


ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 กิโลโวลต์

ผู้จัดทำ

- 
1. นายนิภัทร์ พุ่งสี
 2. นายนิमित พัฒโนทัย
 3. นายบุญสม ละออรัดนศักดิ์
 4. นายปณิธาน ภูมิวิชชเวช



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 กิโลโวลต์

นายนิภัทร์ ทุงดี
นายนิमित พัฒโนทัย
นายบุญสม ละออรัตนศักดิ์
นายปณิธาน ภูมิวิษุเวช
รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นรายงานการออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเซอร์วัดแรงดันกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 กิโลโวลต์ โดยมีองค์ประกอบหลัก แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ภาคแรงสูง ประกอบด้วยตัวเก็บประจួយ่อย แรงสูงขนาดพิกัด 100 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นการนำตัวเก็บประจួយ่อยชนิดโพลีพรอบฟิล์มฟิล์ม มาต่ออนุกรมมีค่าความจุไฟฟ้ารวม 95.82 พิกโคฟารัด แล้วเคลือบด้วยเรซินทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่อพลาสติกใส และทำการฉนวนภายในด้วยน้ำมันหม้อแปลง ภาคแรงต่ำ ประกอบด้วยตัวเก็บประจุนิดเดียวกับภาคแรงสูง มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 67.123 นาโนฟารัด บรรจุอยู่ในกล่องโลหะติดอยู่ที่ฐานตัวเก็บประจุภาคแรงสูง สเกลแฟลคเตอร์ของโวลเตจดีไวเซอร์มีค่า 700 การออกแบบและทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60 (1994)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 จุดประสงค์	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 แผนการดำเนินการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	3
2.1.1 การวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์	3
2.1.2 การวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม	4
2.1.3 การวัดแรงดันด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ	4
2.2 การวัดแรงดันด้วยโวลต์จดีไวเซอร์	5
2.3 วงจรพื้นฐานของระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	5
2.4 คุณสมบัติของระบบวัดแรงดัน	6
2.4.1 ความคลาดเคลื่อน	6
2.4.2 สเกลเฟกเตอร์	7
2.5 โวลต์จดีไวเซอร์วัดแรงดันสูง	7
2.5.1 โวลต์จดีไวเซอร์	7
2.5.2 คะแปซิเตอร์แรงสูง	9
2.5.3 คะแปซิเตอร์ย่อยต่ออันดับ	10
2.6 สเกลเฟกเตอร์	11
2.7 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน	12
2.7.1 สนามไฟฟ้าของทรงกลม – ทรงกลมวางห่างกัน	12
2.7.2 ฉนวนเหลว	13

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	15
3.1 คุณลักษณะที่กำหนด	15
3.2 การออกแบบภาคแรงสูง	15
3.2.1 ความจุไฟฟ้า	15
3.2.2 การคำนวณหาจำนวนตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมด	19
3.2.3 โครงสร้างและการฉนวนของตัวเก็บประจุแรงสูง	19
3.3 การออกแบบภาคแรงต่ำ	21
3.3.1 การเลือกแรงดันขาออก	21
3.3.2 การคำนวณตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	22
3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	23
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.1 บทนำ	28
4.2 การทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ	28
4.3 การทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง	29
4.4 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของตัวเก็บประจุ	31
4.5 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและแพคเตอร์พลังงานสูญเสียของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	32
4.6 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและแพคเตอร์พลังงานสูญเสียของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	32
4.7 การทดสอบหาสเกลแพคเตอร์	33
4.8 การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Comparative Test)	37
4.9 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)	41
4.10 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (withstand voltage test)	43
4.11 การทดสอบวัดแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์	43

บทที่ 5 บทสรุป	47
5.1 สรุปผลการออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุย่อย สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 100 kV	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดข้อมูลของโวลเตจดีไวเคอร์	
ภาคผนวก ข. คู่มือการใช้งาน	
ภาคผนวก ค. รูปการทดสอบโวลเตจดีไวเคอร์	
ภาคผนวก ง. รูปแสดงการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุย่อย	
ภาคผนวก จ. รายละเอียดของตัวเก็บประจุย่อยและคุณสมบัติของ น้ำมันหม้อแปลง	
ภาคผนวก ฉ. มาตรฐานของโวลเตจดีไวเคอร์	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงวงจรการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดีไวเซอร์	5
รูปที่ 2.2 โวลเตจดีไวเซอร์	7
รูปที่ 2.3 โวลเตจดีไวเซอร์แบบกะเปาซีเตอร์	8
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเซอร์แบบกะเปาซีเตอร์ย่อยต่ออันดับ	10
รูปที่ 2.5 ทรงกลมวางห่างกัน	12
รูปที่ 2.6 มุมและแฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก	13
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง(C_{eq})	16
รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก	17
รูปที่ 3.3 โครงสร้างอิเล็กโทรด	23
รูปที่ 3.4 โครงสร้างโวลเตจดีไวเซอร์	24
รูปที่ 3.5 โครงสร้างท่อพลาสติกใส	24
รูปที่ 3.6 โครงสร้างภาคแรงต่ำ	24
รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	25
รูปที่ 3.8 ท่อพลาสติกใส	25
รูปที่ 3.9 อิเล็กโทรดบนและล่าง	26
รูปที่ 3.10 องค์ประกอบภาคแรงต่ำ	26
รูปที่ 3.11 โวลเตจดีไวเซอร์ที่ประกอบเสร็จ	27
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงแรงดันขาเข้าและขาออกของโวลเตจดีไวเซอร์ โดย PSPICE	29
รูปที่ 4.2 ชุดภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง	29
รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ	34
รูปที่ 4.4 วงจรการวัดเปรียบเทียบแรงดัน	38
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ระดับแรงดัน 20 kV _{rms}	39
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ระดับแรงดัน 100 kV _{rms}	40
รูปที่ 4.7 กราฟการทดสอบเปรียบเทียบแรงดัน	41
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ออกแบบวัด ในช่วงแรงดันใช้งาน	42
รูปที่ 4.9 กราฟทดสอบความเป็นเชิงเส้น	43

	หน้า
รูปที่ 4.10 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์ ที่ขนาดแรงดัน 20 kV _{rms}	44
รูปที่ 4.11 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์ ที่ขนาดแรงดัน 50 kV _{rms}	44
รูปที่ 4.12 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์ ที่ขนาดแรงดัน 80 kV _{rms}	45
รูปที่ 4.13 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเคอร์ ที่ขนาดแรงดัน 100 kV _{rms}	45
รูปที่ 4.14 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาเข้าและขาออกของ โวลเตจดีไวเคอร์	46



สารบัญญัตินี้

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันหม้อแปลง	14
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง	30
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ระยะแก๊ป 2.5 mm	30
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตัวเก็บประจุ แบบโพลีพรอปพิลีนฟิล์ม ณ เวลาต่าง ๆ	31
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูง	32
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำ	33
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ	33
ตารางที่ 4.7 การทดสอบวัดแรงดันขาเข้าและขาออกที่ 10 kV	35
ตารางที่ 4.8 การทดสอบวัดแรงดันขาเข้าและขาออกที่ 50 kV	35
ตารางที่ 4.9 การทดสอบวัดแรงดันขาเข้าและขาออกที่ 100 kV	36
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยสเกลแฟคเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์	36
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระดับแรงดัน 20 kV _{rms}	38
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ระดับแรงดัน 100 kV _{rms}	39
ตารางที่ 4.13 การวัดเปรียบเทียบแรงดันที่ระดับแรงดันตลอดช่วงแรงดันใช้งาน	40
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น	42

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบัน การพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมในประเทศ ได้เจริญก้าวหน้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง จะต้องผ่านการทดสอบเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ในการที่จะนำมาติดตั้ง ในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้ เพราะถ้านำไปติดตั้งโดยไม่ผ่านการทดสอบ อาจจะมีข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ผลิตไม่ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำไปติดตั้งแล้วจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ ซึ่งต้องเสียงบประมาณในการซ่อมแซมเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์ให้ได้ตรงตามมาตรฐานก่อนนำไปติดตั้ง แต่เนื่องจากการทดสอบอุปกรณ์แต่ละครั้งนั้นใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก จึงไม่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้านั้นได้โดยตรง ดังนั้นในการวัดแต่ละครั้งจะต้องมีอุปกรณ์เป็นตัวลดทอนลงมาวัด โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศเข้ามาซึ่งมีราคาแพง ในที่นี้จึงได้ทำการวิจัยและพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเซอร์ขึ้นมาใช้เอง ประกอบกับที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ายังไม่มีโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุย่อยกระแสสลับ จึงออกแบบและสร้างเพื่อนำไปใช้งานและให้นักศึกษารุ่นหลังได้ศึกษาและพัฒนาต่อไป

1.1 จุดประสงค์

1. ศึกษาและสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 kV สำหรับแรงดันกระแสสลับ
2. เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
3. เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้ให้สามารถออกแบบและสร้างชิ้นงานได้เองภายในประเทศในอนาคต

1.2 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและทำการออกแบบ เพื่อจัดสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ สำหรับใช้วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดแรงดัน 100 kV_{rms} ในการออกแบบภาคแรงสูงจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีพรอบพิลีนฟิล์มต่ออนุกรมกันวางบนแผ่นอาคริลิกที่ทำเป็นชั้นๆ แล้วจึงเคลือบด้วยเรซิน นำทั้งหมดใส่ในท่อพลาสติกใส โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นตัวช่วยในการระบายความร้อน และเป็นฉนวนภายใน ส่วนภาคแรงต่ำจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดเดียวกับภาคแรงสูง มาต่อขนานกัน

1.3 แผนการดำเนินการ

ภาคเรียนที่ 1

1. ศึกษาทฤษฎีการวัดแรงดันสูงกระแสสลับโดยวิธีของโวลเตจดีไวเดอร์
2. ศึกษาทฤษฎีการเบรคดาวน์และเทคนิคการฉนวน
3. ตรวจสอบวัสดุและอุปกรณ์ที่จะใช้ที่มีในประเทศ
4. ทดสอบแบบจำลองโวลเตจดีไวเดอร์
5. ทดสอบการเบรคดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง
6. ทดสอบการเพิ่มอุณหภูมิของตัวเก็บประจุเมื่อป้อนแรงดันที่พิกัดใช้งาน
7. ออกแบบภาคแรงดันสูง
8. ออกแบบภาคแรงดันต่ำ

ภาคเรียนที่ 2

9. ออกแบบโครงสร้างทั้งหมด
10. สร้างภาคแรงดันสูง
11. สร้างภาคแรงดันต่ำ
12. ประกอบโครงสร้างทั้งหมด
13. ทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)
14. ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสสถิตย์

การวัดแรงดันสูงกระแสสถิตย์ในห้องปฏิบัติการอาจวัดได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้ คือ

1) โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันสูงแบบอิเล็กโตรสแตติกส์ (High-Voltage Electrostatics Voltmeter)

2) ช่องว่างทรงกลม (Sphere gap)

3) อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (Series impedance)

4) โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage divider)

2.1.1 การวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กโตรสแตติกส์

หลักการวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กโตรสแตติกส์ โดยจะอาศัยผลการเกิดแรงจากสนามไฟฟ้า (Electric field) ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่นที่วางขนานกัน โดยทำขอบของอิเล็กโตรดให้มีลักษณะที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเท่ากันตลอดหน้าแผ่นโลหะ แรงที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$|F| = \frac{\epsilon A}{2S^2} (U_{rms})^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ F คือแรงดึงดูดระหว่างแผ่นระนาบ (นิวตัน)

ϵ คือเปอร์มิตติวิตีของฉนวนระหว่างแผ่นระนาบ (ฟารัดต่อเมตร)

A คือพื้นที่แผ่นระนาบ (ตารางเมตร)

D คือระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบ (เซนติเมตร)

S คือระยะแคบที่ขนานกับอิเล็กโตรด (เมตร)

U_{rms} คือแรงดันทดสอบ (โวลต์)

การวัดแรงดันสูงด้วยอิเล็กโตรสแตติกส์โวลต์มิเตอร์เป็นการวัดแรงดึงดูดระหว่างแผ่นระนาบ ซึ่งเป็นวิธีวัดค่าสัมบูรณ์ (Absolute value) แรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยมาก ฉะนั้นการวัดแรงดันสูงต้องใช้อิเล็กโตรสแตติกส์ที่มีพื้นที่กว้าง ๆ เพื่อให้ได้แรงมากพอที่จะวัด เมื่อด้านหนึ่งของอิเล็กโตรดเคลื่อนที่ได้ แรงที่กระทำบนอิเล็กโตรดก็สามารถวัดได้โดยวัดการยืดของสปริง ในการวัดแรงดันสูงนั้นส่วนที่เคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยก็สามารถวัดขนาดแรงดันได้ เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกำลังสองของแรงดันที่ป้อนระหว่างแผ่นระนาบจึงเป็นการวัดค่า r.m.s. ถ้ามีตัวชี้สำหรับอ่านค่าแรงดันโดยตรงต้องมีการแบ่งเทียบมาตรฐาน (Calibration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดแรงดันอิเล็กทรอนิกส์โวลต์มิเตอร์ มีคุณลักษณะสมบัติดังนี้

1. ย่านวัดแรงดัน : ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบ
2. แรงดันที่วัด : วัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ความถูกต้องเที่ยงตรง : อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1% จนถึง 1.0%
4. ย่านความถี่ของแรงดันที่วัด : วัดแรงดันในย่านความถี่สูงได้ถึงย่าน MHz

ในทางปฏิบัติโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถใช้วัดแรงดันได้สูงถึง 500 kVac และ 600 kVdc ซึ่งพลังงานที่ใช้มีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เพราะมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงมาก ($R_i \gg 10^{13}$ โอห์ม, คาปาซิแตนซ์ 5 ถึง 50 pF) จึงทำให้ดึงกระแสจากแหล่งที่วัดแรงดันน้อยมาก

2.1.2 การวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม

เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีตัวชี้ คือไม่ทราบว่าจะขณะนี้แรงดันที่ป้อนเข้าไปนั้นมีค่าเท่าใด แต่อาศัยการเกิดสปาร์คหรือการเกิดเบรคดาวนระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศหรือก๊าซ การวัดแรงดันโดยใช้ช่องว่างทรงกลมมีลักษณะสมบัติดังนี้คือ

1. ใช้วัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์
2. มีความถูกต้องเที่ยงตรง 3%
3. เป็นอุปกรณ์วัดที่ไม่มีตัวชี้ จะสังเกตได้จากการเกิดสปาร์คหรือเบรคดาวน
4. เป็นการวัดค่ายอดเท่านั้น
5. ค่าที่ถูกต้องได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง (ประมาณ 10-15 ครั้ง)

2.1.3 การวัดแรงดันด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ

การวัดแรงดันด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับเป็นการวัดกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่ทราบค่าด้วยแอมป์มิเตอร์ แล้วคำนวณหาค่าแรงดันที่ต้องการวัดได้เท่ากับผลคูณของกระแสและค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออันดับ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ต่อโดยตรงกับแรงดันสูงจึงต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูง ความถูกต้องเที่ยงตรงขึ้นอยู่กับแอมป์มิเตอร์และความคงตัวของอิมพีแดนซ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Low resistance temperature coefficient) ปราศจากโคโรน่าและกระแสรั่วตามผิวของฉนวนรองรับต่อน้อยที่สุด การวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับไม่นิยมใช้วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแต่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะวัดด้วยตัวเก็บประจุมากกว่า

อิมพีแดนซ์ต่ออันดับที่สร้างขึ้นใช้งานโดยทั่วไป จำแนกได้ดังนี้

1. ตัวต้านทานต่ออันดับ (High ohmic series resistors)
2. ตัวเก็บประจุต่ออันดับวัดค่าอาร์เอ็มเอส (Series capacitors)
3. ตัวเก็บประจุต่ออันดับวัดค่ายอด (Chubb-Fortescue method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การวัดแรงดันด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

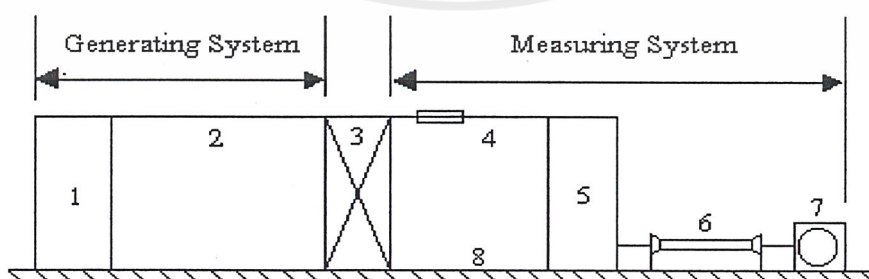
โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูง ๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลมิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำ ๆ วัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงดันสูงต่อเข้ากับแรงดันที่ต้องการวัด แล้วแบ่งทอนเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เปลี่ยน โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมักใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรงและใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับได้ไม่เกิน 20-30 กิโลโวลต์ ดังนั้นในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับจึงนิยมใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้งานโดยทั่วไป จำแนกตามองค์ประกอบของวงจรที่ใช้ดังต่อไปนี้ คือ

- 1) โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (Resistor voltage divider)
- 2) โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitor voltage divider)
- 3) โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม (Mixed voltage divider)
- 4) โวลเตจดีไวเดอร์แบบมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitive voltage divider)

2.3 วงจรพื้นฐานของระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรพื้นฐานสำหรับทดสอบวัสดุฉนวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ 2 ส่วน คือระบบจ่ายแรงดันโดยเริ่มจากหม้อแปลงทดสอบแรงดันโดยผ่านสายนำแรงดันไปยังวัสดุทดสอบ ในส่วนของระบบวัดแรงดันโดยจะเริ่มจากจุดต่อระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุไปจนถึงอุปกรณ์วัดแรงดันกระแสสลับ โดยที่วงจรการทดสอบอุปกรณ์ฉนวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะแสดงดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

- เมื่อ
- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1.คือหม้อแปลง | 2.คือสายนำแรงสูง |
| 3.คือวัสดุทดสอบ | 4. คือสายต่อไปยังตัวแบ่งแรงดัน |
| 5.คือโวลเตจคิไวเคอร์ | 6.คือสายเคเบิล |
| 7.คือเครื่องวัดแรงดันกระแสสลับ | 8.คือระบบสายดิน |

ในระบบวัดแรงดันจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ซึ่งมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.สายนำแรงสูงที่อยู่ระหว่างวัสดุทดสอบ โดยทั่วไปจะมีความยาวเท่ากับความสูงของตัวเก็บประจุแรงสูง เพื่อให้ผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อตัวเก็บประจุแรงสูงลดลง สายนำแรงสูงต้องมีขนาดโคพอกที่จะไม่เกิดโคโรน่าซึ่งเป็นคลื่นรบกวนของระบบวัดแรงดันและสายนำแรงสูงจะต้องไม่ยาวเกินไปจนทำให้เกิดความล่าช้าของสัญญาณมากเกินไป

2.สายเคเบิลวัด จะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ปลายขาออกของตัวเก็บประจุแรงสูงมายังอุปกรณ์วัดแรงดันกระแสสลับ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและลดสัญญาณรบกวนที่มีต่อเครื่องวัดกระแสสลับ สายเคเบิลที่ใช้จะเป็นแบบโคแอกเซียล (Coaxial cable)

3.เครื่องวัดแรงดันกระแสสลับ ซึ่งจะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นก็จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมาก ๆ

4.สายดิน ทำหน้าที่เชื่อมโยงจุดต่อลงดินของอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในระบบทดสอบให้มีศักดาไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีความเหนียวนำต่ำเพื่อลดแรงดันตกในสายดินให้น้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบางขนาดใหญ่ปูบนพื้นห้องทดสอบ เช่นทองแดงแผ่นบาง

2.4 คุณสมบัติของระบบวัดแรงดัน

การวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าหากค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากเท่าใดก็แสดงว่าระบบนั้นมีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูง แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะใช้ระบบวัดที่มีประสิทธิภาพดีเยี่ยมขนาดไหนก็ไม่จำเป็นว่าค่าที่วัดได้จะตรงกับค่าจริงเสมอไป ดังนั้นเพื่อให้ผลการวัดแรงดันมีความถูกต้องและใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด ระบบวัดจะต้องมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดไว้ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญคือ

2.4.1 ความคลาดเคลื่อน

ในการทดสอบวัดแรงดันที่ใช้ระยะเวลาการจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบอยู่ในช่วงเวลา 60 วินาทีค่าของแรงดันทดสอบที่ถูกวัดได้ต้องรักษาระดับแรงดันให้อยู่ภายใน $\pm 1\%$ ของระดับแรงดันทดสอบที่กำหนด สำหรับการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาการจ่ายแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ

มากกว่า 60 วินาทีค่าของแรงดันที่วัดได้จะต้องรักษาระดับแรงดันให้อยู่ภายใน $\pm 3\%$ ของระดับแรงดันทดสอบ

2.4.2 สเกลแฟกเตอร์

สเกลแฟกเตอร์เป็นตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่ได้จากเครื่องมือวัดเพื่อหาค่าแรงดันที่ถูกต้องซึ่งมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการคือ

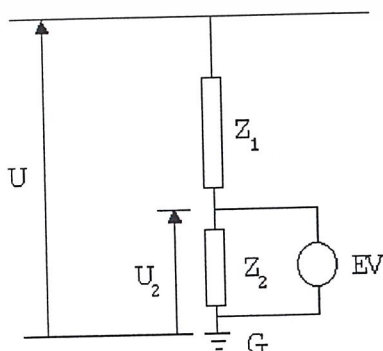
1) ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการวัดค่ายอดหรือค่า rms. ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทดสอบ จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดหรือค่า rms. ไม่เกิน ± 3

2) ความมีเสถียรภาพ (Stability) ในการวัดค่ายอดแรงดันไฟฟ้าเสถียรภาพของ สเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$

2.5 โวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูง

2.5.1 โวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลมิเตอร์ หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำ วัดโดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัดแล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ฉะนั้นโวลเตจดีไวเดอร์ จึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่ออยู่กับสายแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำ อีกข้างหนึ่งมักจะต่อกับดิน ตรงรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำนี้เองจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงดันต่ำ โวลมิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำที่จะนำมาต่อเข้ากับดีไวเดอร์นี้จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นคือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ เช่น อิเล็กโทรสแตติกส์โวลมิเตอร์ กล่าวคือ อิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ของดีไวเดอร์ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.2 โวลเตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูง

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

U คือ แรงดันที่ต้องการวัด

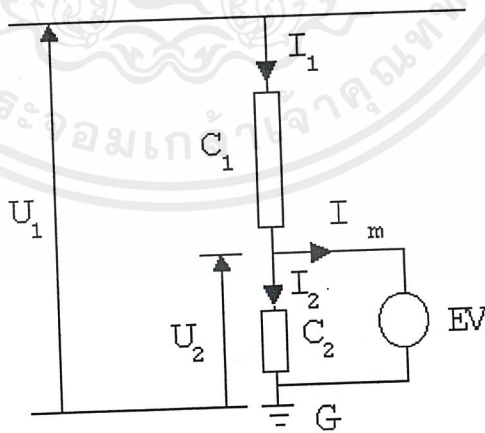
U_2 คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด ซึ่งเป็นแรงดันภาคแรงดันต่ำ

EV คือ เครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางขาเข้าสูง

เมื่อวัด U_2 ด้วยเครื่องมือวัดจึงคำนวณหาแรงดันที่ต้องการวัด ได้จากสมการความสัมพันธ์

$$U = \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \right) U_2 \tag{2.2}$$

การวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์จีโอไดโอด ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะหมดไป เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 เป็นวัตถุหรือสารประเภทเดียวกัน ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่งก็คือองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อนของอิมพีแดนซ์ที่ใช้ทำโวลต์จีโอไดโอดอาจเป็นความต้านทานหรือคัปเปซิเตอร์ก็ได้ แบบความต้านทานใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง และใช้วัดแรงดันกระแสสลับได้ในย่านยี่สิบถึงสามสิบ กิโลโวลต์ ส่วนการวัดแรงดันกระแสสลับด้วยโวลต์จีโอไดโอดจะนิยมใช้แบบคัปเปซิเตอร์เป็นเครื่องมือวัด โวลต์จีโอไดโอดแบบคัปเปซิเตอร์วัดแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 2.3 โวลต์จีโอไดโอดแบบคัปเปซิเตอร์

โวลเตจคิวเตอร์แบบคัปเปซิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วย

C_1 คือ คัปเปซิเตอร์ภาคแรงสูง

C_2 คือ คัปเปซิเตอร์ภาคแรงต่ำ

โดยหลักการแล้วกระแสที่เข้าเครื่องวัด นั้นต้องมีค่าน้อยมากเกือบๆ ศูนย์ [1]
นั่นคือ กระแสไหลผ่านคัปเปซิเตอร์ภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากัน คือ

$$I_1 = \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad (2.3)$$

$$I_2 = \omega C_2 U_2 = I_1 \quad \text{เมื่อ } I_m \cong 0 \quad (2.4)$$

ฉะนั้น

$$U_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2 \quad \text{เมื่อ } C_2 \gg C_1 \quad \text{-----} \quad U_1 \approx \frac{C_2}{C_1} U_2 \quad (2.5)$$

2.5.2 คัปเปซิเตอร์แรงสูง

คัปเปซิเตอร์แรงสูงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปมีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือคัปเปซิเตอร์ก๊าซอัดความดัน และ คัปเปซิเตอร์ข้อยต่ออันดับ

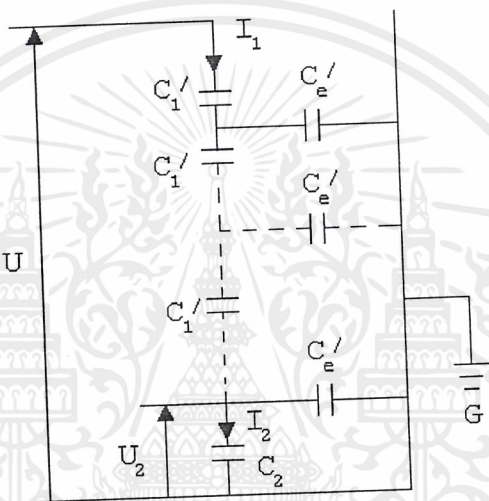
คัปเปซิเตอร์ก๊าซอัดความดัน (Compressed Gas Capacitor)

คัปเปซิเตอร์แรงสูงแบบอัดความดันนี้ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial Cylinder Configuration) เพื่อให้มีขนาดเล็กๆ แต่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนด้วยก๊าซอัดความดันสูง ก๊าซที่นิยมใช้กันได้แก่ N_2 , CO_2 ที่ความดัน 10-20 บาร์ หรือก๊าซ SF_6 ที่ความดันในช่วงประมาณ 1-3 บาร์

ข้อดีของคัปเปซิเตอร์แบบก๊าซอัดความดันก็คือมีค่าพลังงานสูญเสียเปล่าต่ำ (Loss Factor) $t_g \delta$ ต่ำ คือ น้อยกว่า 10^{-5} และโดยที่ใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมเป็นภาคแรงสูงทางด้านแรงสูงก็ใส่แหวนเกราะ (Shielding Ring) จึงทำให้ไม่มีสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอก

2.5.3 คะเปซิเตอร์ย่อยต่ออันดับ

กะเปซิเตอร์แรงสูงชนิดนี้ได้จากการเอากะเปซิเตอร์ประเภทเซรามิกซ์หรือกะเปซิเตอร์กระดาษชุบน้ำมันจนวนจำนวนหลายๆ ตัวมาต่ออันดับกันในลักษณะนี้ย่อมมีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดของกะเปซิเตอร์ย่อยแต่ละตัวกับสิ่งหุ้มล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนที่ต่อลงดิน จึงมีกะเปซิเตอร์กับดินซึ่งจะตัดทิ้งไม่นำมาคิดไม่ได้ดังรูปที่ 2.4 แสดงถึงวงจรสมมูลของกะเปซิเตอร์ย่อยแรงสูง C'_1 กับ กะเปซิเตอร์ลงดินย่อย C'_e



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของ โวลเตจดีไวเคอร์แบบกะเปซิเตอร์ย่อยต่ออันดับ

- เมื่อ C'_1 คือ กะเปซิเตอร์ย่อยแรงสูง
- C_2 คือ กะเปซิเตอร์แรงต่ำ
- C'_e คือ กะเปซิเตอร์ย่อยลงดิน

การหาค่ากะเปซิเตอร์แรงสูงรวม C_1 จะคำนวณจากกะเปซิเตอร์ย่อย C'_1 โดยตรงไม่ได้ แต่อาจคำนวณได้จากกระแส I_2 ที่ไหลผ่านกะเปซิเตอร์แรงต่ำ C_2 ที่มีแรงดันคร่อมดังนั้น กะเปซิเตอร์ผลรวมจะหาได้จากความสัมพันธ์

$$I_2 = \omega C_1 U_1 \tag{2.6}$$

ดังนั้นอัตราส่วนแรงดันต่ำต่อแรงดันสูงจะหาได้จากสมการ

$$\frac{U_2}{U} = \frac{n}{N} \left[1 - \frac{C_e}{6C_1} \right] = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 - \frac{C_e}{6C_1} \right] \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ จำนวนกะเปซิเตอร์ย่อย

N คือ จำนวนกะเปซิเตอร์แรงสูงต่ออันดับ

$$C_1 = C'_1 / N \quad (2.8)$$

$$C_e = N C'_e \quad (2.9)$$

ค่ายังผลของกะเปซิเตอร์ชนิดรวมทั้งหมด C_e ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของโวลเตจดีไวเซอร์ และสภาพแวดล้อมฝาผนัง ในทางปฏิบัติสามารถความผิดพลาดให้น้อยลงได้โดยทำให้ค่า C_e/C_1 มีค่าน้อยลง นั่นคือทำให้กะเปซิเตอร์ C_1 มีค่าสูงขึ้น ปกติค่า C_1 ที่เหมาะสมควรมีค่าประมาณ 10 pF ถึง 40 pF ต่อเมตรของความสูง [1]

2.6 สเกลแฟกเตอร์

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [3] ได้นิยามไว้ดังนี้ "สเกลแฟกเตอร์ หมายถึงตัวประกอบที่นำไปคูณจากค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัด แล้วนำผลของการคูณที่ได้ไปหาค่าแรงดันป้อนเข้า"

มาตรฐาน ได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญไว้ 2 ประการ คือ

1) ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการวัดค่ายอดหรือค่า rms. ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทดสอบ จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดหรือค่า rms. ไม่เกิน $\pm 3\%$

2) ความมีเสถียรภาพ (Stability) ในการวัดค่ายอดแรงดันไฟฟ้าเสถียรภาพของสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$

สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเซอร์แบบใด ๆ อาจหาด้วยวิธีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด
- 2) เทียบกับโวลเตจดีไวเซอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันที่แน่นอนแล้ว
- 3) การวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อม ๆ กัน

วิธีการคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าแน่นอนเหมาะสำหรับหาอัตราส่วนในทางทฤษฎีอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงได้ ส่วนการหาสเกลแฟกเตอร์โดยเทียบกับโวลเตจดีไวเซอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้วซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ โดยทั้งสองวิธีนี้ใช้ได้สำหรับโวลเตจดีไวเซอร์ทุกแบบ

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์ที่ได้จากการทดลองนั้น ถ้าทำการทดลองในสถานที่ต่าง ๆ กัน ค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันที่ได้อาจมีค่าแตกต่างกันไป เพราะค่าความจุสเตรลงดินของโวลเตจดีไวเซอร์ที่เกิดขึ้นจะมีผลกับค่าอัตราส่วนแรงดัน เพราะฉะนั้นการหาค่าอัตราส่วน

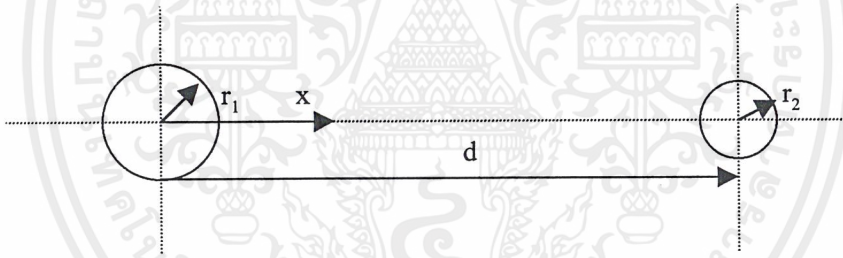
แรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งที่จะติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ในการใช้งานจริง

2.7 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ การออกแบบการฉนวนให้ดีต้องรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้า ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะสมบัติของฉนวน พิกัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้ากำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดการสปาร์ค วาบไฟหรือเบรคดาวผ่านฉนวนซึ่งฉนวนที่เป็นของแข็งจะเสียสภาพการเป็นฉนวนหลังจากเกิดเบรคดาว ส่วนฉนวนเหลวจะกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนดังเดิม

2.7.1 สนามไฟฟ้าของทรงกลม – ทรงกลมวางห่างกัน

ถ้ามีทรงกลมสองลูกรัศมี r_1 และ r_2 วางห่างกันมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ทรงกลมวางห่างกัน

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองคือแนว x เขียนได้ว่า

$$E \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(d-x)^2} \right] = \frac{V \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(d-x)^2} \right]}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2}{d}} \quad (2.10)$$

และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเกิดที่ผิวทรงกลม ($x=r_2$) คือ

$$E_{\max} \approx \left[\frac{Q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{(d-r_2)^2} \right] = \frac{V \left[\frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{(d-r_2)^2} \right]}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2}{d}} \quad (2.11)$$

เมื่อ E_{\max} คือความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

E คือความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

V คือความต่างศักย์

r_1 คือรัศมีอิเล็กโตรดตัวที่ 1

r_2 คือรัศมีอิเล็กโตรดตัวที่ 2

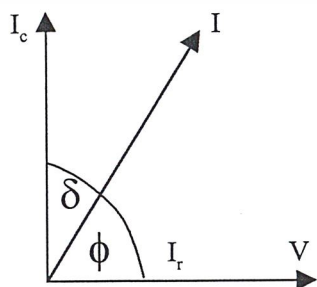
d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

การที่เลือกใช้สูตร E_{\max} เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเป็นการนำตัวเก็บประจุย่อยมาต่ออนุกรมกันจำนวนมาก และต้องเกิดการเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุย่อยจึงทำให้ต้องมีการบัดกรีเกิดขึ้น ซึ่งจุดบัดกรีนี้เองจะเป็นตัวทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จึงต้องพยายามให้จุดบัดกรีมีลักษณะกลมและหลีกเลี่ยงจุดแหลมคม เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าให้น้อยลง

2.7.2 ฉนวนเหลว

ของเหลวใด ๆ สามารถนำมาเป็นฉนวนได้ทั้งนั้น ถ้าหากว่าของเหลวนั้นมีความต้านทานสูงมากพอและไม่เปลี่ยนแปลงสภาพทางฟิสิกส์ในช่วงเวลาที่นานพอสมควร ซึ่งฉนวนเหลวที่นำมาใช้เป็นฉนวนภายในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะเป็นประเภทน้ำมันไฮโดคาร์บอน เช่น น้ำมันปิโตรเลียม (น้ำมันหม้อแปลง) ลักษณะที่ต้องการของฉนวนเหลวสำหรับการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ [1]

- 1) ความถ่วงจำเพาะ
- 2) จุดติดไฟ (จุดติดไฟหมายถึงโอกาสเกิดไฟไหม้ข้อมมีน้อย)
- 3) ความหนืด (ความหนืดต่ำหมายถึงมีการระบายความร้อนได้ดี)
- 4) ความเป็นกรด (แสดงถึงปริมาณที่เป็นส่วนผสมอยู่ในของเหลว)
- 5) แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า ($\tan \delta$)



รูปที่ 2.6 มุมและแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติ	น้ำมันหม้อแปลง
ความถ่วงจำเพาะ g/cm^3	0.9
จุดติดไฟ $^{\circ}C$	130-180
สภาพนำความร้อน $mW/cm^{\circ}C$	1.6
ความต้านทานจำเพาะ $ohm-cm$ ที่ $85^{\circ}C$	100×10^{12}
แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่ $80^{\circ}C, 50Hz$	10×10^{-4}
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตาม IEC standard ที่ $20^{\circ}C, kV/cm$	10-25
เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ϵ_2 (50Hz)	2-25
ความชื้นที่ยอมให้มีได้สูงสุด (ppm)	50
การขยายตัว ($20-100^{\circ}C$)	$7 \times 10^{-4}/^{\circ}C$
ผลแตกตัวขององค์ประกอบเมื่อเกิดอาร์คไฟ	ไฮโดรเจน, อะเซททีลีน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันหม้อแปลง

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

3.1 คุณสมบัติที่กำหนด

คุณลักษณะสมบัติที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบและสร้างขึ้นนี้จะเป็นโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุขนาดพิกัด 100 กิโลโวลต์ ในการออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำการออกแบบและสร้างส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วนคือ องค์ประกอบภาคแรงสูง และองค์ประกอบภาคแรงต่ำ โดยผ่านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการหาค่าแรงดันผ่านภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งในส่วนนี้จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าแรงดันลดน้อยลงเพื่อส่งผ่านแรงดันที่ได้ไปยังภาคแรงต่ำ ให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าได้ เช่น ออสซิลโลสโคป หรือโวลต์มิเตอร์ เป็นต้น

3.2 การออกแบบภาคแรงสูง

3.2.1 ความจุไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุแรงสูงที่ออกแบบและสร้างประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยจำนวนมากต่ออนุกรมกันอยู่เพื่อให้ได้ค่าเก็บประจุและสามารถทนแรงดันได้ตามต้องการ ในการออกแบบเพื่อความปลอดภัยและป้องกันโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อมีการจ่ายแรงดันเกินพิกัดของโวลเตจดีไวเดอร์ จึงได้ออกแบบให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสามารถทนแรงดันได้ 150% ของแรงดันพิกัด โวลเตจดีไวเดอร์ โดยที่ตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัวมีความจุไฟฟ้าเท่ากับ C' และทนแรงดันได้เท่ากับ U' ฉะนั้นเมื่อนำตัวเก็บประจุย่อยจำนวน n ตัว มาต่ออนุกรมหรือขนานกันจะได้ค่าความจุไฟฟ้าและค่าพิกัดแรงดันซึ่งหาได้จากสมการ [1]

เมื่อต่ออนุกรมจะได้

$$C_s = C' / n \quad (3.1)$$

$$U_s = nU' \quad (3.2)$$

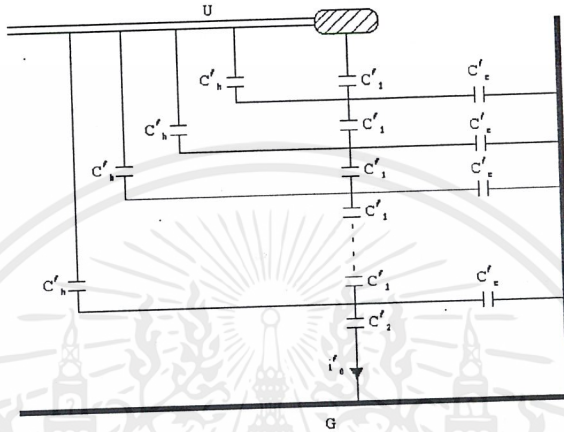
เมื่อต่อขนานจะได้

$$C_p = nC' \quad (3.3)$$

$$U_p = U' \quad (3.4)$$

ความจุสเตรลงดิน

ตัวเก็บประจุแรงสูงเป็นแบบตัวเก็บประจួយมาต่ออันดับ การต่อในลักษณะนี้ย่อมมีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดของตัวเก็บประจួយแต่ละตัวกับสิ่งห้อมล้อม โดยเฉพาะส่วนที่ต่อลงดิน ทำให้มีเคแปซิแตนซ์กับดินซึ่งจะตัดทิ้งไม่นำมาคิดไม่ได้ เพราะฉะนั้นความจุสเตรลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ค่าที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของตัวเก็บ



ประจุแรงสูง เมื่อนำตัวเก็บประจួយต่ออันดับมาบรรจุอยู่ในท่อพลาสติกใส ก็สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก

รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง (C_{eq})

ในสถานะคงตัว สามารถหาค่าเก็บประจุสมมูล (Equivalent Capacitance) (C_{eq}) ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จากสมการ [4]

$$C_{eq} = \frac{I_0}{\omega U} \tag{3.5}$$

$$C_{eq} = C \frac{1 + \frac{C_h}{4C}}{1 + \frac{C_e}{6C} + \frac{C_h}{12C}} \tag{3.6}$$

เมื่อ $C = C'/n$; $C_e = nC'_e$; $C_h = nC'_h$; $n \gg 1$

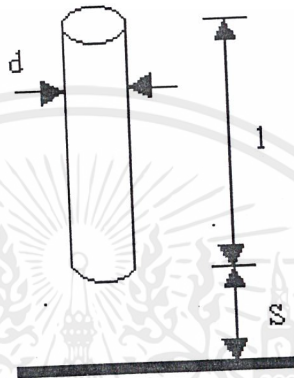
I_0 คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโวลเตจดีไวเดอร์

เนื่องจากโดยทั่วไปค่า C_h จะมีค่าน้อยกว่า C_e มาก [4] ดังนั้น C_{eq} จึงมีค่าน้อยกว่า C เสมอ และถ้าให้ $C_h = 0$ (C_h มีค่าน้อยมาก ๆ) จะสามารถประมาณ C_{eq} ได้เป็น

$$C_{eq} \approx C \frac{1}{1 + \frac{C_e}{6C}} \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{eq} \approx C \left(1 - \frac{C_e}{6C} \right) \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก โดยค่า C_e สามารถหาได้จากการคำนวณ โดยสมมติให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบดังในรูป ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าตัวเก็บประจุคือ[4]

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{(2l)}{d} \sqrt{\frac{(4s+l)}{(4s+3l)}} \right]} \quad (3.9)$$

- เมื่อ C_e คือ ความจุสเตรลงดิน (ฟารัด)
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อพลาสติกใส (เมตร)
- l คือ ความยาวท่อ (เมตร)
- s คือ อิเล็กโตรดล่างเหนือพื้นดิน (เมตร)
- ϵ คือ เปรอริมิตติวิตี้ของตัวกลาง $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ (ฟารัด/เมตร)
- ϵ_0 คือ ค่าเปรอริมิตติวิตี้ของสูญญากาศ 8.854×10^{-12} (ฟารัด/เมตร)
- ϵ_r คือ ค่าเปรอริมิตติวิตี้ของอากาศ ($\epsilon_r = 1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบระยวาวไฟตามผิวนวนสำหรับแรงดันกระแสสลับ ต้องมีค่าเท่ากับ 5m/MV หรือ 2kV/cm เป็นอย่างต่ำ [1] ตัวเก็บประจุแรงสูงที่ออกแบบสร้างมีพิกัดแรงดัน 100kVrms ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดวาวไฟตามผิว ระยะความสูงปลอดภัยของท่อพลาสติกใส เท่ากับ 50 cm หรือ 0.5 m เป็นอย่างต่ำเมื่อต่อตัวเก็บประจุย่อยต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างตัวเก็บประจุย่อยต่อการเกิดเบรคดาวน้และคำนึงถึงความชื้น เพื่อความปลอดภัยจึงออกแบบระยวาวนวนเพื่อ 125% จะได้ความสูงเท่ากับอย่างน้อยเท่ากับ 0.625 m

เพื่อระยะยี่คิเลค โตรคบนและล่างข้างละ	0.015 เมตร
ดังนั้น รวมความสูงของท่อ พลาสติกใส โดยประมาณ (l) เท่ากับ	0.656 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลาง (d)	0.152 เมตร
ความสูงอิเลค โตรคล่างเหนือพื้นดิน (s)เท่ากับ	0.20 เมตร
เมื่อแทนค่าลงในสมการ	

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

$$= \frac{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 0.656}{\ln \left[\frac{2 \times 0.656}{0.152} \sqrt{\frac{4(0.2) + 0.656}{4(0.2) + 3(0.656)}} \right]}$$

$$= 19.86 \text{ pF}$$

ความจุสเตรลงคินมีผลต่อโวลเตจดีไวเคอร์ ดังนี้คือ [1]

- 1) ทำให้การกระจายแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์ไม่เป็นเชิงเส้น
 - 2) ทำให้ค่าอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์ขึ้นอยู่กับความถี่
 - 3) ค่าความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูงจะคลาดเคลื่อนจากการคำนวณทางทฤษฎี
- ค่าความจุไฟฟ้าของภาคแรงสูงสามารถเลือกได้ตามเงื่อนไขต่อไปนี้คือ

1) จิตจำกัคค่า ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงต้องมากพอที่จะทำให้ค่าความจุสเตรลงคิน มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลเตจดีไวเคอร์ควรเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆกัน มิฉะนั้นอาจทำให้เกิดการเบรคดาวน้หรือวาวไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจุย่อยได้

2) จิตจำกัคคบน ค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงต้องไม่มากจนทำให้โวลเตจดีไวเคอร์ กลาย

เป็น โหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ เพราะว่าถ้าค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงมีค่ามากเกินไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์จะมีค่าต่ำลง จะทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับจ่ายกระแสให้โวลเตจดีไวเดอร์มากขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด

3.2.2 การคำนวณหาจำนวนตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมด

ตัวเก็บประจุแรงสูงที่ออกแบบและสร้างประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยชนิดโพลีพรอปพิลีนฟิล์ม (Polypropylene Film) พิกัดของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัวมีขนาดความจุ $0.022 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดันเท่ากับ $650 \text{ V}_{\text{rms}}$ ในการออกแบบเพื่อความปลอดภัยและป้องกันโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อมีการจ่ายแรงดันเกินพิกัดของโวลเตจดีไวเดอร์ จึงได้ออกแบบให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสามารถทนแรงดันได้ 150% ของแรงดันพิกัด โวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 กิโลโวลต์

ดังนั้น ต้องใช้ตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมทั้งหมดเท่ากับ

$$150 \text{ kV}_{\text{rms}} / 650 \text{ V}_{\text{rms}} = 230.77 \text{ ตัว}$$

$$n \approx 231 \text{ ตัว}$$

ค่าความจุไฟฟ้ารวมของภาคแรงสูง (C_1) เท่ากับ

$$\begin{aligned} C_1 &= C'/n \\ &= 0.022 \mu\text{F}/231 \\ &= 95.24 \text{ pF} \end{aligned}$$

3.2.3 โครงสร้างและการคำนวณของตัวเก็บประจุแรงสูง

การจัดวางตัวเก็บประจุย่อยจำนวน 231 ตัวนี้ทำโดยใช้แผ่นอะคริลิกมีขนาดความหนา 1.27 เซนติเมตร มาตัดเป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้วจำนวน 21 แผ่น จากนั้นทำการเจาะรูตรงกลางแผ่นอะคริลิกเพื่อให้สามารถใส่แท่งอะคริลิกใสเป็นแกนกลางยึดแผ่นอะคริลิกทั้ง 21 แผ่น ระหว่างชั้นแผ่นอะคริลิกใช้ท่อใสความยาว 3 เซนติเมตร สวมลงในแท่งอะคริลิกเพื่อเป็นตัวคั่นระหว่างชั้นอะคริลิก

ในแต่ละชั้นจะมีการต่อตัวเก็บประจุย่อยชั้นละ 11 ตัว ซึ่งจะต่ออนุกรมกันเป็นลักษณะโค้งวงกลมโดยรัศมีมีความโค้งเท่ากับรัศมีความโค้งของแผ่นอะคริลิก หลังจากนั้นนำตัวเก็บประจุที่ต่อเสร็จแล้วไปหล่อเคลือบด้วยเรซิน โดยให้เหลือปลายทั้งสองด้านของตัวเก็บประจุตัวแรกและตัวสุดท้าย เพื่อไว้เชื่อมต่อกับชั้นต่อไป การเคลือบด้วยเรซินเพื่อป้องกันการซึมเข้าไปยังตัวเก็บประจุของน้ำมันหม้อแปลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนไปและอายุการใช้งานจะสั้นลง

ในการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยบนแผ่นอะคริลิกต้องมีการบัดกรี ซึ่งจุดบัดกรีนี้เองที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นควรที่จะเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยโดยให้จุดบัดกรีมีลักษณะกลมและหลีกเลี่ยงที่แหลมคม ตัวเก็บประจุย่อยที่ต่อเสร็จแล้วทั้ง 21 ชั้นทำการเชื่อมต่อแต่ละชั้นด้วยเส้น

ลวดตัวนำ แล้วนำตัวเก็บประจุย่อยทั้ง 21 ชั้นมาบรรจุอยู่ในท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และยึดหัวท้ายด้วยอะลูมิเนียมกลึงเป็นฝาปิดท่อและทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุด้วย และทำการฉนวนภายในด้วยน้ำมันหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องมีชนิดอย่างกันตรงรอยต่อหน้าแปลนด้านบนและด้านล่าง

การคำนวณระยะระหว่างชั้น

เพื่อป้องกันการเกิดเบรคดาวระหว่างชั้นจึงต้องคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดบดกรีระหว่างชั้นแล้วนำมาคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นที่ปลอดภัย

พิกัดแรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัวทนได้เท่ากับ $650 \text{ V}_{\text{rms}}$

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างชั้น เท่ากับ $650 \text{ V}_{\text{rms}} \times 11 \times \sqrt{2} \times 2$
 20.22 kV_p

ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้มีค่า (E_p) $38 \text{ kV}_p/\text{cm}$

ดังนั้นระยะห่างระหว่างชั้นอย่างต่ำ 0.5 เซนติเมตร

แต่เพื่อความปลอดภัยจึงออกแบบที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเพราะว่าผลของค่าเก็บประจุสเตรลงดินโดยตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดมีแรงดันตกคร่อมมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดันเมื่อตัวเก็บประจุแรงสูงนี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ โดยจะพิจารณาในกรณีเกิดแรงดันตกคร่อมมากที่สุด

เมื่อ U_k คือ แรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย k เทียบกับดิน

$$U_k = \frac{U}{C'_e + C'_h} \left[\frac{C'_e \sinh\left(\frac{\alpha k}{n}\right)}{\sinh \alpha} + C'_h \frac{\left(1 - \sinh \alpha \left(n - \frac{k}{n}\right)\right)}{\sinh \alpha} \right] \quad (3.10)$$

โดยที่

เมื่อ C'_h คือ ความจุระหว่างตัวเก็บประจุย่อยกับตัวอิเล็กโทรดแต่ละชั้น (ฟารัด)

C'_e คือ ค่าความจุระหว่างตัวเก็บประจุย่อยกับดินแต่ละชั้น (ฟารัด)

C' คือ ความจุแต่ละชั้น (ฟารัด)

k คือ ตัวเก็บประจุย่อยชั้นบนสุด ($k=1$)

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C'_e + C'_h)}{C'}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $U = 100 \text{ kV}_{\text{rms}}$, $C'_1 = 0.022 \mu\text{F}$, $C'_c = 0.085 \text{ pF}$, $C'_h = 0$, $n = 231$; $k = 1$ (ตัวบนสุด)

$$\alpha = \sqrt{\frac{0.085 \text{ pF}}{95.24 \text{ pF}}} = 3.004 \times 10^{-2}$$

เมื่อแทนค่าในสมการ

$$U_k = \frac{100 \text{ kV}}{0.085 \text{ pF}} \left[\frac{0.085 \text{ pF} \sinh(3.004 \times 10^{-2} / 231)}{\sinh 3.004 \times 10^{-2}} \right]$$

$$= 432.84 \text{ V}_{\text{rms}}$$

จะได้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยบนสุด (U_k) เท่ากับ $432.84 \text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งต่ำกว่าแรงดันพิคกิ้งของตัวเก็บประจุย่อย $650 \text{ V}_{\text{rms}}$ ดังนั้นแสดงตัวเก็บประจุแรงสูงสามารถทนแรงดันที่ระดับใช้งาน $100 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ได้ ดังนั้นตัวเก็บประจุแรงสูงที่ออกแบบนี้สามารถนำไปใช้งานที่แรงดันพิคกิ้ง $100 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ได้ตามต้องการ

3.3 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของ โวลเตจดีไวเซอร์ การออกแบบภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

1) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในเปลือกนอกของสายเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

2) การจัดวางองค์ภาคแรงต่ำ ต้องพิจารณาเป็นพิเศษเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำจะมีต่อรูปขาเข้าของเคเบิลวัด จึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำให้อยู่ในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม

3) วัสดุที่ใช้ทำตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำควรเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในภาคแรงสูง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิขององค์ประกอบภาคแรงสูงและแรงต่ำ

4) โครงสร้างภาคแรงต่ำควรออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เพื่อสะดวกในการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์

3.3.1 การเลือกแรงดันขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเซอร์กำหนดด้วยแรงดันป้อนเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันกระแสสลับ เมื่อทราบแรงดันขา

$$a = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3.12)$$

เข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์และสามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบวงจรของโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุได้โดยอาศัยสมการ

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์

C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ในที่นี้ออกแบบเลือกแรงดันขาออก 150 โวลต์ ดังนั้นอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์มีค่าประมาณ 667:1

3.3.2 การคำนวณตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์เลือกแรงดันขาออก 150 โวลต์ จะได้อัตราส่วนแรงดันโวลเตจดีไวเซอร์ 667:1 และจากค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 95.24 pF เมื่อแทนลงในสมการจะได้ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำเท่ากับ 63.43 nF เมื่อคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของภาคแรงสูงและแรงต่ำ จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดเดียวกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ คือตัวเก็บประจุชนิดโพลีพรอบฟิล์ม ขนาด 650 kV_{rms}, 0.022 μF จำนวน 3 ตัว มาต่อขนานกันจะได้ค่าเก็บประจรวมเท่ากับ 66 nF และได้ค่าอัตราส่วนของโวลเตจดีไวเซอร์เป็น 694 : 1 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะยึดหัวท้ายด้วยแผ่นทองแดงและบรรจุอยู่ในกล่องทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว

แสดงการคำนวณค่าเก็บประจุแรงต่ำ

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2 \quad (3.13)$$

$$100kV = \frac{95.24pF + C_2}{95.24pF} 150$$

$$C_2 = 63.43nF$$

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{95.24pF + 63.43nF}{95.24pF}$$

$$= 694$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบอิลেকโตรด

การออกแบบฝาปิดอิลেকโตรดจะมีผลโดยตรงต่อความเครียดสนามไฟฟ้า ดังนั้นเราต้องออกแบบให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยสร้างอิลেকโตรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 cm เพราะขนาดท่อที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm โดยขอบโค้งของอิลেকโตรดต้องมีความสม่ำเสมอไม่มีเหลี่ยมเกิดขึ้น ซึ่งเราจะสร้างอิลেকโตรดแบบ Rogowski profile [ค.ร. ตำราฯ,2528] ซึ่งอิลেকโตรดแบบโรกอฟสกี เป็นอิลেকโตรดที่มีขอบตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าที่ทำให้สนามไฟฟ้านอกแผ่นมีค่าน้อยกว่าค่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอระหว่างภายในแบบอิลেকโตรดรูปแบบอิลেকโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหมายถึงมีความเครียดสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องว่างระหว่างอิลেকโตรดเท่ากัน

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \tag{3.14}$$

เมื่อ U

คือ แรงดันที่ป้อนเข้าระหว่างอิลেকโตรด

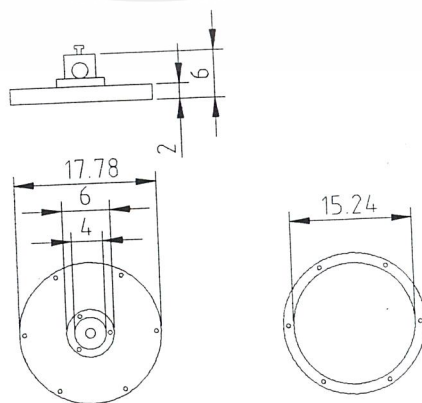
d

คือ ระยะห่างระหว่างอิลেকโตรด

E

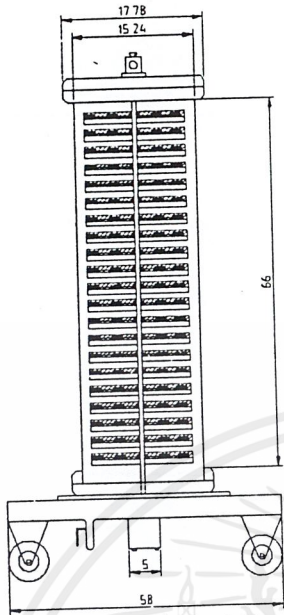
คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ.จุดใดๆ ระหว่างอิลেকโตรด

อิลেকโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดแตกต่างกันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอิลেকโตรดเป็นสำคัญ ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดเราต้องกลึงอิลেকโตรดให้สม่ำเสมอที่สุดเพื่อที่จะป้องกันการเบรคความถี่ระหว่างอิลেকโตรดทั้งสอง

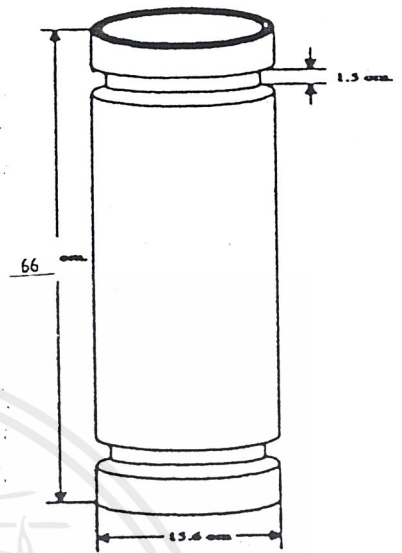


รูปที่ 3.3 โครงสร้างอิลেকโตรด

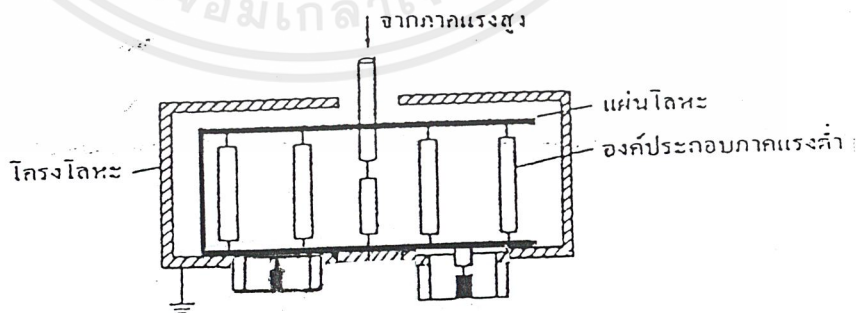
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างโวลเตจดีไวเซอร์

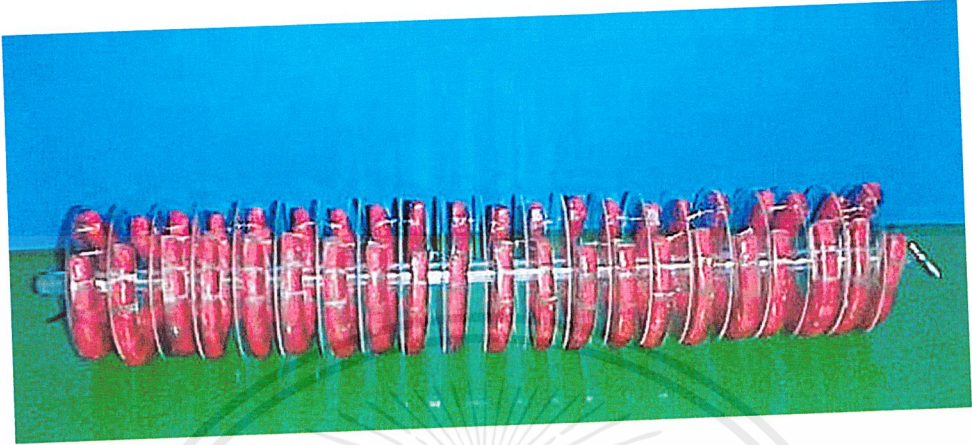


รูปที่ 3.5 โครงสร้างท่อพลาสติกใส



รูปที่ 3.6 โครงสร้างภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

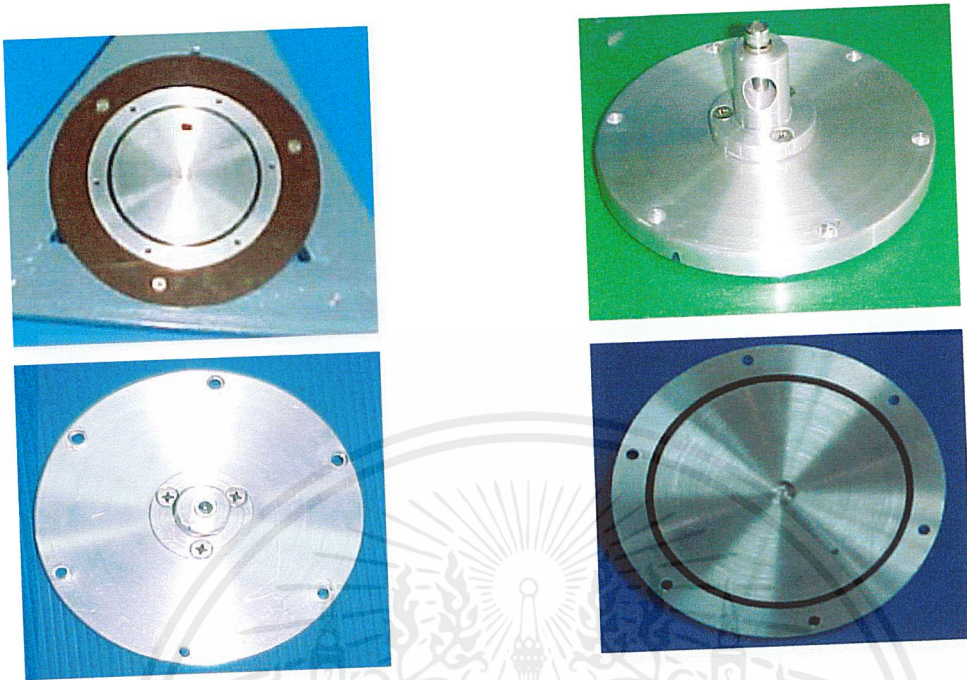


รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง



รูปที่ 3.8 ท่อพลาสติกใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 อิเล็กโตรคบนและล่าง



รูปที่ 3.10 องค์ประกอบภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

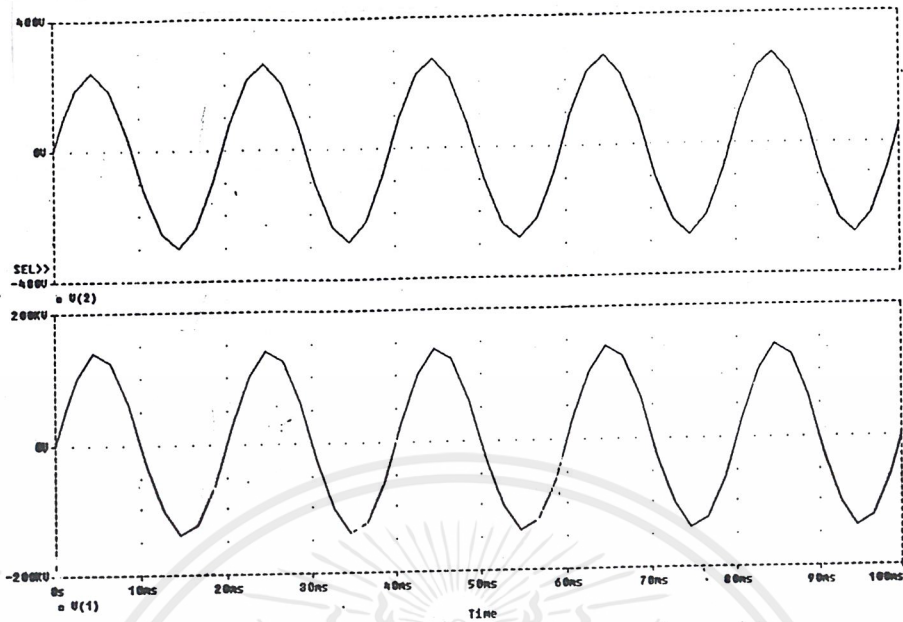
4.1 บทนำ

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของ โวลเตจดิไวเคอร์ วัตต์แรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ เป็นการทดสอบเพื่อให้มั่นใจได้ว่า โวลเตจดิไวเคอร์ วัตต์แรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างขึ้น มีลักษณะสมบัติเหมาะสมสำหรับที่จะใช้วัตต์แรงดันสูงกระแสสลับ ตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล IEC 60-2 (1994) ซึ่งการทดสอบและประเมินผลมีดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ
- 2) การทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง
- 3) การทดสอบหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของตัวเก็บประจุ
- 4) การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง
- 5) การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ
- 6) การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์
- 7) การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Comparative Test)
- 8) การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)
- 9) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (withstand voltage test)
- 10) การทดสอบวัดแรงดันขาออกของโวลเตจดิไวเคอร์

4.2 การทดสอบแบบจำลองของตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ

ก่อนการทำการสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุขนาด 100 kV ได้ทำการจำลองตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุว่าค่าเก็บประจุที่ออกแบบว่าเป็นไปตามทฤษฎีของโวลเตจดิไวเคอร์หรือไม่ โดยใช้ PSPICE ค่าตัวเก็บประจุแรงสูงที่ออกแบบคือ 95.24 pF ค่าตัวเก็บประจุแรงต่ำที่ออกแบบคือ 66 nF เมื่อจ่ายแรงดัน 100kV_{rms} จะได้แรงดันเข้าและขาออกดังกราฟ

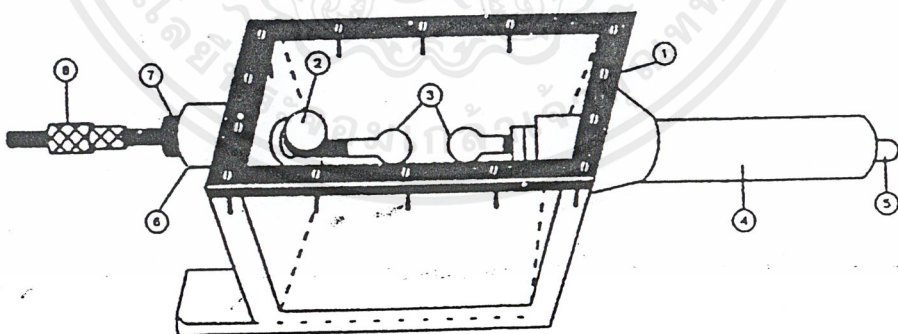


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงแรงดันขาเข้าและขาออกของ โวลเตจดีไวเดอร์ โดย PSPICE

จากกราฟจะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบสามารถแบ่งทอนแรงดันได้ตามทฤษฎีของ โวลเตจดีไวเดอร์ จึงสามารถนำค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบ ไปสร้าง โวลเตจดีไวเดอร์ได้

4.3 การทดสอบหาความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

ในการนำน้ำมันหม้อแปลงมาเป็นฉนวนจำเป็นต้องทราบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรค ความถี่เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างของ โวลเตจดีไวเดอร์และเพื่อความมั่นใจว่าเมื่อนำน้ำมันหม้อแปลงมาฉนวนแล้วจะไม่เกิดการเบรคความถี่ โดยมีอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ชุดภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1. ตัวภาชนะ | 2. ช่องเติมน้ำมัน |
| 3. อิเล็กโทรดแบบทรงกลม | 4. ปลอกฉนวนนำสายไฟแรงสูง |
| 5. ปลายแรงสูง | 6. ปลอกนำสายไฟด้านต่อลงดิน |
| 7. นี้อตลีดแกนตัวนำ | 8. ปลายด้านต่อลงดิน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง 28 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 81 %

d (mm)	Vb (kV)					เฉลี่ย Vb(kV)/mm
	1	2	3	4	5	
2.0	7.23	7.66	8.94	9.16	9.36	4.235
3.5	11.76	12.88	12.72	13.14	13.51	3.657
5.0	14.59	16.53	17.66	17.82	18.72	3.410
เฉลี่ย						3.760
						37.6kV/cm

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

standard test : IEC 156		Example oil : transformer oil	
electrod test : Sphere			
Gap(mm)	Temp room (c)	test no	voltage breakdown(kV)
2.5	34	1	8.18
		2	9.62
		3	10.05
		4	9.23
		5	9.54
		6	9.95
		7	9.02
		8	10.25
		9	9.45
		10	9.06

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคความถี่ของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

ที่ระยะแกป 2.5 mm

จากตารางที่ 4.1 จะได้ค่าแรงดันเบรคความถี่เฉลี่ยทั้งหมด 37.6kV/cm และจากตารางที่ 4.2 จะได้ค่าแรงดันเบรคความถี่เฉลี่ยของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 37.7 kV/cm ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ เพราะมาตรฐาน IEC 156 ได้กำหนดคุณสมบัติของน้ำมันฉนวนมีค่าความคงทนต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเบรคดาวน์เท่ากับ 15-25 kV/cm [1] เราสามารถนำน้ำมันหม้อแปลงมาใช้ได้เพราะมีค่า E_b สูงกว่าค่าเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

4.4 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของตัวเก็บประจุ

เนื่องจากตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเซอร์ต้องฉนวนด้วยน้ำมันหม้อแปลงเมื่อใช้ไปในระยะหนึ่งน้ำมันอาจซึมเข้าไปในตัวเก็บประจุ จะทำให้โวลเตจดีไวเซอร์เสียหายได้และทำให้ค่าตัวเก็บประจุผิดพลาดจึงจำเป็นต้องเคลือบด้วย เรซินแต่เนื่องจากเรซินมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนได้ไม่ดีจึงต้องทดสอบว่าตัวเก็บประจุที่ใช้เมื่อป้อนแรงดันที่พิกัดจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรโดยทำการป้อนแรงดันที่พิกัดของตัวเก็บประจุชนิด โพลีพรอบพีลีนฟิล์ม ขนาด $650V_{rms}$, $0.022\mu F$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วบันทึกผล

ชั่วโมงที่	อุณหภูมิ (°C)
1	28.0
2	28.0
3	29.0
4	29.0
5	28.5
6	28.0
7	27.5
8	27.0
9	27.0
10	27.0

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตัวเก็บประจุแบบ โพลีพรอบพีลีนฟิล์ม ระยะเวลาต่าง ๆ

จากผลการทดลองเมื่อป้อนแรงดันที่พิกัดใช้งานจริงเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ปรากฏว่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงสามารถที่จะนำตัวเก็บประจุไปเคลือบเรซินได้

4.5 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

เมื่อสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแล้ว ต้องมีการวัดค่าเก็บประจุจริงเพื่อจะนำไปใช้คำนวณหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่แท้จริงของโวลเตจดีไวเซอร์ โดยการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟก

เตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกใช้วิธี Schering Bridge โดยใช้เครื่อง C-TAN δ -BRIDGE รุ่น เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TETTEX INSTRUMENT 2801 ในการวัดทำการเปรียบเทียบตัวเก็บประจุมาตรฐานแบบก๊าซอัดรุ่น MICAFIL Type 3370/50pF/600kV

Temperature 29°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 71% ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง

แรงดันทดสอบ kV	c1 ทฤษฎี (nF)	c1 การทดลอง (nF)	%ความผิดพลาด	tan δ (%)
10	95.24	95.81	0.5984	0.09
20	95.24	95.82	0.6089	0.09
40	95.24	95.82	0.6089	0.11
60	95.24	95.82	0.6089	0.12
80	95.24	95.82	0.6089	0.13
100	95.24	95.82	0.6089	0.13
เฉลี่ย	95.24	95.82	0.6089	0.11

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูง

จากตารางค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแรงสูงที่ได้จากการทดลอง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.82 พิโคฟารัด ค่าความจุที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าจากการคำนวณออกแบบประมาณ 0.60% ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของตัวเก็บประจุน้อย และเนื่องจากการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดผิดพลาด รวมทั้งอาจเกิดจากค่าความจุตรงดินเกิดการคลาดเคลื่อนในขณะที่ทดสอบอีกด้วย

ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ได้จากการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.111% แสดงให้เห็นว่า อะคริลิก หรือไดอิเล็กตริกที่ใช้กันหรือแยกส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้ามิให้สัมผัสกันหรือตัดวงจรถึงกันมีคุณสมบัติตามที่กำหนด ซึ่งคุณสมบัติของอะคริลิกที่ 50 Hz ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.012-0.15 [1]

4.6 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

เมื่อสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำแล้ว ต้องมีการวัดค่าเก็บประจุจริงเพื่อจะนำไปใช้คำนวณหาค่าสเกลแฟคเตอร์ที่แท้จริงของโวลเตจดีไวเดอร์ การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกใช้วิธี Schering Bridge โดยใช้เครื่อง C-TAN δ -BRIDGE รุ่น TETTEX INSTRUMENT 2801 ในการวัดทำการเปรียบเทียบตัวเก็บประจุมาตรฐานแบบก๊าซอัดรุ่น HALFELY TRENCH Type NK-100

ความจุ 100.44pF ณ อุณหภูมิ 29°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 71% ผลการทดลองแสดงดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันทดสอบ v	c2 ทฤษฎี (nF)	c2 การทดลอง (nF)	tan (%)	%ความผิดพลาด
150	66	67.123	น้อยมากๆ	1.70152
100	66	67.123	น้อยมากๆ	1.70152

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากตารางค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแรงสูงที่ได้จากการทดลอง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 67.123 นาโนฟารัด ค่าความจุที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าจากการคำนวณออกแบบน้อยมาก ๆ ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของตัวเก็บประจุน้อย และเนื่องจากการอ่านค่าจากเครื่องมือวัดผิดพลาด รวมทั้งอาจเกิดจากค่าความจุสเตรลงดินเกิดการคลาดเคลื่อนในขณะที่ทดสอบอีกด้วย

4.7 การทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์

การทดสอบนี้เพื่อต้องการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด ซึ่งในการทดลองนี้จะทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์สองวิธี คือ 1) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด

2) การวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อม ๆ กัน

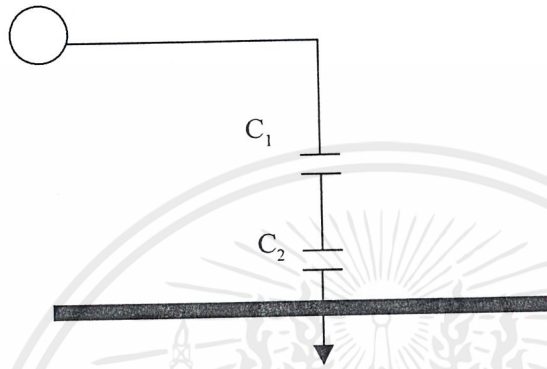
1) ใช้วิธีวัดค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุแรงสูงใช้วิธี Schering Bridge โดยใช้เครื่อง C-TAN δ - BRIDGE รุ่น TETTEX INSTRUMENT 2801 ในการวัดทำการเปรียบเทียบตัวเก็บประจุมาตรฐานแบบก้ำซอครุ่น MICAFIL Type 3370/50pF/600kV สำหรับตัวเก็บประจุแรงต่ำทำการเปรียบเทียบตัวเก็บประจุมาตรฐานแบบก้ำซอครุ่น HALFELY TRENCH Type NK-100 ความจุ 100.44pF

ณ อุณหภูมิ 29°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 71% ผลการทดลองแสดงดังตาราง

องค์ประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์	แรงดันทดสอบ v	ค่าเก็บประจุที่ออกแบบ	ค่าเก็บประจุจากการวัด
c1	10000	95.24 pF	95.82 pF
c2	150	66nF	67.123 nF

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ

จากค่าเก็บประจุในตาราง สามารถหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบตัวเก็บประจุสมการสมมูลย์ สามารถคำนวณหาสเกลแฟกเตอร์ได้ตามสมการ

$$S.F. = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \tag{4.1}$$

จากแทนค่าลงในสมการ

$$S.F. = \frac{95.82 \text{ pF} + 67.123 \text{ nF}}{95.82 \text{ pF}}$$

$$= 700$$

เมื่อแทนค่าลงในตารางจะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดเป็น S.F.=700

เมื่อ S.F. คือ สเกลแฟกเตอร์

2) การวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อม ๆ กัน

โดยทำการทดสอบตลอดช่วงแรงดันใช้งานและทำการบันทึกแรงดันขาเข้าและขาออก แต่ระดับแรงดันจะทำการวัด 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะทำให้ 10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 kV_{rms} แต่จะยกตารางแสดงเพียง 3 ระดับแรงดัน คือ ที่ 10kV,50kV,100kV ดังนี้

การทดสอบครั้งที่	แรงดันที่วัดได้ (V)
1	14.19
2	14.22
3	14.28
4	14.37
5	14.15
6	14.25
7	14.27
8	14.26
9	14.24
10	14.26
ค่าเฉลี่ย	14.25

ตารางที่ 4.7 การทดสอบวัดแรงดันขาเข้าและขาออกที่ 10 kV

การทดสอบครั้งที่	แรงดันที่วัดได้ (V)
1	71.23
2	71.25
3	71.26
4	71.22
5	71.24
6	71.19
7	71.23
8	71.25
9	71.28
10	71.25
ค่าเฉลี่ย	71.24

ตารางที่ 4.8 การทดสอบวัดแรงดันขาเข้าและขาออกที่ 50 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบครั้งที่	แรงดันที่วัดได้ (V)
1	142.89
2	142.92
3	142.9
4	142.88
5	142.91
6	142.93
7	142.89
8	142.91
9	142.89
10	142.93
ค่าเฉลี่ย	142.91

ตารางที่ 4.9 การทดสอบวัดแรงดันขาเข้าและขาออกที่ 100 kV

แรงดันทดสอบ(kV)	แรงดันที่วัดได้ (V)	สเกลแฟกเตอร์
10	14.25	701.7543
20	28.56	700.2801
30	42.85	700.1166
40	56.97	702.1239
50	71.24	701.8528
60	86.03	697.4311
70	99.78	701.5433
80	114.52	698.5679
90	128.66	699.5181
100	142.91	699.7410
เฉลี่ย		700.2929

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเซอร์

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยเท่ากับ 700 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าสเกลแฟกเตอร์ที่

คำนวณจากค่าเก็บประจุที่วัดได้ ดังนั้นสรุปว่าโวลเตจดีไวเซอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 700:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Comparative Test)

การทดสอบวัดเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นการวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โวลเตจดิไวเคอร์แบบตัวเก็บประจุของศูนย์ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) เพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีค่าแรงดันผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ ซึ่งการวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดวิธีเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วิธีวัดเปรียบเทียบระบบวัดอ้างอิงโดยอ่านจากระบบวัดทั้งสองพร้อมกันแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งการวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอาจทำที่ระดับแรงดัน 20 % ของแรงดันพิกัดได้ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้ง มีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกินไปกว่า +3% และการนำค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งค่าที่อ่านได้จะกำหนดเป็นสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบแต่ละครั้ง F_i การทดสอบจะกระทำจนกระทั่งได้ค่าทั้งหมด n ค่า โดย $n \geq 10$ และหาค่าเฉลี่ย F_m ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน s จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1% ของ F_m ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน s คำนวณได้จาก

$$S = \sqrt{\frac{\sum(F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

เมื่อ F_m คือค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับค่าแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบ

F_i คืออัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับค่าแรงดันของค่าที่ต้องการทดสอบ

n คือจำนวนครั้งที่ทำการทดสอบในแต่ละระดับแรงดัน

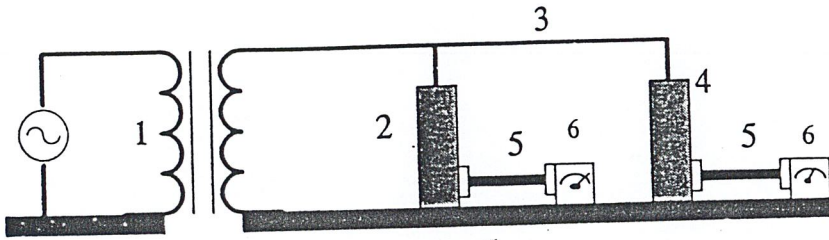
โดยที่ %ค่าความผิดพลาด หาได้จาก

$$\%ค่าความผิดพลาด = \frac{U_c - U_{ref}}{U_{ref}} \times 100 \quad (4.3)$$

เมื่อ U_c คือ แรงดันที่วัดได้จากระบบทดสอบ

U_{ref} คือ แรงดันระบบอ้างอิง

ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรการวัดเปรียบเทียบแรงดัน

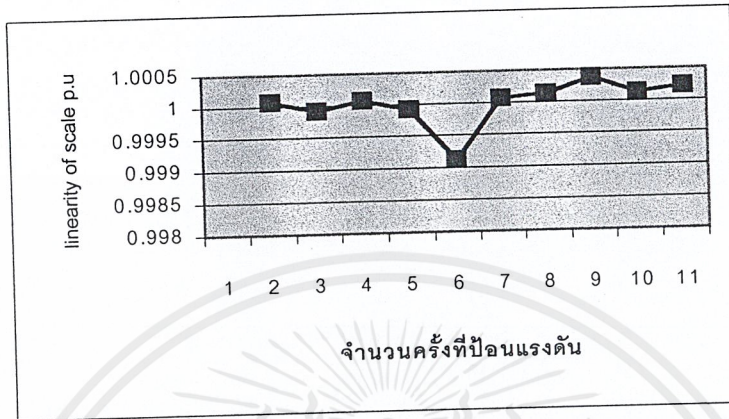
- เมื่อ
1. คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
 2. คือ ระบบวัดอ้างอิง
 3. คือ สายนำแรงสูง
 4. คือ โวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง
 5. คือ สายเคเบิล
 6. คือ เครื่องมือวัดภาคแรงต่ำ

ลำดับ	ระบบอ้างอิง U_{ref} (kV _{rms})	ระบบทดสอบ U_c (kV _{rms})	$F_i (U_{ref}/U_c)$	% ความผิดพลาด
1	20.098	20.010	1.00439	-0.44
2	20.102	20.017	1.00429	-0.42
3	20.090	20.002	1.00439	-0.44
4	20.102	20.017	1.00425	-0.42
5	20.100	20.031	1.00344	-0.34
6	20.090	20.002	1.00439	-0.44
7	20.092	20.003	1.00445	-0.44
8	20.090	19.996	1.00470	-0.47
9	20.092	20.003	1.00445	-0.44
10	20.094	20.003	1.00454	-0.45
ค่าเฉลี่ย	20.095	20.008	1.00433	-0.43
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ฐาน(s)	0.000337			

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดัน 20 kV_{rms}

จากตารางการทดสอบวัดเปรียบเทียบที่ระดับแรงดัน 20 kV ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด กล่าวคือ มาตรฐาน IEC60-2(1994) ได้กำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้ง มีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกินไปกว่า $\pm 3\%$ ดังนั้นสรุปได้ว่าโวลเตจดีไว



เตอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งสามารถแสดงดังกราฟ

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ระดับแรงดัน 20 kV_{rms}

การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดัน 100 kV_{rms}

ลำดับ	ระบบอ้างอิง U _{ref} (kV _{rms})	ระบบทดสอบ U _c (kV _{rms})	Fi (U _{ref} /U _c)	%ความผิดพลาด
1	100.33	100.01	0.999978	-0.32
2	100.38	100.008	1.000496	-0.37
3	100.32	100.015	0.999828	-0.30
4	100.35	100.048	0.999797	-0.30
5	100.39	100.081	0.999866	-0.31
6	100.24	99.88	1.000381	-0.36
7	100.27	100.002	0.99946	-0.27
8	100.33	100	1.000078	-0.33
9	100.35	100.015	1.000127	-0.33
10	100.34	100.019	0.999988	-0.32
ค่าเฉลี่ย	100.33	100.0078	1.003221	-0.32
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s)	0.000298			

ตาราง 4.12 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดัน 100 kV_{rms}

จากตารางการทดสอบวัดเปรียบเทียบที่ระดับแรงดัน 100 kV_{rms} ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่

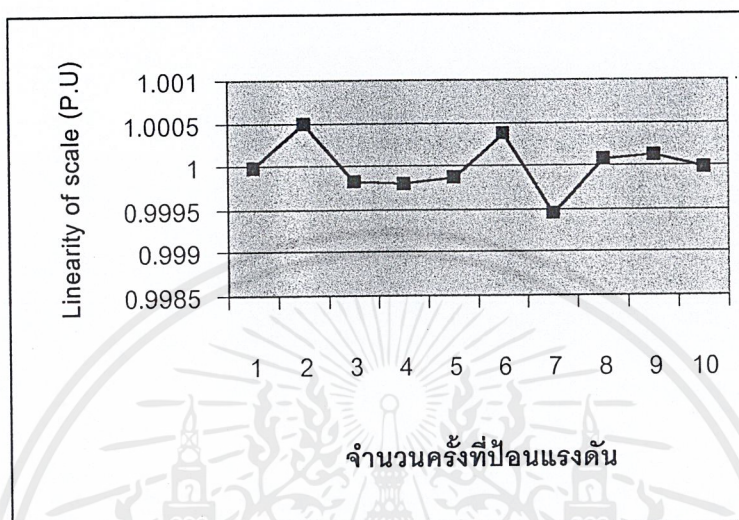
ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด กล่าวคือ มาตรฐาน IEC60-2(1994) ได้กำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกินไปกว่า $\pm 3\%$ ดังนั้นสรุปได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งสามารถแสดงดังกราฟ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ระดับแรงดัน 100 kV_{rms}

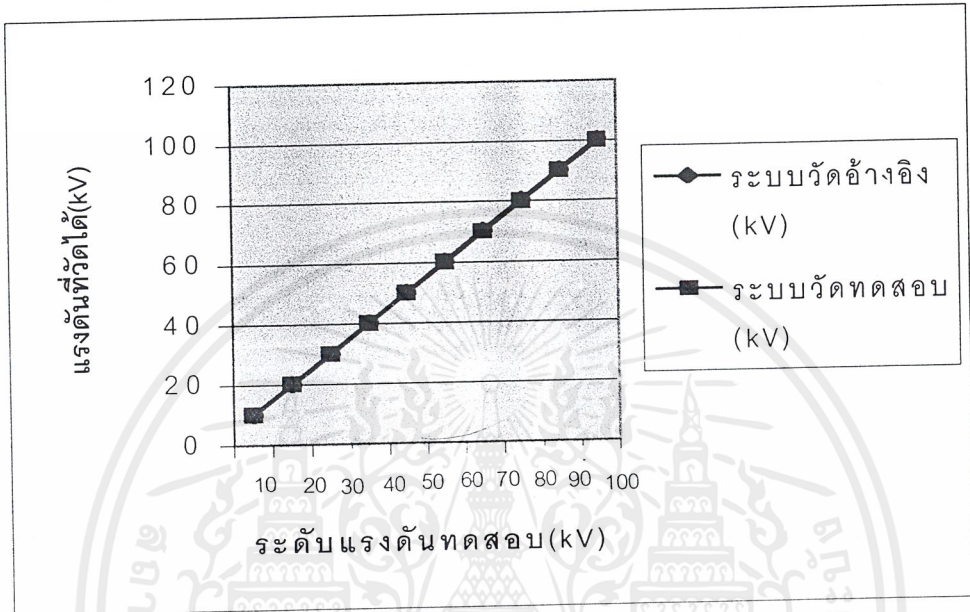
ระดับแรงดัน (kV)	ระบบวัดอ้างอิง(kV)	ระบบวัดทดสอบ(kV)	%ความผิดพลาด
10	10.11	10.06	-0.49455
20	20.095	20.008	-0.43294
30	30.102	29.98	-0.40528
40	40.25	40.06	-0.47204
50	50.19	49.97	-0.43832
60	60.22	59.93	-0.48156
70	70.29	70	-0.41257
80	80.36	79.98	-0.47287
90	90.31	90.001	-0.34215
100	100.37	100.027	-0.34173
ค่าเฉลี่ย			-0.42942

ตารางที่ 4.13 การวัดเปรียบเทียบแรงดันที่ระดับแรงดันตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

จากตารางที่ 4.10 จะได้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 0.42942 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน

กำหนด กล่าวคือ มาตรฐาน IEC60-2(1994) ได้กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละครั้ง มีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกิน $\pm 3\%$ [3] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟการทดสอบเปรียบเทียบแรงดัน

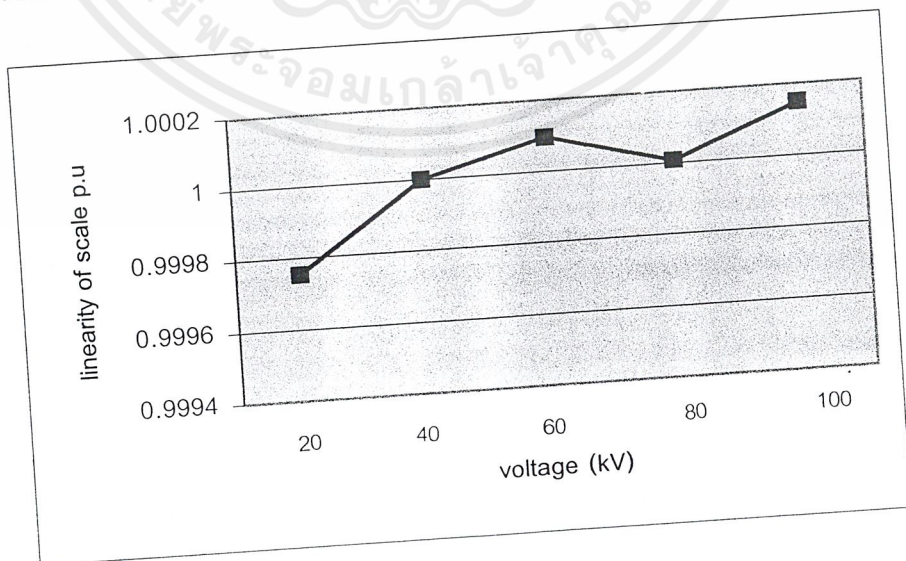
4.9 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

การทดสอบความเป็นเชิงเส้น เป็นการวัดแรงดันเปรียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ ในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ซึ่งในแต่ละค่าของช่วงแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย ระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น [3]

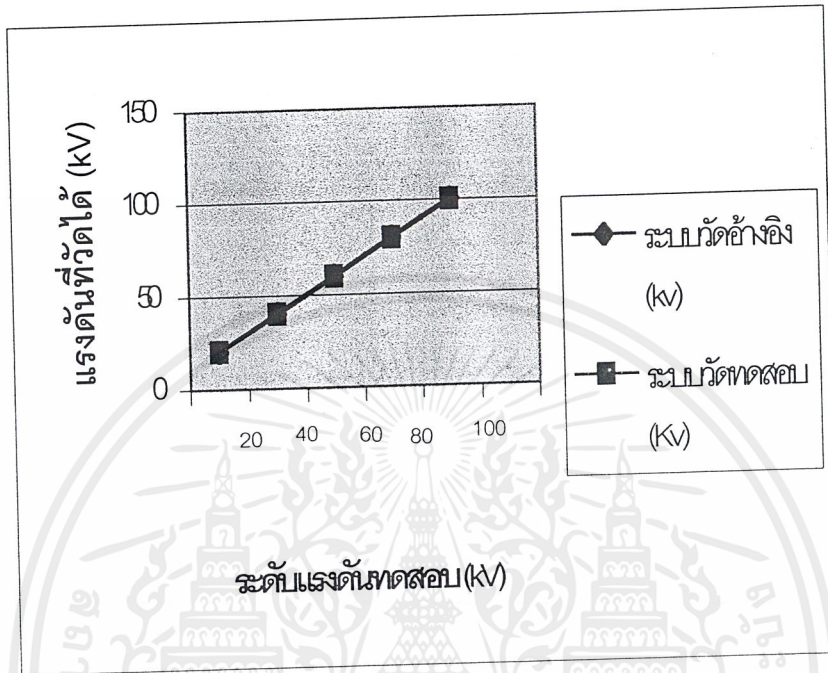
ระดับแรงดัน (kV)	ระบบวัดอ้างอิง $U_{ref}(kV)$	ระบบวัดทดสอบ $U_c(kV)$	%ความผิดพลาด	Fi (U_{ref}/U_c)
20	20.1	20.01	-0.447	1.004498
40	40.25	40.06	-0.472	1.004743
60	60.22	59.93	-0.482	1.004839
80	80.36	79.98	-0.473	1.004751
100	100.65	100.16	-0.487	1.004892
ค่าเฉลี่ย			-0.4722	1.004745
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s)	0.0001529			

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นจากตาราง จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.000152 ซึ่งมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย (F_m) และอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันของระบบอ้างอิงกับค่าแรงดันของระบบวัดที่ทำการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ของค่าเฉลี่ยและจากกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ออกแบบสร้างจะเห็นว่าในช่วงใช้งานของแรงดันระบบวัดจะมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบวัดที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงแรงดันใช้งาน และมีมาตรฐานตาม IEC 60-2 (1994) ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ออกแบบสร้าง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดที่ออกแบบวัดในช่วงแรงดันใช้งาน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



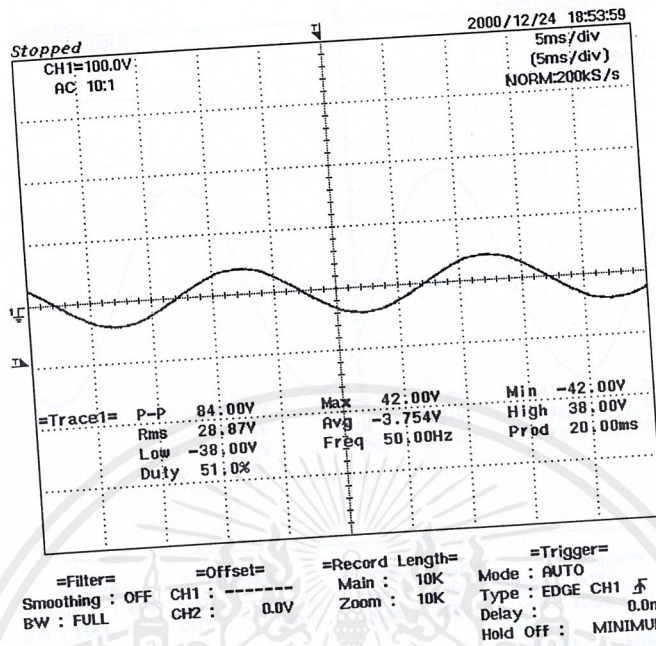
รูปที่ 4.9 กราฟทดสอบความเป็นเชิงเส้น

4.10 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (withstand voltage test)

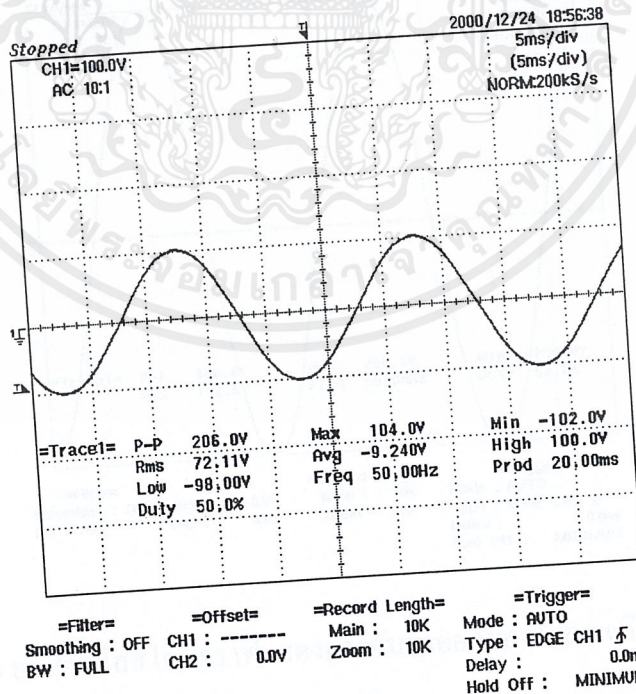
เป็นการทดสอบดูว่าวัสดุฉนวนหรือ ฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ สามารถทนต่อการเบรคดาวน์ในขณะที่ใช้งานได้ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายกับตัวโวลเตจดีไวเดอร์ ตามมาตรฐาน IEC60-2 (1994) [3] กำหนดไว้ว่าให้ทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันที่ค่าแรงดัน 110% ของพิกัดแรงดันสูงสุดเป็นเวลาหนึ่งนาที ซึ่งโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างสามารถทนแรงดันได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

4.11 การทดสอบวัดแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์

ในการวัดแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ด้วยออกสซิโกลโคปซึ่งมีค่าความผิดพลาดตามที่มาตรฐาน IEC60-2(1994) คือมีความผิดพลาดเฉลี่ยไม่เกิน $\pm 3\%$ ซึ่งกราฟแสดงดังรูป



รูปที่ 4.10 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ ที่ขนาดแรงดัน 20 kV_{rms}



รูปที่ 4.11 ออสซิลโลสโคปกราฟแสดงแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ ที่ขนาดแรงดัน 50 kV_{rms}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุย่อย สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดพิกัด 100 kV ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

1) ข้อมูลทางเทคนิคของโวลเตจดีไวเซอร์

พิกัดแรงดัน	100 kV _{rms}
กระแสสูงสุด	3 mA
ความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง	95.82 pF
ความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ	67.123 nF
ความถี่	50 Hz
สเกลแฟกเตอร์	700:1
Accuracy	± 1 %

ผลการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเห็นได้ว่าโวลเตจดีไวเซอร์ มีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้กำหนดไว้

2) การทดสอบความเป็นเชิงเส้น ผลที่ได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้น จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย (F_m) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบวัดที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงแรงดันใช้งาน และมีมาตรฐานตาม IEC 60-2 (1994)

3) การวัดค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะมีความผิดพลาดไปจากที่ได้คำนวณเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุย่อย และค่า สเตรคาปาซิแตนซ์

4) การทดสอบความคงทนของฉนวน ได้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงมีค่า เฉลี่ยทั้งหมด 37.6kV/cm ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ เพราะมาตรฐาน IEC 156 ได้กำหนดคุณสมบัติของน้ำมันฉนวนมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์เท่ากับ 15-25 kV/cm เราสามารถนำน้ำมันหม้อแปลงมาใช้เป็นฉนวนได้เพราะมีค่า E_0 สูงกว่าค่าเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

5) การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบ โดยการใช้ค่าความจุของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำที่วัด ได้จริงจะมีสเกลแฟกเตอร์ไม่ตรงกับที่คำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุย่อย

6) การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ใน

เอกสารเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด กล่าวคือ มาตรฐาน IEC60-2(1994) ได้กำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้ง มีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงไม่เกินไปกว่า $\pm 3\%$ ดังนั้นสรุปได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

7) การทดสอบหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้กับอุณหภูมิของตัวเก็บประจุ สามารถใช้เรซินมาเคลือบตัวเก็บประจุเพื่อป้องกันน้ำมันหม้อแปลงซึมเข้าไปในตัวเก็บประจุได้ เพราะจากการทดลองเมื่อจ่ายไฟเป็นเวลา 10 ชั่วโมง อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

8) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โวลเตจดีไวเดอร์สามารถทนแรงดันไฟฟ้าที่ 110% ของพิกัดแรงดันได้ตามมาตรฐาน IEC60-2 (1994)

9) สาเหตุของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

9.1) ค่าความผิดพลาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุย่อยทั้งภาคแรงสูงและแรงต่ำมีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงไม่เท่ากันซึ่งทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมในภาคแรงสูงและแรงต่ำคลาดเคลื่อนไปจากที่ได้คำนวณไว้

9.2) ความผิดพลาดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดทดสอบ เครื่องมือวัดมีค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดเองจึงทำให้ค่าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนไม่ตรงกับค่าจริง

9.3) ฟองอากาศที่เกิดขึ้นในฉนวนน้ำมันของโวลเตจดีไวเดอร์จะทำให้ความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงลดน้อยลงและจะทำให้เกิดการคายประจุบางส่วน (partial discharge) ได้ซึ่งทำให้การวัดมีความผิดพลาด

9.4) สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และความชื้น มีผลทำให้การวัดมีความผิดพลาด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การเลือกตัวเก็บประจุที่จะนำมาใช้ควรเป็นตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันได้สูงและมีค่าความผิดพลาดต่ำ

2) การต่อตัวเก็บประจุย่อยต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างตัวเก็บประจุ และการบัดกรีระหว่างตัวเก็บประจุต้องพยายามไม่ให้มีส่วนแหลมคมเพราะจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงตรงจุดที่มีความแหลมคมซึ่งอาจจะทำให้เกิดการเบรคดาวน

3) การเติมน้ำมันหม้อแปลงต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศและก่อนทำการวัดควรตรวจสอบดูว่าไม่มีฟองอากาศในน้ำมันหม้อแปลงเพราะจะทำให้การวัดผิดพลาด

4) ควรตรวจสอบเป็นประจำว่ามีการรั่วซึมของน้ำมันหม้อแปลงหรือไม่

5) ควรออกแบบโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้มีส่วนแหลมคม และควรออกแบบโครงสร้างของตัวดีไวเดอร์ให้ซ่อมบำรุงได้ง่าย



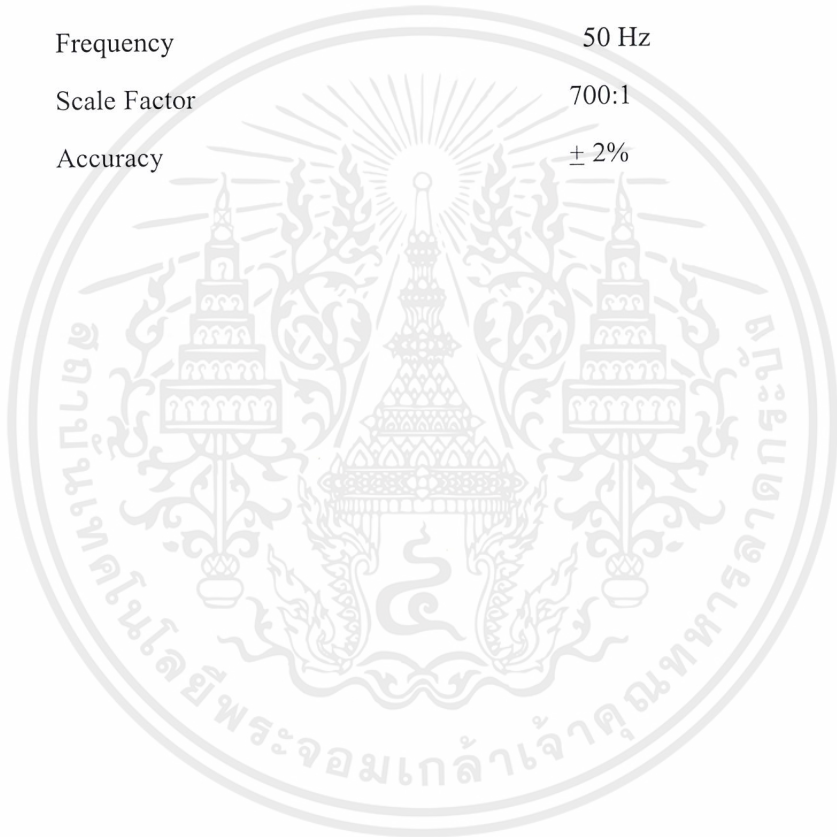
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดข้อมูลของ โวลเตจดีไวเดอร์

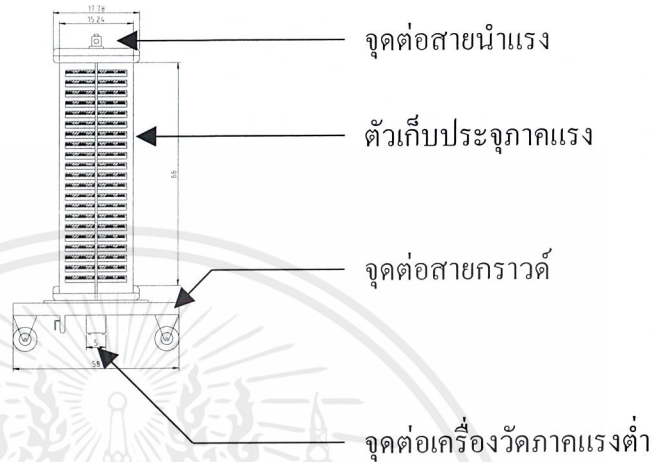
Rated Voltage	100 kV _{rms}
Test Voltage at 110%	110 kV _{rms}
Rated High Voltage Capacitance	96.24 pF
Rated Low Voltage Capacitance	67.128 nF
Rated Current	3 mA
Frequency	50 Hz
Scale Factor	700:1
Accuracy	± 2%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

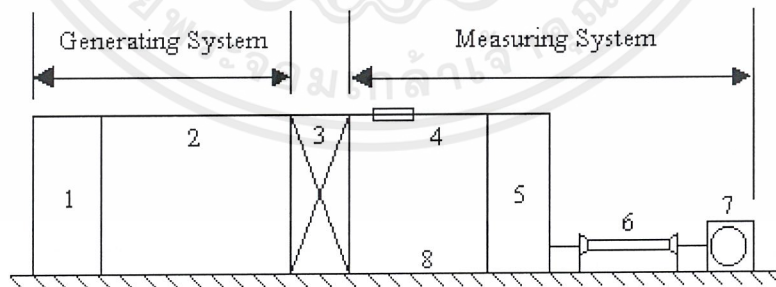
คู่มือการใช้งาน



รูปที่ ข.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของโวลเตจดีไวเดอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

1. สายนำแรงสูง
2. สายกราวด์
3. สายไฟแรงต่ำ
4. Junction Box
5. โวลต์มิเตอร์



รูปที่ ข.2 แสดงวงจรการวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

- เมื่อ
- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1.คือหม้อแปลง | 2.คือสายนำแรงสูง |
| 3.คือวัสดุทดสอบ | 4.คือสายต่อไปยังตัวแบ่งแรงดัน |
| 5.คือโวลเตจดีไวเดอร์ | 6.คือสายไฟแรงต่ำ |
| 7.คือเครื่องวัดแรงดันกระแสสลับ | 8.คือระบบสายดิน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้โวลเตจดีไวเซอร์

1. ต่อสายแรงสูงจากหม้อแปลงแรงดันสูงเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบในลักษณะต่อขนานดังรูปที่ จ.2
2. ต่อสายแรงสูงจากอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบเข้ากับอิลคโตรดบนของโวลเตจดีไวเซอร์
3. ต่อสายกราวด์ที่จุดต่อกราวด์ของดีไวเซอร์กับกราวด์ของระบบ
4. ต่อสายไฟแรงต่ำจากจุดต่อภาคแรงต่ำไปยัง Junction Box เพื่อความปลอดภัยของผู้วัด หลังจากนั้นใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันจาก Junction Box
5. นำค่าที่วัดได้จาก ข้อ 4. คูณกับค่าสเกลแฟกเตอร์ของดีไวเซอร์

ข้อควรระวัง

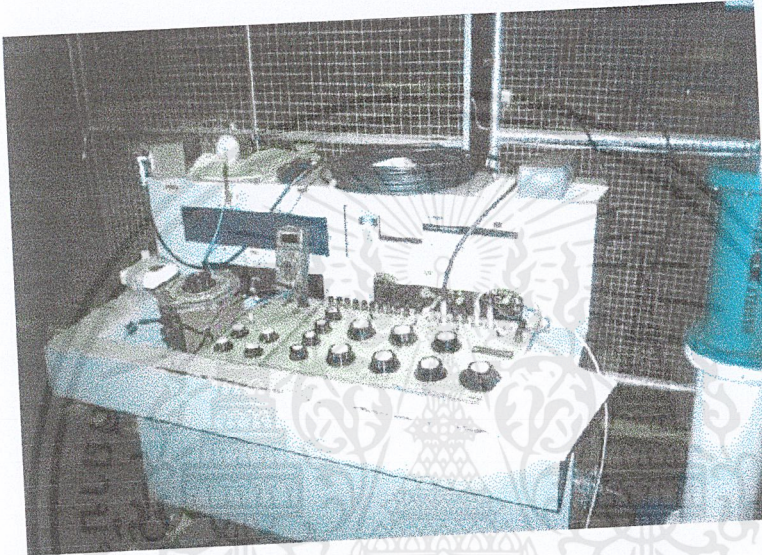
1. ก่อนใช้งานควรตรวจสอบโวลเตจดีไวเซอร์ว่าอยู่ในสภาพพร้อมที่จะใช้งานได้หรือไม่ ตัวอย่างเช่น จุดบัดกรีระหว่างชั้นขาคออกจากกันหรือไม่, ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงมีการรั่วซึมหรือไม่
2. ไม่ควรใช้งานเกินพิกัดของโวลเตจดีไวเซอร์ที่ออกแบบ
3. *หลังจากทำการทดสอบต้องทำการคลายประจุทุกครั้ง เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้

ภาคผนวก ก.

รูปการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์

โดยทำการทดสอบที่ศูนย์ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

(บางพลี)

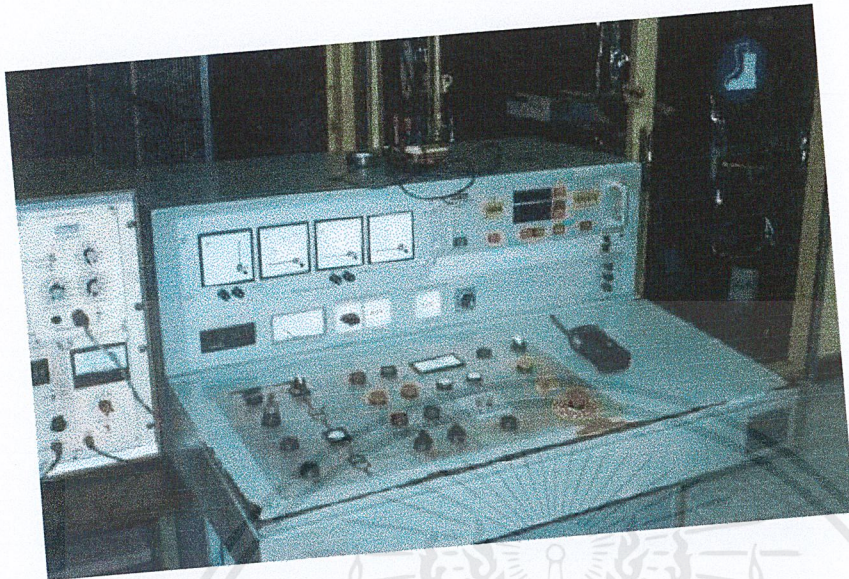


รูปที่ ก.1 การทดสอบวัดค่าเก็บประจุและเฟลคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

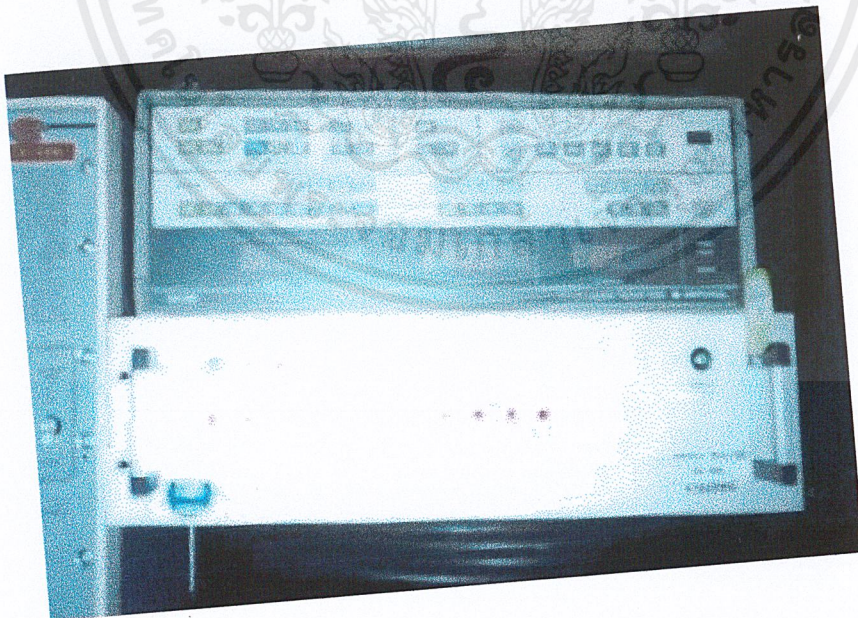


รูปที่ ก.2 การทดสอบวัดค่าเก็บประจุและเฟลคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

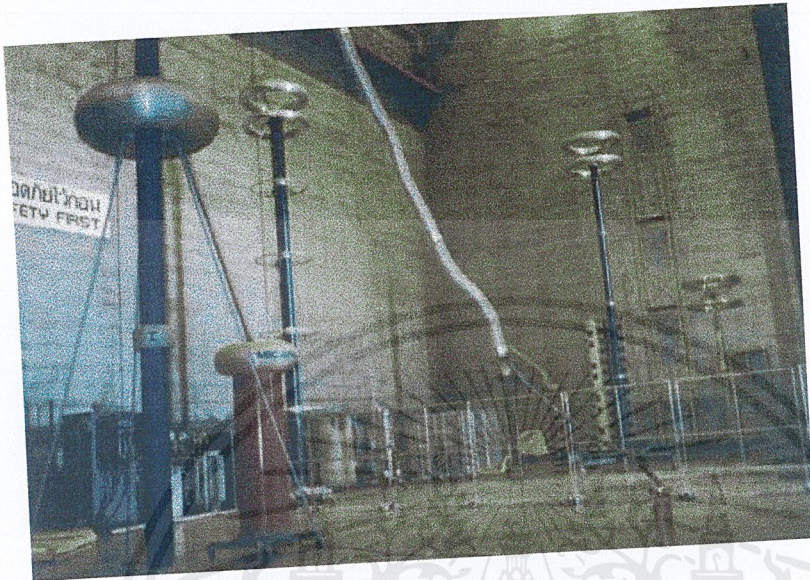


รูปที่ ค.3 เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ ค.4 Digital Multimeter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 การทดสอบความคงทนของโวลเตจดีไวเซอร์



รูปที่ ค.6 การทดสอบมัดแรงดันเปรียบเทียบและการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



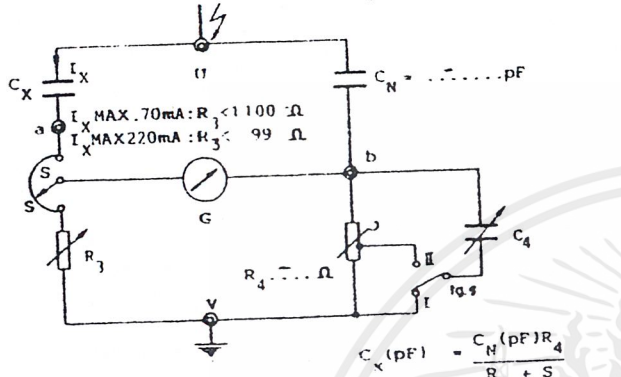
รูปที่ ค.7 การทดสอบดีไวเตอร์ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C & TAN δ MEASUREMENT

OBJECT VD
 MANUFACTURER KMITL
 S.L. NO. _____
 LOCATION _____
 MEASUREMENT BEFORE TEST _____
 MEASUREMENT AFTER TEST _____

TEST OBJECT DESCRIPTION _____



TEST OBJECT CONNECTION DIAGRAM _____

- COMMUTATOR I_{gS} ON POS. I : $TAN \delta (\%) = 10^4 \cdot \frac{C_N (\mu F) R_4}{R_1 + S} \cdot C_4$
- COMMUTATOR I_{gS} ON POS. II : $TAN \delta (\%) = \frac{C_4 (\mu F)}{C_N (\mu F)} \cdot \frac{C_N (\mu F) R_4}{R_1 + S} \cdot \frac{C_N (\mu F)}{U^2 (\text{KV})}$

AMBIENT CONDITION (BEFORE TEST/AFTER TEST)
 PRESSURE _____
 TEMPERATURE 29.5°C
 HUMIDITY 69%

TEST VOLTAGE (U) ...KV.	C ₄ (μF)	R ₁ (Ω)	S (Ω)	TAN δ (%)	C _x (pF)	DIELECTRIC LOSS (W)	REMARKS
20	0.0580	166	.05	0.033	95.81	121	R _{eq} = 10 ² Ω
30	0.0520	166	.04	0.092	95.80	C _N = 49.98 pF	Tan δ II
40	0.1220	166	.03	0.112	95.82		C _N
60	0.1150	166	.03	0.118	95.82		* C ₁
80	0.1210	166	.03	0.126	95.82		
100	0.1210	166	.03	0.121	95.82		
100 V	<0.000	147	.84	-0.00407	67,123.05	15	* C ₂
150 V	<0.000	147	.84	-0.00407	67,123.05	C _N = 100.44 pF	R _{eq} = 20000 Ω S2 N = 5 IL
150 V.	0.5000	228	.58	0.5000	1398.68	761	Tan δ II, R _{eq} = 10 ⁴ Ω * Cable

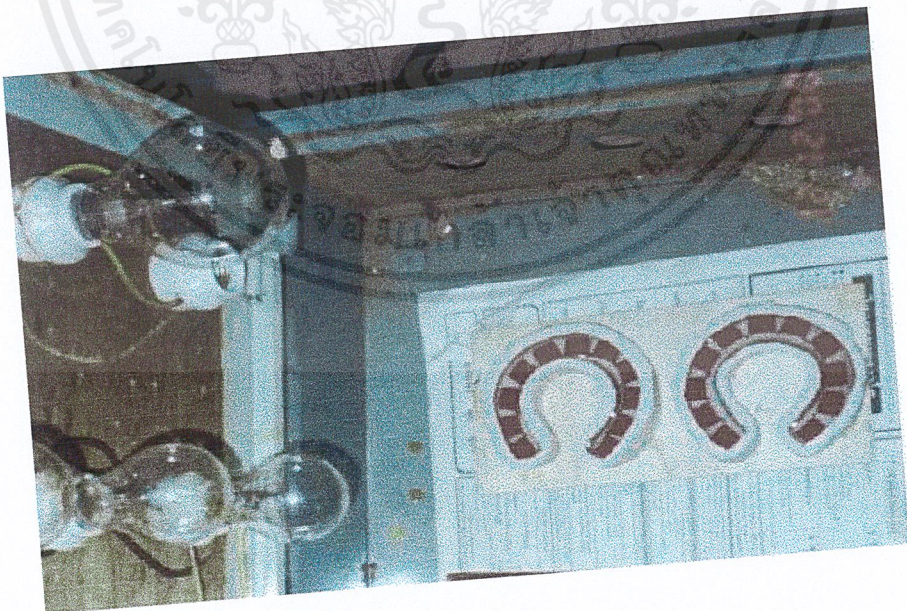
REMARKS _____

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 CONCLUSION SATISFIED TO BE INVESTIGATED
 DATE 11/02/44 BY HV/LAZ

ภาคผนวก ง
รูปแสดงการเคลือบเรซินตัวเก็บประจุย่อย

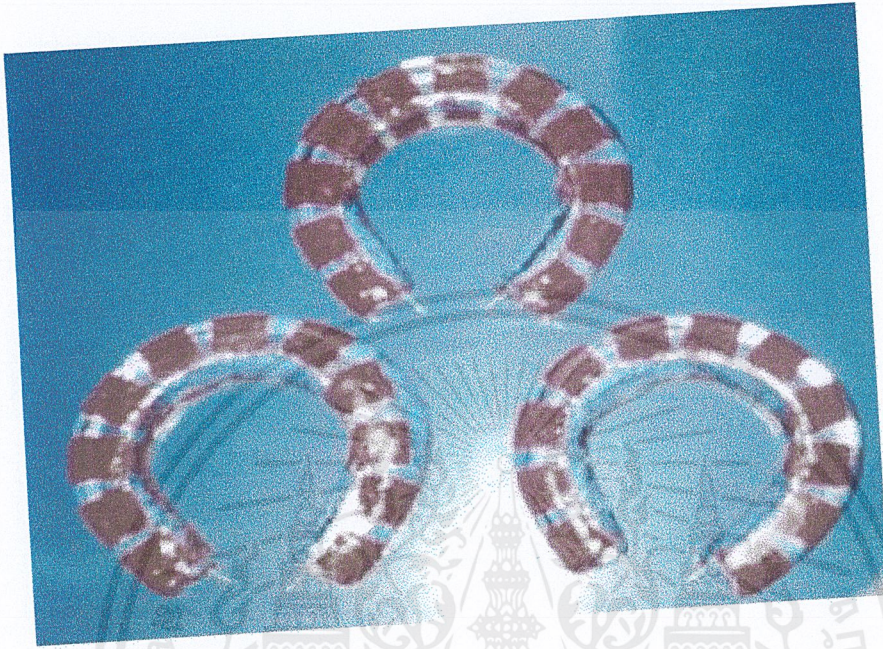


รูปที่ ง.1แสดงการเคลือบเรซินในแม่พิมพ์ที่ทำจากซิลิโคน



รูปที่ ง.2 การอบเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 ตัวเก็บประจุที่เคลือบเรซินเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

รายละเอียดของตัวเก็บประจุย่อยและคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIMA MKP 10



Polypropylene capacitors for pulse applications with electrodes of double-sided metallized carrier film

- Self-healing pulse duty construction with low ESR. ■ Extremely low dissipation factor (tan delta). ■ For all pulse duty applications even with high high frequencies. ■ Wide range of capacitances and rated voltages for applications in switch mode power supplies, frequency dividing in loudspeakers, in lighting, monitors and TV-sets.
- Available taped and reeled up to and including case size 15 x 26 x 31.5/PCM 27.5 mm.

Technical Data / General Data

Dielectric: Polypropylene film.
 Capacitor electrodes: Double-sided metallized plastic film.
 Encapsulation: Flame-retardent plastic case, UL 94 V-0, with epoxy resin seal.
 Colour: Red.
 Marking: Black.
 Temperature range: -55° C to +100° C
 Test category: 55/100/56 in accordance with IEC
 Insulation resistance at +20° C:
 C ≤ 0.33 μF: ≥ 1 x 10⁵ megohms
 (mean value: 5 x 10⁵ megohms)
 C > 0.33 μF: ≥ 30 000 sec (megohms x μF)
 (mean value: 100 000 sec)
 Measuring voltage: 100 V/1 min.
 Dissipation factors at +20° C: tan delta

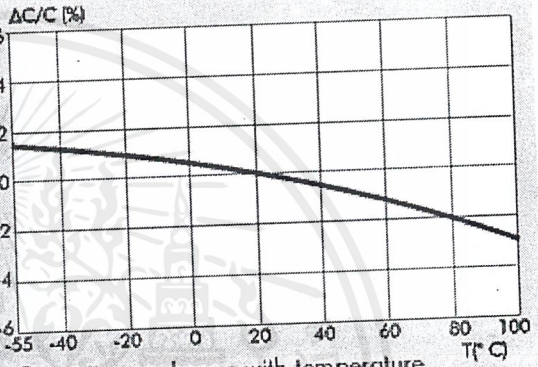
at f	C ≤ 0.1 μF	0.1 μF < C ≤ 1.0 μF	C > 1.0 μF
1 kHz	≤ 3 x 10 ⁻⁴	≤ 3 x 10 ⁻⁴	≤ 3 x 10 ⁻⁴
10 kHz	≤ 4 x 10 ⁻⁴	≤ 6 x 10 ⁻⁴	-
100 kHz	≤ 15 x 10 ⁻⁴	-	-

Capacitance tolerances: +/-20%, +/-10%, +/-5%.
 Maximum pulse rise time:

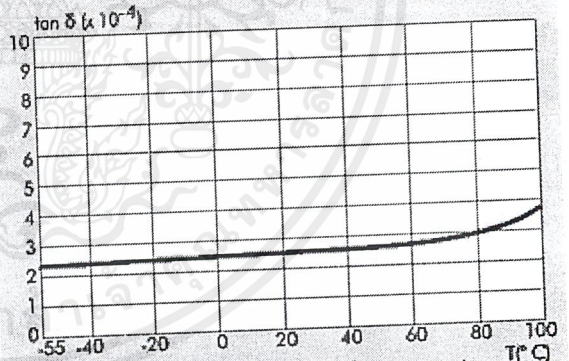
Capacitance pF/μF	Pulse rise time V/μsec max. operation					
	160 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600VDC 2000VDC
1000...2200	-	-	-	1000	1800	3000
3300...6800	-	-	600	950	1300	1500
0.01...0.022	-	400	420	950	950	1000
0.033...0.068	200	150	200	600	700	700
0.1...0.22	110	130	130	350	430	430
0.33...0.68	70	85	100	250	300	300
1.0...2.2	55	65	75	150	200	250
3.3...4.7	40	65	75	150	-	-
6.8...10	30	35	-	-	-	-

Test voltage: 1.6 Ur, 2 sec.
 Vibration: 6 hours at 10...2000 Hz and 0.75 mm displacement amplitude or 10 g in accordance with IEC 60068-2-6.
 Low air density: 1 kPa = 10 mbar in accordance with IEC 60068-2-13.
 Bump test: 4000 bumps at 390 m/sec² in accordance with IEC 60068-2-29.
 Voltage derating: A voltage derating factor of 1.35% per K must be applied from +85° C for DC voltages and from +75° C for AC voltages.

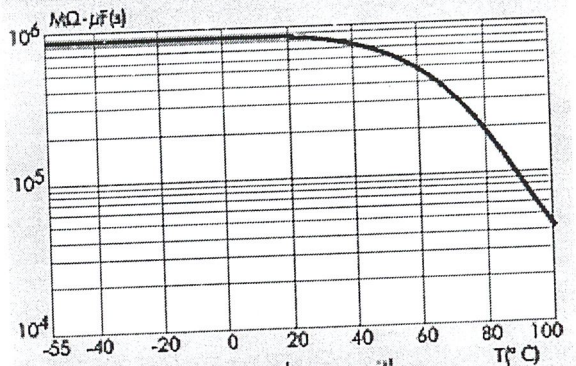
Taping:



Capacitance change with temperature (f=1 kHz) (general guide)

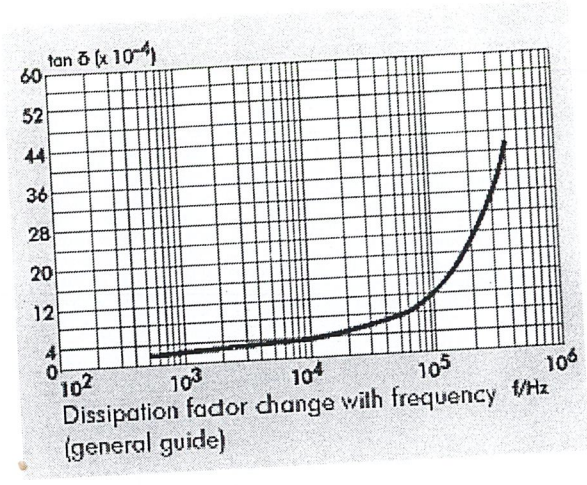


Dissipation factor change with temperature (f=1 kHz) (general guide)



Insulation resistance change with temperature (general guide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

taping

Typical dimensions for taping configuration

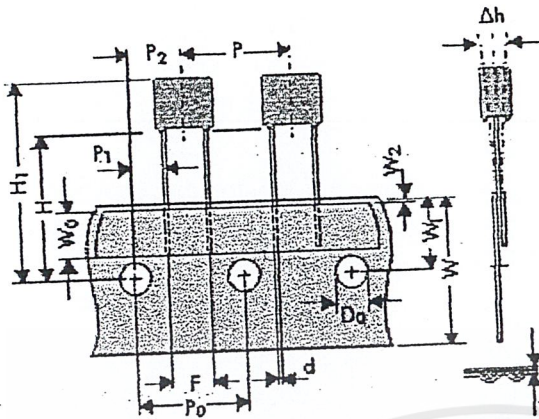


Diagram 1:
PCM 2.5/5/7.5 mm

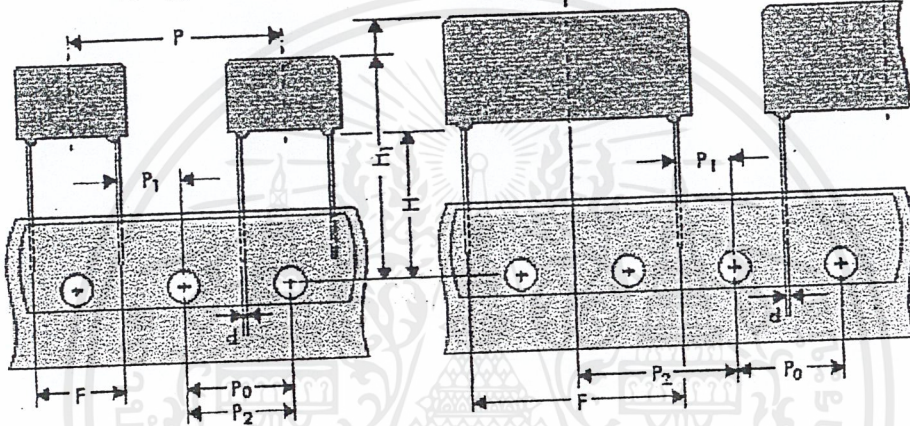


Diagram 2: PCM 10/15 mm

Diagram 3: PCM 22.5 and 27.5* mm

*PCM 27.5 taping possible with two feed holes between components

Dimensions for radial insertion								
Designation	Symbol	PCM 2.5	PCM 5	PCM 7.5	PCM 10**	PCM 15**	PCM 22.5	PCM 27
Carrier tape width	W	18.0 \pm 0.5	18.0 \pm 0.5	18.0 \pm 0.5	18.0 \pm 0.5	18.0 \pm 0.5	18.0 \pm 0.5	18.0 \pm 0.5
Hold-down tape width	W0	6.0 for hot-sealing adhesive tape	6.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape
Hole position	W1	9.0 \pm 0.5	9.0 \pm 0.5	9.0 \pm 0.5	9.0 \pm 0.5	9.0 \pm 0.5	9.0 \pm 0.5	9.0 \pm 0.5
Hold-down tape position	W2	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.
Feed hole diameter	D0	4.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2
Pitch of component	P	12.7 \pm 1.0	12.7 \pm 1.0	12.7 \pm 1.0	25.4 \pm 1.0	25.4 \pm 1.0	38.1 \pm 1.5	50.8 \pm 1.5
Feed hole pitch	P0	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch	12.7 \pm 0.3 cumulative pitch error max. 1.0mm/20pitch
Feed hole centre to lead	P1	5.1 \pm 0.5	3.85 \pm 0.7	2.6 \pm 0.7	7.7 \pm 0.7	5.2 \pm 0.7	7.8 \pm 0.7	5.3 \pm 0.7
Hole centre to component centre	P2	6.35 \pm 1.3	6.35 \pm 1.3	6.35 \pm 1.3	12.7 \pm 1.3	12.7 \pm 1.3	19.05 \pm 1.3	19.05 \pm 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

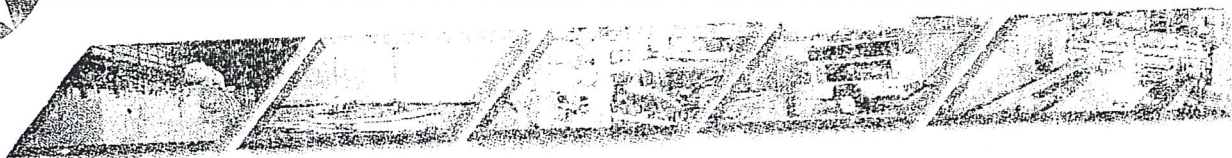
Minimum packing units

Minimum packing units for capacitors with radial leads

PCM	Box size			pieces per packing unit						
				bulk	TPS*	ROLL	REEL		AMMO	
	W	H	L				Ø 360	Ø 500	340x340	490x370
PCM 2.5 mm	2.5	5.5	4.6	1000	-	2200	2500	-	2800	-
	2.5	7	4.6	1000	-	2200	2500	-	2800	-
	3	7.5	4.6	1000	-	2000	2300	-	2300	-
	3.8	8.5	4.6	1000	-	1500	1800	-	1800	-
	2.6	9	4.6	1000	-	1200	1500	-	1500	-
	5.5	10	4.6	1000	-	900	1200	-	1200	-
	5.5	10	4.6	1000	-	900	1200	-	1200	-
PCM 5 mm	2.5	5.5	7.2	1000	-	2200	2500	-	2800	-
	2.5	6.5	7.2	1000	-	2200	2500	-	2800	-
	3	7.5	7.2	1000	-	2000	2300	-	2300	-
	3.5	8.5	7.2	1000	-	1600	2000	-	2000	-
	4.5	6	7.2	500	-	1300	1500	-	1500	-
	4.5	8.5	7.2	500	-	1300	1500	-	1500	-
	4.5	9.5	7.2	500	-	1300	1500	-	1400	-
	5	9	7.2	500	-	1100	1400	-	1400	-
	5	10	7.2	500	-	1100	1400	-	1200	-
	5.5	7	7.2	500	-	1000	1200	-	1200	-
	5.5	11.5	7.2	500	-	1000	1000	-	1000	-
	6.5	8	7.2	500	-	700	1000	-	1000	-
	7.2	8.5	7.2	500	-	700	1000	-	800	-
	7.2	13	7.2	500	-	600	800	-	800	-
	8.5	10	7.2	500	-	600	800	-	800	-
	8.5	14	7.2	500	-	600	800	-	800	-
	PCM 7.5 mm	2.5	7	10	1000	-	-	2500	4400	2800
3		8.5	10	500	-	-	2200	4300	2300	4150
4		9	10	500	-	-	1700	3200	1700	3100
4.5		9.5	10.3	500	-	-	1500	2900	1400	2800
5		10.5	10.3	500	-	-	1300	2500	1300	-
5.7		12.5	10.3	300	-	-	1000	2200	1100	-
5.7		12.5	10.3	300	-	-	1000	2200	1100	-
PCM 10 mm	3	9	13	500	-	-	1100	2200	-	1950
	4	8.5	13.5	1000	-	-	900	1600	-	1450
	4	9	13	300	-	-	900	1600	-	1450
	4	9.5	13	300	-	-	700	1300	-	1200
	5	10	13.5	1000	-	-	700	1300	-	1200
	5	11	13	250	-	-	550	1100	-	1000
	6	12	13	200	-	-	550	1100	-	1000
PCM 15 mm	4	10	18	250	-	-	700	1600	-	1500
	5	11	18	200	-	-	600	1200	-	1150
	5	13	19	1000	-	-	600	1200	-	1200
	6	12.5	18	250	-	-	500	1000	-	1000
	6	14	19	1000	-	-	500	1000	-	1000
	7	14	18	200	-	-	450	900	-	850
	7	15	19	1000	-	-	450	900	-	850
	8	15	18	200	-	-	400	800	-	740
	8	17	19	500	-	-	400	800	-	740
	9	16	18	150	-	-	350	700	-	650
PCM 22.5 mm	5	14	26.5	-	180	-	-	800	-	770
	6	15	26.5	-	155	-	-	700	-	640
	7	16.5	26.5	-	130	-	-	600	-	550
	8	20	28	-	115	-	-	500	-	480
	8.5	18.5	26.5	-	110	-	-	480	-	450
	10	22	28	-	90	-	-	420	-	380
	10.5	19	26.5	-	85	-	-	400	-	360
	10.5	20.5	26.5	-	85	-	-	400	-	360
	11	21	26.5	-	85	-	-	380	-	350
	12	24	28	-	75	-	-	350	-	310
PCM 27.5 mm	9	19	31.5	-	80	-	-	460/340*	-	420
	11	21	31.5	-	68	-	-	380/280*	-	350
	13	24	31.5	-	56	-	-	300	-	290
	13	25	33	-	56	-	-	-	-	250
	15	26	31.5	-	48	-	-	270	-	-
	15	26	33	-	48	-	-	-	-	-
	17	29	31.5	-	44	-	-	-	-	-
	17	34.5	31.5	-	44	-	-	-	-	-
	20	32	33	-	36	-	-	-	-	-
PCM 37.5 mm	9	19	41.5	-	60	-	-	-	-	-
	11	22	41.5	-	51	-	-	-	-	-
	13	24	41.5	-	42	-	-	-	-	-
	15	26	41.5	-	36	-	-	-	-	-
	17	29	41.5	-	33	-	-	-	-	-
	19	32	41.5	-	27	-	-	-	-	-
	20	39.5	41.5	-	27	-	-	-	-	-

* for 2-inch transport pitches
 * Tray-Packing-System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Transformer Oil

Electrical Insulating Oil

Highly refined, naphthenic transformer oil for use where insulating oils meeting the ASTM D3487 Type I transformer oil specification are recommended. Does not contain polychlorinated biphenyls (PCBs).

APPLICATIONS

- Transformers
- Oil-immersed switchgear
- Circuit breakers
- Oil-filled capacitors
- Tap changers
- Electrical reclosures
- Fuses

PERFORMANCE STANDARDS

- ASIM D3487 Type I

ENVIRONMENT, HEALTH and SAFETY

Information is available on this product in the Caltex Material Safety Data Sheet (MSDS) and Caltex Customer Safety Guide. Customers are encouraged to review this information, follow precautions and comply with laws and regulations concerning product use and disposal.

BENEFITS

- ☼ Prolongs transformer life**
 Low viscosity and low pour point provide excellent fluidity at low temperatures and ensure superior convective and conductive heat transfer to improve cooling of transformer components under all operating conditions. Low solvency protects electrical wire enamels.
- ☼ Maximizes life of oil-immersed switches**
 The rapid quenching of arcs reduces contact erosion.
- ☼ Maintains transformer efficiency**
 High dielectric strength and low dissipation factor provide excellent insulating characteristics.
- ☼ Long service life**
 Highly refined base fluids limit the formation of sludges, deposits and soluble compounds which lead to a breakdown of the oil's electrical properties.

KEY PROPERTIES

Transformer Oil	
Dielectric Strength (IEC 156), kV	38
Dielectric Dissipation Factor @ 100°C, %	<0.15
Flash Point, CCC, °C	151
Interfacial Tension @ 25°C, mN/m	45
Pour Point, °C	-51
Viscosity,	
mm ² /s @ 40°C	8.9
mm ² /s @ 100°C	2.4

9/08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ผลิตขึ้นที่มีค่าจนกว่าจะ



Transformer Oil

SERVICE CONSIDERATIONS

Although transformers are highly efficient in changing the voltage of alternating current without changing its frequency, this change is accompanied by a slight loss of energy in the form of heat. A fluid medium such as oil is used to cool the unit and insulate the electrical coils from shorting out. Therefore, the fluid must have excellent fluidity, even at low temperatures, and must be essentially non-conductive. Special refining steps are used to ensure that oil-soluble current-carrying ionic materials are removed from the petroleum crude stocks.

Dryness and cleanliness are critical to the performance of transformer oils. Moisture contamination will cause deterioration of the electrical insulating properties of the oil.

Containers should be stored under cover, with drums inverted or on their sides with the bungs in the horizontal position to avoid breathing of humid air.

Never leave containers standing open for long periods.

As a general rule, all shipments of electrical insulating oils should be tested for dielectric strength before being placed in service. If the dielectric strength is low, the oil should be reconditioned by filtration or dehydration, or both. Proper and careful sampling techniques (such as those outlined in ASTM D923) are essential to ensure that a suitable sample is obtained for testing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

มาตรฐานของ โวลเตจดีไวเซอร์

IEC. Publication NO.60-2, "High Voltage Test Techniquess-Part2 : Measuring Systems".,1994.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

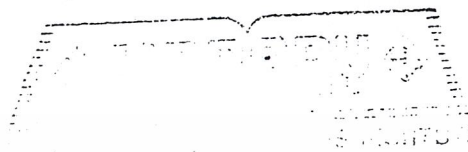
NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
60-2

1994

AMENDEMENT 1
AMENDMENT 1

1996-03



Amendement 1

Techniques des essais à haute tension

Partie 2:
Systèmes de Mesure

Amendment 1

High-voltage test techniques

Part 2:
Measuring Systems

© CEI 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

N

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For prices, see current catalogue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 Definitions and symbols

For the purposes of this part of IEC 60, the following apply.

3.1 *Measuring Systems*

3.1.1 Measuring System: Complete set of devices suitable for performing a high-voltage or impulse-current measurement.

NOTES

1 A Measuring System usually comprises the following components: a converting device with the leads required for connecting this device to the test object or into the current circuit and the connections to earth, a transmission system connecting the output terminals of the device to the indicating or recording instruments with its attenuating, terminating and adapting impedances or networks, and indicating or recording instruments together with any connections to the power supply. Measuring Systems which comprise only some of the above components or which are based on non-conventional principles are acceptable if they meet the accuracy requirements specified in this standard. Components may be made of many elements or a single element, for example, a high-voltage capacitor or a capacitor divider may consist of many low-voltage capacitors or it may consist of a single gas capacitor.

2 The environment in which a Measuring System functions, its clearances to live and earthed structures and the presence of electric or magnetic fields may significantly affect its accuracy.

3.1.2 Record of Performance of a Measuring System: Detailed record, established by the user, describing the system and containing evidence that the requirements given in this standard have been met. This evidence shall include the results of the initial Performance Test and the schedule and results of each subsequent Performance Test and Performance Check.

3.1.3 Approved Measuring System: Measuring System which is shown to comply with one or more of the sets of requirements set out in this standard by:

- an initial Performance Test,
- successive Performance Checks and Performance Tests,
- inclusion of the results of these tests in the Record of Performance.

The system is approved only for the arrangements and operating conditions included in its Record of Performance.

3.1.4 Reference Measuring System: Measuring System having sufficient accuracy and stability for use in the approval of other systems by making simultaneous comparative measurements with specific types of waveform and ranges of voltage or current.

NOTE - A Reference Measuring System (maintained according to the requirements of this standard) can be used as an Approved Measuring System but the converse is not true.

3.1.5 IEC Standard Measuring Device: Device that can be used for measuring high-voltage with the specified accuracy (for example a sphere-gap or a rod/rod gap used according to IEC 60-1).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 *Converting devices*

3.2.1 converting device: Device for converting the quantity to be measured into another quantity, compatible with the indicating or recording instrument.

3.2.2 voltage divider: Converting device consisting of a high-voltage and a low-voltage arm such that the input voltage is applied across the complete device and the output voltage is taken from the low-voltage arm. [IEV 301-05-13, modified]

NOTE – The elements of the two arms are usually resistors or capacitors or combinations of these and the device is described by the type and arrangement of its elements (for example, resistor, capacitor or resistor-capacitor).

3.2.3 voltage transformer: Step-down transformer for the measurement of the parameters of high alternating voltages. [IEV 321-03-01, modified]

3.2.4 high-voltage measuring impedance: Device which carries a current proportional to the applied voltage.

3.2.5 current-measuring shunt: Resistor across which the voltage is proportional to the current to be measured. [IEV 301-06-05, modified]

3.2.6 compensated current-measuring device: Current-measuring device which includes a compensating circuit.

3.2.7 current transformer: Transformer which produces an output proportional to the input current. [IEV 321-02-01, modified]

NOTE – A Rogowski coil used with an integrating circuit is a wide-band current transformer.

3.2.8 electric-field probe: Converting device for the measurement of the amplitude and waveform of an electric field.

NOTE – An electric-field probe may be used to measure the waveform of the voltage producing the field provided that the measurement is not affected by corona.

3.3 transmission system: Set of devices which transfers the output signal of a converting device to an indicating and/or recording instrument.

NOTES

1 A transmission system generally consists of a coaxial cable with its terminating impedance, but it may include attenuators or other devices connected between the converting device and the instrument. For example, an optical link includes the transmitter, the optical cable and the receiver as well as related amplifiers.

2 A transmission system may be partially or completely included in the converting device.

3.4 Indicating or recording instrument: Device intended to display or provide a record of the value of a measurand or a related value. [IEV 301-02-11 and 12, modified]

3.5 Scale factors

3.5.1 scale factor of a Measuring System: Factor by which the value of the instrument reading is to be multiplied to obtain the value of the input quantity.

NOTES

- 1 A Measuring System may have more than one scale factor, for example, it may have different scale factors for different frequency ranges or waveforms (see 3.6.1).
- 2 For some Measuring Systems the value of the input quantity is displayed directly (i.e., the scale factor of the Measuring System is unity).

3.5.2 scale factor of a converting device: Factor by which the output of the converting device is to be multiplied to obtain its input quantity.

NOTE – The scale factor of a converting device may be dimensionless (for example, the ratio of a divider) or may have dimensions (for example, the impedance of a high-voltage measuring impedance).

3.5.3 scale factor of a transmission system: Factor by which the output of a transmission system is to be multiplied to obtain its input quantity.

3.5.4 scale factor of an indicating or recording instrument: Factor by which the instrument reading is to be multiplied to obtain its input quantity.

3.5.5 Assigned Scale Factor: Scale factor of a Measuring System determined at the most recent Performance Test.

NOTE – A Measuring System may have more than one Assigned Scale Factor, for example, it may have several Nominal Epochs each with a different value (see 3.6.1)

3.6 Definitions related to the dynamic behaviour of a Measuring System

3.6.1 Nominal Epoch τ_N (Impulse measurements, front part of impulse only): Range of values between the minimum (t_{\min}) and the maximum (t_{\max}) of the relevant time parameter of impulses for which the Measuring System is to be approved. The relevant time parameter is:

- | | |
|----------------------------|---|
| the front time T_1 | for full lightning and tail-chopped impulses and for current impulses |
| the time to chopping T_c | for front-chopped impulses |
| the time to peak T_p | for switching impulses |

NOTES

1 A Measuring System may have one, two or more Nominal Epochs for different waveforms. For example, a particular Measuring System might be approved:

- for full lightning impulses with an Assigned Scale Factor F_1 over a Nominal Epoch τ_{N1} from $T_1 = 0,8 \mu\text{s}$ to $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$
- for front-chopped lightning impulses with an Assigned Scale Factor F_2 over a Nominal Epoch τ_{N2} from $T_c = 0,5 \mu\text{s}$ to $T_c = 0,9 \mu\text{s}$
- for switching impulses with an Assigned Scale Factor F_3 over a Nominal Epoch τ_{N3} from $T_p = 200 \mu\text{s}$ to $T_p = 300 \mu\text{s}$.

2 "Front-chopped impulse" is used to designate a chopped impulse with a time to chopping in the range $0,5 \mu\text{s}$ to $2 \mu\text{s}$ as distinct from a "tail-chopped impulse" which has a time to chopping greater than $2 \mu\text{s}$.

6 Performance Tests on Measuring Systems

6.1 General requirements

The Assigned Scale Factor of the Measuring System is determined by calibration using the specified Performance Tests. For an Impulse Measuring System, the Performance Tests also show that its dynamic performance is adequate for the specified measurements and that the level of any disturbance is less than the specified limits.

In high-voltage tests, the size of the apparatus, the levels of voltage and current used, and the interaction between the test and measuring circuits often make it necessary to perform calibration tests in the test facility of the user.

However, Measuring Systems or their components may be transported to another laboratory for calibration in an arrangement which simulates the operating conditions, provided that the interference test, when specified, is performed in the test facility of the user. The simulated arrangement shall represent the operating conditions described in the Record of Performance and this simulated arrangement shall also be described in the Record of Performance.

Unless type tests show a converting device is not sensitive to proximity effects over a specified range of clearances the Assigned Scale Factor of any Measuring System based on that converting device shall be measured for each condition of use. Each set of clearances or range of clearances shall be entered in the Record of Performance.

The input voltage or current used for calibration should be of the same type, frequency or waveform as voltages or currents to be measured. When this condition is not fulfilled, evidence shall be given of the validity of the Assigned Scale Factor in the range of frequency or waveforms to be used.

The reference method of determining the Assigned Scale Factor is comparison with a Reference Measuring System at the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current whenever possible. However, as Reference Measuring Systems are not always available at the highest voltages and currents, the comparison may be made at voltages or currents as low as 20 % of the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current (see 6.2 a)).

For lightning impulses with peak values over 1 MV, it may be made at 200 kV. Alternatively, the Assigned Scale Factor may be determined by measuring the scale factor of each component, usually at low voltage, and taking the product of the scale factors of the components (see 6.2 b)).

The voltage or current used to determine the Assigned Scale Factor shall be included in the range covered by the linearity test.

All equipment used in establishing the scale factors of Measuring Systems and all instruments used in Measuring Systems shall have calibrations traceable to National Measurement Standards (Etalons).

The conditions under which the calibration has been performed shall be included in the Record of Performance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 value F_m is taken 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_0 may be taken as the Assigned Scale Factor if, introduced in place of F_m in the formula for s , it gives the value of s less than 1 % of F_m .
2. For measurement of direct and alternating voltages, independent readings may be obtained either by applying the test voltage and taking n readings or by applying the test voltage n times and taking a reading each time. For impulses, n impulses are applied.

The test shall be performed at a single voltage or current level (see 6.1). The setting of the measuring instrument may be changed or a different instrument may be used to achieve a suitable sensitivity, provided that this change does not alter the rest of the Measuring System and that the settings used on each instrument have been calibrated.

If only one measuring instrument is available (this measuring instrument is the instrument to be used in the Approved Measuring System and shall meet the relevant IEC standard) the test may be made by the repeated alternate connection of the instrument to each system to provide the n values F_i . A termination equivalent to the instrument shall be connected in the place of the instrument in the other system. All other parts of both systems shall remain unchanged.

A Measuring System with several scale factors (for example, the use of different low-voltage arms for a voltage divider) shall be calibrated for each scale factor. Measuring Systems with secondary voltage dividers may be calibrated on one setting only, provided that the load on the output of the converting device can be shown to be constant for all settings by other tests. For such cases the full range of settings of the secondary divider shall be calibrated separately.

NOTE - For the use of oscilloscope probes see annex G.

b) *Alternative Method: component calibration*

The Assigned Scale Factor shall be determined as the product of the scale factors of its converting device, its transmission system and its measuring instrument.

For the converting device and the transmission system or their combination, the scale factor shall be measured by one of the methods given in 5.2 to assure a total uncertainty not larger than 1 % (care should be taken to ensure the appropriate "stray" capacitance or coupling and the mutual influence of the components are included in the measurement).

The scale factor of an instrument is determined according to the relevant IEC standard (see clause 2) or by performing the relevant tests given in this part of IEC 60.

6.3 *Dynamic behaviour test (for Impulse Measuring Systems)*

a) *Reference method: comparison with a Reference Measuring System*

The same records taken in the test of 6.2 a) can be used and the relevant time parameters of the measured impulses evaluated for each system and:

- the value of each time parameter shall be within ± 10 % of the corresponding value measured by the Reference Measuring System,
- for each time parameter, the experimental standard deviation of the ratio of the corresponding readings of the system under test and the Reference Measuring System shall be less than 5 % of the mean value of the ratio.

b) *Alternative Method: step response measurement*

The step response of the Measuring System shall be measured according to 5.8.2. The relevant response parameters shall be determined and shall meet the requirements given in the relevant clause of this part of IEC 60.

6.4 *Interference test (for Impulse Measuring Systems)*

The test shall be made on the Measuring System, with its cable or transmission system short-circuited at its input terminals without changing the earth connections of the cable or transmission system. An interfering condition shall be produced at the input of the Measuring System (for voltage measurements – by a disruptive discharge with an impulse representative of the waveform to be applied; for current measurements – by operation of an appropriate device) and the output shall be recorded. The test shall be made at the Rated Measuring Voltage or Rated Measuring Current.

The amplitude of the measured interference shall be less than 1 % of the output of the Measuring System when measuring the test voltage or current. Interference greater than 1 % is permitted provided it is shown that it does not affect the measurement.

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 scale factor

The scale factors 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 $\pm 1\%$.

8.1.2 Dynamic behaviour

The amplitude/frequency response of the Measuring System shall not vary by more than $\pm 2\%$ between 0,2 times and seven times the frequency of the test voltage. When the presence of the test object enhances the harmonic content above the seventh harmonic the amplitude/frequency response shall not vary by more than $\pm 2\%$ up to the frequency of the highest significant harmonic. Special requirements may be specified by the relevant technical committee.

NOTES

- 1 In certain cases, it may be necessary to measure voltage transients superimposed on an alternating voltage. No requirements for this are given here but some guidance may be obtained from clause 9.
- 2 Some sources do not generate harmonics (for example, series resonant test sets).

8.2 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

The requirements of the type tests can be met by tests on a unit of the same type or sometimes from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit. See clause 5 for details and 4.4.2 for exceptions.

The components of a Measuring System shall meet the requirements of the following type and routine tests:

Type tests:

- temperature effect on the converting device and the transmission system and on their scale factors (5.6),
- long-term stability (5.5),
- proximity effect (if required) (5.7),
- wet or polluted withstand test on the converting device (if required) (5.9),
- dynamic behaviour (5.8).

Routine tests:

- determination of the scale factors (5.2),
- linearity test (5.3, additional alternative methods 8.2.1),
- short-term stability (5.4),
- dry withstand test on the converting device (5.9).

8.2.1 *Linearity test: requirements and additional alternative methods*

The linearity test shall be made according to 5.3.

Additional alternative methods are:

a) *Comparison with a sphere-gap*

The Measuring System shall be checked against a sphere-gap used according to 8.5 of IEC 52. Tests shall be made with gap spacings corresponding to the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced gap settings between these extremes.

The complete linearity test shall be made in a short time so that atmospheric conditions do not change and hence corrections need not be applied. If each of the five ratios of the disruptive discharge voltage of the gap to the corresponding output of the system under test is within $\pm 1\%$ of their mean value then the system can be considered linear.

b) *Method for multi-section capacitor converting devices*

For a converting device consisting of several identical high-voltage units a test consisting of the following three steps shall be made:

- a type test on an equivalent complete converting device (equipped with its electrodes) as specified in 5.3,
- measurement of the capacitance of each high-voltage unit at the five voltages specified in 5.3. The capacitance of each unit shall not change over the voltage range by more than $\pm 1\%$,
- the assembled converting device shall be free from visible and audible corona at the Rated Measuring Voltage.

c) *Comparison with the input voltage of a transformer or a transformer cascade*

The Measuring System shall be connected to measure the output of the transformer. The output of the Measuring System shall be checked against the input voltage of the transformer. Tests shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of the five ratios of the measured voltage to the corresponding input voltage is within $\pm 1\%$ of their mean value then the Measuring System is considered linear.

NOTE - Attention should be paid to the possible variation of the voltage ratio of the transformer because of the load and non-linear characteristics of the magnetic circuit.

d) *Comparison with the output of an electric-field measuring instrument*

The Measuring System shall be checked against an electric-field measuring instrument which is so located that it measures a field proportional to the voltage being measured. The electric-field measuring instrument is used according to the relevant requirements of IEC 833. The test shall be made at the minimum and maximum values of the operating voltage range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. If each of the five ratios of the measured voltage to the corresponding measured electric field is within $\pm 1\%$ of their mean value then the Measuring System is considered linear.

8.2.2 *Determination of the scale factor of a peak voltmeter*

The scale factor shall be determined using a known sinusoidal voltage of rated frequency.

NOTE - Indicating instruments other than peak voltmeters are calibrated according to IEC 51.

8.3 *Performance Test on Measuring Systems*

The Assigned Scale Factor shall be determined according to 6.2.

8.4 *Performance Check*

The scale factor(s) of an Approved Measuring System can be checked by one of the following methods.

a) *Check of the scale factors of the components*

The scale factor(s) of each component can be checked using internal or external calibrators having an uncertainty within $\pm 1\%$. If each scale factor differs from its previous value by not more than $\pm 1\%$, the Assigned Scale Factor is taken as still valid. If any difference exceeds $\pm 1\%$ then a new value of the Assigned Scale Factor shall be determined (see third paragraph of 4.2).

b) *Check of the scale factor of the Measuring System*

A comparison shall be made with another Approved Measuring System with the procedure of 6.2 a) or with an IEC Standard Measuring Device according to IEC 52.

When the difference between the two measured values is within $\pm 3\%$, the Assigned Scale Factor is taken as still valid. When the difference is larger, then the Assigned Scale Factor shall be determined again (see third paragraph of 4.2).

8.5 *IEC Standard Measuring Device*

The sphere-gap, used according to IEC 52, is an IEC Standard Measuring Device for the peak value with an uncertainty within $\pm 3\%$.

5 Acceptance tests on components for an Approved Measuring System

5.1 *Applicability*

The tests 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 instruments which meet the requirements of the relevant standard referenced in clause 2. Some of these tests cannot be performed on existing equipment (see 5.6 and 5.9): for these cases see 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 components have been shown 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 measurements of its input and output quantities,
- a bridge method,
- calculation based on measured 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 range and at three approximately equally spaced voltages or currents 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

or one of the additional methods described in the relevant clauses of this standard.

These 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.

5.4 *Short-term stability test*

The full rated voltage or current shall be applied to the device continuously (or in the case of impulses, at the maximum rate) for a period appropriate to the anticipated use.

The scale factor shall be measured before and immediately after (within 10 min) the application of the voltage or current. The two values shall not differ by more than 1 %.

5.5 *Long-term stability of single elements*

The stability characteristics, voltage and current effects and temperature effects of each type of element, shall be such that the scale factor of a converting device does not change by more than 1 % between successive Performance Tests.

These characteristics may be taken from manufacturer's data or demonstrated by successive Performance Tests.

5.6 *Temperature effect*

The variations of the scale factor or of a parameter (for example, resistance or capacitance) of a device due to changes of the ambient temperature are determined by computation using the temperature coefficients of single elements or by making measurements at different temperatures.

The temperature coefficients shall be listed in the Record of Performance and may be taken from manufacturer's data.

Temperature correction factors may be used in cases where the ambient temperature varies over a wide range. Any temperature corrections to be used shall be listed in the Record of Performance.

In each case, it shall be shown that the scale factor is within 1 %, taking into account any temperature correction (see annex D).

5.7 *Proximity effect*

Variations of the scale factor or of a parameter of a device, due to proximity effects, can be determined by measurements performed for different distances of the device from an earthed wall or an energized structure, the distances from other earthed walls or energized structures remaining constant or so large there is no effect.

For each range of distances listed in the Record of Performance, it shall be shown that the scale factor is within 1 %.

For current measurements, the effects of off-centre paths (when relevant) and the effects of nearby paths for high currents can be determined by measurements performed for different paths and distances to current-carrying conductors.

NOTE - Some test facilities may choose to approve their Measuring Systems for only a single set of distances or for a few sets or ranges of distances.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 *Dynamic behaviour of a component*

The response of the component shall be determined in a Measuring System representative of its operating conditions, particularly clearances to earthed and energized structures. Either the amplitude/frequency response or the step response shall be measured.

5.8.1 *Determination of the amplitude/frequency response*

The system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for an appropriate range of frequencies.

5.8.2 *Determination of the step response*

The system is subjected to a voltage or current step and its output is measured (see annex C). The rise time of the applied step should be less than $1/10$ of the partial response time T_{α} .

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 any 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.

Annex G (informative)

Areas where special care is needed

G.1 Measurement of the scale factor of a divider (see 5.2)

Divider ratios can be determined by measuring the impedances of the high-voltage and low-voltage arms separately. The ratio is then obtained by dividing the sum of the impedances by the impedance of the low-voltage arm. An alternative technique consists of applying a voltage to the divider and simultaneously measuring the input and output voltages. The ratio is determined by dividing the input voltage by the output voltage.

For resistor dividers, the resistance of the high-voltage and low-voltage arms are often measured with a low direct voltage by means of a Wheatstone bridge or by means of an ohmmeter providing it has sufficient accuracy.

The ratios of capacitor-type dividers are affected by stray capacitance, therefore, their ratios should be determined with the high-voltage arms positioned in the locations normally occupied during the tests. For capacitor or series resistor/capacitor dividers, the capacitance of the high-voltage arms may be measured by means of a Schering bridge or a transformer ratio-arm bridge. The use of a low-voltage general purpose RLC bridge is not recommended because lead and stray capacitances can be included in the measurements and the resulting ratio may be in error.

For parallel resistor/capacitor dividers, the resistance and capacitance of the high-voltage arms may be measured by temporarily removing the resistors from the high-voltage arm and measuring the capacitance of the remaining column using the technique described above. The resistance of the high-voltage arm is measured either *in situ* or when the resistors have been temporarily removed from the capacitor column. The ratios of the resistance and capacitances in the two branches of the divider should be equal. If the resistors cannot be removed from the high-voltage arm, the ratio may be determined by measuring the ratio of the resistive branch with direct voltage and subsequently checking the response of the completed divider to a square wave. The rise-time of the square wave should be such that the divider response is not oscillatory. The output and input waveforms should be the same without any evidence of overshoot. This method is less accurate than the others.

G.2 Probes and external attenuators

Special precautions should be taken to avoid accidental changes when an oscilloscope probe is used in conjunction with the voltage divider in order to reduce the signal to a level suitable for the digital recorder or oscilloscope. It is essential that the probe compensation be properly adjusted before making any measurement. The compensation is made by applying a square-wave voltage signal and altering the adjustable components of the probe or attenuator circuits while observing the output signal from the probe on the oscilloscope screen.

It should be noted that the built-in square-wave generators in most oscilloscopes do not have rise times which are fast enough or top levels which are long enough for compensation purposes if the probe is to be used for the measurement of standard lightning impulses. It is therefore recommended that an external signal generator be used which has a rise time less than 0,1 μ s and a top level of at least 1 ms duration. If the probe is to be used in the determination of the step response of the Measuring System, then the rise time of the square wave should be < 2 ns.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G.3 Probe scale factor

The scale factor of some oscilloscope probes cannot be determined from impedance measurements; in these cases the scale factor can be determined by applying a voltage to the probe which can be accurately measured by means of an external voltmeter and measuring the output voltage by the oscilloscope (calibrated according to relevant IEC standards).

The probe compensation must be adjusted for optimum response before making these measurements. A single-shot step generator can be used and the d.c. level before the application of the step is the input signal to be measured.

Alternatively, an a.c. signal may be used providing its frequency is within the measuring capability of the external voltmeter. Another technique is to use a standard pulse generator (IEC 1083-1) providing it has adequate accuracy. Whichever technique is used, the probe signal should agree with the external voltmeter or the impulse calibrator to within 1 %.

When two similar probes are being used during comparative measurements, a useful check can be performed by connecting both probes to the same input signal. The resulting waveforms should agree to within 0,5 % for measurements of amplitude and to within 1 % for measurements of time parameters.

G.4 Use of appropriate levels

In order to achieve the required accuracy during impulse measurements, the scale factor of the Measuring System should be adjusted so that the signal deflection occupies almost the full screen. On an 8-bit digital recorder this will result in an amplitude uncertainty of approximately 0,5 %. If only half-full screen deflection is used, the uncertainty will increase to 1 % and if smaller deflections are used the uncertainties will be even greater.

These uncertainties may be reduced by using a 10-bit or a 12-bit digital recorder, provided the sampling rate is fast enough to measure the front time of a standard lightning impulse. A minimum sampling rate of 60 million samples per second (sampling time = 17 ns) is required in order to measure the fastest lightning impulses.

The digital recorder or oscilloscope including any internal attenuator should be checked for accuracy, preferably by means of a standard pulse generator. When two channels are used during comparative measurements, the check described above for probes should also be used for the channels being used. The measured waveforms should agree to within 0,5 % for measurements of amplitude and to within 1 % for measurements of time parameters.

G.5 Accuracy of time measurements

Internal clocks in modern digital recorders are often sufficiently accurate and stable for errors from this source to be negligible. However it is necessary (and sufficient) to demonstrate that the instrument meets the requirements of IEC 1083-1.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากทางผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีจาก รศ. ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ พี่โต้ง พี่เล็ก พี่บอย และพี่ปริญญาโททุกคนที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจเรื่อยมา รวมทั้งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทศาลเท็กซ์ ประเทศไทย จำกัด ที่ได้ช่วยเหลือให้นำมันหม้อแปลงมาใช้เป็นฉนวนในการทำปริญญาานิพนธ์ และ พี่ประเสริฐและเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตบางพลีทุกคนที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ใช้สถานที่ทำการทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์และคอยเป็นกำลังใจเสมอมา ขอบใจญาติภาคเคมี เพื่อนๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร 2528.
- [2] IEC. Publication NO.60-1, “High Voltage Test Techniquess-Part1: General Definition and Test Requirements”.,1989 .
- [3] IEC. Publication NO.60-2 , ” High Voltage Test Techniquess-Part2: Measuring System”.,1994
- [4] Kuffel E. and “ Zaengl W. S.,”High Voltage Engineering Fundamental”,Pergamon Press Ltd., Oxford, 1st ed. ,1984.
- [5] Kuffel E. and Abdulah M. “ High Voltage Engineering ” , Pergamon Press Ltd., Oxford , 1st ed., 1997
- [6] Schwab A.J., “ High Voltage Mesurement Techniques” Cambridge:The MIT Press, 1972