

โวลท์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงอินพัลส์ พิกัด 100 kV

UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER

โดย

นาย กิรติวุฒิ วิสุทธิศิลป์
นาย ปุณณวีร์ ทองเขียว
นาย พรศักดิ์ สงวน
นาย ศุภวัฒน์ ถิ่นเรืองแสง

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงอิมพัลส์ พิกัด 100 kV
UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...104288
วัน,เดือน,ปี...3.๑.๓๑...2552

b. 12102037
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงอิมพัลส์ พิกัด 100 kV
UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงอิมพัลส์ พิกัด 100 kV

ผู้จัดทำ

1. นาย กิรติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์
2. นาย ปุณยวีร์ ทองเขียว
3. นาย พรศักดิ์ สงวน
4. นาย ศุภวัฒน์ กลั่นเรืองแสง





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงอิมพัลส์ พิกัด 100 kV

นาย กิรติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์

นาย ปุณยวีร์ ทองเขียว

นาย พรศักดิ์ สงวน

นาย ศุภวัฒน์ กลั่นเรืองแสง

ผศ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นรายงานผลการออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับ, กระแสตรง และ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ในตัวเดียวกัน ขนาดพิกัดกรณีใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ 200 kV แรงดันสูงกระแสตรง 100 kV และวัดแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV ออกแบบโดยใช้เทคนิควงจรร่วม R-C ประกอบด้วยวงจร ย่อยที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อแรงดันที่ต้องการวัดแตกต่างกัน ต่อซ้อนเป็นองค์ประกอบรวมภาคแรงสูงและแรงต่ำเดียวกัน ใช้ตัวเก็บประจุย่อย ชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์มและตัวต้านทานย่อยชนิดฟิล์มโลหะต่ออันดับเป็นองค์ประกอบภาคแรงสูงและแรงต่ำ ภาคแรงสูงทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่อฉนวนภายในอัดด้วยฉนวนก๊าซ SF₆ ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกล่องซิลิโคนนิย่ม การทดสอบและประเมินผลคุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) จากผลการทดสอบพบว่า โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นสามารถใช้วัดแรงดันสูงทั้ง 3 แบบ ได้เป็นอย่างดีและมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER

Keratiwut Visitsilp

Punyavee Thongkiew

Pornsak Sanguan

Supavat Kaunrongsang

Asst.Prof. Norasege Pattanadech Supervisor

Year 2008

ABSTRACT

This paper presents a design and construction of a Universal Voltage Divider for measuring of Impulse, DC and AC voltages with rated of 200 kV, 100 kV and 100 kV respectively. The high-voltage part is designed and constructed by using R-C circuit component technique. The high-voltage and low voltage circuits comprise many sub-circuits commonly connected as a unit, while each sub-circuit has different response to different voltage types. The polypropylene film capacitors and metal-film resistors are commonly connected to construct the high-voltage and low-voltage part of the divider. All high-voltage components are packed in the pipe filled with SF₆ insulated gas. The low-voltage part is constructed in the shielding box made from Aluminum. The performance of the divider has been examined by calibrating with the reference measuring system. The test procedures are conformed with IEC 60060-2 (1994) standard. The test results show that the Universal Voltage Divider have a good performance for all types of voltage waveform measuring and meet all the standard requirements.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นเรศเรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์พีรภูมิ ยุทธโกวิท ที่ได้กรุณาให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญาบัตรจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณอำนาจ ศรีมหาโกศล พี่สามภพ พี่ธนาชาติ พี่ศุภโชค พี่กฤตวัฒน์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสอบเทียบโวลต์เตจติไวเตอร์

ขอขอบคุณคุณปริญญา ชมลิ้ม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการแก้ปัญหาผลตอบสนองรูปคลื่น คุณณัฐพันธ์ บุญเสนอ และคุณภูษิต บุญโท ที่ช่วยอนุเคราะห์ในเรื่องการเติมก๊าซ SF₆

ขอขอบคุณคุณแพทย นิมสนอง คุณภูษิต ถึงสุข และคุณอภิชาติ นิมเทียน พี่ๆ ป.โท ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบมาโดยตลอด รวมทั้งคุณเกริก แซ่เลื่อง คุณสุชาติ มณฑปใหญ่ ที่ช่วยเป็นกำลังสำคัญในการประกอบโวลต์เตจติไวเตอร์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะ นายนิจธนกร สุระพร ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	XIII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์	5
2.1 บทนำ	5
2.2 แบบต่าง ๆ ของโวลต์เตจดีไวเดอร์	6
2.2.1 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน	7
2.2.2 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์	8
2.2.3 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	8
2.2.4 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	9
2.2.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	10
2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลต์เตจดีไวเดอร์	12
2.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุและคุณสมบัติ	12
2.3.1.1 ตัวคาปาซิเตอร์ชนิดที่มีค่าคงที่	12
2.3.1.1.1 ตัวคาปาซิเตอร์แบบกระดาษ	12
2.3.1.1.2 ตัวคาปาซิเตอร์แบบไมก้า	13
2.3.1.1.3 ตัวคาปาซิเตอร์แบบเซรามิก	14
2.3.1.1.4 ตัวคาปาซิเตอร์แบบฟิล์ม	15
2.3.1.1.5 ตัวคาปาซิเตอร์แบบเล็กโตรไลต์ทริก	16
2.3.1.1.6 ตัวคาปาซิเตอร์แบบแทนทาลัม	17

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1.2 ตัวคาปาซิเตอร์ชนิดเปลี่ยนค่าได้	18
2.3.1.3 คุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุ	19
2.3.2 ชนิดของตัวต้านทานและคุณสมบัติ	21
2.3.2.1 คาร์บอนรีซิสเตอร์	22
2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	22
2.3.2.3 เม็ดทอลฟิล์มรีซิสเตอร์	23
2.3.2.4 ไวร็วาวด์รีซิสเตอร์	23
2.3.2.5 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP) และตัวถังแบบเดี่ยว (SIP)	24
2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้	25
2.3.2.7 คุณสมบัติของตัวต้านทานเชิงอุดมคติและเชิงความถี่	25
2.3.3 การฉนวน	26
2.3.3.1 คุณสมบัติของฉนวน	26
2.3.3.2 ชนิดของวัสดุฉนวน	27
2.3.3.2.1 ฉนวนแข็ง	27
2.3.3.2.2 ฉนวนเหลว	28
2.3.3.2.3 ฉนวนก๊าซ	28
2.3.3.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวกับก๊าซ	28
2.3.3.2.5 การเสียสภาพการฉนวน	29
2.3.3.3 SF ₆ (Sulphur Hexafluoride)	29
2.3.3.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF ₆	29
2.3.3.3.2 คุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF ₆	32
2.3.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด	33
2.3.4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น	33
2.3.4.2 สเกลแฟคเตอร์	39
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์	41
3.1 คุณลักษณะของโวลต์เตจดีไวเดอร์	41
3.2 การออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	41
3.2.1 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง	42
3.2.1.1 ค่าวาบไฟตามผิวฉนวน	42
3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน	42

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ	43
3.2.1.4 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด	44
3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	45
3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย	45
3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์	46
3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ	47
3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก	47
3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	48
3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	48
3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์	49
3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	51
3.5 การวางไฟตามผิวต่อ	56
3.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าที่ได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์	57
3.6.1 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ	57
3.6.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	58
3.7 การอัดก๊าซ SF ₆	62
3.7.1 ข้อต่อและวาล์วที่เลือกใช้	62
3.7.2 การตรวจเช็คการรั่วซึม	62
3.7.3 การอัดก๊าซ SF ₆	63
3.8 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเดอร์ โดยใช้โปรแกรม Microsim schematic	64
3.8.1 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่พิกัด	65
3.8.1.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV	65
3.8.1.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV	66
3.8.1.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV	68
3.8.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบ ความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน	69
3.8.2.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV	69
3.8.1.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 110 kV	71
3.8.1.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV	72

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	74
4.1 บทนำ	74
4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ	74
4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	74
4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	75
4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง	76
4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง	76
4.3.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงแรงดันอิมพัลส์	76
4.4 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	76
4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง	76
4.4.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำแรงดันอิมพัลส์	77
4.5 การทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้น	77
4.6 การทดสอบหาคูณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	82
4.7 การทดสอบหาคูณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	85
4.8 การทดสอบหาคูณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงแรงดันอิมพัลส์	89
4.8.1 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Determination of the scale factor)	91
4.8.2 การหาค่าเสถียรภาพ (Short-term stability test)	93
4.8.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test)	95
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	102
5.1 สรุปผลการทดลอง	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลโวลต์เตจดีไวเซอร์	5
2.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	6
2.3 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน	7
2.4 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบความต้านทานมีซีลด์	8
2.5 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ	9
2.6 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบผสม	9
2.7 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	11
2.8 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ	11
2.9 ตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ	12
2.10 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	13
2.11 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	13
2.12 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	14
2.13 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	15
2.14 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	16
2.15 โครงสร้างและลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแท่นทาลัม	17
2.16 รูปร่างและสัญลักษณ์ของวาริเอเบิล คาปาซิเตอร์	18
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่	19
2.18 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ ในแต่ละย่านความถี่	20
2.19 อุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุ	20
2.20 คาร์บอนรีซิสเตอร์	22
2.21 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	22
2.22 เม็ททอลฟิล์มรีซิสเตอร์	23
2.23 ไวรัวร์วาร์ดรีซิสเตอร์	24
2.24 ตัวต้านทานชนิดตัวถัง แบบเดี่ยว (SIP)	24
2.25 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)	24
2.26 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้	25
2.27 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ	25
2.28 คุณสมบัติของตัวต้านทานที่ใช้งานจริงทางปฏิบัติ	26
2.29 โมเลกุลของ SF ₆	30
2.30 ไดอะแกรมความดัน – อุณหภูมิของ SF ₆	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 แรงดันเบรคดาว์นของก๊าซ SF_6 เมื่อเทียบกับอากาศ และน้ำมันหม้อแปลง	32
2.32 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการระบายความร้อน	32
2.33 โครงข่ายวงจร 4 ชั้นที่เขียนแทนระบบวัด	33
2.34 วงจรวัดผลตอบสนองของรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน	35
2.35 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	37
2.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x	37
2.37 ผลตอบสนองรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T	38
3.1 ตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก	42
3.2 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	43
3.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	44
3.4 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	45
3.5 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์	47
3.6 ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ	48
3.7 วงจรสมมูลย์	49
3.8 การจำลองการสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	49
3.9 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์	50
3.10 ส่วนประกอบภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบ	50
3.11 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์	51
3.12 โครงสร้างการวิเคราะห์อิลีกโทรด	52
3.13 ลักษณะของอิลีกโทรดพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมและสนามไฟฟ้า	52
3.14 ลักษณะของอิลีกโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมและสนามไฟฟ้า	53
3.15 ผลการจำลองอิลีกโทรดที่ระยะรัศมี $X = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1 cm โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 2 cm	54
3.16 ผลการจำลองอิลีกโทรดที่ระยะรัศมี $X = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1 cm โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 2.7 cm	54
3.17 ผลการจำลองอิลีกโทรดที่ระยะรัศมี $X = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1.5 cm โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 2 cm	55
3.18 ผลการจำลองอิลีกโทรดที่ระยะรัศมี $X = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1.5 cm โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 3 cm	55
3.19 อิลีกโทรดของโวลต์เตจดีไวเดอร์	56

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 ผลการจำลองวางไฟตามผิวท่อ	56
3.21 สายเคเบิลชนิด RG11 A/U	57
3.22 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป	57
3.23 หัวต่อภาคแรงต่ำ	57
3.24 เครื่องมือวัดแรงต่ำ	59
3.25 เกจวัดความดันและข้อต่อทองเหลืองที่เลือกใช้	62
3.26 การเช็คการรั่วซึมของโวลท์เทจดีไวเดอร์	63
3.27 การแวกคัมโวลท์เทจดีไวเดอร์	63
3.28 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลท์เทจดีไวเดอร์	64
3.29 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV	65
3.30 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV	65
3.31 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV	66
3.32 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV	66
3.33 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV	67
3.34 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV	67
3.35 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแสเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV	68
3.36 รูปคลื่นแรงดันของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV	68
3.37 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV	69
3.38 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV	69
3.39 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV	70
3.40 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV	70
3.41 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสตรง 110 kV	71
3.42 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 110 kV	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.43 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเซอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง 110 kV	72
3.44 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแสเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV	72
3.45 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเซอร์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV	73
3.46 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเซอร์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV	73
4.1 วงจรหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	77
4.2 วงจรทดสอบหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	78
4.3 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 100 Ω	79
4.4 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 150 Ω	79
4.5 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 200 Ω	79
4.6 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 300 Ω	80
4.7 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 400 Ω	80
4.8 ออสซิลโลกราฟแสดงผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์	81
4.9 การวิเคราะห์ผลตอบสนองรูปขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	81
4.10 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันสูงกระแสสลับ	82
4.11 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแพกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	83
4.12 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	85
4.13 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	86
4.14 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	88
4.15 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	89
4.16 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	90
4.17 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 0.84/60 μ s ชั่วบวก	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 μ s ชั่วบวก	100
4.19 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 0.84/60 μ s ชั่วลบ	100
4.20 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 μ s ชั่วลบ	101
5.1 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์	102



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 71-1	1
1.2 วิธีการดำเนินงาน	3
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF ₆	30
3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง	41
3.2 ตารางเปรียบเทียบแรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1	45
3.3 คุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U	58
3.4 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ ตามมาตรฐาน IEC 61010-1	59
3.5 คุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUKE87 & 89 series IV	60
3.6 คุณสมบัติของ FLUKE 41 Power Harmonics Analyzer	60
3.7 คุณสมบัติของ Probe	61
4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	75
4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	75
4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง	76
4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์	76
4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง	76
4.6 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำอิมพัลส์	77
4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วงภายนอก	78
4.8 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	84
4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	85
4.10 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	87
4.11 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	88
4.12 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 0.84/60µs	91
4.13 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 0.84/60µs	91
4.14 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60µs	92

สารบัญญัตินี้ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	92
4.16 สรุปลักษณะของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดอิมพัลส์	92
4.17 ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ในการหาค่าเสถียรภาพของระบบ สำหรับแรงดัน อิมพัลส์ชั่วบวก ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	93
4.18 ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ในการหาค่าเสถียรภาพของระบบ สำหรับแรงดัน อิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	93
4.19 ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ในการหาค่าเสถียรภาพของระบบ สำหรับแรงดัน อิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	94
4.20 ผลการทดสอบคุณลักษณะของระบบวัด ก่อนการทดสอบ Short-term stability	94
4.21 ผลการทดสอบคุณลักษณะของระบบวัด หลังการทดสอบ Short-term stability	94
4.22 การเปลี่ยนแปลงของสเกลแฟกเตอร์ หลังการทดสอบ Short-term stability	94
4.23 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก ที่พิกัด 100 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	95
4.24 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก ที่พิกัด 125 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	95
4.25 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก ที่พิกัด 150 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	96
4.26 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก ที่พิกัด 175 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	96
4.27 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวก ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	96
4.28 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 100 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	97
4.29 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 125 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	97
4.30 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 150 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.31 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล ที่พิกัด 175 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	98
4.32 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	98
4.33 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S	98
4.33 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S (ต่อ)	99
4.34 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	99



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น การใช้เครื่องมือวัดโดยตรงเป็นเรื่องที่เสี่ยง และอันตรายอย่างมาก ซึ่งแตกต่างกับการวัดในระบบแรงดันต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการทราบค่าแรงดันในระบบแรงดันสูง จึงต้องทำการลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลง เพื่อให้ปลอดภัยกับผู้ที่ทำการวัด และเหมาะสมกับเครื่องมือวัด จึงได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ลดทอนแรงดันสูงที่ต้องการวัดให้มีขนาดต่ำลงให้เหมาะสมกับเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ อุปกรณ์ลดทอนแรงดันสูงที่นิยมใช้ชนิดหนึ่ง คือ โวลท์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider) ซึ่งสามารถวัดแรงดันสูงได้เป็นอย่างดี การสร้างอุปกรณ์ลดทอนแรงดันหรือโวลท์เตจดีไวเดอร์ ให้ได้ค่าวัดออกมาที่ถูกต้อง ควรจะต้องเข้าใจในหลักการการทำงานของอุปกรณ์ลดทอน และออกแบบการสร้างให้มีความสอดคล้องกับมาตรฐานการสร้างเครื่องวัดแรงดัน

โดยใช้อ้างอิงของมาตรฐานสากล IEC 60060-1, IEC 60060-2 และ IEEE เป็นเกณฑ์การตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะการทำงาน ซึ่งผลของการทดสอบจะเป็นตัวที่แสดงให้เห็นว่าการออกแบบสร้างเป็นไปตามทฤษฎีที่คำนวณไว้หรือไม่ ส่วนการประกอบและโครงสร้างจะพยายามใช้วัสดุที่ผลิตในประเทศ เพื่อเป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ประโยชน์ที่ได้เพื่อเป็นการพัฒนาบุคลากรและทักษะในการสร้างเครื่องมือใช้เอง ทำให้ประหยัดงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ ซึ่งสามารถใช้งานทดแทนอุปกรณ์ที่มีขายสำเร็จรูปในท้องตลาดได้

ตารางที่ 1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 71-1 [1]

Insulation voltage U_m (kV)	3.6	7.2	12	17.5	24	36	52	72.5
Rated alternating Withstand Voltage (kV)	10	20	28	38	50	70	95	140
Rated lighting withstand voltage (kV)	40	60	75	95	125	170	250	325

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบโวลท์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับวัดด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับตัวต้านทาน
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติโวลท์เตจดีไวเดอร์
3. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบโวลท์เตจดีไวเดอร์
4. เพื่อรองรับงานการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูง
5. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ด้วยตัวแบ่งแรงดันแบบผสม
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม FEM ในการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าบนตัวแบ่งแรงดัน
- 3) ทำการออกแบบและสร้างโวลต์เดจิติไวเตอร์แบบผสม ที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดสูงสุด 100 kV แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดสูงสุด 100 kV และสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัดสูงสุด 200 kV

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
4. ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
5. วิเคราะห์และปรับปรุงอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้ตามมาตรฐานและข้อกำหนด
6. จัดทำปฏิญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงหรือโวลต์เดจิติไวเตอร์ ที่มีคุณสมบัติในการวัดแรงดันกระแสสลับพิกัดสูงสุด 100 kV แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพิกัดสูงสุด 100 kV และแรงดันอิมพัลส์ พิกัดสูงสุด 200 kV ความผิดพลาด $\pm 5\%$ และนำมาให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อใช้เป็นต้นแบบงานวิจัยต่อไป และสามารถนำต้นแบบดังกล่าวมาพัฒนาและออกแบบเพื่อให้สามารถวัดแรงดันที่พิกัดสูงขึ้น และนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 1.2 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2551									
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1. ศึกษาทฤษฎี ข้อมูล ที่เกี่ยวข้อง กับการออกแบบและการทดสอบ โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	←-----→									
2. ศึกษามาตรฐาน ที่เกี่ยวข้อง กับการออกแบบและการทดสอบ โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	←-----→									
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์ในการออกแบบ และจำลอง		←-----→								
4. ออกแบบและสร้างโวลต์เตจ ดีไวเดอร์แบบผสม				←-----→						
5. ทำการทดสอบโวลต์เตจดีไวเดอร์ แบบผสม นำผลที่ได้ไปปรับปรุง แก้ไข และสรุปผลการทดสอบ						←-----→				
6. จัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับสมบูรณ์								←-----→		

←-----→ **วางแผน** ←-----→ **ทำจริง**

1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์ในประเทศไทย มีหลายงานวิจัยแต่ส่วนมากจะเป็นงานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยที่จะเป็นงานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์

1. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณ วรา จุห้อง ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
2. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงสูงแบบตัวต้านทานขนาด 100 kV วิทยานิพนธ์ของคุณอาทร ภาษี และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณอรณพ ลิ้มสีมารัตน์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
4. การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
5. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 400 kV แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณไพศาล จิรานันต์รัตน์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
6. โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 300 kV ของคุณปริญญา ชมลิ้ม, คุณพีรวุฒิ ยุทธโกวิท, คุณนรเศรษฐ พัฒนเดช และคณะ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.
7. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสมขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ของคุณสุชาติ มณฑปใหญ่ และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
8. โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมราคาประหยัดสำหรับใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ขนาด 100 kV ของคุณรัชกร ปานหอทอง, คุณศรารุณี คลีสุวรรณ และคุณธีรธรรม บุญยะกุล การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.
9. โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงแรงดันกระแสสลับ, แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ของคุณไชยพร หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

บทที่ 2

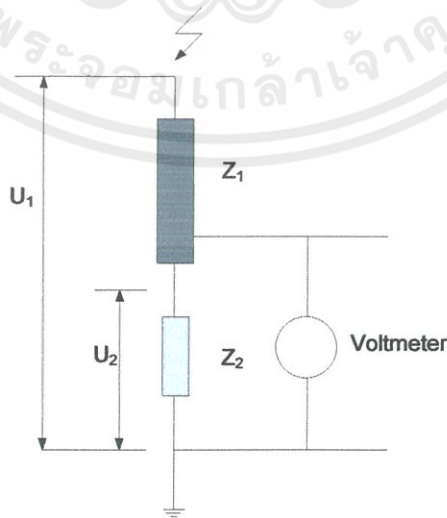
ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจติไวเดอร์

2.1 บทนำ

การวัดแรงดันสูงนอกจากกระยะระหว่างผู้วัดและอุปกรณ์วัดที่ปลอดภัยโดยอาศัยหลักการณวนที่ถูกต้องแล้ว การวัดแรงดันสูงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วย ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญได้แก่ ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชีตความสามารถของเครื่องวัด ความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดแรงดันอิมพัลส์

เทคนิคการวัดแรงดันสูง [2] ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันอิมพัลส์นี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนแรงดันกระแสลับและแรงดันกระแสตรง นั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และในระบบส่งจ่ายจำหน่าย

โวลต์เตจติไวเดอร์ที่ใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์สองชุดต่อกันอยู่คือ ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) ของโวลต์เตจติไวเดอร์นั้นจะรับแรงดันแทบทั้งหมดตกคร่อมตัวมัน อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) จะเป็นส่วนแรงดันตกคร่อมเข้าเครื่องวัด ปกติปลายด้านบนของโวลต์เตจติไวเดอร์เป็นขั้วต่อแรงดันสูง ส่วนปลายด้านล่างของโวลต์เตจติไวเดอร์เป็นศักย์ดิน ตัวประกอบวงจรทั้งสองภาคของโวลต์เตจติไวเดอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่าง โวลต์เตจติไวเดอร์จะได้ชื่อตามตัวประกอบวงจรและลักษณะการจัดวางตัวประกอบ วงจรเหล่านั้น คือ โวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน โวลต์เตจติไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ และโวลต์เตจติไวเดอร์แบบผสมตามลำดับ [3]



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเดอร์

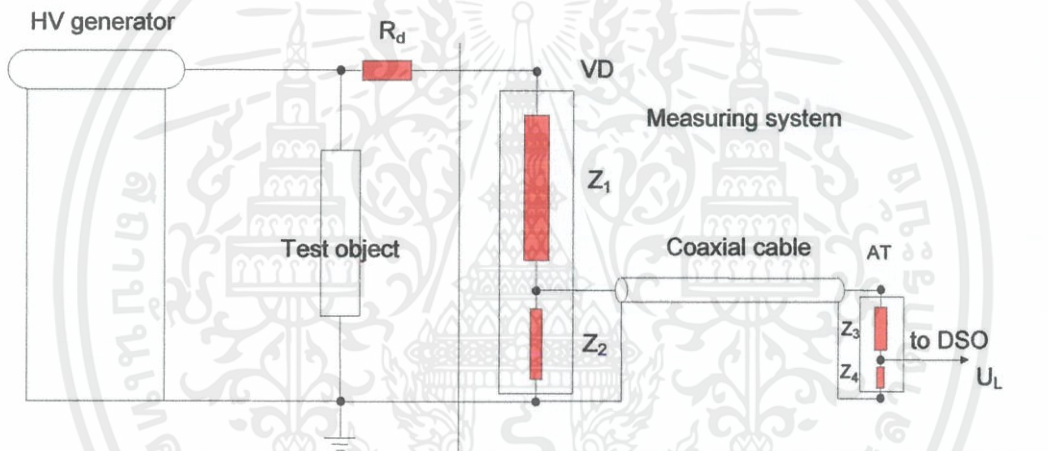
2.2 แบบต่าง ๆ ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ [3-4]

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แรงดันกระแสสลับ
2. แรงดันกระแสตรง
3. แรงดันอิมพัลส์

ซึ่งการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลท์เตจดีไวเดอร์ [2] เป็นการวัดที่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นอุปกรณ์วัดด้านแรงดันต่ำ

โดยทั่วไปการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบโวลท์เตจดีไวเดอร์ จะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ สายนำแรงสูง ตัวดีไวเดอร์ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) สูงประมาณ 2.5 เมตร/เมกกะโวลท์ เคเบิลวัดแบบแกนร่วม (Coaxial cable) และออสซิลโลสโคป ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

- R_d คือ ความต้านทานหน่วงสายนำไฟฟ้าแรงดันสูง
 VD คือ โวลท์เตจดีไวเดอร์
 AT คือ ตัวลดทอนแรงดัน (Attenuator)

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิดสามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้ดังนี้

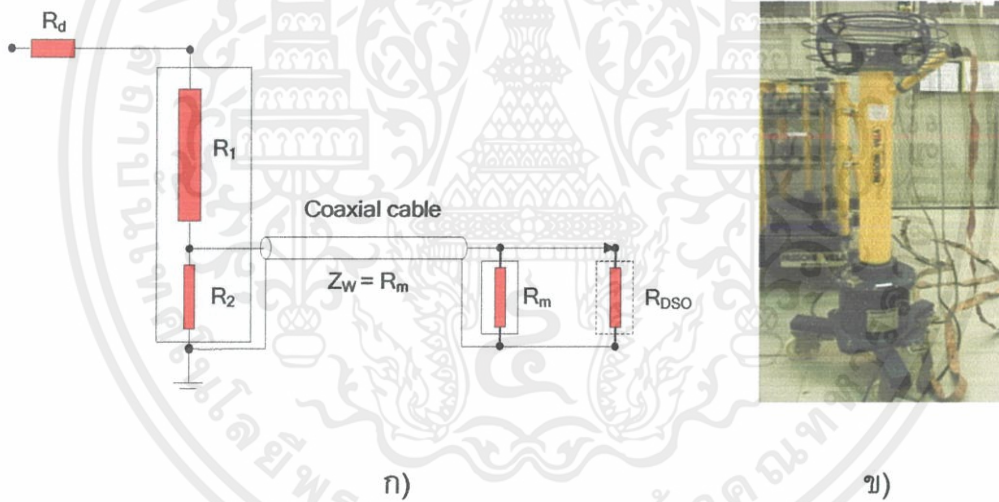
- (ก) แบบความต้านทาน (Resistor voltage divider)
- (ข) แบบความต้านทานมีชีลด์ (Shielded resistor voltage divider)
- (ค) แบบตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor voltage divider)
- (ง) แบบผสม (Mixed voltage divider)
- (จ) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitor voltage divider)

2.2.1 โวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน คือ โวลต์เตจติไวเดอร์ที่อิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดพันให้เกิดความเหนียวแน่นต่ำ แขนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

โวลต์เตจติไวเดอร์ชนิดนี้ใช้วัตต์แรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่า 100 กิโลโวลต์ เหมาะสำหรับใช้วัตต์แรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัตต์แรงดันสูงอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจากความจุสเตรลงดิน จึงนิยมใช้วัตต์ไม่เกิน 2,300 กิโลโวลต์

ความถูกต้องในการวัดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัตต์แรงดันต่ำพร้อมความต้านทานของภาคแรงต่ำซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัตต์ที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสรั่วไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้แรงดันสูงเกินไป นั่นคือ $I \geq 0.1$ มิลลิแอมป์, $R \leq 10$ เมกกะโอห์ม/กิโลโวลต์



รูปที่ 2.3 โวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน

ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเดอร์

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานภาคแรงสูง

R_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

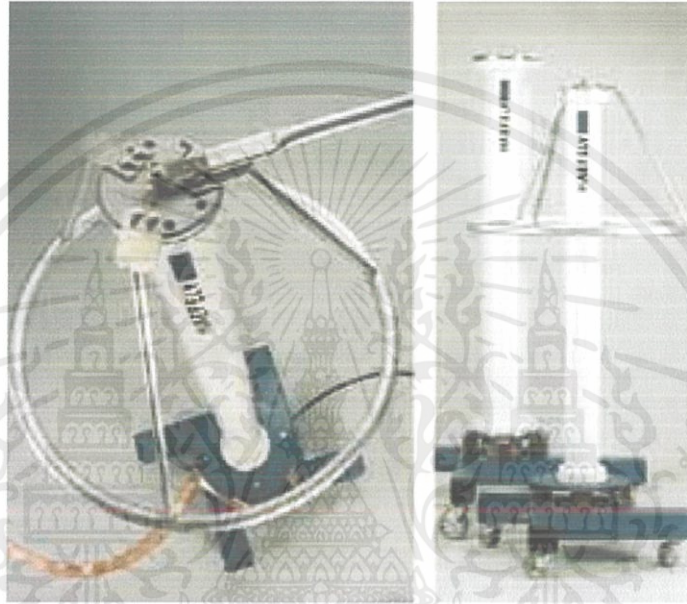
R_m คือ ความต้านทานแมทซิ่งของเคเบิลวัด

Z_w คือ เสรีอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

ข) โวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน (Haefely)

2.2.2 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีซีลด์

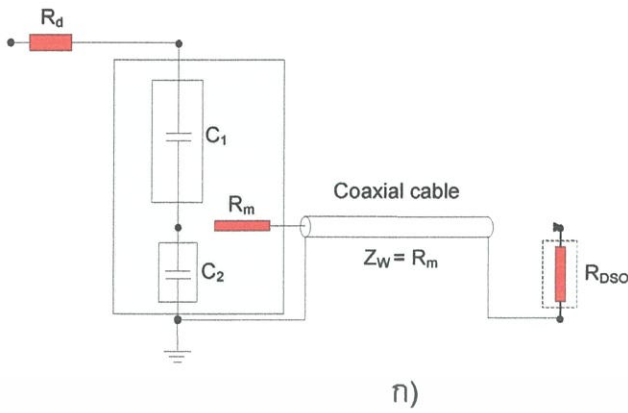
โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้จะมีลักษณะสมบัติความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองรูปขึ้นได้ต่างๆ กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของซีลด์อิเล็กทรอนิกส์ และขึ้นอยู่กับ การออกแบบความต้านทานในภาคแรงสูงให้เป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด เมื่อความสูงของ โวลต์เตจดีไวเดอร์มากขึ้นอาจใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์ หลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มี ส่วนหนึ่งส่วนใดต่อกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไป โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาดต่ำกว่า 500 กิโลโวลต์ ใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์อันเดียวติดตั้งตอนบนก็เพียงพอ



รูปที่ 2.4 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานมีซีลด์

2.2.3 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำเป็นแบบตัว เก็บประจุดังรูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุน้อยหรือตัวเก็บประจุ เต็มก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุน้อยจะใช้ตัวเก็บประจุน้อยมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าความเก็บ ประจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุน้อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมันหรือแบบเซรามิก เป็นต้น ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเต็มจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบอัดความดัน มีโครงสร้าง อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกัน ก๊าซอัดความดันที่ใช้ อาจเป็นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ซึ่งจะให้ ผลตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันที่คงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ ใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับและ แรงดันอิมพัลส์



ก)

ข)

รูปที่ 2.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

ก) วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเตอร์

เมื่อ C_1 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

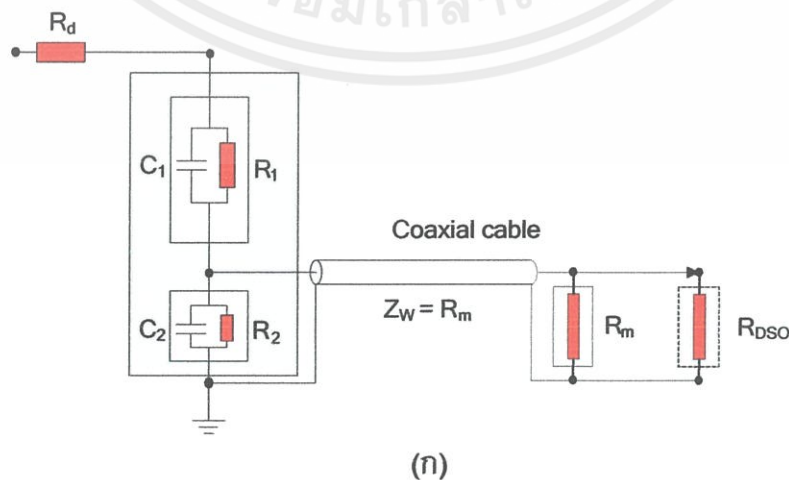
R_m คือ ความต้านทานแมทซ์ซิงของเคเบิลวัด

Z_w คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

ข) โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

2.2.4 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้ได้ดัดแปลงมาจากโวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจួយ่อยขนานเข้าไปกับความต้านทานเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้น เมื่อตัวเก็บประจุนานที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่าของความจุสเตรย์ลงดิน และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้เหมาะสมสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุนานที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป วงจรทั่วไปของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.6 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

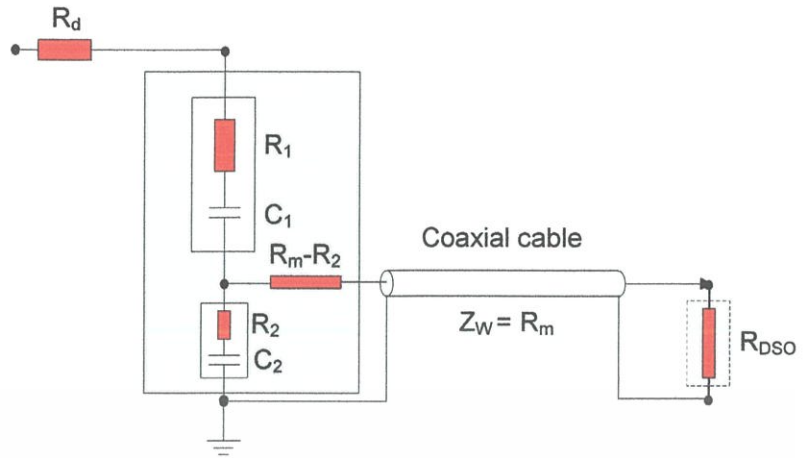
ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์

- เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานย่อยในภาคแรงสูง
 C_1 คือ ตัวเก็บประจุย่อยขนานในภาคแรงสูง
 R_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ
 C_2 คือ ตัวเก็บประจุขนานในภาคแรงต่ำ
 R_m คือ ความต้านทานแมทซิงของเคเบิลวัต
 Z_w คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัต

ข) โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

2.2.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานห่วง

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้ภาคแรงสูง และภาคแรงดันต่ำ ประกอบด้วยความต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.7 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวของโวลต์เตจติไวเตอร์ ถ้าเลือกใช้ตัวต้านทานที่เหมาะสม โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดี แม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ



ข)

รูปที่ 2.7 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเดอร์

ข) โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงสูง

C_1 คือ ตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูง

R_2 คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงต่ำ

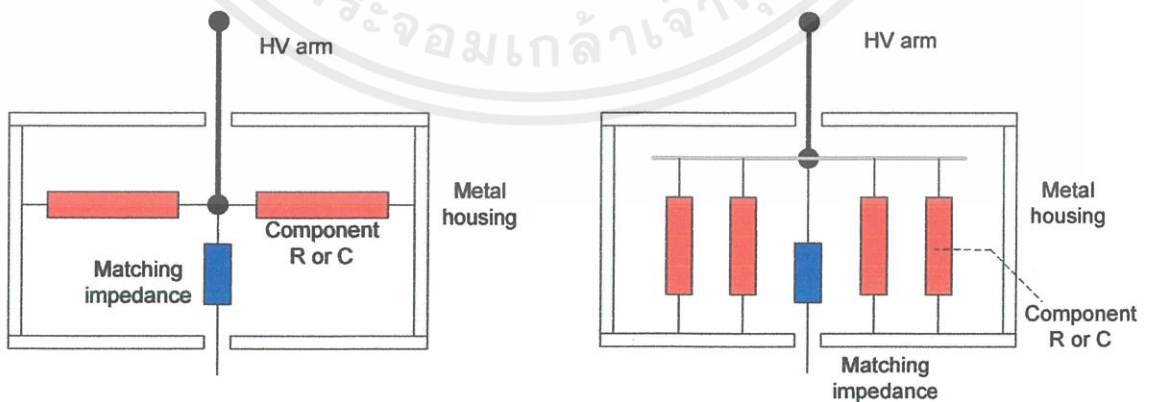
C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

R_m คือ ความต้านทานเมทซิ่งของเคเบิลวัด

Z_w คือ เสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

ก)

เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องมีเวลาตอบสนองที่ไว การที่มีความเหนี่ยวนำแฝงในระบบวัดโดยเฉพาะภาคแรงต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่ง การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้มีความเหนี่ยวนำน้อยที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้มีความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนี่ยวนำได้ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เตจดีไวเดอร์

โวลท์เตจดีไวเดอร์จะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน ซึ่งเราจะเรียกชื่อของโวลท์เตจดีไวเดอร์แต่ละชนิด ตามลักษณะการต่ออุปกรณ์ภายใน โวลท์เตจดีไวเดอร์ภายในอิมพีแดนซ์ ซึ่งการสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์จำเป็นต้องทราบรายละเอียดและคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ การฉนวน เป็นต้น

2.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุและคุณสมบัติ [6-7]



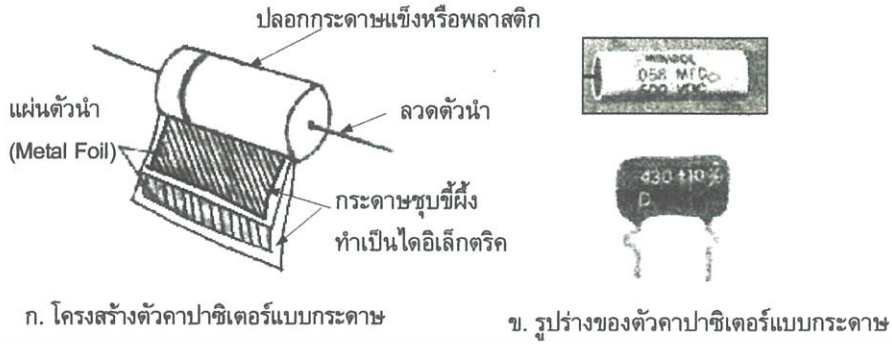
รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ

2.3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่

เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าคงที่ได้ โดยมากจะเรียกชื่อตามชนิดของไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

2.3.1.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบซีฟี่เป็นตัวไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นตัวนำที่ยาวมากเพื่อให้เกิดความจุตามต้องการแล้วทำการม้วนให้เป็นทรงกระบอก ตัวเก็บประจุแบบกระดาษจะมีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด ถึง 1 ไมโครฟารัด อัตราทนไฟสูงประมาณ 200 – 1600 VDC



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

2.3.1.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไมก้าเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นฉนวนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และถือเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าประมาณ 1 พิโคฟารัด - 0.1 ไมโครฟารัด อัตราทนกำลังไฟประมาณ 100 - 2500 VDC



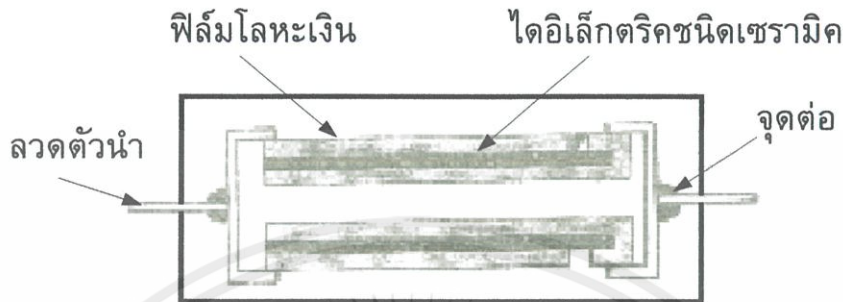
รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ตัวเก็บประจุชนิดไมก้ายังแบ่งออกตามชนิดของแผ่นตัวนำที่นำมาใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. แบบโลหะพอยล์ จะใช้แผ่นฟิล์มของโลหะบางๆ ทำเป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุซึ่งจะเป็นแบบที่เรียกว่าไมก้าก้อน
2. แบบซิลเวอร์ไมก้า ประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กตริก ซึ่งทำมาจากโลหะเงินบริสุทธิ์ฉาบลงบนแผ่นไมก้า เพื่อจะทำให้คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบนี้ดีขึ้น

2.3.1.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไดอิเล็กตริกที่ทำมาจากกระเบื้องดินเผา หรือที่เรียกว่า เซรามิก แล้วเคลือบผิวเซรามิกด้วยเงินเพื่อใช้แทนเป็นแผ่นตัวนำทำให้มีความจุสูงขึ้น ซึ่งจะมีค่าความจุระหว่าง 1 พิโคฟารัด - 2.2 ไมโครฟารัด มีอัตราทนไฟตั้งแต่ 3.3 – 600 VDC



ก) โครงสร้างของเซรามิก คาปาซิเตอร์



ข) ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- 1) Low Dielectric มีขนาดใหญ่ พิกัดสูงสุดประมาณ 500 พิโคฟารัด มีทั้งชนิดที่สัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิเป็นศูนย์และเป็นลบ มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมเมื่อใช้ในย่านความถี่วิทยุ และวงจรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงที่ต้องการเก็บประจุน้อยๆ
- 2) Medium Dielectric มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิสูง คุณสมบัติดีกว่าแบบ Low Dielectric แต่ให้ค่าเก็บประจุสูงกว่า
- 3) High Dielectric นำไปใช้ในวงจรทั่วไปได้ดี ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก มีค่าเก็บประจุสูง แต่มีข้อพึงระวังคือ ที่แรงดันพิกัดหรืออุณหภูมิสูงๆ อาจไม่สามารถใช้งานได้ถึงค่าพิกัดที่ระบุไว้

2.3.1.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมากแต่จะใช้ไดอิเล็กทริกประเภทฟิล์มพลาสติก (Plastic film) ส่วนอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นอลูมิเนียมแบบแผ่น หรืออลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นฟิล์ม ลักษณะมิติของตัวเก็บประจุแบบนี้มีหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน การแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม แบ่งตามชนิดสารไดอิเล็กทริกได้ดังนี้

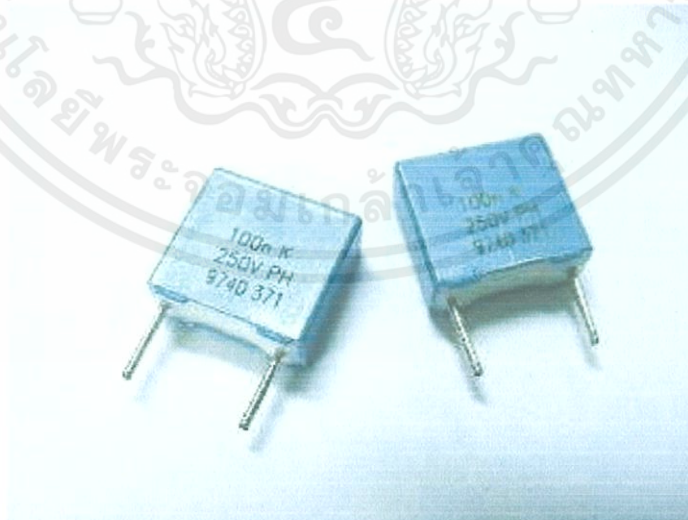
- ชนิดโพลีเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKT ออกแบบมาใช้งานในย่านอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง แต่มีข้อจำกัดตรงที่ต้องทำงาน ณ อุณหภูมิที่ระบุไว้เท่านั้น คุณสมบัติตัวเก็บประจุจะยังคงเดิมตามพิกัดที่ระบุ มีค่าความจุ 0.001 – 100 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดันถึง 1500 VDC

- ชนิดโพลีสไตรีนคาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKS ออกแบบมาใช้งานกับแรงดันต่ำ ที่อุณหภูมिन้อยกว่า 100 °C โพลีสไตรีนมีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกที่ดีเยี่ยม แต่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีขนาดโตกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่นที่พิกัดความจุไฟฟ้าเดียวกัน ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุ 10 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดันถึง 1000 VDC

- ชนิดโพลีคาร์บอนเนต ออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติที่ดี ใช้งานในย่านอุณหภูมิกว้าง

- ชนิดโพลีโนพรพิลีน ขนาดมิติของตัวเก็บประจุชนิดนี้ ค่อนข้างเล็กกะทัดรัดมีค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิปานกลาง

- ชนิดเทพลอน ออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดถึง 200 °C และมีค่าความเป็นฉนวนสูงมาก



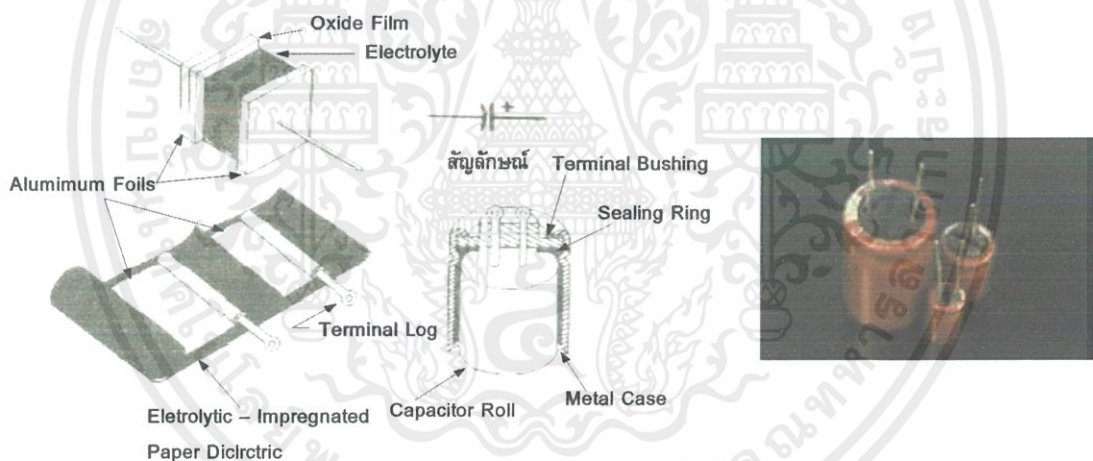
รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มนี้จะไม่มีขีดในการใช้งาน และความต้านทานของฉนวนมีค่าสูง จึงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุเนื่องมาจากอุณหภูมิน้อยที่สุด ใช้กับวงจรความถี่สูงได้ดี วงจรตั้งเวลา วงจรอินทิเกรท แต่ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีราคาแพง

2.3.1.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

บางที่เรียกว่าอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์คาปาซิเตอร์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นโลหะทำเป็นขั้วบวก จุ่มอยู่ตรงกลางของน้ำยาเคมี หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สารละลายพวก Ethylene, Glycol, Glycerine, Boric Acid Liquid Ammonia และอื่นๆ ที่อยู่ในสภาพของเหลวชั้น ที่บรรจุอยู่ในกระบอกโลหะ เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ โดยป้อนไฟบวกเข้าที่แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นขั้วบวก และไฟลบเข้าที่ขั้วลบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะปรากฏผลว่ามีการแยกตัวทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้ขั้วบวกเกิดอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก เกิดขึ้นรอบๆ แผ่นบวกนี้ โดยมันจะเป็นไดอิเล็กตริกที่บางที่สุดที่กั้นระหว่าง แผ่นตัวนำบวกและลบสามารถทำให้ตัวเก็บประจุสะสมประจุได้



รูปที่ 2.14 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

นอกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวชั้นที่นำมาทำตัวเก็บประจุแบบนี้หรือที่เรียกว่า ชนิดอิเล็กโทรไลต์เปียก เรายังสามารถใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นมากคล้ายแป้งเปียกมาทำตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์แบบแห้งได้

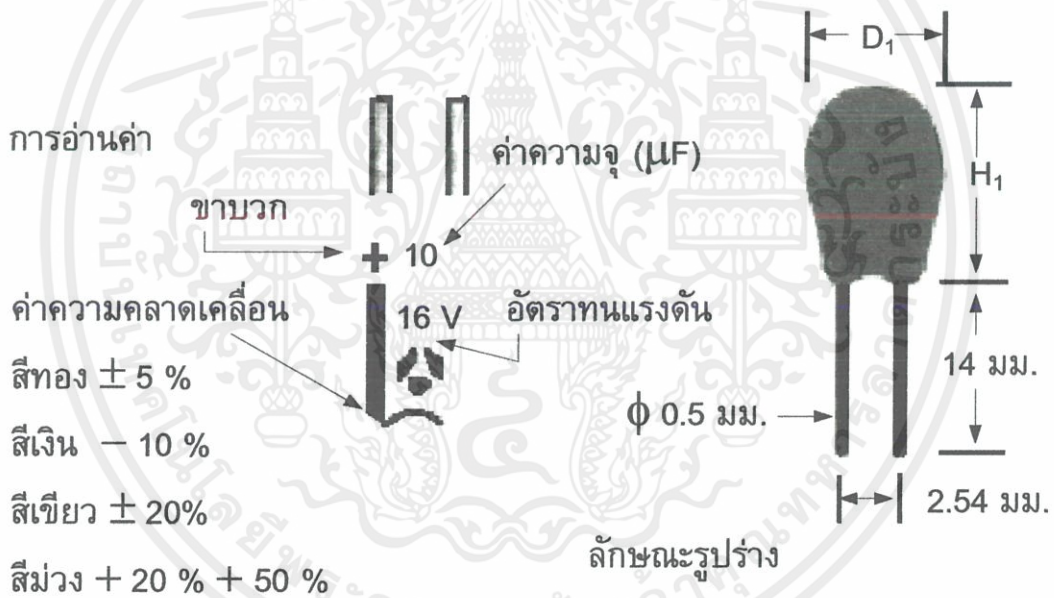
ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์จะมีค่าความจุตั้งแต่ 1 ไมโครฟารัดขึ้นไปจนถึง 0.1 ฟารัด แรงดันใช้งานสูงถึง 500 โวลต์ ข้อด้อยของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือ มีความคลาด

เคลื่อนอยู่ในช่วง -20 ถึง +100% และมีกระแสรั่วไหลสูง มักนิยมใช้กับงานที่ความถี่ต่ำ เช่น วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

2.3.1.1.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้สารแทนทาลัม ทำเป็นขั้วบวกแทนอลูมิเนียม ส่วนสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทำเป็นไดอิเล็กตริกนั้น จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบโซลิตอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใช้ MnO_2 และแบบซัลฟูริคแอซิด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์ที่รีดแล้วปรากฏว่ามีคุณสมบัติการรั่วของกระแส และคุณสมบัติทางความถี่ คุณสมบัติทางอุณหภูมิดีกว่า จึงนิยมใช้กับวงจรกำจัดสัญญาณรบกวน วงจรฟิลเตอร์

ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด ถึง 1000 ไมโครฟารัด มีอัตราทนแรงดัน 6 – 120 VDC แต่ค่าความจุที่มีขายตามท้องตลาดจะมีค่า 0.1 ไมโครฟารัด ถึง 100 ไมโครฟารัด

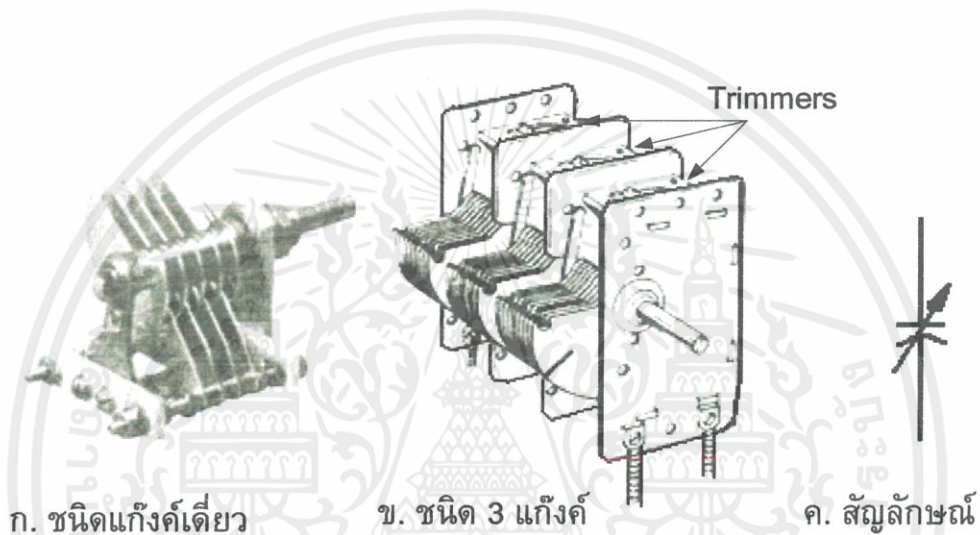


รูปที่ 2.15 โครงสร้างและลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดเปลี่ยนค่าได้

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 ชุด หรือที่เรียกว่าแก๊งค์ คือ ชุดแผ่นโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้เรียกว่าโรเตอร์ และแผ่นโลหะที่ยึดติดอยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ โดยทั่วไปแล้วสเตเตอร์จะมีจำนวนแผ่นมากกว่าโรเตอร์อยู่ 1 แผ่น ฉนวนที่ใช้กันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองจะใช้อากาศเป็นฉนวน อิเล็กทริก ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อเราหมุนแกนโรเตอร์ โดยถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองวางขนานกันมากที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าสูง และถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองแผ่นวางซ้อนกันน้อยที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุจะน้อยตามไปด้วย ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความจุประมาณ 10 – 400 พิโคฟารัด



ก. ชนิดแก๊งค์เดี่ยว

ข. ชนิด 3 แก๊งค์

ค. สัญลักษณ์

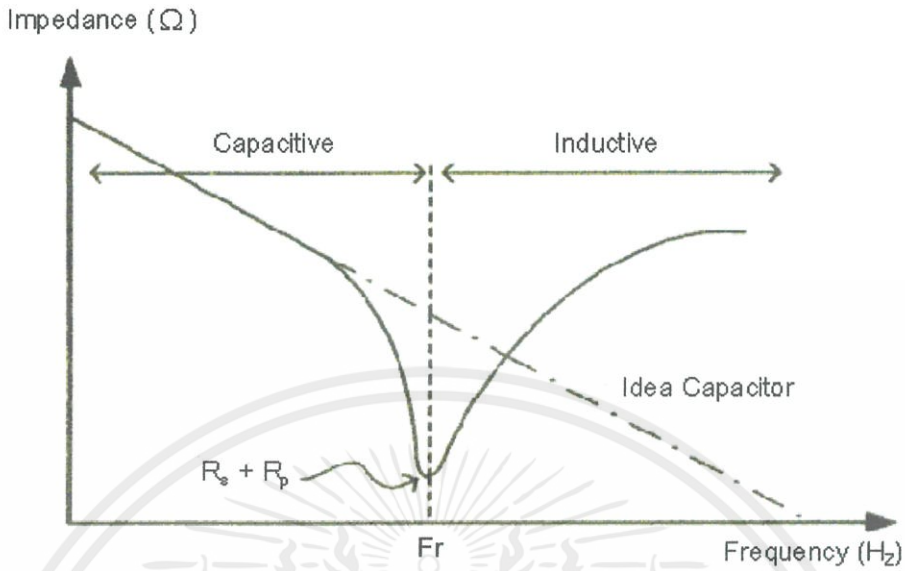
รูปที่ 2.16 รูปร่างและสัญลักษณ์ของวาริเอเบิล คาปาซิเตอร์

การตรวจวัดตัวเก็บประจุ

การวัดตัวเก็บประจุโดยใช้มัลติมิเตอร์โดยจะต้องตั้งให้มิเตอร์อยู่ในย่านการวัดของ โอห์มมิเตอร์ แล้วเลือกใช้สเกลตามค่าความจุของตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

- ค่าความจุตั้งแต่ 100 ไมโครฟารัด ขึ้นไป ตั้งที่สเกล R x 1
- ค่าความจุตั้งแต่ 20 ไมโครฟารัด ถึง 100 ไมโครฟารัด ตั้งที่สเกล R x 10
- ค่าความจุตั้งแต่ 1 ไมโครฟารัด ถึง 10 ไมโครฟารัด ตั้งที่สเกล R x 1K
- ค่าความจุต่ำกว่า 1 ไมโครฟารัด ลงมาตั้งที่สเกล R x 10K

2.3.1.3 คุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุ [8]



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 2.17 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานจริงกับตัวเก็บประจุในอุดมคติ จะพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นค่าความเหนี่ยวนำที่ขาของตัวเก็บประจุจะมีผลมากขึ้นจนในที่สุด ที่ความถี่ F_r ค่าความเหนี่ยวนำจะทำให้ตัวเก็บประจุเกิดเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมขึ้นมาค่าอิมพีแดนซ์ ของตัวเก็บประจุจะเป็นค่าความต้านทานรวมระหว่างค่าความต้านทาน R_s และ R_p เท่านั้นและเมื่อความถี่สูงกว่า F_r ตัวเก็บประจุจะมีคุณสมบัติเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปตัวเก็บประจุค่าสูงจะมีค่าความเหนี่ยวนำภายในมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าความเก็บประจุน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากต้องใช้แผ่นตัวนำที่มีพื้นที่มากกว่า เช่น ตัวเก็บประจุขนาด 0.1 ไมโครฟารัด จะมีผลกระทบต่อกุณภาพมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่า 300 พิโคฟารัด (ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุชนิดเดียวกัน) อนึ่งตัวเก็บประจุ หากนำมาใช้งานที่ความถี่ 250 เมกกะเฮิรตซ์ จะมีค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุเป็นตามสมการพื้นฐาน คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2.1)$$

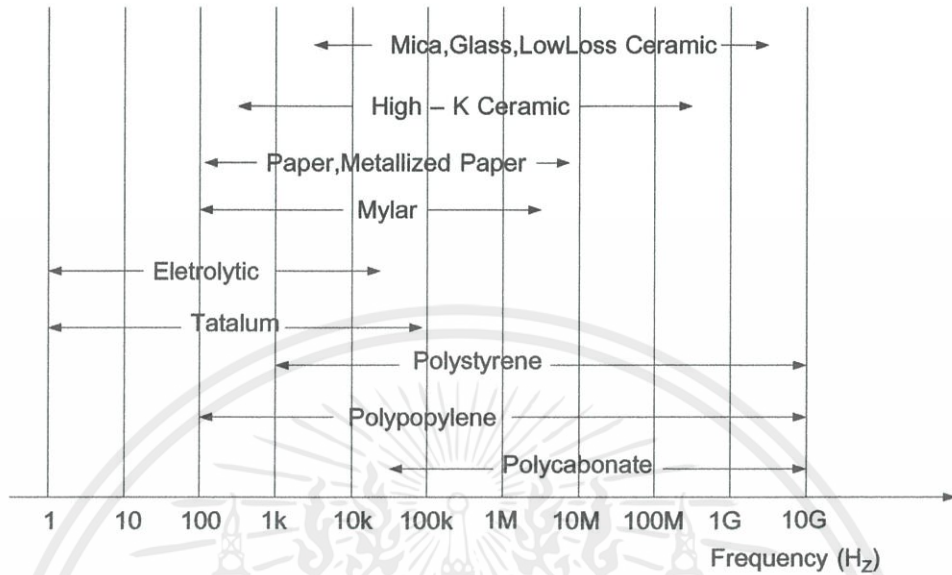
เมื่อ X_c แทนค่ารีแอกแตนซ์: โอห์ม (Ω)

ω แทนค่าความถี่เชิงมุม : เรเดียนต่อวินาที (rad / s)

C แทนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ: ฟารัด (F)

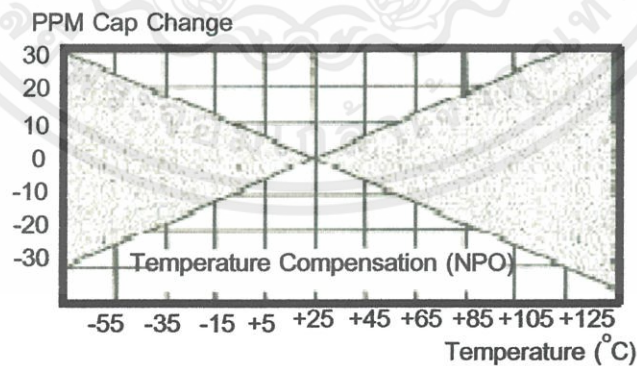
สำหรับวงจรความถี่สูงนั้น มักจะใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุเบี่ยงที่มีค่าความเก็บประจุอยู่ในช่วงพิโคฟารัด และไม่ใช่ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูง

เนื่องจากต้องการให้ค่ารีแอกแตนซ์มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการออกแบบหรือการเลือกใช้อุปกรณ์ สำหรับใช้งานในย่านวีเอชเอฟหรือสูงกว่านั้นควรใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) ในการตรวจสอบเนื่องจากจะให้ค่าที่ถูกต้องและเชื่อถือได้มากที่สุด



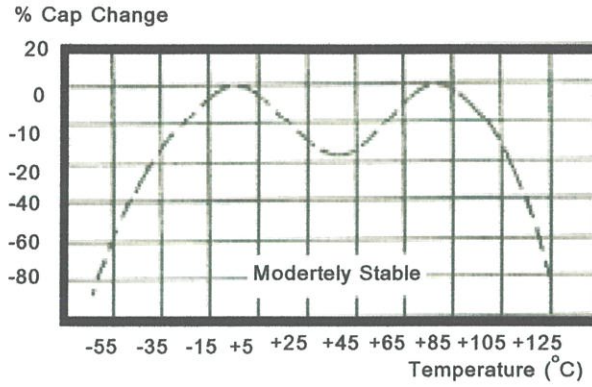
รูปที่ 2.18 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในแต่ละย่านความถี่

จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าตัวเก็บประจุที่ใช้ได้ดี ในช่วงความถี่ที่มากกว่า 100 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีอยู่ 5 แบบด้วยกัน คือ ไมก้า เซรามิก โพลีสไตรีน โพลีโพลีเอทิลีน และโพลีคาบอนเนตซึ่งตัวเก็บประจุทั้ง 5 ชนิดนี้ ที่นิยมใช้เซรามิกกันมากเพราะราคาถูกและมีเสถียรภาพที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพอสมควร คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (k) ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกซึ่งมากเท่าไรก็จะทำให้คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุแย่งลงเท่านั้น

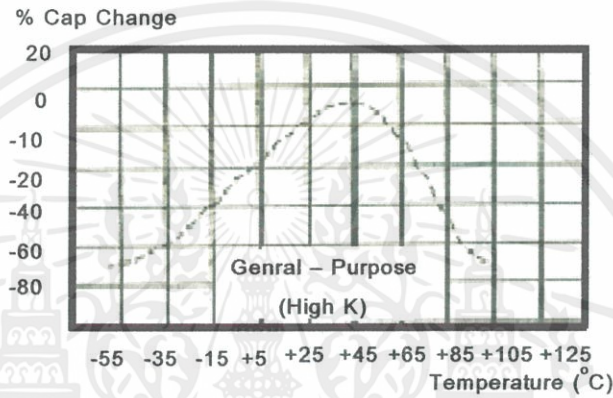


ก. ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกปานกลาง



ค. ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง

รูปที่ 2.19 อุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุ

จากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บประจุที่มี ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ จะมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นดีกว่า ตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ตัวไดอิเล็กตริกปานกลางและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงที่ตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกปานกลางจะมีเสถียรภาพปานกลาง ส่วนตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างสูง

2.3.2 ชนิดของตัวต้านทานและคุณสมบัติ [6,7]

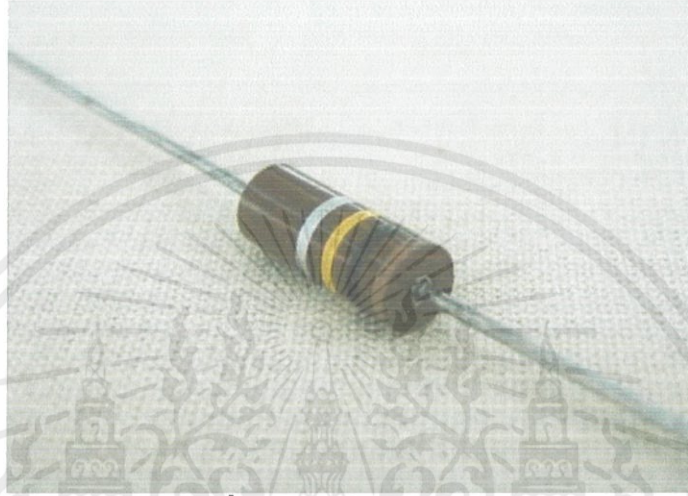
ความต้านทานเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีรูปร่างแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และความต้านทานแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

- 1) ความต้านทานแบบตั้งเดิม
- 2) ความต้านทานแบบฟิล์มทั้งหนาและบาง

ความต้านทานแบบตั้งเดิมโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ด้วยกัน โดยที่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างไม่เหมือนกัน [4]

2.3.2.1 คาร์บอนรีซิสเตอร์ (Carbon-Composition Resistors)

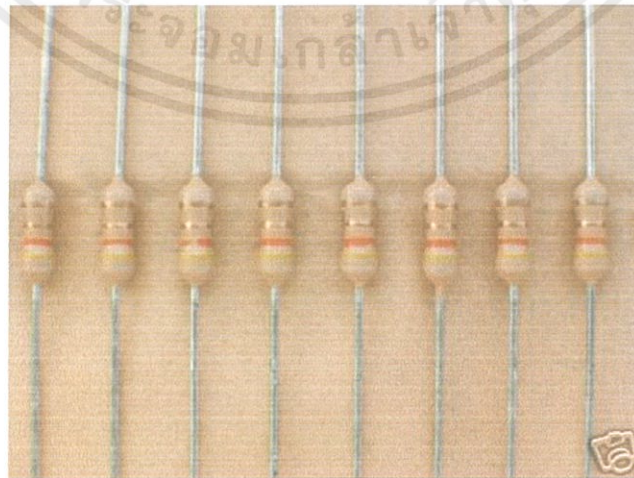
เป็นความต้านทานที่มีความน่าเชื่อถือสูง มีราคาต่ำ ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่า 1 โอห์ม - 22 เมกกะโอห์ม ความผิดพลาด 3%-20% พิกัดกำลัง 0.125-2 วัตต์ สัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ (TC) มีค่าประมาณ $0.1\% / ^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 0 ถึง $160\text{ }^\circ\text{C}$ ใช้งานได้ดีในย่าน 0 ถึง $60\text{ }^\circ\text{C}$ โดยที่ TC ละเลยได้ สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นจากตัวต้านทานชนิดนี้มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.20 คาร์บอนรีซิสเตอร์

2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์ (Carbon-Film Resistors)

มีค่าความต้านสูงมาก พิกัด 10-100 เมกกะโอห์ม มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ ค่าความคลาดเคลื่อน 0.5% ขึ้นไป ที่พิกัดน้อยกว่า 100 กิโลโอห์ม มีการสร้างสัญญาณรบกวนน้อยแต่มีราคาแพง ความต้านทานชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงบางครั้ง จะต้องมีผลการขีดเซยอุณหภูมิด้วย ไม่สามารถทนต่อแรงดันกระชากในช่วงสั้นๆ ละมีอัตราทนกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1 – 10 วัตต์

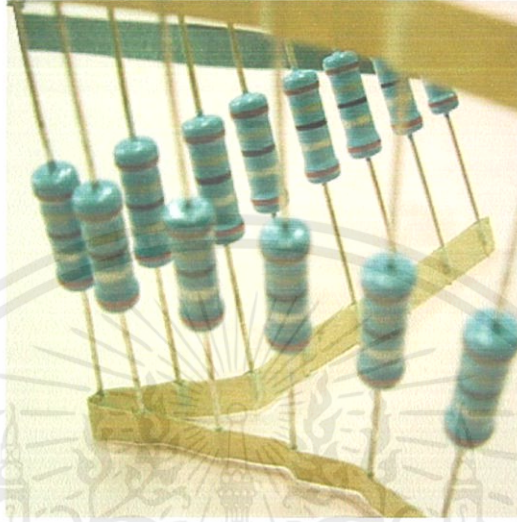


รูปที่ 2.21 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 เม็ทตอลฟิล์มรีซิสเตอร์ (Metal-Film Resistors)

เป็นความต้านทานใช้งานที่ต้องการสัญญาณรบกวนต่ำ พิกัด 0.1 โอห์ม – 1.5 เมกกะโอห์ม การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิมีต่ำ ($0.0001\%/^{\circ}\text{C}$) สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นมีค่าน้อยมาก พิกัดกำลัง 0.1-1 วัตต์ ความคลาดเคลื่อน 0.1 – 2% แต่มีราคาแพง



รูปที่ 2.22 เม็ทตอลฟิล์มรีซิสเตอร์

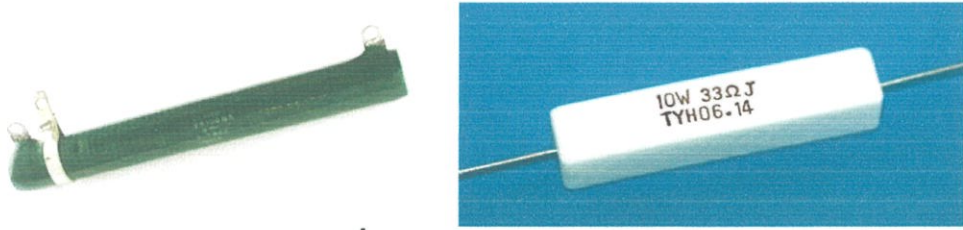
2.3.2.4 ไวร้รววดรีซิสเตอร์ (Wirewound Resistors)

ไวร้รววดรีซิสเตอร์ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 3 ประเภทคือ แบบมีกำลังสูง, ความถูกต้องสูงและแบบ ใช้งานทั่วไป ปกติแล้วตัวต้านทานแบบไวร้รววด จะมีค่าอินดักแตนซ์สูง แต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวต้านทานแบบไวร้รววดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ คือแบบไบฟิลลา (Bifilar wound Resistors) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวต้านทานไวร้รววดแบบไร้ความเหนี่ยวนำ (non-inductive wirewound resistor)

1) แบบมีกำลังสูง มีพิกัด 1 โอห์ม - 100 กิโลโอห์ม พิกัดกำลัง 5 – 200 วัตต์ มีค่าความผิดพลาด 5 – 10 % นำไปใช้งานประเภทเครื่องเสียง ต่อกับทรานซิสเตอร์

2) แบบมีความถูกต้องสูง สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมีค่าต่ำ มีเสถียรภาพสูงมาก ๆ โดยทั่วไป อยู่ในช่วงย่านความถูกต้อง 1% การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิมีค่า $0.0005\%/^{\circ}\text{C}$ ความต้านทานอยู่ในช่วง 1 โอห์ม - 100 กิโลโอห์ม ใช้งานประเภทที่มีความเที่ยงตรงสูง พิกัดกำลัง 0.25 - 1 วัตต์ โดยที่พิกัด 3, 5, 10, 25 วัตต์ ยังสามารถหาซื้อได้

3) แบบทั่วๆไป ช่วง 1/4 โอห์ม ถึง 10 กิโลโอห์ม พิกัดกำลัง 0.5, 1 และ 3 วัตต์ ความต้านทานแบบเดียวกับความต้านทานแบบคาร์บอน ค่าเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิมีต่ำ

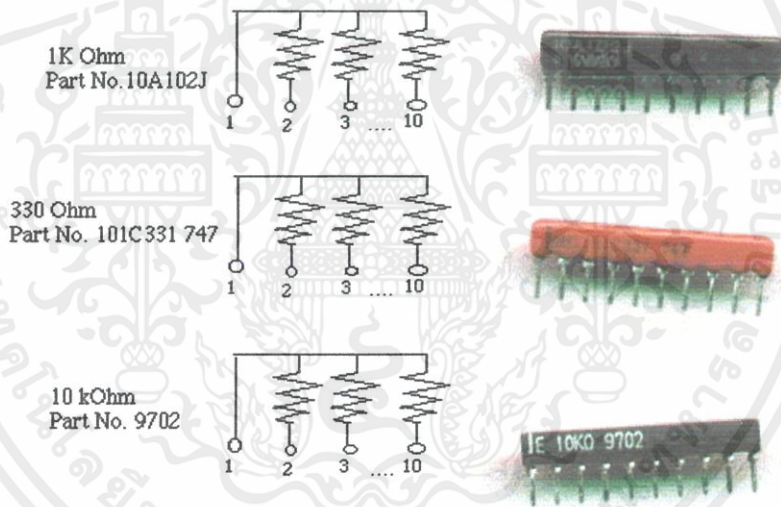


รูปที่ 2.23 ไวร์วาวด์รีซิสเตอร์

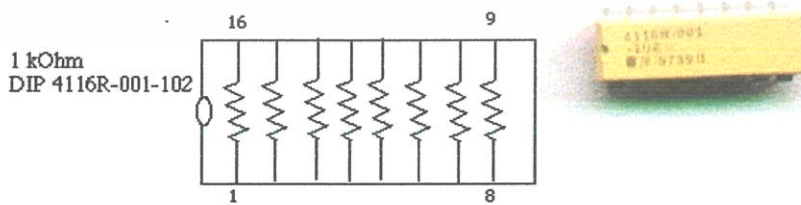
2.3.2.5 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP) และตัวถังแบบเดี่ยว (SIP)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ พิกัดประมาณ 10 โอห์มถึง 30 เมกกะโอห์ม พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงถึง 10 วัตต์ ค่าความคลาดเคลื่อน 0.1 % ถึง 2 %

เหมาะสำหรับงานซึ่งต้องการเสถียรภาพและความเที่ยงตรงสูงกว่าแบบคาร์บอน สามารถใช้กับงานในวงจรกระแสสลับได้ดี คือ จะมีย่านความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูงเป็นเมกกะเฮิรตซ์ได้ และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.24 ตัวต้านทานชนิดตัวถัง แบบเดี่ยว (SIP)



รูปที่ 2.25 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

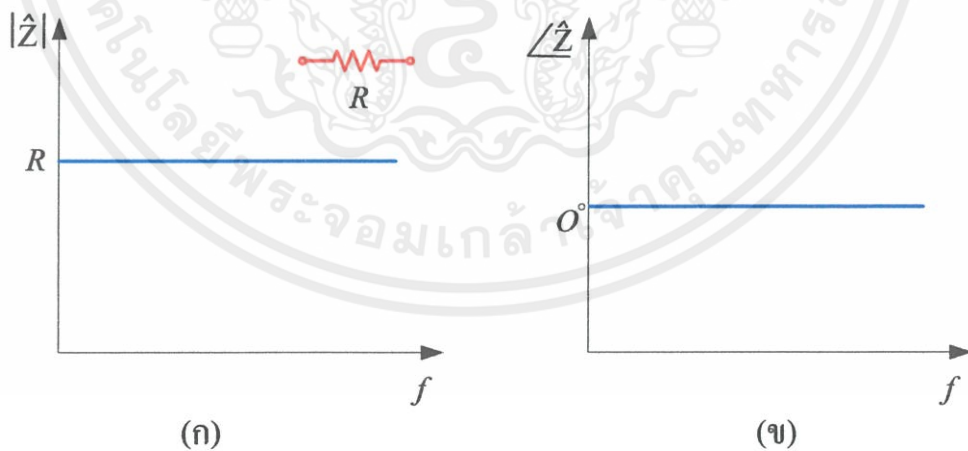
2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistors)

ตัวต้านทานชนิดนี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ โดยการใช้แกนหมุน (แบบวงแหวน) หรือเลื่อนแกน (แบบสไลด์) พิกัด 5 โอห์ม ถึง 1 เมกกะโอห์ม พิกัดกำลัง 0.2-1 วัตต์ ใช้งานเป็นรีโอสตัท (Rheostat) เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร หรือใช้เป็นแบบโพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) สำหรับควบคุมโวลต์เดจของวงจร หรือใช้สำหรับปรับสัญญาณต่างๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วอลลุ่ม (Volume), เบส (Bass) และทรีเบิล (Treble) หรือปุ่มปรับความสว่างของโทรทัศน์ (Brightness) และอื่น ๆ



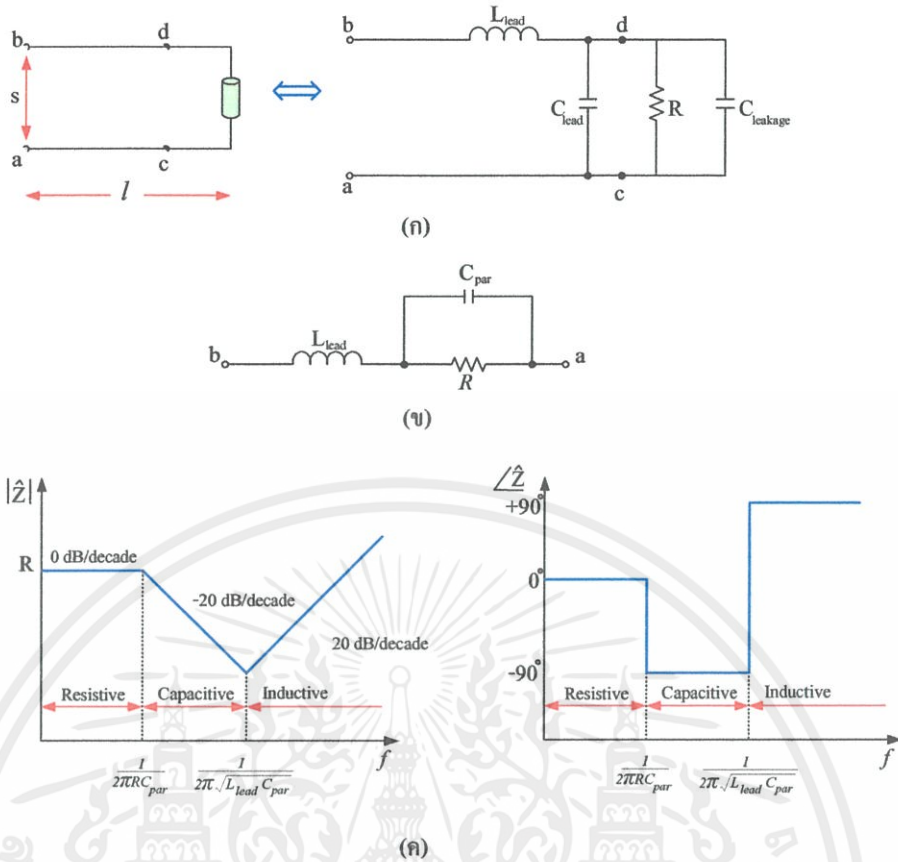
รูปที่ 2.26 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้

2.3.2.7 คุณสมบัติของตัวต้านทานเชิงอุดมคติและเชิงความถี่



รูปที่ 2.27 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 คุณสมบัติของตัวต้านทานที่ใช้งานจริงทางปฏิบัติ (ก) วงจรสมมูล (ข) วงจรสมมูลแบบง่าย (ค) ความสัมพันธ์เชิงความถี่โดยที่ $C_{par} = C_{lead} + C_{leakage}$

2.3.3 การฉนวน [2,8]

การฉนวนหมายถึง การใช้วัสดุที่เป็นฉนวนมาคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำที่มีแรงดันกับดิน และยังทำหน้าที่รับแรงทางกลช่วยระบายความร้อน การฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ

2.3.3.1 คุณสมบัติของฉนวน

วัสดุฉนวนที่ดีจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

1) คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

- มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อให้ขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อยประหยัด
- มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือการเสื่อมสภาพฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูง เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกดแรงบิดหรือแรงดึง

3) คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อน และช่วยระบายความร้อนได้ดีไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์ขยายตัว ทางความร้อนต่ำ

4) มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ไม่เป็นพิษ แม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

5) ทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมันไม่ดูดซึมความชื้น และทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

2.3.3.2 ชนิดของวัสดุฉนวน

การฉนวนที่ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงแบ่งตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

- 1) ฉนวนแข็ง
- 2) ฉนวนเหลว
- 3) ฉนวนก๊าซ

2.3.3.2.1 ฉนวนแข็ง

ในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบร่วมกับฉนวนเหลวหรือก๊าซ เพื่อทำหน้าที่ยึดและรองรับแรงทางกล ฉนวนแข็งเมื่อเกิดการเบรคดาวน์หรือเจาะผ่านแล้วจะเสียสภาพการฉนวนโดยสมบูรณ์และระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้ทั่วไปได้แก่ กระดาษ กระดาษอัด ยาง ไมก้า แก้ว เซรามิก หรือ พอร์เลน พลาสติก เมกะไลต์ คาสท์เรซิ่น ไฟเบอร์ โยแก้ว พีวีซี พีอี (PE) ครอสลิงค์ (XLPE)

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็ง

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)
- 2) เปอร์มีตติวิตี
- 3) แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริก
- 4) ความคงทนต่อแรงทางกล
- 5) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี ความร้อน

2.3.3.2.2 ฉนวนเหลว

จะมีน้ำหนักและความหนาแน่นมากกว่าก๊าซ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซ ที่คงความดันบรรยากาศเดียวกัน วัตต์ความดันไม่ได้ใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึมและช่วยระบายความร้อนได้ดี เมื่อเกิดการเบรคดาวน์ผ่านจะทำให้เสียสภาพความเป็นฉนวนชั่วคราว เมื่อเวลาผ่านไปก็สามารถกลับสู่สภาพการฉนวนได้ดีอีก แต่คุณภาพอาจต่ำลง มีความไวต่อสิ่งเจือปน ตัวอย่างฉนวนเหลวที่ใช้กันก็คือ น้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว

- 1) ความถ่วงจำเพาะ
- 2) จุดติดไฟสูง คือมีโอกาสที่จะเกิดเพลิงไหม้น้อย
- 3) ความหนืดต่ำ หมายถึงระบายความร้อนได้ดี
- 4) แพลกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า มีค่าต่ำ

2.3.3.2.3 ฉนวนก๊าซ

เป็นสารที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน คุณสมบัติก๊าซในแง่ของฉนวนก็คือ สามารถกลับคืนสู่สภาพความเป็นฉนวนได้อีกอย่างรวดเร็วหลังจากเกิดเบรคดาวน์ หรือเสียสภาพการฉนวนชั่วคราว ตัวอย่างก๊าซที่ใช้กันมากในการเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ อากาศ ใช้เป็นฉนวนภายนอกของอุปกรณ์ ก๊าซไนโตรเจนในอุปกรณ์ไฟฟ้า และก๊าซ SF₆ ใช้ในเซอร์กิตเบรคเกอร์ และ ระบบ GIS

2.3.3.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซ[8]

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซในสนามไฟฟ้า จะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน คือ

- 1) ความคงทน ต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ฉะนั้นการระบายความร้อนจึงอาจช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ส่วนกรณีของก๊าซนั้นอาจทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่น ก็คือการเพิ่มความดันก๊าซ
- 2) ฉนวนแข็งและฉนวนเหลวจะมีลักษณะสมบัติที่ต่างกับของก๊าซอย่างเด่นชัดประการหนึ่งก็คือ อายุหรือความเก่าแก่ (ageing) ซึ่งหมายถึงว่าเมื่อใช้งานไปนานๆ เป็นปีค่าความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้าจะลดต่ำลง
- 3) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งและฉนวนเหลว เมื่อได้รับแรงดันกระแสดตรงจะมีค่าสูงกว่าเมื่อรับแรงดันกระแสสลับ แม้จะคิดเทียบที่ค่ายอดก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 4) ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวคิดเป็นค่าอาร์เอ็มเอส แต่ในกรณีของก๊าซจะเกิดเบรคดาวน์ที่ค่ายอดเสมอ

5) ชีตความสามารถการใช้เป็นฉนวนของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกำหนดด้วยพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิ

6) อายุการใช้งานของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับอย่างมากกับดิสชาร์จบางส่วน (PD) ซึ่งเป็นผลเพิ่มพลังงานสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม และเป็นผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำลง อายุการใช้งานก็จะสั้นลงและนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ได้

2.3.3.2.5 การเสีสภาพการฉนวน [8]

ภาระหน้าที่หลักของการกันฉนวนก็คือ เป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่บางกรณีก็ทำหน้าที่รับแรงทางกลและทนต่อความร้อนด้วย การเสีสภาพของการฉนวน หมายถึง ฉนวนนั้นได้รับการเปลี่ยนจากสภาพการเป็นฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าไม่สามารถรับแรงดันได้ต่อไป ซึ่งการเสีสภาพอาจเนื่องจากทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ได้ หรือเสีสภาพเนื่องจากแรงทางกลหรือความร้อน กระบวนการที่ทำให้เสีสภาพการฉนวนนั้นเกิดขึ้นได้หลายประเภท เช่น

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

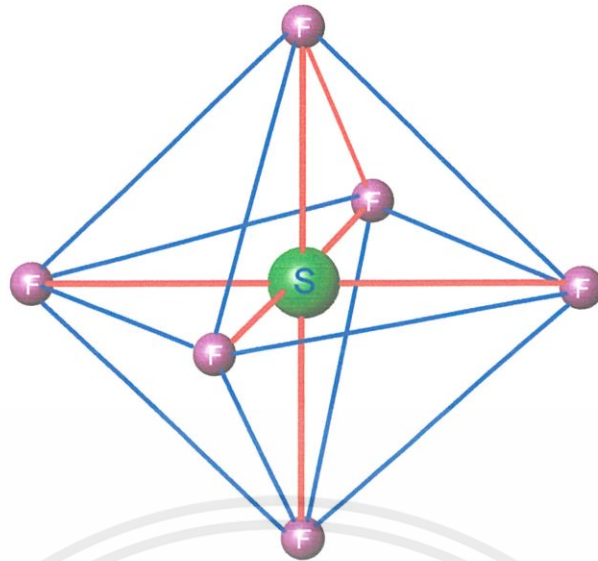
2.3.3.3 SF₆: (Sulphur Hexafluoride) [9]

SF₆ เป็นฉนวนประเภทฉนวนก๊าซ ปัจจุบันก๊าซ SF₆ ได้รับความสนใจและมีบทบาท สำคัญต่อเทคโนโลยีแห่งการฉนวน ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพราะ SF₆ มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าดีเป็นเลิศ ทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวนด้วยก๊าซชนิดอื่น ๆ มีเสีสภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี

การเลือกใช้ก๊าซเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการที่สำคัญ คือต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ที่ความดันไม่สูงนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เจือต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและถ่ายเทความร้อนดี ลักษณะคุณสมบัติดังกล่าว จะเห็น SF₆ มีคุณสมบัติครบถ้วน

2.3.3.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF₆

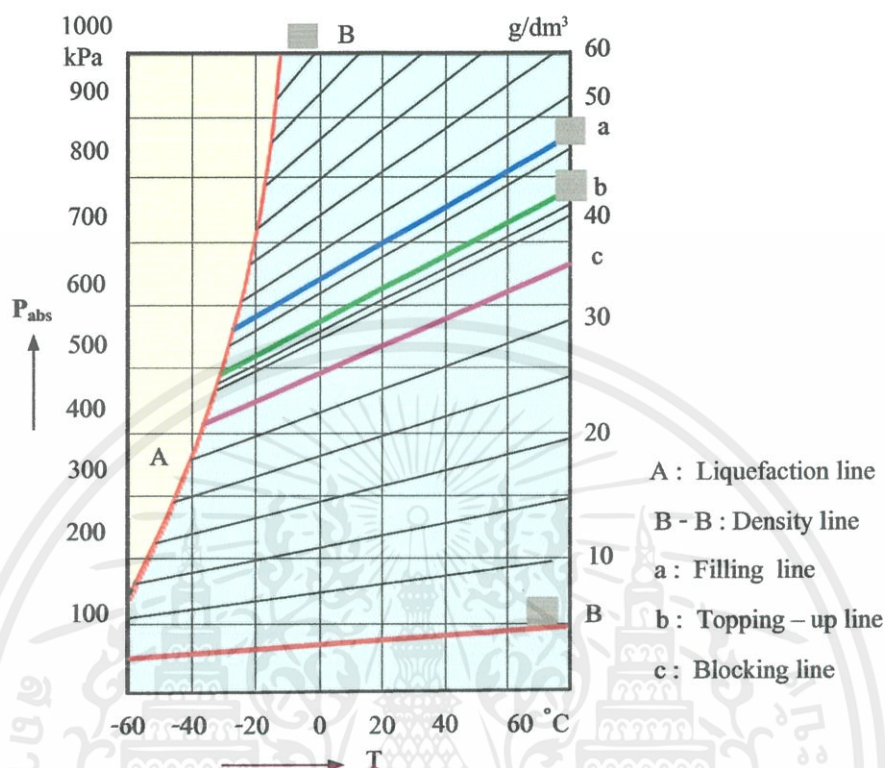
ก๊าซ SF₆ เป็นสารประกอบของเทคโนโลยี อะตอมมิคโมเลกุลของกำมะถัน และฟลูออรีน ดังรูปที่ 2.29 เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เจือต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500⁰ C ภายในถังที่ปิดมิดชิดปราศจากออกซิเจนและความชื้นคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

รูปที่ 2.29 โมเลกุลของ SF₆ตาราง 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆

น้ำหนักโมเลกุล	146.054
ความดันขณะเป็นไอที่ 70 °F, 1 atm	320 psig
ปริมาตรจำเพาะที่ 70 °F, 1 atm	25 ft ³ / lb
อุณหภูมิของจุด Sublimation ที่ 1 atm	-82.8 °F (-63.8 °C)
จุดเยือกแข็งที่ 2.21 atm	-69.4 °F (-50.8 °C)
ความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซที่ 20 °C, 1 atm	6.11
ความหนาแน่นในสถานะก๊าซที่ 0 °C, 1 atm	6.52 g / l
ความหนาแน่นในสถานะของเหลวที่ -50.8 °C	1.88 g/l
อุณหภูมิวิกฤต	114 °F (45.55 °C)
ความดันวิกฤต	38.35 kg/cm ² abs
ความหนาแน่นวิกฤต	0.734 g/ml
ความร้อนแฝงของจุด Sublimation ที่ -63.8 °C, 1 atm	38.62 cal/g
ความร้อนแฝงของจุดหลอมเหลวที่ -50.8 °C, 2.21 atm	8.2 cal/g
ความร้อนจำเพาะในสถานะของเหลวที่ -50.6 °C	0.18 cal/g °C
ความร้อนจำเพาะในสถานะก๊าซที่ 25 °C, 1 atm	0.16 cal/g °C
ความตึงผิวที่ -50 °C	11.63 dynes/cm
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกในสถานะก๊าซที่ 25 °C, 1 atm	1.00207
Ionization Potential	19.3 eV
ความสามารถละลายในน้ำที่ 25 °C, 1 atm	0.001 ml/ml water
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	87.8 kV/cm.bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

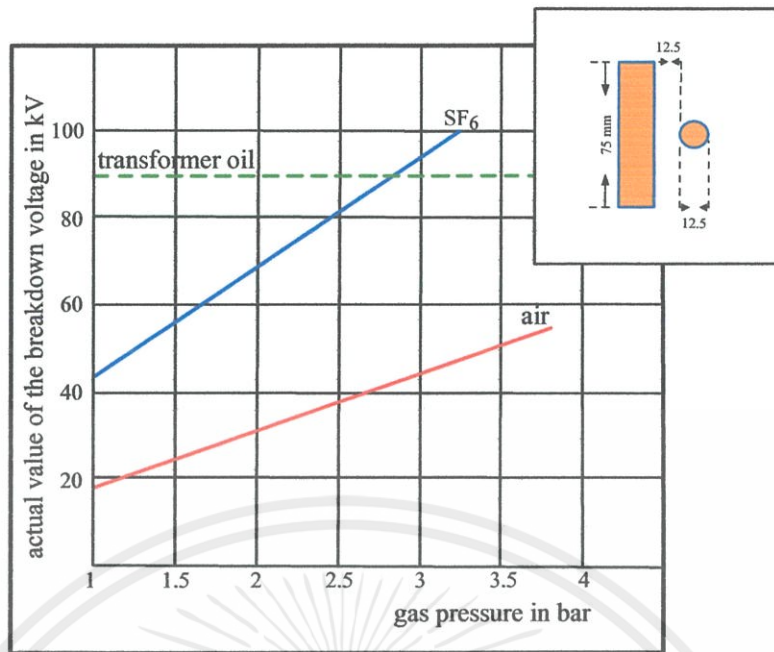
SF₆ จะอยู่ในสถานะก๊าซหรือไอเหลวนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันดัง
เส้นกราฟไดอะแกรมในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ไดอะแกรมความดัน - อุณหภูมิของ SF₆ พร้อมกับเส้นความหนาแน่น (g / dm^3)

โดยเส้น a เป็นเส้นที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการเติม SF₆ ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อก๊าซมีการรั่วออกไปจากระบบการฉนวน ก๊าซ SF₆ ต้องมีสถานะเหนือเส้น b และอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับระบบการฉนวนดังกล่าว จะต้องทำงานเมื่อระบบการฉนวนอยู่ภายใต้เส้น c

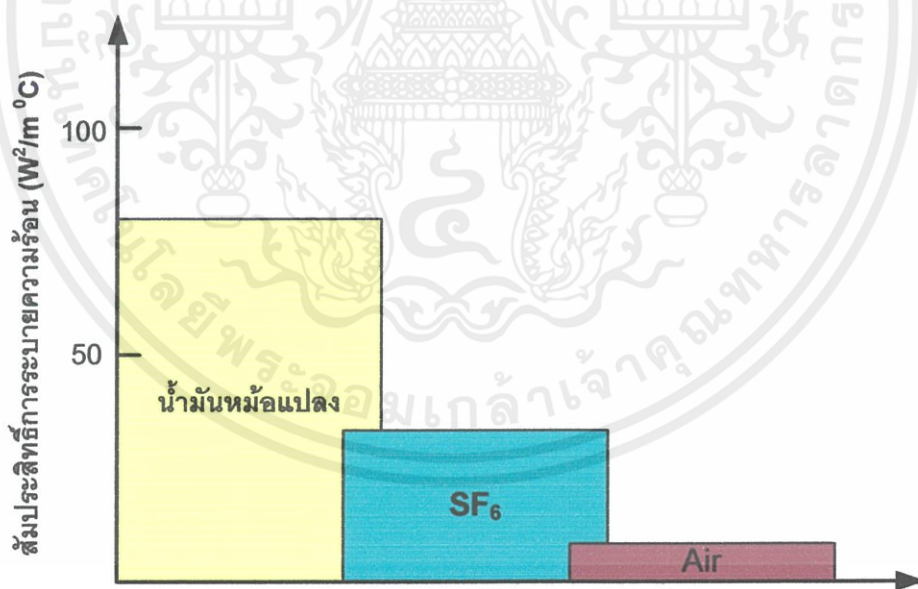
ก๊าซ SF₆ มีความหนาแน่นหนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบัน จึงทำให้ก๊าซ SF₆ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนกัน เช่น อากาศหรือไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ก๊าซ SF₆ จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศและจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่าๆ กับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF₆ มีความดันอัดประมาณ 3 bar (1 bar = 750 mmHg) ดังเส้นกราฟเปรียบเทียบ ในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แรงดันเบรคดาวน์ของก๊าซ SF₆ เปรียบเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง

2.3.3.3.2 คุณสมบัติการระบายความร้อนของก๊าซ SF₆

SF₆ จะมีคุณสมบัติระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศแต่ได้เพียงครึ่งหนึ่งของน้ำมันหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนของฉนวนตามธรรมชาติ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ

- 1) ผลตอบสนองรูปขึ้น
- 2) สเกลแฟกเตอร์

2.3.4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (Transfer characteristic) ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลต์เตจดีไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยระบบโครงข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

ในกรณีที่ $I_o = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (2.3)$$

ค่า $H(s)$ จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ที่ความถี่ต่ำ ๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่า ความถี่จำกัด (limit frequency) [6] ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (Normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(o)}{A_{11}(s)} \quad (2.4)$$

เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์มักจะมีค่าสเกลแพกเตอร์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่ (amplitude/frequency response) จึงทำได้ค่อนข้างยากวิธีที่นิยมในทางปฏิบัติ คือ การหาผลตอบสนองรูปขั้น (step response) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} H(s) \right] \quad (2.5)$$

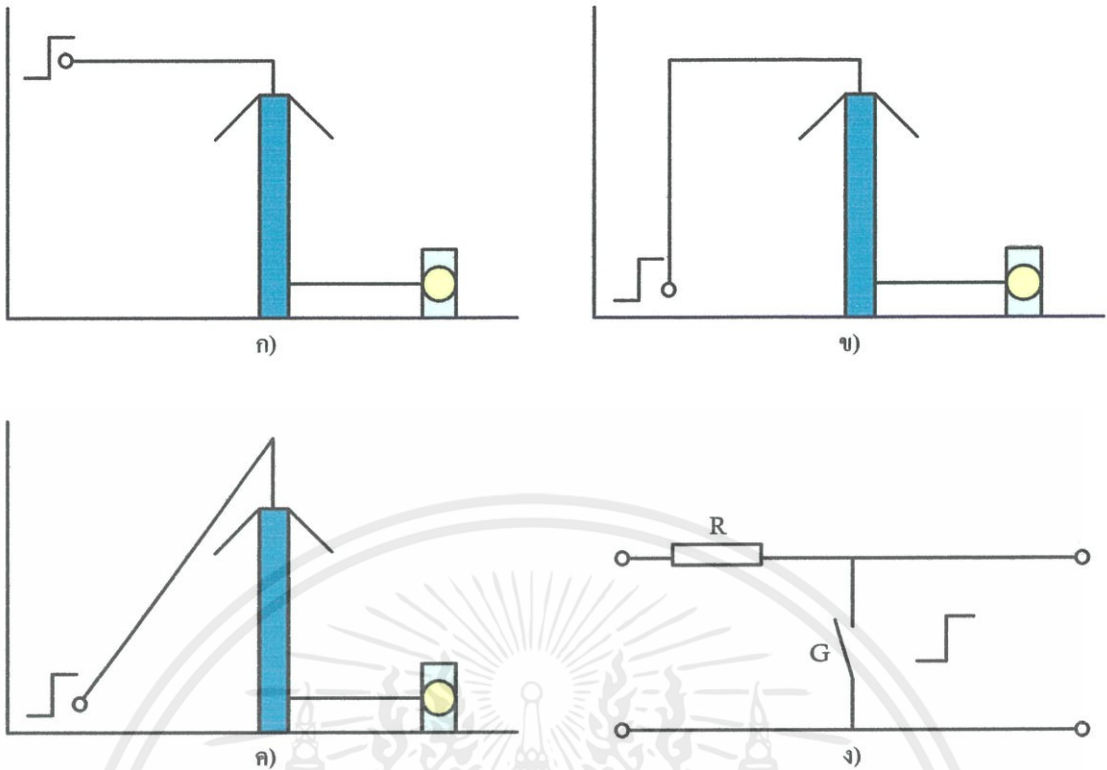
จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกเมื่อ ทราบแรงดันขาเข้า $V_i(t)$ ได้จาก [5]

$$V_o(t) = \int_0^t V_i'(t-\tau) G(\tau) \cdot d\tau \quad (2.6)$$

เมื่อ $V_i'(t-\tau)$ คือ อนุพันธ์ของ $V_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ
เวลาคอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการ

$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1-h(s)}{s} \right] \quad (2.7)$$

โดยวงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2(1994) [10] แสดงไว้ในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัตแรงดัน โดย G คือแกปสร้างแรงดันรูปขั้น

วงจรมีมาตรฐานแนะนำไว้คือ วงจรในรูปที่ 2.34 ก) และพารามิเตอร์ตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น มาตรฐานได้กำหนดนิยามไว้ดังนี้

1. พารามิเตอร์ผลตอบสนอง (response parameter) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีที่กำหนด

2. จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น (virtual origin of step response, O_1) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านเส้นที่เกิดการแกว่ง และใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

3. ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (normalized step response, $g(t)$) หมายถึง ผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.35 ก)

4. อินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (step response integral) หมายถึง อินทีกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น $g(t)$ (ดูรูปที่ 2.35 ข)

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau$$

5. เวลาตอบสนองจากการทดลอง (experimental response time, T_N) หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{\max}

$$T_N = T(t_{\max})$$

6. เวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time, T_α) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7. เวลาตอบสนองเศษเหลือ (residual response time, $T_R(t_i)$) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{\max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

8. ส่วนพุ่งเกิน (overshoot, β) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่งหน่วย

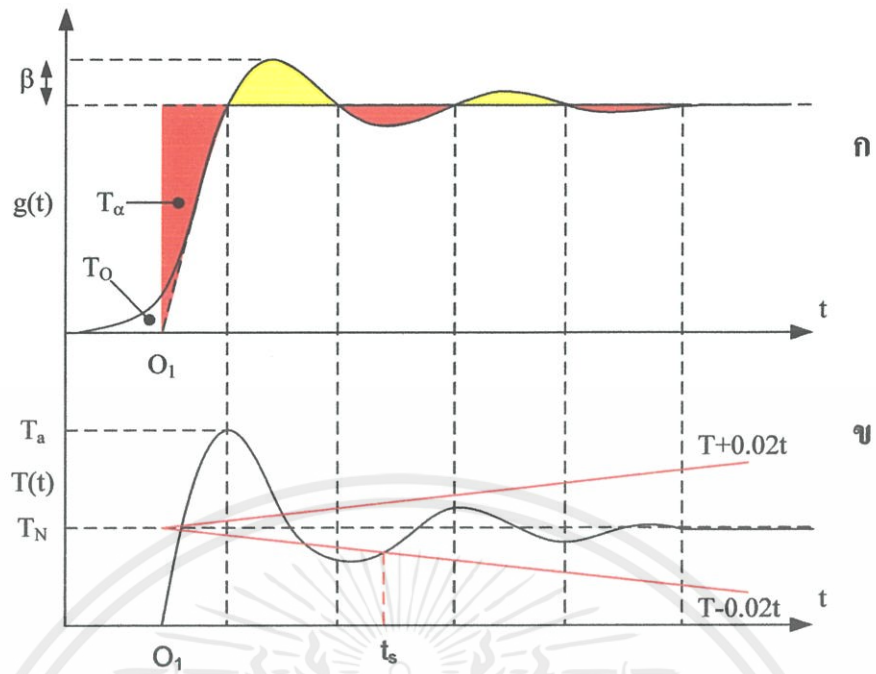
9. เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (initial distortion time, T_o) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

10. เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (setting time t_s) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ $T_R(t_i)$ มีค่าน้อยกว่า 2% ของ t สำหรับทุกๆค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง t_{\max}

$$|T_N - T(t)| < 0.02 t_s$$

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ [10]

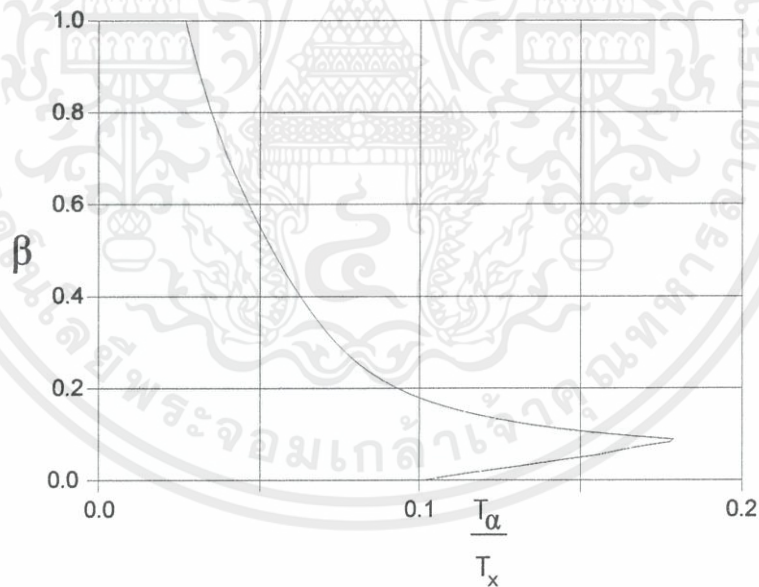
ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ที่ค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า T_α/T_1 จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรงเงาของรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [10]

ก) เมื่อเทียบกับ $g(t)$

ข) เมื่อเทียบกับ $T(t)$



รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x [10]

โดยที่ T_x คือ เวลาหน่วงคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์คลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาคลื่นตัด T_c พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

$$T_a - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$$

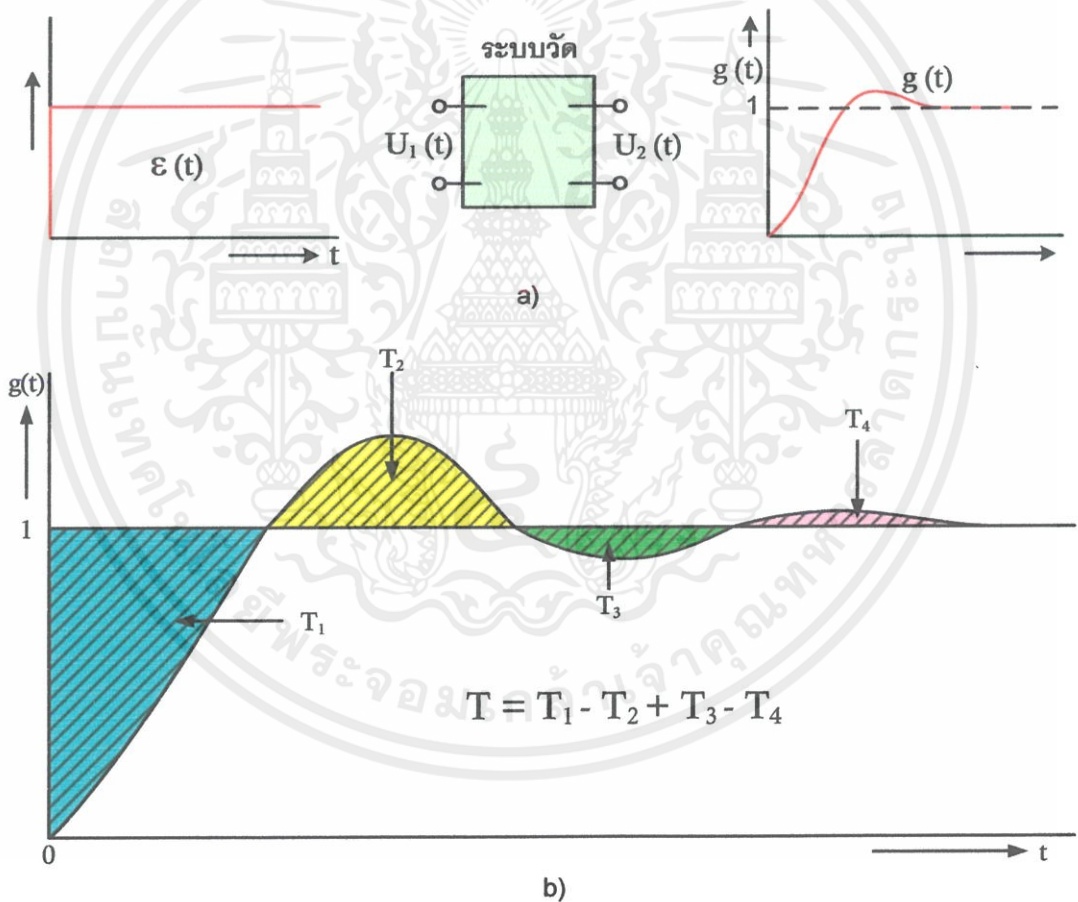
- เวลาเข้าสู่ สภาวะคงตัวควรมีค่า

$$T_s \leq T_c$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \leq 0.005T_c$$

จำกัดความของผลตอบสนองรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T แสดงดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ผลตอบสนองรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T

2.3.4.2 สเกลแฟกเตอร์ (Scale factor)

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [10] ได้นิยามไว้ ดังนี้

“สเกลแฟกเตอร์” หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่ทางคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 3\%$

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น (front time) จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 5\%$

2) ความมีเสถียรภาพ (Stability)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่ทางคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้า ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 3\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน สเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงที่ขั้วออกของสายนำแรงสูงต่อแรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด นั่นคือ

$$a = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.8)$$

เมื่อ a คือ สเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์

V_1 คือ แรงดันที่ปลายขาออกของสายนำแรงสูง

V_2 คือ แรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด

สเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบใดๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

ก) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด

ข) เทียบกับโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันที่แน่นอนแล้ว

ค) เทียบกับแกปทรงกลม

ทั้ง 3 วิธีที่ใช้กันอยู่นี้ วิธี ก. เหมาะสำหรับหาอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎีซึ่งอาจแตกต่างไปจากเวลาใช้งานจริงได้ วิธี ข. และ ค. นั้นใช้ได้กับโวลต์เตจดีไวเดอร์ทุกแบบ โดยที่วิธี ค. เป็นวิธีซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง $\pm 3\%$

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลท์เตจติไวเดอร์จากการทดลองนั้นถ้าทำการทดลองในสถานที่ต่าง ๆ กันค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันที่ได้อาจมีค่าต่างกันไปเพราะค่าอัตราส่วนแรงดันขึ้นอยู่กับค่าความจุสเตรลงดินของโวลท์เตจติไวเดอร์ ดังนั้นการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลท์เตจติไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งซึ่งจะติดตั้งโวลท์เตจติไวเดอร์ในการใช้งานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลท์เตจดีไวเซอร์

3.1 คุณสมบัติของโวลท์เตจดีไวเซอร์

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างเป็นโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันสูงกระตกร และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานในตัวเดียวกัน โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60060-2(1994) [10] กำหนด ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลท์เตจดีไวเซอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเหตุที่ใช้เป็นแบบผสม เพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองดีขึ้น และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน ซึ่งเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง

ชนิดของแรงดันที่ต้องการวัด	พิกัดสูงสุดที่ต้องการออกแบบสร้าง
แรงดันสูงกระแสสลับ	100 kV _{rms}
แรงดันสูงกระแสตรง	100 kV
แรงดันสูงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน	200 kV _p

โดยโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นลักษณะโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ องค์กรประกอบภาคแรงสูง และองค์กรประกอบภาคแรงต่ำ โดยผ่านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการวัดค่าแรงดันผ่านภาคแรงสูง ซึ่งในส่วนนี้จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าลดน้อยลงเพื่อส่งผ่านแรงดันที่ได้ไปยังภาคแรงต่ำของโวลท์เตจดีไวเซอร์ ในส่วนของภาคแรงต่ำนี้จะมีการลดระดับแรงดันที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้ได้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่จะนำไปต่อร่วมกับโวลท์เตจดีไวเซอร์เพื่อวัดค่าแรงดันด้านออกของโวลท์เตจดีไวเซอร์ เช่น ออสซิลโลสโคป หรือโวลท์มิเตอร์ เป็นต้น

3.2 การออกแบบโวลท์เตจดีไวเซอร์แบบผสม

โวลท์เตจดีไวเซอร์ลักษณะดังกล่าวนี้ เป็นการนำตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุตามต้องการโดยมีตัวต้านทานต่อขนานในแต่ละชั้นและระหว่างชั้น อัดก๊าซฉนวน (SF₆) ที่ความดัน 3 bar โดยไม่เกิดโคโรนาระหว่างอิเล็กโทรด

3.2.1 การออกแบบสร้างภาคแรงสูง

3.2.1.1 ค่าวาวไฟตามพิกัด [2-6]

ความยาวท่ออะคลิลิกกำหนดด้วยระยะวาวไฟตามพิกัดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของท่ออะคลิลิก ในกรณีแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะใช้ระยะวาวไฟตามพิกัดมีค่าน้อย

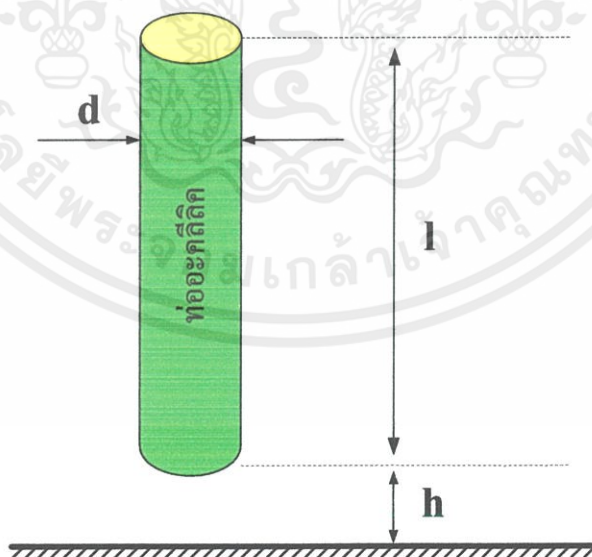
$$2.5 \text{ m} / 1 \text{ MV}$$

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันอิมพัลส์พิกัดเท่ากับ 100 kV ดังนั้นระยะวาวไฟตามพิกัดควรมีค่าน้อยเท่ากับ 0.25 เมตร ซึ่งในกรณีนี้ออกแบบท่อที่มีความยาว 1 เมตร เนื่องจากในที่นี้ระยะความยาวท่อ (l) จะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ

3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน

ความจุสเตรย์ลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือ ค่าความจุสเตรย์ลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงสูงเป็นตัวเก็บประจุน้อย เมื่อบรรจุอยู่ในท่ออะคลิลิกก็สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุน้อยรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.1 ค่าความจุสเตรย์หาได้จากสมการ

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



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุน้อยรูปทรงกระบอก

ท่ออะคลิลิกที่เลือกใช้มีความยาว (l) ของท่อที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 1 เมตร ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 20 เซนติเมตร มีความสูงวัดจากพื้นดิน (h) เท่ากับ 20 เซนติเมตร นำมาแทนในสมการจะได้

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

$$= \frac{5.560312 \times 10^{-11}}{1.928977892}$$

$$= 28.825 \text{ pF}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณเท่ากับ 28.825 pF

3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypropylene Film) มีขนาดความจุ 0.022 μF พิกัด 1600 V_{DC} /650 V_{AC} โดยที่ AC พิกัด 100 kV_{rms} จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งสิ้นจำนวน 154 ตัว

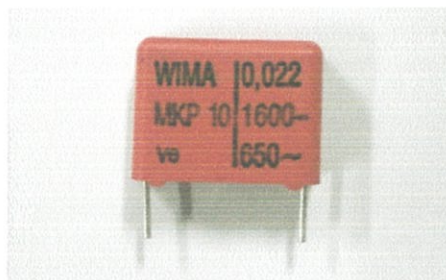
เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่จะวัด

ที่ 1.1 เท่า หรือ 110 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน $\frac{110k}{650} = 170$ ตัว

คิดเผื่อความปลอดภัย

ที่ 1.3 เท่า หรือ 130 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน $\frac{130k}{650} = 200$ ตัว

จึงเลือกใช้จำนวน 200 ตัว ชั้นละ 8 ตัว จำนวน 25 ชั้น ที่ความปลอดภัย 1.3 หรือ 130 % และในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุควรให้มามีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณ 3 เท่า หรือมากกว่า ในที่นี้ค่าความจุสเตรย์ลงดินมีค่าเท่ากับ 28.825 pF เมื่อนำตัวเก็บประจุจำนวน 200 ตัวมาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 110 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์มาก โดยที่มีกระแสที่พิกัดแรงดัน 3.45 mA

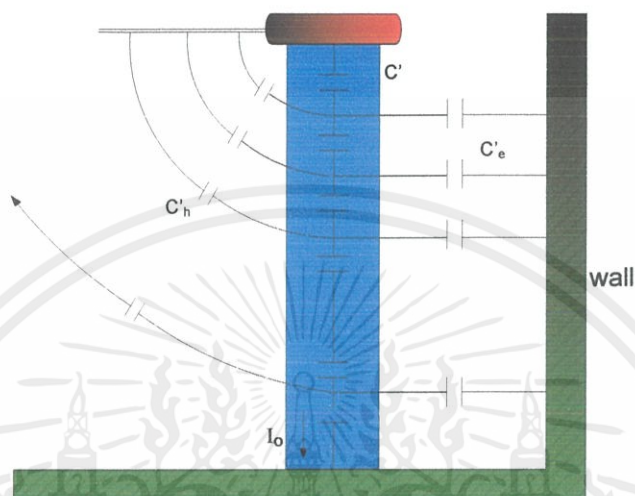


รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดัน เมื่อโวลต์เตจติวเดอรรันใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) โดยต้องคำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Withstand test ที่ 110% หรือ 1.1 เท่า



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

$$U_k = \frac{U}{C'e' + C'h'} \left[\frac{C'e' \sinh(\alpha k / 200)}{\sinh \alpha} + C'h' \left[\frac{1 - \sin(\alpha k / n)}{\sinh \alpha} \right] \right] \quad (3.2)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C'e' + C'h')}{C_r}} \quad (3.3)$$

เมื่อ U = แรงดันคงทนได้ = 110 kV

C = ค่าของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว = 2.20E-08

C_e = ค่าความจุสเตรย์ = 2.88E-11

n = จำนวนตัวเก็บประจุ = 200

k = ชั้นที่ 1

$C'e$ = C_e/n = 1.44E-13

$C'1$ = $C1/n$ = 1.1E-10

$C'h$ = 0

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C'e' + C'h')}{C_r}} = 0.036193922$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตารางเปรียบเทียบแรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1

ระดับ Withstand test		1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
C ตัวที่ 1 พิกัด $U_C = 650 V_{AC}$	170 ตัว	588.107	646.918	705.728	764.539	823.350	882.160
	200 ตัว	499.809	549.88	599.869	649.858	699.847	749.836

□ ใช้งานได้ □ พิกัด □ เกินพิกัด

ดังนั้นจึงเลือกออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 200 ตัว ซึ่งสามารถใช้ทดสอบความคงทนของอุปกรณ์ได้ตามมาตรฐาน [10] ที่ 1.3 หรือ 130 %

3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ตัวความต้านทานภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง ตามมาตรฐานกำหนดให้ $R \leq 10 M\Omega/kV$, $1 mA \geq I \geq 0.1 mA$ โดยเราใช้ตัวต้านทาน ชนิดคาร์บอนฟิล์ม ขนาด $10 M\Omega$ มาต่อขนานกับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยใช้ตัวต้านทาน จำนวน 25 ตัว จะได้ R รวมทั้งหมด $250 M\Omega$ ซึ่งจะได้

$$R = 250M\Omega/100kV_{dc} = 2.5k\Omega/kV_{dc}$$

$$I = 100kV/250M\Omega = 0.4 mA$$

จากที่คำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานและกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง

3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย

จากการต่อตัวต้านทานจะเกิดค่าสูญเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$loss = \frac{V^2}{R} = \frac{(100kV)^2}{250M\Omega} = 40W \quad (3.4)$$

ค่าสูญเสียจากความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 40 W เป็นค่าการสูญเสียรวมทั้งหมด เมื่อหาที่แต่ละชั้นจะได้เท่ากับ $40/25 = 1.6 W$ กำหนดให้ใช้ตัวต้านทานที่มีพิกัด 3 W ต่อชั้น

3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงจะต้องกระจายตลอดภาคแรงสูงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดจากเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในสายตัวนำแรงสูงและตัวเก็บประจุภาคแรงสูง การต่อตัวต้านทานกระจายนี้ยังสามารถช่วยหน่วงการแกว่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลต์เตจดีไวเดอร์เองได้ดีกว่าการต่อความต้านทานหน่วงภายนอกโวลต์เตจดีไวเดอร์ อย่างไรก็ตามก็ยังมี การแกว่งของระบบวัดเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายตัวนำซึ่งจะต้องมีความต้านทานภายนอกซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำต่อเพื่อหน่วงการแกว่งดังกล่าว ความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงหาได้จากสมการ (3.5)

$$R_d \approx 4\sqrt{L/C_e} \quad (3.5)$$

ปกติค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 500 ถึง 1000 โอห์ม [2,6] และไม่ควรรอกแบบให้มีค่าความต้านทานสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ค่าเวลาตอบสนองมีค่ามากเกินไป ขณะเดียวกันจะต้องมีความต้านทานไม่ต่ำมากนัก เพราะจะไม่สามารถหน่วงการแกว่งของรูปคลื่นได้เพียงพอ การหาค่าตัวต้านทานจากสมการ (3.5) จะต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำของโวลต์เตจดีไวเดอร์ก่อนจึงต้องทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ โดยทำการเชื่อมต่อตัวเก็บประจื่อย่อยภาคแรงสูงทั้งหมดให้เป็นตัวเก็บประจุล้น (R=0) และหาผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ หรือได้จากการคำนวณโดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์ด้วยความเร็วแสงซึ่งมีค่าประมาณ 3.33 ns/m [5] จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Z_t C_e = \tau_t \text{ (nS/m)} \quad (3.6)$$

โดยที่ $Z_t = \sqrt{L/C_e}$ คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์
 C_e คือ ค่าเก็บประจุสเตรย์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์
 $\tau_t = \sqrt{L \cdot C_e}$ คือ เวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} Z_t &= \frac{\tau_t}{C_e} = \frac{3.33 \text{ ns/m}}{28.8 \text{ pF}} \\ &= 115.625 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_d &= 4 \cdot Z_t \\ &= 4 \cdot 115.625 \\ &= 462.5 \Omega \end{aligned}$$

ค่าความต้านทานหน่วงที่คิดได้เป็นค่าความต้านทานหน่วงภายในโวลท์เตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูงทั้งหมด เมื่อนำมาต่อจะต่ออยู่ระหว่างชั้นของแต่ละชั้น จำนวน 24 ชั้น จะได้ค่าความต้านทานหน่วงแต่ละชั้นเท่ากับ $462.5/24 = 19.27 \Omega$ ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ค่าความต้านทานหน่วงที่พิกัด 20 Ω 5 W เป็นตัวต้านทานแบบเซรามิก



รูปที่ 3.5 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันอิมพัลส์

3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลท์เตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

ก) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซีลต์ของเคเบิลสายวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

ข) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมชซิ่งของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกับความต้านทานแมชซิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์โดยอาศัยสมการ (3.7)

$$a = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3.7)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลท์เตจดีไวเดอร์

C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออก 100 V ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันโวลต์เตจติไวดอเตอร์มีค่า 1000:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุและค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (3.8)$$

3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลต์เตจติไวดอเตอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 100 V จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวดอเตอร์เท่ากับ 1000:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงสูงทั้งหมดเท่ากับ 110 pF ซึ่งเลือกเป็นแบบ Polypropylene ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำคำนวณได้จาก

$$\frac{C_2}{C_1} = 1000 \quad (3.9)$$

จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงต่ำ 0.11 μF โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.022 μF ต่อขนานกัน 5 ตัว

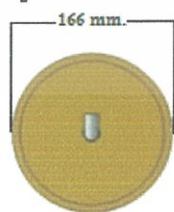
3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวดอเตอร์เท่ากับ 1000:1 ค่าความต้านทานภาคแรงสูงรวมทั้งหมด 250 $\text{M}\Omega$ โดยค่าความต้านทานคำนวณได้จาก

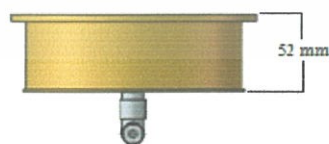
$$\frac{R_1}{R_2} = 1000 \quad (3.10)$$

จากการคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ 250 $\text{k}\Omega$ โดยใช้ตัวต้านทานชนิดเม็ทอลฟิล์มขนาด 1.25 $\text{M}\Omega$ 3 W ต่อขนานกัน 5 ตัว

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมชซิ่ง (R_m) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยความต้านทานแมชซิ่งนี้เลือกใช้แบบฟิล์มโลหะขนาด 2 W 50 Ω จำนวน 1 ตัว ได้ค่าความต้านทาน $R_m = 50 \Omega$ ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานภาคแรงต่ำจะประกอบอยู่ภายในกระบอกทองเหลือง ดังรูปที่ 3.5



(ก)



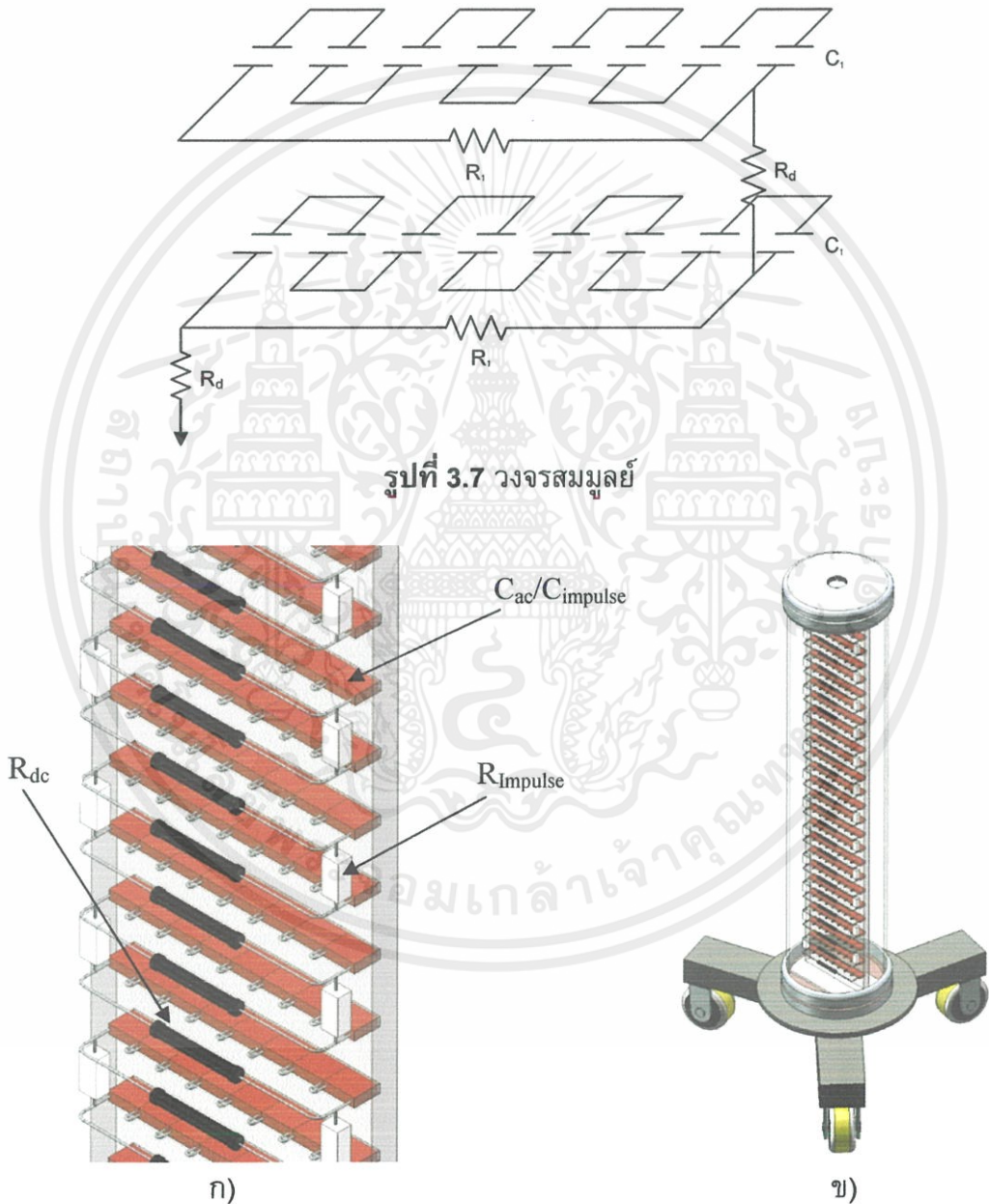
(ข)

รูปที่ 3.6 ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ

ก) ด้านล่าง ข) ด้านข้าง

3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์

การต่อตัวเก็บประจุย่อยและตัวต้านทานในภาคแรงสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 200 ตัว ตัวต้านทานย่อยทั้งหมดจำนวน 25 ตัว และตัวต้านทานหน่วยจำนวน 24 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นอะคลิลิกสีหนา 1.5 cm. ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 8 ตัว ซึ่งจะนำตัวเก็บประจุย่อยต่อเข้าไป ต่อจากนั้นจึงนำตัวต้านทานย่อยต่อขนานกับตัวเก็บประจุย่อยแต่ละชั้นและระหว่างชั้น ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุจะเป็นการต่อแบบอนุกรม และตัวต้านทานจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละท่อน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7 ถึง รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลย์

รูปที่ 3.8 การจำลองการสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

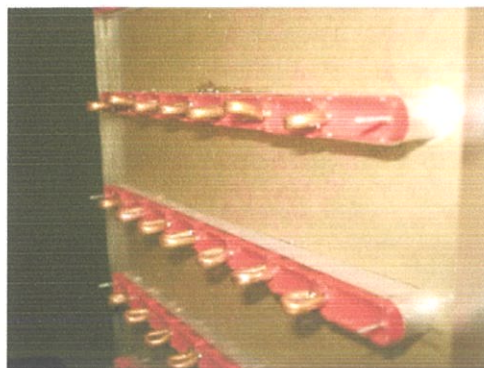
ก) การจำลองการเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยแต่ละชั้น

ข) การจำลองโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



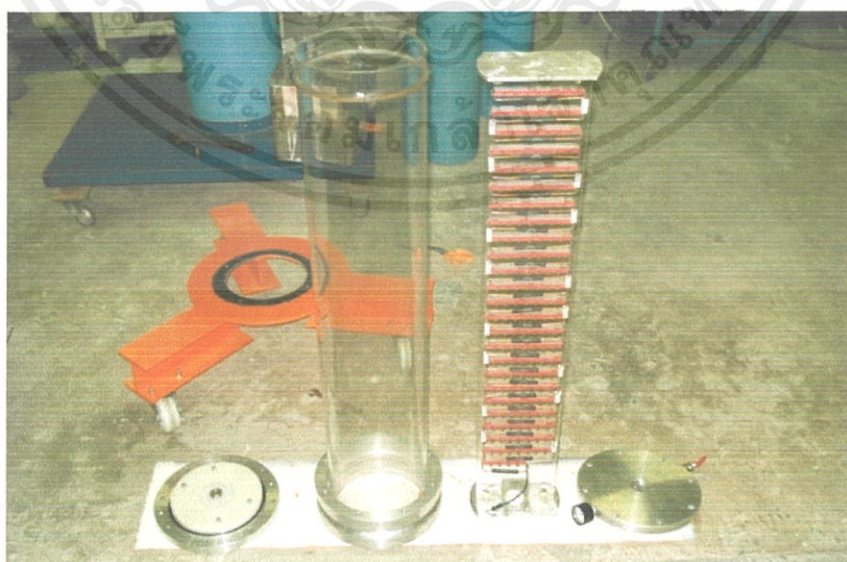
ค)



ง)

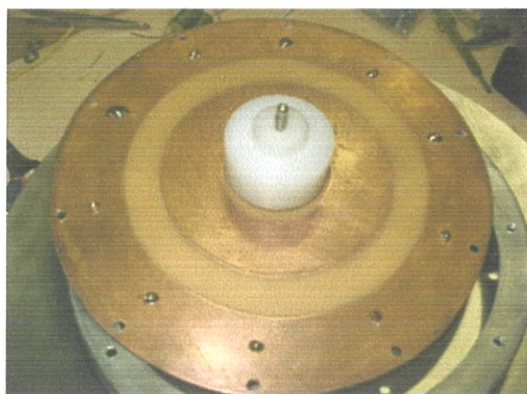
รูปที่ 3.9 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์

- ก) แผ่นอะคลิลิกใสเซาะร่องสำหรับจับยึดตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน
- ข) การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น
- ค) การเชื่อมต่อตัวต้านทานขนานตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น
- ง) ภาคแรงสูงที่เสร็จสมบูรณ์

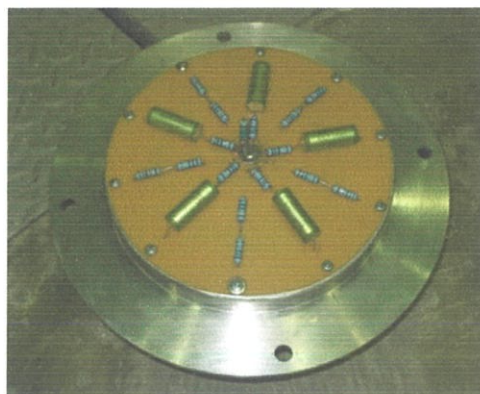


รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 3.11 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์

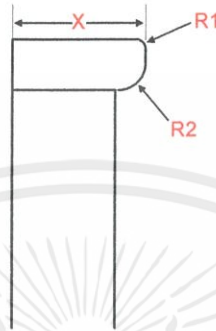
- ก) ด้านล่างของแผ่นวางอุปกรณ์ภาคแรงต่ำ
- ข) การจัดวางอุปกรณ์ภาคแรงต่ำด้านบน
- ค) ครอบอกภาคแรงต่ำที่เสร็จสมบูรณ์

3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

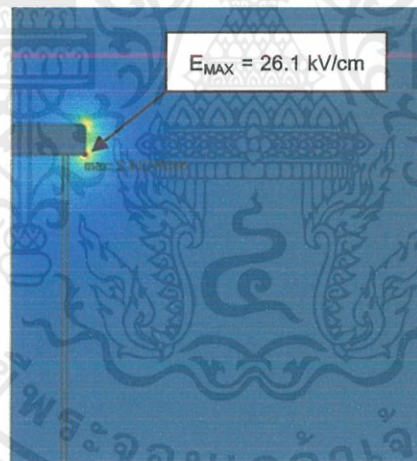
ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น ควรจะออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้สะดวก การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรจะไม่มีความซับซ้อน เพราะจะทำให้จุดๆ นั้นเกิดความเครียด สนามไฟฟ้าสูง ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งควรมีความแข็งแรงทางกลด้วย เมื่อประกอบเข้ากับท่ออะคริลิกใส สะดวกในการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง หรืออุปกรณ์แรงสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ทำควรป้องกันการรั่วซึม เนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลว หรือก๊าซบรรจุอยู่เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนระหว่างตัวอุปกรณ์กับผิวท่อ ดังนั้นเราจึงใช้โปรแกรมช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณสนามไฟฟ้า (FEM) ช่วยในการวิเคราะห์อิลีคโตรด รูปทรงต่างๆ ทั้งแบบพื้นฐาน ครึ่งวงกลม และได้ทำการทดลองเปลี่ยนระยะ x รัศมีขอบบน และรัศมีของล่าง โดยการจำลอง ความเครียดของสนามไฟฟ้าจากรูปทรงพื้นฐาน โดยกำหนดให้อิลีคโตรดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่ง แทนด้วยอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเปอริมิตติวิตี (ϵ)=1 และค่าคอนดักติวิตี (ρ)= 3.8×10^7 Siemens / meter ดังรูปที่ 3.13

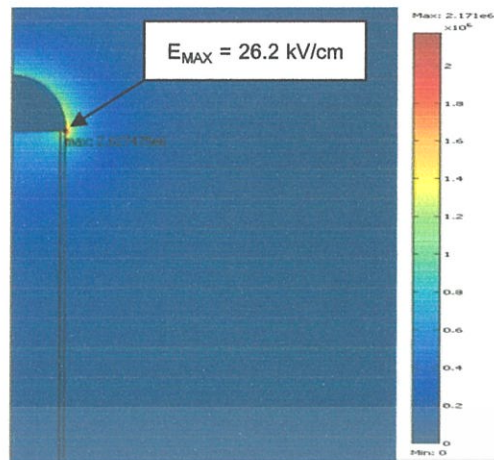


รูปที่ 3.12 โครงสร้างการวิเคราะห์อิลีคโตรด
เมื่อ x คือ รัศมีของอิลีคโตรด, $R1$ คือ รัศมีขอบบนของอิลีคโตรด,
 $R2$ คือ รัศมีขอบล่างของอิลีคโตรด



รูปที่ 3.13 ลักษณะของอิลีคโตรดพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมและสนามไฟฟ้า

จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอยู่ 2 จุด คือ ขอบด้านบน และขอบด้านล่าง แต่จะเกิดมากที่ขอบด้านล่างโดยมีค่าสูงสุด = 26.1 kV/cm ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการเพราะจะเกิดโคโรนา เราจึงต้องลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง โดยการ ออกแบบอิลีคโตรดใหม่ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ลักษณะของอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมและสนามไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมในรูปที่ 3.14 จะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่จุดขอบด้านล่างและมีค่าน้อยลงกว่าในรูปที่ 3.13 โดยมีค่าสูงสุด = 26.2 kV/cm แต่ว่าอิเล็กโทรดรูปทรงนี้จะใช้ค่าจ่ายในการสร้างสูง เพราะใช้เนื้อโลหะจำนวนมาก อีกทั้งขั้นตอนการทำส่วนโค้งให้มีผิวเรียบสม่ำเสมอสามารถทำได้ยาก ดังนั้นอิเล็กโทรดจึงควรมีลักษณะรูปทรงคล้ายครึ่งวงกลมแต่ด้านบนเรียบ โดยจะหาค่าขนาดของรัศมี (X) ของอิเล็กโทรดได้จากการคำนวณดังนี้

$$r = \frac{V}{E_{\max}} = \frac{130kV \times \sqrt{2}}{20kV/cm} = 9.2cm$$

$$\text{คูณเผื่อ } 130\% = 9.2 \times 1.3 = 11.96 \approx 12 \text{ cm}$$

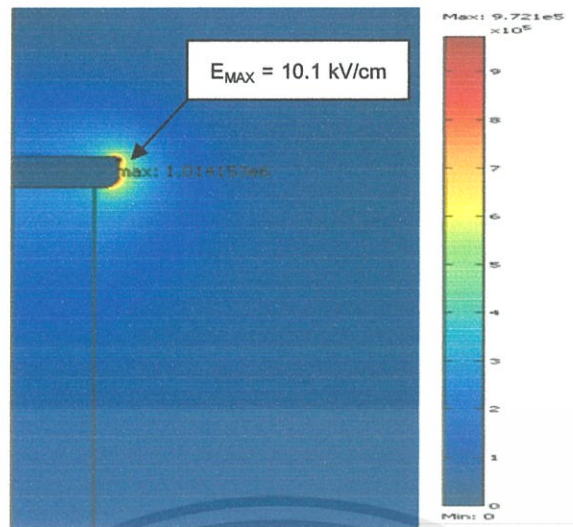
$$\therefore r \geq 12 \text{ cm}$$

r คือ รัศมีของอิเล็กโทรด

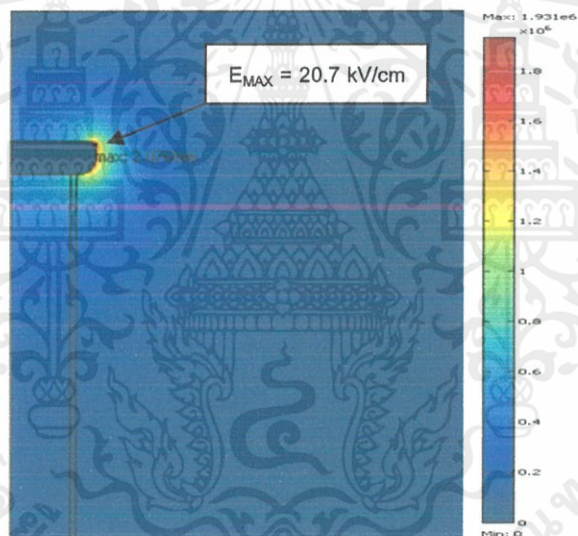
V คือ ค่ายอดแรงดันใช้งาน

E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศที่ 20 kV/cm

สาเหตุที่เราต้องคูณเผื่อ 130% เนื่องมาจากขนาดรัศมีของอิเล็กโทรดจากการคำนวณมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออะคลิลิกใสที่ใช้งาน จึงไม่สามารถเจาะรูเพื่อใช้สกรูยึดอิเล็กโทรดได้ จึงต้องคูณเผื่อเพื่อเพิ่มขนาด

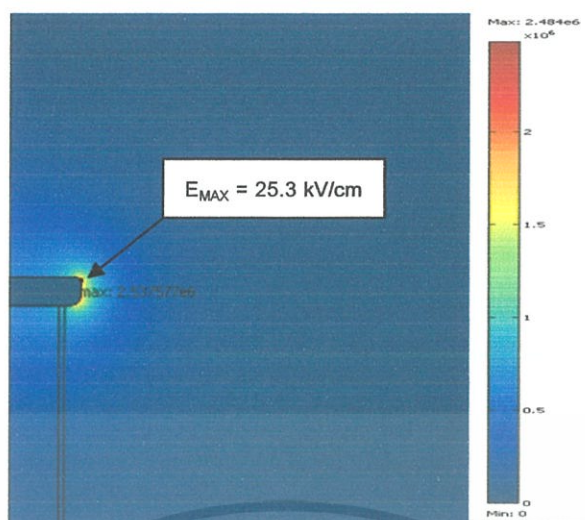


รูปที่ 3.15 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี $x = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1 cm
โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 2 cm

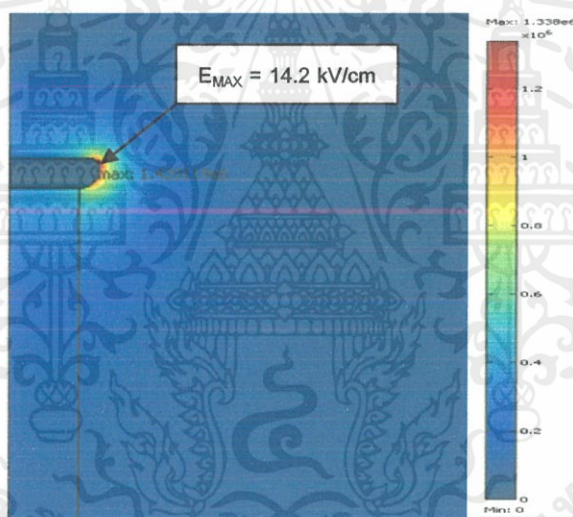


รูปที่ 3.16 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี $x = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1 cm
โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 2.7 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



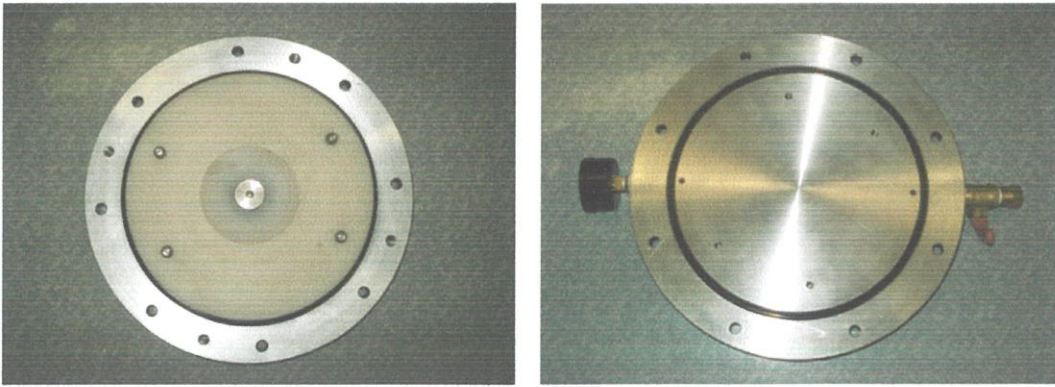
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี $x = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1.5 cm
โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 2 cm



รูปที่ 3.18 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี $x = 13$ cm โค้งขอบด้านบน ($R1$) = 1.5 cm
โค้งขอบด้านล่าง ($R2$) = 3 cm

อิเล็กทรอนิกส์ที่เราใช้ในโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสมนี้คือ ดังรูปที่ 3.15 โดยใช้ โปรแกรม FEM ช่วยในการออกแบบ โดยมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด = 10.1 kV/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

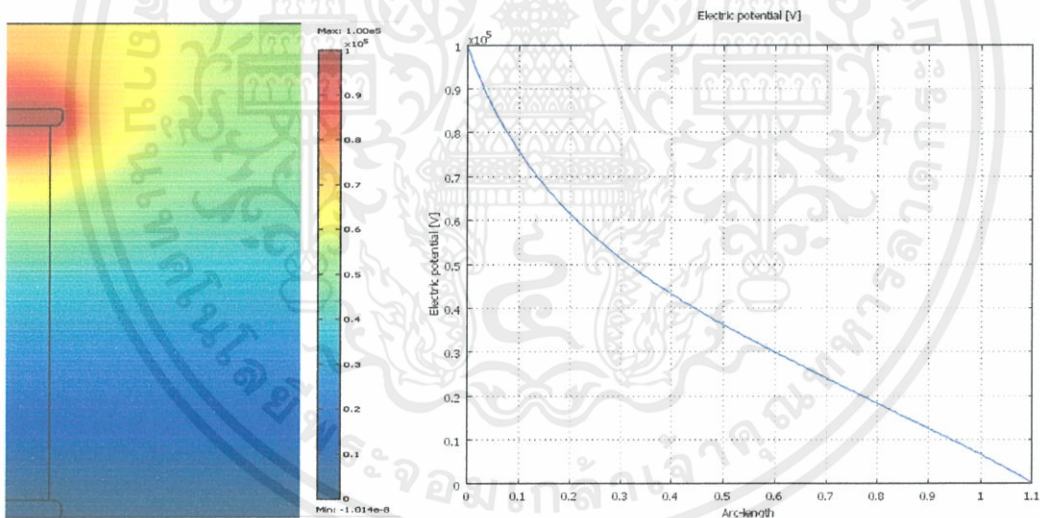
ข)

รูปที่ 3.19 อิเล็กโทรดของโวลต์เดจดีไวเดอร์

เมื่อ ก) ด้านล่าง ข) ด้านบน

3.5 การวางไฟตามผิวท่อ

จากในหัวข้อที่ 3.4 ที่ผ่านมาเราทำการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดโดยใช้โปรแกรม (FEM) ในหัวข้อนี้เราใช้โปรแกรม (FEM) ทำการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามผิวท่อ โดยแสดงออกมาในรูปกราฟของอิเล็กโทรดที่เราเลือกที่จะใช้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองวางไฟตามผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U

คุณสมบัติสาย RG11 A/U		รายละเอียด
อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)		75 ± 2.5
ค่าความจุภายใน (pF / m)		67
การสะท้อน (>= dB)	VHF	20
ตัวนำ	วัสดุ	แทลเลียมคาร์บอน
	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	1.2
ไดอิเล็กตริก	วัสดุ	PE
	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	7.2 ± 0.5
สายถักชีลด์	วัสดุชั้นที่ 1	ทองแดง
	วัสดุชั้นที่ 2	-
เปลือกหุ้ม	วัสดุ	PVC
	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	10.3 ± 0.3
น้ำหนัก kg / km		143
อุณหภูมิ (°C)		-10°C / +80°C
อัตราการลดทอน ≤ dB / 100m	10 MHz	1.8
	50 MHz	4.5
	100 MHz	6.5
	800 MHz	22
	1000 MHz	25.5

3.6.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

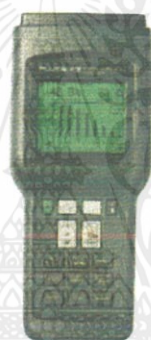
ในส่วนของภาคแรงดันต่ำจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือวัดที่สามารถวัดแรงดันขาออกของโวลต์เตจดีไวเซอร์ได้ และเครื่องมือวัดแรงดันต่ำมีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล แต่ปัจจุบันเครื่องมือวัดที่นิยมใช้กันมากคือ แบบดิจิตอล จึงจะขอยกตัวอย่างเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลที่จะนำมาใช้วัดแรงดันเอาท์พุทที่ออกจากโวลต์เตจดีไวเซอร์ดังนี้

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1 [11]

Overvoltage Installation category	Working Voltage (dc or ac – rms to ground)	Peak Impulse Transient (20 repetitions)	Test source ($\Omega = V/A$)
CAT I	600 V	2500V	30 Ohm source
CAT I	1000V	4000V	30 Ohm source
CAT II	600V	4000V	12 Ohm source
CAT II	1000V	6000V	12 Ohm source
CAT III	600V	6000V	2 Ohm source
CAT III	1000V	8000V	2 Ohm source



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 3.24 เครื่องมือวัดแรงต่ำ

- ก) มัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV
- ข) FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer
- ค) Oscilloscope DL 1540/DL 1540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV

Function	Ranges/Description
DC Voltage	0 to 1000 V
AC Voltage, true RMS	15 mV to 1000 V – 100 kHz Bandwidth
Basic Accuracy	DC voltage : 0.025% AC voltage : 0.4%
DC Current	0 to 10 A (20 A for 30 seconds)
AC Current, true RMS	25 μ A to 10 A (20 A for 30 seconds)
Resistance	0 to 30 M Ω
Conductance	0 to 50 nS
Capacitance	0.01 nF to 50 mF
Diode Test	3.1 V
Temperature	-200 $^{\circ}$ C to 1350 $^{\circ}$ C (-328 $^{\circ}$ F to 2462 $^{\circ}$ F)
Frequency	0.5 Hz to 1000 kHz

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ FLUKE 41 Power Harmonics Analyzer

ระดับสัญญาณขาเข้าต่ำสุด 5 Vrms (ใช้ V REFERENCE) หรือ 1Arms(ใช้ A REFERENCE)			
การวัด แรงเคลื่อนไฟฟ้า	INPUT RANGE 0.0 V ถึง 600 V rms(ac+dc) 0.0V ถึง +/-933 V peak	การวัดกระแสไฟฟ้า (TRUE RMS) (1mV/A) ISOLATED	INPUT RANGE 1.0 mV (A) ถึง1000mVrms (A) (ac+dc)1.0 mV (A) ถึง +/-2000 mV (A) peak
ความถูกต้อง เบื้องต้น (ที่ 5Hz-65 Hz, dc)	rms:+/-(0.5%+2digits) peak dc : +/- (2%+3digits)	ความถูกต้องเบื้องต้น (ที่ 5 Hz- 65 Hz,dc)	rms:+/(0.5%+3digit) + PROBE SPECS peak, dc: +/--(2%+4digits)
ความต้านทานขาเข้า	1M , BALANCE	ความต้านทานขาเข้า	1M/47pF
CREST FACTOR	> 3.0 ต่ำกว่า 300V, 1.5/600 V	CREST FACTOR	> 3.0 ต่ำกว่า600mV, 2.0/1000mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของ Oscilloscope DL 1540/DL 1540L

Input Terminals: The input impedance is $1\text{ M}\Omega \pm 1.5\%$ and approximately 25 pF

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของ Probe

Item	Specifications Setting 10:1	Setting 1:1	Conditions
Input impedance/capacitance	$10\text{ M}\Omega \pm 2\%$ approx. 14 pF	$1\text{ M}\Omega \pm 1.5\%$ approx. 100 pF	When used with this instrument
Attenuation ratio	$10:1 \pm 2.5\%$	-	When used with this instrument
Frequency band	DC to 150 MHz	DC to 6 MHz	When used with this instrument
Rise time	2.4 ns or less	58 ns or less	When used with this instrument
Maximum input voltage	$600\text{ V(DC + ACpeak)}$ or 424 Vrms , Frequency is 100 kHz or lower	*1	-
Connector type	BNC	BNC	-
Total length	1.5 m	1.5 m	-

* 1 when the probe's attenuation ratio is "1:1", never input voltage exceeding the maximum input voltage of this instrument

3.7 การอัดก๊าซ SF₆

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเป็นแบบผสมระหว่างตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่งประกอบด้วยภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ ในส่วนของภาคแรงต่ำ ภายนอกเป็นกระป๋องอลูมิเนียมภายในใช้อากาศเป็นฉนวน ส่วนในภาคแรงสูงภายนอกเป็นท่ออะคริลิก และภายในเลือกใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนภายใน ซึ่งคุณสมบัติความเป็นฉนวนของก๊าซ SF₆ ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความดันที่อัดเข้าไป แต่การที่จะอัดก๊าซเข้าไปนั้นต้องพิจารณา คุณสมบัติการทนความดันของท่ออะคริลิก และขนาดของขั้วต่อและวาล์วปิด - เปิด เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ

3.7.1 ขั้วต่อและวาล์วที่เลือกใช้

ส่วนใหญ่มักจะนิยมใช้ขั้วต่อและวาล์วทองเหลืองเป็นตัวเชื่อมต่อ เนื่องจากไม่ขึ้นสนิม ขั้วต่อและวาล์วที่ใช้จะมีขนาด 1/4 นิ้วทั้งหมด และเกจวัดความดันที่ใช้สามารถอ่านค่าความดันได้สูงสุด 10 บาร์ ในส่วนของขั้วต่อและวาล์วได้ทำการออกแบบโดยจะมีขั้วต่อเป็นตัวรับก๊าซและผ่านเกจวัดความดันมาตามสายและเข้าตัววาล์ว ซึ่งส่วนของวาล์วปิด - เปิด จะติดตั้งอยู่ที่ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ด้านหลังเพื่อป้องกันการรั่วของก๊าซที่อาจจะเกิดที่สายได้ เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานานๆ



ก)

ข)

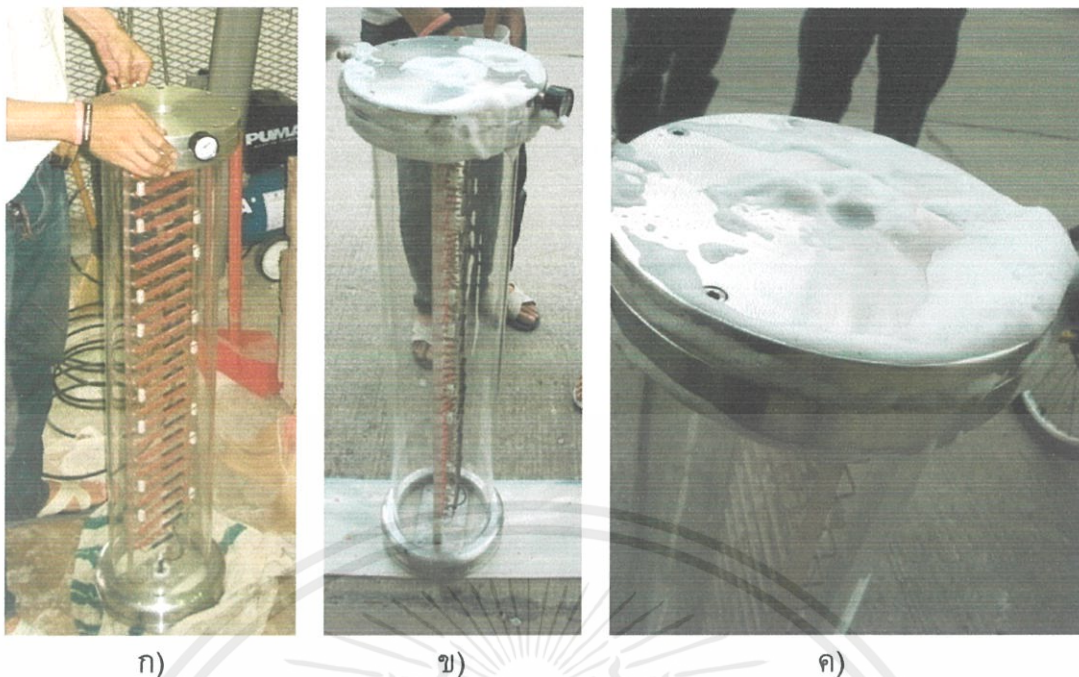
ค)

รูปที่ 3.25 เกจวัดความดันและขั้วต่อทองเหลืองที่เลือกใช้

ก) เกจวัดความดัน ข) ขั้วต่อด้านรับก๊าซ ค) การประกอบเข้ากับฝาอิเล็กทรอนิกส์ด้านหลัง

3.7.2 การตรวจเช็คการรั่วซึม

ก่อนที่จะทำการอัดก๊าซ ต้องทำการเช็ค การรั่วซึมของอากาศที่อัดภายในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์เสียก่อนจนแน่ใจว่าเมื่ออัดก๊าซเข้าไปแล้วไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซ การเช็คดังกล่าว ในที่นี้ใช้ลมอัดเข้าไปแทนก๊าซแล้วใช้น้ำสบู่ลูบให้ทั่วดูว่ามีฟองหรือไม่ ถ้ามีฟองโป่งขึ้นมาแสดงว่าจุดนั้นมีการรั่วซึม ซึ่งการรั่วซึมที่พบเกิดจากการไขขั้วต่อทองเหลืองไม่แน่น จึงมีการพันเกลียวขั้วต่อทองเหลืองเพิ่มและทำการไขให้แน่นการรั่วซึมจึงหายไป



ก)

ข)

ค)

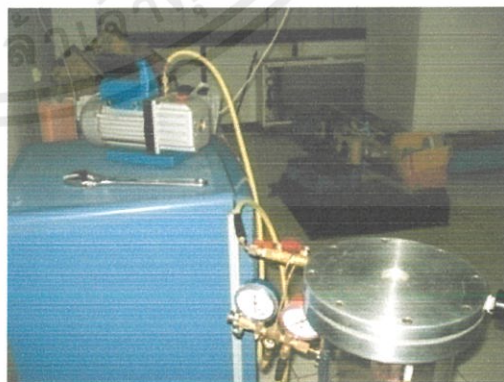
รูปที่ 3.26 การเช็คการรั่วซึมของโวลท์เตจดีไวเดอร์

ก) การอัดลมเพื่อเช็คการรั่วซึม ข) การเช็คการรั่วซึม ค) ลักษณะการรั่วซึม

3.7.3 การอัดก๊าซ SF₆

1. การแวกคัมทำโดยการใช้เครื่องแวกคัมดูดอากาศภายในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ออกให้มากที่สุดหรือไม่มีอากาศเลย วิธีนี้ทำให้ก๊าซที่อัดเข้าไปเป็นก๊าซที่บริสุทธิ์ โดยมีอากาศปนอยู่น้อยที่สุดหรือไม่มี

2. เมื่อทำการแวกคัมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการอัดก๊าซเข้าไป เมื่อต่อสายก๊าซเข้ากับวาล์วของตัวดีไวเดอร์ก็เปิดวาล์วที่ถังก๊าซแล้วดูความดันภายในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์เมื่อถึงค่าที่ต้องการแล้ว ก็ปิดวาล์ว

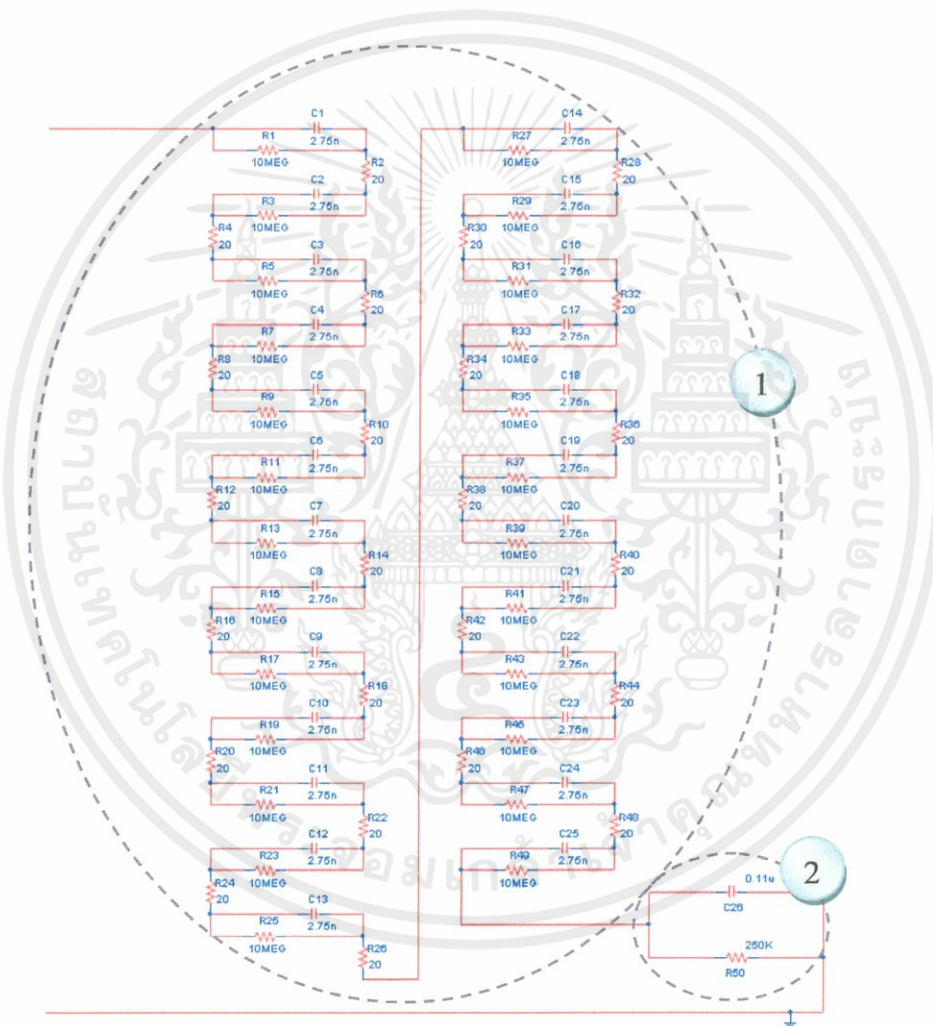


รูปที่ 3.27 การแวกคัมโวลท์เตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การจำลองการทำงานของโวลท์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ออกแบบ โดยที่ด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำจะประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน โดยที่ด้านแรงสูงจะแบ่งออกเป็น 25 ชั้น ซึ่งใน 1 ชั้นจะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 8 ตัว ในที่นี้ได้ทำการรวมตัวเก็บประจุ 1 ชั้น เป็นตัวเดียว เพื่อประหยัดพื้นที่ในการเขียนวงจร โดยจะมีตัวต้านทานต่ออยู่ระหว่างชั้นเป็นจำนวน 24 ตัว ส่วนทางด้านแรงต่ำ ก็ทำการรวมตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานเป็นตัวเดียว เพื่อสะดวกในจำลองการทำงาน เมื่อเรานำค่าต่างๆ ที่คำนวณเรียบร้อยแล้วมาต่อก็คจะได้วงจรดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลท์เตจดีไวเดอร์

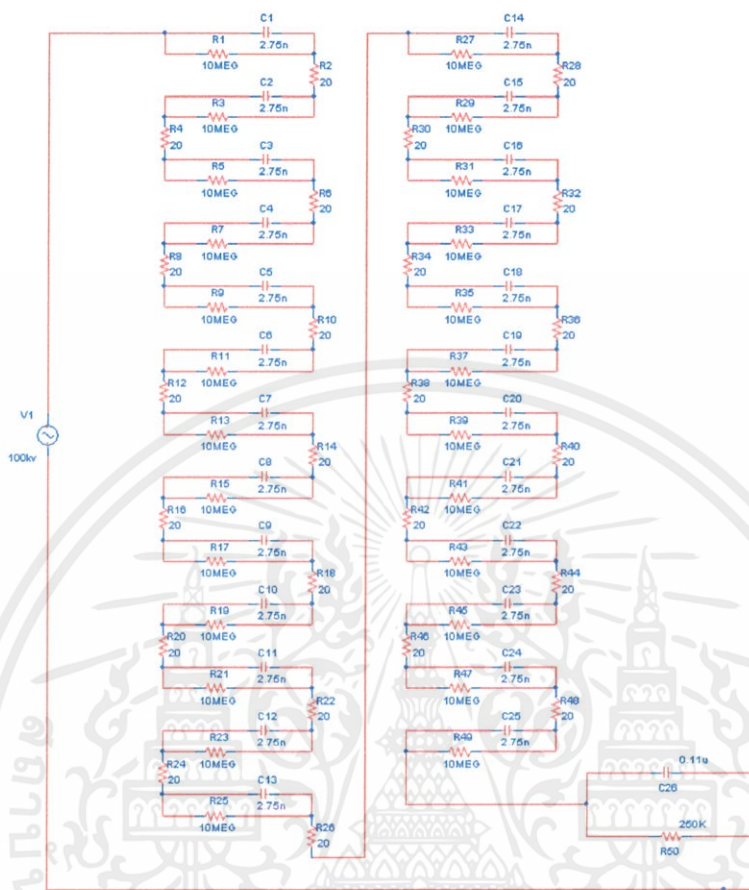
เมื่อ 1 คือ อิมพีแดนซ์ด้านแรงสูง (Z_1)

2 คือ อิมพีแดนซ์ด้านแรงต่ำ (Z_2)

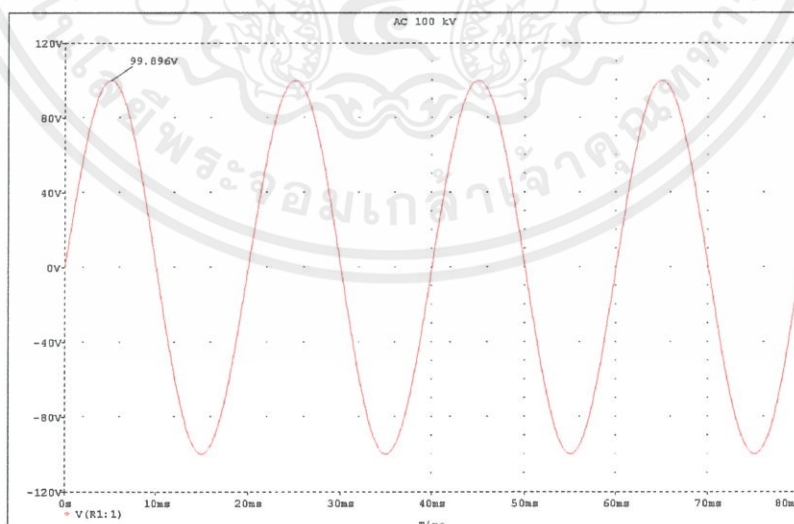
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่พิกัด

3.8.1.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV

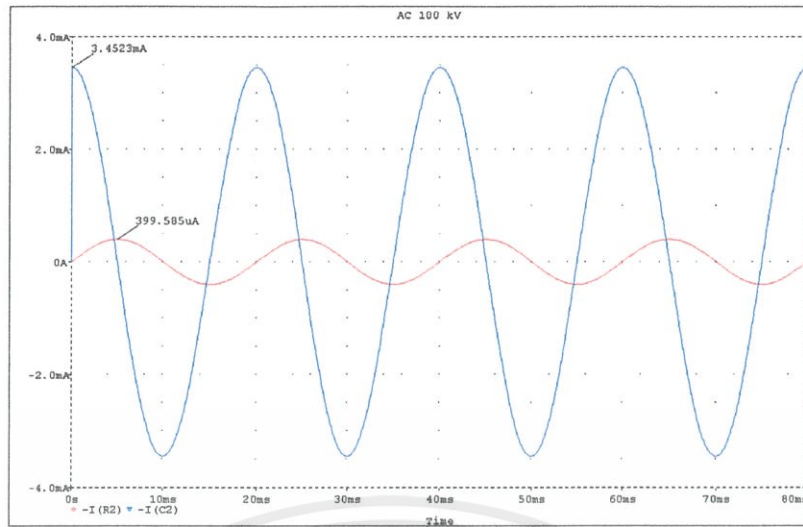


รูปที่ 3.29 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV



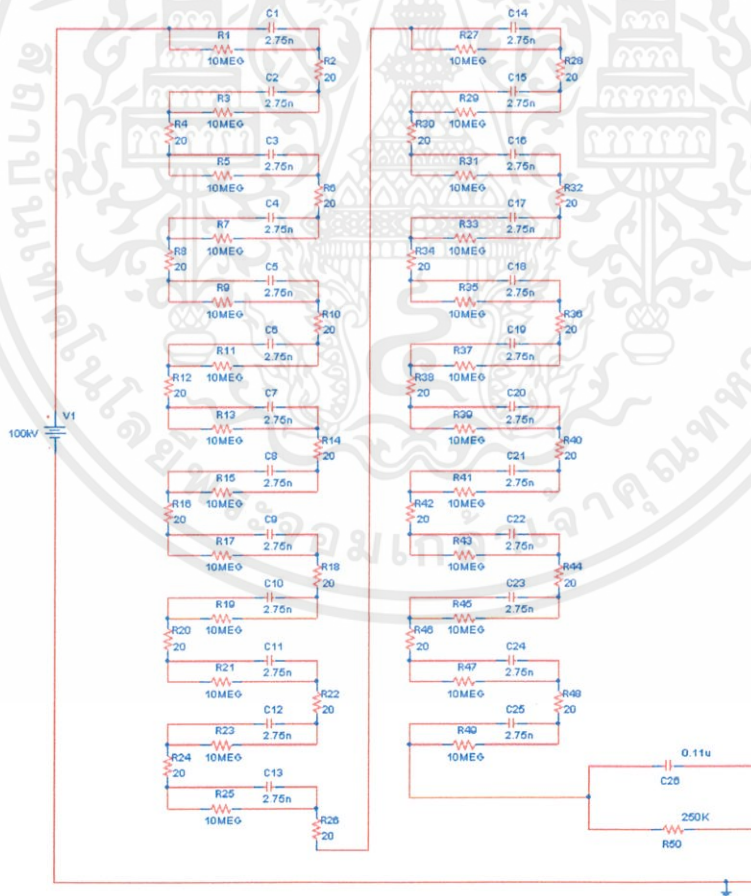
รูปที่ 3.30 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของโวลต์เตจดีไวเซอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



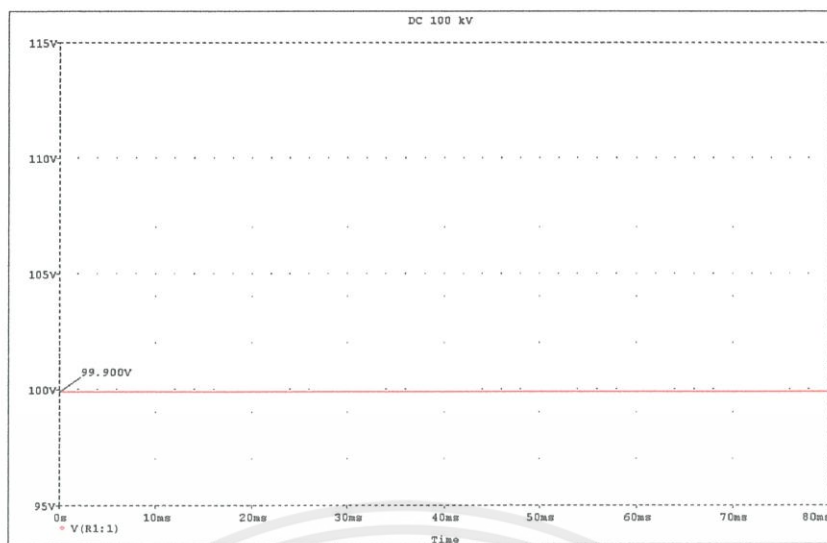
รูปที่ 3.31 รูปคลื่นกระแสเอาร์ทพุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ 100 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 3.4523 mA และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 399.585 μ A

3.8.1.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV

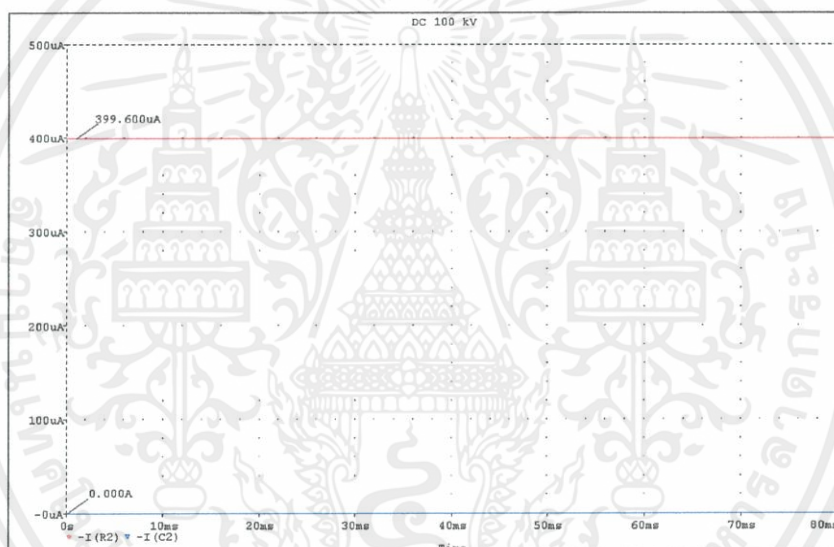


รูปที่ 3.32 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



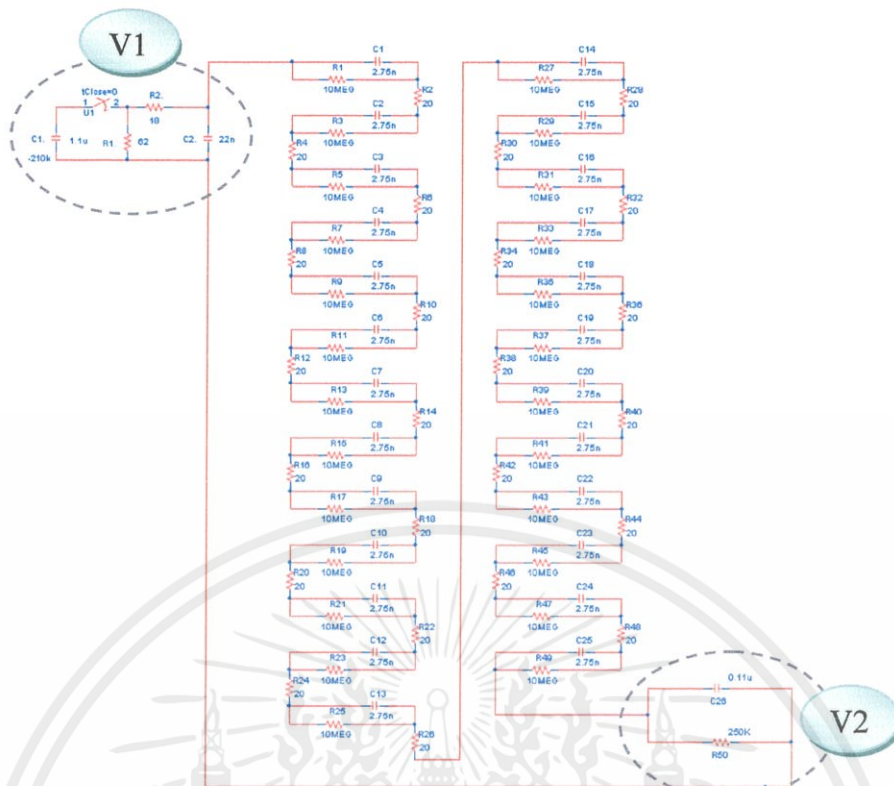
รูปที่ 3.33 รูปคลื่นแรงดันแอทพุทของไพล์เตอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV



รูปที่ 3.34 รูปคลื่นกระแสแอทพุทของไพล์เตอร์เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง 100 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าประมาณ 0.000 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 399.600 μ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV



รูปที่ 3.35 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV
เมื่อ V1 คือ วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (แรงดันอินพุท)
V2 คือ แรงดันเอาต์พุท



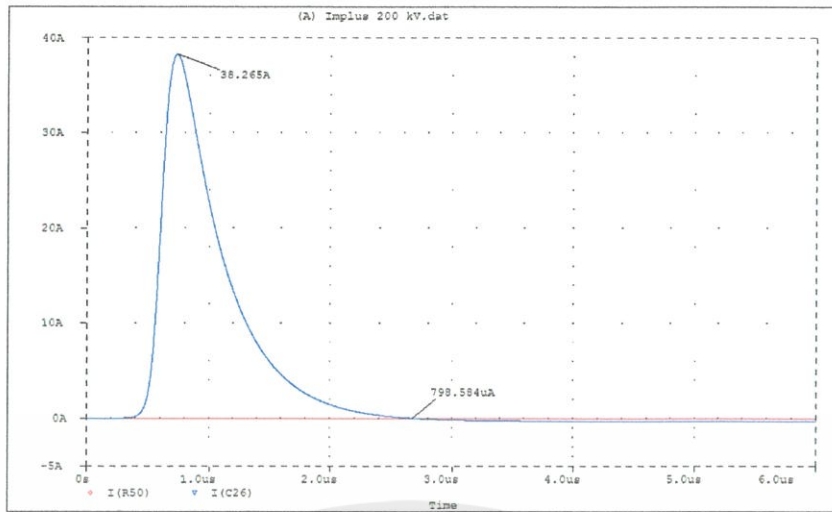
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.36 รูปคลื่นแรงดันของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV

เมื่อ (ก) คือ แรงดันอินพุทมีค่า 199.857 kV

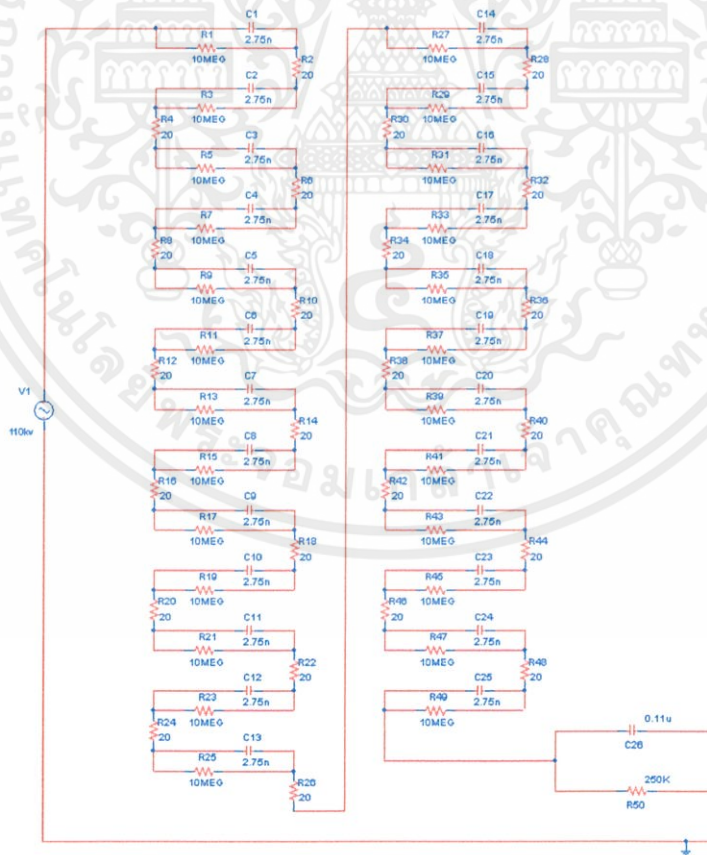
(ข) คือ แรงดันเอาต์พุทมีค่า 199.646 V



รูปที่ 3.37 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 200 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 38.265 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 798.584 μ A

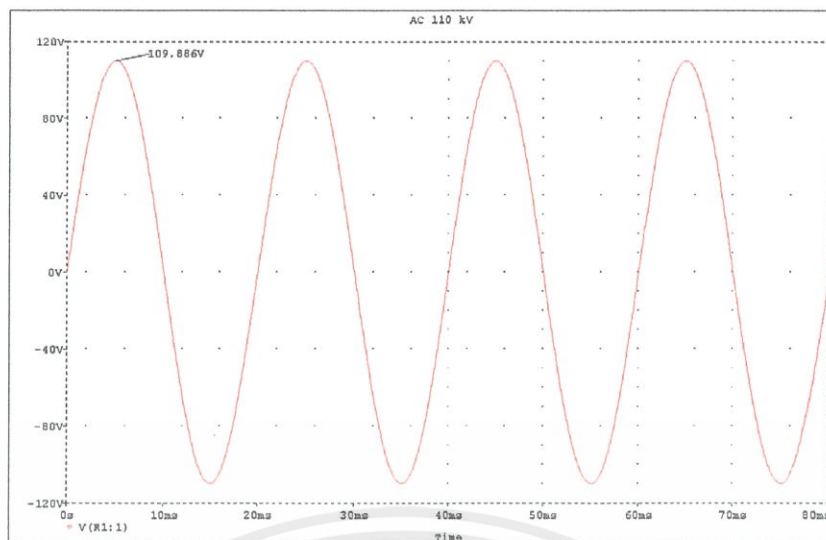
3.8.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบความคงทนอยู่ใต้ต่อแรงดัน

3.8.2.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV

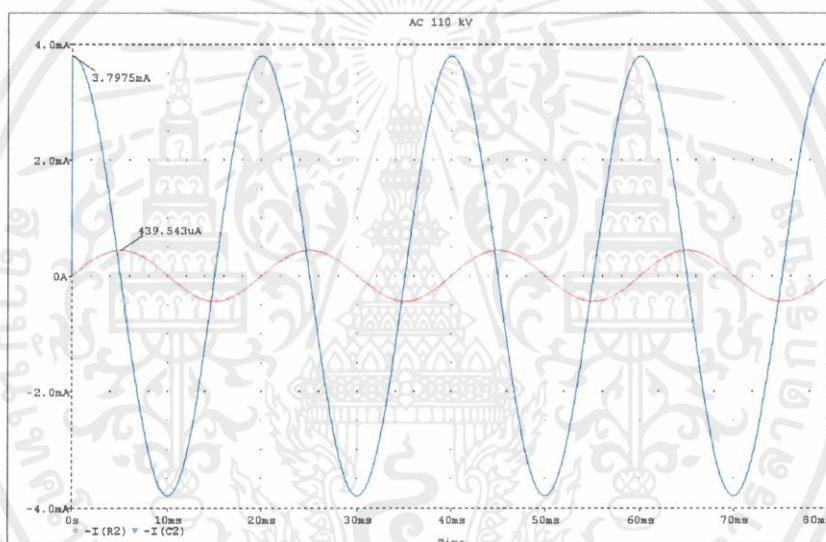


รูปที่ 3.38 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



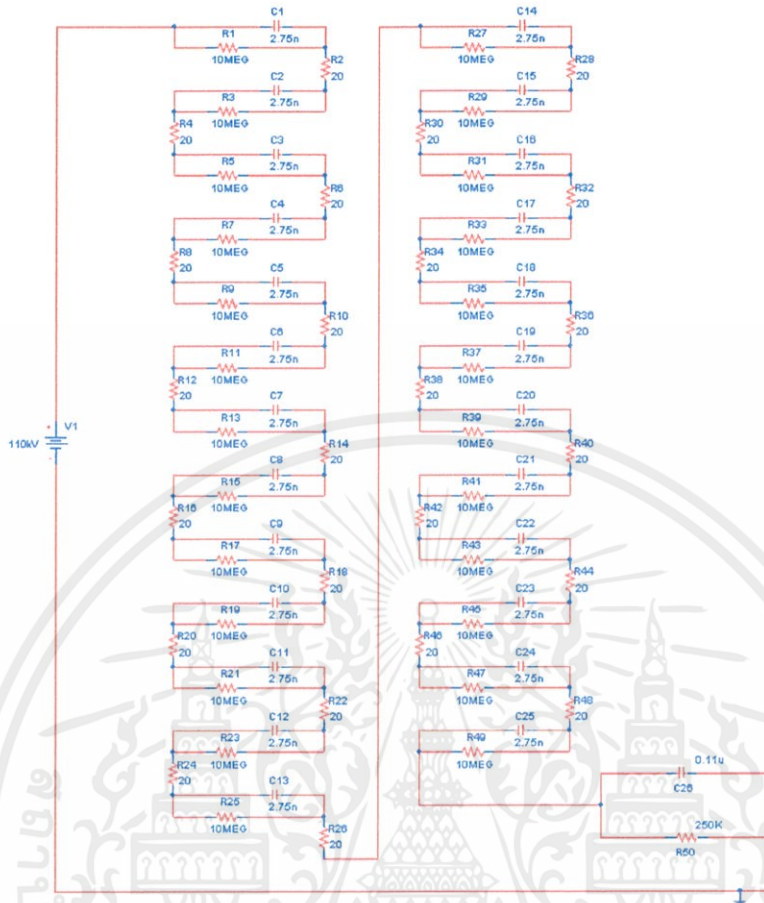
รูปที่ 3.39 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เตจติไวเดอร์ เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 kV



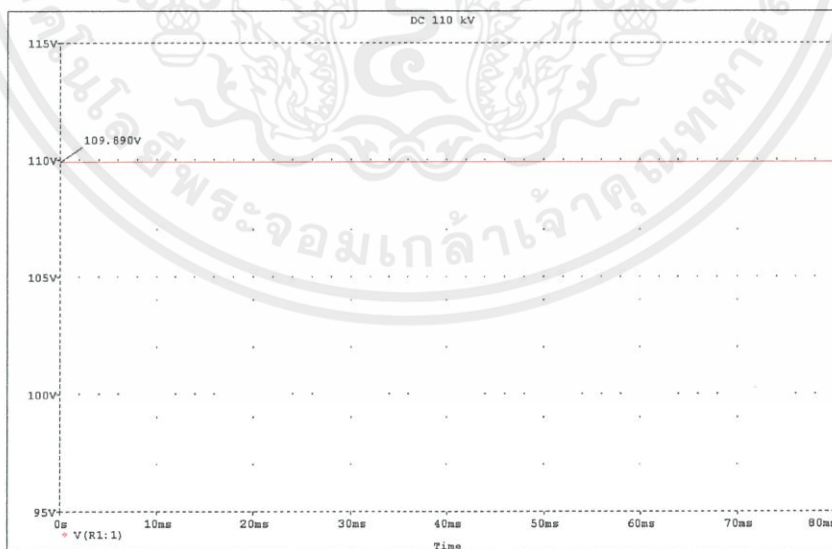
รูปที่ 3.40 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เตจติไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ 110 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 3.7975 mA และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 439.543 μ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 110 kV

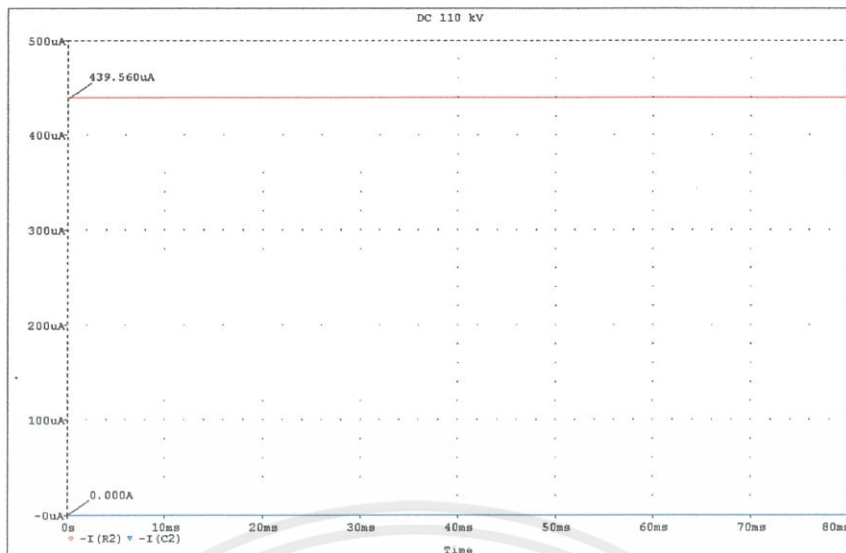


รูปที่ 3.41 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 110 kV



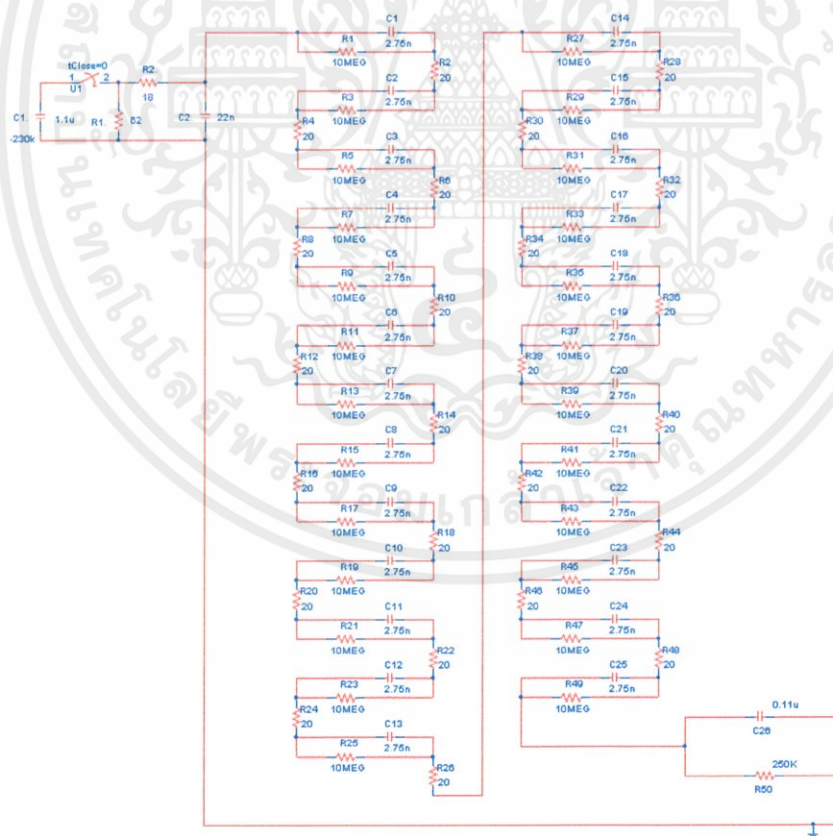
รูปที่ 3.42 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 110 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



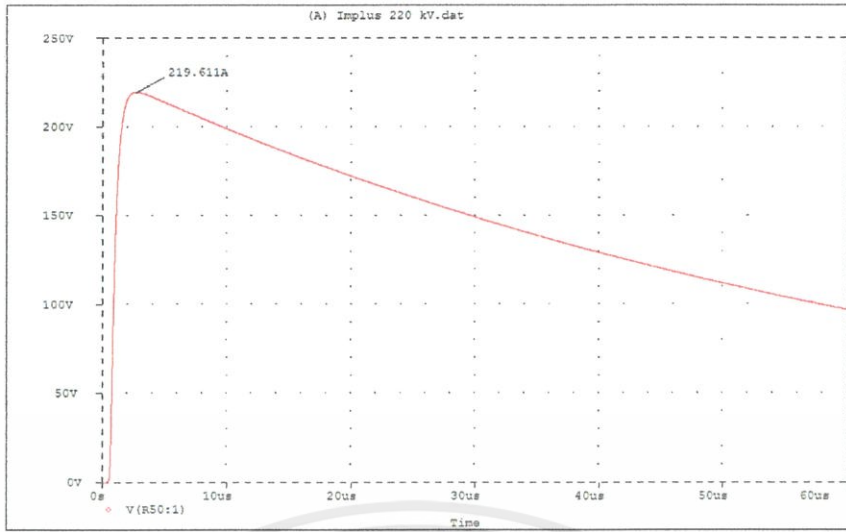
รูปที่ 3.43 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง 110 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าประมาณ 0.000 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 439.560 μ A

3.8.2.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV

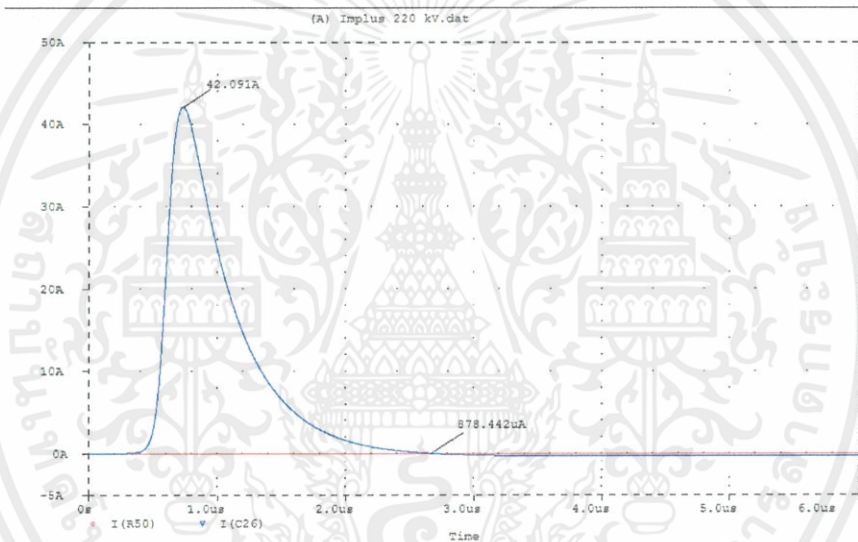


รูปที่ 3.44 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.45 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ 220 kV



รูปที่ 3.46 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 220 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 42.091 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 878.442 μ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 บทนำ

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2(1994)[10] ซึ่งการทดสอบและการประมวลผลได้แบ่งหัวข้อตามลำดับดังต่อไปนี้

- ก) การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- ข) การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- ค) การหาผลตอบสนองรูปขั้น (Unit Step Response)
- ง) การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor Test)
- จ) การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)
- ฉ) การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test)
- ช) การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Test)
- ซ) การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน

สำหรับการทดสอบหาลักษณะต่างๆ ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ และการหาผลตอบสนองรูปขั้น (Unit Step Response) ซึ่งในส่วนนี้จะทำการวัด ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ส่วนที่ 2 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor Test), การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test), การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test), การทดสอบความคงทนต่อแรงดัน (Withstand Test) และการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน ซึ่งในส่วนนี้จะทำการทดสอบ ณ กองทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (บางพลี) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ

4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงใช้เครื่องวัด RLC Meter ของบริษัท HEWLETT PACKARD IMPEDANCE/GAIN-PHASE ANALYZER รุ่น 4194A การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงผลการทดลองได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (Hz)	C ₁ จากการคำนวณ (pF)	C ₁ จากการวัด (pF)	Error (%)
100	110	109.02	0.89
500	110	109.54	0.42
1000	110	108.86	1.04
10000	110	109.60	0.30

จากตารางที่ 4.1 ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุย่อยที่นำมาต่ออันดับกัน และค่าความจุสเตรลงดินในขณะที่ทำการทดสอบของตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ด้วย

4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะใช้วงจรและเครื่องมือวัดชนิดเดียวกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (Hz)	C ₂ จากการคำนวณ (nF)	C ₂ จากการวัด (nF)	Error (%)
100	110	109.87	0.18
500	110	109.69	0.28
1000	110	108.53	1.36
10000	110	109.75	0.27

จากการทดลองจะเห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าน้อยกว่าค่าการคำนวณที่ได้จากทางทฤษฎี เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

การหาค่า % ผิดพลาดโดย

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{\text{ค่าจากการคำนวณ} - \text{ค่าจากการวัด}}{\text{ค่าจากการคำนวณ}} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง

4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง

โดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงใช้เครื่องวัด Mega Ohm Meter ของบริษัท YOKOGAWA รุ่น 2406 Digital Insulation Tester การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสตรง แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง

R_{DC} จากการคำนวณ ($M\Omega$)	R_{DC} จากการวัด ($M\Omega$)	Error (%)
250	249	0.4

4.3.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์

ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์ จะใช้ Multimeter ของบริษัท FLUKE รุ่น 189 TRUE RMS ซึ่งผลจากการวัดได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์

$R_{impulse}$ จากการ คำนวณ (Ω)	$R_{impulse}$ จากการวัด (Ω)	Error (%)
160	158	1.25

4.4 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง

ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง จะใช้เครื่องมือวัด Multimeter ของบริษัท FLUKE รุ่น 189 TRUE RMS ซึ่งผลจากการวัดได้แสดงไว้ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง

R_{DC} จากการคำนวณ (Ω)	R_{DC} จากการวัด (Ω)	Error (%)
250	249	0.4

4.4.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำอิมพัลส์

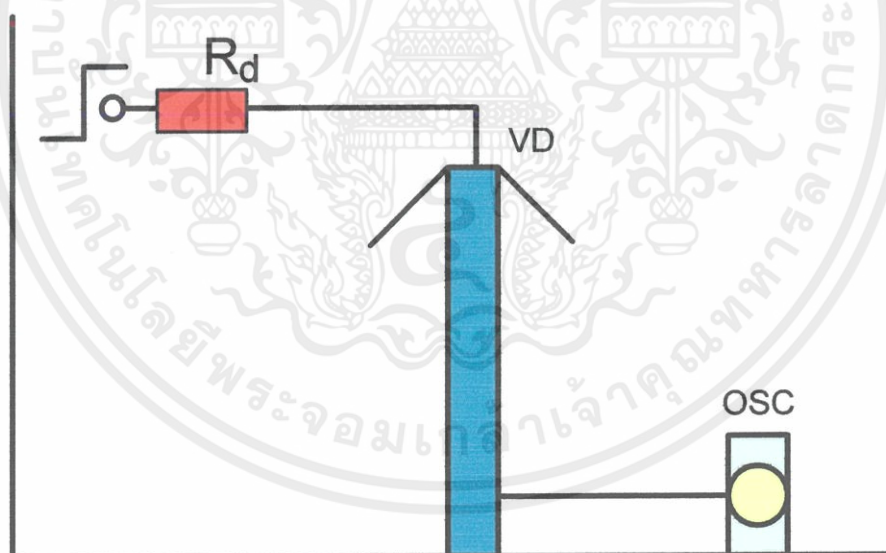
ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำอิมพัลส์จะใช้เครื่องมือวัดเช่นเดียวกับการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง ซึ่งผลจากการวัดได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำอิมพัลส์

R_{mpulse} จากการคำนวณ (Ω)	R_{mpulse} จากการวัด (Ω)	Error (%)
0.2	0.19	5

4.5 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

วงจรหาผลตอบสนองรูปขั้นในที่นี้ใช้วงจรในรูปที่ 2.34ก) ตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [10] ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยต่อเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (unit step generator) ของบริษัท DR.STRAUSS รุ่น RIG 1000-H ตามวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2

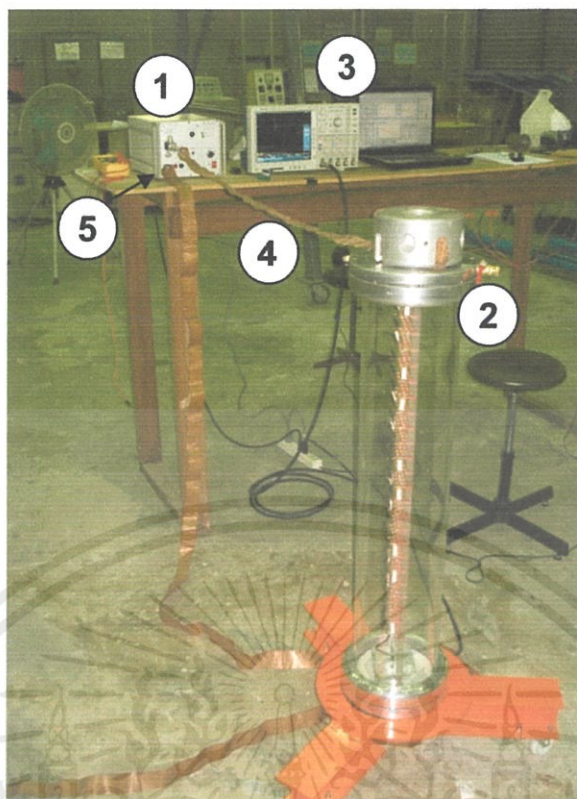


รูปที่ 4.1 วงจรหาผลตอบสนองรูปขั้น

เมื่อ R_d คือ ตัวต้านทานหน่วง

VD คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์

OSC คือ อุปกรณ์วัด เช่น ออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบหาผลตอบสนองของรูปขั้น

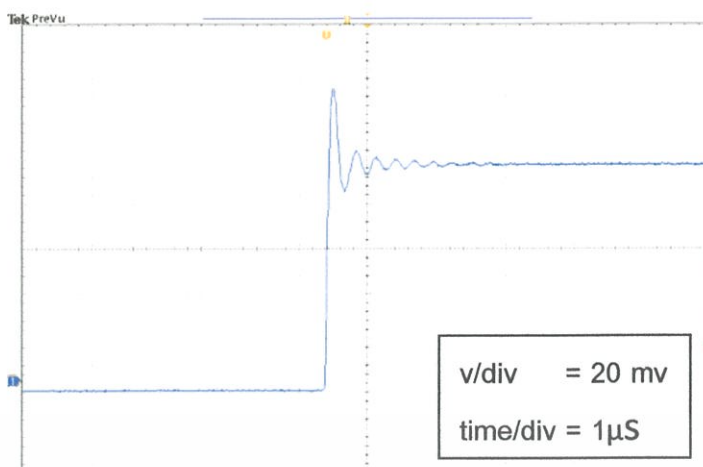
1. เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการสอบเทียบ 3. ออสซิลโลสโคป
4. สายตัวนำ 5. ตัวต้านทานแมทชิง

การหาผลตอบสนองของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมโดยจะทำการหาผลตอบสนองที่ค่าความต้านทานหน่วงภายนอกต่าง ๆ กัน ในที่นี้สายนำที่ใช้เป็นสายเคเบิล RG-8 ซึ่งจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ 50 โอห์ม จึงได้มีการต่อตัวต้านทานแมทชิงเพื่อหน่วงการแกว่งของสัญญาณที่ทำการวัด ซึ่งพารามิเตอร์ผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 4.7 และออสซิลโลกราฟแสดงในรูปที่ 4.3-4.7

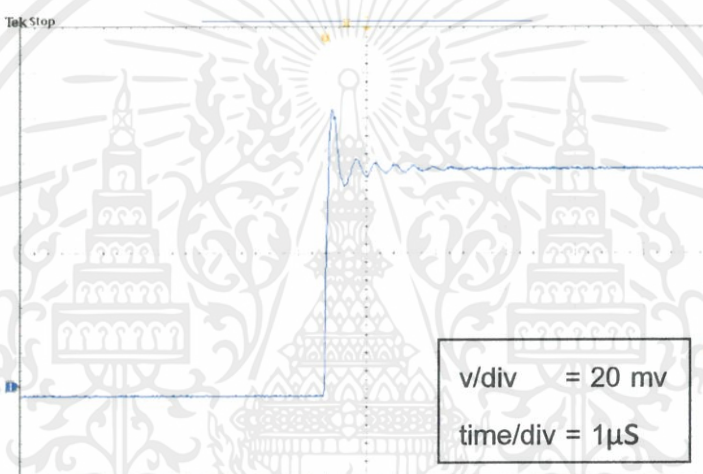
ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน่วงภายนอก

$R_d (\Omega)$	β (%)	T_α (ns)	T_N (ns)
100	33.51	33.59	8.94
150	26.02	52.78	34.26
200	18.20	37.23	22.71
300	7.90	48.33	44.05
400	1.36	65.90	65.45

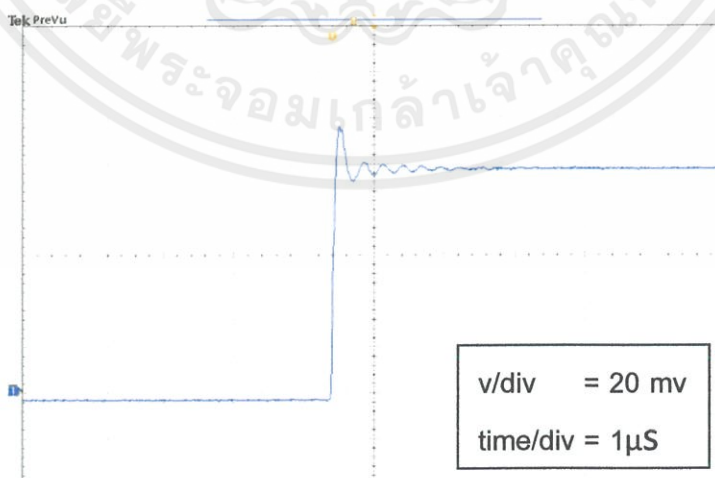
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.3 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 100 Ω

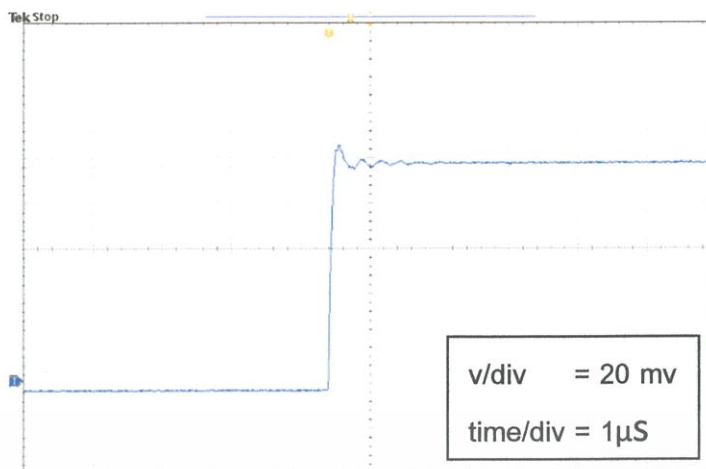


รูปที่4.4 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 150 Ω

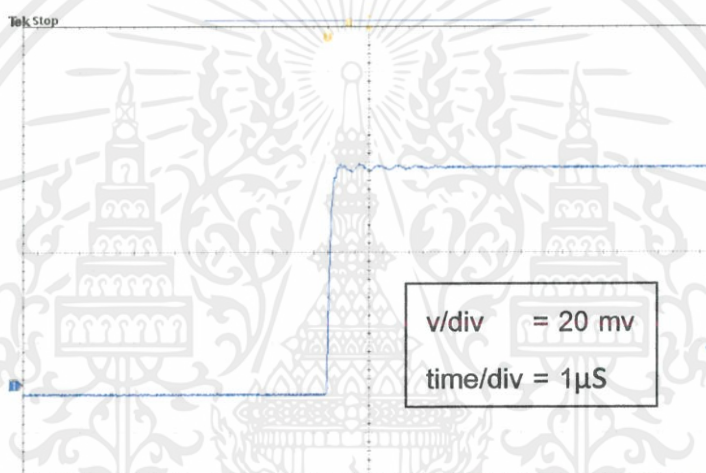


รูปที่4.5 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 200 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

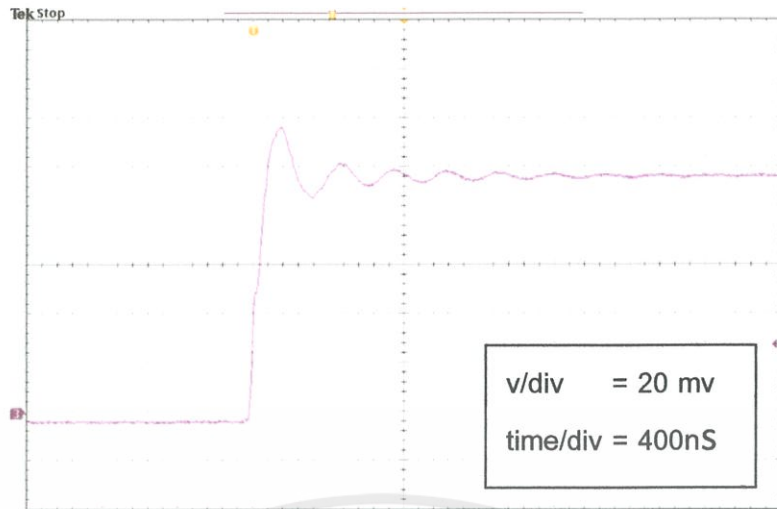


รูปที่ 4.6 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปชั้นของโวลต์เตจดีโวลเตอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 300Ω



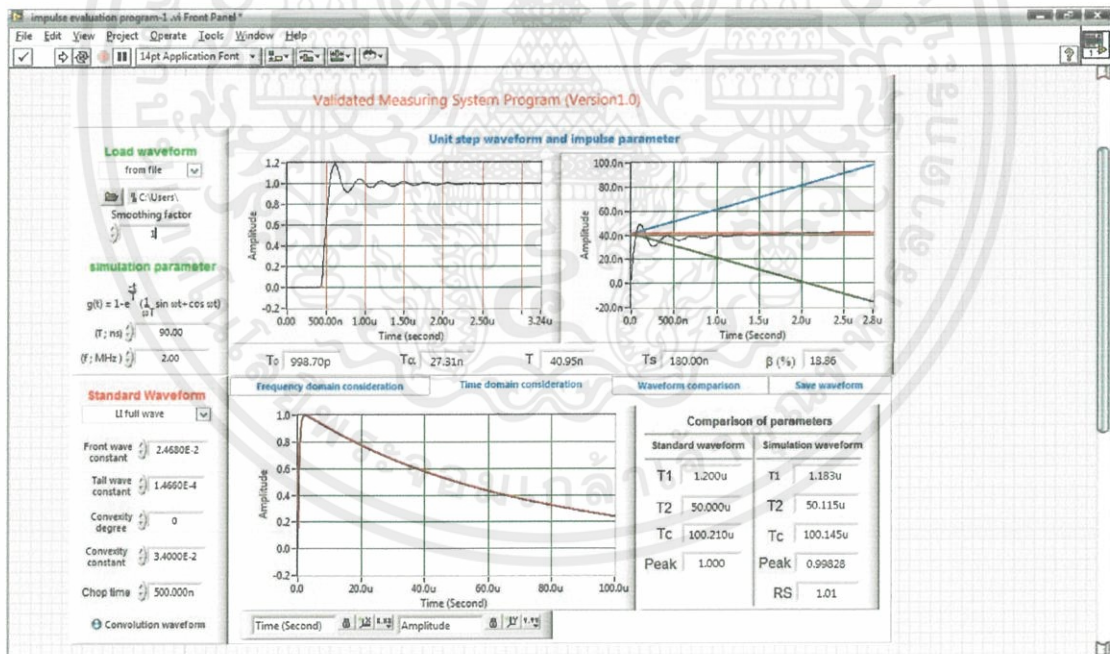
รูปที่ 4.7 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปชั้นของโวลต์เตจดีโวลเตอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 400Ω

จากผลการทดลองที่ได้สรุปได้ว่า พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลต์เตจดีโวลเตอร์ที่ออกแบบมีค่าเกินที่มาตรฐานแนะนำไว้ทั้งในกรณีการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ทางผู้จัดทำจึงได้ทดลองทำการต่อตัวเหนี่ยวนำเพิ่มในวงจร ซึ่งผลปรากฏว่าหน้าคลื่นมีความชันขึ้น แต่เกิดการกระเพื่อม(Oscillate) ที่หน้าคลื่นมาก ทำให้ค่า β ไม่ได้ตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงโดยนำตัวต้านทานขนาด 10Ω 16 ตัวต่ออนุกรมระหว่างชั้นของตัวเก็บประจุแต่ละชั้นที่ภาคแรงสูง และต่อตัวต้านทานขนาด 1Ω ขนาน 5 ตัวที่ภาคแรงต่ำ ทำให้ได้ผลตอบสนองรูปชั้นที่ได้แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ออสซิลโลกราฟแสดงผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลท์เตจดีไวเดอร์

จากออสซิลโลกราฟสรุปได้ว่า โวลท์เตจดีไวเดอร์ตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่สร้างขึ้นมีค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองตามที่มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [10] แนะนำไว้ สำหรับการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและจากรูปที่ 2.36 จะได้ว่า β ต้องไม่เกิน 100 % ในที่นี้ได้ค่า β เท่ากับ 18.86 % และมีค่า T_α เท่ากับ 27.31 ns

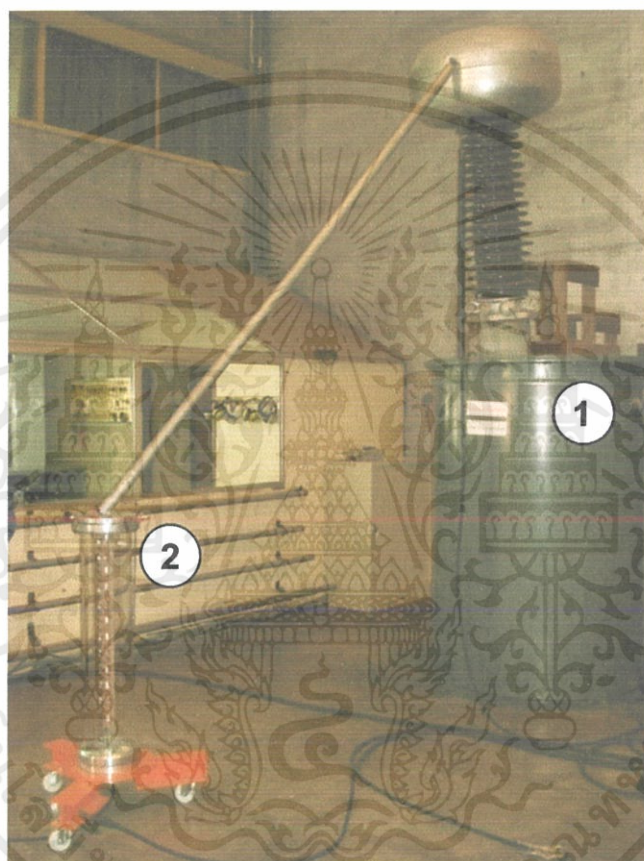


รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ผลตอบสนองรูปขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

ในขั้นตอนแรกของการทดสอบ จะทำการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Test) ก่อนเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ จะไม่เกิดการเบรกดาวนในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัด เป็นเวลา 1 นาที [10] ดังแสดงในรูปที่ 4.10

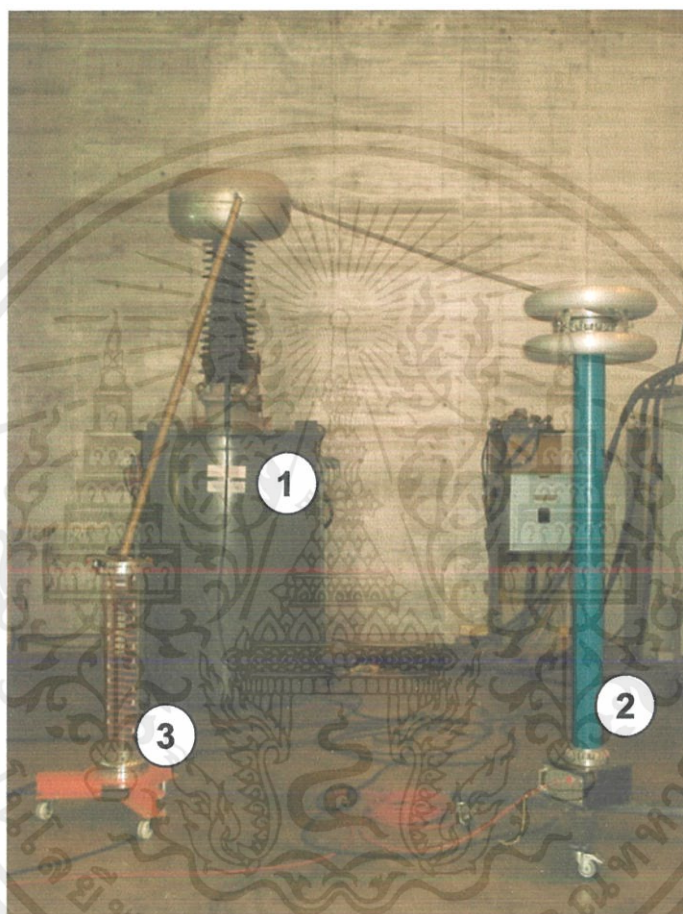


รูปที่ 4.10 วงจรการทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันสูงกระแสสลับ
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

จากการทดสอบเมื่อจ่ายแรงดันที่ 110% ของพิกัด แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที ไม่เกิดการวบไฟตามผิวฉนวนของท่อ และอุปกรณ์ภายในท่อ จึงสรุปได้ว่ามีความคงทนต่อแรงดันตามที่มาตรฐานกำหนด [10]

หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับโดยทำการต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนานกันเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับตามรูปที่ 4.11 โดยจะทำการป้อนแรงดัน โดยทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 20 kV, 40 kV, 60 kV, 80 kV โดยอ่าน

ค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 100 kV ซึ่งเป็นพิกัดสูงสุดของอุปกรณ์วัดเป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันทิ้งไว้ที่พิกัดเป็นเวลา 30 นาที และทำการวัดสเกลแฟกเตอร์ที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อหาค่าความมีเสถียรภาพของระบบวัด (Short-term Stability test) โดยสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 4.11 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

No.	20		40		60		80		100		100 (After 30 min)	
	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)
1	20.064	20.48	40.072	40.7	60.034	61.1	80.03	81.6	99.988	101.8	99.988	102
2	20.071	20.48	40.102	40.7	60.089	61.1	80.03	81.6	100.1	102.2	100.04	102
3	20.053	20.48	40.042	40.7	60.093	61.1	80.013	81.6	100.14	102.2	100.02	102.1
4	20.038	20.45	40.059	40.7	60.08	61.1	80.023	81.7	100.14	102.2	100.05	102.1
5	20.004	20.44	40.08	40.7	60.055	61.1	79.999	81.5	100.04	102.1	100.02	102.1
6									99.981	102.1	99.999	102
7									99.999	102.1	100.08	102.1
8									99.84	102.1	100.11	102.1
9									100.06	102.1	100.03	102.1
10									100.03	102.1	100.02	102.1
Average	20.046	20.466	40.071	40.7	60.07	61.1	80.019	81.6	100.032	102.1	100.036	102.07
Dev.(%)	2.1		1.57		1.71		1.98		2.07		2.03	
Scale factor	979.5		984.5		983.1		980.6		979.7		980.1	

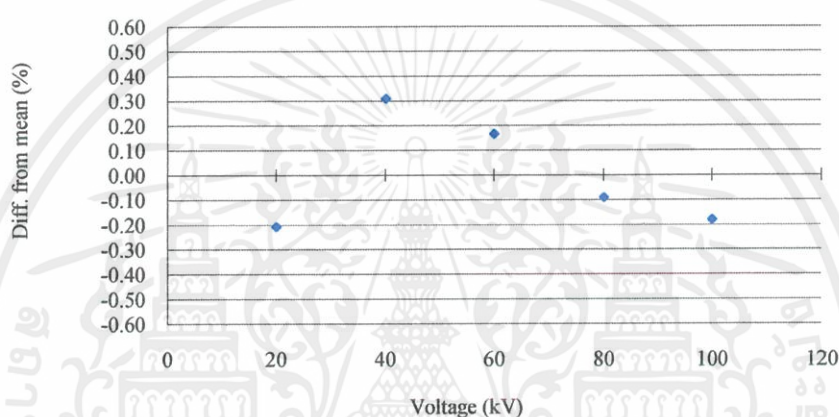
1. Determination of the assigned scale factor = 980
2. Linearity test = 0.31
3. Short-term stability test = 0.04
4. Uncertainty = 0.85

อุปกรณ์ที่ใช้ : - UNIVERSAL Reference voltage divider "HIGHVOLT"
 Type MCR 0.6/500-500/200 Serial no. 883345
 - Wide band power analyzer "NORMA" Model D 6200
 Serial no. P5 62718 SR
 - Terminating resistor (1.11 MW)

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนี้ จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่า ตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งานโดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีสัญญาณผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่ทำการทดสอบที่อ่านได้ จากระบบวัดจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น [10] ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

REF. (kV)	UUC (kV)	REF./UUC	Diff. (%)
20.046	20.466	0.9795	-0.207
40.071	40.700	0.9845	0.310
60.070	61.100	0.9831	0.167
80.019	81.600	0.9806	-0.090
100.032	102.100	0.9797	-0.180
Avg. =		0.9815	

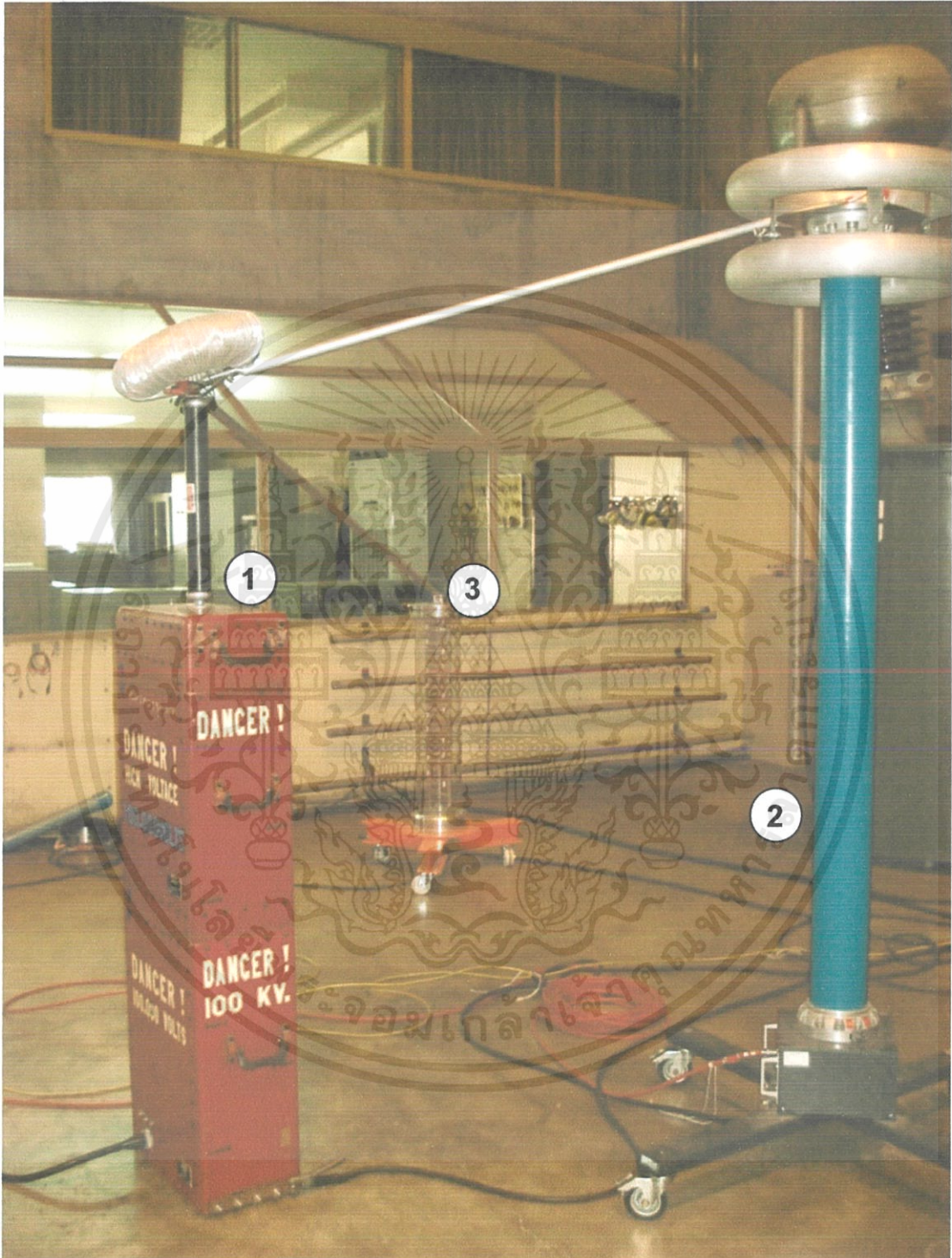


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

4.7 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

เนื่องจากทำการทดสอบความทนอยู่ได้อ่อนแรงดันสูงกระแสสลับไปแล้ว (AC Withstand Test) จึงไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบความทนอยู่ได้อ่อนแรงดันกระแสตรง สามารถทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงได้เลย โดยทำการต่อโวลต์เดจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสตรงที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เดจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนานกันเข้าเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงตามรูปที่ 4.13 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 20 kV, 40 kV, 60 kV, 80 kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันดังกล่าว เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 100 kV ซึ่งเป็นพิกัดสูงสุดของอุปกรณ์วัดเป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันทิ้งไว้ที่พิกัดเป็นเวลา 15 นาที และทำการวัดสเกลแฟกเตอร์ที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อหาค่าความมีเสถียรภาพของระบบวัด (Short-term Stability test) โดย

สเกลแพกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 4.13 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันกระแสตรง
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

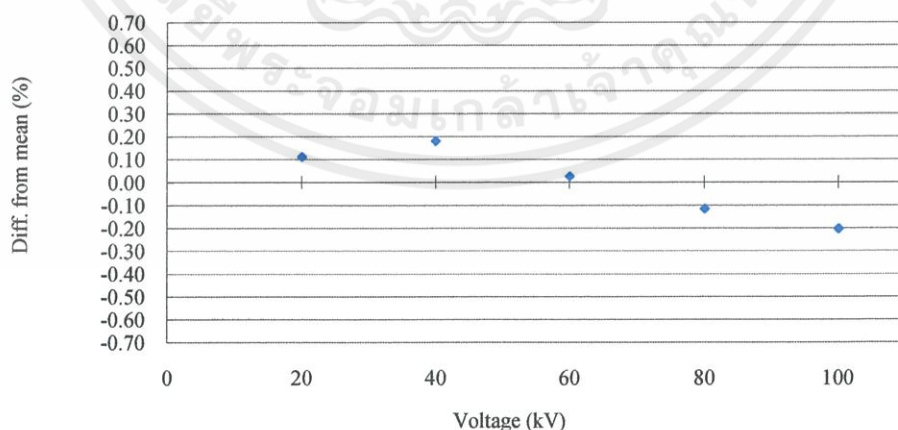
จากการทดสอบได้ผล ดังนี้

1. Determination of the assigned scale factor =Ratio x Factor = 985
2. Linearity test = 0.21
3. Short-term stability test = -0.18
4. Uncertainty = 0.84

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนี้ จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่า ตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งานโดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีสัญญาณผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่ทำการทดสอบที่อ่านได้จากระบบวัดจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น [10] ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

REF. (kV)	UUC (kV)	REF./UUC	Diff. (%)
20.014	20.258	0.9880	0.112
40.000	40.460	0.9886	0.181
60.016	60.800	0.9871	0.026
80.039	81.200	0.9857	-0.116
100.04	101.58	0.9848	-0.203
Avg. =		0.9868	

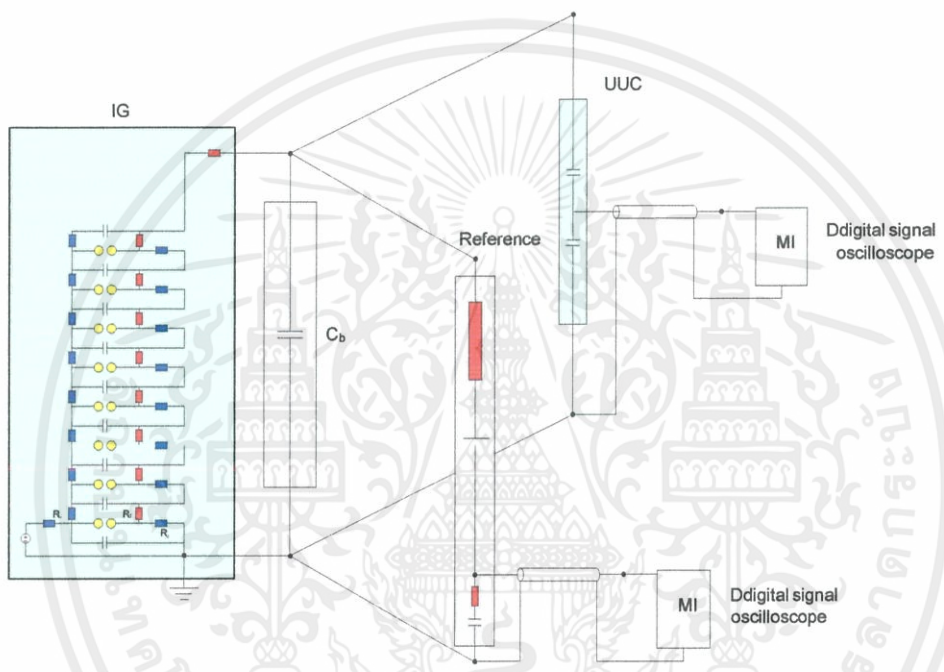


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

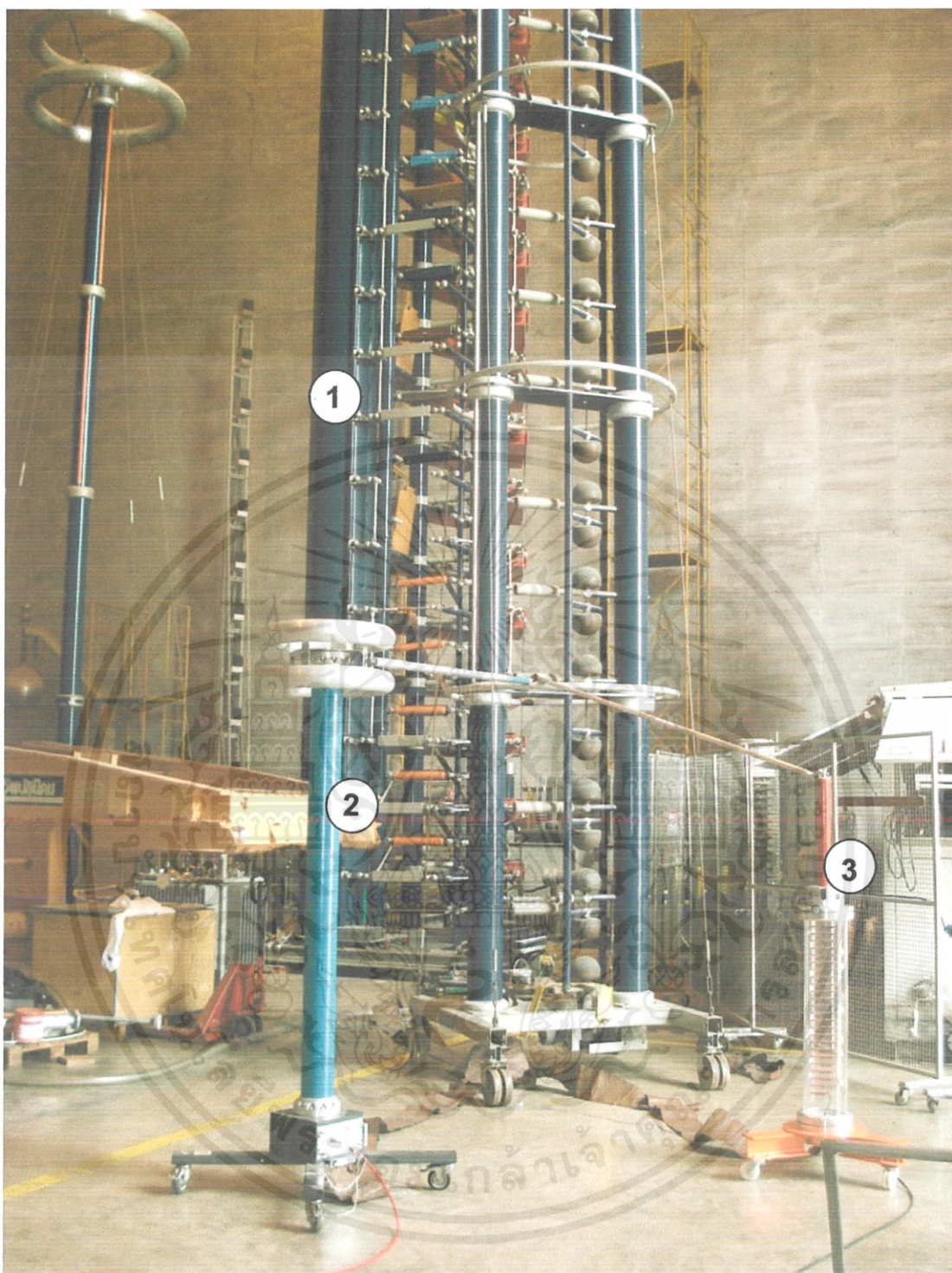
4.8 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

ในกรณีของระบบวัดแรงดันสูงอิมพัลส์จะทำการต่ออิมพัลส์ โวลท์ เตจดีไวเดอร์ ที่ต้องการสอบเทียบ และอิมพัลส์โวลท์ เตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนานกันเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามรูปที่ 4.15-4.16 การหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดันต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [10] ซึ่งกำหนดค่าต่างๆ สำหรับการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยกำหนดให้ค่ายอดมีค่า $\pm 3\%$ เวลาหน้าคลื่น $\pm 30\%$ และเวลาหลังคลื่น $\pm 20\%$ โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของเวลารูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μ S) นั่นคือ 0.84/60 μ S และ 1.56/60 μ S



รูปที่ 4.15 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

- โดย
- IG คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 - Cb คือ ตัวเก็บประจุไหลตสำหรับปรับรูปคลื่น
 - AT คือ ตัวลดทอนแรงดัน
 - Reference คือ อิมพัลส์โวลท์ เตจดีไวเดอร์อ้างอิง
 - UUC คือ อิมพัลส์โวลท์ เตจดีไวเดอร์ที่ทำการสอบเทียบ



รูปที่ 4.16 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์
 1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Determination of the scale factors)

ทำการทดสอบที่พิกัดสูงสุดของโวลต์เดจดีไวเดอร์ที่ทำการสอบเทียบ (200 kV) โดยทำการวัดรูปคลื่นฟ้าผ่า 0.84/60 μ S และ 1.56/60 μ S ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

ตารางที่ 4.12 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 0.84/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	+ 200	0.84/60	199.80	0.885	59.94	204.50	0.868	57.06
2			200.30	0.888	59.68	204.20	0.855	57.14
3			200.20	0.881	59.75	203.70	0.836	57.39
4			200.00	0.881	59.79	203.60	0.833	57.49
5			200.10	0.876	59.81	202.20	0.825	58.10
6			200.20	0.873	59.83	202.50	0.829	58.01
7			200.10	0.874	59.82	202.40	0.828	58.05
8			200.00	0.874	59.84	202.40	0.826	58.08
9			200.20	0.879	59.74	202.60	0.829	57.98
10			200.10	0.875	59.80	202.40	0.827	58.00

ตารางที่ 4.13 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 0.84/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	- 200	0.84/60	-200.50	0.854	60.79	-205.90	0.856	57.39
2			-200.60	0.856	60.72	-206.00	0.859	57.27
3			-202.50	0.870	59.77	-206.60	0.863	57.02
4			-200.40	0.855	60.78	-205.80	0.863	57.41
5			-200.70	0.856	60.71	-205.40	0.836	57.55
6			-202.30	0.868	59.83	-205.10	0.839	57.54
7			-202.10	0.865	59.87	-204.90	0.832	57.57
8			-200.20	0.856	60.72	-205.20	0.846	57.49
9			-202.30	0.871	59.82	-205.60	0.851	57.33
10			-200.20	0.859	60.66	-205.80	0.860	57.22

ตารางที่ 4.14 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	+ 200	1.56/60	200.00	1.579	59.38	199.00	1.640	59.25
2			199.90	1.573	59.37	198.90	1.639	59.26
3			199.50	1.564	59.56	198.80	1.636	59.28
4			199.60	1.563	59.51	198.80	1.624	59.20
5			199.60	1.568	59.49	198.80	1.622	59.35
6			199.90	1.570	59.37	198.70	1.640	59.30
7			199.60	1.564	59.57	198.90	1.626	59.27
8			199.60	1.563	59.52	198.60	1.613	59.41
9			199.70	1.568	59.47	198.80	1.630	59.32
10			199.50	1.563	59.56	198.90	1.641	59.35

ตารางที่ 4.15 ค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบ ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	- 200	1.56/60	-200.20	1.571	59.24	-198.50	1.617	59.21
2			-199.90	1.565	59.32	-198.70	1.609	59.05
3			-199.90	1.561	59.33	-198.70	1.623	59.12
4			-200.00	1.572	59.40	-198.70	1.611	59.10
5			-200.30	1.551	59.28	-198.50	1.590	59.19
6			-199.70	1.560	59.44	-198.80	1.609	59.09
7			-199.90	1.559	59.33	-198.70	1.639	59.10
8			-200.00	1.565	59.38	-198.70	1.640	59.10
9			-200.10	1.567	59.35	-198.80	1.601	59.05
10			-199.90	1.558	59.38	-198.70	1.609	59.13

ตารางที่ 4.16 สรุปผลสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดอิมพัลส์

Waveshape (μ s)	U (kV)	Assigned scale factors
0.84 / 60	+ 200	985.5
0.84 / 60	- 200	978.4
1.56 / 60	+ 200	1004.4
1.56 / 60	- 200	1006.6

4.8.2 การหาค่าเสถียรภาพ (Short-term stability test)

การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบ ให้นำเอาโวลต์เตจติไวเตอร์อ้างอิงออกจากวงจรการทดสอบ จากนั้นให้ทำการทดสอบโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.56/60 μ s จำนวน 30 ครั้ง ที่พิกัดของโวลต์เตจติไวเตอร์ เพื่อดูค่ายอดของแรงดัน

ตารางที่ 4.17 ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ในการหาค่าเสถียรภาพของระบบ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ s

U_p (kV)	Waveshape (μ s)	No.	U_p_{UUC}	No.	U_p_{UUC}	No.	U_p_{UUC}
+ 200	1.56/60	1	200.0	11	199.9	21	200.1
		2	200.1	12	200.1	22	200.2
		3	200.1	13	200.1	23	200.1
		4	200.1	14	200.1	24	199.9
		5	199.9	15	199.9	25	199.9
		6	199.5	16	200.1	26	200.1
		7	200.1	17	200.0	27	200.1
		8	200.2	18	200.0	28	200.1
		9	199.9	19	200.1	29	199.9
		10	200.1	20	200.0	30	200.2

ตารางที่ 4.18 ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ในการหาค่าเสถียรภาพของระบบ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ s

U_p (kV)	Waveshape (μ s)	No.	U_p_{UUC}	No.	U_p_{UUC}	No.	U_p_{UUC}
- 200	1.56/60	1	-200.2	11	-199.9	21	-199.9
		2	-199.7	12	-199.8	22	-199.9
		3	-199.8	13	-199.9	23	-199.9
		4	-199.8	14	-199.8	24	-199.7
		5	-199.8	15	-199.8	25	-199.9
		6	-199.7	16	-199.9	26	-199.7
		7	-199.9	17	-199.8	27	-199.9
		8	-200.0	18	-199.7	28	-199.8
		9	-200.0	19	-199.8	29	-199.8
		10	-199.8	20	-199.8	30	-199.9

หลังจากนั้นให้ทำการต่อโวลต์เตจติไวเตอร์เข้าไปในวงจรการทดสอบอีกครั้ง และทำการตรวจสอบสเกลแพกเตอร์อีกครั้ง โดยต้องทำภายใน 10 นาที หลังจาก Short-term stability test ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.20-4.22 และหลังจากการทดสอบนี้ต้องหยุดการทดสอบ เพื่อให้อุปกรณ์ที่อยู่ภายในโวลต์เตจติไวเตอร์คืนสภาพคุณสมบัติเป็นเวลอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.19 ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ ในการหาค่าเสถียรภาพของระบบ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ s

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Negative polarity		Positive polarity	
			U_{p_Ref}	U_{p_UUC}	U_{p_Ref}	U_{p_UUC}
1	-/+ 200	1.56/60	-199.8	-198.2	199.7	199.4
2			-200.0	-198.4	200.1	198.9
3			-199.4	-198.4	200.1	198.9
4			-199.8	-198.7	200.4	198.9
5			-199.7	-198.6	200.5	198.9
6			-199.8	-198.6	200.1	199.1
7			-199.8	-198.7	200.0	198.9
8			-199.8	-198.6	200.1	199.2
9			-200.2	-198.6	200.5	199.1
10			-200.2	-198.6	200.2	199.1

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบคุณลักษณะของระบบวัด ก่อนการทดสอบ Short-term stability

Waveshape (μ s)	U (kV)	F	δF (%)	S.D.	S.D. (%)
0.84 / 60	+ 200	985.5	-1.45	4.36	0.44
0.84 / 60	- 200	978.4	-2.16	5.43	0.55
1.56 / 60	+ 200	1004.4	0.44	0.92	0.09
1.56 / 60	- 200	1006.6	0.66	1.31	0.13
0.84 / 60	+ 200	-4.90	1.72	-3.46	0.72
0.84 / 60	- 200	-1.21	1.36	-4.94	0.30
1.56 / 60	+ 200	4.06	0.59	-0.30	0.10
1.56 / 60	- 200	3.32	0.97	-0.39	0.09

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบคุณลักษณะของระบบวัด หลังการทดสอบ Short-term stability

Waveshape (μ s)	U (kV)	F	δF (%)	S.D.	S.D. (%)
1.56 / 60	+ 200	1005.7	0.57	1.84	0.18
1.56 / 60	- 200	1006.6	0.66	1.29	0.13

ตารางที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงของสเกลแฟกเตอร์ หลังการทดสอบ Short-term stability

Waveshape (μ s)	U (kV)	F_{Before}	F_{After}	Deviation of the scale factor (%)
1.56 / 60	+ 200	1004.4	1005.7	0.13
1.56 / 60	- 200	1006.6	1006.6	0

4.8.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test)

การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ จะเริ่มทดสอบที่ระดับแรงดัน 100 kV, 125 kV, 150 kV, 175 kV และ 200 kV โดยจะทำการทดสอบที่ระดับแรงดันละ 10 ครั้ง โดยจะทำการทดสอบในวันถัดไป หลังจากการทดสอบเสถียรภาพ (Short-term Stability)

ตารางที่ 4.23 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่พิกัด 100 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	+ 100	1.56/60	100.7	1.529	60.02	98.75	1.401	60.81
2			100.7	1.527	60.00	98.80	1.399	60.77
3			100.7	1.528	60.02	98.76	1.400	60.77
4			100.6	1.530	60.04	98.83	1.401	60.71
5			100.7	1.528	60.05	98.75	1.400	60.82
6			100.7	1.528	60.00	98.74	1.399	60.80
7			100.7	1.530	60.01	98.65	1.397	60.92
8			100.7	1.531	60.04	98.73	1.398	60.83
9			100.3	1.486	60.40	98.43	1.393	60.99
10			101.0	1.532	59.77	98.46	1.388	61.05

ตารางที่ 4.24 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่พิกัด 125 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	+ 125	1.56/60	124.9	1.617	59.83	124.1	1.535	59.65
2			125.0	1.607	59.89	124.1	1.539	59.69
3			124.9	1.613	59.83	124.1	1.557	59.73
4			124.9	1.623	59.81	124.1	1.561	59.66
5			124.9	1.614	59.82	124.0	1.552	59.68
6			125.0	1.612	59.86	124.1	1.541	59.66
7			125.0	1.610	59.85	124.1	1.544	59.68
8			124.9	1.620	59.82	124.1	1.551	59.65
9			125.0	1.618	59.78	124.1	1.557	59.63
10			125.0	1.612	59.81	124.1	1.551	59.70

ตารางที่ 4.25 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว
ที่พิกัด 150 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	+ 150	1.56/60	150.2	1.599	59.84	149.2	1.541	59.80
2			150.3	1.606	59.83	149.3	1.557	59.72
3			150.2	1.595	59.84	149.2	1.551	59.78
4			150.3	1.601	59.81	149.4	1.578	59.67
5			150.2	1.599	59.82	149.2	1.545	59.75
6			150.2	1.604	59.85	149.2	1.565	59.80
7			150.3	1.606	59.86	149.2	1.551	59.77
8			150.2	1.603	59.82	149.3	1.550	59.75
9			150.2	1.603	59.82	149.2	1.551	59.81
10			150.1	1.613	59.90	149.3	1.564	59.75

ตารางที่ 4.26 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว
ที่พิกัด 175 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	+ 175	1.56/60	175.1	1.611	59.95	174.10	1.561	59.79
2			175.2	1.613	59.87	174.00	1.560	59.83
3			175.2	1.150	59.91	174.10	1.563	59.79
4			175.2	1.610	59.90	174.10	1.562	59.82
5			175.3	1.616	59.89	174.10	1.560	59.80
6			175.1	1.600	59.86	174.00	1.553	59.84
7			175.2	1.619	59.90	174.20	1.588	59.79
8			175.1	1.613	59.87	174.10	1.563	59.83
9			175.3	1.615	59.80	173.90	1.564	59.85
10			175.1	1.611	59.88	174.10	1.566	59.78

ตารางที่ 4.27 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว
ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	+ 200	1.56/60	200.5	1.570	58.92	199.2	1.521	58.87
2			200.4	1.568	59.00	199.2	1.536	58.83
3			200.5	1.586	58.96	199.1	1.537	58.89
4			200.4	1.594	59.00	199.1	1.566	58.86
5			200.2	1.588	58.94	198.7	1.539	58.88
6			199.5	1.590	59.20	198.7	1.546	58.9
7			199.5	1.579	59.24	198.7	1.540	58.85
8			200.6	1.588	58.92	199.0	1.538	58.88
9			200.2	1.580	59.11	199.1	1.540	58.88
10			200.5	1.585	58.97	199.0	1.554	58.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ
ที่พิกัด 100 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	- 100	1.56/60	-100.7	1.481	60.37	-100.8	1.422	59.52
2			-101.2	1.518	60.03	-100.7	1.419	59.54
3			-100.7	1.521	59.90	-100.4	1.421	59.55
4			-101.0	1.529	60.00	-100.5	1.422	59.62
5			-100.3	1.481	60.42	-100.3	1.420	59.57
6			-100.5	1.502	60.16	-100.2	1.419	59.68
7			-100.4	1.481	60.45	-100.4	1.419	59.57
8			-100.3	1.484	60.30	-100.3	1.420	59.59
9			-100.8	1.526	59.98	-100.3	1.421	59.58
10			-100.7	1.526	59.97	-100.4	1.423	59.51

ตารางที่ 4.29 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ
ที่พิกัด 125 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	- 125	1.56/60	-124.9	1.493	60.30	-124.8	1.425	59.50
2			-124.9	1.496	60.20	-124.8	1.424	59.54
3			-125.0	1.503	60.28	-124.8	1.427	59.52
4			-124.9	1.499	60.24	-124.8	1.426	59.50
5			-125.0	1.497	60.25	-124.8	1.426	59.50
6			-124.9	1.493	60.30	-124.8	1.425	59.50
7			-125.0	1.502	60.33	-124.8	1.431	59.51
8			-124.9	1.496	60.20	-124.8	1.424	59.54
9			-124.9	1.498	60.25	-124.8	1.428	59.55
10			-125.0	1.499	60.23	-124.8	1.426	59.51

ตารางที่ 4.30 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ
ที่พิกัด 150 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	Up (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)	Up (kV)	T1 (μ s)	T2 (μ s)
1	- 150	1.56/60	-150.1	1.662	59.83	-149.2	1.433	59.55
2			-149.9	1.629	60.00	-149.2	1.431	59.55
3			-149.9	1.660	59.91	-149.1	1.433	59.55
4			-150.0	1.629	59.83	-149.1	1.430	59.61
5			-149.8	1.628	59.90	-149.2	1.434	59.52
6			-149.8	1.646	59.99	-149.1	1.431	59.54
7			-149.8	1.641	60.00	-149.0	1.430	59.63
8			-149.8	1.653	59.89	-149.1	1.430	59.55
9			-149.9	1.652	59.95	-149.1	1.432	59.56
10			-149.8	1.663	60.01	-149.1	1.431	59.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.31 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ
ที่พิกัด 175 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	- 175	1.56/60	-175.1	1.585	59.81	-173.9	1.435	59.61
2			-174.9	1.568	59.90	-173.9	1.433	59.66
3			-175.1	1.581	59.89	-173.9	1.434	59.61
4			-174.8	1.575	59.94	-173.8	1.434	59.64
5			-174.9	1.573	60.01	-173.9	1.434	59.66
6			-175.1	1.583	59.82	-174.0	1.435	59.58
7			-175.1	1.577	59.83	-174.0	1.434	59.58
8			-174.9	1.573	60.00	-173.9	1.435	59.61
9			-175.1	1.579	59.91	-173.9	1.434	59.61
10			-174.9	1.573	59.90	-173.9	1.433	59.61

ตารางที่ 4.32 ค่าเปรียบเทียบในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ
ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

No.	U_p (kV)	Waveshape (μ s)	Reference			Unit under calibration (UUC)		
			U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)	U_p (kV)	$T1$ (μ s)	$T2$ (μ s)
1	- 200	1.56/60	-200.0	1.628	60.01	-198.6	1.570	59.78
2			-200.1	1.627	59.97	-198.7	1.579	59.76
3			-199.8	1.633	60.00	-198.7	1.590	59.77
4			-200.2	1.634	59.95	-198.7	1.630	59.75
5			-200.2	1.645	59.97	-198.7	1.648	59.76
6			-200.1	1.649	59.96	-198.7	1.648	59.74
7			-200.3	1.638	59.94	-198.8	1.640	59.77
8			-199.7	1.635	59.97	-198.5	1.600	59.76
9			-200.0	1.582	59.87	-198.7	1.574	59.76
10			-200.0	1.629	59.84	-198.6	1.588	59.75

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ
ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S

Waveshape (μ s)	U (kV)	F	δF (%)	ΔF (%)	$S.D.$ (%)
1.56 / 60	+ 100	1020.2	2.02	1.08	0.21
	+ 125	1006.9	0.69	-0.23	0.04
	+ 150	1006.5	0.65	-0.27	0.06
	+ 175	1006.4	0.64	-0.28	0.07
	+ 200	1006.3	0.63	-0.29	0.14
	- 100	1002.3	0.23	-0.20	0.23
	- 125	1001.1	0.11	-0.32	0.04
	- 150	1005.1	0.51	0.08	0.06
	- 175	1006.2	0.62	0.19	0.05
	- 200	1006.9	0.69	0.26	0.07

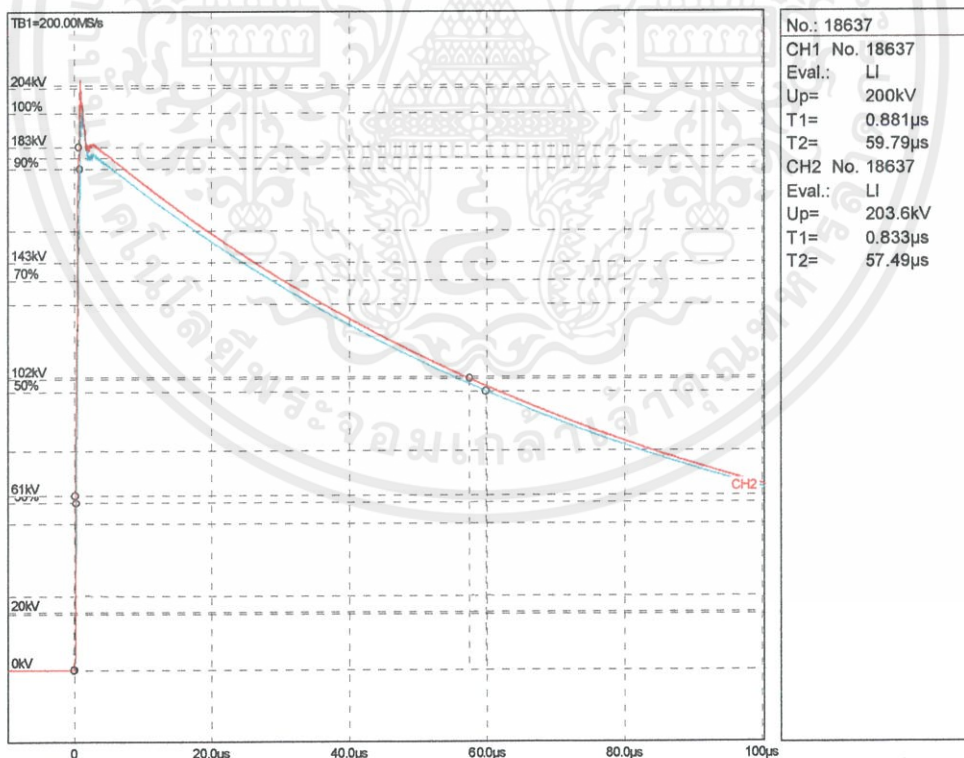
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล ที่พิกัด 200 kV รูปคลื่น 1.56/60 μ S (ต่อ)

Waveshape (μ s)	U (kV)	$\delta T1$ (%)	S.D. for T1 (%)	$\delta T2$ (%)	S.D. for T2 (%)
1.56 / 60	+ 100	-8.3	0.29	1.35	0.18
	+ 125	-4.1	0.56	-0.26	0.05
	+ 150	-3.0	0.71	-0.13	0.07
	+ 175	0.9	0.58	-0.12	0.04
	+ 200	-2.6	0.77	-0.25	0.05
	- 100	-5.6	0.10	-0.97	0.08
	- 125	-4.8	0.15	-1.23	0.03
	- 150	-13.0	0.10	-0.61	0.06
	- 175	-9.0	0.05	-0.47	0.05
	- 200	-1.4	1.96	-0.31	0.02

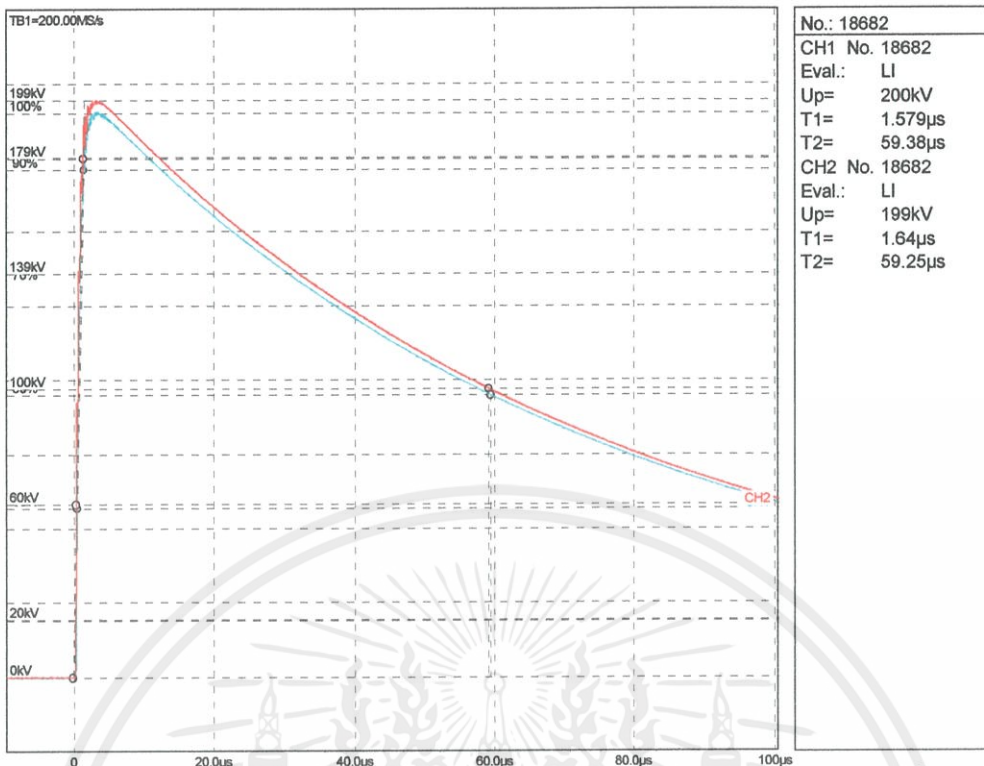
ตารางที่ 4.35 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

Type of voltage	Measuring values	Range	Relative measuring uncertainty
Lightning impulse voltage	Scale factor, U	100 kV to 200 kV	1.3 %
	Front time, T1	0.84 μ s to 1.56 μ s	9.5 %
	Time to half-value, T2	60 μ s to 61 μ s	4.1 %

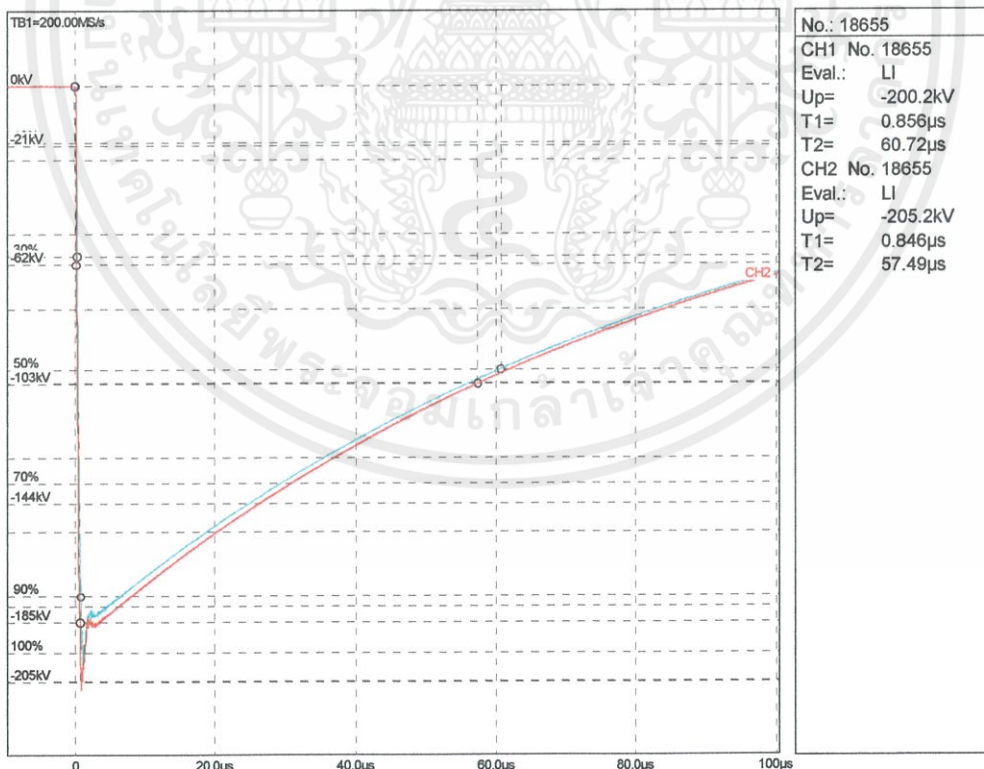


รูปที่ 4.17 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 0.84/60 μ s ชั่วบวก

โดย CH1 จากโวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง (สีฟ้า) CH2 จากโวลท์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ (สีแดง)

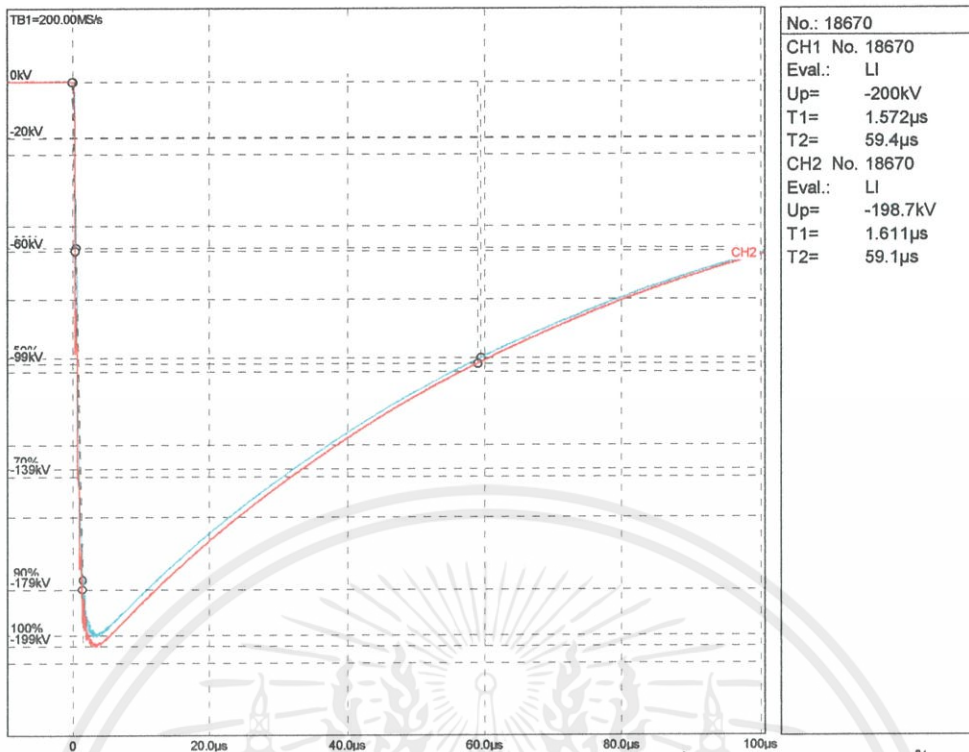


รูปที่ 4.18 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 μ s ขั้วบวก โดย CH1 จากโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง (สีฟ้า) CH2 จากโวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ (สีแดง)



รูปที่ 4.19 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 0.84/60 μ s ขั้วลบ โดย CH1 จากโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง (สีฟ้า) CH2 จากโวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ (สีแดง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 μ s ขั้วลบ โดย CH1 จากโวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง (สีฟ้า) CH2 จากโวลท์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ (สีแดง)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบความสามารถของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ แรงดัน กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง โดยทำการ สอบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด [10] ซึ่งใน กรณีการวัดแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองชี้พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเวลามีค่า น้อยกว่า 5 % และความคลาดเคลื่อนของค่ายอดแรงดันน้อยกว่า 1% ซึ่งสามารถวัดรูปคลื่น ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μ s ทางคณะผู้จัดทำจึงขอสรุปผลการทดสอบ โดยใช้แบบฟอร์มรายงาน ที่ออกโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้ขอความอนุเคราะห์ไป และ ได้รับการตอบรับช่วยเหลือสนับสนุนเป็นอย่างดีตลอดมา



รูปที่ 5.1 โวลต์เดจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ, กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ พบว่ามีความละเอียดมากในการคำนวณ และเลือกใช้อุปกรณ์ ซึ่งถ้าหากค่าของอุปกรณ์ที่เลือกใช้มีความคลาดเคลื่อนจะทำให้ระบบการวัด และการลดทอนมีการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีความถี่สูง สามารถวัดได้ยาก ในส่วนของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับ ซึ่งจะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมาก และเนื่องจากตัวเก็บประจุที่มีพิกัดทนแรงดันสูงมักหาซื้อในประเทศไทยยาก ประกอบกับถ้าหากซื้อจากต่างประเทศจะใช้ระยะเวลาในการสั่งซื้อนาน จึงต้องใช้เวลาในการหาตัวเก็บประจุให้ครบตามที่คำนวณ และการเชื่อมขาของอุปกรณ์ภายในภาคแรงสูง ซึ่งทางผู้จัดทำได้ใช้ท่อทองเหลืองสวมกับขาของอุปกรณ์เพื่อลดการเกิดโคโรนา แต่จะมีผลเสียในเรื่องค่าความเหนียวนำ เนื่องจากท่อทองเหลืองที่ใส่เข้าไปกลายเป็นความเหนียวนำภายในท่อ มีผลต่อการผ่านการทดสอบหาผลตอบสนองรูปขึ้นได้ยาก



เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication No.71, **Insulation Co-ordination**, 1976.
- [2] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2547.
- [3] วรา จุห้อง, **การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์** **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2524.
- [4] วิชัย เดยวงศ์ศักดิ์, **การออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 400 กิโลโวลต์ แบบตัวเก็บประจุ**, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2530.
- [5] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, **การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์**, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] อนันท์ คัมภีรานนท์ และรุจี จันทร์ขาว, **ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น**, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี.
- [7] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2**, สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สำรวย สังข์สะอาด, **เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1**, ฉนวนและวัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] IEC 60 – 2, **High Voltage test technique**, Part 2: Measuring System, 1994.
- [11] IEC 61010-1 Edition 2, **Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory**, Part 1: General requirements, 2001.
- [12] ปริญญา ชมลิ้ม, พีรภูมิ ยุทธโกวิท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, ปิยะบุตร พฤษานาบุบาล, อานันวัฒน์ คุณากร และสุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, “วิธีการพัฒนาปรับปรุงผลตอบสนองทางเวลาของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ”, **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29**. ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ปริญญา ชมลิ้ม, พีรฤทธิ ยุทธโกวิท, นครเศรษฐ พัฒนเดช, อรรณพ ลิ้มสีมารัตน์ และ สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, “การประเมินความถูกต้องของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์จาก ผลตอบสนองของรูปชั้น”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29. ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 257
- [14] สุชาติ มณฑปใหญ่ และคณะ “การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสม ขนาด 300 kV” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
สรุปผลการทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ



1. Converting device

Manufacturer King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang

Type Universal Voltage Divider

Rated voltage 100 kV AC.

2. Coaxial cable 1.5 m

3. Indicating instrument Digital multimeter "HEWLETT PACKARD" Model 973A Serial no. JP38011148

EGAT's measuring system data

1. UNIVERSAL Reference voltage divider "HIGHVOLT" Type MCR 0.6/500-500/200 Serial no. 883345

2. Wide band power analyzer "NORMA" Type D 6200 Serial no. P5 62718 SR
(Voltage channel 61 U1 Serial no. P4 62370 F, Input impedance = 10.45 M)

3. Terminating resistor (1.11 M Ω)

The uncertainty is evaluated in accordance with IEC 60-2 (1994) procedure, providing a level of confidence of not less than 95 %.

UUC	Universal Voltage Divider	Ambient condition			
Manufacturer	-	Pressure	760	± 2	hPa
Model	Universal Voltage Divider	Temperature	25	± 2	°C
Serial no.	-	Humidity	59	± 5	%
Client	KMITL				
Calibration date	January 26, 2009				

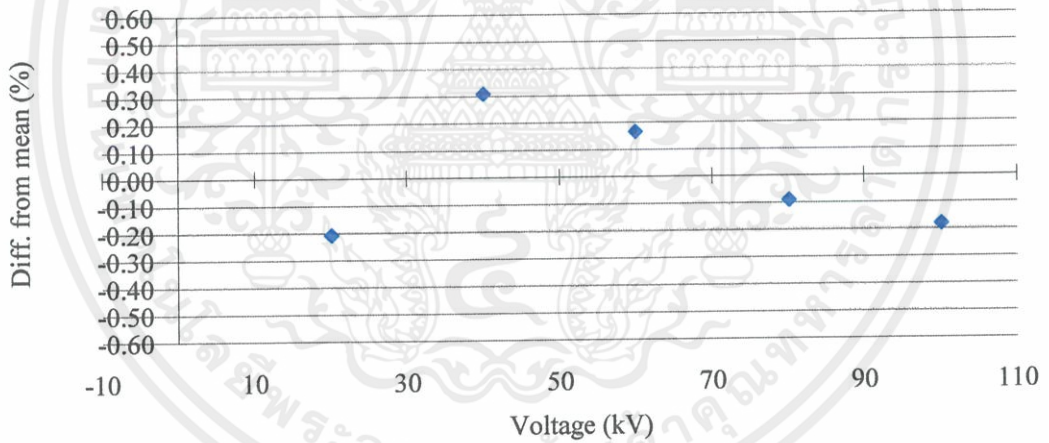
1. Determination of the assigned scale factor

The scale factors of the approved voltage divider, when compared with EGAT's measuring system, is **980** at 100 kV.

2. Linearity test

Reference (kVac)	Unit under calibration			Estimated uncertainty (%)
	Ratio	Low output (V)	Scale factor	
20.046	AC (1000:1)	20.47	979.50	0.85
40.071		40.70	984.50	0.84
60.070		61.10	983.10	0.84
80.02		81.60	980.60	0.84
100.03		102.10	979.70	0.84

The linearity of the high voltage divider is less than $\pm 0.6\%$ in the range of 20 - 100 kV.



3. Short-term stability test

The short-term stability was checked at a voltage of 100 kV for 30 minutes. Observations were proceeded immediately after application of the voltage and after 30 minutes. The change of scale factor, before and after voltage application, is less than 0.04 %.

ภาคผนวก ข
สรุปผลการทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสตรง



- | | |
|--------------------------|---|
| 1. Converting device | |
| <i>Manufacturer</i> | King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang |
| <i>Type</i> | Universal Voltage Divider |
| <i>Rated voltage</i> | 100 kV DC. |
| 2. Coaxial cable | 1.5 m |
| 3. Indicating instrument | Digital multimeter "HEWLETT PACKARD" Model 973A Serial no. JP38011148 |

EGAT's measuring system data

1. UNIVERSAL Reference voltage divider "HIGHVOLT" Type MCR 0.6/500-500/200 Serial no. 883345
2. Wide band power analyzer "NORMA" Type D 6200 Serial no. P5 62718 SR
(Voltage channel 61 U1 Serial no. P4 62370 F, Input impedance = 10.45 M Ω)
3. Terminating resistor (1.11 M Ω)

The uncertainty is evaluated in accordance with IEC 60-2 (1994) procedure, providing a level of confidence of not less than 95 %.

UUC	Universal Voltage Divider	Ambient condition			
Manufacturer	-	Pressure	760	± 2	hPa
Model	Universal Voltage Divider	Temperature	25	± 2	°C
Serial no.	-	Humidity	59	± 5	%
Client	KMITL				
Calibration date	January 26, 2009				

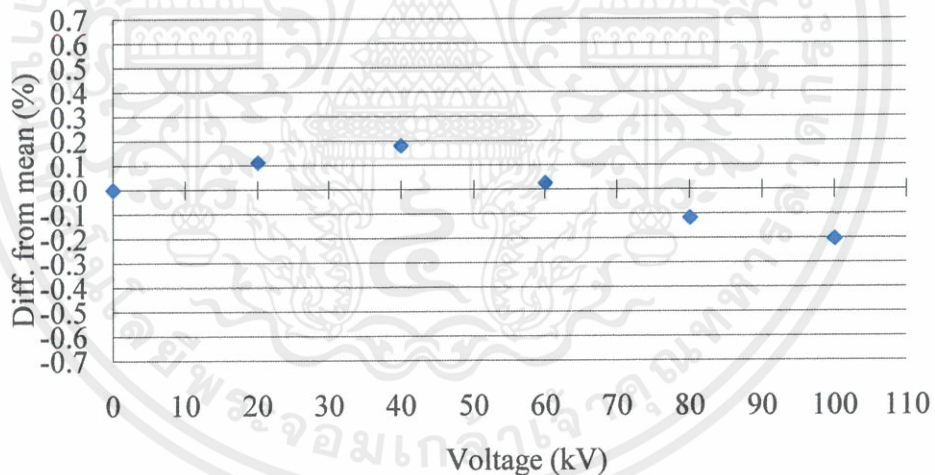
1. Determination of the assigned scale factor

The scale factors of the approved voltage divider, when compared with EGAT's measuring system, is **985** at 100 kV.

2. Linearity test

Reference (kVac)	Unit under calibration			Estimated uncertainty (%)
	Ratio	Low output (V)	Scale factor	
20.014	DC (1000:1)	20.258	988.0	0.83
40.000		40.460	988.6	0.83
60.016		60.800	987.1	0.83
80.093		81.200	985.7	0.83
100.04		101.58	984.8	0.83

The linearity of the high voltage divider is less than $\pm 0.6\%$ in the range of 20 - 100 kV.



3. Short-term stability test

The short-term stability was checked at a voltage of 100 kV for 15 minutes. Observations were proceeded immediately after application of the voltage and after 30 minutes. The change of scale factor, before and after voltage application, is less than 0.18 %.

ภาคผนวก ค
สรุปผลการทดสอบการวัดแรงดันอิมพัลส์

EGAT
CALIBRATION REPORT

Universal Voltage Divider			
Manufacturer	KMITL	Ambient condition	
Model	-	Pressure	1015 ± 1 hPa
Serial no.	-	Temperature	28 ± 1 °C
Customer	KMITL	Humidity	58 ± 10 %

1. Unit under calibration

The unit under calibration (UUC) is a Damped Capacitive Voltage Divider for 400 kV lightning impulse voltage, consisting of the following components:

- Measuring capacitor "PASSONI VILLA" Type ILCD-400 Serial no. 05639
- Low voltage unit "PASSONI VILLA" 1.075 μ F 1200 V Serial no. 05640
- Measuring cable length 10 m
- Attenuator rack Channel A
- Digital oscilloscope "LECROY" Type 9310A Serial no. 9310 4117 Channel 1 (CH1)
- Digital data acquisition, analysis and computer control system WinSDA-C

The nominal scale factors of the unit under calibration (F_{UUC}) consist of:

- The scale factor of measuring capacitor and low voltage unit
- The scale factor of attenuator rack Channel A

Overall scale factor

1000
0
1000

2. Calibration procedure

The voltage divider was calibrated by comparison measurement against the reference standard

- Universal reference divider "HIGHVOLT" Type MCR 0.6/500-500/200 Serial no. 883345 Calibration mark 974/DKD-K-24501/03-11
- Digital recorder "DR. STRAUSS SYSTEM-ELEKTRONIK GMBH" Type TR-AS 200-14 Serial no. 637 Calibration mark 335/DKD-K-11701/04-07

The scale factor for a single measurement was calculated according to the following equation:

$$F_i = \frac{F_{UUC} \times U_C}{U_{UUC}}$$

- where
- F_i On the basis of a single measurement, calculated scale factor of the unit under calibration
 - F_{UUC} Nominal scale factor of the unit under calibration
 - U_N Voltage displayed at the measuring instrument of the reference standard
 - U_{UUC} Voltage displayed at the measuring instrument of the unit under calibration

For each voltage level and waveshape, 10 measurements were carried out. For each measurement, the scale factor F_i was calculated. For each of the measuring series with 10 measurements, the arithmetic mean value F , the relative deviation of the scale factor δF related to the nominal scale factor F_{UUC} , the standard deviation S.D. (for F) and the relative standard deviation (related to F) were calculated.

The relative deviation of the arithmetic mean value of the scale factor of a measuring series related to the nominal scale factor was calculated as follows:

$$\delta F (\%) = \frac{F - F_{UUC}}{F_{UUC}} \times 100$$

The relative standard deviation of the scale factor of a measuring series related to the arithmetic mean value of the scale factor was calculated by using the following equation:

$$S.D. (\%) = \frac{S.D.}{F} \times 100$$

- where - F Arithmetic mean value of the scale factor of the measuring series
 - S.D. Standard deviation for F

The measuring deviation of the time parameters for a single measurement was calculated according to the following equations:

$$\delta T_{1i} (\%) = \frac{T1 - T1_{Ref}}{T1_{Ref}} \times 100$$

$$\delta T_{2i} (\%) = \frac{T2 - T2_{Ref}}{T2_{Ref}} \times 100$$

- where - $\delta T_{1i}, \delta T_{2i}$ On the basis of a single measurement, calculated measuring deviation of the time parameters
 - T1, T2 Measured values of the unit under calibration
 - $T1_{Ref}, T2_{Ref}$ Measured values of the reference standard

For each of the measuring series with 10 measurements, the mean value of the measuring deviation $\delta T1, \delta T2$ and the standard deviation S.D. for T1, S.D. for T2 were calculated.

The short-term stability test was performed by applying the maximum rated voltage, continuously, to the unit under calibration. For each voltage polarity, 30 impulses were applied. The scale factor shall then be measured immediately after (within 10 minutes) the application of the voltage. The scale factors measured before and after the application of the voltage shall not differ by more than 1 %

For the linearity test, the values of the scale factor of the unit under calibration shall be measured at the minimum and maximum voltages of the operating range and at three approximately equally spaced voltages between these extremes. These five values shall not differ by more than ± 1 % from the mean value.

$$\Delta F = \frac{F - F_{avg}}{F_{avg}} \times 100$$

- where - ΔF Deviation of each five scale factors from the mean value.
 - F_{avg} Arithmetic mean value of the five scale factors calculated from the linearity test.

3. Measuring conditions

Calibration items	Quantity	Waveshape (\square s)	Voltage (kV)	No. of impulses
Determination of the scale factors	U, T1, T2	0.84 / 60	+200	10 for each waveshape
		0.84 / 60	-200	
		1.56 / 60	+200	
		1.56 / 60	-200	
Short-term stability test	U	1.56 / 60	+/-200	30 for each polarity
Linearity test	U, T1, T2	1.56 / 60	+/- 100, +/- 125, +/- 150, +/- 175, +/- 200	10 for each voltage level

4. Measuring results

4.1 Assigned scale factors

From the measurement, the following assigned scale factors were determined for the unit under calibration.

Waveshape (μs)	U (kV)	Assigned scale factors
0.84 / 60	+ 200	985.5
0.84 / 60	- 200	978.4
1.56 / 60	+ 200	1004.4
1.56 / 60	- 200	1006.6

4.2 Determination of the scale factors

4.2.1 Before short-term stability test

Waveshape (μs)	U (kV)	F	δF (%)	S.D.	S.D. (%)
0.84 / 60	+ 200	985.5	-1.45	4.36	0.44
0.84 / 60	- 200	978.4	-2.16	5.43	0.55
1.56 / 60	+ 200	1004.4	0.44	0.92	0.09
1.56 / 60	- 200	1006.6	0.66	1.31	0.13

Waveshape (μs)	U (kV)	$\delta T1$ (%)	S.D. for $T1$ (%)	$\delta T2$ (%)	S.D. for $T2$ (%)
0.84 / 60	+ 200	-4.90	1.72	-3.46	0.72
0.84 / 60	- 200	-1.21	1.36	-4.94	0.30
1.56 / 60	+ 200	4.06	0.59	-0.30	0.10
1.56 / 60	- 200	3.32	0.97	-0.39	0.09

4.2.2 After short-term stability test

Waveshape (μs)	U (kV)	F	δF (%)	S.D.	S.D. (%)
1.56 / 60	+ 200	1005.7	0.57	1.84	0.18
1.56 / 60	- 200	1006.6	0.66	1.29	0.13

4.3 Short-term stability test

The results of the short-term stability test after applying 30 impulses at maximum rated voltage for each polarity are as follows:

Waveshape (μs)	U (kV)	F_{Before}	F_{After}	Deviation of the scale factor (%)
1.56 / 60	+ 200	1004.4	1005.7	0.13
1.56 / 60	- 200	1006.6	1006.6	0

4.4 Linearity test

Waveshape (μs)	U (kV)	F	δF (%)	ΔF (%)	S.D. (%)
1.56 / 60	+ 100	1020.2	2.02	1.08	0.21
	+ 125	1006.9	0.69	-0.23	0.04
	+ 150	1006.5	0.65	-0.27	0.06
	+ 175	1006.4	0.64	-0.28	0.07
	+ 200	1006.3	0.63	-0.29	0.14
	- 100	1002.3	0.23	-0.20	0.23
	- 125	1001.1	0.11	-0.32	0.04
	- 150	1005.1	0.51	0.08	0.06
	- 175	1006.2	0.62	0.19	0.05
	- 200	1006.9	0.69	0.26	0.07

Waveshape (μs)	U (kV)	$\delta T1$ (%)	S.D. for $T1$ (%)	$\delta T2$ (%)	S.D. for $T2$ (%)
1.56 / 60	+ 100	-8.3	0.29	1.35	0.18
	+ 125	-4.1	0.56	-0.26	0.05
	+ 150	-3.0	0.71	-0.13	0.07
	+ 175	0.9	0.58	-0.12	0.04
	+ 200	-2.6	0.77	-0.25	0.05
	- 100	-5.6	0.10	-0.97	0.08
	- 125	-4.8	0.15	-1.23	0.03
	- 150	-13.0	0.10	-0.61	0.06
	- 175	-9.0	0.05	-0.47	0.05
	- 200	-1.4	1.96	-0.31	0.02

5. Measuring uncertainty

Type of voltage	Measuring values	Range	Relative measuring uncertainty
Lightning impulse voltage	Scale factor, U	100 kV to 200 kV	1.3 %
	Front time, $T1$	0.84 μs to 1.56 μs	9.5 %
	Time to half-value, $T2$	60 μs	4.1 %

The reported uncertainty is based on standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$, providing level of confidence of not less than 95 %. The uncertainty stated is valid for the instant of calibration and does not include any portion for the long-term stability of the unit under calibration.

ภาคผนวก
ขนาดแรงดันทดสอบมาตรฐาน BIL

การเลือกขนาดแรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับระดับการฉนวน (Insulation level) นั่นคือ ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัสดุนั้นๆ ไปใช้งาน

ตาราง ก-1 มาตรฐานการทดสอบฉนวน BIL

Highest voltage for equipment (kV _{r.m.s})	Rated lightning impulse withstand voltage (kV _{peak})
3.6	40
7.2	60
12	75
17.5	95
24	125
36	170
52	250
72.5	325
100	380
123	450
145	550
170	650
245	1050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

1. ข้อกำหนดสำหรับการรับรองระบบการวัด

1.1 การวัดค่าสูงสุดของอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม จะต้องมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1\%$

1.2 การวัดค่าสูงสุดของอิมพัลส์รูปคลื่นหน้าตัด มีข้อกำหนดในส่วนข้อผิดพลาด ดังนี้

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นมีค่าผิดพลาด $\leq \pm 5\%$

$$0.5\mu S \leq T_c < 2\mu S$$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หลังคลื่นมีค่าผิดพลาด $\leq \pm 3\%$

$$T_c \geq 2\mu S$$

1.3 ค่าพารามิเตอร์ของเวลาจะต้องไม่เกินค่าผิดพลาด $\pm 10\%$ ของค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง

2. ความมีเสถียรภาพของค่าสเกลแฟกเตอร์

สเกลแฟกเตอร์ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$ สำหรับช่วงการวัดในอุณหภูมิล้อมรอบ

3. คุณสมบัติทางพลศาสตร์

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบวัด จะต้องสามารถวัดค่าแรงดันสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ของเวลาเกินช่วงเวลาของรูปคลื่นโดย

3.1 ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องมีค่า ตามข้อกำหนดดังนี้

ภายใน $\pm 1\%$ สำหรับอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดหลังคลื่น

ภายใน $\pm 3\%$ สำหรับอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

3.2 ค่าผิดพลาดของพารามิเตอร์ทางเวลา จะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 10\%$

4. การหาค่าของสเกลแฟกเตอร์ สามารถทดสอบโดยวิธีดังต่อไปนี้

4.1 ทำการวัดแรงดันอินพุทและเอาท์พุทในเวลาเดียวกัน

4.2 ใช้วงจรบริดจ์

4.3 คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์

5. การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดจะวัดที่ค่าแรงดันต่ำสุดและค่าแรงดันสูงสุดของช่วงการทำงาน มีการทดสอบทั้งชั่วคราวและชั่วคราว มีการวัดแรงดันทดสอบค่าละ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบแต่ละค่า ซึ่งการทดสอบทำได้ 4 วิธีคือ

5.1 ทดสอบเปรียบเทียบกับแถบทรงกลม

5.2 ทดสอบเปรียบเทียบกับโวลต์เตจดีไวเดอร์มาตรฐาน

5.3 ทดสอบปรับเทียบกับแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

5.4 ทดสอบปรับเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

6. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

ทำการทดสอบที่ 110 % ของค่าแรงดันพิกัด โดยการเบรกดาวนหรือวาบไฟตามผิวเกิดขึ้นได้ไม่เกิน 2 ครั้ง จึงถือว่าผ่านการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maxi-Mox

Precision Thick Film Axial Terminal High Voltage/High Resistance



Maxi-Mox resistors are also versatile. Suitable for industrial applications requiring still more power for high voltage switching, industrial control, and high voltage current limiting.

FEATURES

- Wide resistance ranges
- Voltage rating to 50KV
- Power rating to 12.5 watts
- Silicone or epoxy coating

APPLICATIONS

- HV power supplies
- Power distribution
- Medical instrumentation
- Avionics

SPECIFICATIONS

Material

Core: Alumina

Resistor: Thick Film

Electrical

Resistance Range: 250Ω to 1 Teraohm

Power Rating: 2.0W to 12.5W

Voltage Rating: 10KV to 50KV

Tolerance: 0.5% to 20%

Operating Temperature: -55°C to +210°C

Temperature Coefficient: 25ppm/°C 0° to 85°C available

Ohmite Series	Resistance Range (Ohms)	Power @70°C	Voltage Rating	Available Tolerances*	A ± 0.015" (in/mm)	B max. (in/mm)	Capacitance (pf)
• High-temperature (silicone coated)							
MOX-1-12	250 ohms to 300,000M	2.5W	10.0KV	1% to 20%	1.120" / 28.45	0.310" / 7.87	0.75
MOX-2-12	500 ohms to 700,000M	5.0W	20.0KV	1% to 20%	2.120" / 53.85	0.310" / 7.87	0.60
MOX-3-12	750 ohms to 1,000,000M	7.5W	30.0KV	1% to 20%	3.120" / 79.24	0.310" / 7.87	0.50
MOX-4-12	1K to 1,000,000M	10.0W	40.0KV	1% to 20%	4.120" / 104.65	0.310" / 7.87	0.40
MOX-5-12	1.25K to 1,000,000M	12.5W	50.0KV	1% to 20%	5.120" / 130.05	0.310" / 7.87	0.30
*Some tolerances are not available over the entire resistance range.							
• Standard (epoxy coated) @25°C							
MOX-1-13	250 ohms to 300,000M	2.0W	10.0KV	0.1% to 20%	1.140" / 28.96	0.345" / 8.76	0.75
MOX-2-13	500 ohms to 700,000M	3.0W	20.0KV	0.1% to 20%	2.140" / 54.36	0.345" / 8.76	0.60
MOX-3-13	750 ohms to 1,000,000M	4.0W	30.0KV	0.1% to 20%	3.140" / 79.76	0.345" / 8.76	0.50
MOX-4-13	1K to 1,000,000M	5.0W	40.0KV	0.1% to 20%	4.140" / 105.16	0.345" / 8.76	0.40
MOX-5-13	1.25K to 1,000,000M	6.0W	50.0KV	0.1% to 20%	5.140" / 130.56	0.345" / 8.76	0.30

TEMPERATURE/VOLTAGE COEFFICIENTS OF RESISTANCE

Resistor Series	Temp. Coeff. of Resistance*			Voltage Coeff. of Resistance**	
	25 PPM/°C	50 PPM/°C	100 PPM/°C	< 2PPM/Volt	< 5PPM/Volt
MOX-1	1K-1,500M	1K-450M	451M-30,000M	250Ω-1,000M	1,001M-100,000M
MOX-2	1K-1,500M	1K-1,000M	1,001M-60,000M	500Ω-2,600M	2,601M-200,000M
MOX-3	1K-1,500M	1K-1,500M	1,501M-90,000M	750Ω-4,000M	4,001M-300,000M
MOX-4	1K-1,500M	1K-2,000M	2,001M-120,000M	1K-5,300M	5,301M-400,000M
MOX-5	1K-1,500M	1K-2,500M	2,501M-150,000M	1.25K-6,700M	6,701M-500,000M

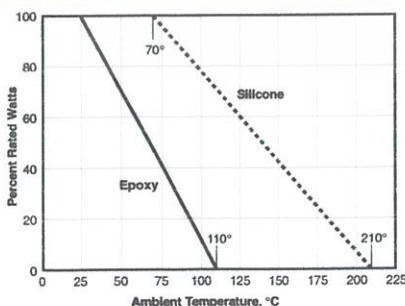
*Epoxy: -55°C to 110°C; High Temp. Silicone: -55°C to 210°C

**For tighter VCs please contact Ohmite.

PERFORMANCE DATA

Characteristic	Test Method	Specification
Humidity	MIL-STD-202, Method 103B, Condition B	±0.25%
Dielectric Withstanding Voltage	MIL-STD-202, Method 301, 750V	±0.25%
Insulation Resistance	MIL-STD-202, Method 302, Condition A or B	>10,000 M or greater dry
Thermal Shock	MIL-STD-202, Method 107G, Condition B, B-1, or F	±0.20%
Load Life	MIL-STD-202, Method 108A, Condition D	±1.0%
Resistance to Solvents	MIL-STD-202, Method 215G	Acceptable for High Reliability Series only
Terminal Strength	MIL-STD-202, Method 211A, Condition A or B	±0.25%
Shock (Specified Pulse)	MIL-STD-202, Method 213B, Condition I	±0.25%
Vibration High Frequency	MIL-STD-202, Method 204D, Condition D	±0.20%
Power Conditioning	MIL-R-49462A, Par 4.8	±0.50%
Solderability	MIL-STD-202, Method 208F	>95% Coverage

DERATING



ORDERING INFORMATION

Coating
2 = Black silicone
3 = Epoxy
6 = No coating E = RoHS Compliant

Style
1,2,3,4,5,8

MOX-1-131006FE

Maxi Mox Series Terminal 1 = 0.032" Ohms First 3 digits are significant; 4th digit is multiplier (# of zeroes to follow). Examples:
10R2 = 10.2 ohms
1000 = 100 ohms
1503 = 150,000 ohms

Tolerance
D = 0.5%
F = 1%
G = 2%
J = 5%
K = 10%
M = 15%
P = 20%

Check product availability at www.ohmite.com

Recommendation for Processing and Application of Through-Hole Capacitors

Soldering Process

A preheating of through-hole WIMA capacitors is allowed for temperatures $T_{max} < 100^{\circ}C$.
In practice a preheating duration of $t < 5$ min. has been proven to be best.

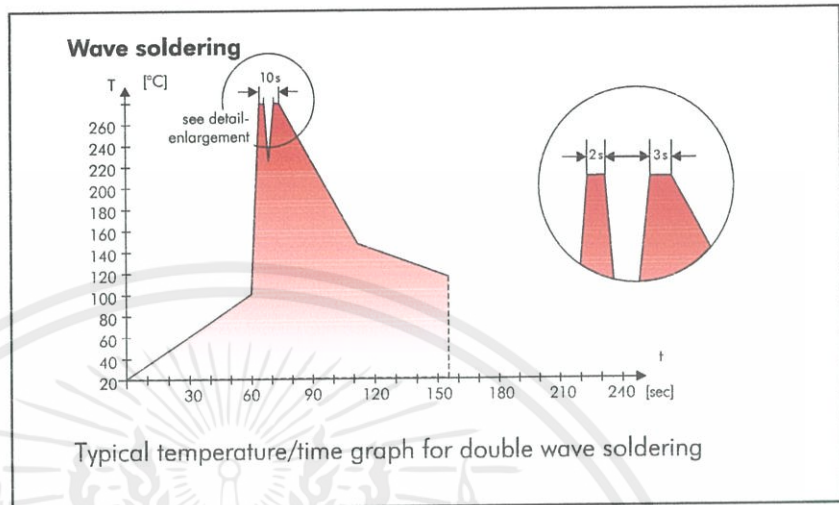
Single wave soldering

Soldering bath temperature: $T < 260^{\circ}C$
Immersion time: $t < 5$ sec

Double wave soldering

Soldering bath temperature: $T < 260^{\circ}C$
Immersion time: $2 \times t < 3$ sec

Due to different soldering processes and heat requirements the graphs are to be regarded as a recommendation only.



WIMA Quality and Environmental Philosophy

ISO 9001:2000 Certification

ISO 9001:2000 is an international basic standard of quality assurance systems for all branches of industry. The approval according to ISO 9001:2000 of our factories by the VDE inspectorate certifies that organisation, equipment and monitoring of quality assurance in our factories correspond to internationally recognized standards.

WIMA WPCS

The WIMA Process Control System (WPCS) is a quality surveillance and optimization system developed by WIMA. WPCS is a major part of the quality-oriented WIMA production. Points of application of WPCS during production process:

- incoming material inspection
- metallization
- film inspection
- schoopage
- pre-healing
- lead attachment
- cast resin preparation/encapsulation
- 100% final inspection
- AQL check

WIMA Environmental Policy

All WIMA capacitors, irrespective of whether through-hole devices or SMD, are made of environmentally friendly materials. Neither during manufacture nor in the product itself any toxic substances are used, e.g.

- Lead
- PCB
- CFC
- Hydrocarbon chloride
- Chromium 6+
- PBB/PBDE
- Arsenic
- Cadmium
- Mercury
- etc.

We merely use pure, recyclable materials for packing our components, such as:

- carton
- cardboard
- adhesive tape made of paper
- polystyrene

We almost completely refrain from using packing materials such as:

- foamed polystyrene (Styropor®)
- adhesive tapes made of plastic
- metal clips

RoHS Compliance

According to the RoHS Directive 2002/95/EC certain hazardous substances like e.g. lead, cadmium, mercury must not be used any longer in electronic equipment as of July 1st, 2006. For the sake of the environment WIMA has refrained from using such substances since years already.

Tape for lead-free WIMA capacitors

DIN EN ISO 14001:2005

WIMA's environmental management has been established in accordance with the guidelines of DIN EN ISO 14001:2005. The certification has been granted in June 2006.

Polypropylene (PP) Capacitors for Pulse Applications with Double-Sided Metallized Electrodes and Schoopage Contacts PCM 7.5 mm to 37.5 mm

Special Features

- Pulse duty construction
- Self-healing
- Very low dissipation factor
- Negative capacitance change versus temperature
- According to RoHS 2002/95/EC

Typical Applications

- For pulse applications e.g.
- Switch mode power supplies
 - TV and monitor sets
 - Lighting
 - Audio/video equipment

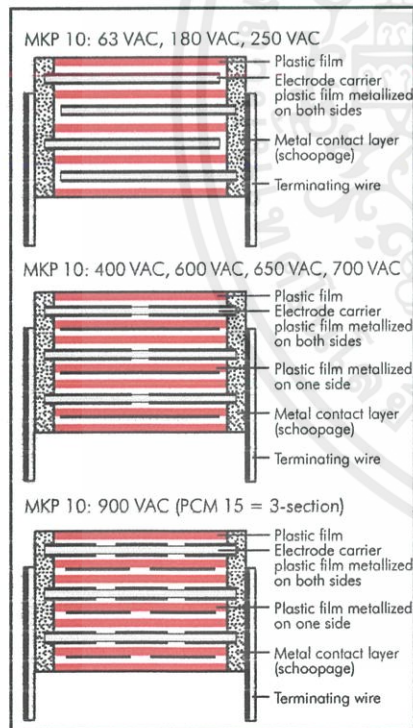
Construction

Dielectric: Polypropylene (PP) film

Capacitor electrodes:

Double-sided metallized plastic film

Internal construction:



Encapsulation:

Solvent-resistant, flame-retardant plastic case with epoxy resin seal, UL 94 V-0

Terminations: Tinned wire.

Marking: Colour: Red.

Marking: Black. Epoxy resin seal: Red

Electrical Data

Capacitance range:

1000 pF to 15 μ F (E12-values on request)

Rated voltages:

100 VDC, 250 VDC, 400 VDC, 630 VDC, 1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC, 2500 VDC

Capacitance tolerances:

$\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$

Operating temperature range:

-55°C to $+100^\circ\text{C}$

Climatic test category:

55/100/56 in accordance with IEC

Insulation resistance at $+20^\circ\text{C}$:

$C \leq 0.33 \mu\text{F}$: $\geq 1 \times 10^5 \text{ M}\Omega$

(mean value: $5 \times 10^5 \text{ M}\Omega$)

$C > 0.33 \mu\text{F}$: $\geq 30\,000 \text{ sec (M}\Omega \times \mu\text{F)}$

(mean value: 100 000 sec)

Measuring voltage: 100 V/1 min.

Dissipation factors at $+20^\circ\text{C}$: $\tan \delta$

at f	$C \leq 0.1 \mu\text{F}$	$0.1 \mu\text{F} < C \leq 1.0 \mu\text{F}$	$C > 1.0 \mu\text{F}$
1 kHz	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$
10 kHz	$\leq 4 \times 10^{-4}$	$\leq 6 \times 10^{-4}$	-
100 kHz	$\leq 15 \times 10^{-4}$	-	-

Maximum pulse rise time:

Capacitance pF/ μ F	max. pulse rise time V/ μ sec at $T_A < 40^\circ\text{C}$							
	100 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC	2500 VDC
1000 ... 2200	1000	1800	1800	1800	2800	5400	9000	11000
3300 ... 6800	900	1200	1200	1200	2800	5400	9000	11000
0.01 ... 0.022	700	1100	1200	1800	2100	3000	3400	11000
0.033 ... 0.068	400	800	900	1800	2100	2100	2100	-
0.1 ... 0.22	200	500	500	900	1400	1400	1400	-
0.33 ... 0.68	100	300	400	700	900	900	900	-
1.0 ... 2.2	70	200	200	400	400	500	-	-
3.3 ... 4.7	50	80	100	150	-	-	-	-
6.8 ... 15	35	50	70	-	-	-	-	-

for pulses equal to the rated voltage

Mechanical Tests

Pull test on leads:

$d \leq 0.8 \phi$: 10 N in direction of leads

$d > 0.8 \phi$: 20 N in direction of leads

according to IEC 60068-2-21

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

Test voltage: $1.6 U_r$, 2 sec.

Dielectric absorption:

0.05%

Voltage derating:

A voltage derating factor of 1.35 % per K

must be applied from $+85^\circ\text{C}$ for DC

voltages and from $+75^\circ\text{C}$ for AC

voltages.

Reliability:

Operational life > 300 000 hours

Failure rate < 1 fit ($10.5 \times U_r$ and 40°C)

Packing

Available taped and reeled up to and

including case size 15 x 26 x 31.5 /

PCM 27.5 mm.

Detailed taping information and graphs

at the end of the catalogue.

For further details and graphs please

refer to Technical Information.

Continuation

General Data

Capacitance	100 VDC/63 VAC*				250 VDC/180 VAC*				400 VDC/250 VAC*				630 VDC/400 VAC*			
	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**
1000 pF	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5**
1500 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5**
2200 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5**
3300 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5**
4700 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5**
6800 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5**
0.01 µF	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5*	4	9	10	7.5*	5	10.5	10.3	7.5**
0.015 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5*	4	9	10	7.5*	5	11	13	10*
0.022 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5*	4	9	10	7.5*	5	11	13	10*
0.033 "	4	9	10	7.5	4	9	10	7.5*	4	9	10	7.5*	5	11	13	10*
0.047 "	5	10.5	10.3	7.5*	5	10.5	10.3	7.5*	5.7	12.5	10.3	7.5*	6	12	13	10*
0.068 "	4	9	13	10*	4	9	13	10*	5	11	13	10*	5	11	18	15*
0.1 µF	5	10.5	10.3	7.5*	5	10.5	10.3	7.5*	6	12	13	10*	6	12.5	18	15*
0.15 "	4	9	13	10*	4	9	13	10*	5	11	18	15*	6	15	26.5	22.5*
0.22 "	5	11	13	10	5	11	13	10*	6	12.5	18	15*	7	14	18	15*
0.33 "	6	15	18	15	6	15	18	15*	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*
0.47 "	6	12	13	10	6	12	13	10*	7	14	18	15*	9	16	18	15*
0.68 "	5	11	18	15*	5	11	18	15*	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*
1.0 µF	6	12.5	18	15	6	12.5	18	15*	8	15	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5*
1.5 "	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*	9	19	31.5	27.5*
2.2 "	7	14	18	15	7	14	18	15*	9	16	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5*
3.3 "	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*	7	16.5	26.5	22.5*	9	19	31.5	27.5*
4.7 "	8	15	18	15	8	15	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5*	11	21	26.5	22.5*
6.8 "	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*	9	19	31.5	27.5*	11	21	31.5	27.5*
10 "	9	16	18	15*	9	16	18	15*	10.5	19	26.5	22.5*	11	21	31.5	27.5
15 "	7	16.5	26.5	22.5*	7	16.5	26.5	22.5*	9	19	31.5	27.5*	9	19	31.5	27.5*
1.0 µF	8.5	18.5	26.5	22.5	8.5	18.5	26.5	22.5*	11	21	26.5	22.5*	15	26	31.5	27.5*
1.5 "	9	19	31.5	27.5*	9	19	31.5	27.5*	11	21	31.5	27.5*	13	24	41.5	37.5*
2.2 "	10.5	19	26.5	22.5	11	21	26.5	22.5*	13	24	31.5	27.5*	17	29	31.5	27.5*
3.3 "	11	21	31.5	27.5	11	21	31.5	27.5*	13	24	41.5	37.5*	15	26	41.5	37.5*
4.7 "	13	24	31.5	27.5	13	24	31.5	27.5*	17	29	31.5	27.5*	20	39.5	31.5	27.5*
6.8 "	13	24	31.5	27.5	15	26	31.5	27.5*	13	24	41.5	37.5*	19	32	41.5	37.5*
10 "	13	24	31.5	27.5	13	24	41.5	37.5*	17	29	41.5	37.5*	20	39.5	41.5	37.5
15 "	17	29	31.5	27.5	17	34.5	31.5	27.5*	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5
22 "	20	39.5	31.5	27.5*	20	39.5	31.5	27.5*	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5
33 "	17	29	41.5	37.5*	19	32	41.5	37.5*	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5
47 "	19	32	41.5	37.5	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5
68 "	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5								
100 "	24	45.5	41.5	37.5												

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + U_{\text{DC}} \leq U_r$

** PCM = Printed circuit module = lead spacing

* On ordering please state the required PCM (lead spacing)!
If not specified, smaller PCM will be booked.

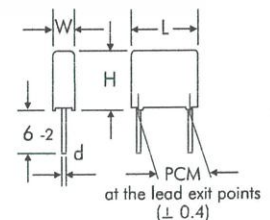
** Admissible AC voltage 280 VAC max.

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible AC voltage.

Taped version see page 121.

∅ d	PCM
0.6	7.5 - 10
0.8	15 - 27.5
1.0	37.5



Rights reserved to amend design data without prior notification.

Continuation

General Data

Capacitance	1000 VDC/600 VAC*				1600 VDC/650 VAC*				2000 VDC/700 VAC*				2500 VDC/900 VAC*			
	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**
1000 pF	4	9	10	7.5*	4	9	13	10	4	9	13	10	5	11	18	15*
1500 "	4	9	13	10*	4	9	13	10	4	9	13	10	6	15	26.5	22.5*
	4	9	10	7.5*									5	11	18	15*
2200 "	4	9	13	10*	4	9	13	10	5	11	13	10*	6	15	26.5	22.5
	4	9	10	7.5*									5	11	18	15*
3300 "	4	9	10	7.5*	4	9	13	10	5	11	18	15	5	11	18	15*
	4	9	13	10*									6	15	26.5	22.5*
4700 "	4.5	9.5	10.3	7.5*	5	11	13	10	5	11	18	15*	6	15	26.5	22.5*
	4	9	13	10*									6	15	26.5	22.5*
6800 "	5.7	12.5	10.3	7.5*	6	12	13	10*	6	12.5	18	15*	7	14	18	15*
	5	11	13	10*									5	11	18	15*
0.01 µF	5	11	13	10*	5	11	18	15	7	14	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5
0.015 "	5	11	18	15*	6	12.5	18	15*	6	15	26.5	22.5*	10.5	19	26.5	22.5
	6	12	13	10*												
0.022 "	5	11	18	15*	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*	11	21	26.5	22.5
	6	12.5	18	15*												
0.033 "	6	15	26.5	22.5*	6	15	26.5	22.5*	7	16.5	26.5	22.5*	11	21	26.5	22.5
	6	15	26.5	22.5*												
0.047 "	7	14	18	15*	8	15	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5*	11	21	31.5	27.5*
	6	15	26.5	22.5*												
0.068 "	6	15	26.5	22.5*	9	19	31.5	27.5*	11	21	31.5	27.5*	11	21	26.5	22.5*
	7	16.5	26.5	22.5												
0.1 µF	8.5	18.5	26.5	22.5*	11	21	26.5	22.5*	13	24	31.5	27.5				
0.15 "	11	21	31.5	27.5*	11	21	31.5	27.5*	15	26	31.5	27.5*	15	26	31.5	27.5*
	11	21	26.5	22.5*												
0.22 "	11	21	31.5	27.5*	15	26	31.5	27.5*	17	34.5	31.5	27.5*	17	34.5	31.5	27.5*
	11	21	31.5	27.5												
0.33 "	15	26	31.5	27.5*	17	34.5	31.5	27.5*	19	32	41.5	37.5	19	32	41.5	37.5
	13	24	41.5	37.5*												
0.47 "	17	29	31.5	27.5*	20	39.5	31.5	27.5*	20	39.5	41.5	37.5	20	39.5	41.5	37.5
	13	24	41.5	37.5*												
0.68 "	13	24	41.5	37.5*	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5
	20	39.5	31.5	27.5*												
1.0 µF	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5								
1.5 "	24	45.5	41.5	37.5												

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + U_{\text{DC}} \leq U_i$

** PCM = Printed circuit module = lead spacing

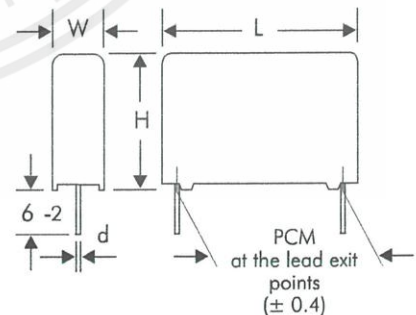
* On ordering please state the required PCM (lead spacing)!
If not specified, smaller PCM will be booked.

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Taped version see page 121.

∅ d	PCM
0.6	7.5 - 10
0.8	15 - 27.5
1.0	37.5



Rights reserved to amend design data without prior notification.

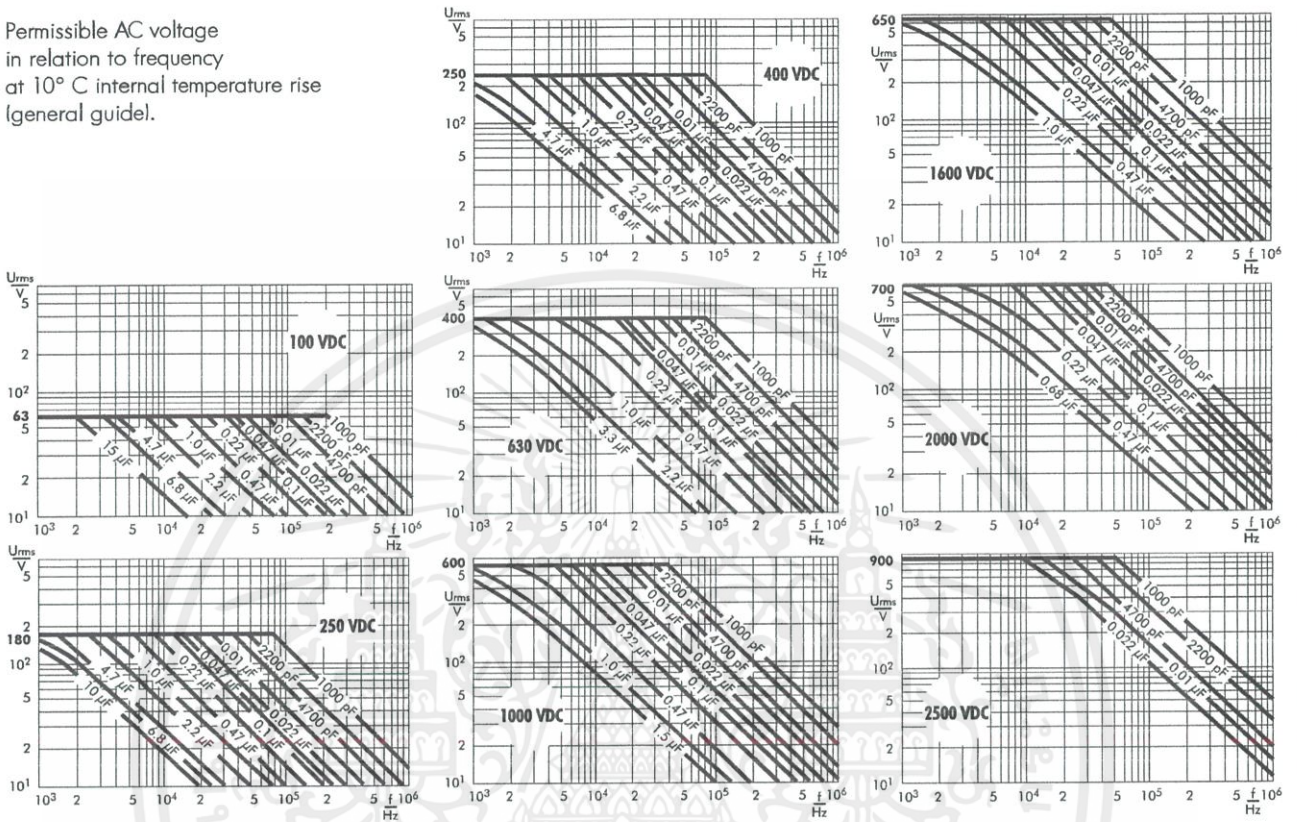
Continuation page 71

WIMA MKP 10



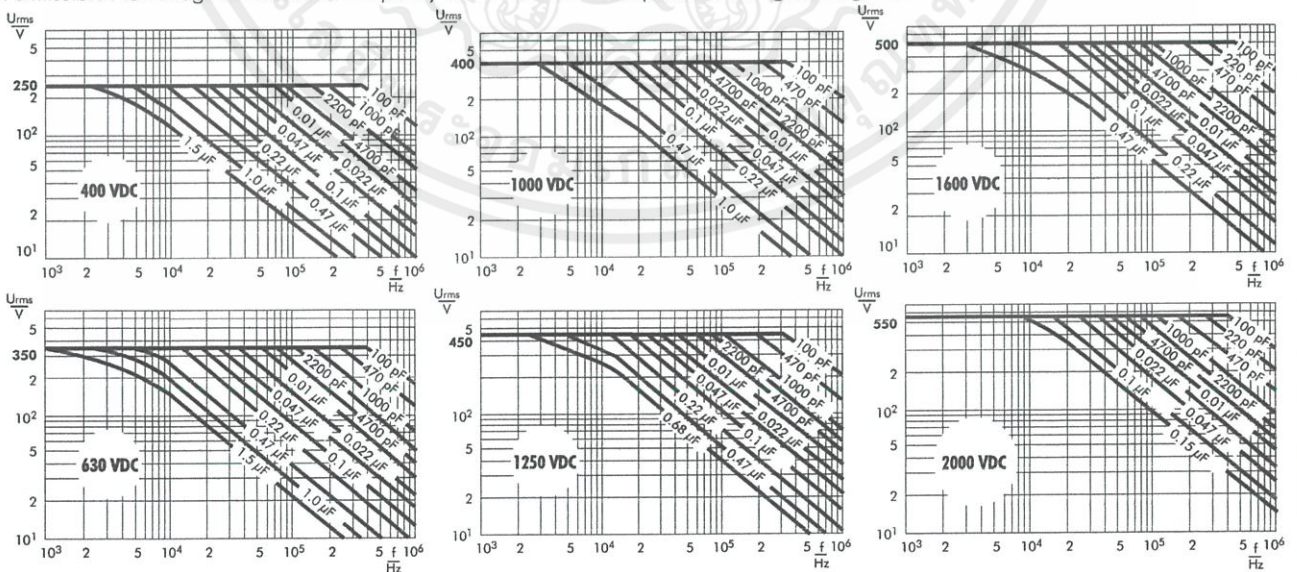
Continuation

Permissible AC voltage in relation to frequency at 10° C internal temperature rise (general guidel).



WIMA FKP 4

Permissible AC voltage in relation to frequency at 10° C internal temperature rise (general guidel).



Technical information and general data see page 72.

Typical Dimensions for Taping Configuration

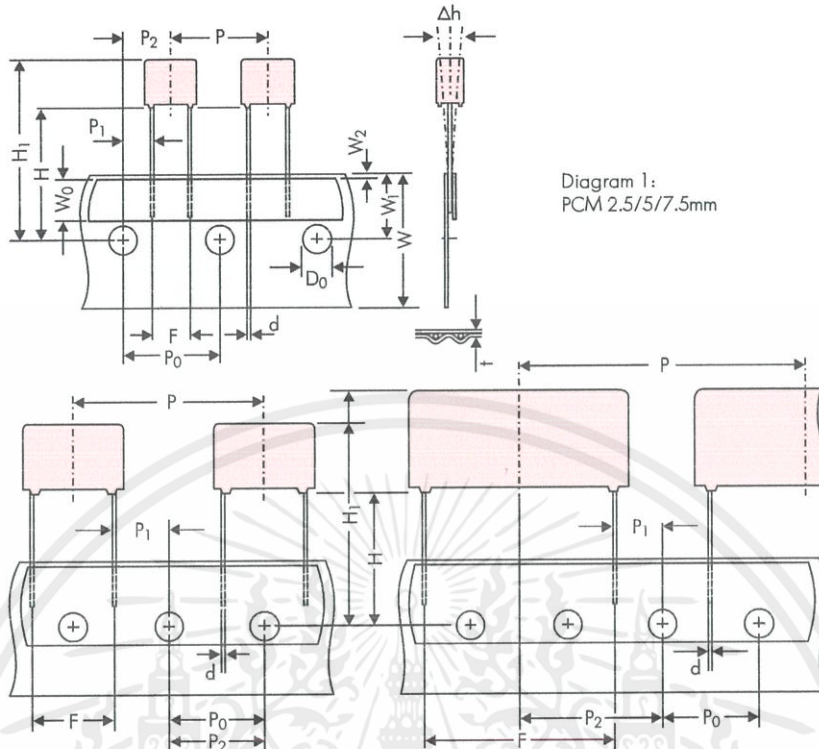


Diagram 2: PCM 10/15 mm

Diagram 3: PCM 22.5 and 27.5*mm

*PCM 27.5 tapping possible with two feed holes between components

Designation	Symbol	Dimensions for Radial Taping						
		PCM 2.5 tapping	PCM 5 tapping	PCM 7.5 tapping	PCM 10 tapping*	PCM 15 tapping*	PCM 22.5 tapping	PCM 27.5 tapping
Carrier tape width	W	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5
Hold-down tape width	W ₀	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	W ₁	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5
Hold-down tape position	W ₂	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	D ₀	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2
Pitch of component	P	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	25.4 ±1.0	25.4 ±1.0	38.1 ±1.5	38.1 ±1.5 or 50.8 ±1.5
Feed hole pitch	P ₀	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch
Feed hole centre to lead	P ₁	5.1 ±0.5	3.85 ±0.7	2.6 ±0.7	7.7 ±0.7	5.2 ±0.7	7.8 ±0.7	5.3 ±0.7
Hole centre to component centre	P ₂	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	12.7 ±1.3	12.7 ±1.3	19.05 ±1.3	19.05 ±1.3
Feed hole centre to bottom edge of the component	H _A	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5
Feed hole centre to top edge of the component	H ₁	H+H _{component} < H ₁ 32.25 max.	H+H _{component} < H ₁ 32.25 max.	H+H _{component} < H ₁ 24.5 to 31.5	H+H _{component} < H ₁ 25.0 to 31.5	H+H _{component} < H ₁ 26.0 to 37.0	H+H _{component} < H ₁ 30.0 to 43.0	H+H _{component} < H ₁ 35.0 to 45.0
Lead spacing at upper edge of carrier tape	F	2.5 ±0.5	5.0 ^{+0.8} _{-0.2}	7.5 ±0.8	10.0 ±0.8	15 ±0.8	22.5 ±0.8	27.5 ±0.8
Lead diameter	d	0.4 ±0.05	0.5 ±0.05	*0.5 ±0.05 or 0.6 ^{+0.05} _{-0.05}	*0.5 ±0.05 or 0.6 ^{+0.05} _{-0.05}	0.8 ^{+0.08} _{-0.05}	0.8 ^{+0.08} _{-0.05}	0.8 ^{+0.08} _{-0.05}
Component alignment	Δh	± 2.0 max.	± 2.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.
Total tape thickness	t	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2
Package (see also page 122)	▲	ROLL/AMMO			AMMO			
		REEL ø 360 max. ø 30 +1	B 52 ±2 58 ±2 } depending on comp. dimensions		REEL ø 360 max. ø 30 ±1	52 ±2 58 ±2 or 66 ±2	REEL ø 500 max. ø 25 ±1	54 ±2 60 ±2 66 ±2
Unit		see details page 124.						

▲ Please give „H“ dimensions and desired packaging type when ordering.

Dims in mm.

* Diameter of leads see General Data.

Please clarify customer-specific deviations with the manufacturer.

* PCM 10 and PCM 15 can be crimped to PCM 7.5.

Position of components according to PCM 7.5 sketch 11. P₀ = 12.7 or 15.0 is possible

ประวัติผู้เขียน



นายกีรติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพจากโรงเรียนอาชีวะดอนบอสโก บ้านโป่ง ราชบุรี ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: kiratiwut@hotmail.com



นายปุ่นยวีร์ ทองเขียว เกิดเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพจากโรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์ ช่างกล ชส.ทบ. ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตนนทบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: t_punyavee@hotmail.com



นายพรศักดิ์ สงวน เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพจากวิทยาลัยเทคนิคกาญจนาภิเษก มหานคร ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: p_sangan@hotmail.com



นายศุภวัฒน์ กลั่นเรืองแสง เกิดเมื่อวันที่ 5 เมษายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพจากวิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: vatashi@hotmail.com