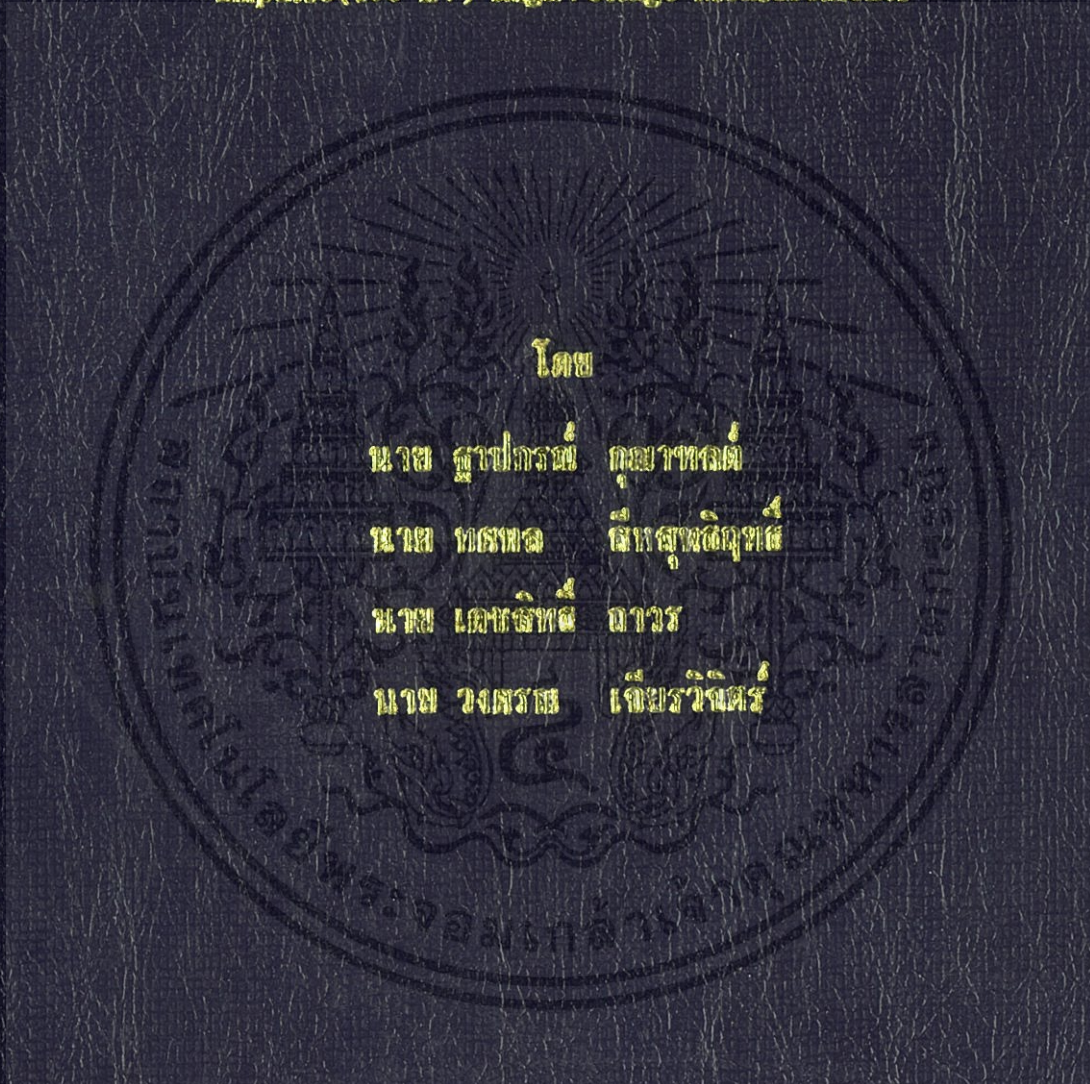


โวลเทจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้กับแรงดันสูงกระแสตรง,  
กระแสตรง และแรงดันคลื่นพัลส์ ถึง 200 kV

The Universal Voltage Divider for the AC(200 kV), DC(200 kV) and  
Impulse(400 kV) High Voltage Measurements



โดย

นาย สุภาพกรณ์ กุฎยาทนต์

นาย ทศพล สีทสุโขทัย

นาย เดชชาติ อาร

นาย วงศธร เตียรวัชร

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของวารสารที่มหาวิทยาลัยสุโขทัยวิทยาการร่วมศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2568

โวลเตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ,  
กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 200 kV

The Universal Voltage Divider for the AC(200 kV), DC(200 kV) and  
Impulse(400 kV) HighVoltage Measurements



T121617



เลขหมู่.....**121617**  
เลขทะเบียน.....  
วัน, เดือน, ปี.....**23 ก.ค. 2555**

b. **12161702**  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ(200 kV),  
กระแสตรง(200 kV) และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด(400 kV)  
The Universal Voltage Divider for the AC(200 kV), DC(200 kV) and  
Impulse(400 kV) HighVoltage Measurements



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โวลเตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ(200 kV), กระแสตรง  
(200 kV) และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด(400 kV)

ผู้จัดทำ



1. นาย ฐาปกรณ์ กุณาทลต์
2. นาย ทศพล สีหสุทธิฤทธิ์
3. นาย เดชสิทธิ์ ถาวร
4. นาย วงศรณ เจียรวิจิตร

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลเตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ(200 kV),  
กระแสตรง(200 kV) และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด(400 kV)

นาย ฐาปนกรณ์ กุณาทลด์

นาย ทศพล สีหสุทธิฤทธิ์

นาย เดชสิทธิ์ ถาวร

นาย วงศรณ เจียรวิจิตร

ผศ.ดร. เซาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

**บทคัดย่อ**

บทความฉบับนี้เป็นรายงานผลการออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ, กระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้ในตัวเดียวกัน ขนาดพิกัดกรณีใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV แรงดันสูงกระแสตรง 200 kV และวัดแรงดันสูงกระแสสลับ 200 kV ออกแบบโดยใช้เทคนิควงจรร่วม R-C ประกอบด้วยวงจรย่อยที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อแรงดันที่ต้องการวัดแตกต่างกัน ต่อซ้อนเป็นองค์ประกอบรวมภาคแรงสูงและแรงต่ำเดียวกัน ใช้ตัวเก็บประจุย่อยชนิดโพลีโพรพีลีนฟิล์ม และตัวต้านทานย่อยชนิดฟิล์มโลหะต่ออันดับเป็นองค์ประกอบภาคแรงสูงและแรงต่ำ ภาคแรงสูงทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่อฉนวนภายในอัดด้วยฉนวนก๊าซ SF<sub>6</sub> ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกล่องซิลด์เหล็ก การทดสอบและประเมินผลคุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3]

The Universal Voltage Divider for the AC(200 kV), DC(200 kV) and  
Impulse(400 kV) HighVoltage Measurements

Tapakorn Kunaton

Tossapon Srihasutirith

Detchsitz Taworn

Vongsaron Jinvijit

Asst.Prof.Dr. Chow Chompoo-inwai Supervisor

Year 2010

**ABSTRACT**

This paper presents a design and construction of a Universal Voltage Divider (UVD). The rated voltages for measuring of Impulse, DC and AC voltages are 400 kV, 200 kV and 200 kV respectively. The high-voltage part is designed by using common 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 SF<sub>6</sub> insulated gas. The low-voltage part is packed in the shielding box made from metal. The performance of the divider has been checked by calibrating with the reference measuring system. The test procedures are confirmed in according to IEC 60060-2 (1994) standard.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดอกเตอร์เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้ข้อคิดดี ๆ และคำปรึกษาต่าง ๆ รวมถึงสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์และได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขปริญญาบัตรจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดีและดอกเตอร์พีรวัฏมิ ยุทธโกวิท ที่ได้กรุณาติชมและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณปณณยวีร์ ฉายสิริ และพี่ ๆ ป.โท ทุกคน ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลืออีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยดูแลเรื่องการทดสอบแรงดันอิมพัลส์

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เจดดิไวเดอร์	5
2.1 บทนำ	5
2.2 แบบต่าง ๆ ของโวลต์เจดดิไวเดอร์	6
2.2.1 โวลท์เจดดิไวเดอร์แบบความต้านทาน	7
2.2.2 โวลท์เจดดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีซีลด์	8
2.2.3 โวลท์เจดดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	8
2.2.4 โวลท์เจดดิไวเดอร์แบบผสม	10
2.2.5 โวลท์เจดดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่ง	11
2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เจดดิไวเดอร์	12
2.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุและคุณสมบัติ	12
2.3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่	12
2.3.1.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	12
2.3.1.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	13
2.3.1.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค	13
2.3.1.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	14
2.3.1.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลต์ทริก	15

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1.1.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม	16
2.3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดเปลี่ยนค่าได้	17
2.3.1.3 คุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุ	18
2.3.2 ชนิดของตัวต้านทานและคุณสมบัติ	20
2.3.2.1 คาร์บอนรีซิสเตอร์	20
2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	21
2.3.2.3 เม็ดทอลฟิล์มรีซิสเตอร์	21
2.3.2.4 ไวร็วาว์ดรีซิสเตอร์	22
2.3.2.5 ตัวต้านทานแบบตีตะขาบ (DIP) และตัวถังแบบเดี่ยว (SIP)	23
2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistors)	23
2.3.2.7 คุณสมบัติของตัวต้านทานเชิงอุดมคติและเชิงความถี่	24
2.3.3 การฉนวน	24
2.3.3.1 คุณสมบัติของฉนวน	24
2.3.3.2 ชนิดของวัสดุฉนวน	25
2.3.3.2.1 ฉนวนแข็ง	25
2.3.3.2.2 ฉนวนเหลว	26
2.3.3.2.3 ฉนวนก๊าซ	26
2.3.3.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซ	26
2.3.3.2.5 การเสียสภาพการฉนวน	27
2.3.3.3 SF <sub>6</sub> : (Sulphur Hexafluoride)	28
2.3.3.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF <sub>6</sub>	28
2.3.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด	30
2.3.4.1 ผลตอบสนองรูปร่าง	30
2.3.4.2 สเกลแฟกเตอร์ (Scale factor)	36
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์	38
3.1 คุณลักษณะของโวลต์เตจดีไวเดอร์	38
3.2 การออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	38
3.2.1 การออกแบบสร้างภาคแรงสูง	39
3.2.1.1 ค่าวาปไฟตามผิวฉนวน	39
3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน	39
3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ	40

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด	41
3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	42
3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย	42
3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์	43
3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ	44
3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก	44
3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	45
3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	45
3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์	47
3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	55
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าที่ได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์	57
3.5.1 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ	57
3.5.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	58
3.6 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเดอร์ โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics	62
3.6.1 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่พิกัด	63
3.7.1.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV	63
3.7.1.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	64
3.7.1.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV	66
3.6.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบ ความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน	67
3.7.2.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240 kV	67
3.8.2.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV	69
3.7.2.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 480 kV	71
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	73
4.1 บทนำ	
4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ	73
4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	73
4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	74
4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง	74

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง	74
4.3.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์	74
4.4 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	75
4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง	75
4.5 การหาผลตอบสนองรูปขึ้น	75
4.6 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	77
4.7 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	82
4.8 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	91
5.1 สรุปผลการทดลอง	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลโวลท์เตจดีไวเดอร์	5
2.2 วงจรวัตแรงดันอิมพัลส์	6
2.3 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน	7
2.4 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานมีซีลด์	8
2.5 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	9
2.6 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	10
2.7 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	11
2.8 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ	11
2.9 ตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ	12
2.10 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	13
2.11 ตัวเก็บประจุแบบไมกา	13
2.12 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค	14
2.13 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	15
2.14 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ตริก	16
2.15 โครงสร้างและลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม	17
2.16 รูปร่างและสัญลักษณ์ของวาริเอเบิล คาปาซิเตอร์	17
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่	18
2.18 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ ในแต่ละย่านความถี่	19
2.19 คาร์บอนรีซิสเตอร์	20
2.20 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	21
2.21 เม็ททอลฟิล์มรีซิสเตอร์	21
2.22 ไวรร์วาวด์รีซิสเตอร์	22
2.23 ตัวต้านทานชนิดตัวถัง แบบเดี่ยว (SIP)	22
2.24 ตัวต้านทานแบบดินตะขาบ (DIP)	22
2.25 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้	23
2.26 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ	24

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 กลไกการเบรกดาว์นของฉนวนแข็ง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า $E_b$ แปรไปตามช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน	25
2.28 ลักษณะการดิซชาร์จเบรกดาว์นในแก๊ป	27
2.29 โมเลกุลของ $SF_6$	28
2.30 แรงดันเบรกดาว์นของก๊าซ $SF_6$ เมื่อเทียบกับอากาศ และน้ำมันหม้อแปลง	30
2.31 โครงข่ายวงจร 4 ขั้ว ที่เขียนแทนระบบวัด	31
2.32 วงจรวัดผลตอบสนองรูปคลื่นสำหรับระบบวัดแรงดัน	32
2.33 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	34
2.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta$ กับ $T_a/T_x$	35
3.1 ตัวเก็บประจุเดี่ยวแบบทรงกระบอก	39
3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ	40
3.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	41
3.4 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	42
3.5 ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ	46
3.6 การจำลองการสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	47
3.7 โครงสร้างของภาคแรงสูงด้านล่าง	48
3.8 ฉนวนซูฟิลินภายในภาคแรงสูงด้านล่าง	48
3.9 โครงสร้างของตัวนำลูมิเนียภายในภาคแรงสูงด้านล่าง	49
3.10 โครงสร้างและขนาดภายในของภาคแรงต่ำ	50
3.11 โครงสร้างและขนาดของตัวนำภายในภาคแรงต่ำ	51
3.12 โครงสร้างและการจัดวางชุดตัวเก็บประจุและตัวต้านทานในภาคแรงต่ำ	52
3.13 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์	53
3.14 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์	54
3.15 การวิเคราะห์โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์	55
3.16 สายเคเบิลชนิด RG11 A/U	57
3.17 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป	57
3.18 หัวต่อภาคแรงต่ำ	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	59
3.20 วงจรรวมที่ใช้จำลองการทำงานของดวลเตจดีไวเตอร์	62
3.21 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลท์เตจดีไวเตอร์แบบย่อส่วน	63
3.22 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV	64
3.23 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV	64
3.24 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV	65
3.25 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	65
3.26 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	66
3.27 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง 200 kV	66
3.28 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส	
เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV	67
3.29 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV	67
3.30 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV	68
3.31 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240 kV	68
3.32 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240 kV	69
3.33 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์	
เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ 240 kV	69

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.34 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV	70
3.35 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV	71
3.36 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV	71
3.37 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 480 kV	72
3.38 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ 480 kV	72
3.39 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 480 kV	73
3.40 โวลเตจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์	73
4.1 วงจรการหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	74
4.2 รูปกราฟจากวงจรการหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	75
4.3 วงจรการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันสูงกระแสสลับ	76
4.4 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแพกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	77
4.5 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระบบทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัด แรงดันกระแสสลับ	81
4.6 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของ REF. / UCC ที่ระบบทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	81
4.7 รูปวงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	82
4.8 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระบบทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัด แรงดันกระแสตรง	84
4.9 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของ REF. / UCC ที่ระบบทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	84
4.10 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของระบบวัดอิมพัลส์	85
4.11 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของระบบวัดอิมพัลส์	86

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วบวกร จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง	87
4.13 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วบวกร จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง	87
4.14 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วลบ จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง	88
4.15 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วลบ จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง	88
4.16 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วบวกร จากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ	89
4.17 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วบวกร จากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ	89
4.18 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วลบ จากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ	90
4.19 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.56/60 $\mu$ S ชั่วลบ จากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ	90

## สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 71-1	1
1.2 วิธีการดำเนินงาน	3
2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF <sub>6</sub>	29
3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง	38
3.2 คุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U	58
3.3 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ ตามมาตรฐาน IEC 61010-1	59
3.4 คุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV	60
3.5 คุณสมบัติของ FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer	60
3.6 คุณสมบัติของ Probe	61
4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	73
4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	74
4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง	74
4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง	75
4.5 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	79
4.6 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับที่ระดับแรงดัน100kVและ หลังจาก 100kV 15นาที	80
4.7 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	81
4.8 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	83
4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	84

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น การใช้เครื่องมือวัดโดยตรงเป็นเรื่องที่เสี่ยง อันตรายอย่างมาก ซึ่งแตกต่างกับการวัดในระบบแรงดันต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการทราบค่าแรงดันในระบบแรงดันสูง จึงต้องทำการลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลง เพื่อให้ความปลอดภัยกับผู้ทำการวัดและเหมาะสมกับเครื่องมือวัด จึงได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ลดทอนแรงดันสูงที่ต้องการวัดให้มีขนาดต่ำลงให้เหมาะสมกับเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ อุปกรณ์ลดทอนแรงดันสูงที่นิยมใช้ชนิดหนึ่ง คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider) ซึ่งสามารถวัดแรงดันสูงได้เป็นอย่างดี การสร้างอุปกรณ์ลดทอนแรงดันหรือโวลต์เตจดีไวเดอร์ ให้ได้ค่าวัดออกมาที่ถูกต้อง ควรจะต้องเข้าใจในหลักการการทำงานของอุปกรณ์ลดทอน และการออกแบบการสร้างให้มีความสอดคล้องกับมาตรฐานการสร้างเครื่องวัดแรงดัน

โดยใช้ข้อกำหนดของมาตรฐานสากล 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 lightning Withstand Voltage (kV)	40	60	75	95	125	170	250	325

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับวัดด้วยตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทาน
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติโวลต์เตจดีไวเดอร์
3. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์
4. เพื่อรองรับงานการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูง

## 5. เพื่อส่งเสริมให้เกิดพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ด้วยตัวแบ่งแรงดันแบบผสม

2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม FEM ในการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้าบนตัวแบ่งแรงดัน

3) ทำการออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดสูงสุด 200 kV แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัด 200 kV และสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัดสูงสุด 400 kV

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
4. ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
5. วิเคราะห์และปรับปรุงอุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้มาตรฐานและข้อกำหนด
6. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงหรือโวลต์เตจดีไวเดอร์ ที่มีคุณสมบัติในการวัดแรงดันกระแสสลับพิกัดสูงสุด 200 kV แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV และแรงดันอิมพัลส์ พิกัดสูงสุด 400 kV ความผิดพลาด  $\pm 5\%$  และนำมาขอให้คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อใช้เป็นต้นแบบงานวิจัยต่อไป และสามารถนำต้นแบบดังกล่าวมาพัฒนาและออกแบบเพื่อให้สามารถวัดแรงดันที่พิกัดสูงขึ้น และนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 1.2 วิธีการดำเนินงาน

วิธีดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	มีย	กค	สค	กย	ตค	พย	ธค	มค	กพ	
1. ศึกษา ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม	←-----→									
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม	←-----→									
3. ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและจำลอง		←-----→								
4. ออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม					←-----→					
5. ทำการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม และ นำผลที่ได้ไปปรับปรุงแก้ไขและสรุปผลการทดสอบ						←-----→				
6. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									←-----→	

### 1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโวลท์เตจดีไวเดอร์ในประเทศไทย มีหลายงานวิจัยแต่ส่วนมากจะเป็นงานวิจัยโวลท์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยที่จะป็นงานวิจัยโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์

1. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลท์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญานิพนธ์ดุษฎีของคุณ วรา จุห้อง ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.

2. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงสูงแบบตัวต้านทานขนาด 100 kV ปริญญานิพนธ์ของคุณอาทร ภาษี และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2547.

3. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลท์เตจดีไวเดอร์อ้าวงขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญานิพนธ์ดุษฎีของคุณอรณพ ลิมส์มาร์ตัน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

4. การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์ขนาด 1000 kV วิทยานิพนธ์ ปรินญาบัณฑิตของคุณประเสริฐ รั้งสีโสภณอาภรณ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

5. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์ขนาด 400 kV แบบตัวเก็บ ประจุมี่ความต้านทานหน่วง วิทยานิพนธ์ปรินญาบัณฑิตของคุณไพศาล จิรานันตรัตน์ บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

6. โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุมี่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 300 kV ของคุณปรินญา ชมลิน, คุณพีรวิฑู ุฑทโกวิท, คุณนเรศเรษฐ พัฒนเดช และคณะ การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.

7. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสมขนาด 300 kV ปรินญา นิพนธ์ของคุณสุชาติ มณฑปใหญ่ และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

8. โวลต์เตจติไวเตอร์แบบวงจรร่วมราคาประหยัดสำหรับใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ขนาด 100 kV ของคุณรัชกร ปานหอทอง, คุณศรา วุฒิ คลีสุวรรณ และคุณธีรธรรม บุญยะกุล การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.

9. โวลต์เตจติไวเตอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงแรงดันกระแสสลับ, แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ของคุณไชยพร หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

## บทที่ 2

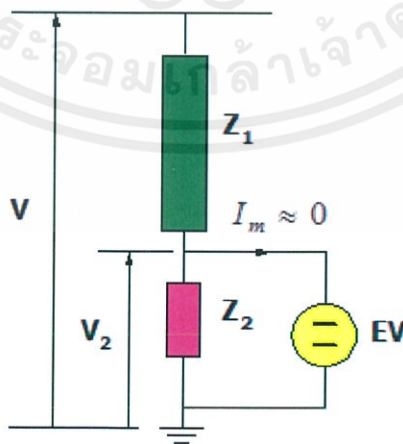
### ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจติไวเตอร์

#### 2.1 บทนำ

การวัดแรงดันสูงนอกจากกระยะระหว่างผู้วัดและอุปกรณ์วัดที่ปลอดภัยโดยอาศัยหลักการฉนวนที่ถูกต้องแล้ว การวัดแรงดันสูงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วย ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่สำคัญได้แก่ ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชีตความสามารถของเครื่องวัด ความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดแรงดันอิมพัลส์

เทคนิคการวัดแรงดันสูง [2] ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันอิมพัลส์นี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรง นั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และในระบบส่งจ่ายจำหน่าย

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่ใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์สองชุดต่อกันอยู่คือ ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง ( $Z_1$ ) ของโวลต์เตจติไวเตอร์นั้นจะรับแรงดันแทบทั้งหมดตกคร่อมตัวมัน อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ( $Z_2$ ) จะเป็นส่วนแรงดันตกคร่อมเข้าเครื่องมือวัด ปกติปลายด้านบนของโวลต์เตจติไวเตอร์เป็นขั้วต่อแรงดันสูง ส่วนปลายด้านล่างของโวลต์เตจติไวเตอร์เป็นศักย์ดิน ตัวประกอบวงจรทั้งสองภาคของโวลต์เตจติไวเตอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่าง โวลต์เตจติไวเตอร์จะได้อัปเดตตามตัวประกอบวงจรและลักษณะการจัดวางตัวประกอบ วงจรเหล่านั้น คือ โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสมตามลำดับ [3]



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเตอร์

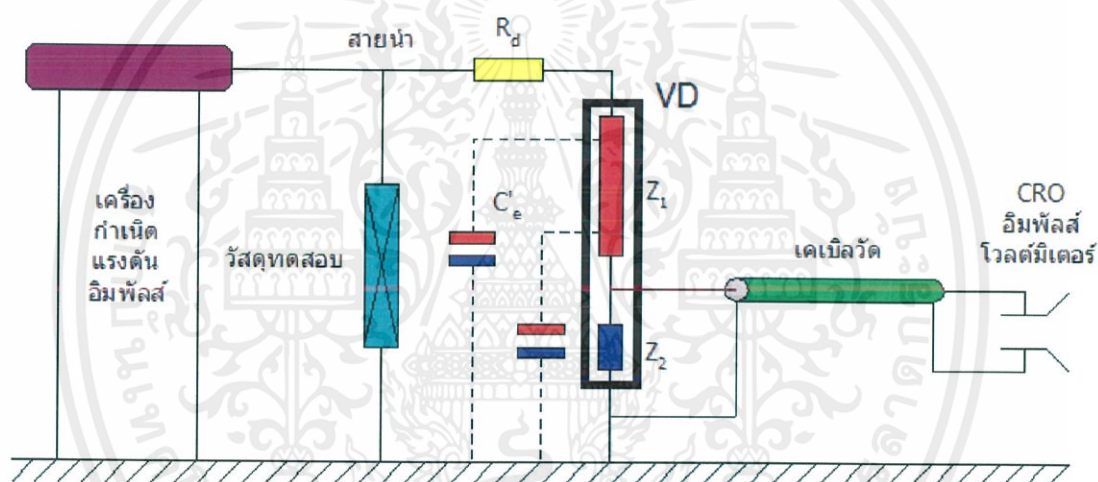
## 2.2 แบบต่าง ๆ ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ [3-4]

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แรงดันกระแสสลับ
2. แรงดันกระแสตรง
3. แรงดันอิมพัลส์

ซึ่งการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลท์เตจดีไวเดอร์ [2] เป็นการวัดที่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นอุปกรณ์วัดด้านแรงดันต่ำ

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



รูปที่ 2.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

$R_d$  คือ ความต้านทานหน่วงสายนำไฟฟ้าแรงดันสูง

VD คือ โวลท์เตจดีไวเดอร์

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิดสามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้ดังนี้

(ก) แบบความต้านทาน (Resistor voltage divider)

(ข) แบบความต้านทานมีชีลด์ (Shielded resistor voltage divider)

(ค) แบบตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capcitor voltage divider)

(ง) แบบผสม (Mixed voltage divider)

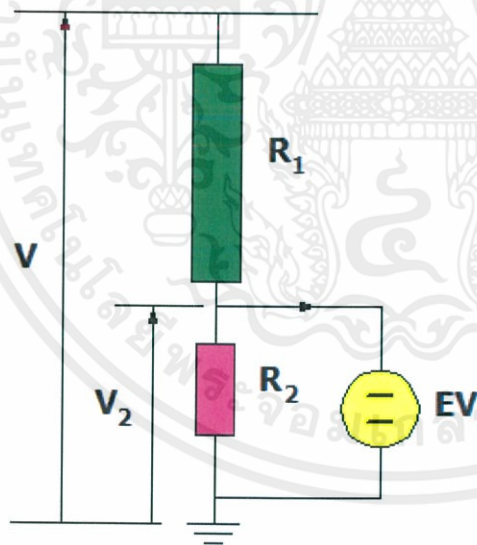
(จ) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitor voltage divider)

### 2.2.1 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน คือ โวลต์เตจติไวเตอร์ที่อิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดพันให้เกิดความเหนียวแน่นต่ำ แห่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้วัดแรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่า 100 กิโลโวลต์ เหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัดแรงดันสูงอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจากความจุสเตรย์ลงดิน จึงนิยมใช้วัดไม่เกิน 2,300 กิโลโวลต์

ความถูกต้องในการวัดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันต่ำคร่อมความต้านทานของภาคแรงต่ำซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง เช่นโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสรั่วไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้แรงดันสูงเกินไป นั่นคือ  $I \geq 0.1$  มิลลิแอมป์,  $R \leq 10$  เมกกะโอห์ม/กิโลโวลต์



ก)



ข)

รูปที่ 2.3 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน

ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์

เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง

$R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

ข) โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน (Haefely)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 โวลท์เตจดีไวเตอร์แบบความต้านทานมีซีลด์

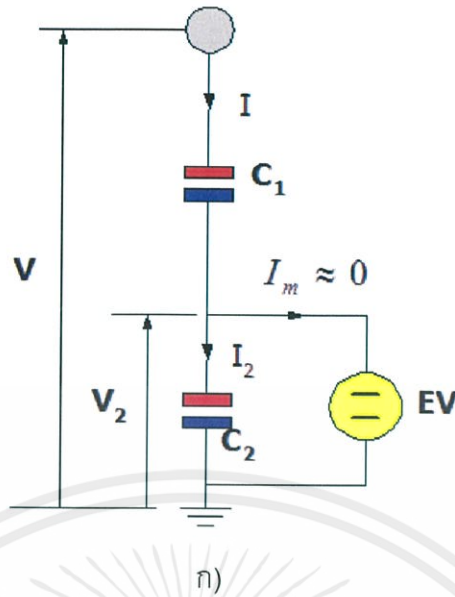
โวลท์เตจดีไวเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะสมบัติความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองรูปขึ้นได้ต่างๆ กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของซีลด์อิเล็กทรอนิกส์โทรต และขึ้นอยู่กับ การออกแบบความต้านทานในภาคแรงสูงให้เป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด เมื่อความสูงของ โวลท์เตจดีไวเตอร์มากขึ้นอาจใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์โทรต หลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มี ส่วนหนึ่งส่วนใดต่อกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไป โวลท์เตจดีไวเตอร์ขนาดต่ำกว่า 500 กิโลโวลท์ ใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์โทรตอันเดียวติดตั้งตอนบนก็เพียงพอ



รูปที่ 2.4 โวลท์เตจดีไวเตอร์แบบตัวต้านทานมีซีลด์

### 2.2.3 โวลท์เตจดีไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลท์เตจดีไวเตอร์แบบนี้มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำเป็นแบบตัว เก็บประจุดังรูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุย้อยหรือตัวเก็บประจุ เต็มวงก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุย้อยจะใช้ตัวเก็บประจุย้อยมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าความเก็บ ประจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุย้อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมันหรือแบบเซรามิค เป็นต้น ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเต็มวงจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบอัดความดัน มีโครงสร้าง อิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ก๊าซอัดความดันที่ใช้ อาจเป็น ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไนโตรเจน หรือ ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ( $\text{SF}_6$ ) ซึ่งจะให้ ได้ ผลตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ ใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับและ แรงดันอิมพัลส์



### รูปที่ 2.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

ก) วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเตอร์

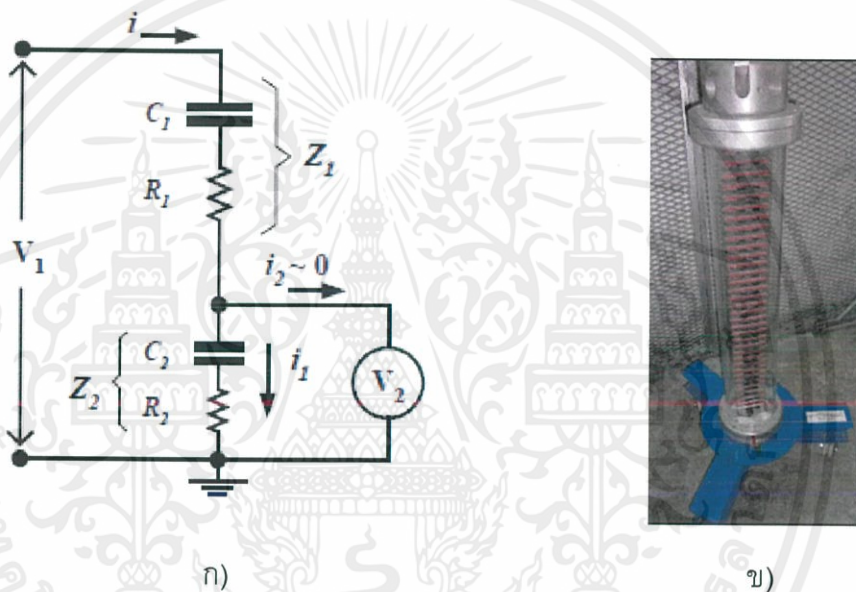
เมื่อ  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

$C_2$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ข) โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

### 2.2.4 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้ได้ดัดแปลงมาจากโวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจุย่อยขนานเข้าไปกับความต้านทานเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้น เมื่อตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่าของความจุสเตรย์ลงดิน และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้เหมาะสมสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป วงจรทั่วไปของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์

เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง

$C_1$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยขนานในภาคแรงสูง

$R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

$C_2$  คือ ตัวเก็บประจุขนานในภาคแรงต่ำ

ข) โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

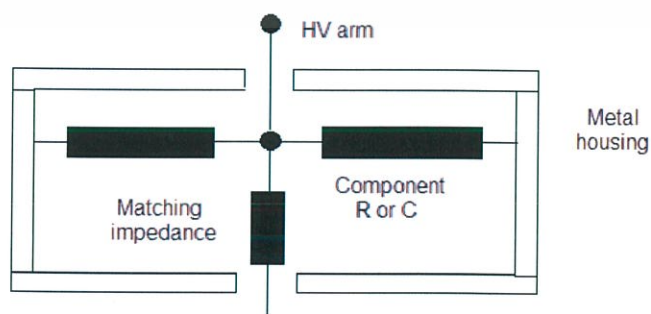
## 2.2.5 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ ประกอบด้วย ความต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.7 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวของโวลท์เตจดีไวเดอร์ ถ้าเลือกใช้ตัวต้านทานที่เหมาะสม โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดี แม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 2.7 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

เนื่องจากโวลท์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องมีเวลาตอบสนองที่ไว การที่มีความเหนี่ยวนำแฝงในระบบวัดโดยเฉพาะภาคแรงต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่ง การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้มีความเหนี่ยวนำน้อยที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้มีความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนี่ยวนำได้ แสดงดังรูปที่ 2.8



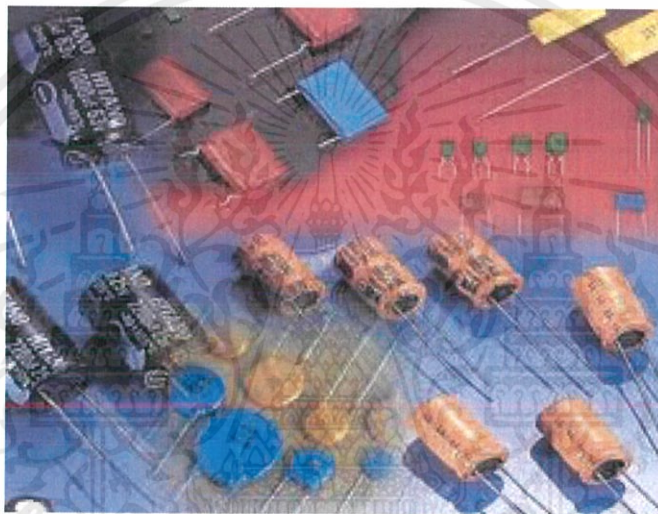
รูปที่ 2.8 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลต์เตจดีไวเดอร์

โวลต์เตจดีไวเดอร์จะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกันซึ่งเราจะเรียกชื่อของโวลต์เตจดีไวเดอร์แต่ละชนิด ตามลักษณะการต่ออุปกรณ์ภายในโวลต์เตจดีไวเดอร์ภายในอิมพีแดนซ์ ซึ่งการสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์จำเป็นต้องทราบรายละเอียดและคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ การฉนวน เป็นต้น

### 2.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุและคุณสมบัติ [6-7]



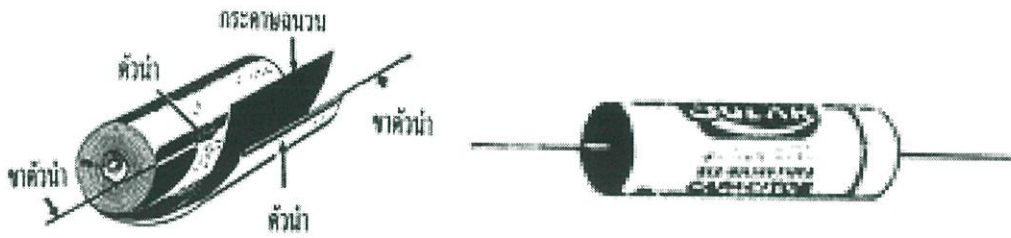
รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ

#### 2.3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่

เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าคงที่ได้ โดยมากจะเรียกชื่อตามชนิดของไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

##### 2.3.1.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบซีฟี่เป็นตัวไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นตัวนำที่ยาวมากเพื่อให้เกิดความจุตามต้องการแล้วทำการม้วนให้เป็นทรงกระบอก ตัวเก็บประจุแบบกระดาษจะมีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด ถึง 1 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดันไฟสูงประมาณ 200 – 1600 V<sub>DC</sub>



ก. โครงสร้างคาปาซิเตอร์แบบกระดาด

ข. รูปร่างของคาปาซิเตอร์แบบกระดาด

รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบกระดาด

## 2.3.1.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไมก้าเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งจะเป็ฉนวนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และถือเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุด ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าประมาณ 1 พิโคฟารัด – 0.1 ไมโครฟารัด อัตราทนกำลังไฟประมาณ 100 – 2500 V<sub>DC</sub>



ก. โครงสร้างคาปาซิเตอร์แบบไมก้า

ข. รูปร่างของคาปาซิเตอร์แบบไมก้า

รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

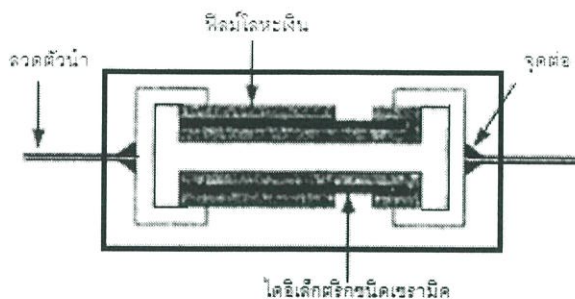
ตัวเก็บประจุชนิดไมก้ายังแบ่งออกตามชนิดของแผ่นตัวนำที่นำมาใช้มีอยู่ 2 ชนิดคือ

1. แบบโลหะฟอยล์ จะใช้แผ่นฟิล์มของโลหะบาง ๆ ทำเป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุซึ่งจะเป็นแบบที่เรียกว่าไมก้าก้อน

2. แบบซิลเวอร์ไมก้า ประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กตริก ซึ่งทำมาจากโลหะเงินบริสุทธิ์ฉาบลงบนแผ่นไมก้า เพื่อจะทำให้คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบนี้ดีขึ้น

## 2.3.1.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไดอิเล็กตริกที่ทำมาจากกระเบื้องดินเผา หรือที่เรียกว่าเซรามิก แล้วเคลือบผิวเซรามิกด้วยเงินเพื่อใช้แทนเป็นแผ่นตัวนำทำให้มีความจุสูงขึ้น ซึ่งจะมีค่าความจุระหว่าง 1 พิโคฟารัด – 2.2 ไมโครฟารัด มีอัตราทนไฟตั้งแต่ 3.3 – 600 V<sub>DC</sub>



ก. โครงสร้างคาปาซิเตอร์แบบเซรามิก



ข. รูปร่างของคาปาซิเตอร์แบบเซรามิก  
รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

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

#### 2.3.1.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

ตัวเก็บประจุนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมากแต่จะใช้ไดอิเล็กตริกประเภทฟิล์มพลาสติก (Plastic film) ส่วนไดอิเล็กตริกจะเป็นอลูมิเนียมแบบแผ่น หรืออลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นฟิล์ม ลักษณะมิติของตัวเก็บประจุนี้นี้มีหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน การแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุแบบฟิล์มแบ่งตามชนิดสารไดอิเล็กตริกได้ดังนี้

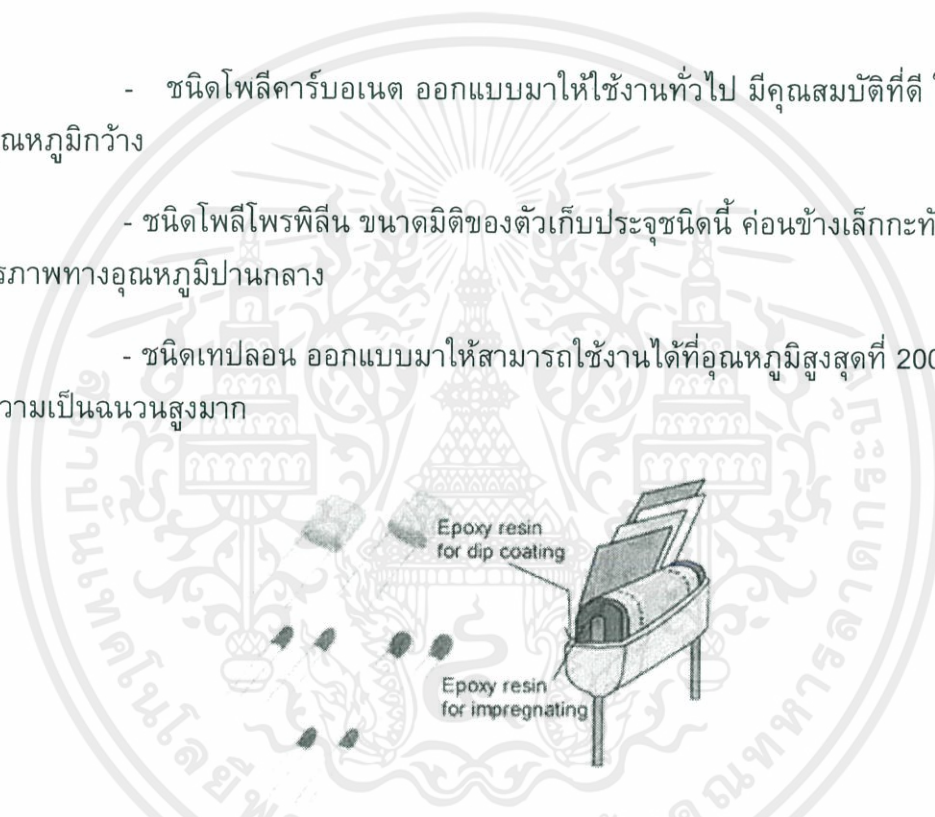
- ชนิดโพลีเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKT ออกแบบมาใช้งานในย่านอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง แต่มีข้อจำกัดตรงที่ต้องทำงาน ณ อุณหภูมิที่ระบุไว้เท่านั้น คุณสมบัติตัวเก็บประจุจะยังคงเดิมตามพิกัดที่ระบุ มีค่าความจุ 0.001 – 100 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดันถึง 1500 V<sub>DC</sub>

- ชนิดโพลีสไตรีนคาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKS ออกแบบมาใช้งานกับแรงดันต่ำที่อุณหภูมिन้อยกว่า 100 °C โพลีสไตรีนมีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีเยี่ยมแต่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีขนาดโตกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่นที่พิกัดความจุไฟฟ้าเดียวกัน ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุ 10 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดันถึง 1000 VDC

- ชนิดโพลีคาร์บอเนต ออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติที่ดี ใช้งานในย่านอุณหภูมิกว้าง

- ชนิดโพลีโพรพิลีน ขนาดมิติของตัวเก็บประจุชนิดนี้ ค่อนข้างเล็กกะทัดรัดมีค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิปานกลาง

- ชนิดเทปลอน ออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 200 °C และมีค่าความเป็นฉนวนสูงมาก



รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

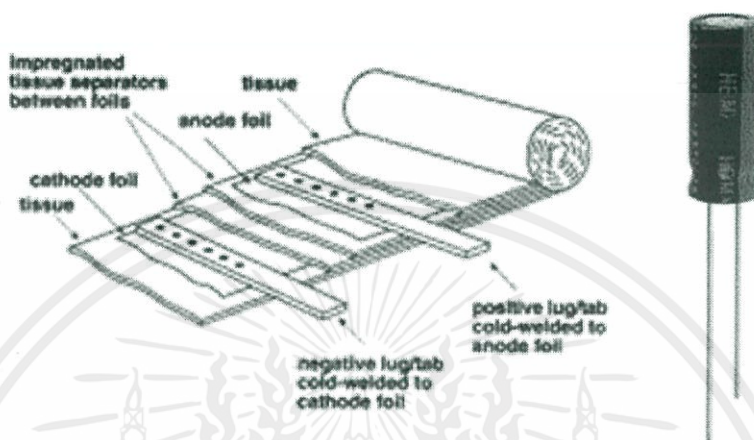
ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มนี้จะไม่มีส่วนในการใช้งาน และความต้านทานของฉนวนมีค่าสูง จึงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุเนื่องมาจากอุณหภูมिन้อยที่สุด ใช้กับวงจรความถี่สูงได้ดี วงจรตั้งเวลา วงจรอินทิเกรท แต่ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีราคาแพง

#### 2.3.1.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลต์

บางที่เรียกว่าอลูมิเนียมอิเล็กโตรไลต์คาปาซิเตอร์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นโลหะทำเป็นขั้วบวก จุ่มอยู่ตรงกลางของน้ำยาเคมี หรือสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้สารละลายพวก Ethylene, Glycol, Glycerine, Boric Acid, Liquid Ammonia และอื่นๆ ที่อยู่ในสภาพของเหลวชั้น ที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกโลหะ เมื่อป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ โดยป้อนไฟบวกเข้าที่แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นขั้วบวก และไฟลบเข้าที่ขั้วลบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทริก จะปรากฏผลว่ามีการแยกตัวทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้ขั้วบวกเกิดอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก เกิดขึ้นรอบๆ แผ่นบวกนี้ โดยมีมันจะเป็นไดอิเล็กตริกที่บางที่สุดที่กั้นระหว่าง แผ่นตัวนำบวกและลบสามารถทำให้ตัวเก็บประจุสะสมประจุได้



รูปที่ 2.14 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ทริก

นอกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทริกที่เป็นของเหลวชั้นที่นำมาทำตัวเก็บประจุแบบนี้หรือที่เรียกว่า ชนิดอิเล็กโทรไลต์เปียก เรายังสามารถใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นมากคล้ายแป้งเปียกมาทำตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์แบบแห้งได้

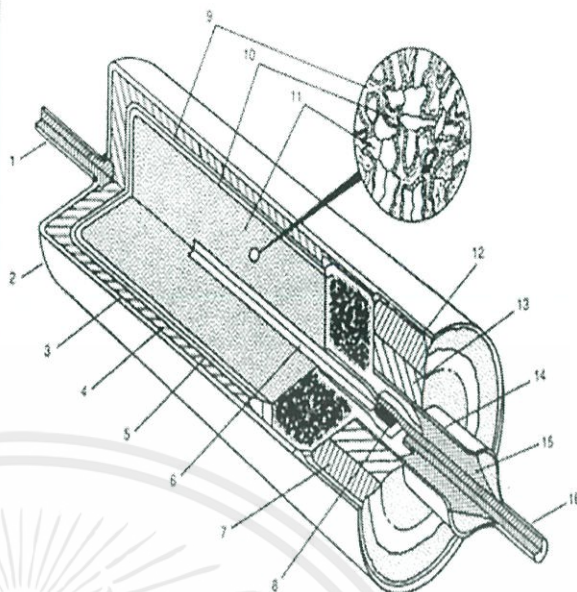
ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์จะมีค่าความจุตั้งแต่ 1 ไมโครฟารัดขึ้นไปจนถึง 0.1 ฟารัด แรงดันใช้งานสูงถึง 500 โวลท์ ข้อดีของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือ มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -20 ถึง +100% และมีกระแสรั่วไหลสูง มักนิยมใช้กับงานที่ความถี่ต่ำ เช่น วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

#### 2.3.1.1.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้สารแทนทาลัม ทำเป็นขั้วบวกแทนอลูมิเนียม ส่วนสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทำเป็นไดอิเล็กตริกนั้น จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบโซลิดอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใช้  $MnO_2$  และแบบซัลฟูริคแอซิด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์ทริกแล้วปรากฏว่ามีคุณสมบัติการรั่วไหลของกระแส และคุณสมบัติทางความถี่ คุณสมบัติทางอุณหภูมิดีกว่า จึงนิยมใช้กับวงจรกำจัดสัญญาณรบกวน วงจรฟิลเตอร์

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

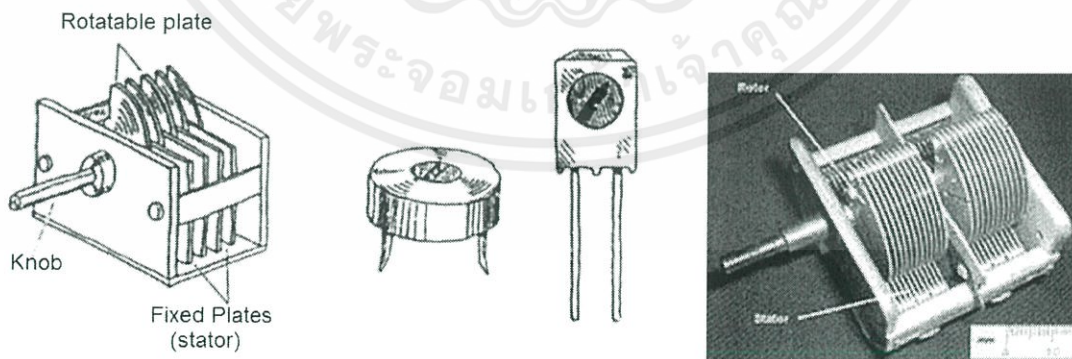
Number	Name	Material
1	Cathode	Ni
2	Case can	Sn-Pb plated brass
3	Solder	High temperature
4	Silver coating	Silver suspension
5	Carbon coating	Colloidal carbon
6	Anode stem	Tantalum wire
7,13,14	Header	Hermetic seal glass
8	Stem to lead weld	
9	Oxidizer Surface	MnO <sub>2</sub>
10	Dielectric film	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
11	Tantalum anode	Sintered Ta
12	Solder seal	Sn-Pb solder
15	Eyelet seal	SB-5
16	Anode	Ni



รูปที่ 2.15 โครงสร้างและลักษณะของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

2.3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดเปลี่ยนค่าได้

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 ชุด หรือที่เรียกว่าแก๊งค์ คือ ชุดแผ่นโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้เรียกว่าโรเตอร์ และแผ่นโลหะที่ยึดติดอยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ โดยทั่วไปแล้วสเตเตอร์จะมีจำนวนแผ่นมากกว่าโรเตอร์อยู่ 1 แผ่น ฉนวนที่ใช้กันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองจะใช้อากาศเป็นอเล็กทริก ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อเราหมุนแกนโรเตอร์ โดยถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองวางขนานกันมากที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าสูง และถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองแผ่นวางชันกันน้อยที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุก็จะน้อยตามไปด้วย ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความจุประมาณ 10 – 400 พิโคฟารัด



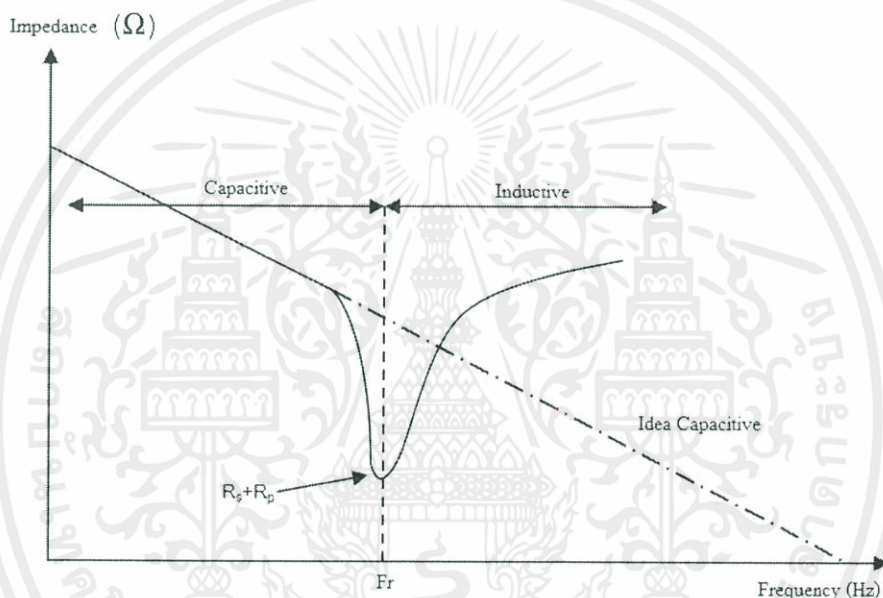
รูปที่ 2.16 รูปร่างและสัญลักษณ์ของวาริเอเบิล คาปาซิเตอร์

### การตรวจวัดตัวเก็บประจุ

การวัดตัวเก็บประจุโดยใช้มัลติมิเตอร์โดยจะต้องตั้งให้มิเตอร์อยู่ในย่านการวัดของ โอห์มมิเตอร์ แล้วเลือกใช้สเกลตามค่าความจุของตัวเก็บประจูดังต่อไปนี้

- 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 จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์แฉงมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่า 300 พิโคฟารัด (ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุชนิดเดียวกัน) อนึ่งตัวเก็บประจุ หากนำมาใช้งานที่ความถี่ 250 เมกกะเฮิรตซ์ จะมีค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุเป็นตามสมการพื้นฐาน คือ

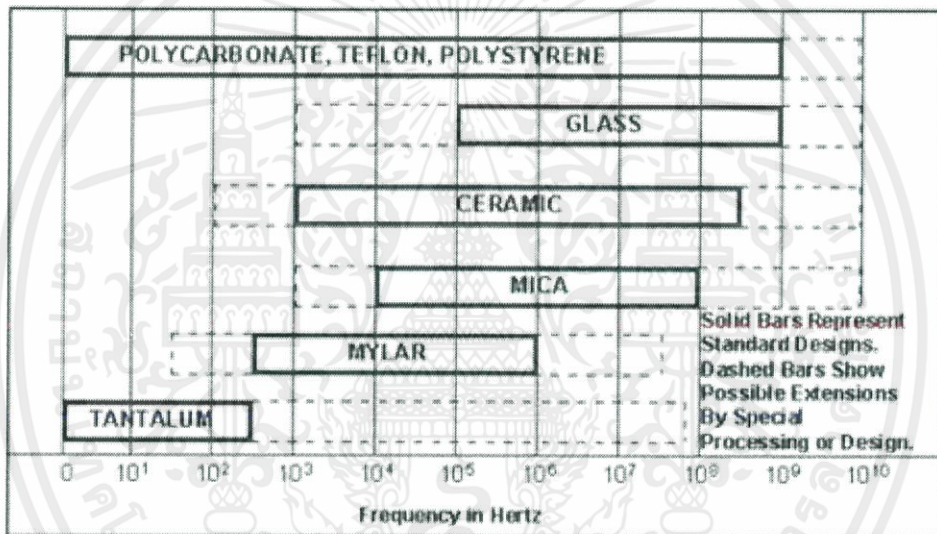
$$X_C = \frac{1}{\omega c} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $X_C$  แทนค่ารีแอกแตนซ์ : โอห์ม ( $\Omega$ )

$\omega$  แทนค่าความถี่เชิงมุม : เรเดียนต่อวินาที (rad/s)

$C$  แทนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ : ฟารัด (F)

สำหรับวงจรความถี่สูงนั้น มักจะใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุเบี่ยงที่มีค่าความเก็บประจุอยู่ในช่วงพิโคฟารัด และไม่ใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูง เนื่องจากต้องการให้ค่ารีแอกแตนซ์มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการออกแบบหรือการเลือกใช้อุปกรณ์ สำหรับใช้งานในย่านวีเอชเอฟหรือสูงกว่านั้นควรใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) ในการตรวจสอบเนื่องจากจะให้ค่าที่ถูกต้องและเชื่อถือได้มากที่สุด



รูปที่ 2.18 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในแต่ละย่านความถี่

จากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุที่ใช้ได้ดี ในช่วงความถี่ที่มากกว่า 100 เมกกะเฮิร์ตซ์ มีอยู่ 5 แบบด้วยกัน คือ ไมก้า เซรามิก โพลีสไตรีน โพลีโพลีไธน และโพลีคาร์บอนเนตซึ่งตัวเก็บประจุทั้ง 5 ชนิดนี้ ที่นิยมใช้เซรามิกกันมากเพราะราคาถูกและมีเสถียรภาพที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพอประมาณ คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $k$ ) ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกซึ่งมากเท่าไรก็จะทำให้คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุแยกลงเท่านั้น

โดยตัวเก็บประจุที่มี ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นดีกว่า ตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกปานกลางและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงที่ตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกปานกลางจะมีเสถียรภาพปานกลาง ส่วนตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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)

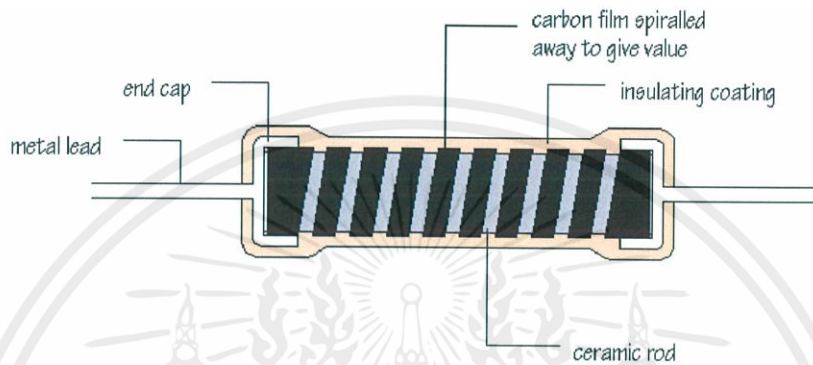
เป็นความต้านทานที่มีความน่าเชื่อถือสูง มีราคาต่ำ ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่า 1 โอห์ม – 22 เมกกะโอห์ม ความผิดพลาด 3%-20% พิกัดกำลัง 0.125 – 2 วัตต์ สัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ (TC) มีค่าประมาณ 0.1%/°C ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 160 °C ใช้งานได้ดีในย่าน 0 ถึง 60 °C โดยที่ TC ละเลยได้สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นจากตัวต้านทานชนิดนี้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.19 คาร์บอนรีซิสเตอร์

### 2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์ (Carbon-Film Resistor)

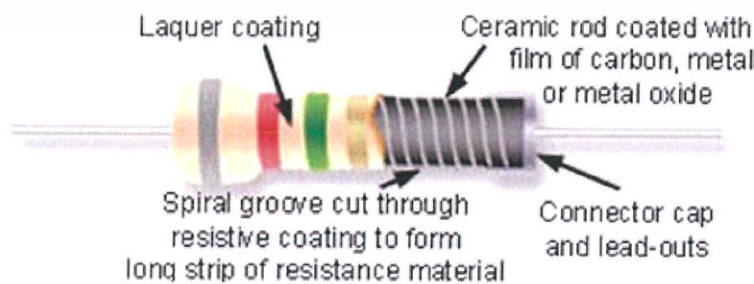
มีค่าความต้านสูงมาก พิกัด 10 - 100 เมกกะโอห์ม มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ ค่าความคลาดเคลื่อน 0.5% ขึ้นไป ที่พิกัดน้อยกว่า 100 กิโลโอห์ม มีการสร้างสัญญาณรบกวนน้อยแต่มีราคาแพง ความต้านทานชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงบางครั้ง จะต้องมีการคิดผลการชดเชยอุณหภูมิด้วยไม่สามารถทนต่อแรงดันกระชากในช่วงสั้นๆ และมีอัตราทนกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1 - 10 วัตต์



รูปที่ 2.20 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์

### 2.3.2.3 เมทัลฟิล์มรีซิสเตอร์ (Metal-Film Resistor)

เป็นความต้านทานใช้งานที่ต้องการสัญญาณรบกวนต่ำ พิกัด 0.1 โอห์ม - 1.5 เมกกะโอห์ม การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำ (0.0001%/°C) สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นมีค่าน้อยมาก พิกัดกำลัง 0.1-1 วัตต์ ความคลาดเคลื่อน 0.1 - 2% แต่มีราคาแพง



รูปที่ 2.21 เมทัลฟิล์มรีซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

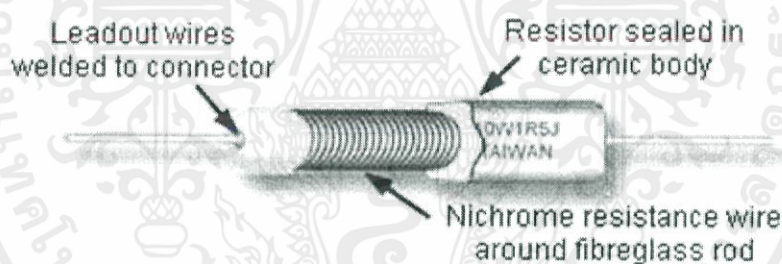
### 2.3.2.4 ไวร้รวาวตรีซีสเตอร์ (Wirewound Resistors)

ไวร้รวาวตรีซีสเตอร์ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภทคือ แบบมีกำลังสูง, ความถูกต้องสูงและแบบใช้งานทั่วไป ปกติแล้วตัวต้านทานแบบไวร้รวาวตรีซีสเตอร์ จะมีค่าอินดักแตนซ์สูง แต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวต้านทานแบบไวร้รวาวตรีซีสเตอร์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ คือแบบไบฟิลลา (Bifilar wound Resistor) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวต้านทานไวร้รวาวตรีซีสเตอร์แบบไร้ความเหนี่ยวนำ (non-inductive wirewound resistor)

1) แบบมีกำลังสูง มีพิกัด 1 โอห์ม – 100 กิโลโอห์ม พิกัดกำลัง 5 – 200 วัตต์ มีค่าความผิดพลาด 5 – 10 % นำไปใช้งานประเภทเครื่องเสียงต่อร่วมกับทรานซิสเตอร์

2) แบบมีความถูกต้องสูง สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมีค่าต่ำมีเสถียรภาพสูงมากๆ โดยทั่วไป อยู่ในช่วงย่านความถูกต้อง 1 % การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำ 0.0005%/°C ความต้านทานอยู่ในช่วง 1 โอห์ม – 100 กิโลโอห์มใช้งานประเภทที่มีความเที่ยงตรงสูง พิกัดกำลัง 0.25 – 1 วัตต์ โดยที่พิกัด 3, 5, 10, 25 วัตต์ ยังสามารถหาซื้อได้

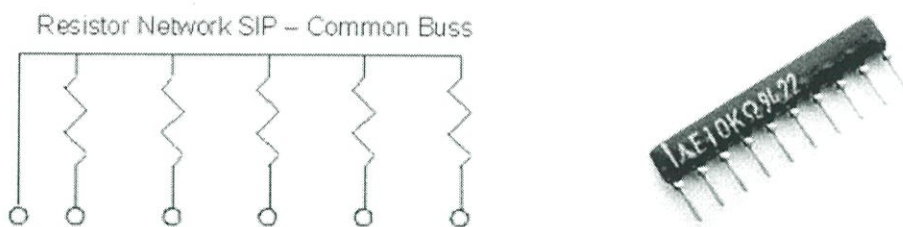
3) แบบทั่วๆไป ช่วง 1/4 โอห์ม ถึง 10 กิโลโอห์ม พิกัดกำลัง 0.5, 1 และ 3 วัตต์ ความต้านทานแบบเดียวกับความต้านทานแบบคาร์บอน ค่าเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ



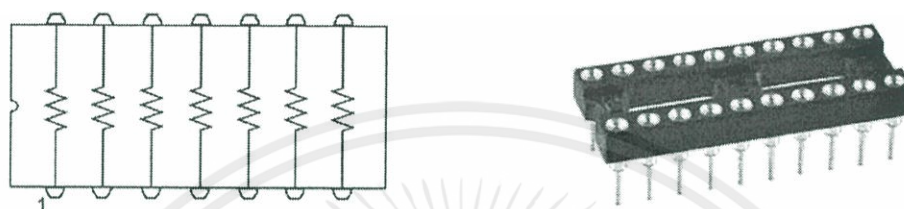
รูปที่ 2.22 ไวร้รวาวตรีซีสเตอร์

### 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



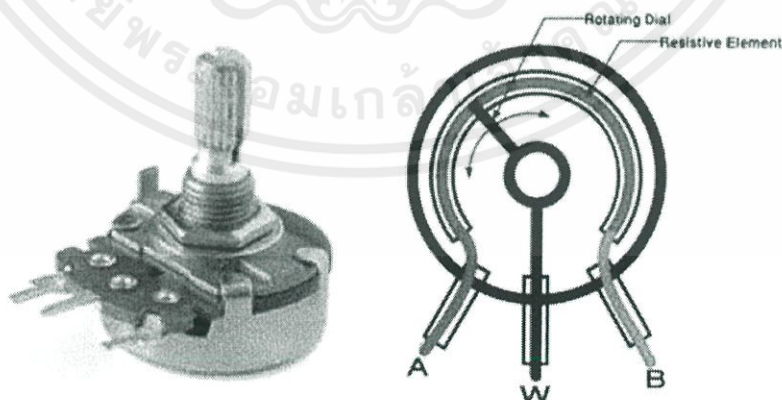
รูปที่ 2.23 ตัวต้านทานชนิดตัวถัง แบบเดี่ยว (SIP)



รูปที่ 2.24 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)

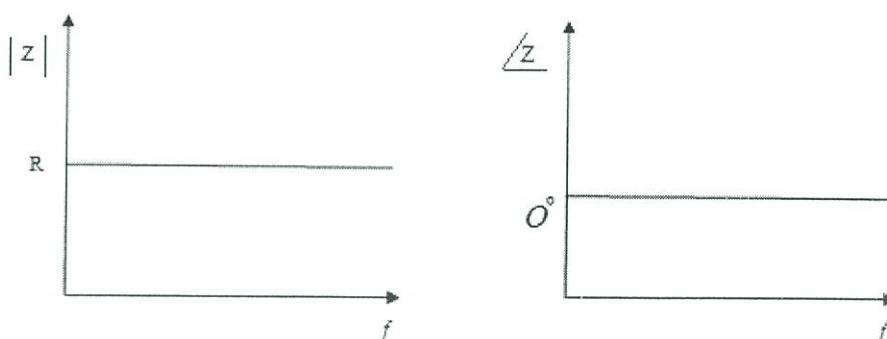
### 2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistors)

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



รูปที่ 2.25 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้

### 2.3.2.7 คุณสมบัติของตัวต้านทานเชิงอุดมคติและเชิงความถี่



รูปที่ 2.26 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ

### 2.3.3 การฉนวน [2,8]

การฉนวนหมายถึง การใช้วัสดุเป็นฉนวนมาคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำที่มีแรงดันกับดิน และยังทำหน้าที่รับแรงทางกลช่วยระบายความร้อน การฉนวนซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ของระบบ

#### 2.3.3.1 คุณสมบัติของฉนวน

วัสดุฉนวนที่ดีจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

##### 1) คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

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

2) คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูง เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องรองรับน้ำหนักแรงกดแรงบิดหรือแรงดึง

3) คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อน และช่วยระบายความร้อนได้ดีไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

4) มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ไม่เป็นพิษ แม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

5) ทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมันไม่ดูดซึมความชื้นและทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

### 2.3.3.2 ชนิดของวัสดุฉนวน

การฉนวนที่ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงแบ่งตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

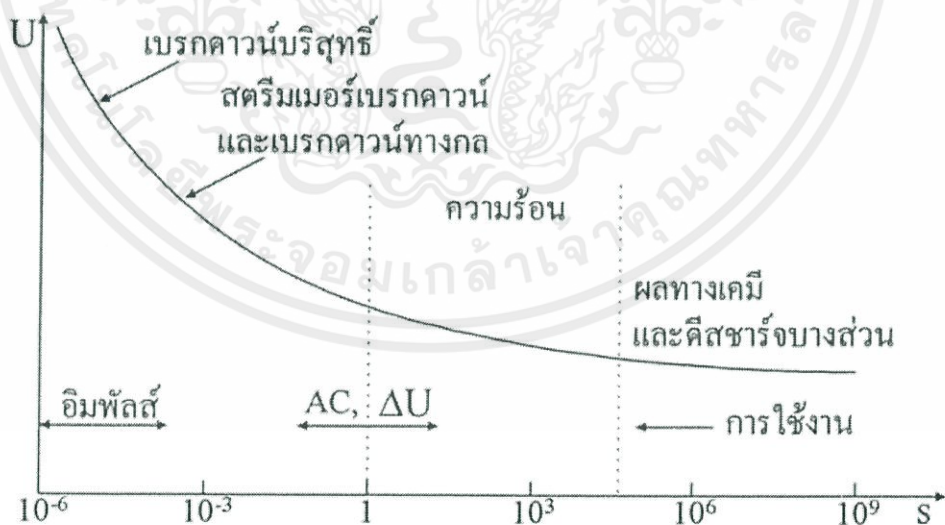
- 1) ฉนวนแข็ง
- 2) ฉนวนเหลว
- 3) ฉนวนก๊าซ

#### 2.3.3.2.1 ฉนวนแข็ง

ในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบร่วมกับฉนวนเหลวหรือก๊าซ เพื่อทำหน้าที่ยึดและรองรับแรงทางกล ฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวนหรือเจาะผ่านแล้วจะเสียสภาพโดยสมบูรณ์และระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้ทั่วไปได้แก่ กระจก กระจกอัด ยาง ไมก้า แก้ว เซรามิก หรือ พอร์เลน พลาสติก เมกะไลต์ คาสท์เรซิ่น ไฟเบอร์ โยแก้ว พีวีซี พีอี (PE) ครอสลิงค์ (XLPE)

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็ง

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



รูปที่ 2.27 กลไกการเบรกดาวนของฉนวนแข็ง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน

### 2.3.3.2.2 ฉนวนเหลว

จะมีน้ำหนักและความหนาแน่นมากกว่าแก๊ซ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแก๊ซ ที่ความดันบรรยากาศเดียวกัน วัตความดันไม่ได้ใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึมและช่วยระบายความร้อนได้ดี เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ผ่านจะทำให้เสียสภาพความเป็นฉนวนชั่วคราว เมื่อเวลาผ่านไปก็สามารถกลับสู่สภาพการฉนวนได้ดีอีก แต่คุณภาพอาจต่ำลง มีความไวต่อสิ่งเจือปน ตัวอย่างฉนวนเหลวที่ใช้กันก็คือ น้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว

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

### 2.3.3.2.3 ฉนวนก๊าซ

เป็นสารที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึมและระบายความร้อน คุณสมบัติก๊าซในแง่ของฉนวนก็คือ สามารถกลับคืนสู่สภาพความเป็นฉนวนได้อีกอย่างรวดเร็วหลังจากเกิดเบรกดาวน์ หรือเสียสภาพการฉนวนชั่วคราว ตัวอย่างก๊าซที่ใช้กันมากในการเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ อากาศ ใช้เป็นฉนวนภายนอกของอุปกรณ์ ก๊าซไนโตรเจนในอุปกรณ์ไฟฟ้า และก๊าซ SF<sub>6</sub> ใช้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบ GIS

### 2.3.3.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซ [8]

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกับก๊าซในสนามไฟฟ้า จะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน คือ

- 1) ความคงทน ต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ฉะนั้นการระบายความร้อนจึงอาจช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ส่วนกรณีของก๊าซนั้นอาจทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่น ก็คือ การเพิ่มความดันก๊าซ
- 2) ฉนวนแข็งและฉนวนเหลวจะมีลักษณะสมบัติที่ต่างกับของก๊าซอย่างเด่นชัดประการหนึ่งก็คือ อายุหรือความแก่ (Ageing) ซึ่งหมายถึงว่าเมื่อใช้งานไปนานๆ เป็นปี ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลง
- 3) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งและฉนวนเหลว เมื่อได้รับแรงดันกระแสดตรงจะมีค่าสูงกว่าเมื่อรับแรงดันกระแสดลัด แม้จะคิดเทียบที่ค่ายอดก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 4) ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสดลัดซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวคิดเป็นค่าอาร์เอ็มเอส แต่ในกรณีของก๊าซจะเกิดเบรกดาวน์ที่ค่ายอดเสมอ







5) ขีดความสามารถการใช้เป็นฉนวนของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวกำหนดด้วยพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิ

6) อายุการใช้งานของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับอย่างมากกับดิสชาร์จบางส่วน (PD) ซึ่งเป็นผลเพิ่มพลังงานสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม และเป็นผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำลง อายุการใช้งานก็จะสั้นลงและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนได้

### 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

ลักษณะในแก๊ป	สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย	สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง
ลักษณะดิสชาร์จที่ $U_i$	 No discharge	 No discharge	 PD
ลักษณะเบรกดาวนสมบูรณ์ $U_b$	 เบรกดาวนโดยตรง	 เบรกดาวนโดยตรง	 เบรกดาวนแบบโคโรนา
ค่าแรงดันเบรกดาวน $U_b$ หรือโคโรนาเริ่มเกิด $U_i$	$U_b = E_b \times d$	$U_b = E_b \times d \times \eta^*$	$U_i = E_i \times d \times \eta^*$ $U_b > U_i$

รูปที่ 2.28 ลักษณะการดิสชาร์จเบรกดาวนในแก๊ป

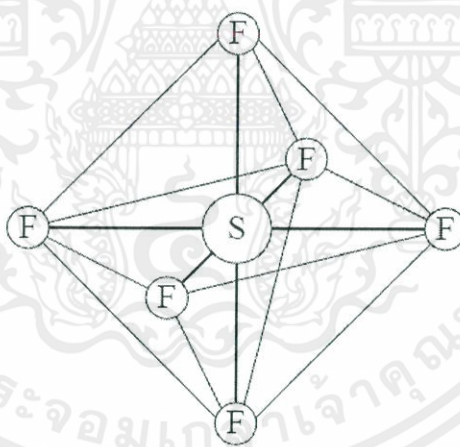
### 2.3.3.3 SF<sub>6</sub> : (Sulphur Hexafluoride) [9]

SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนประเภทฉนวนก๊าซ ปัจจุบันก๊าซ SF<sub>6</sub> ได้รับความสนใจและมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีแห่งการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพราะ SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าดีเป็นเลิศ ทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวนด้วยก๊าซอัดชนิดอื่นๆ มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี

การเลือกใช้ก๊าซเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับแพกเตอร์ต่างๆ หลายประการที่สำคัญ คือต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ที่ความดันไม่สูงนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและถ่ายเทความร้อนดี ลักษณะคุณสมบัติดังกล่าว จะเห็น SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติครบถ้วน

#### 2.3.3.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF<sub>6</sub>

ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นสารประกอบของเทคโนโลยีอะตอมมิคโมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีน ดังรูปที่ 2.29 เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ติดไฟ เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500 °C ภายในถังที่ปิดมิดชิดปราศจากออกซิเจนและความชื้น คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF<sub>6</sub> สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

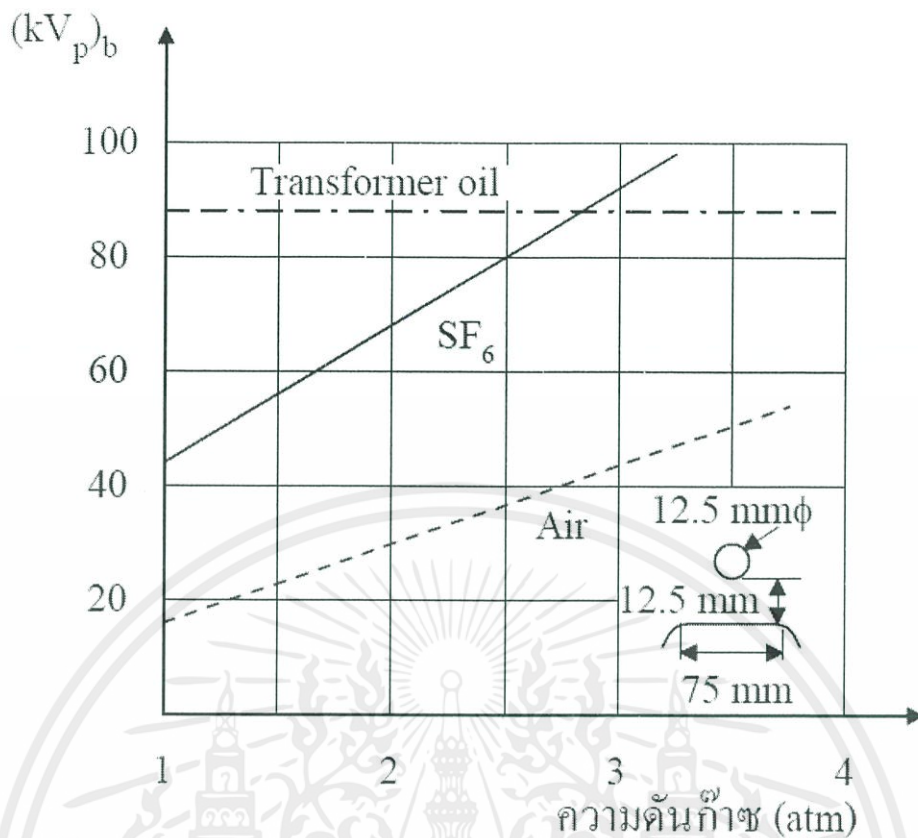


รูปที่ 2.29 โมเลกุลของ SF<sub>6</sub>

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF<sub>6</sub>

น้ำหนักโมเลกุล	146.054
ความดันขณะเป็นไอที่ 70 °F, 1 atm	320 psig
ปริมาตรจำเพาะที่ 70 °F, 1 atm	25 ft <sup>3</sup> /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 <sup>2</sup> 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

ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีความหนาแน่น หนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบัน จึงทำให้ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนกัน เช่น อากาศหรือไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ก๊าซ SF<sub>6</sub> จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่า ของอากาศและจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่าๆ กับน้ำมันหม้อแปลง เมื่อ SF<sub>6</sub> มีความดันอัดประมาณ 3 bar (1 bar = 750 mmHg)



รูปที่ 2.30 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF<sub>6</sub> เมื่อเทียบกับอากาศ และน้ำมันหม้อแปลง

### 2.3.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

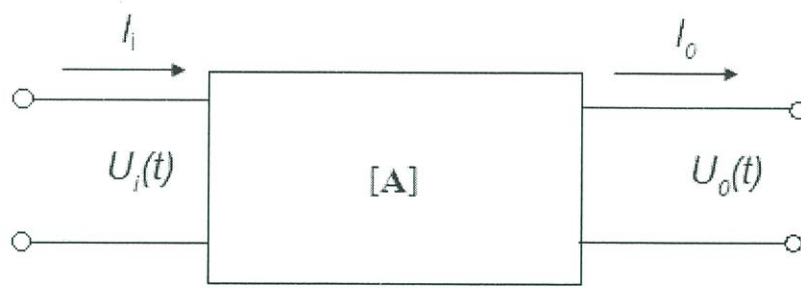
เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ

- 1) ผลตอบสนองรูปขึ้น
- 2) สเกลแฟกเตอร์

#### 2.3.4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (Transfer characteristic) ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดียิ่งขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลต์เตจดีไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยระบบโครงข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงข่ายวงจร 4 ขั้ว ที่เขียนแทนระบบวัต

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออก ในเชิงความถี่สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

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

เมื่อ  $s$  คือ ตัวแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

ในกรณีที่  $I_o = 0$  จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ได้เป็นค่า

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

ค่า  $H(s)$  จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ที่ความถี่ต่างๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป  $\pm 3$  dB เรียกว่า ความถี่จำกัด (limit frequency) [6] ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนเนออร์มัลไลซ์ (Normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (2.4)$$

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

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

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่จะได้สามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกเมื่อ ทราบแรงดันขาเข้า  $V_i(t)$  ใดๆ ได้จาก [5]

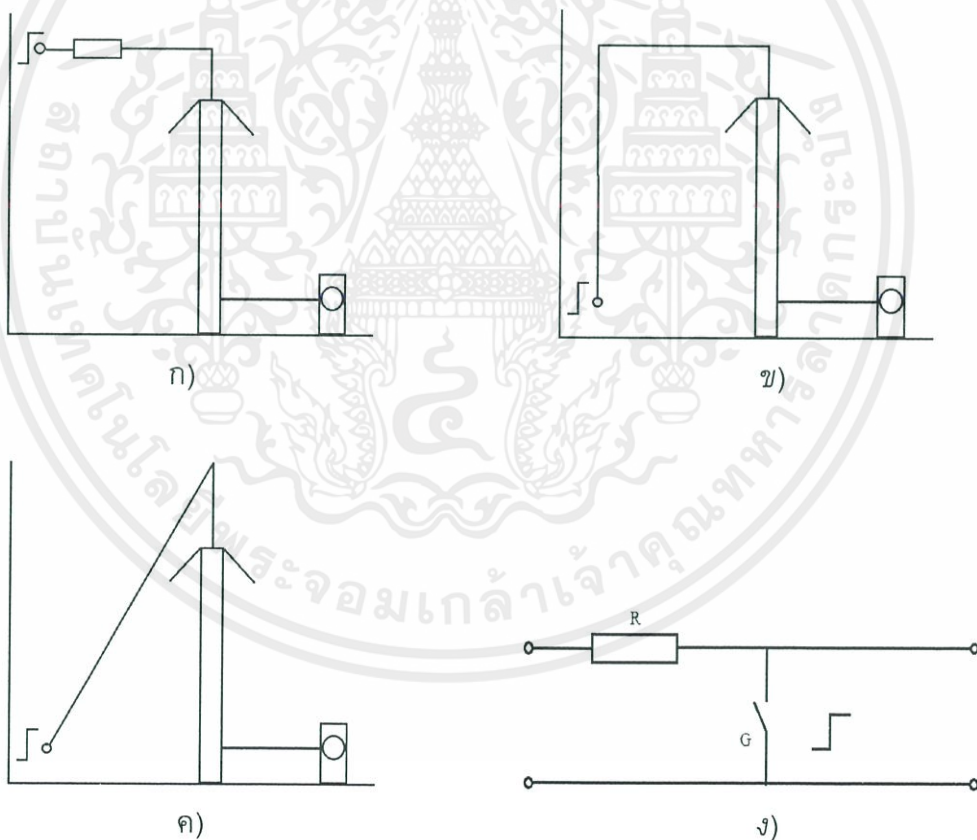
$$V_0(t) = \int_0^t V'_i(t - \tau) \cdot G(\tau) \cdot d\tau \quad (2.6)$$

เมื่อ  $V'_i(t - \tau)$  คืออนุพันธ์ของ  $V_i(t - \tau)$  เมื่อเทียบกับ  $\tau$

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนออร์มัลไลซ์  
ดังแสดงในสมการ

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

โดยวงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน โดย G คือแกปสร้างแรงดันรูปขึ้น

วงจรมีมาตรฐานแนะนำไว้คือ วงจรในรูปที่ 2.32 ก) และพารามิเตอร์ตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น มาตรฐานได้กำหนดนิยามไว้ดังนี้

1. พารามิเตอร์ผลตอบสนอง (*response parameter*) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีที่กำหนด

2. จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น (*virtual origin of step response,  $O_1$* ) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทับกับส่วนชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านเส้นที่เกิดการแกว่ง และใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

3. ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (*normalized step response,  $g(t)$* ) หมายถึง ผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.33 ก)

4. อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (*step response integral*) หมายถึง อินทิกรัลจาก  $O_1$  ถึง  $t$  ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น  $g(t)$  (ดูรูปที่ 2.33 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,  $T_\alpha$* ) หมายถึงค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

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,  $\beta$* ) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์  $g(t)$  ที่เกินหนึ่งหน่วย

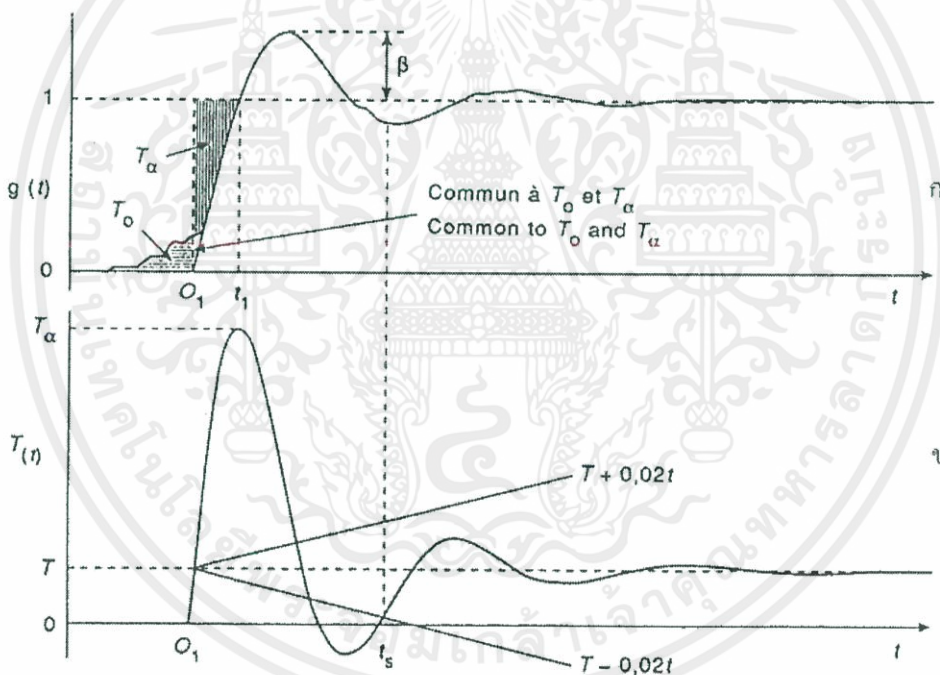
9. เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (*initial distortion time,  $T_0$* ) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์  $g(t)$  และเส้นตรงที่ใช้  $O_1$

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

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

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ [10]

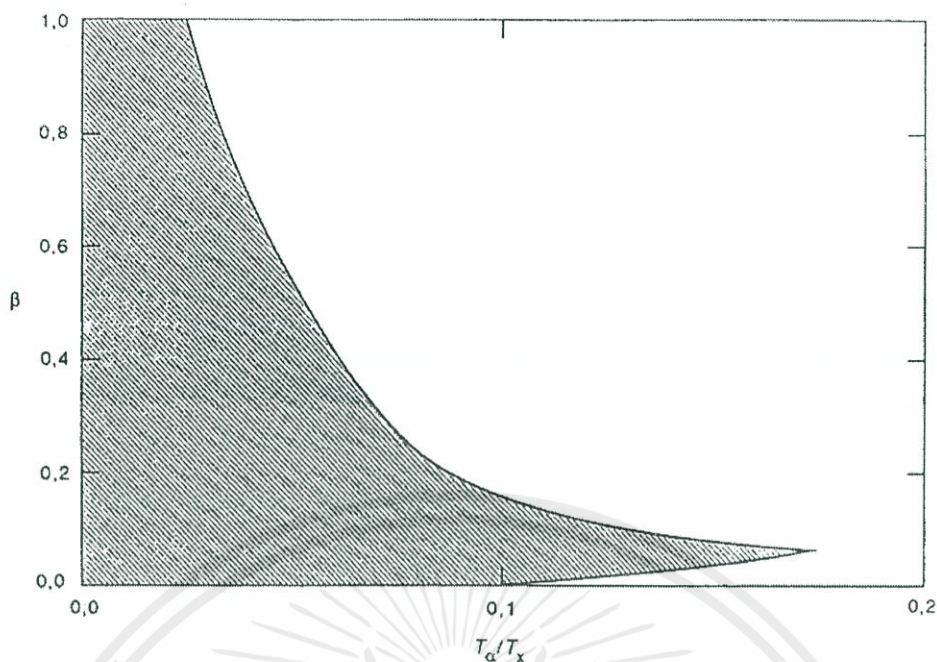
ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ที่ค่าเวลาหน้าคลื่น  $T_1$  ส่วนฟูงเกิน  $\beta$  และเวลาตอบสนองบางส่วน  $T_\alpha$  ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า  $T_\alpha / T_1$  จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรงเงาของรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [10]

ก) เมื่อเทียบกับ  $g(t)$

ข) เมื่อเทียบกับ  $T(t)$



รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha/T_x$  [10]

โดยที่  $T_x$  คือ เวลาค้นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์คลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาค้นตัด  $T_c$   
พารามิเตอร์ผลตอบแทนควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

$$T_\alpha - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$$

- เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวควรมีค่า

$$T_s \leq T_e$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \leq 0.005T_e$$

### 2.3.4.2 สเกลแฟกเตอร์ (Scale factor)

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [3] ใต้นิยามไว้ ดังนี้

“สเกลแฟกเตอร์” หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

#### 1) ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน  $\pm 3\%$

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

#### 2) ความมีเสถียรภาพ (Stability)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลง ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้า ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 3\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน สเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงที่หัวออกของสายนำแรงสูงต่อแรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด นั่นคือ

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

เมื่อ	a	คือ	สเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์
	$V_1$	คือ	แรงดันที่ปลายขาออกของสายนำแรงสูง
	$V_2$	คือ	แรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด

สเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบใด ๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

- ก) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด
- ข) เทียบกับโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันที่แน่นอนแล้ว
- ค) เทียบกับแกปทรงกลม

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

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจดีไวเดอร์จากการทดลองนั้น ถ้าทำการทดลองในสถานที่ต่าง ๆ กันค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันที่ได้อาจมีค่าต่างกันไปเพราะค่าอัตราส่วนแรงดันขึ้นอยู่กับค่าความจุสเตรลงดินของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ดังนั้นการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งซึ่งจะติดตั้งโวลต์เตจดีไวเดอร์ในการใช้งานจริง



### บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์

### 3.1 คุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างเป็นโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุและตัวต้านทานสามารถใช้วัตต์แรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานในตัวเดียวกัน โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60060-2(1994) [3] กำหนด ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลต์เตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเหตุที่ใช้เป็นแบบผสม เพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองดีขึ้น และค่าที่ของเวลาภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน ซึ่งเหมาะสมสำหรับวัตต์แรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง

ชนิดของแรงดันที่ต้องการวัด	พิกัดสูงสุดที่ต้องการออกแบบสร้าง
แรงดันสูงกระแสสลับ	200 kV <sub>rms</sub>
แรงดันสูงกระแสตรง	200 kV <sub>rms</sub>
แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน	400 kV <sub>p</sub>

โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นลักษณะโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ องค์ประกอบภาคแรงสูง และองค์ประกอบภาคแรงต่ำ โดยผ่านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการวัดหาค่าแรงดันผ่านภาคแรงสูง ซึ่งในส่วนนี้จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าน้อยลงเพื่อส่งผ่านแรงดันที่ได้ไปยังภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ในส่วนของภาคแรงต่ำจะมีการลดระดับแรงดันที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้ได้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่จะนำไปต่อร่วมกับโวลต์เตจดีไวเดอร์เพื่อวัดค่าแรงดันด้านออกของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เช่น ออสซิลโลสโคป หรือ โวลต์มิเตอร์ เป็นต้น

### 3.2 การออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม

โวลต์เตจดีไวเดอร์ลักษณะดังกล่าวนี้ เป็นการนำตัวเก็บประจุย่อยมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าตัวเก็บประจุตามต้องการโดยมีตัวต้านทานต่อขนานในแต่ละชั้นและระหว่างชั้น อัดอากาศ ที่ความดัน 3 bar โดยไม่เกิดโคโรนาระหว่างอิเล็กโทรด

### 3.2.1 การออกแบบสร้างภาคแรงสูง

#### 3.2.1.1 ค่าวาวไฟตามผิวฉนวน [2-6]

ความยาวท่ออะคลีลิกกำหนดด้วยระยะวาวไฟตามผิวฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของท่ออะคลีลิก ในกรณีแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะใช้ระยะวาวไฟตามผิวมีค่าอย่างน้อย

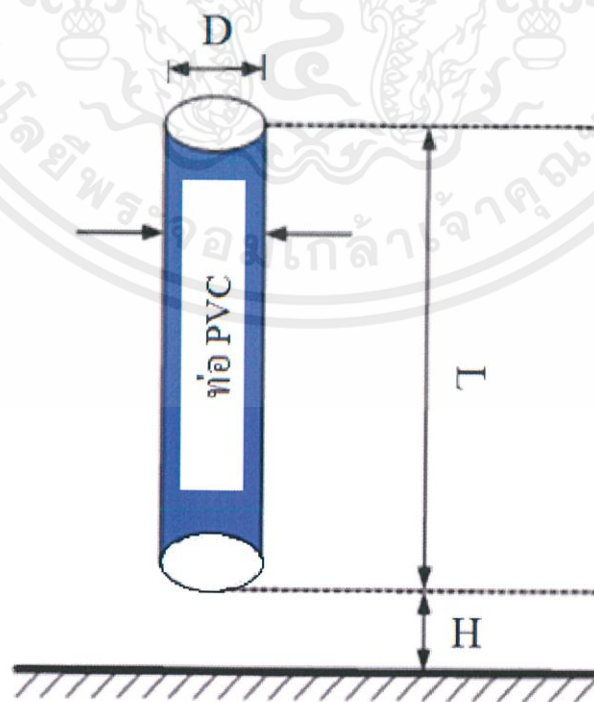
$$2.5 \text{ m} / 1 \text{ MV}$$

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันอิมพัลส์พิกัดเท่ากับ 400 kV ดังนั้นระยะวาวไฟตามผิว ควรมีค่าน้อยเท่ากับ 0.25 เมตร ซึ่งในกรณีนี้ออกแบบท่อที่มีความยาว 1 เมตร เนื่องจากในท่อดังกล่าวระยะความยาวท่อ ( $l$ ) จะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ

#### 3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน

ความจุสเตรย์ลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือ ค่าความจุสเตรย์ลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงสูงเป็นตัวเก็บประจูง่าย เมื่อบรรจุอยู่ในท่ออะคลีลิกก็สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอกดังรูปที่ 3.1 ค่าความจุสเตรย์หาได้จาก

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



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุเดี่ยวแบบทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อพีวีซีที่เลือกใช้มีความยาว ( $l$ ) ของท่อที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 1.85 เมตร ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $d$ ) เท่ากับ 30 เซนติเมตร มีความสูงวัดจากพื้นดิน ( $h$ ) เท่ากับ 20 เซนติเมตร นำมาแทนในสมการจะได้

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

$$= \frac{1.029179 \times 10^{-10}}{2.075358}$$

$$= 49.590 \text{ pF}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณเท่ากับ 49.590 pF

### 3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypropylene Film) มีขนาดความจุ 0.022  $\mu\text{F}$  พิกัด 800 V<sub>DC</sub> /400 V<sub>AC</sub> โดยที่จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งสิ้นจำนวน 500 ตัว

เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่จะวัด

ที่ 1.1 เท่า หรือ 110 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน 550 ตัว

คิดเผื่อความปลอดภัย

ที่ 1.3 เท่า หรือ 130 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน 649 ตัว

จึงเลือกใช้จำนวน 649 ตัว ชั้นละ 11 ตัว จำนวน 59 ชั้น ที่ความปลอดภัย 1.3 หรือ 130 % และในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุควรมีค่าให้มากกว่าค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณ 3 เท่า หรือมากกว่า ในที่นี้ค่าความจุสเตรย์ลงดินมีค่าเท่ากับ 49.590 pF เมื่อนำมาตัวเก็บประจุจำนวน 649 ตัว มาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 339 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์มาก โดยที่มีกระแสที่พิกัดแรงดัน 0.44 mA

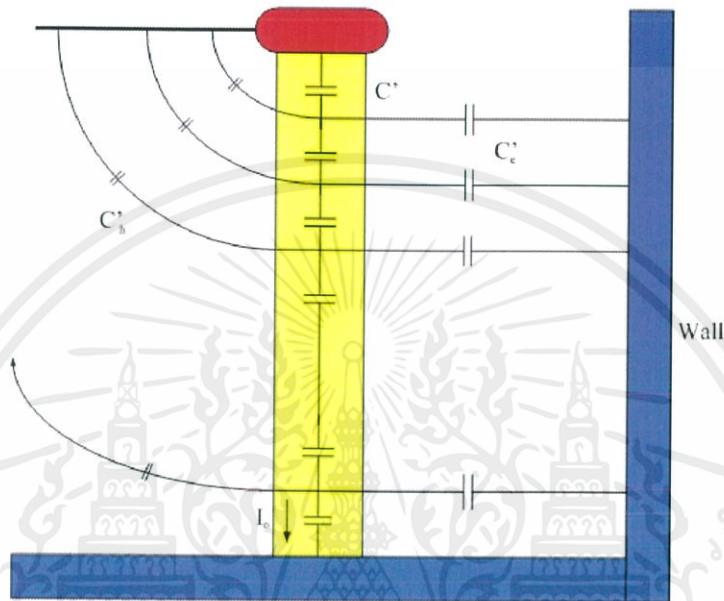


รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยบนตัวบนว่าสามารถทนแรงดัน เมื่อ โวลต์เตจดีไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) โดยต้องคำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Withstand test ที่ 110 % หรือ 1.1 เท่า



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

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

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C_e' + C_h')}{C_{1'}}} \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $U$  = แรงดันคงทนได้ = 220 kV  
 $C$  = ค่าของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว =  $2.20 \times 10^{-7}$   
 $C_e$  = ค่าความจุสเตรย์ =  $49.590 \times 10^{-12}$   
 $n$  = จำนวนตัวเก็บประจุ = 649  
 $k$  = ชั้นที่ 1  
 $C_e' = C_e/n = 7.64 \times 10^{-14}$   
 $C_1' = C_1/n = 3.39 \times 10^{-10}$   
 $C_h' = 0$

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C_e' + C_h')}{C_{1'}}} = 0.014834$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันสูงกระแสตรง

ตัวความต้านทานภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเตอร์ที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง ตามมาตรฐานกำหนดให้  $R \leq 10 \text{ M}\Omega/\text{kV}$ ,  $1 \text{ mA} \geq I \geq 0.1 \text{ mA}$  โดยเราใช้ตัวต้านทาน ชนิดคาร์บอนฟิล์ม ขนาด  $10 \text{ M}\Omega$  มาต่อขนานกับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยใช้ตัวต้านทาน จำนวน 236 ตัว มาต่อขนานแล้วอนุกรมจนได้ความต้านทาน  $10 \text{ M}\Omega$  ต่อชั้น จะได้ R รวมทั้งหมด  $590 \text{ M}\Omega$  ซึ่งจะได้

$$R = 590\text{M}\Omega/200\text{kV}_{\text{dc}} = 2.95\text{k}\Omega/\text{kV}_{\text{dc}}$$

$$I = 200\text{kV}/590\text{M}\Omega = 0.34\text{mA}$$

จากที่คำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานและกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันสูงกระแสตรง

### 3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย

จากการต่อตัวต้านทานจะเกิดค่าสูญเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

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

ค่าสูญเสียความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ  $40\text{W}$  เป็นค่าการสูญเสียรวมทั้งหมด เมื่อหาที่แต่ละชั้นได้เท่ากับ  $40/25 = 1.6\text{W}$  กำหนดให้ใช้ตัวต้านทานที่มีพิกัด  $3\text{W}$  ต่อชั้น

### 3.2.1.7 ตัวต้านทานห้วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตัวต้านทานห้วงภาคแรงสูงจะต้องกระจายตลอดภาคแรงสูงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดจากเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในสายตัวนำแรงสูงและตัวเก็บประจุภาคแรงสูง การต่อตัวต้านทานกระจายนี้ยังสามารถช่วยหน่วงการแกว่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลท์เตจดีไวเดอร์เองได้ดีกว่าการต่อความต้านทานห้วงภายนอกโวลท์เตจดีไวเดอร์ อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีการแกว่งของระบบวัดเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายตัวนำซึ่งจะต้องมีความต้านทานภายนอกซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำต่อ เพื่อหน่วงการแกว่งดังกล่าว ความต้านทานห้วงภาคแรงสูงหาได้จากสมการ (3.5)

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

ปกติค่าความต้านทานห้วงภาคแรงสูงที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 500 ถึง 1,000 โอห์ม [11,6] และไม่ควรรอบนอกแบบให้มีค่าความต้านทานสูงมากจนเกินไป เพราะจะทำให้ค่าเวลาตอบสนองมีค่ามากเกินไป ขณะเดียวกันจะต้องมีความต้านทานไม่ต่ำมากนัก เพราะจะไม่สามารถหน่วงการแกว่งของรูปคลื่นได้เพียงพอ การหาค่าตัวต้านทานจากสมการ (3.5) จะต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำของโวลท์เตจดีไวเดอร์ก่อนจึงทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ โดยทำการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูงทั้งหมดให้เป็นตัวเก็บประจุล้วน ( $R = 0$ ) และหาผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลท์เตจดีไวเดอร์ หรือได้จากการคำนวณโดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ด้วยความเร็วแสงซึ่งมีค่าประมาณ 3.3 ns/m [5] จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

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

โดยที่  $Z_t = \sqrt{L/C_e}$  คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์  
 $C_e$  คือ ค่าเก็บประจุสเตรย์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์  
 $\tau_t = \sqrt{L/C_e}$  คือ เวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์  
 แทนค่าลงในสมการ

$$Z_t = \frac{\tau_t}{C_e} \text{ และ } R_d = 4 \times Z_t$$

$$\text{จะได้ } R_d = 268.60 \Omega$$

ค่าความต้านทานห้วงที่คิดได้เป็นค่าความต้านทานห้วงภายในโวลท์เตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูงทั้งหมด เมื่อนำมาต่อจะต่ออยู่ระหว่างชั้นของแต่ละชั้น จำนวน 24 ชั้น จะได้ค่าความต้านทานห้วงแต่ละชั้นเท่ากับ  $268.60/24 = 11.19 \Omega$  ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ค่าความต้านทานห้วงที่พิกัด 5Ω 5W เป็นตัวต้านทานแบบเซรามิก

### 3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

ก) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซีลด์ของเคเบิลสายวัด หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่าง ๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

ข) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมชซิ่งของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่อลูปขั้วของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกับความต้านทานแมชซิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

#### 3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลต์เตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยอาศัยสมการ (3.7)

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

เมื่อ  $a$  คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจดีไวเดอร์

$C_1$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

$C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออก 100V ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันโวลต์เตจดีไวเดอร์มีค่า 1000:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุและค่าความต้านทานภาคแรงต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

### 3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลต์เตจติไวเตอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 100V จะได้ อัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวเตอร์เท่ากับ 1000:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงสูงทั้งหมด เท่ากับ 110 pF ซึ่งเลือกเป็นแบบ Polypropylene ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำคำนวณได้จาก

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

จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงต่ำ 0.339 โดยใช้ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.068 ต่อขนานกัน 5 ตัว

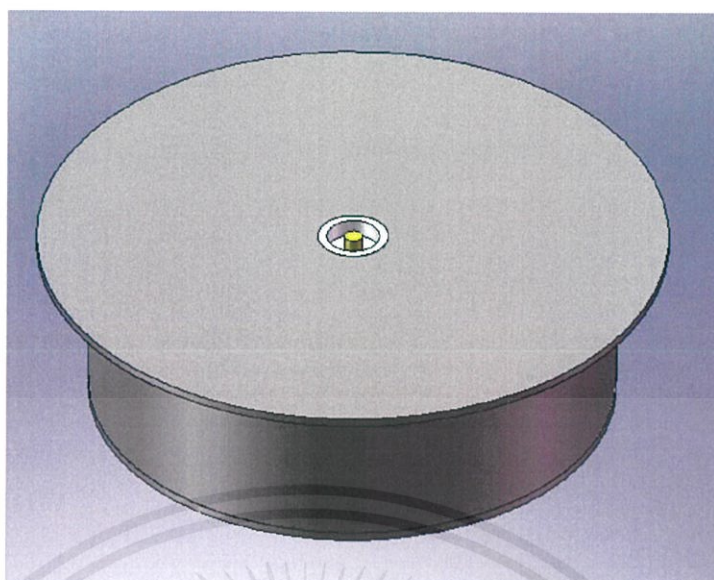
### 3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวเตอร์เท่ากับ 1000:1 ค่าความต้านทานภาคแรงสูงรวมทั้งหมด 590MΩ โดยค่าความต้านทานคำนวณได้จาก

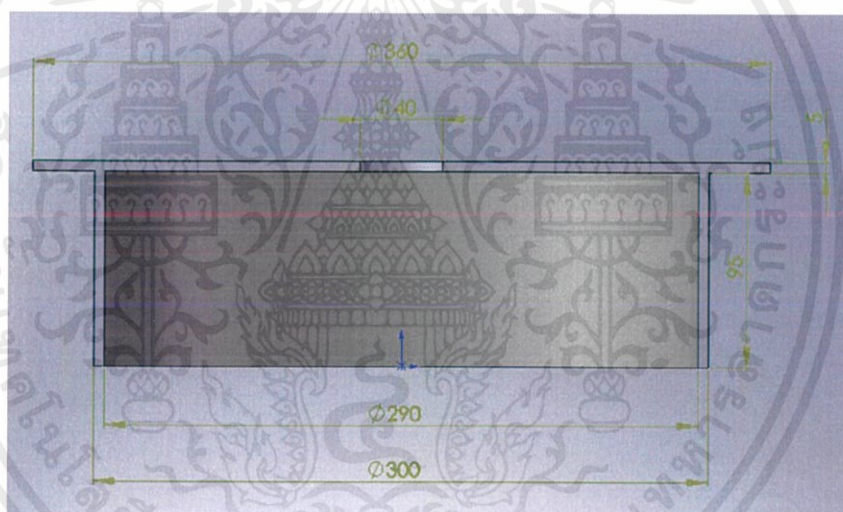
$$\frac{R_1}{R_2} = 1000 \quad (3.10)$$

จากการคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ 590kΩ โดยใช้ตัวต้านทาน ชนิดเม็ทอลฟิล์มขนาด 1.25 MΩ 3W ต่อขนานกัน 5 ตัว

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ ตัวต้านทานแมชชิง ( $R_m$ ) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยความต้านทานแมชชิงนี้เลือกใช้แบบฟิล์ม โลหะขนาด 2 W 50 Ω จำนวน 1 ตัว ได้ค่าความต้านทาน  $R_m = 50 \Omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จ อิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานภาคแรงต่ำจะประกอบจะประกอบอยู่ ภายในกระบอกรองเหลือง ดังรูปที่ 3.5



ก)



ข)

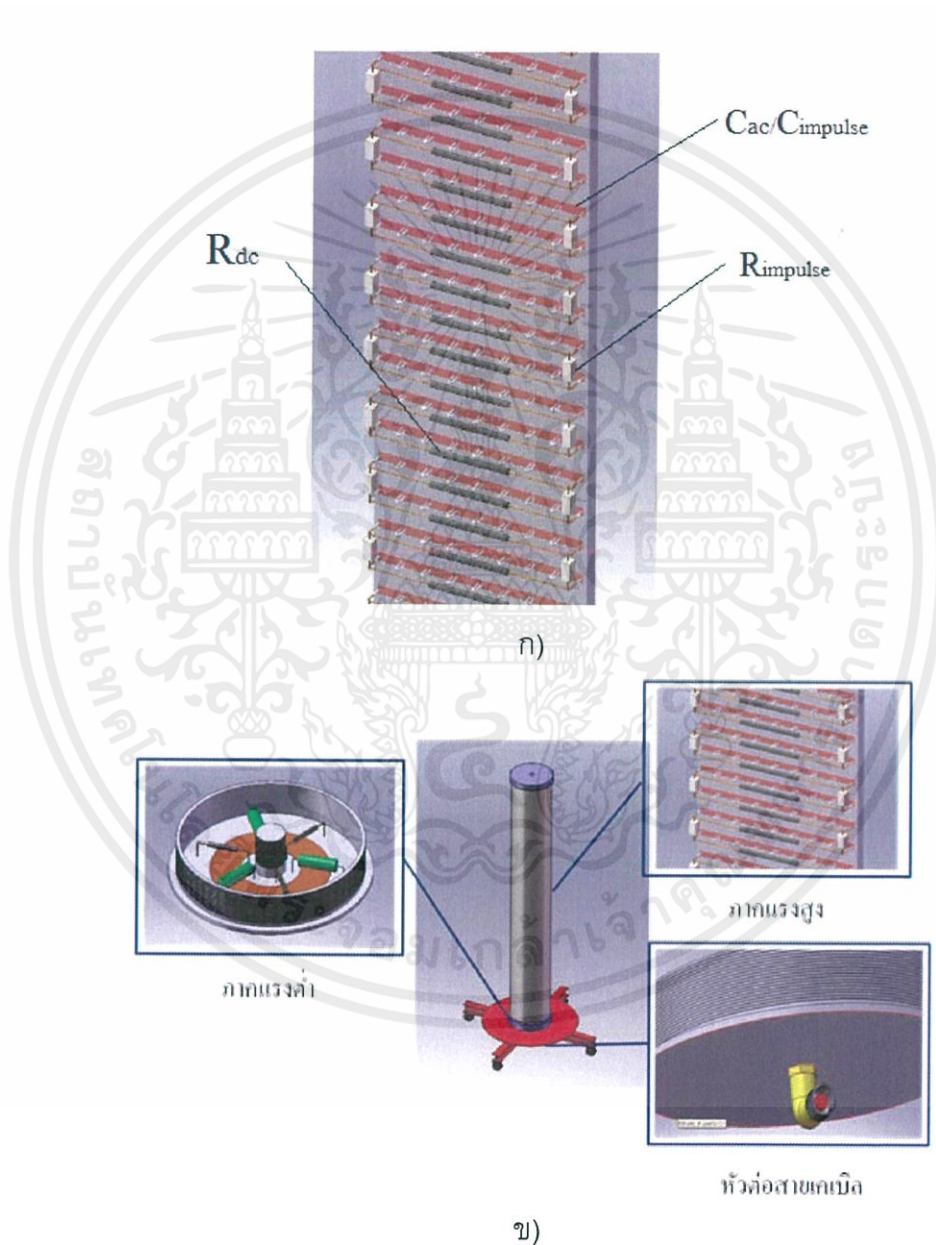
รูปที่ 3.5 ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ

ก) ด้านบน ข) ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์

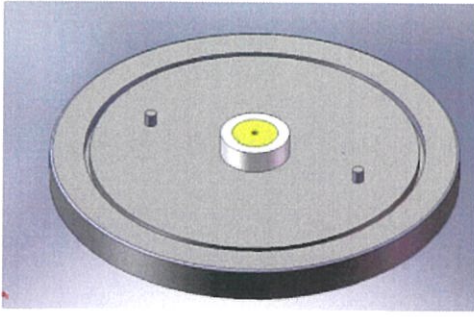
การต่อตัวเก็บประจุย่อยและตัวต้านทานในภาคแรงสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 649 ตัว ตัวต้านทานย่อยทั้งหมดจำนวน 59 ตัว และตัวต้านทานหน่วงจำนวน 58 ตัว การประกอบทำได้โดยใช้แผ่นอะคริลิกใสหนา 1.7 cm. ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 11 ตัว ซึ่งจะนำตัวเก็บประจุย่อยต่อเข้าไป ต่อจากนั้นจึงนำตัวต้านทานย่อยต่อขนานกับตัวเก็บประจุย่อยแต่ละชั้นและระหว่างชั้น ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุจะเป็นการต่อแบบอนุกรม และตัวต้านทานจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละท่อน ซึ่งแสดงใน รูปที่



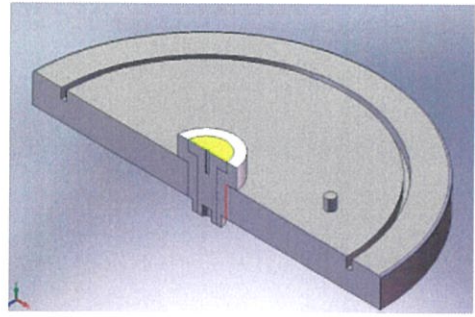
รูปที่ 3.6 การจำลองการสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

- ก) การจำลองการเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานแต่ละชั้น  
ข) การจำลองโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

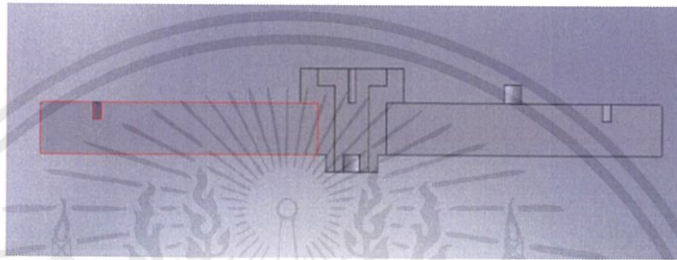
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



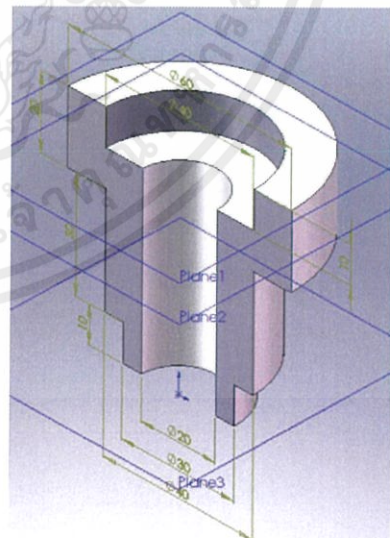
ค)

### รูปที่ 3.7 โครงสร้างของภาคแรงสูงด้านล่าง

- ก) ส่วนประกอบของภาคแรงสูงด้านล่างประกอบด้วยฉนวนซูฟิลีน(สีขาว) ตัวนำลูมิเนียมเนียม(สีเหลือง)
- ข) ภาพตัดขวางของภาคแรงสูงด้านล่าง



ก)

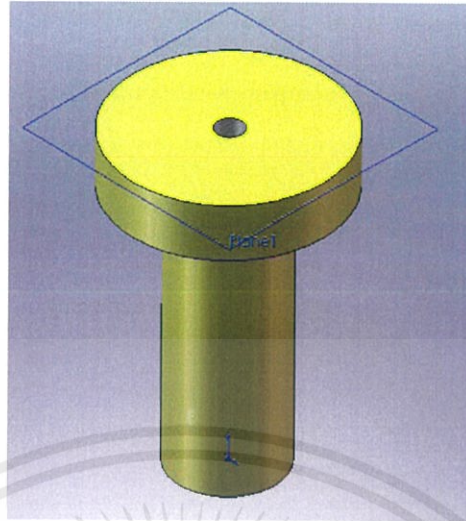


ข)

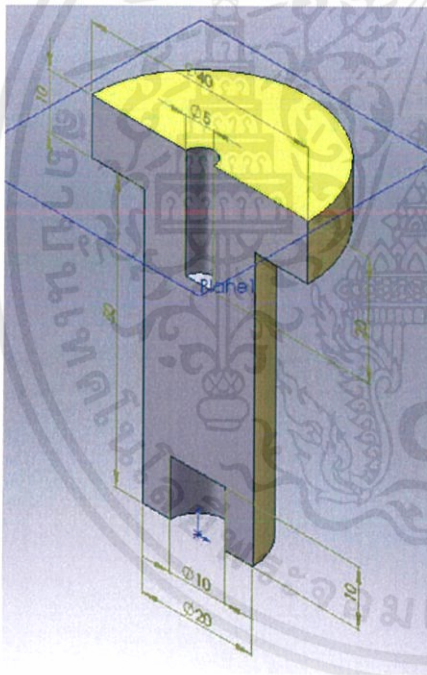
### รูปที่ 3.8 ฉนวนซูฟิลีนภายในภาคแรงสูงด้านล่าง

- ก) และ ข) โครงสร้างและภาพตัดของฉนวนซูฟิลีนภายในภาคแรงสูงด้านล่าง

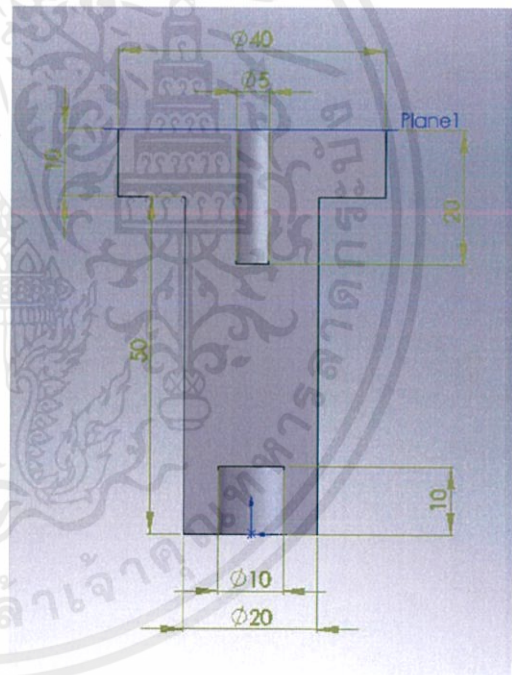
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



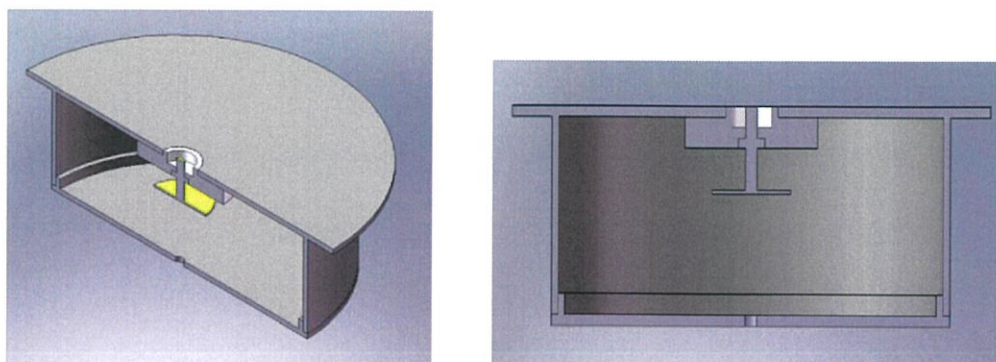
ข)



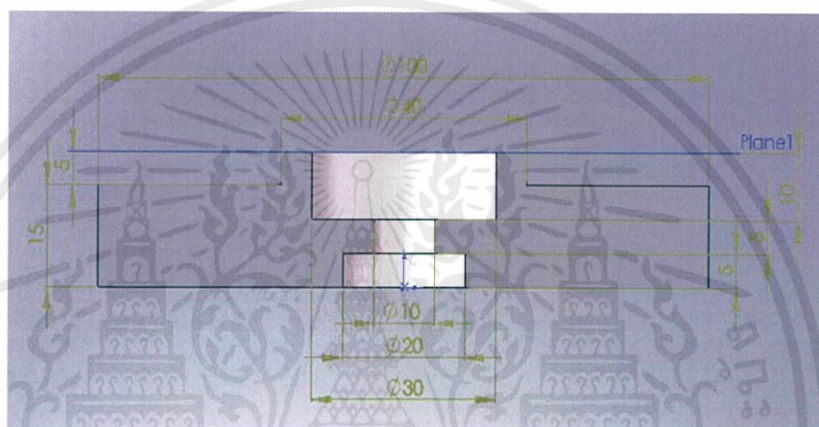
ค)

รูปที่ 3.9 โครงสร้างของตัวนำลুমินีเยียมภายในภาคแรงสูงด้านล่าง  
ก) ข) และ ค) รูปร่างและขนาดของตัวนำลুমินีเยียมภายในภาคแรงสูงด้านล่าง

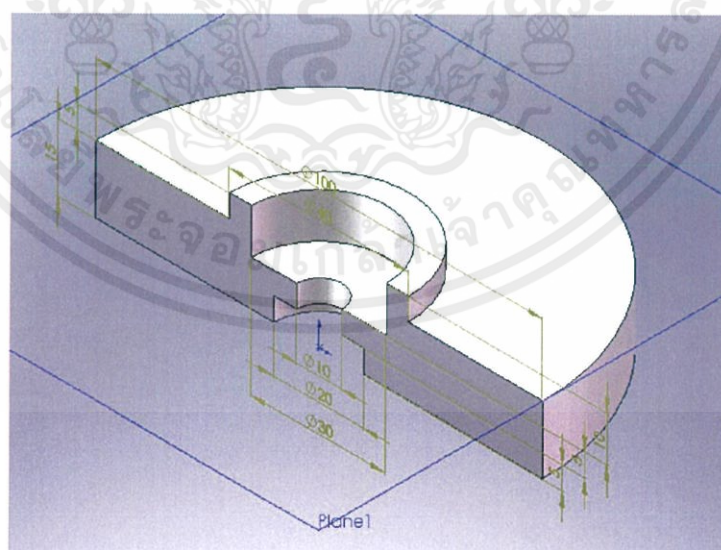
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



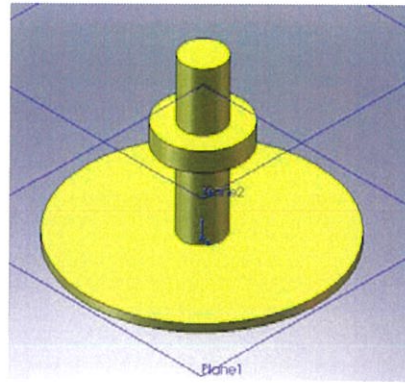
ค)

### รูปที่ 3.10 โครงสร้างและขนาดภายในของภาคแรงต่ำ

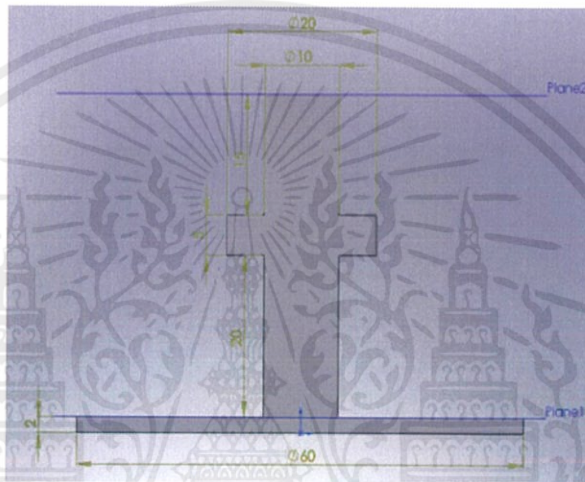
ก) ด้านข้างของภาคแรงต่ำ ข) และ ค) ภาพตัดของฉนวนซูฟิสันภายในภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

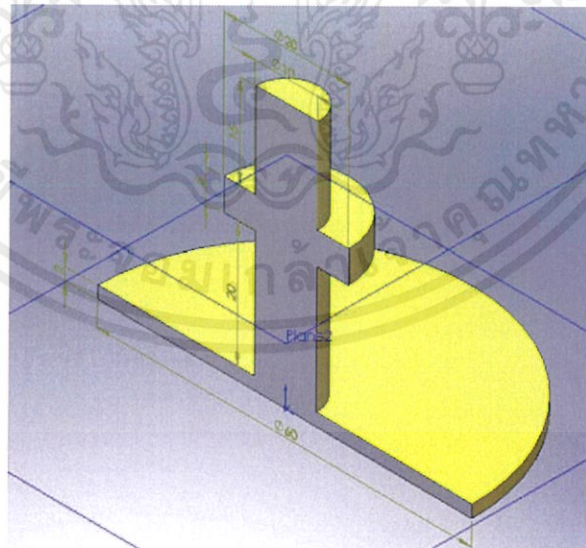
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

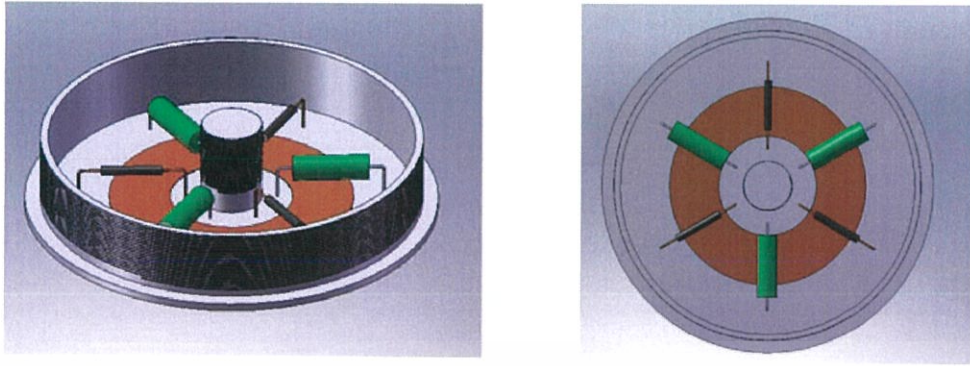


ค)

รูปที่ 3.11 โครงสร้างและขนาดของตัวนำภายในภาคแรงต่ำ

ก) รูปร่างของตัวนำภายในภาคแรงต่ำ ข) ภาพตัดและขนาดของตัวนำ

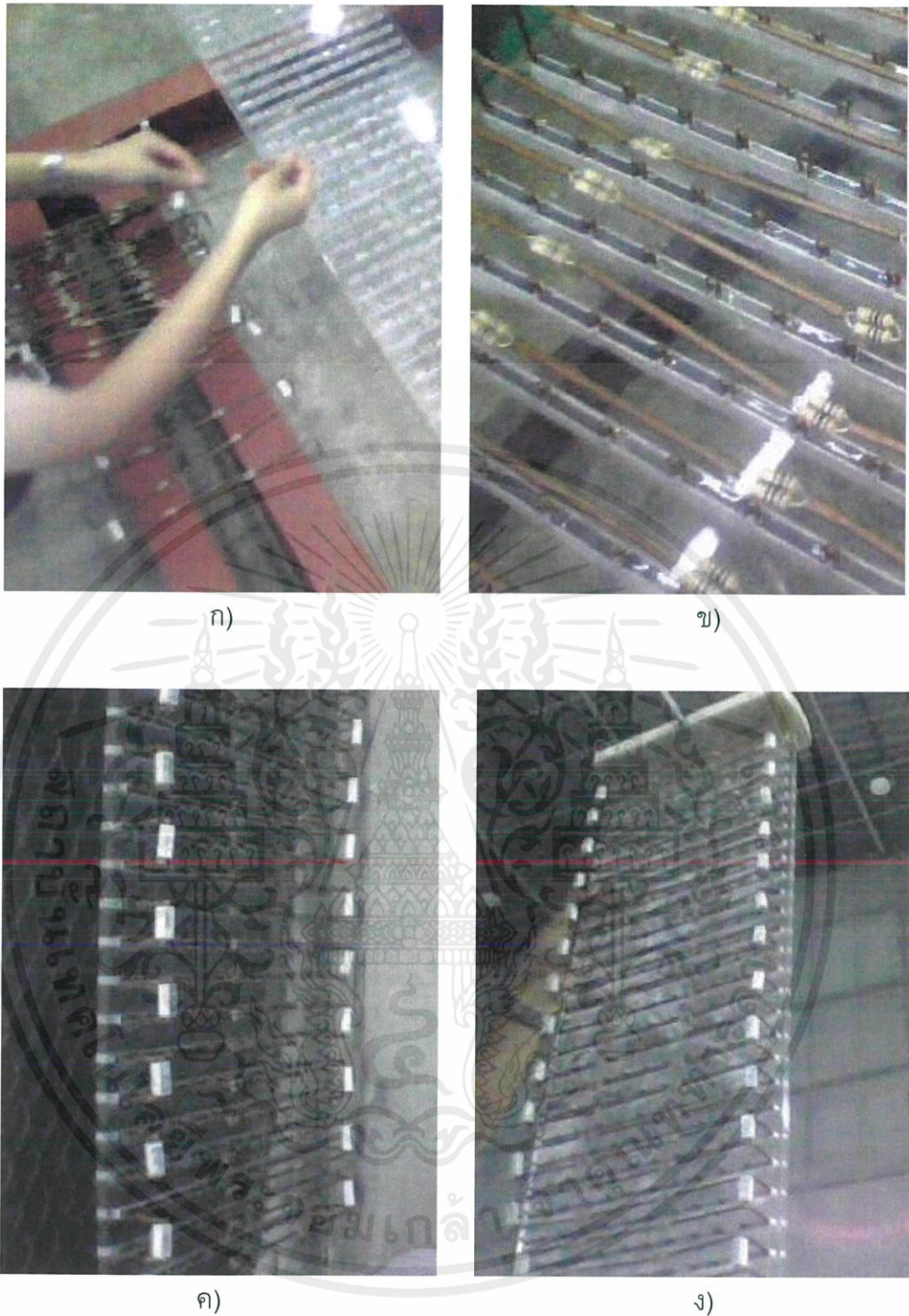
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โครงสร้างและการจัดวางชุดตัวเก็บประจุและตัวต้านทานในภาคแรงต่ำ



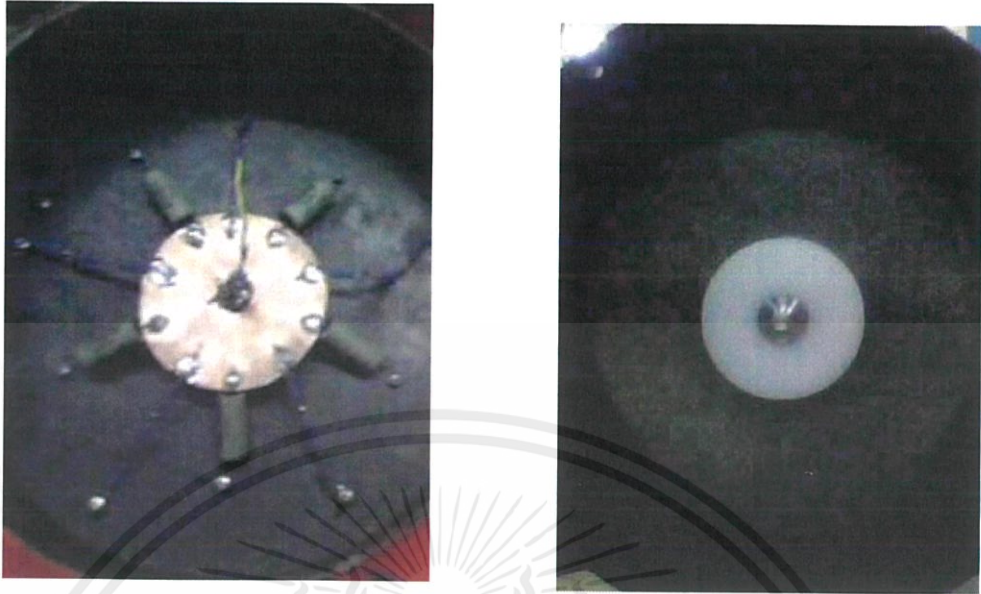
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 3.13 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงสูงของโวลท์เตจดีไวเดอร์

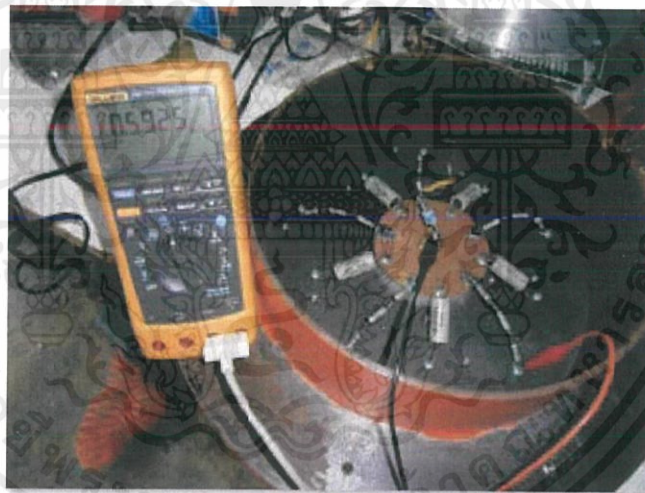
- ก) แผ่นอะคลิลิกใสเซาะร่องสำหรับจับยึดตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน
- ข) การเชื่อมต่อตัวต้านทานขนานตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น
- ค) การเชื่อมต่อตัวต้านทานหน่วงในแต่ละชั้น
- ง) ภาคแรงสูงที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

ข)



ค)

รูปที่ 3.14 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงต่ำของโวลท์เตจติไวเดอร์

ก) การจัดวางอุปกรณ์ภาคแรงต่ำด้านบน

ข) ด้านล่างของแผ่นวางอุปกรณ์ภาคแรงต่ำ

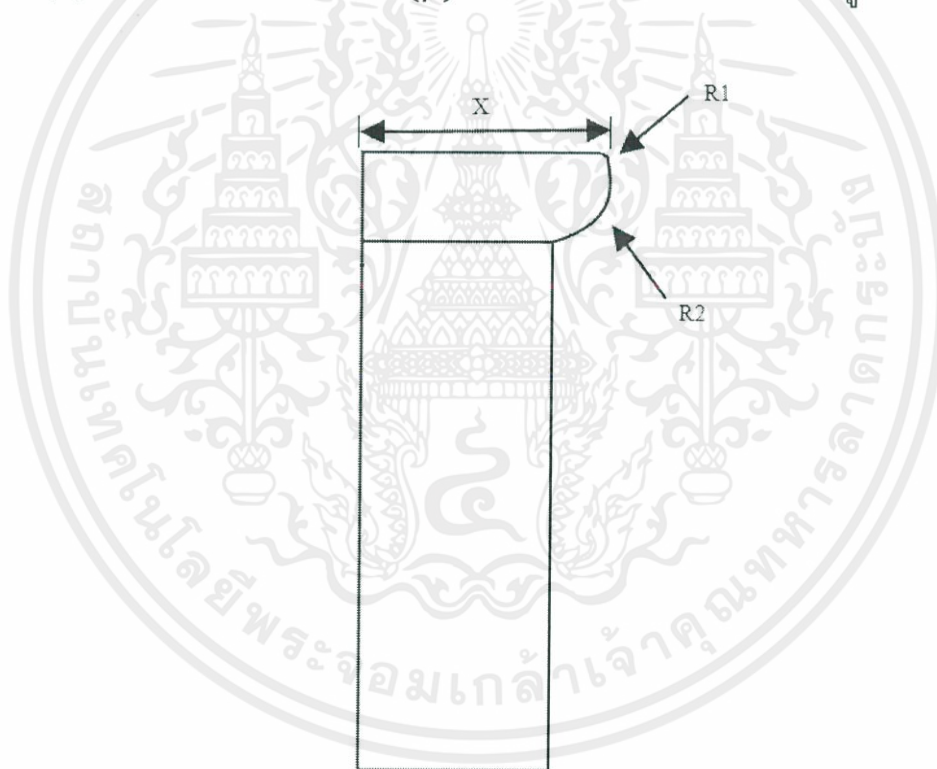
ค) ครอบอกภาคแรงต่ำที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบอิลีกโทรด

ในการออกแบบอิลีกโทรดนั้น ควรจะออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้ สะดวก การออกแบบอิลีกโทรดที่ดีควรจะไม่มีขอบคม เพราะจะทำให้จุดๆ นั้นเกิดความเครียด สนามไฟฟ้าสูง ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งควรมีความแข็งแรงทางกลด้วย เมื่อประกอบเข้ากับท่ออะคลีลิกใส สะดวกในการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรืออุปกรณ์แรงสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ทำควรป้องกันการรั่วซึม เนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลวหรือก๊าซบรรจุอยู่เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนระหว่างตัวอุปกรณ์กับผิวท่อ ดังนั้นเราจึงใช้โปรแกรมช่วยคำนวณสนามไฟฟ้า (FEM) ช่วยในการวิเคราะห์อิลีกโทรด รูปทรงต่างๆ ทั้งแบบพื้นฐานครึ่งวงกลมและได้ทำการทดลองเปลี่ยนระยะ X รัศมีขอบบน และรัศมีของล่าง โดยการจำลองความเครียดของสนามไฟฟ้าจากรูปทรงพื้นฐาน โดยกำหนดให้อิลีกโทรดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งแทนด้วยอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเปอร์มิตติวิตี

( $\epsilon$ ) = 1 และค่าคอนดักติวิตี ( $\rho$ ) =  $3.8 \times 10^7$  Siemens / meter ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การวิเคราะห์โครงสร้างอิลีกโทรด

เมื่อ X คือรัศมีของอิลีกโทรด

R1 คือ รัศมีขอบบนของอิลีกโทรด

R2 คือ รัศมีของล่างของอิลีกโทรด

จากการใช้โปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า(FEM) จุดที่เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอยู่ 2 จุด คือ ขอบด้านบนและขอบด้านล่าง แต่จะเกิดมากที่สุดที่ขอบด้านล่าง โดยมีค่าสูงสุด = 26.1 kV/cm ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการเพราะจะเกิดโคโรนา เราจึงต้องลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง โดยการออกแบบอีเล็กโทรดใหม่

อีเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลม จะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่จุดขอบด้านล่างและมีค่าน้อยลงกว่าเดิม โดยมีค่าสูงสุด = 26.2 kV/cm แต่ว่าอีเล็กโทรดรูปทรงนี้จะใช้ค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง เพราะใช้เนื้อโลหะจำนวนมาก อีกทั้งขั้นตอนการทำส่วนโค้งให้มีผิวเรียบสม่ำเสมอสามารถทำได้ยาก ดังนั้นอีเล็กโทรดจึงควรมีลักษณะรูปทรงคล้ายครึ่งวงกลมแต่ด้านบนเรียบ โดยจะหาค่าขนาดของรัศมี (X) ของอีเล็กโทรดได้จากการคำนวณดังนี้

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

r คือ รัศมีของอีเล็กโทรด

v คือ ค่ายอดของแรงดันใช้งาน

$E_{max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศที่ 20 kV/cm

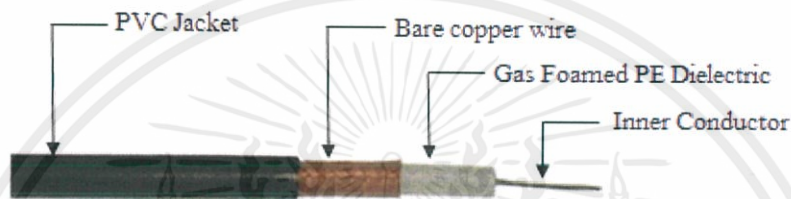
สาเหตุที่เราต้องคูณเผื่อ 130% เนื่องมาจากขนาดรัศมีของอีเล็กโทรดจากการคำนวณมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออะคลีลิสที่ใช้ใช้งาน จึงไม่สามารถเจาะรูเพื่อใช้สกรูยึดอีเล็กโทรดได้ จึงต้องคูณเผื่อเพื่อเพิ่มขนาดอีเล็กโทรดที่เราใช้ในโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสมนี้

### 3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าที่ได้จากโวลเตจดีไวเดอร์

#### 3.5.1 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ

ชนิดของสายเคเบิลที่เลือกใช้ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน IEEE Std 4 – 1995 หัวข้อที่ 18.4 โดยแนะนำสายโคแอกเซียลชนิด RG11 A/U ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 75  $\Omega$  โดยมีความยาวที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 15 เมตร (50 ฟุต)

โดยสายที่ใช้มีการลดทอนสัญญาณน้อยและสามารถทนแรงดันได้สูงมีความถี่ใช้งานที่กว้าง ซึ่งในการออกแบบเราใช้สายชนิด RG11 A/U ซึ่งมีแรงดันใช้งาน 600 Vrms หรือประมาณ 850 Vpeak โดยมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.16 สายเคเบิลชนิด RG11 A/U

ส่วนการเลือกหัวต่อโดยใช้ชนิด N (Neill) ซึ่งเป็นหัวต่อแบบสกรู โดยใช้ที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมคือ 50  $\Omega$  และ 75  $\Omega$  ซึ่งมีแรงดันใช้งาน 1,000 Vrms ที่ระดับน้ำทะเลและแรงดัน Withstanding Dielectric ที่ระดับน้ำทะเลโดยใช้ที่ย่านความถี่ 0 - 1.5 GHz มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ 75  $\Omega$  และที่ย่านความถี่ 0 – 11 GHz มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  ส่วนย่านอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -65  $^{\circ}\text{C}$  ถึง 165  $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.17 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.18 หัวต่อภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 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
ไดอิเล็กทริก	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 / 100 m	10 MHz	1.8
	50 MHz	4.5
	100 MHz	6.5
	800 MHz	22
	1000 MHz	25.5

### 3.5.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

ในส่วนของภาคแรงดันต่ำจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือวัดที่สามารถวัดแรงดันขาออกของโวลต์เตจดีไวเดอร์ได้ และเครื่องมือวัดแรงดันต่ำมีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล แต่ปัจจุบันเครื่องมือวัดที่นิยมใช้กันมากคือ แบบดิจิตอล จึงจะขอยกตัวอย่างเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลที่จะนำมาใช้วัดแรงดันเอาท์พุทที่ออกจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ดังนี้

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1 [2]

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	2500 V	30 Ohm source
CAT I	1000 V	4000 V	30 Ohm source
CAT II	600 V	4000 V	12 Ohm source
CAT II	1000 V	6000 V	12 Ohm source
CAT III	600 V	6000 V	2 Ohm source
CAT III	1000 V	8000 V	2 Ohm source



รูปที่ 3.19 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

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

ตารางที่ 3.4 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 $\mu$ A to 10 A (20 A for 30 seconds)
Resistance	0 to 30 M $\Omega$
Conductance	0 to 50 nS
Capacitance	0.01 nF to 50 mF
Diode Test	3.1 V
Temperature	-200 °C to 1350 °C (-328 °F to 2462 °F)
Frequency	0.5 Hz to 1000 kHz

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของ FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer

ระดับสัญญาณขาเข้าต่ำสุด 5 Vrms (ใช้ V REFERENCE) หรือ 1 Arms (ใช้ A REFERENCE)			
การวัด แรงเคลื่อนไฟฟ้า	INPUT RANGE 0.0 V ถึง 600 V rms(ac+dc) 0.0V ถึง +/-993 Vpeak	การวัดกระแสไฟฟ้า (TRUE RMS) (1mV/A) ISOLATED	INPUT RANGE 1.0 mV (A) ถึง 1000 mVrms (A) ถึง +/- 2000 mV (A) peak
ความถูกต้องเบื้องต้น (ที่ 5 Hz-65 Hz,dc)	rms : +/- (0.5%+2digits) peak dc:+/- (2%+3digits)	ความถูกต้องเบื้องต้น (ที่ 5 Hz – 65 Hz,dc)	rms : +/- (0.5%+3digits) + PROBE SPEC peak, dc:+/- (2%+4digits)
ความต้านทานขาเข้า	1M , BALANCE	ความต้านทานขาเข้า	1M/47pF
CREST FACTOR	> 3.0 ต่ำกว่า 300 V, 1.5/600 V	CREST FACTOR	> 3.0 ต่ำกว่า 300 mV, 2.0/1000 mV

คุณสมบัติของ Oscilloscope DL 1540/DL 1540L

**Input Terminals :** The Input Impedance is 1 M $\Omega$   $\pm$  1.5% and approximately 25 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

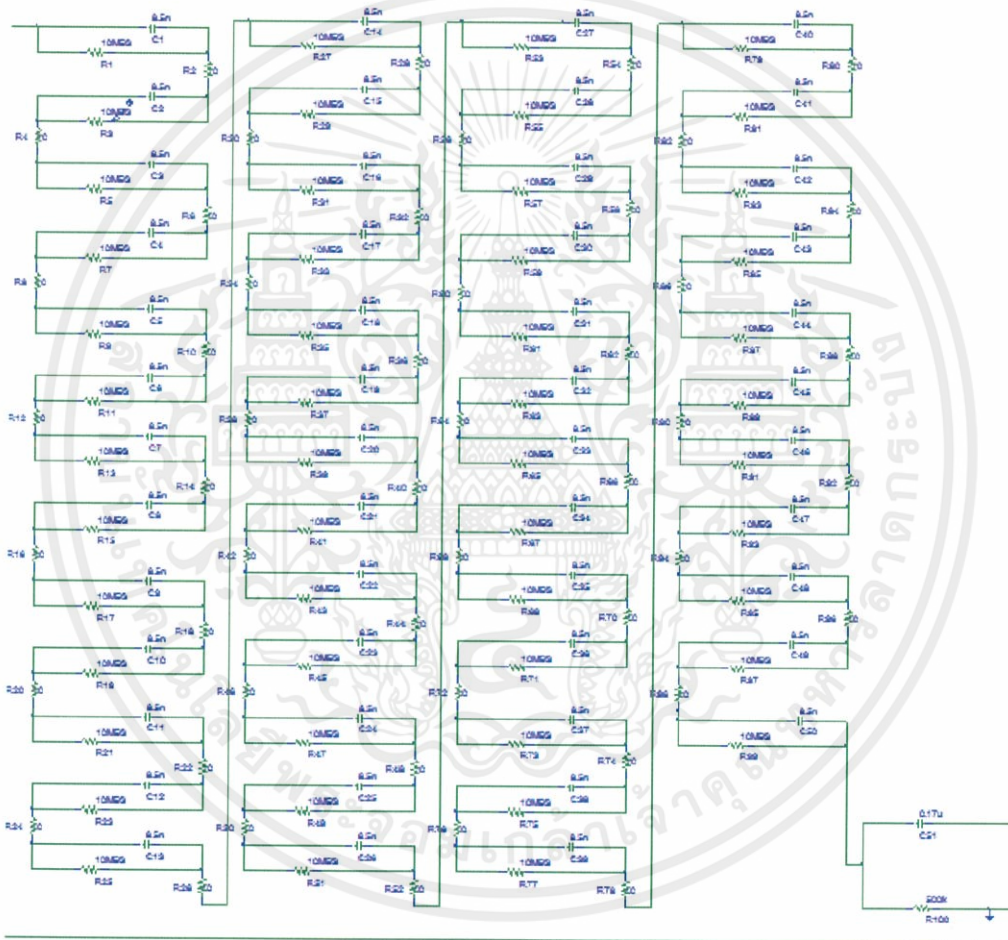
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ Probe

Item	Specifications Setting 10 : 1	Setting 1 : 1	Conditions
Input Impedance/capacitance	10 M $\Omega$ $\pm$ 2% approx. 14 pF	10 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 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	-

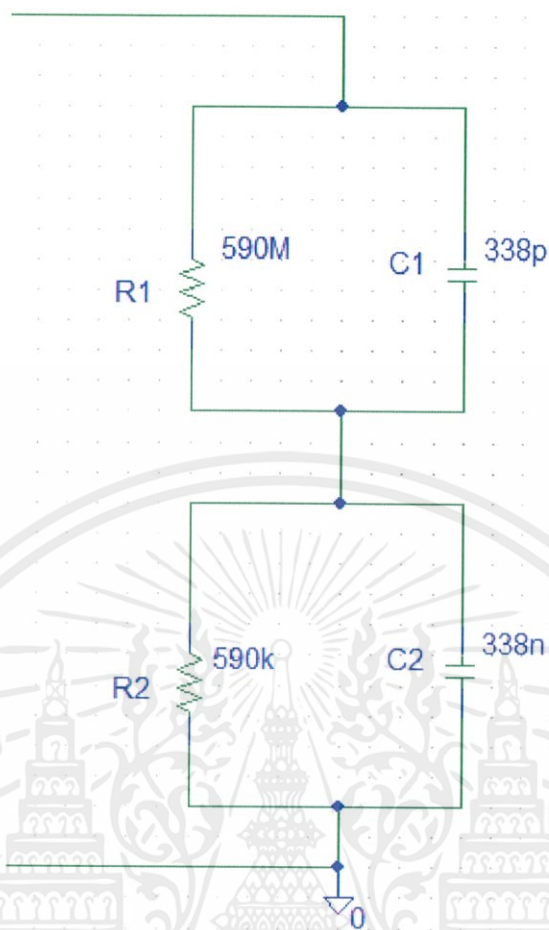
\*1 when the probe's attenuation ratio is "1:1", never input voltage exceeding the maximum input voltage of this instrument

### 3.7 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเซอร์โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบผสมที่ออกแบบ โดยที่ด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำจะประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน โดยด้านแรงสูงจะแบ่งออกเป็น 59 ชั้น ซึ่งใน 1 ชั้นจะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 11 ตัว ในที่นี้ได้ทำการรวมตัวเก็บประจุ 1 ชั้น เป็นตัวเดียว เพื่อประหยัดพื้นที่ในการเขียนวงจร ส่วนทางด้านแรงต่ำ ก็จะมีการรวมตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานเป็นตัวเดียว เพื่อสะดวกในการจำลองการทำงาน เมื่อเรานำค่าต่างๆ ที่คำนวณเรียบร้อยแล้วมาต่อกันก็จะได้วงจรดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 วงจรรวมที่ใช้จำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเซอร์



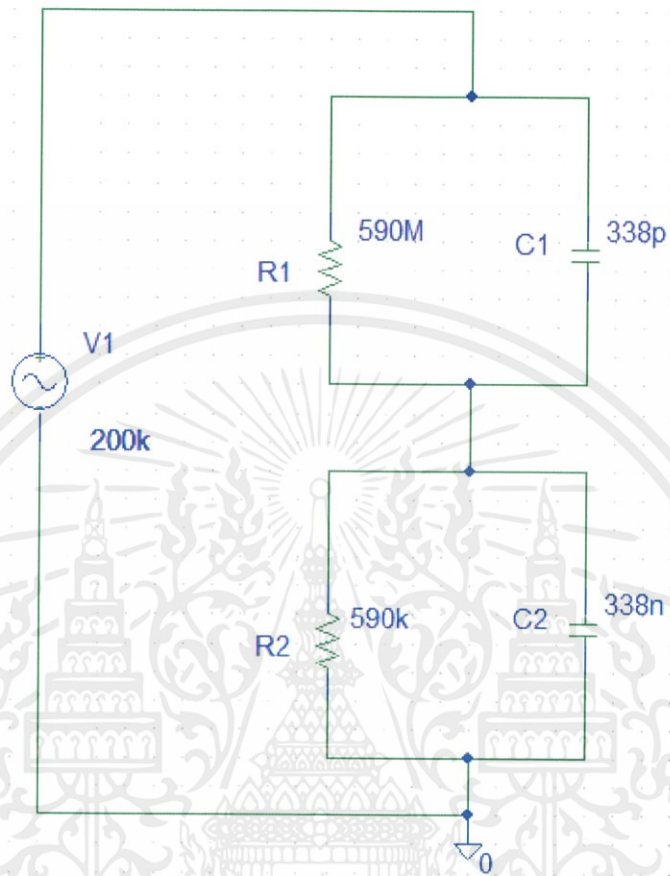
รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบย่อส่วน

เมื่อ 1 คือ อิมพีแดนซ์ต้านแรงสูง ( $Z_1$ )

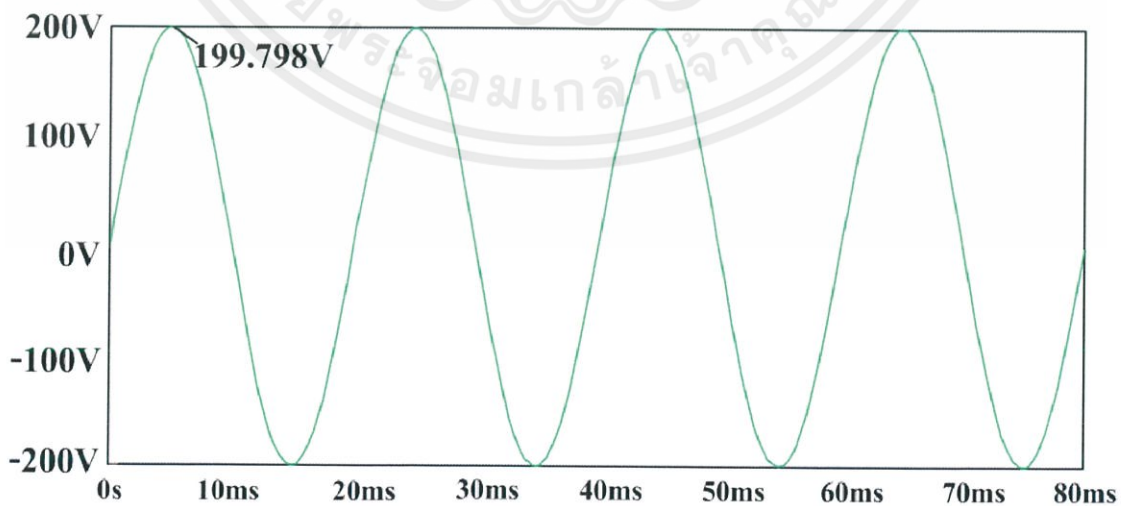
2 คือ อิมพีแดนซ์ต้านแรงต่ำ ( $Z_2$ )

### 3.7.1 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่พิกัด

#### 3.8.1.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV



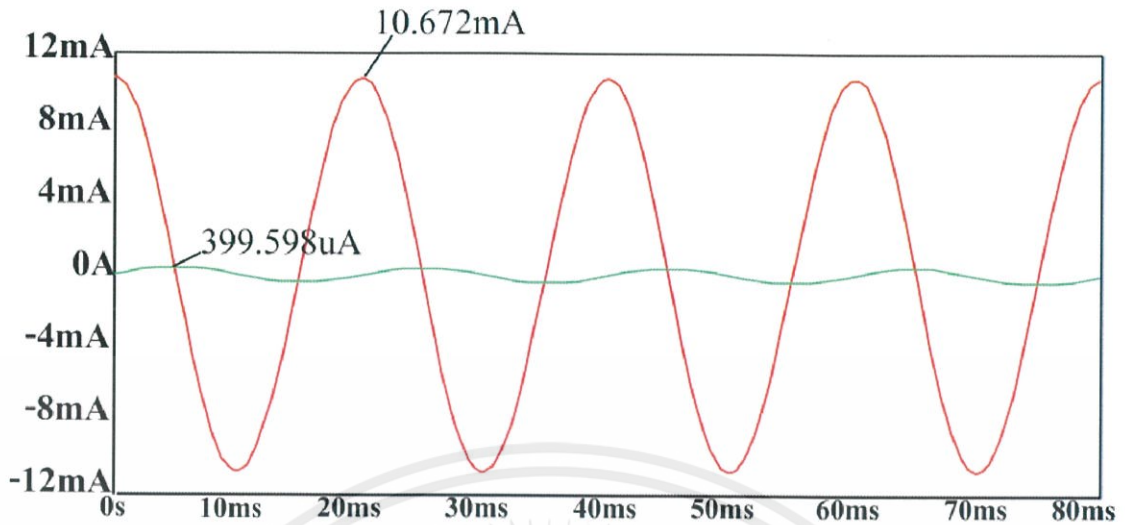
รูปที่ 3.22 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200kV



รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200kV

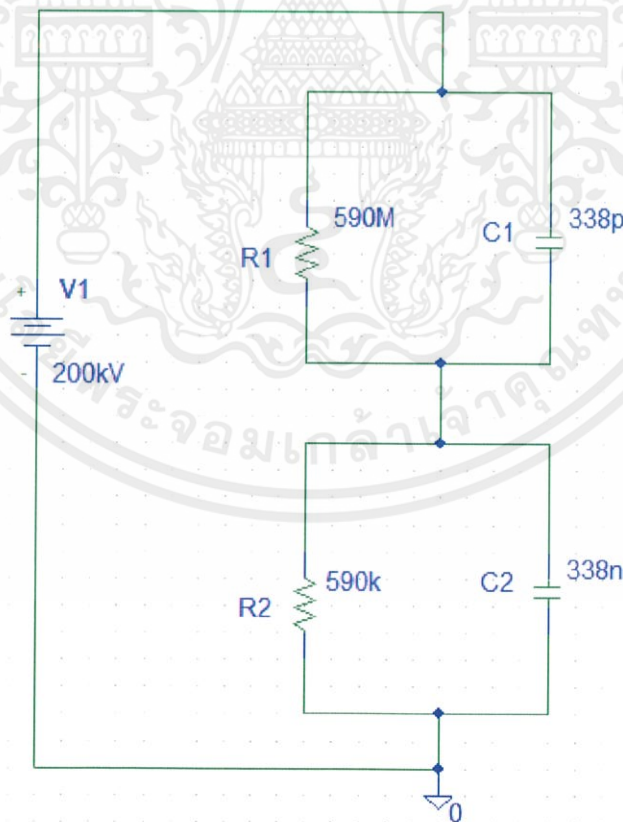
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



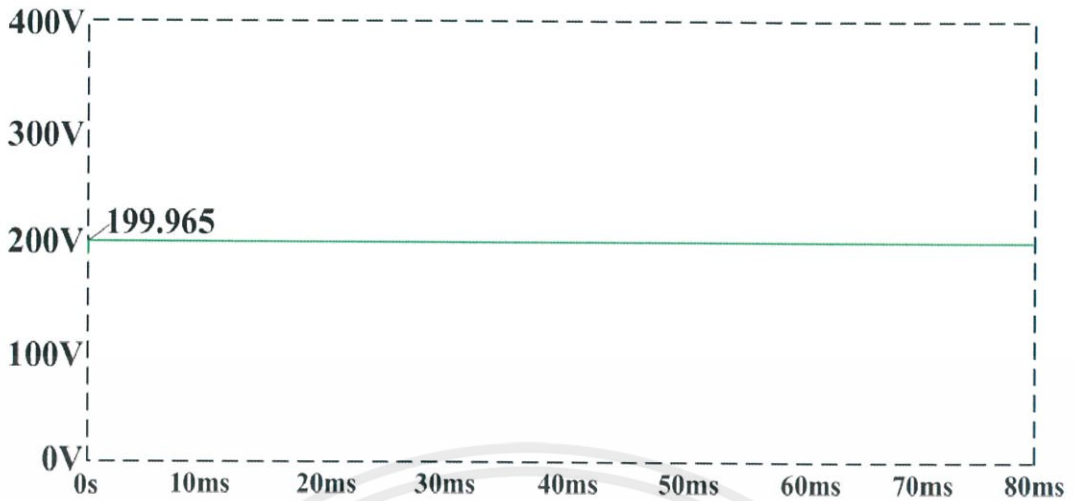
รูปที่ 3.24 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ 200 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 10.672mA และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 399.598  $\mu$ A

### 3.7.1.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV

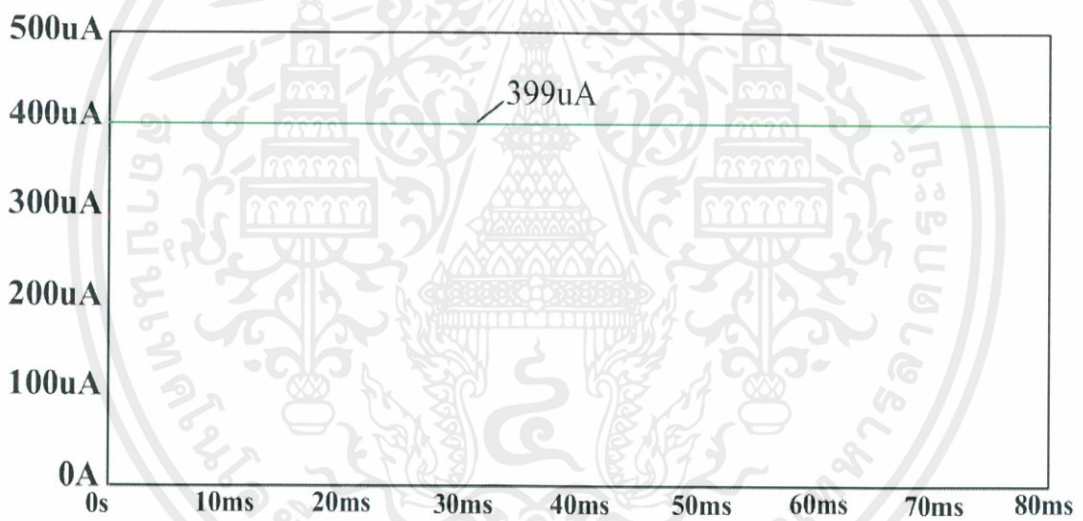


รูปที่ 3.25 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

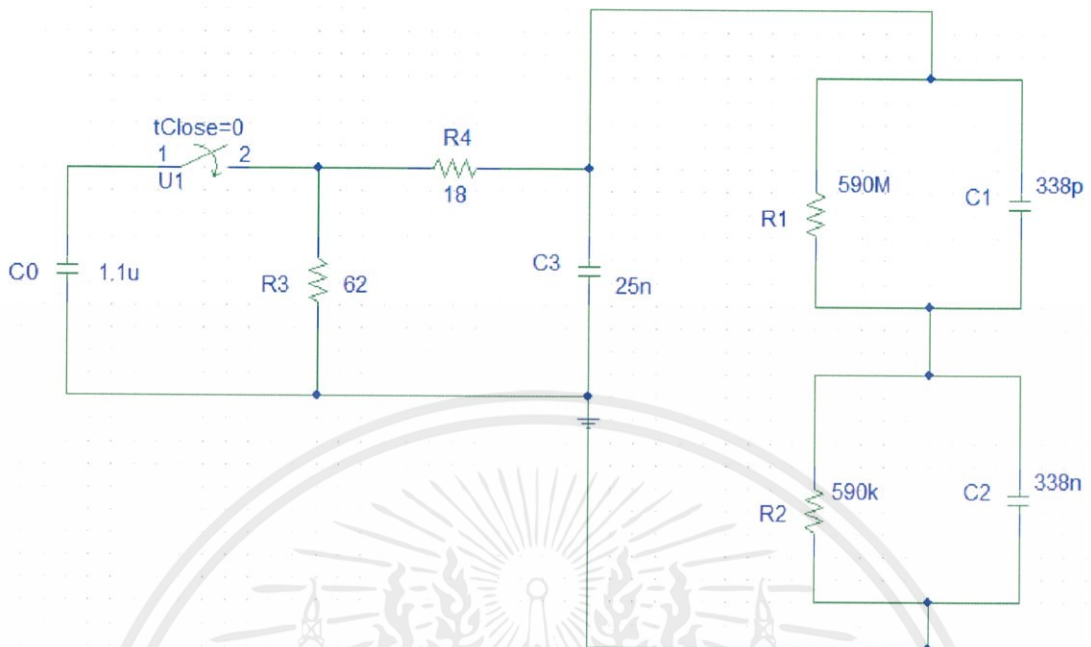


รูปที่ 3.26 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV

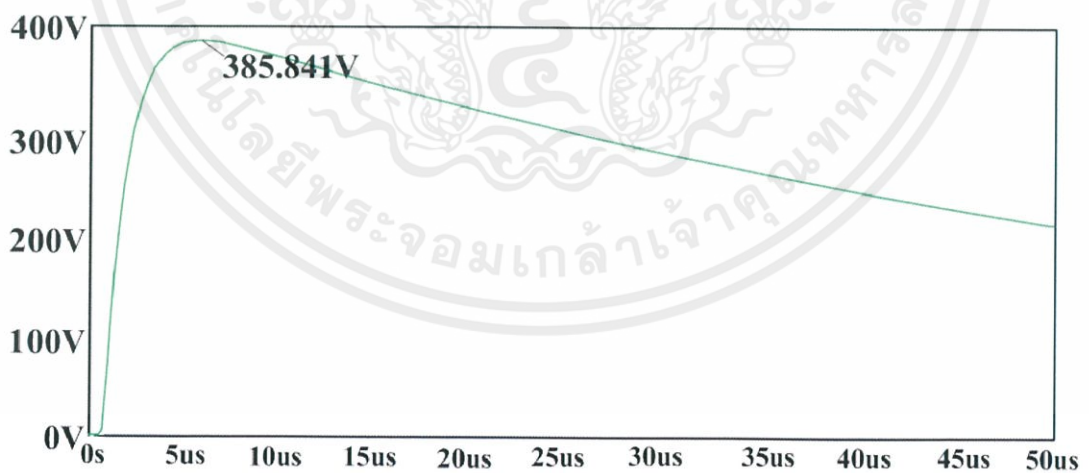


รูปที่ 3.27 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง 200 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าประมาณ 0.000 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 399  $\mu$ A

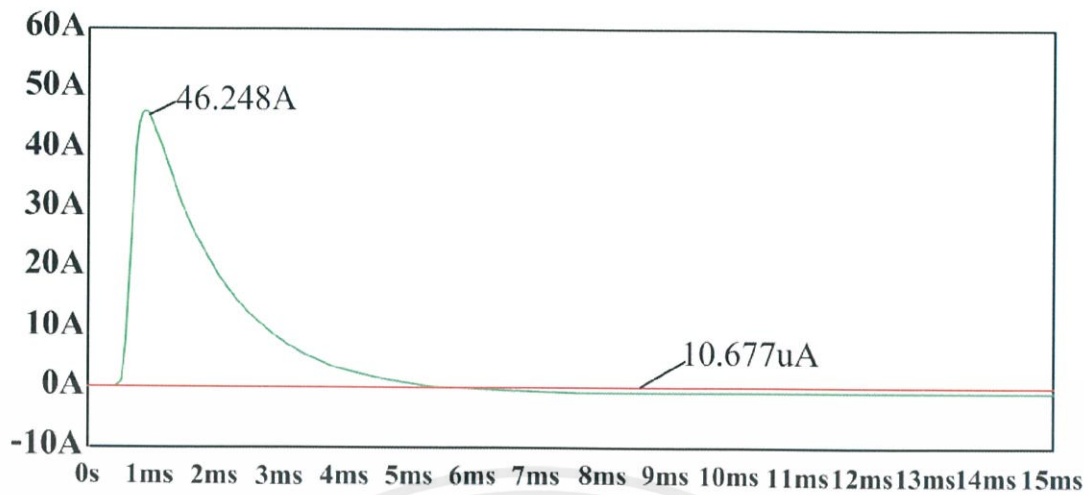
## 3.7.1.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV



รูปที่ 3.28 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแสเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV  
เมื่อ V1 คือ วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (แรงดันอินพุท)  
V2 คือ แรงดันเอาต์พุท



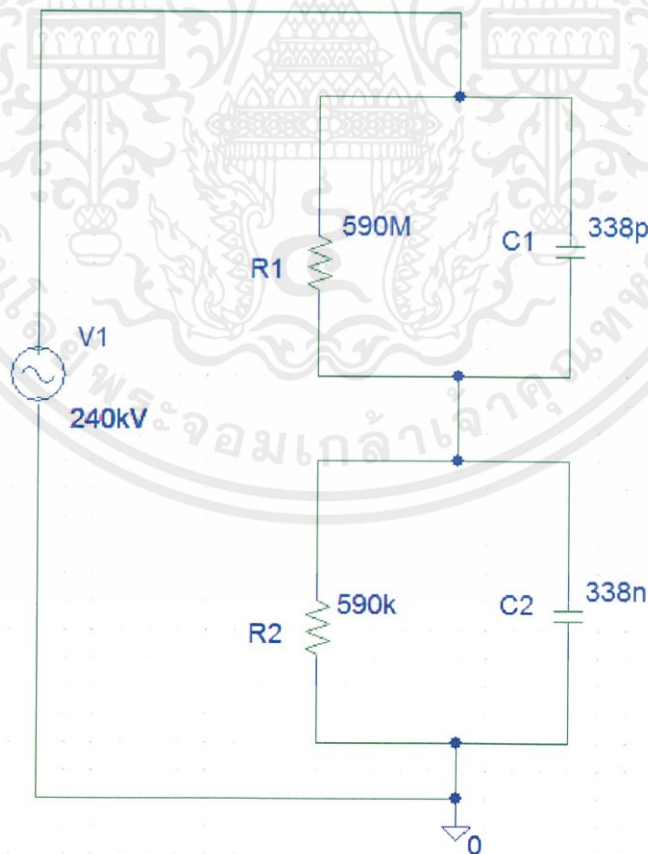
รูปที่ 3.29 รูปคลื่นแรงดันของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400 kV  
เมื่อ (ก) คือ แรงดันอินพุทมีค่า  
(ข) คือ แรงดันเอาต์พุทมีค่า



รูปที่ 3.30 รูปคลื่นกระแสเอ้าท์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 400kV โดยวัตต์ที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 46.248 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 10.677uA

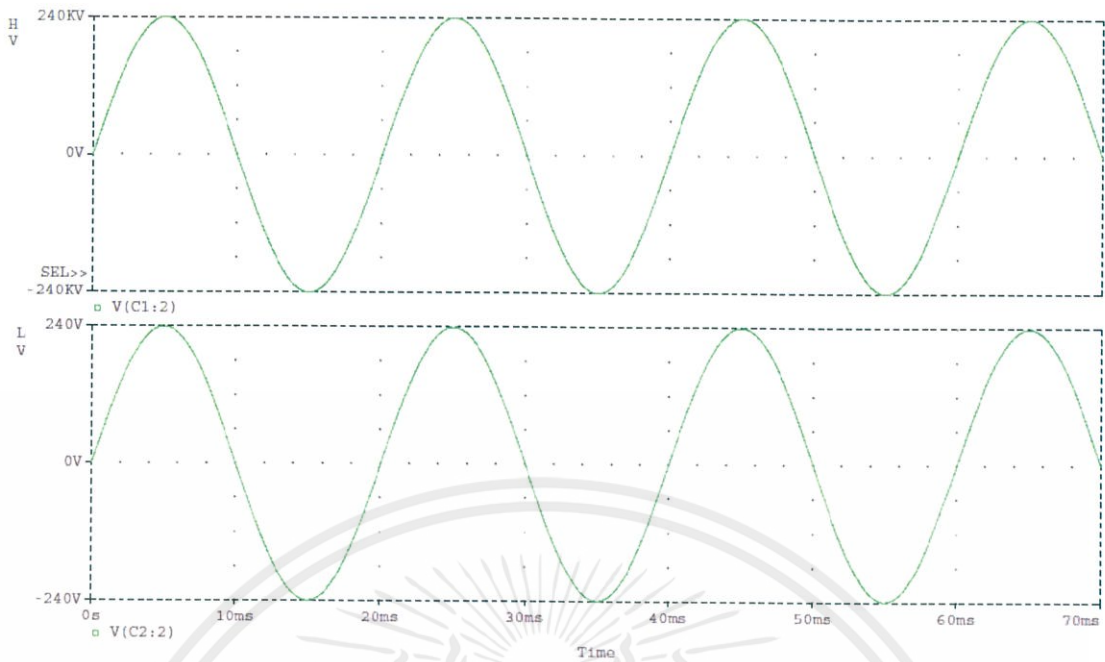
### 3.7.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบความคงทนอยู่ใต้ต่อแรงดัน

#### 3.7.2.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240 kV

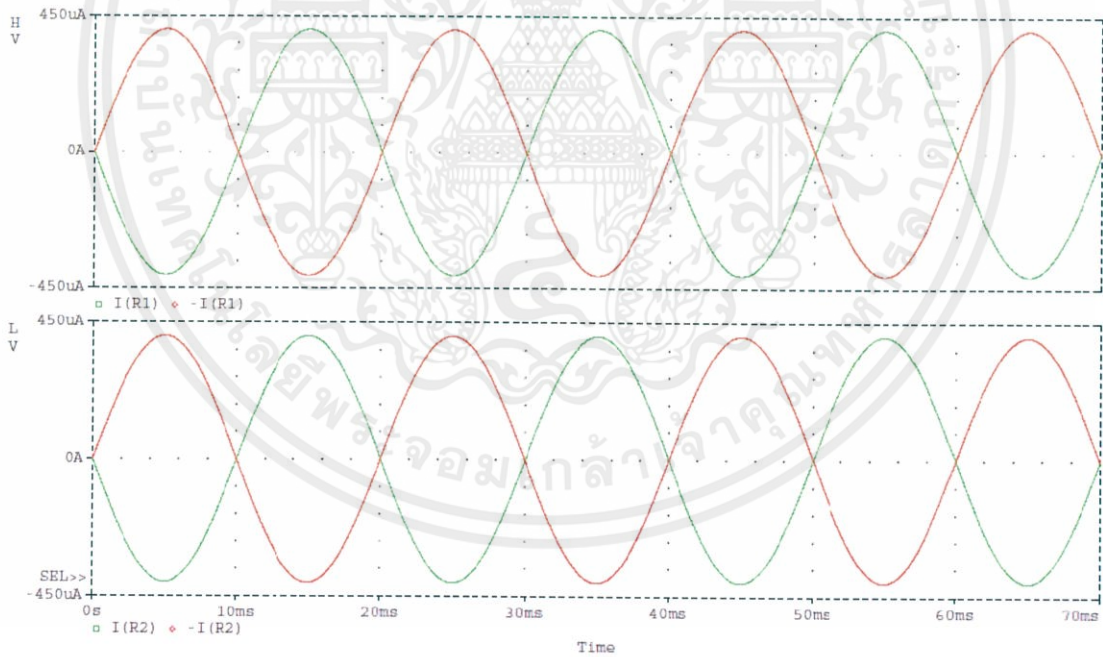


รูปที่ 3.31 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



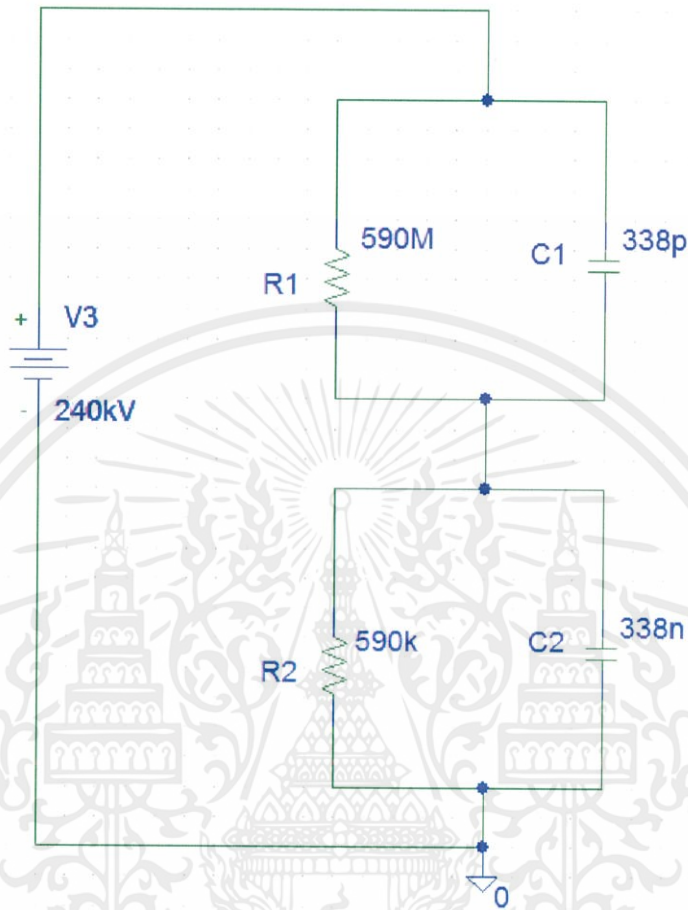
รูปที่ 3.32 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 240 kV



รูปที่ 3.33 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์เมื่อป้อนแรงดันกระแสสลับ 240 kV โดยวัดที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 448  $\mu$ A

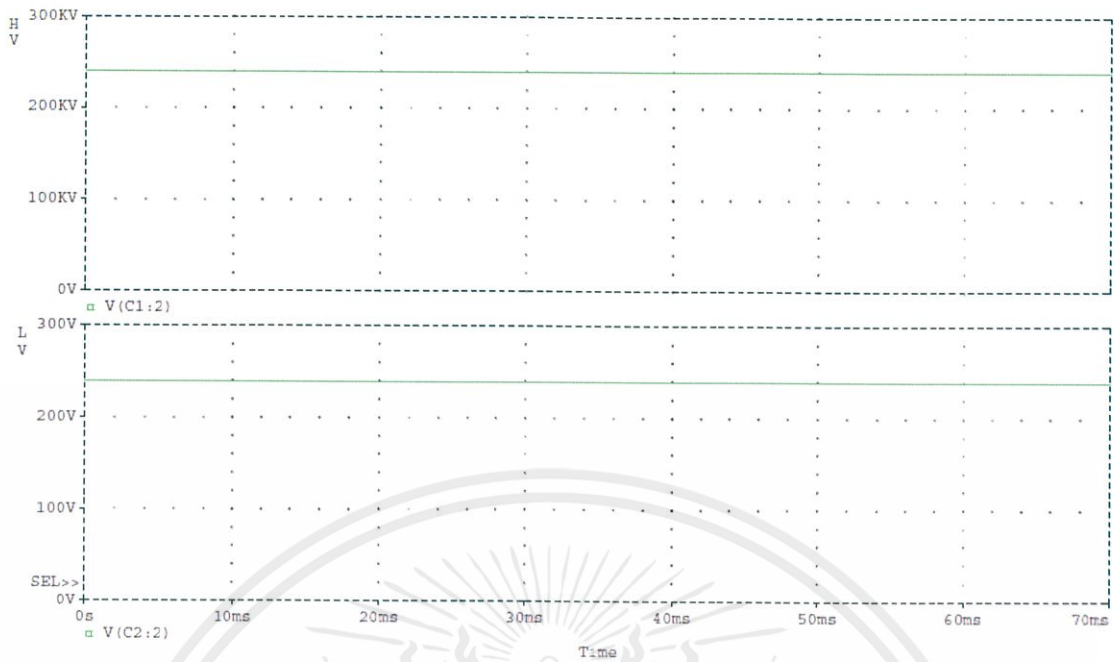
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.8.2.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV

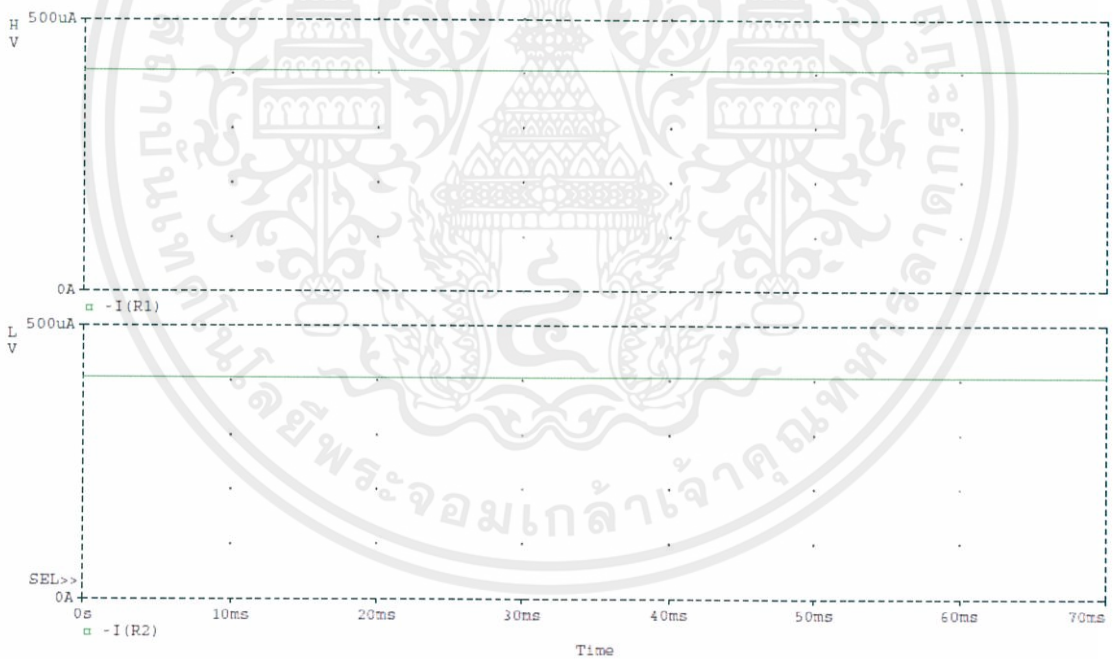


รูปที่ 3.34 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

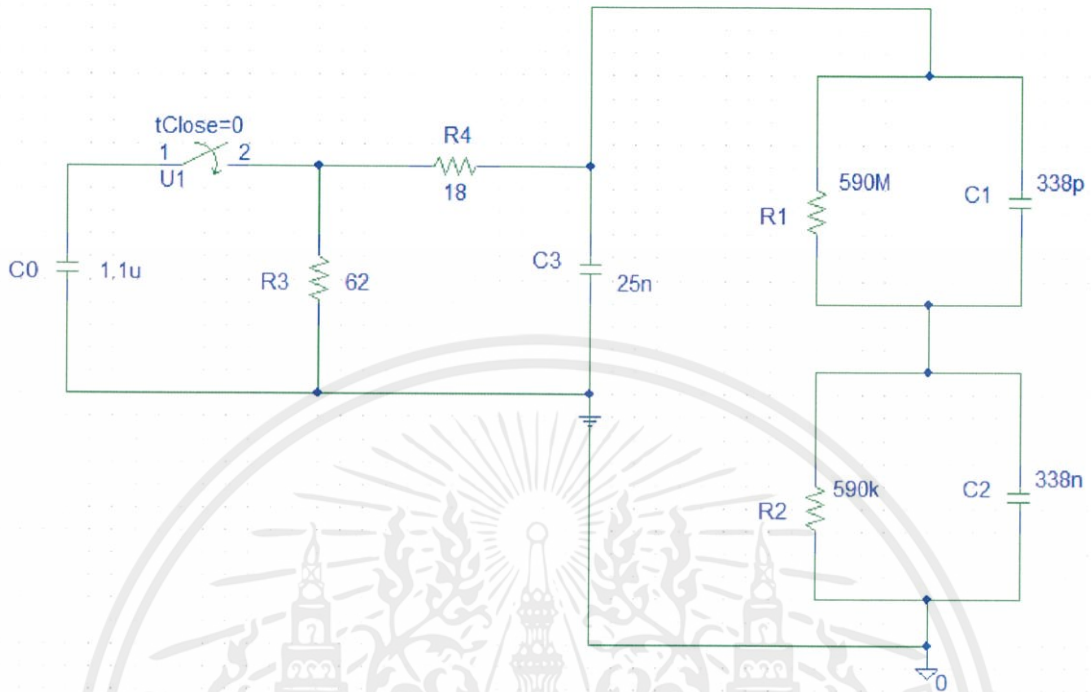


รูปที่ 3.35 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240 kV

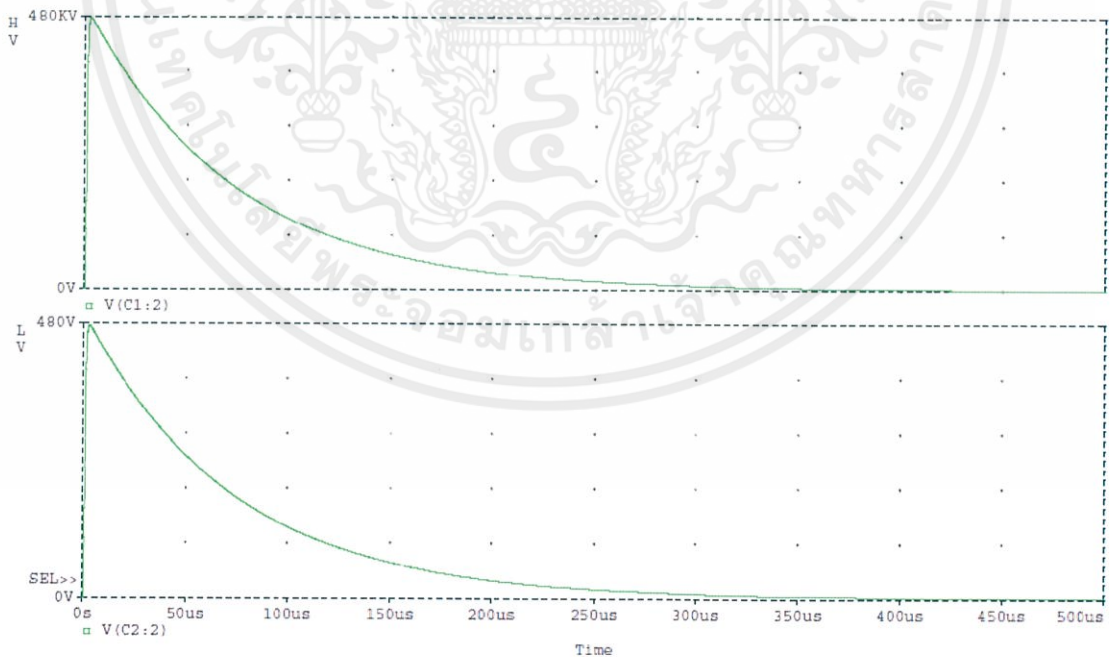


รูปที่ 3.36 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 240kV วัดตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 400  $\mu$ A

## 3.7.2.3 ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 480 kV

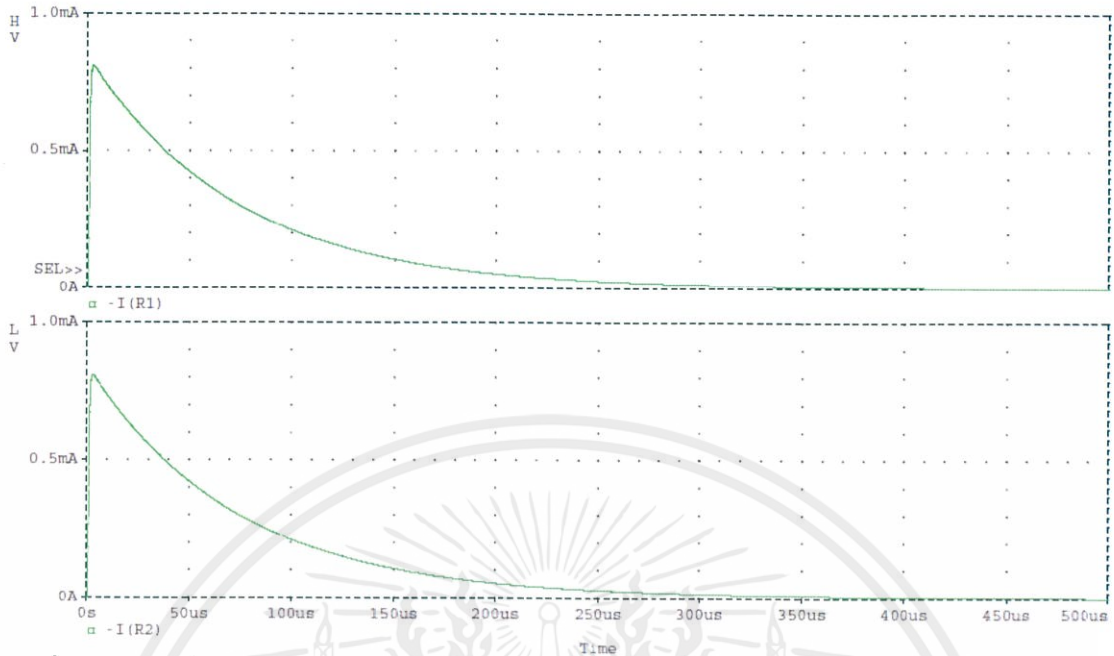


รูปที่ 3.37 วงจรแสดงการวัดแรงดันและกระแส เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 480 kV



รูปที่ 3.38 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อวัดแรงดันอิมพัลส์ 480 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุทของโวลท์เตจดีไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 480 kV โดยที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 0.8 mA



รูปที่ 3.40 โวลเตจดีไวเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

#### 4.1 บทนำ

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2(1994)[3]ซึ่งการทดสอบและการประมวลผลแบ่งหัวข้อตามลำดับต่อไปนี้

- ก) การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- ข) การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- ค) การหาผลตอบสนองของรูปขั้น (Unit step Response)
- ง) การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor Test)
- จ) การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)
- ฉ) การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test)
- ช) การทดสอบเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน

การทดสอบหาลักษณะต่าง ๆ ของโวลเตจดีไวเดอร์จะทำการวัด ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### 4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ

##### 4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

การวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงใช้เครื่องมือวัด RLC Meter ของ บริษัท HEWLETT PACKARD IMPEDANCE/GAIN-PHASE ANALYZER รุ่น 4194A การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ(Hz)	$C_1$ จากการคำนวณ (pF)	$C_1$ จากการวัด (pF)	Error%
100	339	337.45	0.46
1000	339	336.77	0.66
10000	339	337.04	0.58
100000	339	337.72	0.38

#### 4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำจะใช้วงจรถ่ายและเครื่องมือวัดชนิดเดียวกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ(Hz)	C <sub>2</sub> จากการคำนวณ (pF)	C <sub>2</sub> จากการวัด (pF)	Error%
100	339	337.33	0.49
1000	339	337.98	0.30
10000	339	337.04	0.58
100000	339	337,64	0.40

การหาค่า%ผิดพลาดได้จากสูตร

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

#### 4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง

##### 4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงใช้เครื่องมือวัด Mega Ohm Meter ของบริษัท YOGOGAWA รุ่น 2406 Digital Insulation Tester การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงที่ใช้ในการวัดภาคแรงสูงกระแสตรงแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง

R <sub>DC</sub> จากการคำนวณ(MΩ)	R <sub>DC</sub> จากการวัด(MΩ)	Error(%)
590	571	3.39

##### 4.3.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์

ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงอิมพัลส์ จะใช้ Multimeter ของบริษัท FLUKE รุ่น 189 TRUE RMS ผลการวัดแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.4

#### 4.4 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

##### 4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรง

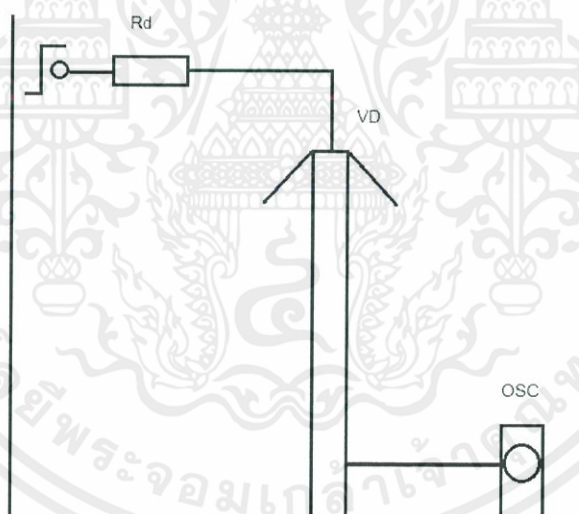
ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำกระแสตรงจะใช้ Multimeter ของบริษัท FLUKE รุ่น 189 TRUE RMS ผลการวัดแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงกระแสตรง

$R_{DC}$ จากการคำนวณ( $\Omega$ )	$R_{DC}$ จากการวัด( $\Omega$ )	Error(%)
590	592.5	0.42

#### 4.5 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

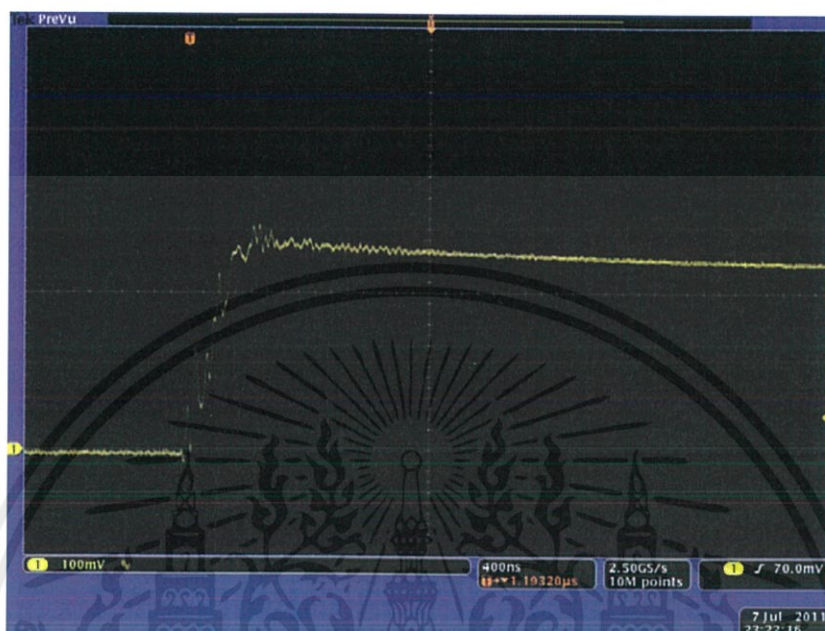
วงจรการหาผลตอบสนองรูปขั้น ใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [1] โดยต่อเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (Unit step generator) ของบริษัท DR. STRAUSS รุ่น RIG 1000-H ตามวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วงจรการหาผลตอบสนองรูปขั้น

- เมื่อ  $R_d$  คือ ตัวต้านทานหน่วง  
 $VD$  คือ โวลเตจดีไวเดอร์  
 $OSC$  คือ อุปกรณ์วัด เช่น ออสซิลโลสโคป

การหาผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีไวเตอร์แบบผสม ในที่นี้สายตัวนำที่ใช้จะเป็นสายเคเบิล RG-8 ซึ่งจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งจะได้รูปกราฟจากวงจรการหาผลตอบสนองรูปชั้นดังแสดงในรูปที่ 4.2



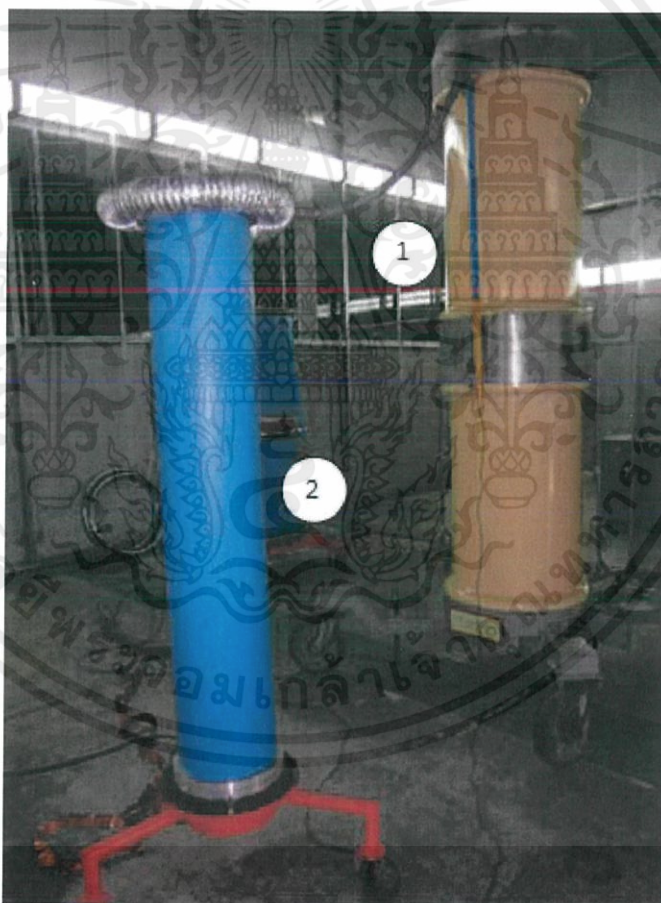
รูปที่ 4.2 รูปกราฟจากวงจรการหาผลตอบสนองรูปชั้น

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

เมื่อนำโวลเตจดีไวเตอร์ มาทดสอบหาผลตอบสนองรูปชั้นเพื่อดูความไวต่อการตอบสนองของโวลเตจดีไวเตอร์พบว่าโวลเตจดีไวเตอร์ มีความไวต่อการตอบสนอง แต่แรงดันอิมพัลส์ที่น้อยมาจากที่ตัวต้านทานตอบสนองได้ไม่ดีและมีสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นผลของตัวเหนี่ยวนำที่มีมากสังเกตได้จากกราฟ และเมื่อดูระยะเวลาขึ้นจะเห็นผลของตัวเก็บประจุจากการที่หางคลื่นใช้เวลาานานมาก กว่าแรงดันจะคงที่ ทำให้กราฟของผลตอบสนองรูปชั้นไม่เป็นที่ไปตามมาตรฐาน

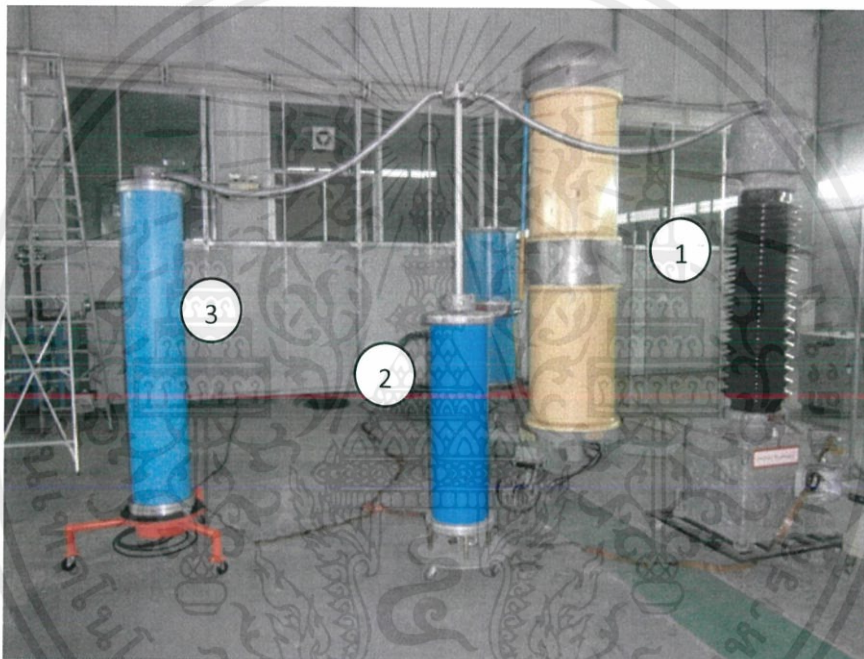
#### 4.6 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

ในขั้นตอนแรกของการทดสอบ จะทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Test) ก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าการฉนวนภายในของภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวนในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบเบรกดาวนในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัดจากการทดสอบเมื่อจ่ายแรงดันที่ 110% ของพิกัดแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที ไม่เกิดวابلไฟตามผิวฉนวนของท่อ และอุปกรณ์ภายในท่อ จึงสรุปได้ว่ามีความคงทนต่อแรงดันตามมาตรฐานกำหนด



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันสูงกระแสสลับ  
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ 2. โวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันสูง กระแสสลับโดยทำการต่อโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับที่จะทำการสอบเทียบ และ โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับตามรูปที่ 4.11 โดยจะทำการป้อนแรงดัน โดยทำการบันทึกขนาดแรงดันตั้งแต่ 10 kV ถึง 90kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 100kV เป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันไว้ที่ พิกัดเป็นเวลา 15 นาที และทำการวัดสเกลแฟกเตอร์ที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อความมีเสถียรภาพของระบบวัด (Short-term Stability Test) โดยสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 4.4 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ  
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ 2. โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสลับ

TEST REPORT FOR HIGH VOLTAGE DIVIDER																						
TEMPERATURE 30 ° C					HUMIDITY 76%					PRESSURE 760 hPa												
Level (kVac)	SET RATIO NORMA(REF.) 1000			SET RATIO NORMA(UUC) 1			SET RATIO NORMA(UUC) 1			SET RATIO NORMA(UUC) 1			SET RATIO NORMA(UUC) 1									
	Ref. (kV)	UCC (V)	SF No.1	Ref. (kV)	UCC (V)	SF No.2	Ref. (kV)	UCC (V)	SF No.3	Ref. (kV)	UCC (V)	SF No.4	Ref. (kV)	UCC (V)	SF No.5	Ref. (kV)	UCC (V)	SF No.5	Aver. Ref. (kV)	Aver. UCC (V)	Dev %	SCALE FACTOR
10	10.08	9.67	1042	9.96	9.58	1039	9.82	9.42	1042	10.02	9.60	1043	10.00	9.60	1041	9.97	9.57	1041	9.97	9.57	4.01	1041
20	20.00	19.40	1030	19.96	19.20	1039	19.84	19.01	1043	20.03	19.19	1043	20.03	19.21	1042	19.97	19.20	1040	19.97	19.20	3.85	1040
30	30.10	29.10	1034	29.96	28.77	1041	30.02	28.77	1043	29.96	28.71	1043	29.87	28.70	1040	29.98	28.81	1040	29.98	28.81	3.90	1040
40	40.14	38.82	1034	40.51	38.88	1041	40.06	38.42	1042	40.14	38.50	1042	39.83	38.22	1042	40.13	38.56	1040	40.13	38.56	3.91	1040
50	50.40	48.70	1034	50.58	48.60	1040	50.12	48.10	1041	50.34	48.30	1042	49.90	47.90	1041	50.26	48.32	1040	50.26	48.32	3.85	1040
60	60.10	58.11	1034	60.23	57.90	1040	60.25	57.86	1041	59.89	57.44	1042	60.37	58.00	1040	60.16	57.86	1039	60.16	57.86	3.82	1039
70	70.19	67.80	1035	69.95	67.30	1039	70.01	67.30	1040	70.24	67.40	1042	70.01	67.30	1040	70.08	67.42	1039	70.08	67.42	3.79	1039
80	79.97	77.20	1035	80.34	77.40	1037	79.96	76.80	1041	80.47	77.20	1042	79.97	77.00	1038	80.14	77.12	1039	80.14	77.12	3.76	1039
90	90.01	86.32	1042	90.12	86.63	1040	90.24	86.47	1043	90.11	86.35	1043	90.42	86.75	1042	90.18	86.50	1042	90.18	86.50	4.08	1042
																					Average ratio	1040

อุปกรณ์ที่ใช้: - Digital insulation taster YOGOGA WA 24060 1000V 2000MΩ

- FLUKE 189 True rms Multimeter

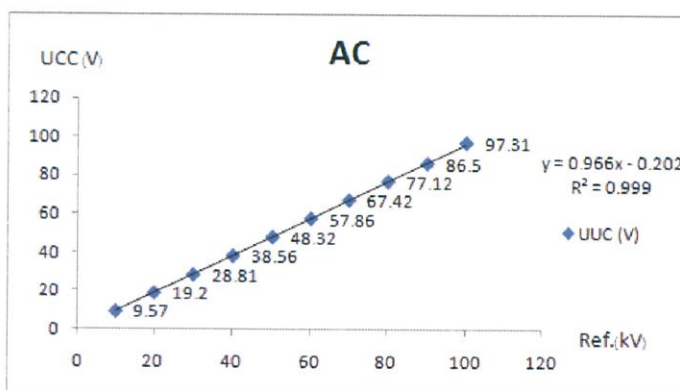
- ชุดความถี่ AC High voltage Generator 145kV 50Hz

- UNIVERSAL REFERENCE VOLTAGE DIVIDER 100kV

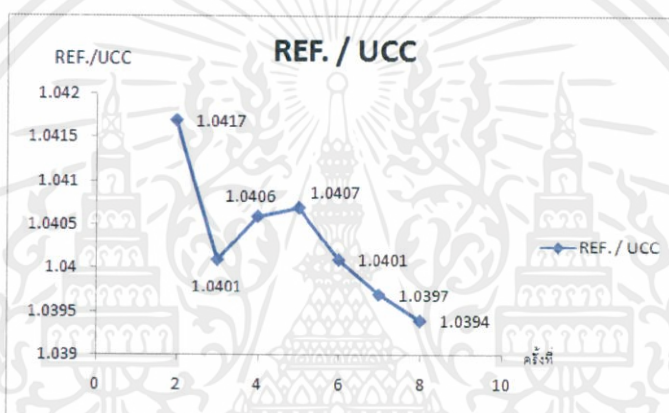
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสลับที่ระดับแรงดัน  
100kVและหลังจาก 100kV 15นาที

No.	100		100 (After 15 min )	
	Ref.(kV)	UCC(V)	Ref.(kV)	UCC(V)
1	99.89	97.57	99.96	97.01
2	100.32	97.34	100.41	97.43
3	100.04	97.25	100.02	97.05
4	100.22	97.10	100.32	97.40
5	100.43	97.03	100.14	97.43
6	100.02	97.27	99.92	97.40
7	100.31	97.44	100.07	97.10
8	99.78	97.51	100.33	97.60
9	99.69	97.46	100.03	97.12
10	100.41	97.13	99.89	97.10
Aver.	100.11	97.31	100.10	97.26
Dev %	2.79		2.83	
SCALE FACTOR	1028.7		1029.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่าง UCC และ Ref. ที่ระบบทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ



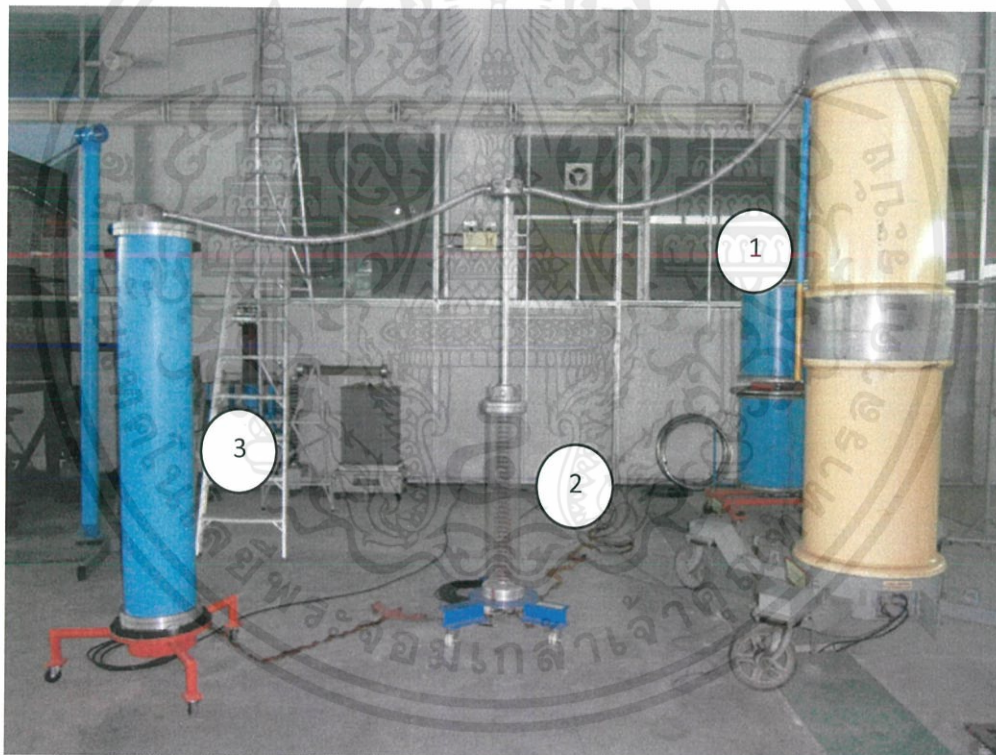
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของ REF. / UCC ที่ระบบทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

REF.(kV)	UCC(kV)	REF. / UCC	Diff(%)
9.97	9.57	1.0417	0.040
19.97	19.20	1.0401	0.038
29.98	28.81	1.0406	0.039
40.13	38.56	1.0407	0.039
50.26	48.32	1.0401	0.038
60.16	57.86	1.0397	0.038
70.08	67.42	1.0394	0.037
80.14	77.12	1.0391	0.037
90.18	86.50	1.0425	0.040
Avg.		= 1.0404	

#### 4.6 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

เนื่องจากทดสอบความคงทนอยู่ได้ของแรงดันสูงกระแสสลับไปแล้ว จึงไม่ต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ของแรงดันกระแสตรง สามารถทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงได้เลยโดยทำการต่อโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสตรงที่จะทำการสอบเทียบ และโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงตามรูปที่ 4.6 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 10kV ถึง 80kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง เพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) โดยสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 4.7 รูปวงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

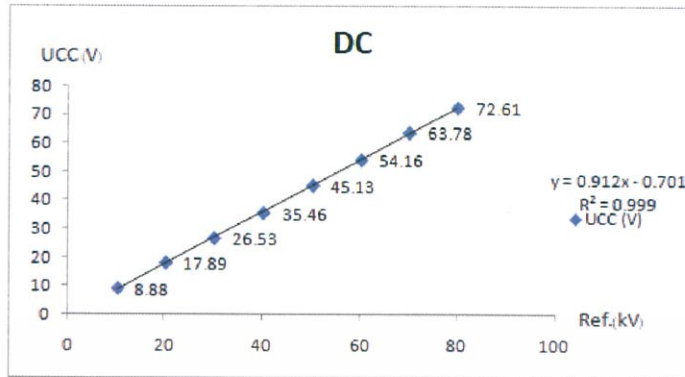
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง 2. โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

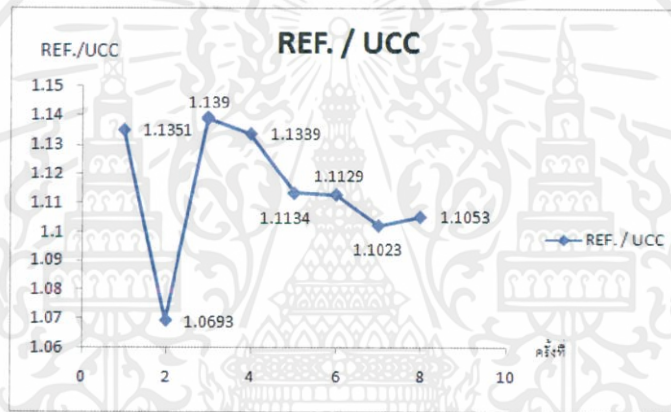
TEST REPORT FOR HIGH VOLTAGE DIVIDER															
TEMPERATURE 29 ° C					HUMIDITY 75%					PRESSURE 760 hPa					
SET RATIO NORMA(REF.) 1000															
SET RATIO NORMA(UUC) 1															
Level (kVdc)	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		SF		
	Ref. (kV)	UCC (V)	Ref. (kV)	UCC (V)	Ref. (kV)	UCC (V)	Ref. (kV)	UCC (V)	Ref. (kV)	UCC (V)	Ref. (kV)	UCC (V)	Ref. (kV)	UCC (V)	
10	9.64	9.76	10.12	8.51	10.32	8.74	10.25	8.65	10.15	8.62	10.05	9.02	10.08	8.88	
20	20.13	18.05	20.31	18.87	20.50	18.74	20.10	17.14	20.04	17.45	20.17	17.14	20.20	17.89	
30	30.01	27.65	30.55	27.10	30.47	26.72	30.19	26.63	30.12	26.03	30.01	25.10	30.22	26.53	
40	40.14	36.85	40.23	36.11	40.11	34.87	40.32	35.11	40.21	35.17	40.26	34.67	40.21	35.46	
50	50.22	46.48	50.47	45.67	50.24	45.13	50.14	45.42	50.23	44.36	50.21	43.75	50.25	45.13	
60	60.05	55.71	60.26	55.32	60.78	53.25	60.23	54.33	60.07	53.67	60.34	52.70	60.28	54.16	
70	70.41	64.32	70.58	64.71	70.21	64.32	70.14	63.72	70.22	63.14	70.31	62.49	70.31	63.78	
80	80.22	73.64	80.41	72.47	80.32	72.61	80.24	72.41	80.13	72.56	80.24	71.97	80.26	72.61	
													Average ratio		112!

อุปกรณ์ที่ใช้:

- อุปกรณ์ที่ใช้: UNIVERSAL REFERENCE VOLTAGE DIVIDER 100kV
- Digital insulation taster YOGOGAWA 24060 1000V 2000MΩ
- FLUKE 189 True rms Multimeter
- ชุดควบคุม DC High voltage Generator HI-TESTER
- DC Transformer - 600kV 10mA



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่างUCCและRef.ที่ระบบทดสอบต่างๆของระบบวัดแรงดันกระแสตรง



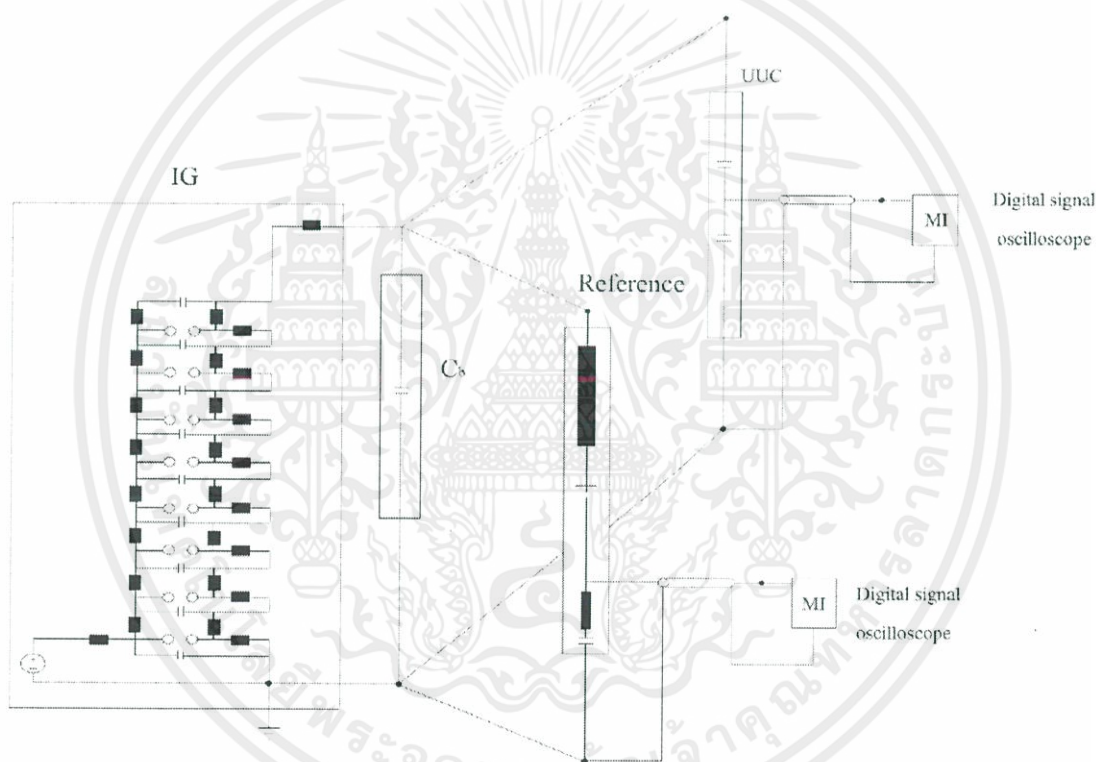
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของ REF. / UCC ที่ระบบทดสอบต่างๆของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

REF.(kV)	UCC(kV)	REF. / UCC	Diff(%)
10.08	8.88	1.1351	0.119
20.20	17.89	1.0693	0.114
30.22	26.53	1.1390	0.122
40.21	35.46	1.1339	0.118
50.25	45.13	1.1134	0.101
60.28	54.16	1.1129	0.101
70.31	63.78	1.1023	0.092
80.26	72.61	1.1053	0.095
Avg.		= 1.1139	

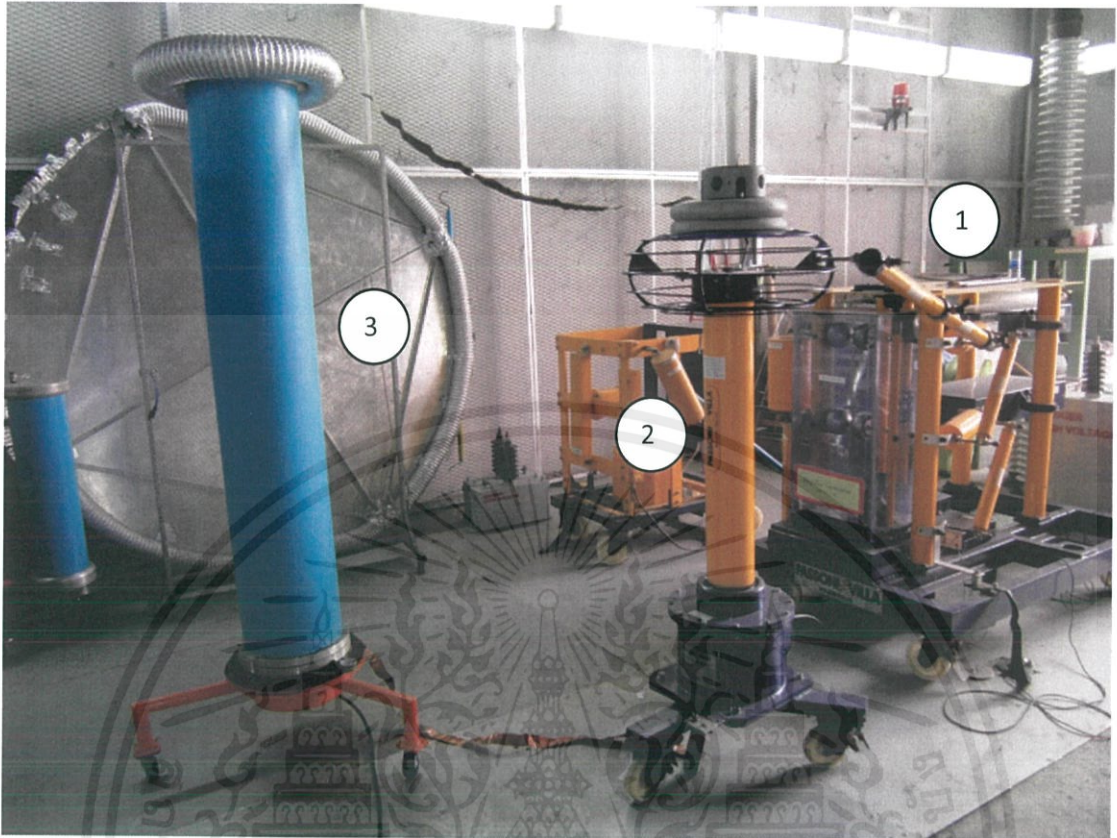
#### 4.7 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

ในการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงอิมพัลส์จะทำการต่ออิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ต้องการสอบเทียบ และอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนานกันเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามรูปที่ 4.15-4.16 การหาค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันที่ระบบแรงดันต่างๆตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [1] ซึ่งกำหนดค่าต่างๆสำหรับการวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยกำหนดให้ค่ายอดที่ค่า  $\pm 3\%$  เวลาหน้าคลื่น  $\pm 30\%$  และเวลาหลังคลื่น  $\pm 20\%$  โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบที่ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของเวลารูปคลื่นมาตรฐาน ( $1.2/50\mu\text{s}$ ) นั่นคือ  $0.86/60\mu\text{s}$  และ  $1.56/60\mu\text{s}$



รูปที่ 4.10 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆของระบบวัดอิมพัลส์

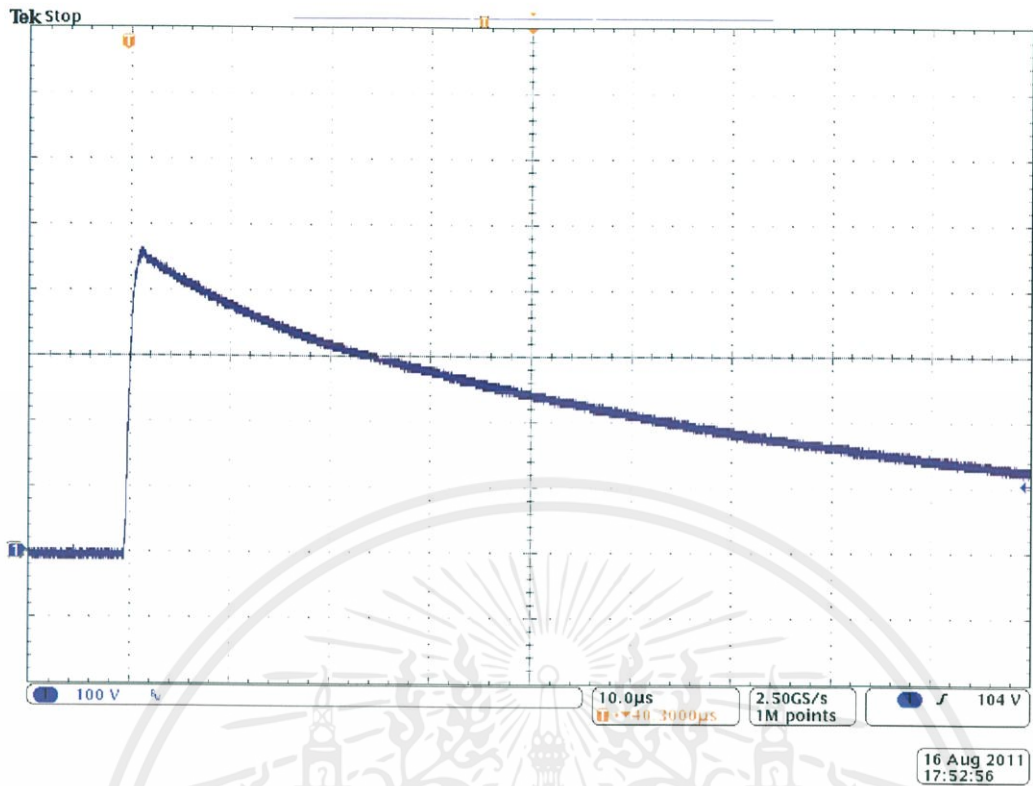
โดย	IG	คือ	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
	Cb	คือ	ตัวเก็บประจุไหลตสำหรับปรับรูปคลื่น
	AT	คือ	ตัวลดทอนแรงดัน
	Reference	คือ	อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง
	UUC	คือ	อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการสอบเทียบ



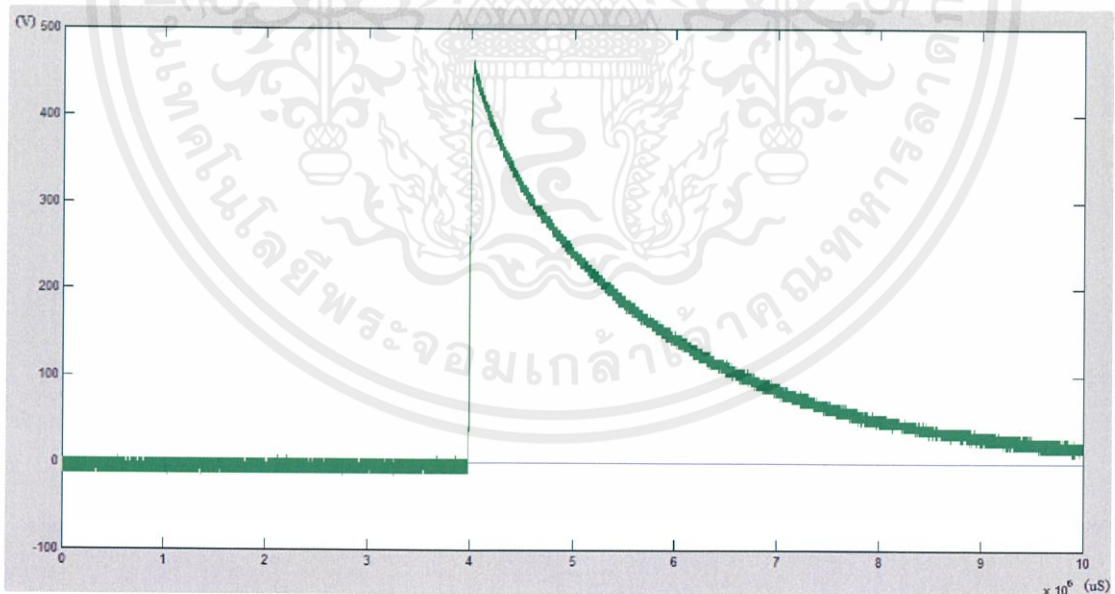
รูปที่ 4.11 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆของระบบวัตติมพัลส์

1.เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2.โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3.โวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

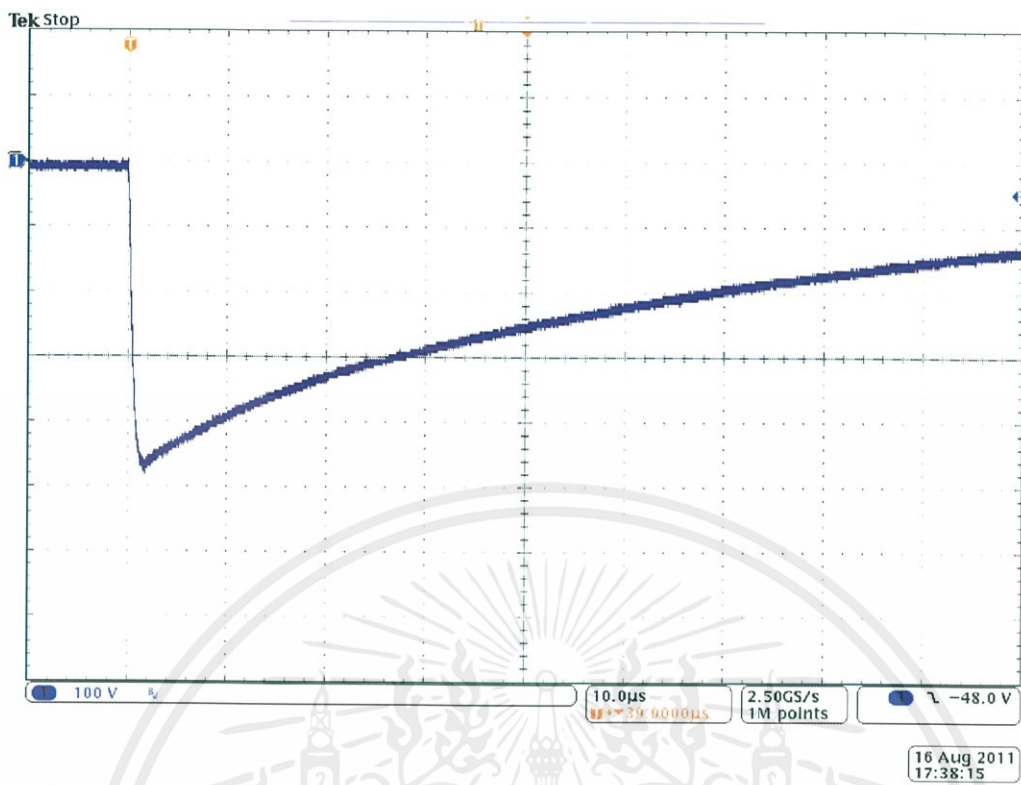
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



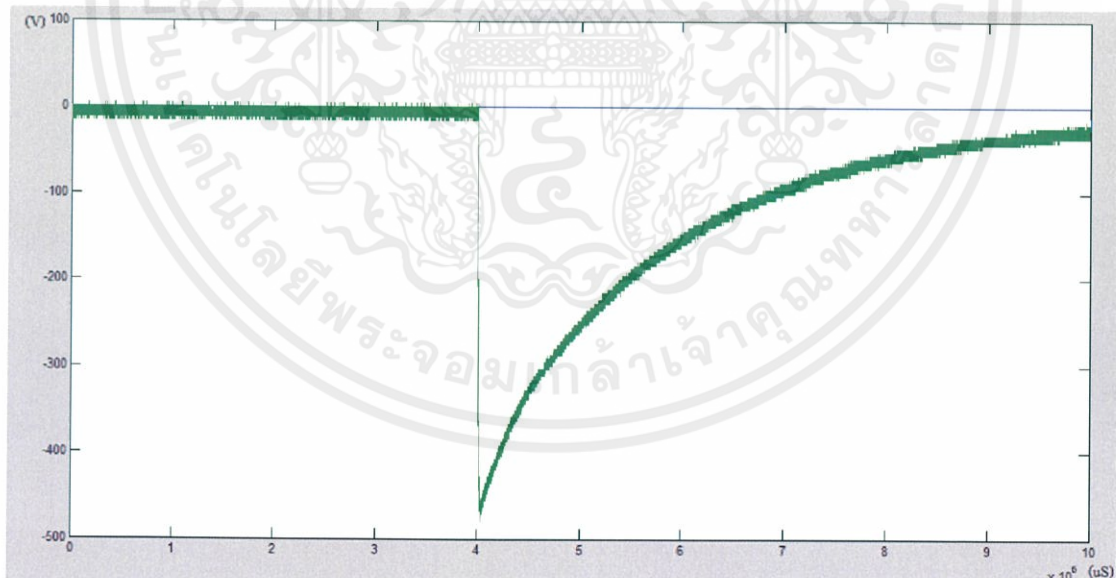
รูปที่ 4.12 ผลการวัดปรับเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{s}$  ชั่วบวก จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงวัดจากสโคปได้ค่า  $T_1 = 0.95 \mu\text{s}$  ,  $T_2 = 53 \mu\text{s}$



รูปที่ 4.13 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดปรับเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{s}$  ชั่วบวกจากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ไป Plot ด้วยโปรแกรม MATLAB 7.8.0

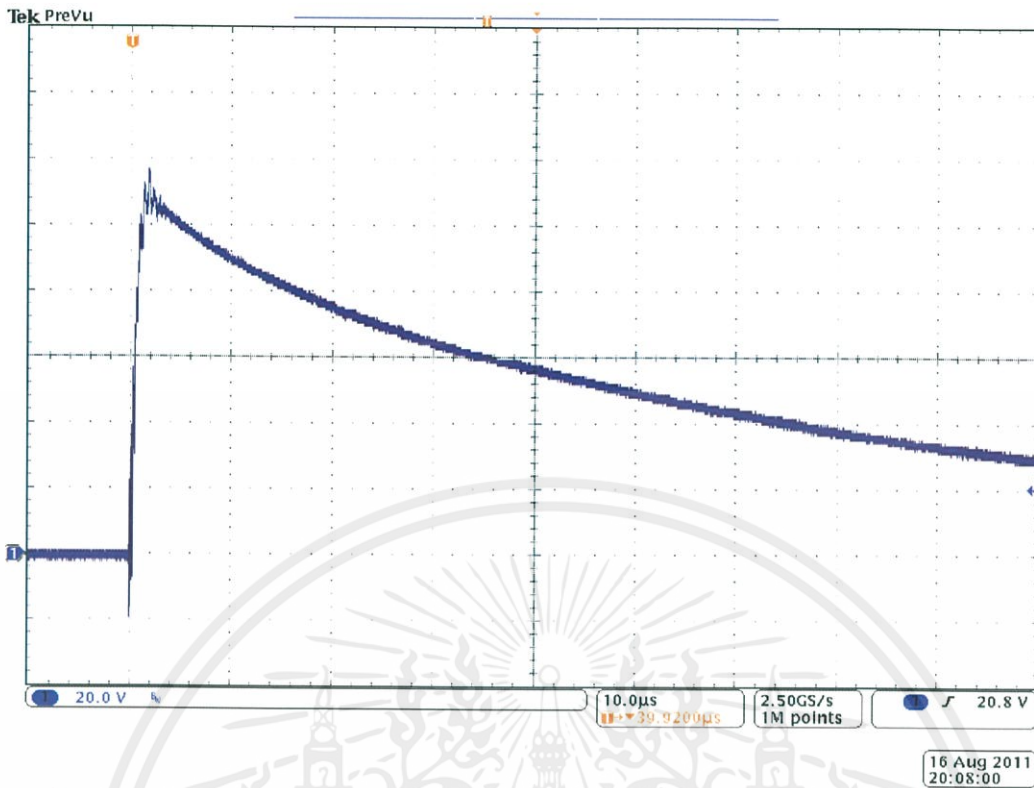


รูปที่ 4.14 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{s}$  ขั้วลบ จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง วัดจากสโคปได้ค่า  $T_1 = 1.1 \mu\text{s}$  ,  $T_2 = 48.9 \mu\text{s}$

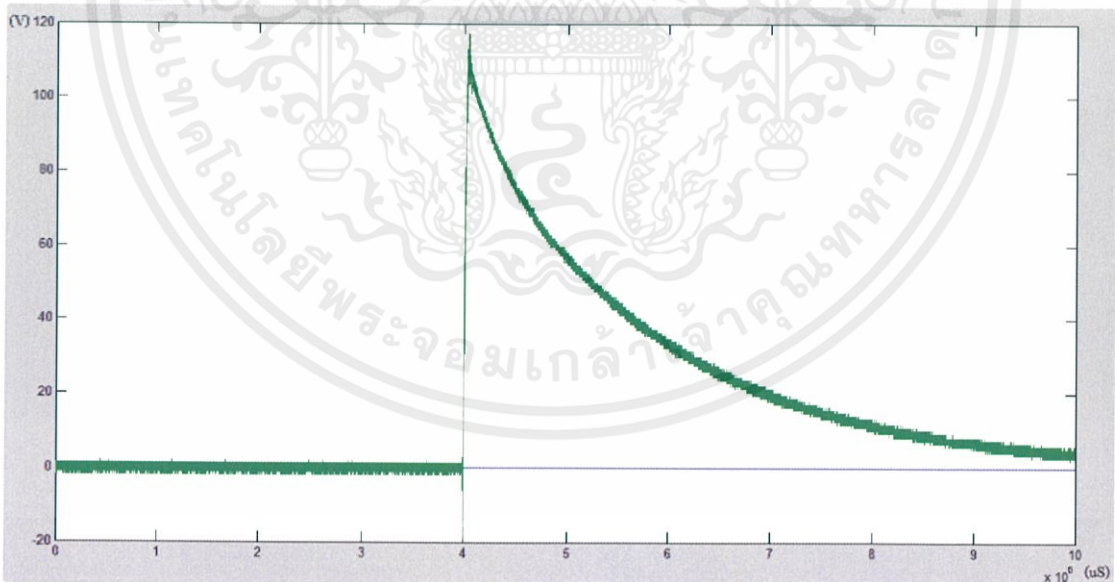


รูปที่ 4.15 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{s}$  ขั้วลบจากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ไป Plot ด้วยโปรแกรม MATHLAB 7.8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

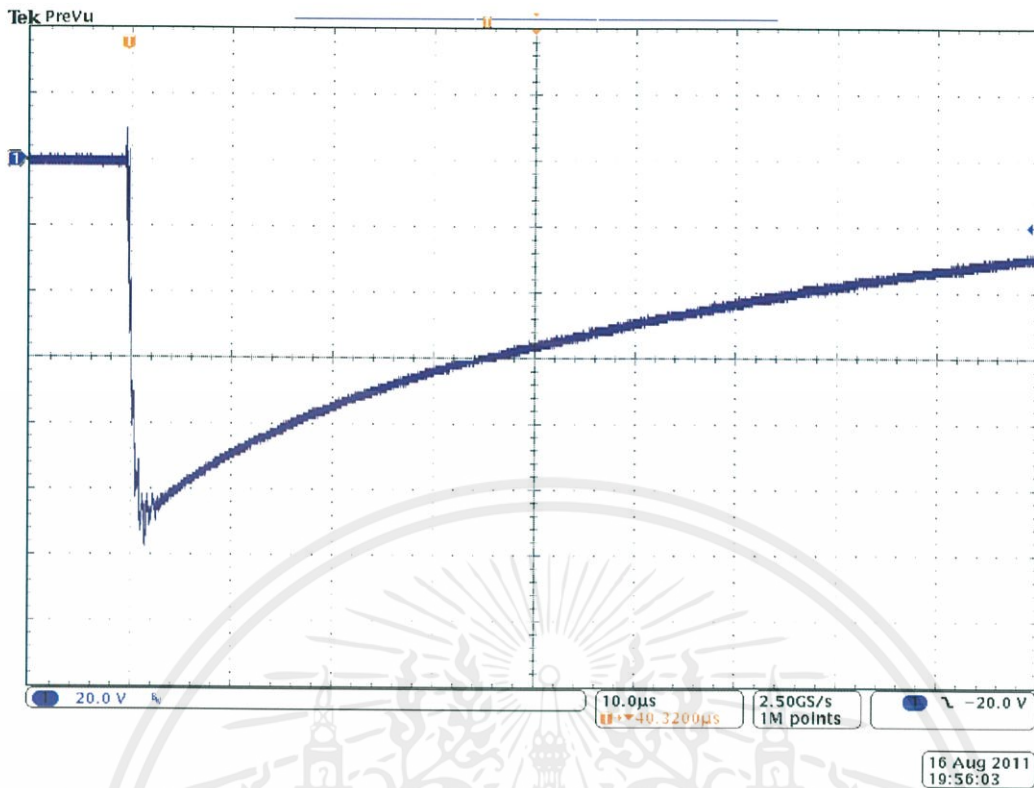


รูปที่ 4.16 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{S}$  ขั้วบวก จากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ วัดจากสโคปได้ค่า  $T_1 = 0.9 \mu\text{S}$  ,  $T_2 = 57\mu\text{S}$

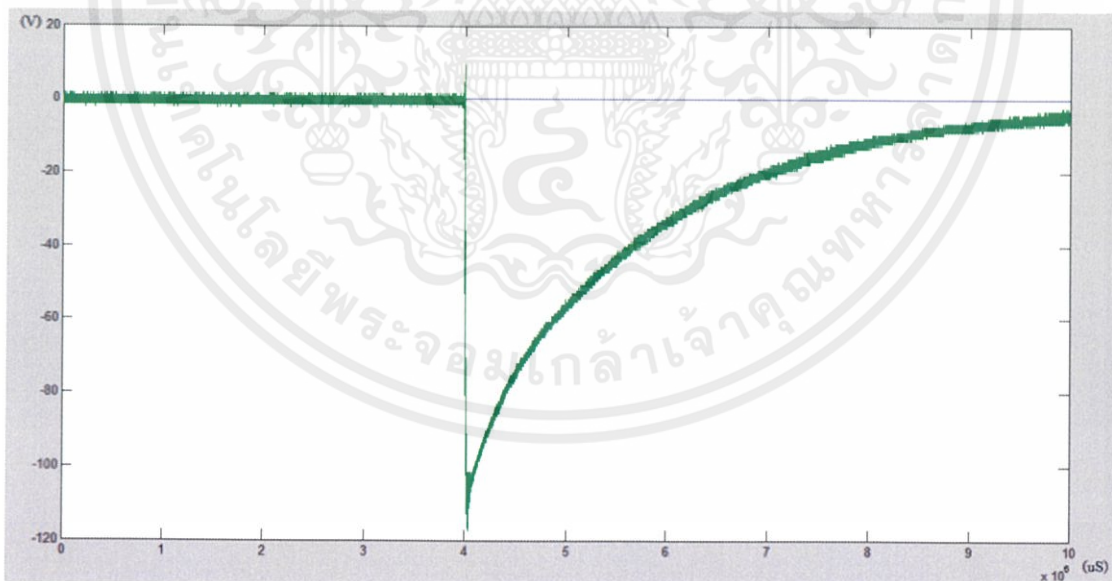


รูปที่ 4.17 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{S}$  ขั้วบวกจากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ ไป Plot ด้วยโปรแกรม MATLAB 7.8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{S}$  ขั้วลบ จากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบวัดจากสโคปได้ค่า  $T_1 = 1.01 \mu\text{S}$  ,  $T_2 = 49 \mu\text{S}$



รูปที่ 4.19 รูปกราฟที่ได้จากการนำชุดข้อมูลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่านรูปคลื่นเต็ม 1.56/60  $\mu\text{S}$  ขั้วลบจากโวลเตจดีไวเดอร์สอบเทียบ ไป Plot ด้วยโปรแกรม MATLAB 7.8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัญหาโดยรวมที่พบในโครงการงานโวลต์เตจดีไวเดอร์คือ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ นั้นมีความละเอียดมากในการเลือกใช้ ซึ่งจะต้องทำการคำนวณและหาข้อมูลรวมทั้งรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆก่อนนำมาใช้ รวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักมาก โดยได้ใช้เหล็กในการเป็นฐานด้านแรงต่ำเพราะมีราคาถูกกว่าอลูมิเนียม ทำให้เกิดความลำบาก เวลาถอดชิ้นส่วนของโวลต์เตจดีไวเดอร์เพื่อแก้ไขวงจรภายใน น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนี้เองทำให้ล้อสำหรับเคลื่อนย้ายโวลต์เตจดีไวเดอร์ เคลื่อนที่ได้ยากลำบากเพราะน้ำหนักมากและประกอบกับตัวล้อมีความฝืด ส่วนการเลือกใช้ท่อพีวีซีควรเลือกใช้ท่อพีวีซีที่มีความหนาเพื่อความปลอดภัยในเวลาอัดก๊าซ ส่วนแผ่นอะคริลิกได้ใช้แผ่นบางเกินไปสาเหตุเนื่องมาจากข้อจำกัดของจำนวนชั้น รวมถึงจำนวนตัวเก็บประจุที่ต้องใส่ในแต่ละชั้น ทำให้เวลาตั้งแผ่นขึ้น ตัวแผ่นจะตั้งได้อย่างไม่มั่นคงทำให้เกิดความเสี่ยงที่แผ่นอะคริลิกอาจหักได้ จึงแก้ปัญหาด้วยการทำแท่งยึดอลูมิเนียมระหว่างท่อPVC และแผ่นอะคริลิก ทางด้านส่วนปลายของแผ่นอะคริลิกเมื่อนำแผ่นอะคริลิกใส่เข้าไปในท่อจึงสามารถตั้งอยู่ได้อย่างมั่นคง ส่วนการประกอบตัวเก็บประจุเข้ากับแผ่นอะคริลิกควรใช้กาวยาง หรือซิลิโคนเป็นตัวยึดตัวเก็บประจุทั้งนี้เพื่อให้ตัวเก็บประจุและแผ่นอะคริลิกยึดติดกันได้อย่างแน่นหนา

จากการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับพบว่าค่าความผิดพลาดยังอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้ [2] อัตราส่วนของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้

ส่วนการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงตรงพบว่าอัตราส่วนของโวลต์เตจดีไวเดอร์มีค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นจากการออกแบบ ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นคาดว่าน่าจะเกิดจากหลายปัจจัย สาเหตุหนึ่งก็คือการเกิดโคโรนาขึ้นตามขอบคมของโวลต์เตจดีไวเดอร์ โดยเฉพาะบริเวณอิเล็กโตรดทั้งด้านบนและด้านล่าง และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะช่วงเวลาในการทำการทดสอบทำในช่วง บ่าย-กลางคืน ซึ่งช่วงเวลานี้จะมีความชื้นในอากาศสูงและทดสอบในช่วงฤดูฝน ทำให้ในแต่ละวันจะมีความชื้นในอากาศในปริมาณที่สูง จึงทำให้เกิดโคโรนาที่อิเล็กโตรดทั้งด้านบนและด้านล่าง การเกิดโคโรนาด้านล่างของโวลต์เตจดีไวเดอร์ สาเหตุที่น่าจะเกิดจากความชื้นส่วนหนึ่งและอีกสาเหตุคือการใช้เหล็กเป็นฐานด้านแรงต่ำ เมื่อป้อนแรงดันต่ำเข้าสู่โวลต์เตจดีไวเดอร์ เหล็กทั้งแผ่นยังไม่เป็นตัวต้านทานโดยสมบูรณ์ เมื่อป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเต็มพิกัดเหล็กทั้งแผ่นจะเป็นตัวต้านทานโดยสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความสูญเสียขึ้นทางด้านแรงต่ำทำให้อัตราส่วนของโวลต์เตจติไวเตอร์ผิดเพี้ยนไปจากที่คำนวณไว้ จึงแก้ปัญหาด้วยการนำฐานเหล็กทางด้านแรงต่ำไปเจาะรูตรงด้านท้ายแล้วติดฉนวนซูพิลินซึ่งตรงกลางฉนวนจะมีแท่งอลูมิเนียมตัวนำติดอยู่เพื่อให้แรงดันที่ล่งสู่ภาคแรงต่ำผ่านลงไปที่ฐานของโวลต์เตจติไวเตอร์ได้

ส่วนการวัดแรงดันอิมพัลส์พบว่าค่าความผิดพลาดยังอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ แต่รูปคลื่นยังมีผลกระทบของ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นในวงจรทางด้านแรงสูง เนื่องจากได้ใช้ท่อทองแดงเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างขาของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานจึงทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำแฝงมากส่วนอีกสาเหตุหนึ่งอาจมาจากสายเคเบิลภายในห้องแลปซึ่งเกิดการขำรุคภายในจึงส่งผลให้ผลการทดสอบที่อ่านค่าได้เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ได้ส่งผลให้รูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์มีค่าความผิดเพี้ยนไปจากเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สามารถวัดค่าได้ทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ พบว่ามีความละเอียดมากในการออกแบบสร้าง เช่น การเลือกขนาดของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ การเลือกขนาดท่อ การสั่งทำแผ่นอะคิลิกเซาะร่อง และการสั่งกลึงอิเล็กทรอนิกส์ด้านบนและด้านล่างรวมทั้งกล่องใส่วงจรภาคแรงต่ำก็ใช้เวลานาน และอีกปัญหาหนึ่งที่พบคือ เนื่องจากผู้จัดทำได้ใช้ท่อทองแดงในการเชื่อมขาของอุปกรณ์ในภาคแรงสูงจึงทำให้เกิดผลเสียในเรื่องของค่าความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นมากภายในวงจรทำให้มีผลของการออสซิลเลตเกิดขึ้นในด้านการทดสอบเรื่อง Unit step response และการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ รวมทั้งสายเคเบิลที่ใช้ในการวัดบางเส้นเกิดชำรุดและเสื่อมสภาพ จึงต้องทำการเปลี่ยนสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบหลายครั้ง ดังนั้นจากปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจึงสรุปได้ว่า ควรพยายามหาทางให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝงน้อยที่สุด ควรตัดขาตัวต้านทานและตัวเก็บประจุให้สั้นและเลือกใช้ท่อทองแดงขนาดเล็กหรือใช้ลวดเส้นเล็กๆ เชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุกับตัวต้านทาน และพยายามทำทุกส่วนของโวลต์เตจดีไวเดอร์ให้มีขอบคมน้อยที่สุดเพื่อลดการเกิดโคโรนา และเลือกใช้วัสดุที่ลดการเกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication No.71. Insulation Co-ordination,1976.
- [2] IEC 61010-1 Edition2, Safty require for electrical equipment for measurement ,control and laboratory,Part 1:General requipment 2001.
- [3] IEC 60060-2 High Voltage test technique, Part 2: Measuring System,1994.
- [4] วิชัย เตยวงศ์ศักดิ์, การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 400 กิโลโวลท์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,ปี 2524.
- [5] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลท์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,ปี 2524.
- [6] อนันท์ คัมภีรานนท์ และรุจี จันทรชิวา, ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น , สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี
- [7] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1,ฉนวนและวัสดุฉนวน,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สำรวย สังข์สะอาด, เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1, ฉนวนและวัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] วรา จุห้อง,การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลท์ แบบตัวเก็บประจุ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,ปี 2524.
- [11] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,ปี 2527.
- [12] ปริญญา ชมลิม, พีรวิทย์ ยุทธโกวิท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, ปิยะบุตร พุกษานูบาล ,อานันท์วัฒน์คุณากร และสุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, “ วิธีการพัฒนาปรับปรุงผลตอบสนองทางเวลาของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ”, การประชุมทางวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 29. ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ปริญญา ชมลิ้ม, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, นรเศรษฐ พัฒนเดช, ปิยะบุตร พุกษานูบาล ,อานันท์วัฒน์คุณากร และสุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร, “ วิธีการพัฒนาปรับปรุงผลตอบสนองทางเวลาของโวลเตจดีไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ”, การประชุมทางวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 29. ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549, หน้า 257
- [14] สุชาติ มณฑปใหญ่ และคณะ “การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสมขนาด 300kV” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



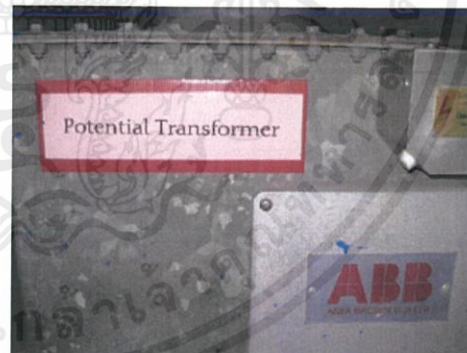


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพและรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ ภายในห้องปฏิบัติการ  
ไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



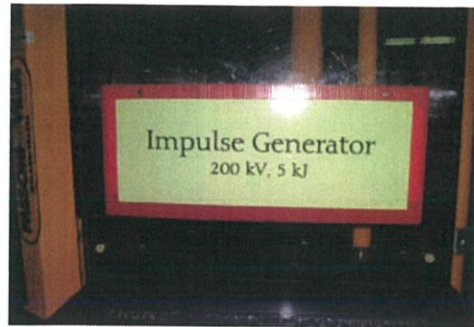
- DC Transformer 600kV 10mA



Potential Transformer (ABB Switch gear)

- Voltage Transformer
- Insulation 275-650 kV
- Standard IEC 186
- Total mass 590kg
- TYPE EMFE 145
- Highest system Voltage 145kV/50Hz
- Voltage Factor 1.5/30s.
- Manufacturing Year 1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ Impulse Generator 200kV,5kJ

(PASSONI VILLA,MILANO-ITALIA)

- Supply Voltage 220V
- Maximun Current 0.02A
- Middle current 0.01A
- Polarity +/-
- Number 04938
- Year 1994



Damped Capacitive Voltage Divider (PASSONI VILLA,MILANO-ITALIA)

- Type ILCD-200
- Impulse Voltage 1,2/50  $\mu$ S 200kV
- Impulse Voltage 250/2500  $\mu$ S 200kV
- Continuous Voltage 50Hz 50kV
- Rate Capacitance 4200 pF
- Rate Series Resistance 50 $\Omega$
- Year 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง  
ที่ใช้ในระบบวัดแรงดันกระแสสลับ  
- Nameplate unspecified



โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง  
ที่ใช้ในระบบวัดแรงดันกระแสตรง  
- R-C Voltage divider  
- Rated Voltage AC/DC 50kV  
- Rated Ratio AC/DC 1000/1  
- Rated Capacitance(Hi) 104.7 pF  
- Rated Capacitance(Low) 104.7 nF  
- Rated Resistance(Hi) 350M $\Omega$   
- Rated Resistance(Low) 350 $\Omega$   
- Frequency 50Hz Filling O<sub>2</sub>

# PHE450

**RoHS**  
Compliant

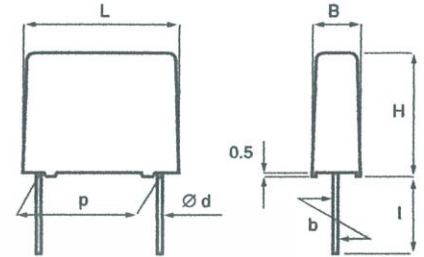
- Double metallized film pulse capacitor, polypropylene dielectric
- According to IEC 60384-17 Grade 1.1
- Small sizes

## TYPICAL APPLICATIONS

High frequency applications with high current stress, such as deflection circuits in TV-sets, protection circuits in SMPS and in electronic ballasts.

## CONSTRUCTION

Polypropylene dielectric with double metallized polyester film as electrodes. Encapsulation in self-extinguishing material meeting the requirements of UL 94V-0.



## TECHNICAL DATA

<b>Rated voltage <math>U_R</math>, VDC</b>	250	400	630	1000	1600	2000	2500	3000
<b>Rated voltage <math>U_R</math>, VAC</b>	180	250	300/400	375/600	650	700	900	1000
<b>Capacitance range</b>	330pF– 10 $\mu$ F	330pF– 5.6 $\mu$ F	330pF– 3.3 $\mu$ F	330pF– 2.2 $\mu$ F	2.7nF– 1.0 $\mu$ F	1.0nF– 0.68 $\mu$ F	1.0nF– 0.33 $\mu$ F	1.0nF– 0.033 $\mu$ F

**NEW RANGE**

**Capacitance values** In accordance with IEC E12 series.  
**Capacitance tolerance**  $\pm 5\%$  standard. Other tolerances on request

**Category temperature range**  $-55^\circ\text{C}$  to  $+105^\circ\text{C}$

**Rated temperature**  $+85^\circ\text{C}$

**Voltage derating** The rated voltage is decreased with  $1.3\% / ^\circ\text{C}$  between  $+85^\circ\text{C}$  and  $+105^\circ\text{C}$

**Climatic category** 55/105/56/B

**Test voltage between terminals** The 100 % factory test is carried out at  $1.6 \times U_R$  VDC

**Insulation resistance** Measured at  $23^\circ\text{C}$ , 100 VDC 60s for  $U_R < 500$  VDC and at 500 VDC for  $U_R \geq 500$  VDC  
Between terminals:  
 $C \leq 0.33 \mu\text{F}$ :  $\geq 100\,000 \text{ M}\Omega$   
 $C > 0.33 \mu\text{F}$ :  $\geq 30\,000 \text{ s}$   
Between terminals and case:  
 $\geq 100\,000 \text{ M}\Omega$

**Dissipation factor  $\tan\delta$**  Maximum values at  $23^\circ\text{C}$

	$C \leq 0.1 \mu\text{F}$	$0.1 \mu\text{F} < C \leq 1.0 \mu\text{F}$	$C > 1.0 \mu\text{F}$
1 kHz	0.03 %	0.03 %	0.03 %
10 kHz	0.04 %	0.06 %	–
100 kHz	0.15 %	–	–

**Inductance** Approximately 6 nH/cm for the total length of capacitor winding and the leads.

**Pulse rise time** The capacitors can withstand an unlimited number of pulses with a  $dU/dt$  according to the article table. For peak to peak voltages lower than the rated voltage ( $U_{pp} < U_R$ ), the specified  $dU/dt$  can be multiplied by  $U_R/U_{pp}$

p	d	std l	max l	b
$7.5 \pm 0.4$	0.6	5 <sup>-1</sup>	20	$\pm 0.4$
$10.0 \pm 0.4$	0.6	5 <sup>-1</sup>	30	$\pm 0.4$
$15.0 \pm 0.4$	0.8	6 <sup>-1</sup>	30	$\pm 0.4$
$22.5 \pm 0.4$	0.8	6 <sup>-1</sup>	30	$\pm 0.4$
$27.5 \pm 0.4$	0.8	6 <sup>-1</sup>	30	$\pm 0.4$
$37.5 \pm 0.5$	1.0	6 <sup>-1</sup>	30	$\pm 0.7$

Three different winding constructions are used, depending on voltage and lead spacing. They are specified in the article table.



1 section construction



2 section construction



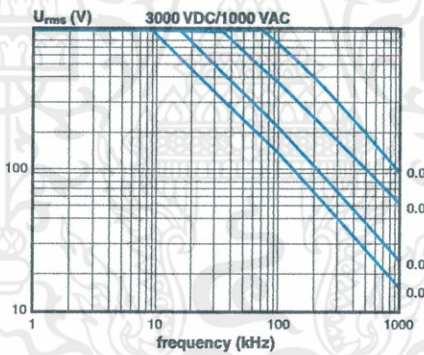
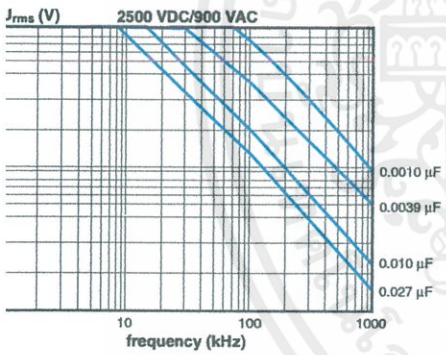
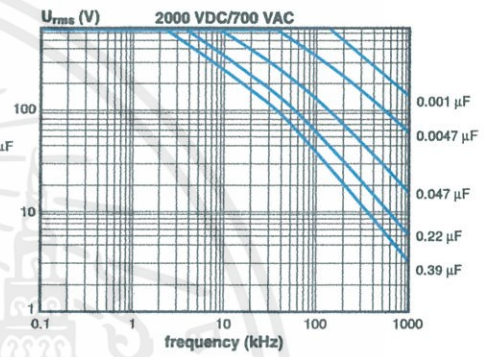
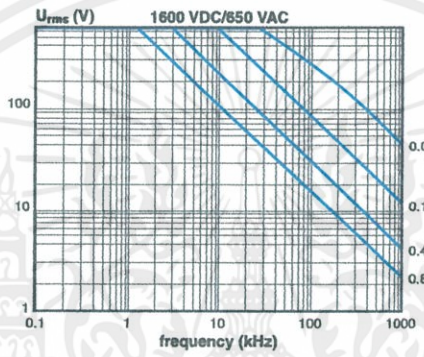
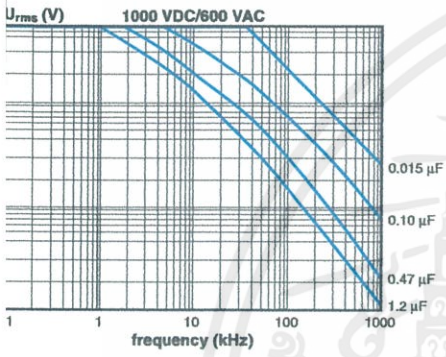
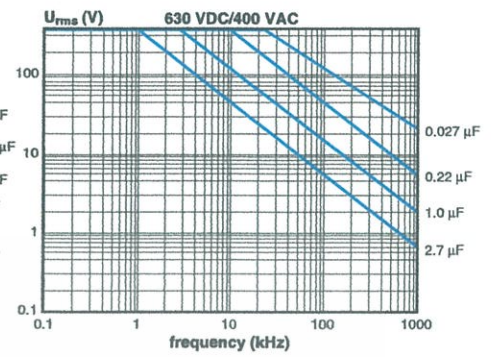
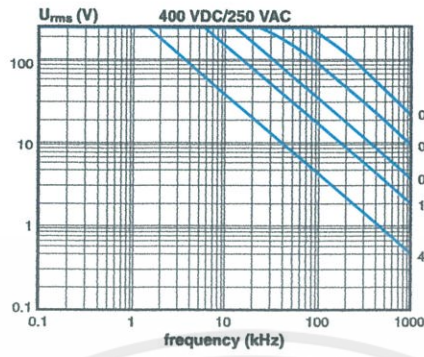
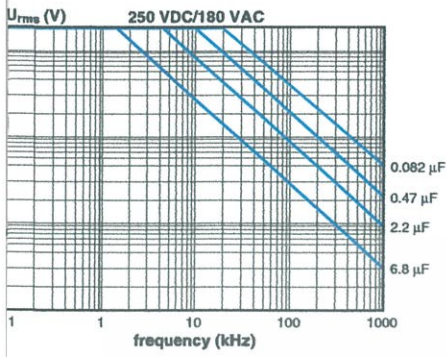
3 section construction

## ENVIRONMENTAL TEST DATA

According to IEC 60384-17, Grade 1.1 and Quality tests and requirements for Pulse Capacitors on page 95.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DERATING OF  $U_{RMS}$  VS FREQUENCY, +85°C AMBIENT TEMPERATURE AND 10°C INTERNAL HEATING, TYPICAL VALUES**



More simulation possibilities in PCCAD. See page 94.

**ORDERING INFORMATION**

The article code for the standard part is given in the article table. For other options, see page 11.

**MARKING**

- RIFA
- Article code
- Rated capacitance according to IEC 60062
- Rated voltage
- Capacitance tolerance code
- Manufacturing code (year, month)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ARTICLE TABLE

Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 85 °C 0.2 m/s	Article code	Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 85 °C 0.2 m/s	Article code
		B	H	L						B	H	L			
<b>250 VDC /180 VAC (1 section winding construction)</b>							<b>250 VDC /180 VAC (1 section)</b>								
<b>LEAD SPACING 7.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 15 MM</b>								
0.00033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK3330JR05	0.047	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450HB5470JR06
0.00039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK3390JR05	0.056	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450HB5560JR06
0.00047	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK3470JR05	0.068	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450HB5680JR06
0.00056	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK3560JR05	0.082	B04	5.5	10.5	18.0	600	101	PHE450HB5820JR06
0.00068	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK3680JR05	0.10	B04	5.5	10.5	18.0	600	100	PHE450HB6100JR06
0.00082	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK3820JR05	0.12	B04	5.5	10.5	18.0	600	99	PHE450HB6120JR06
0.0010	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4100JR05	0.15	B05	5.5	12.5	18.0	600	85	PHE450HB6150JR06
0.0012	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4120JR05	0.18	B10	6.5	12.5	18.0	600	83	PHE450HB6180JR06
0.0015	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4150JR05	0.22	B06	7.5	14.5	18.0	600	74	PHE450HB6220JR06
0.0018	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4180JR05	0.27	B06	7.5	14.5	18.0	600	73	PHE450HB6270JR06
0.0022	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4220JR05	0.33	B12	8.0	15.0	18.0	600	67	PHE450HB6330JR06
0.0027	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4270JR05	0.39	B11	8.5	16.0	18.0	600	65	PHE450HB6390JR06
0.0033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4330JR05	0.47	B14	9.5	17.5	18.0	600	60	PHE450HB6470JR06
0.0039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450HK4390JR05								
0.0047	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450HK4470JR05								
0.0056	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450HK4560JR05								
0.0068	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450HK4680JR05	0.18	D13	6.5	14.5	26.0	600	58	PHE450HD6180JR06L2
0.0082	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450HK4820JR05	0.22	D13	6.5	14.5	26.0	400	60	PHE450HD6220JR06L2
0.010	K01	4.0	8.0	10.0	1200	160	PHE450HK5100JR05	0.27	D13	6.5	14.5	26.0	400	59	PHE450HD6270JR06L2
0.012	K01	4.0	8.0	10.0	1200	160	PHE450HK5120JR05	0.33	D13	6.5	14.5	26.0	400	58	PHE450HD6330JR06L2
0.015	K01	4.0	8.0	10.0	800	160	PHE450HK5150JR05	0.39	D17	7.0	16.5	26.0	400	54	PHE450HD6390JR06L2
0.018	K01	4.0	8.0	10.0	800	160	PHE450HK5180JR05	0.47	D17	7.0	16.5	26.0	400	53	PHE450HD6470JR06L2
0.022	K01	4.0	8.0	10.0	800	160	PHE450HK5220JR05	0.56	D15	9.0	18.5	26.0	400	49	PHE450HD6560JR06L2
0.027	K03	5.0	11.0	10.0	800	160	PHE450HK5270JR05	0.68	D15	9.0	18.5	26.0	400	47	PHE450HD6680JR06L2
0.033	K03	5.0	11.0	10.0	800	160	PHE450HK5330JR05	0.82	D18	10.5	19.0	26.0	400	43	PHE450HD6820JR06L2
0.039	K03	5.0	11.0	10.0	800	160	PHE450HK5390JR05	1.0	D16	11.0	21.5	26.0	400	40	PHE450HD7100JR06L2
0.047	K03	5.0	11.0	10.0	800	160	PHE450HK5470JR05	1.2	D20	13.5	23.0	26.0	400	38	PHE450HD7120JR06L2
0.056	K03	5.0	11.0	10.0	800	160	PHE450HK5560JR05	1.5	D20	13.5	23.0	26.0	400	36	PHE450HD7150JR06L2
0.068	K04	6.0	12.0	10.5	800	160	PHE450HK5680JR05	1.8	D19	15.5	24.5	26.0	400	36	PHE450HD7180JR06L2
<b>LEAD SPACING 10 MM</b>							<b>LEAD SPACING 27.5 MM</b>								
0.0010	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4100JR05	0.82	F11	10.5	20.5	31.5	300	38	PHE450HF6820JR06L2
0.0012	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4120JR05	1.0	F11	10.5	20.5	31.5	300	38	PHE450HF7100JR06L2
0.0015	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4150JR05	1.2	F11	10.5	20.5	31.5	300	37	PHE450HF7120JR06L2
0.0018	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4180JR05	1.2	F17	21.0	12.5	31.5	300	37	PHE450HT7120JR06L2
0.0022	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4220JR05	1.5	F12	11.5	22.5	31.5	300	34	PHE450HF7150JR06L2
0.0027	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4270JR05	1.8	F03	13.5	23.0	31.5	300	32	PHE450HF7180JR06L2
0.0033	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4330JR05	2.2	F13	14.5	24.5	31.5	300	31	PHE450HF7220JR06L2
0.0039	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4390JR05	2.2	F19	27.5	16.0	31.5	300	31	PHE450HT7220JR06L2
0.0047	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4470JR05	2.7	F14	17.5	28.0	31.5	300	27	PHE450HF7270JR06L2
0.0056	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4560JR05	3.3	F15	19.0	29.0	31.5	300	25	PHE450HF7330JR06L2
0.0068	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450HA4680JR05	3.9	F16	21.0	30.0	31.5	300	23	PHE450HF7390JR06L2
0.0082	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450HA4820JR05	3.9	F18	31.0	19.0	31.5	300	23	PHE450HT7390JR06L2
0.010	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450HA5100JR05								
0.012	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450HA5120JR05								
0.015	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450HA5150JR05								
0.018	A01	4.0	9.0	13.0	1100	142	PHE450HA5180JR05	1.8	R05	13.0	24.0	41.0	200	28	PHE450HR7180JR06L2
0.022	A01	4.0	9.0	13.0	1100	142	PHE450HA5220JR05	2.2	R05	13.0	24.0	41.0	200	28	PHE450HR7220JR06L2
0.027	A01	4.0	9.0	13.0	1100	142	PHE450HA5270JR05	2.7	R05	13.0	24.0	41.0	200	27	PHE450HR7270JR06L2
0.033	A01	4.0	9.0	13.0	700	142	PHE450HA5330JR05	3.3	R04	15.0	26.0	41.0	200	25	PHE450HR7330JR06L2
0.039	A01	4.0	9.0	13.0	700	142	PHE450HA5390JR05	3.9	R02	16.5	32.0	41.0	200	22	PHE450HR7390JR06L2
0.047	A01	4.0	9.0	13.0	700	142	PHE450HA5470JR05	4.7	R02	16.5	32.0	41.0	200	22	PHE450HR7470JR06L2
0.056	A02	4.5	10.5	13.0	700	122	PHE450HA5560JR05	5.6	R03	19.0	36.0	41.0	200	18	PHE450HR7560JR06L2
0.068	A02	4.5	10.5	13.0	700	122	PHE450HA5680JR05	6.8	R06	21.0	38.0	41.0	200	17	PHE450HR7680JR06L2
0.082	A03	5.0	11.0	13.0	700	116	PHE450HA5820JR05	8.2	R08	28.0	43.0	41.0	200	17	PHE450HR7820JR06L2
0.100	A04	6.0	12.0	13.0	700	105	PHE450HA6100JR05	10	R08	28.0	43.0	41.0	200	17	PHE450HR8100JR06L2
0.120	A04	6.0	12.0	13.0	700	105	PHE450HA6120JR05								
<b>LEAD SPACING 37.5 MM</b>															

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ARTICLE TABLE

Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 0.2 m/s	Article code	Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 0.2 m/s	Article code						
		B	H	L						B	H	L									
<b>400 VDC / 250 VAC (1 section)</b>							<b>400 VDC / 250 VAC (1 section)</b>														
<b>LEAD SPACING 7.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 15 MM</b>														
0.00033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK3330JR05	0.12	B06	7.5	14.5	18.0	1000	75	PHE450KB6120JR06						
0.00039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK3390JR05	0.15	B06	7.5	14.5	18.0	1000	75	PHE450KB6150JR06						
0.00047	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK3470JR05	0.18	B12	8.0	15.0	18.0	1000	71	PHE450KB6180JR06						
0.00056	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK3560JR05	0.22	B14	9.5	17.5	18.0	1000	60	PHE450KB6220JR06						
0.00068	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK3680JR05	0.27	B14	9.5	17.5	18.0	1000	59	PHE450KB6270JR06						
0.00082	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK3820JR05	<b>LEAD SPACING 22.5 MM</b>													
0.0010	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4100JR05	0.12	D13	6.5	14.5	26.0	600	58	PHE450KD6120JR06L2						
0.0012	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4120JR05	0.15	D13	6.5	14.5	26.0	600	58	PHE450KD6150JR06L2						
0.0015	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4150JR05	0.18	D13	6.5	14.5	26.0	600	58	PHE450KD6180JR06L2						
0.0018	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4180JR05	0.22	D17	7.0	16.5	26.0	600	52	PHE450KD6220JR06L2						
0.0022	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4220JR05	0.27	D17	7.0	16.5	26.0	600	52	PHE450KD6270JR06L2						
0.0027	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4270JR05	0.33	D15	9.0	18.5	26.0	600	48	PHE450KD6330JR06L2						
0.0033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4330JR05	0.39	D15	9.0	18.5	26.0	600	48	PHE450KD6390JR06L2						
0.0039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450KK4390JR05	0.47	D18	10.5	19.0	26.0	600	45	PHE450KD6470JR06L2						
0.0047	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450KK4470JR05	0.56	D16	11.0	21.5	26.0	600	40	PHE450KD6560JR06L2						
0.0056	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450KK4560JR05	0.68	D20	13.5	23.0	26.0	600	35	PHE450KD6680JR06L2						
0.0068	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450KK4680JR05	0.82	D20	13.5	23.0	26.0	600	35	PHE450KD6820JR06L2						
0.0082	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450KK4820JR05	1.0	D19	15.5	24.5	26.0	600	33	PHE450KD7100JR06L2						
0.010	K01	4.0	8.0	10.0	1200	160	PHE450KK5100JR05	<b>LEAD SPACING 27.5 MM</b>													
0.012	K01	4.0	8.0	10.0	1200	160	PHE450KK5120JR05	0.47	F11	10.5	20.5	31.5	500	38	PHE450KF6470JR06L2						
0.015	K03	5.0	11.0	10.0	1200	160	PHE450KK5150JR05	0.56	F11	10.5	20.5	31.5	500	38	PHE450KF6560JR06L2						
0.018	K03	5.0	11.0	10.0	1200	160	PHE450KK5180JR05	0.68	F11	10.5	20.5	31.5	500	38	PHE450KF6680JR06L2						
0.022	K03	5.0	11.0	10.0	1200	160	PHE450KK5220JR05	0.68	F17	21.0	12.5	31.5	500	38	PHE450KT6680JR06L2						
0.027	K03	5.0	11.0	10.0	1200	160	PHE450KK5270JR05	0.82	F12	11.5	22.5	31.5	500	34	PHE450KF6820JR06L2						
0.033	K03	5.0	11.0	10.0	1200	160	PHE450KK5330JR05	1.0	F03	13.5	23.0	31.5	500	32	PHE450KF7100JR06L2						
0.039	K04	6.0	12.0	10.5	1200	160	PHE450KK5390JR05	1.2	F13	14.5	24.5	31.5	500	30	PHE450KF7120JR06L2						
0.047	K04	6.0	12.0	10.5	1200	160	PHE450KK5470JR05	1.5	F14	17.5	28.0	31.5	500	27	PHE450KF7150JR06L2						
<b>LEAD SPACING 10 MM</b>							1.5	F19	27.5	16.0	31.5	500	27	PHE450KT7150JR06L2							
0.0010	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4100JR05	1.8	F15	19.0	29.0	31.5	500	25	PHE450KF7180JR06L2						
0.0012	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4120JR05	2.2	F16	21.0	30.0	31.5	500	24	PHE450KF7220JR06L2						
0.0015	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4150JR05	2.2	F18	31.0	19.0	31.5	500	24	PHE450KT7220JR06L2						
0.0018	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4180JR05	<b>LEAD SPACING 37.5 MM</b>													
0.0022	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4220JR05	1.0	R05	13.0	24.0	41.0	300	27	PHE450KR7100JR06L2						
0.0027	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4270JR05	1.2	R05	13.0	24.0	41.0	300	27	PHE450KR7120JR06L2						
0.0033	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4330JR05	1.5	R05	13.0	24.0	41.0	300	27	PHE450KR7150JR06L2						
0.0039	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4390JR05	1.8	R04	15.0	26.0	41.0	300	25	PHE450KR7180JR06L2						
0.0047	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4470JR05	2.2	R02	16.5	32.0	41.0	300	22	PHE450KR7220JR06L2						
0.0056	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4560JR05	2.7	R02	16.5	32.0	41.0	300	22	PHE450KR7270JR06L2						
0.0068	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450KA4680JR05	3.3	R03	19.0	36.0	41.0	300	19	PHE450KR7330JR06L2						
0.0082	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450KA4820JR05	3.9	R03	19.0	36.0	41.0	300	19	PHE450KR7390JR06L2						
0.010	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450KA5100JR05	4.7	R06	21.0	38.0	41.0	300	17	PHE450KR7470JR06L2						
0.012	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450KA5120JR05	5.6	R08	28.0	43.0	41.0	300	17	PHE450KR7560JR06L2						
0.015	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450KA5150JR05	<b>630 VDC / 300 VAC (1 SECTION)</b>													
0.018	A01	4.0	9.0	13.0	1100	142	PHE450KA5180JR05	<b>LEAD SPACING 7.5 MM</b>													
0.022	A01	4.0	9.0	13.0	1100	142	PHE450KA5220JR05	0.00033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK3330JR05						
0.027	A01	4.0	9.0	13.0	1100	142	PHE450KA5270JR05	0.00039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK3390JR05						
0.033	A02	4.5	10.5	13.0	1100	122	PHE450KA5330JR05	0.00047	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK3470JR05						
0.039	A03	5.0	11.0	13.0	1100	116	PHE450KA5390JR05	0.00056	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK3560JR05						
0.047	A04	6.0	12.0	13.0	1100	105	PHE450KA5470JR05	0.00068	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK3680JR05						
0.056	A04	6.0	12.0	13.0	1100	105	PHE450KA5560JR05	0.00082	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK3820JR05						
<b>LEAD SPACING 15 MM</b>							0.0010	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4100JR05							
0.033	B04	5.5	10.5	18.0	2500	100	PHE450KB5330JR06	0.0012	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4120JR05						
0.039	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450KB5390JR06	<p>ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้</p>													
0.047	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450KB5470JR06														
0.056	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450KB5560JR06														
0.068	B04	5.5	10.5	18.0	1000	100	PHE450KB5680JR06														
0.082	B05	5.5	12.5	18.0	1000	99	PHE450KB5820JR06														
0.10	B10	6.5	12.5	18.0	1000	85	PHE450KB6100JR06														

## ARTICLE TABLE

Capacitance $\mu\text{F}$	Box code	Max dimensions in mm			Max $\text{dU/dt}$ $\text{V}/\mu\text{s}$	Rthha $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ $85^{\circ}\text{C}$ $0.2\text{ m/s}$	Article code	Capacitance $\mu\text{F}$	Box code	Max dimensions in mm			Max $\text{dU/dt}$ $\text{V}/\mu\text{s}$	Rthha $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ $85^{\circ}\text{C}$ $0.2\text{ m/s}$	Article code
		B	H	L						B	H	L			
<b>630 VDC / 300 VAC (1 SECTION)</b>							<b>630 VDC / 400 VAC (2 SECTION)</b>								
<b>LEAD SPACING 7.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 22.5 MM</b>								
0.0015	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4150JR05	0.033	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450MD5330JR06L2
0.0018	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4180JR05	0.039	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450MD5390JR06L2
0.0022	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4220JR05	0.047	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450MD5470JR06L2
0.0027	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4270JR05	0.056	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450MD5560JR06L2
0.0033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4330JR05	0.068	D13	6.5	14.5	26.0	1800	59	PHE450MD5680JR06L2
0.0039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450MK4390JR05	0.082	D13	6.5	14.5	26.0	1800	59	PHE450MD5820JR06L2
0.0047	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450MK4470JR05	0.10	D13	6.5	14.5	26.0	1800	59	PHE450MD6100JR06L2
0.0056	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450MK4560JR05	0.12	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450MD6120JR06L2
0.0068	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450MK4680JR05	0.15	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450MD6150JR06L2
0.0082	K01	4.0	8.0	10.0	1400	160	PHE450MK4820JR05	0.18	D15	9.0	18.5	26.0	1800	50	PHE450MD6180JR06L2
0.010	K03	5.0	11.0	10.0	1400	160	PHE450MK5100JR05	0.22	D15	9.0	18.5	26.0	1800	50	PHE450MD6220JR06L2
0.012	K03	5.0	11.0	10.0	1400	160	PHE450MK5120JR05	0.27	D16	11.0	21.5	26.0	1800	45	PHE450MD6270JR06L2
0.015	K03	5.0	11.0	10.0	1400	160	PHE450MK5150JR05	0.33	D16	11.0	21.5	26.0	1800	45	PHE450MD6330JR06L2
0.018	K03	5.0	11.0	10.0	1400	160	PHE450MK5180JR05	0.39	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450MD6390JR06L2
0.022	K04	6.0	12.0	10.5	1400	160	PHE450MK5220JR05	0.47	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450MD6470JR06L2
								0.56	D19	15.5	24.5	26.0	1800	34	PHE450MD6560JR06L2
<b>LEAD SPACING 10 MM</b>							<b>LEAD SPACING 27.5 MM</b>								
0.0010	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4100JR05	0.22	F11	10.5	20.5	31.5	1100	38	PHE450MF6220JR06L2
0.0012	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4120JR05	0.27	F11	10.5	20.5	31.5	1100	38	PHE450MF6270JR06L2
0.0015	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4150JR05	0.33	F11	10.5	20.5	31.5	1100	38	PHE450MF6330JR06L2
0.0018	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4180JR05	0.39	F11	10.5	20.5	31.5	1100	38	PHE450MF6390JR06L2
0.0022	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4220JR05	0.39	F17	21.0	12.5	31.5	1100	38	PHE450MT6390JR06L2
0.0027	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4270JR05	0.47	F12	11.5	22.5	31.5	1100	35	PHE450MF6470JR06L2
0.0033	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4330JR05	0.56	F03	13.5	23.0	31.5	1100	34	PHE450MF6560JR06L2
0.0039	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4390JR05	0.68	F13	14.5	24.5	31.5	1100	33	PHE450MF6680JR06L2
0.0047	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4470JR05	0.82	F14	17.5	28.0	31.5	1100	30	PHE450MF6820JR06L2
0.0056	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4560JR05	0.82	F19	27.5	16.0	31.5	1100	30	PHE450MT6820JR06L2
0.0068	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450MA4680JR05	1.0	F14	17.5	28.0	31.5	1100	30	PHE450MF7100JR06L2
0.0082	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450MA4820JR05	1.2	F16	21.0	30.0	31.5	1100	25	PHE450MF7120JR06L2
0.010	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450MA5100JR05	1.2	F18	31.0	19.0	31.5	1100	25	PHE450MT7120JR06L2
0.012	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450MA5120JR05								
0.015	A01	4.0	9.0	13.0	1200	142	PHE450MA5150JR05								
0.018	A02	4.5	10.5	13.0	1200	122	PHE450MA5180JR05								
0.022	A02	4.5	10.5	13.0	1200	122	PHE450MA5220JR05								
0.027	A03	5.0	11.0	13.0	1200	116	PHE450MA5270JR05	0.56	R05	13.0	24.0	41.0	700	29	PHE450MR6560JR06L2
0.033	A04	6.0	12.0	13.0	1200	105	PHE450MA5330JR05	0.68	R05	13.0	24.0	41.0	700	28	PHE450MR6680JR06L2
0.039	A04	6.0	12.0	13.0	1200	105	PHE450MA5390JR05	0.82	R05	13.0	24.0	41.0	700	28	PHE450MR6820JR06L2
								1.0	R04	15.0	26.0	41.0	700	27	PHE450MR7100JR06L2
								1.2	R04	15.0	26.0	41.0	700	27	PHE450MR7120JR06L2
								1.5	R02	16.5	32.0	41.0	700	24	PHE450MR7150JR06L2
								1.8	R03	19.0	36.0	41.0	700	20	PHE450MR7180JR06L2
								2.2	R03	19.0	36.0	41.0	700	20	PHE450MR7220JR06L2
								2.7	R06	21.0	38.0	41.0	700	18	PHE450MR7270JR06L2
								3.3	R08	28.0	43.0	41.0	700	18	PHE450MR7330JR06L2
<b>630 VDC / 400 VAC (2 SECTION)</b>							<b>1000 VDC / 375 VAC (1 SECTION)</b>								
<b>LEAD SPACING 15 MM</b>							<b>LEAD SPACING 7.5 MM</b>								
0.010	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450MB5100JR06	0.00033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK3330JR05
0.012	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450MB5120JR06	0.00039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK3390JR05
0.015	B04	5.5	10.5	18.0	2500	100	PHE450MB5150JR06	0.00047	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK3470JR05
0.018	B04	5.5	10.5	18.0	2500	100	PHE450MB5180JR06	0.00056	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK3560JR05
0.022	B04	5.5	10.5	18.0	2500	100	PHE450MB5220JR06	0.00068	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK3680JR05
0.027	B04	5.5	10.5	18.0	2500	100	PHE450MB5270JR06	0.00082	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK3820JR05
0.033	B04	5.5	10.5	18.0	2500	100	PHE450MB5330JR06	0.0010	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4100JR05
0.039	B05	5.5	12.5	18.0	2500	90	PHE450MB5390JR06	0.0012	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4120JR05
0.047	B10	6.5	12.5	18.0	2500	85	PHE450MB5470JR06	0.0015	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4150JR05
0.056	B10	6.5	12.5	18.0	2500	85	PHE450MB5560JR06	0.0018	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4180JR05
0.068	B06	7.5	14.5	18.0	2500	75	PHE450MB5680JR06	0.0022	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4220JR05
0.082	B12	8.0	15.0	18.0	2500	72	PHE450MB5820JR06								
0.10	B11	8.5	16.0	18.0	2500	70	PHE450MB6100JR06								
0.12	B14	9.5	17.5	18.0	2500	61	PHE450MB6120JR06								
0.15	B14	9.5	17.5	18.0	2500	61	PHE450MB6150JR06								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ARTICLE TABLE

Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rththa °C/W 0.2 m/s	Article code	Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rththa °C/W 0.2 m/s	Article code
		B	H	L						B	H	L			
<b>1000 VDC / 375 VAC (1 SECTION)</b>							<b>1000 VDC / 600 VAC (2 SECTION)</b>								
<b>LEAD SPACING 7.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 22.5 MM</b>								
0.0027	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4270JR05	0.082	D13	6.5	14.5	26.0	1800	54	PHE450PD5820JD13R06L2
0.0033	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4330JR05	0.10	D17	7.0	16.5	26.0	1800	52	PHE450PD6100JD17R06L2
0.0039	K01	4.0	8.0	10.0	2000	160	PHE450PK4390JR05	0.12	D14	8.0	16.0	26.0	1800	52	PHE450PD6120JD14R06L2
0.0047	K03	5.0	11.0	10.0	2000	160	PHE450PK4470JR05	0.15	D15	9.0	18.5	26.0	1800	49	PHE450PD6150JD15R06L2
0.0056	K03	5.0	11.0	10.0	2000	160	PHE450PK4560JR05	0.18	D18	10.5	19.0	26.0	1800	46	PHE450PD6180JD18R06L2
0.0068	K03	5.0	11.0	10.0	2000	160	PHE450PK4680JR05	0.22	D16	11.0	21.5	26.0	1800	44	PHE450PD6220JD16R06L2
0.0082	K03	5.0	11.0	10.0	2000	160	PHE450PK4820JR05	0.27	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450PD6270JD20R06L2
0.010	K04	6.0	12.0	10.5	2000	160	PHE450PK5100JR05	0.33	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450PD6330JD20R06L2
0.012	K04	6.0	12.0	10.5	2000	160	PHE450PK5120JR05	0.39	D19	15.5	24.5	26.0	1800	35	PHE450PD6390JD19R06L2
<b>LEAD SPACING 10 MM</b>							<b>LEAD SPACING 27.5 MM</b>								
0.0010	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4100JR05	0.15	F11	10.5	20.5	31.5	1300	38	PHE450PF6150JR06L2
0.0012	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4120JR05	0.18	F11	10.5	20.5	31.5	1300	38	PHE450PF6180JR06L2
0.0015	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4150JR05	0.22	F11	10.5	20.5	31.5	1300	36	PHE450PF6220JF11R06L2
0.0018	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4180JR05	0.22	F17	21.0	12.5	31.5	1300	36	PHE450PT6220JR06L2
0.0022	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4220JR05	0.27	F11	10.5	20.5	31.5	1300	36	PHE450PF6270JF11R06L2
0.0027	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4270JR05	0.33	F12	11.5	22.5	31.5	1300	35	PHE450PF6330JF12R06L2
0.0033	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4330JR05	0.39	F03	13.5	23.0	31.5	1300	34	PHE450PF6390JF03R06L2
0.0039	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4390JR05	0.47	F13	14.5	24.5	31.5	1300	34	PHE450PF6470JF13R06L2
0.0047	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4470JR05	0.47	F19	27.5	16.0	31.5	1300	30	PHE450PT6470JR06L2
0.0056	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4560JR05	0.56	F14	17.5	28.0	31.5	1300	28	PHE450PF6560JF14R06L2
0.0068	A01	4.0	9.0	13.0	1400	142	PHE450PA4680JR05	0.68	F14	17.5	28.0	31.5	1300	28	PHE450PF6680JF14R06L2
0.0082	A02	4.5	10.5	13.0	1400	122	PHE450PA4820JR05	0.68	F18	31.0	19.0	31.5	1300	25	PHE450PT6680JR06L2
0.010	A02	4.5	10.5	13.0	1400	122	PHE450PA5100JR05	0.82	F15	19.0	29.0	31.5	1300	25	PHE450PF6820JF15R06L2
0.012	A03	5.0	11.0	13.0	1400	116	PHE450PA5120JR05	1.0	F16	21.0	30.0	31.5	1300	25	PHE450PF7100JF16R06L2
0.015	A04	6.0	12.0	13.0	1400	105	PHE450PA5150JR05	<b>LEAD SPACING 37.5 MM</b>							
0.018	A04	6.0	12.0	13.0	1400	105	PHE450PA5180JR05	0.33	R05	13.0	24.0	41.0	800	28	PHE450PR6330JR06L2
<b>1000 VDC / 600 VAC (2 SECTION)</b>							0.39	R05	13.0	24.0	41.0	800	28	PHE450PR6390JR06L2	
<b>LEAD SPACING 15 MM</b>							0.47	R05	13.0	24.0	41.0	800	28	PHE450PR6470JR06L2	
0.0039	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450PB4390JR06	0.56	R05	13.0	24.0	41.0	800	27	PHE450PR6560JR05R06L2
0.0047	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450PB4470JR06	0.68	R04	15.0	26.0	41.0	800	25	PHE450PR6680JR04R06L2
0.0056	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450PB4560JR06	0.82	R02	16.5	32.0	41.0	800	25	PHE450PR6820JR06L2
0.0068	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450PB4680JR06	1.0	R02	16.5	32.0	41.0	800	20	PHE450PR7100JR02R06L2
0.0082	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450PB4820JR06	1.2	R03	19.0	36.0	41.0	800	19	PHE450PR7120JR06L2
0.010	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450PB5100JR06	1.5	R03	19.0	36.0	41.0	800	19	PHE450PR7150JR03R06L2
0.012	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450PB5120JR06	1.8	R06	21.0	38.0	41.0	800	19	PHE450PR7180JR06R06L2
0.015	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450PB5150JR06	2.2	R08	28.0	43.0	41.0	800	19	PHE450PR7220JR08R06L2
0.018	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450PB5180JB04R06	<b>1600 VDC / 650 VAC (2 SECTION)</b>							
0.022	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450PB5220JB04R06	<b>LEAD SPACING 15 MM</b>							
0.027	B05	5.5	12.5	18.0	2500	90	PHE450PB5270JB05R06	0.0027	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450RB4270JR06
0.033	B10	6.5	12.5	18.0	2500	87	PHE450PB5330JB10R06	0.0033	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450RB4330JR06
0.039	B06	7.5	14.5	18.0	2500	78	PHE450PB5390JR06	0.0039	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450RB4390JR06
0.047	B06	7.5	14.5	18.0	2500	78	PHE450PB5470JB06R06	0.0047	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450RB4470JR06
0.056	B12	8.0	15.0	18.0	2500	75	PHE450PB5560JB12R06	0.0056	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450RB4560JR06
0.068	B11	8.5	16.0	18.0	2500	70	PHE450PB5680JB11R06	0.0068	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450RB4680JR06
0.082	B14	9.5	17.5	18.0	2500	60	PHE450PB5820JB14R06	0.0082	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450RB4820JR06
0.10	B16	11.0	19.0	18.0	2500	55	PHE450PB6100JB16R06	0.010	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450RB5100JR06
0.12	B16	11.0	19.0	18.0	2500	55	PHE450PB6120JB16R06	0.012	B04	5.5	10.5	18.0	2500	99	PHE450RB5120JR06
<b>LEAD SPACING 22.5 MM</b>							0.015	B05	5.5	12.5	18.0	2500	90	PHE450RB5150JR06	
0.022	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450PD5220JR06L2	0.018	B10	6.5	12.5	18.0	2500	88	PHE450RB5180JR06
0.027	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450PD5270JR06L2	0.022	B10	6.5	12.5	18.0	2500	89	PHE450RB5220JR06
0.033	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450PD5330JR06L2	0.027	B06	7.5	14.5	18.0	2500	80	PHE450RB5270JR06
0.039	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450PD5390JR06L2	0.033	B12	8.0	15.0	18.0	2500	75	PHE450RB5330JR06
0.047	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450PD5470JR06L2	0.039	B11	8.5	16.0	18.0	2500	73	PHE450RB5390JR06
0.056	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450PD5560JR06L2	0.047	B14	9.5	17.5	18.0	2500	60	PHE450RB5470JR06
0.068	D13	6.5	14.5	26.0	1800	55	PHE450PD5680JD13R06L2	0.056	B14	9.5	17.5	18.0	2500	60	PHE450RB5560JR06

NEW

NEW

ARTICLE TABLE

Capaci- tance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 85 °C 0.2 m/s	Article code	Capaci- tance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 85 °C 0.2 m/s	Article code
		B	H	L						B	H	L			

1600 VDC / 650 VAC (2 SECTION)

LEAD SPACING 22.5 MM

0.010	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450RD5100JR06L2
0.012	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450RD5120JR06L2
0.015	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450RD5150JR06L2
0.018	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450RD5180JR06L2
0.022	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450RD5220JR06L2
0.027	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450RD5270JR06L2
0.033	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450RD5330JR06L2
0.039	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450RD5390JR06L2
0.047	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450RD5470JR06L2
0.056	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450RD5560JR06L2
0.068	D15	9.0	18.5	26.0	1800	50	PHE450RD5680JR06L2
0.082	D15	9.0	18.5	26.0	1800	50	PHE450RD5820JR06L2
0.10	D18	10.5	19.0	26.0	1800	48	PHE450RD6100JR06L2
0.12	D16	11.0	21.5	26.0	1800	45	PHE450RD6120JR06L2
0.15	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450RD6150JR06L2
0.18	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450RD6180JR06L2
0.22	D19	15.5	24.5	26.0	1800	34	PHE450RD6220JR06L2

LEAD SPACING 27.5 MM

0.082	F11	10.5	20.5	31.5	1300	37	PHE450RF5820JR06L2
0.10	F11	10.5	20.5	31.5	1300	37	PHE450RF6100JR06L2
0.10	F17	21.0	12.5	31.5	1300	37	PHE450RT6100JR06L2
0.12	F11	10.5	20.5	31.5	1300	37	PHE450RF6120JR06L2
0.15	F12	11.5	22.5	31.5	1300	36	PHE450RF6150JR06L2
0.18	F03	13.5	23.0	31.5	1300	35	PHE450RF6180JR06L2
0.22	F13	14.5	24.5	31.5	1300	35	PHE450RF6220JR06L2
0.22	F19	27.5	16.0	31.5	1300	35	PHE450RT6220JR06L2
0.27	F14	17.5	28.0	31.5	1300	32	PHE450RF6270JR06L2
0.33	F15	19.0	29.0	31.5	1300	28	PHE450RF6330JR06L2
0.33	F18	31.0	19.0	31.5	1300	28	PHE450RT6330JR06L2
0.39	F16	21.0	30.0	31.5	1300	25	PHE450RF6390JR06L2

LEAD SPACING 37.5 MM

0.18	R05	13.0	24.0	41.0	800	27	PHE450RR6180JR06L2
0.22	R05	13.0	24.0	41.0	800	27	PHE450RR6220JR06L2
0.27	R05	13.0	24.0	41.0	800	27	PHE450RR6270JR06L2
0.33	R04	15.0	26.0	41.0	800	26	PHE450RR6330JR06L2
0.39	R04	15.0	26.0	41.0	800	26	PHE450RR6390JR04R06L2
0.47	R02	16.5	32.0	41.0	800	24	PHE450RR6470JR06L2
0.56	R02	16.5	32.0	41.0	800	20	PHE450RR6560JR02R06L2
0.68	R03	19.0	36.0	41.0	800	20	PHE450RR6680JR06L2
0.82	R06	21.0	38.0	41.0	800	18	PHE450RR6820JR06L2
1.0	R08	28.0	43.0	41.0	800	18	PHE450RR7100JR08R06L2

2000 VDC / 700 VAC (2 SECTION)

LEAD SPACING 15 MM

0.0010	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4100JR06
0.0012	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4120JR06
0.0015	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4150JR06
0.0018	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4180JR06
0.0022	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4220JR06
0.0027	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4270JR06
0.0033	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4330JR06
0.0039	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4390JR06
0.0047	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4470JR06
0.0056	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4560JR06
0.0068	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450SB4680JR06
0.0082	B05	5.5	12.5	18.0	2500	92	PHE450SB4820JR06

2000 VDC / 700 VAC (2 SECTION)

LEAD SPACING 15 MM

0.010	B10	6.5	12.5	18.0	2500	90	PHE450SB5100JR06
0.012	B06	7.5	14.5	18.0	2500	80	PHE450SB5120JR06
0.015	B06	7.5	14.5	18.0	2500	80	PHE450SB5150JR06
0.018	B12	8.0	15.0	18.0	2500	75	PHE450SB5180JR06
0.022	B11	8.5	16.0	18.0	2500	70	PHE450SB5220JR06
0.027	B14	9.5	17.5	18.0	2500	61	PHE450SB5270JR06

LEAD SPACING 22.5 MM

0.0033	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD4330JR06L2
0.0039	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD4390JR06L2
0.0047	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD4470JR06L2
0.0056	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD4560JR06L2
0.0068	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD4680JR06L2
0.0082	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD4820JR06L2
0.010	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD5100JR06L2
0.012	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD5120JR06L2
0.015	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450SD5150JR06L2
0.018	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450SD5180JR06L2
0.022	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450SD5220JR06L2
0.027	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450SD5270JR06L2
0.033	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450SD5330JR06L2
0.039	D14	8.0	16.0	26.0	1800	53	PHE450SD5390JR06L2
0.047	D15	9.0	18.5	26.0	1800	52	PHE450SD5470JR06L2
0.056	D18	10.5	19.0	26.0	1800	50	PHE450SD5560JR06L2
0.068	D16	11.0	21.5	26.0	1800	45	PHE450SD5680JR06L2
0.082	D16	11.0	21.5	26.0	1800	45	PHE450SD5820JR06L2
0.10	D20	13.5	23.0	26.0	1800	40	PHE450SD6100JR06L2
0.12	D19	15.5	24.5	26.0	1800	35	PHE450SD6120JR06L2

LEAD SPACING 27.5 MM

0.047	F11	10.5	20.5	31.5	1300	37	PHE450SF5470JR06L2
0.056	F11	10.5	20.5	31.5	1300	37	PHE450SF5560JR06L2
0.056	F17	21.0	12.5	31.5	1300	37	PHE450ST5560JR06L2
0.068	F11	10.5	20.5	31.5	1300	36	PHE450SF5680JF11R06L2
0.082	F11	10.5	20.5	31.5	1300	35	PHE450SF5820JF11R06L2
0.10	F12	11.5	22.5	31.5	1300	34	PHE450SF6100JF12R06L2
0.12	F03	13.5	23.0	31.5	1300	32	PHE450SF6120JF03R06L2
0.12	F19	27.5	16.0	31.5	1300	32	PHE450ST6120JR06L2
0.15	F13	14.5	24.5	31.5	1300	30	PHE450SF6150JF13R06L2
0.18	F14	17.5	28.0	31.5	1300	28	PHE450SF6180JF14R06L2
0.18	F18	31.0	19.0	31.5	1300	28	PHE450ST6180JR06L2
0.22	F15	19.0	29.0	31.5	1300	26	PHE450SF6220JF15R06L2
0.27	F16	21.0	30.0	31.5	1300	25	PHE450SF6270JF16R06L2

LEAD SPACING 37.5 MM

0.10	R05	13.0	24.0	41.0	800	27	PHE450SR6100JR06L2
0.12	R05	13.0	24.0	41.0	800	27	PHE450SR6120JR06L2
0.15	R05	13.0	24.0	41.0	800	26	PHE450SR6150JR05R06L2
0.18	R05	13.0	24.0	41.0	800	26	PHE450SR6180JR05R06L2
0.22	R04	15.0	26.0	41.0	800	24	PHE450SR6220JR04R06L2
0.27	R02	16.5	32.0	41.0	800	22	PHE450SR6270JR02R06L2
0.33	R02	16.5	32.0	41.0	800	22	PHE450SR6330JR02R06L2
0.39	R03	19.0	36.0	41.0	800	18	PHE450SR6390JR03R06L2
0.47	R03	19.0	36.0	41.0	800	18	PHE450SR6470JR03R06L2
0.56	R06	21.0	38.0	41.0	800	18	PHE450SR6560JR06R06L2
0.68	R08	28.0	43.0	41.0	800	18	PHE450SR6680JR08R06L2

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการติดต่อ หรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Updated since the latest printed catalogue

## ARTICLE TABLE

Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 0.2 m/s	Article code	Capacitance µF	Box code	Max dimensions in mm			Max dU/dt V/µs	Rthha °C/W 0.2 m/s	Article code
		B	H	L						B	H	L			
<b>2500 VDC / 900 VAC (3 SECTION)</b>							<b>3000 VDC / 1000 VAC (3 SECTION)</b>								
<b>LEAD SPACING 15 MM</b>							<b>LEAD SPACING 15 MM</b>								
0.0010	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450TB4100JR06	0.0010	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450XB4100JB04R06
0.0012	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450TB4120JR06	0.0012	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450XB4120JB04R06
0.0015	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450TB4150JR06	0.0015	B05	5.5	12.5	18.0	2500	92	PHE450XB4150JB05R06
0.0018	B04	5.5	10.5	18.0	2500	98	PHE450TB4180JR06	0.0018	B05	5.5	12.5	18.0	2500	90	PHE450XB4180JB05R06
0.0022	B05	5.5	12.5	18.0	2500	92	PHE450TB4220JR06	0.0022	B10	6.5	12.5	18.0	2500	87	PHE450XB4220JB10R06
0.0027	B10	6.5	12.5	18.0	2500	90	PHE450TB4270JR06	0.0027	B06	7.5	14.5	18.0	2500	80	PHE450XB4270JB06R06
0.0033	B06	7.5	14.5	18.0	2500	80	PHE450TB4330JR06	0.0033	B12	8.0	15.0	18.0	2500	75	PHE450XB4330JB12R06
0.0039	B06	7.5	14.5	18.0	2500	80	PHE450TB4390JR06	0.0039	B11	8.5	16.0	18.0	2500	70	PHE450XB4390JB11R06
0.0047	B12	8.0	15.0	18.0	2500	75	PHE450TB4470JR06	0.0047	B14	9.5	17.5	18.0	2500	61	PHE450XB4470JB14R06
0.0056	B11	8.5	16.0	18.0	2500	70	PHE450TB4560JR06	0.0056	B14	9.5	17.5	18.0	2500	60	PHE450XB4560JB14R06
0.0068	B14	9.5	17.5	18.0	2500	60	PHE450TB4680JB14R06	0.0068	B16	11.0	19.0	18.0	2500	55	PHE450XB4680JB16R06
0.0082	B14	9.5	17.5	18.0	2500	60	PHE450TB4820JR06								
0.010	B16	11.0	19.0	18.0	2500	55	PHE450TB5100JB16R06								
<b>LEAD SPACING 22.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 22.5 MM</b>								
0.0047	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450TD4470JR06L2	0.0047	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450XD4470JD13R06L2
0.0056	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450TD4560JR06L2	0.0056	D13	6.5	14.5	26.0	1800	58	PHE450XD4560JD13R06L2
0.0068	D13	6.5	14.5	26.0	1800	60	PHE450TD4680JR06L2	0.0068	D17	7.0	16.5	26.0	1800	55	PHE450XD4680JD17R06L2
0.0082	D13	6.5	14.5	26.0	1800	55	PHE450TD4820JD13R06L2	0.0082	D14	8.0	16.0	26.0	1800	54	PHE450XD4820JD14R06L2
0.010	D17	7.0	16.5	26.0	1800	53	PHE450TD5100JD17R06L2	0.010	D15	9.0	18.5	26.0	1800	50	PHE450XD5100JD15R06L2
0.012	D14	8.0	16.0	26.0	1800	52	PHE450TD5120JD14R06L2	0.012	D18	10.5	19.0	26.0	1800	49	PHE450XD5120JD18R06L2
0.015	D15	9.0	18.5	26.0	1800	52	PHE450TD5150JR06L2	0.015	D16	11.0	21.5	26.0	1800	44	PHE450XD5150JD16R06L2
0.018	D15	9.0	18.5	26.0	1800	50	PHE450TD5180JD15R06L2	0.018	D16	11.0	21.5	26.0	1800	44	PHE450XD5180JD16R06L2
0.022	D18	10.5	19.0	26.0	1800	48	PHE450TD5220JD18R06L2	0.022	D20	13.5	23.0	26.0	1800	38	PHE450XD5220JD20R06L2
0.027	D16	11.0	21.5	26.0	1800	45	PHE450TD5270JD16R06L2	0.027	D19	15.5	24.5	26.0	1800	35	PHE450XD5270JD19R06L2
0.033	D20	13.5	23.0	26.0	1800	38	PHE450TD5330JD20R06L2	0.033	D19	15.5	24.5	26.0	1800	35	PHE450XD5330JD19R06L2
0.039	D20	13.5	23.0	26.0	1800	38	PHE450TD5390JD20R06L2								
0.047	D19	15.5	24.5	26.0	1800	35	PHE450TD5470JD19R06L2								
<b>LEAD SPACING 27.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 27.5 MM</b>								
0.027	F11	10.5	20.5	31.5	1300	38	PHE450TF5270JF11R06L2								
0.033	F11	10.5	20.5	31.5	1300	38	PHE450TF5330JF11R06L2								
0.039	F12	11.5	22.5	31.5	1300	36	PHE450TF5390JF12R06L2								
0.047	F03	13.5	23.0	31.5	1300	35	PHE450TF5470JF03R06L2								
0.056	F03	13.5	23.0	31.5	1300	35	PHE450TF5560JF03R06L2								
0.068	F13	14.5	24.5	31.5	1300	34	PHE450TF5680JF13R06L2								
0.082	F14	17.5	28.0	31.5	1300	30	PHE450TF5270JF14R06L2								
0.10	F15	19.0	29.0	31.5	1300	28	PHE450TF6100JF15R06L2								
0.12	F16	21.0	30.0	31.5	1300	25	PHE450TF6120JF16R06L2								
<b>LEAD SPACING 37.5 MM</b>							<b>LEAD SPACING 37.5 MM</b>								
0.068	R05	13.0	24.0	41.0	800	28	PHE450TR5680JR05R06L2								
0.082	R05	13.0	24.0	41.0	800	28	PHE450TR5820JR05R06L2								
0.10	R04	15.0	26.0	41.0	800	27	PHE450TR6100JR04R06L2								
0.12	R04	15.0	26.0	41.0	800	27	PHE450TR6120JR04R06L2								
0.15	R02	16.5	32.0	41.0	800	25	PHE450TR6150JR02R06L2								
0.18	R03	19.0	36.0	41.0	800	20	PHE450TR6180JR03R06L2								
0.22	R03	19.0	36.0	41.0	800	20	PHE450TR6220JR03R06L2								
0.22	R06	21.0	38.0	41.0	800	19	PHE450TR6220JR06L2								
0.27	R06	21.0	38.0	41.0	800	19	PHE450TR6270JR06R06L2								
0.33	R08	28.0	43.0	41.0	800	19	PHE450TR6330JR08R06L2								

NEW RANGE

Statements of suitability for certain applications are based on our knowledge of typical operating conditions for such applications, but are not intended to constitute – and we specifically disclaim – any warranty concerning suitability for a specific customer application or use. This Information is intended for use only by customers who have the requisite experience and capability to determine the correct products for their application. Any technical advice inferred from this Information or otherwise provided by us with reference to the use of our products is given gratis, and we assume no obligation or liability for the advice given or results obtained.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับบริการเชิง นีเพื่อการค้าเท่านั้น มิใช่ข้อมูล ที่เห็นได้ชัดแจ้งโดยนิตินันต์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Approval Sheet

for

**Carbon Film Resistors  
Non-Inductive**

**NCR series**

**±5%, ±10%**

**YAGEO CORPORATION**

**Headquarters:** 3F, No.233-1, Pao Chiao Rd., Hsin Tien, Taipei, Taiwan, R.O.C.

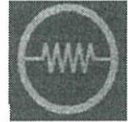
**Tel:** 886-2-2917-7555 **Fax:** 886-2-2917-4286

**Hsin Tien Plant:** 3F, No.5, Lane 560, Chung Cheng Rd., Hsin Tien Taipei, Taiwan, R.O.C

**Tel:** 886-2-2218-2139 **Fax:** 886-2-6629-8898

URL: [www.yageo.com](http://www.yageo.com)





**1. PRODUCT:**

Non-Inductive CARBON FILM RESISTORS

(Normal & Miniature Style)

Gray body color for Normal Size

Pink body color for Miniature Size

Inductance is  $< 1 \mu H$

**2. PART NUMBER:**

Part number of the Non-Inductive flame-proof type carbon film resistor is identified by the name, power, tolerance, packing, temperature coefficient, special type and resistance value.

Example :

<b>NCR</b>	<b>-50</b>	<b>K</b>	<b>T</b>	<b>-</b>	<b>52-</b>	<b>10K</b>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Series Name	Power Rating	Resistance Tolerance	Packing Style	Temperature Coefficient of Resistance	Special Type	Resistance Value

(1) Style: NCR SERIES

(2) Power Rating : -25=1/4W , 50S=1/2W , -50=1/2W , 1WS=1W , 100=1W , 2WS=2W , 200=2W , 3WS=3W

(3) Tolerance : J =  $\pm 5\%$  , K =  $\pm 10\%$

(4) Packaging Type :  
 R= Paper Taping Reel  
 T= Tape on Box Packing  
 B= Bulk Packing

(5) Temperature Coefficient : see table 1

(6) Special Type :  
 26- = 26mm  
 52- = 52.4mm  
 73- = 73mm  
 M = M-Type forming for Bulk  
 PN = PANAsert ( rated watts -25 & 50s & -50 & 1ws size only )  
 AV = AvIsert ( rated watts -25 & 50s & -50 & 1ws size only )  
 FT = M-Type forming for taping ( rated watts -25 & 50s & -50 & 1ws size only )

(7) Resistance Value : E24 Series



### 3. BAND-CODE:



COLOR	1ST BAND	2ND BAND	MULTIPLIER	TOLERANCE
BLACK	0	0	1Ω	
BROWN	1	1	10Ω	
RED	2	2	100Ω	
ORANGE	3	3	1KΩ	
YELLOW	4	4	10KΩ	
GREEN	5	5	100KΩ	Non Inductance
BLUE	6	6	1MΩ	
VIOLET	7	7	10MΩ	
GREY	8	8		
WHITE	9	9		
GOLD			0.1Ω	± 5 % (J)
SILVER			0.01Ω	± 10 % (K)

### 4. ELECTRICAL CHARACTERISTICS

STYLE	NCR-25	NCR50S	NCR-50	NCR1WS	NCR100	NCR2WS	NCR200	NCR3WS
Power Rating at 70 °C	1/4W	1/2W		1W		2W		3W
Maximum Working Voltage	250V	300V	350V	400V	500V			
Maximum Overload Voltage	500V	600V	700V	800V	1000V			
Dielectric Withstanding Voltage	500V		700V		1000V			
Resistance Range	2.2Ω~5KΩ for E24 series value							
Operating Temp. Range	- 55 °C to + 155 °C							
Temperature Coefficient	see Table. 1							

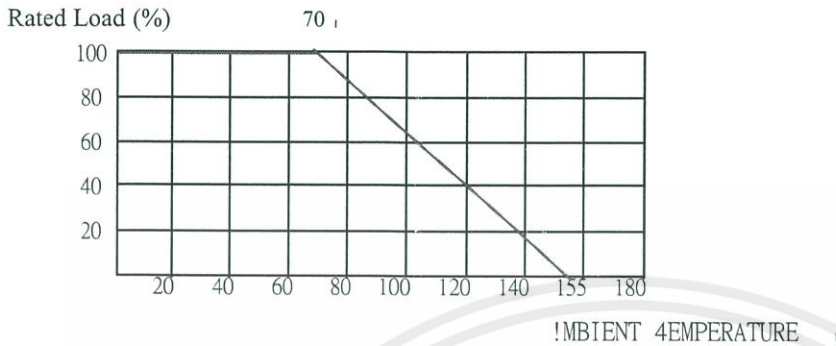
\* Below or over this resistance range on request.

TABLE 1 TEMPERATURE COEFFICIENT

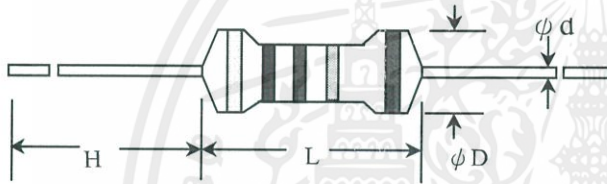
Value Range	Max. Value of Temp. Coefficient ppm/°C
Under 5KΩ	- 500
5K ~ 10KΩ	-800



## 5. DERATING CURVE



## 6. DIMENSIONS



STYLE		DIMENSION			
Normal	Miniature	L	φD	H	φd
NCR-25	NCR50S	6.3±0.5	2.4±0.2	28±2.0	0.55±0.05
NCR-50	NCR1WS	9.0±0.5	3.3±0.3	26±2.0	0.55±0.05
NCR100	NCR2WS	11.5±1.0	4.5±0.5	35±2.0	0.8±0.05
NCR200	NCR3WS	15.5±1.0	5.0±0.5	33±2.0	0.8±0.05

## 7. ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

### (1) Short Time Over Load Test

At 2.5 times of the rated voltage applied for 5 seconds, the resistor should be free from defects after the resistor is released from load for about 30 minutes

$$\text{Short Time Overload Voltage} = 2.5 * \sqrt{\text{Power Rating} \times \text{Resistance Value}}$$

The change of the resistance value should be within  $\pm 0.75 \% + 0.05 \Omega$  (Normal Style)

The change of the resistance value should be within  $\pm 2.0 \% + 0.05 \Omega$  (Miniature Style)

### (2) Dielectric Withstanding Voltage

The resistor is placed on the metal V Block. Apply a Table I dielectric withstanding between the terminals connected together with the block for about 60 seconds.

The resistor shall be able to withstand without breakdown or flashover.



(3) Temperature Coefficient Test

Test of resistors above room temperature  $100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ( Testing Temperature  $115^{\circ}\text{C}$  to  $130^{\circ}\text{C}$  ) at the constant temperature silicon plate for over 5 minutes. Then measure the resistance value. The Temperature Coefficient is calculated by the following equation and its value should be within the range of requested.

$$\text{Resistor Temperature Coefficient} = \frac{R - R_0}{R_0} \times \frac{1}{t - t_0} \times 10^6$$

- R = Resistance value under the testing temperature
- R<sub>0</sub> = Resistance value at the room temperature
- t = The testing temperature
- t<sub>0</sub> = Room temperature

(4) Insulation Resistance

Apply test terminal on lead and resistor body.  
The test resistance should be high than 1,000M ohm.

(5) Solderability

Immerse the specimen into the solder pot at  $260 \pm 5^{\circ}\text{C}$  for  $5 \pm 0.5$  seconds.  
At least 95% solder coverage on the termination.

(6) Resistance to Solvent

The specimen into the appropriate solvent of IPA condition of ultrasonic machine for 1 minutes.  
The specimen is no deterioration of coatings and color code.

(7) Terminal Strength

Direct Load – Resistors shall be held by one terminal and the load shall be gradually applied in the direction of the longitudinal axis of the resistor unit the applied load reacheds 5 pounds ◦  
The load shall be held for 10 seconds. The load of weight shall be  $\geq 2.5 \text{ kg}$  ( 24.5N ).

(8) Pulse Overload

Apply 4 times of rated voltage to the specimen at the 1 second on and 25 seconds off cycle, subjected to voltage application cycles specified in 10,000 time ◦  
The change of the resistance value shall be within  $\pm 1.0\% + 0.05 \Omega$

(9) Load Life in Humidity

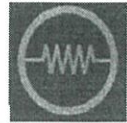
Place the specimen in a test chamber at  $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$  and 90 ~ 95 % relative humidity. Apply the rated voltage to the specimen at the 1.5 hours on and 0.5 hour off cycle. The total length of test is 1,000 hours  
The change of the resistance value shall be within  $\pm 3 \% + 0.05 \Omega$

(10) Load Life Test

Placed in the constant temperature chamber of  $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$  the resistor shall be connected to the lead wire at the point of 25mm. Length with each terminal, the resistors shall be arranged not much effected mutually by the temperature of the resistors and the excessive ventilation shall not be performed, for 90 minutes on and 30 minutes off under this condition the rated D.C. voltage is applied continuously for 1000+48/-0 hours then left at no-load for 1hour, measured at this time the resistance value ◦

The change of the resistance value shall be within  $\pm 3 \% + 0.05 \Omega$ .

There shall be no remarkable change in the appearance and the color code shall be legible after the test.



(11) Temperature Cycling Test

The temperature cycle shown in the following table shall be repeated 5 times consecutively. The measurement of the resistance value is done before the first cycle and after ending the fifth cycle, leaving in the room temperature for about 1 hour ◦

Temperature Cycling Conditions:

Step	Temperature(°C)	Time (minute)
1	-55 ± 3	30
2	25 ± 3	2 ~3
3	155 ± 3	30
4	25 ± 3	2 ~3

The change of the resistance value shall be within ± 1.0 % + 0.05 Ω  
After the test the resistor shall be free from the electrical or mechanical damage.

(12) Resistance to Soldering Heat

The terminal lead shall be dipped into the solder pot at 350 ± 10 °C for 3 ± 0.5 seconds up to 2 ~ 2.5 mm. The change of the resistance value shall be within ± 1.0 % + 0.05 Ω

(13) Overload Flame Retardant

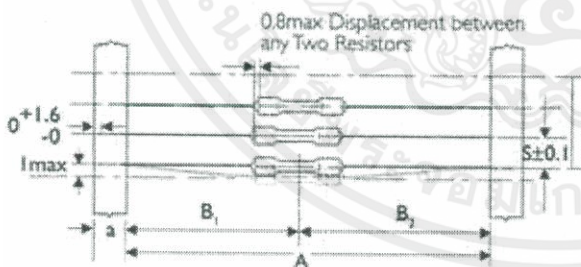
At 4 times of the rated voltage applied for 1 minute

$$\text{Overload Test Voltage} = 4 * \sqrt{\text{Power Rating} \times \text{Resistance Value}}$$

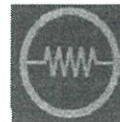
The resistor shall be able to no evidence of flaming arcing.

**8. PACKING METHODS**

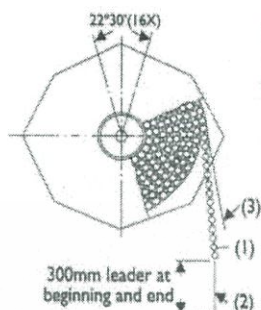
Bandolier for Axial leads



STYLE		DIMENSIONS			Unit : mm	
Normal	Miniature	a	A	B1-B2	S (spacing)	T (max. deviation of spacing)
NCR-25	NCR50S	6 ± 0.5	52.4 ± 1.0 26.0 ± 1.0	1.2 1.0	5	1 mm per 10 spacing
NCR-50	NCR1WS	6 ± 0.5	52.4 ± 1.0	1.2	5	0.5 mm per 5 spacing
NCR100	NCR2WS	6 ± 0.5	73.0 ± 1.5 52.4 ± 1.0	1.5 1.2	5	
NCR200	NCR3WS	6 ± 0.5	73.0 ± 1.5 52.4 ± 1.0	1.5 1.2	10	

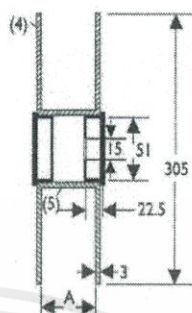


## TAPE ON REEL PACKING



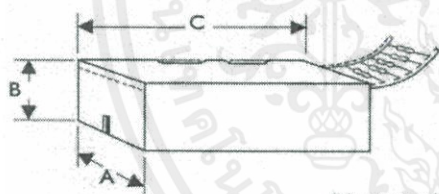
Bandoliers can be reeled;  
dimension a differ with type.

- (1) resistor
- (2) bandolier
- (3) paper
- (4) flange
- (5) cylinder



STYLE		TAPE ON REEL	
Normal	Miniature	ACROSS FLANGE (A)	Qty per reel
NCR-25	NCR50S	72	5,000
NCR-50	NCR1WS	72	2,500
NCR100	NCR2WS	95	2,000
NCR200	NCR3WS	95	1,000

## TAPE ON BOX PACKING



Bandoliers may also be supplied in  
a cardboard box ("ammopack").

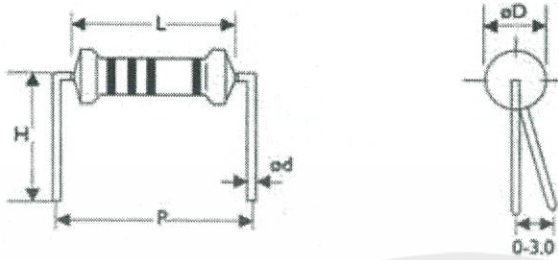
"Ammopack" is an abbreviation of "ammunition packing"  
The dimensions of A-B-C vary with type and quantity.

STYLE		Standard Lead Length			Short Lead Length			Qty per box
Normal	Miniature	W (A)	H (B)	L (C)	W (A)	H (B)	L (C)	
NCR-25	NCR50S	81	104	260	48	102	255	5,000
NCR-50	NCR1WS	73	45	258	—	—	—	1,000
NCR100	NCR2WS	103	78	260	81	91	260	1,000
NCR200	NCR3WS	103	94	260	81	91	260	1,000



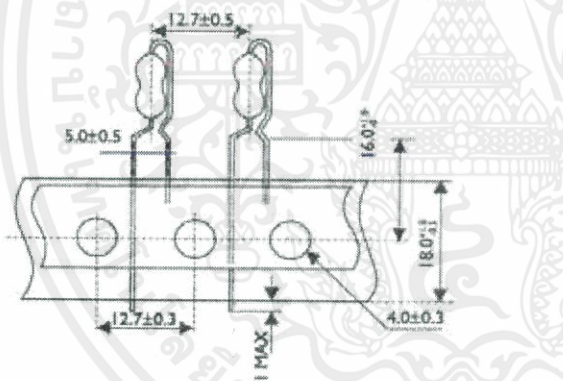
## 11. SPECIAL TYPE ( FORMING DIMENSIONS )

M TYPE

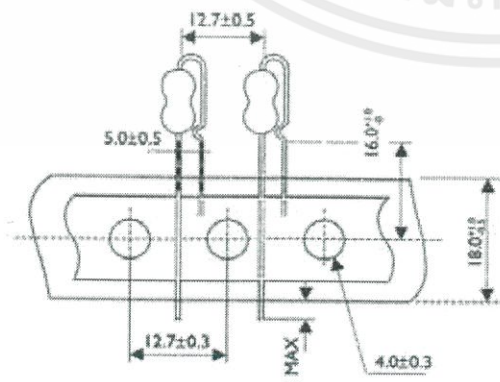


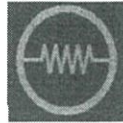
STYLE		DIMENSIONS				UNIT : mm
Normal	Miniature	L	$\phi D$	$\phi d$	P	H
NCR-25	NCR50S	$6.3 \pm 0.5$	$2.4 \pm 0.2$	$0.55 \pm 0.05$	$10.0 \pm 1$	$10.0 \pm 1$
NCR-50	NCR1WS	$9.0 \pm 0.5$	$3.3 \pm 0.3$	$0.55 \pm 0.05$	$12.5 \pm 1$	$10.0 \pm 1$
NCR100	NCR2WS	$11.5 \pm 1.0$	$4.5 \pm 0.5$	$0.8 \pm 0.05$	$15.0 \pm 1$	$12.5 \pm 1$
NCR200		$15.5 \pm 1.0$	$5.0 \pm 0.5$	$0.8 \pm 0.05$	$20.0 \pm 1$	$15.0 \pm 1$

PN Type Forming for Taping (rated watts -25 & 50s & -50 & 1ws size only )

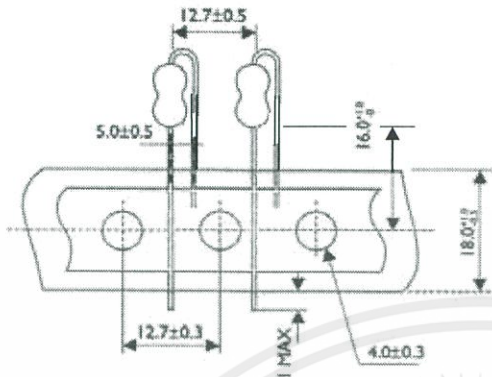


AV Type Forming for Taping (rated watts -25 & 50s & -50 & 1ws size only )





FT Type Forming for Taping (rated watts -25 & 50s & -50 & 1ws size only )



## 12. Plant Address

- A. Taiwan Hsin Tien Plant  
3F, No.5, Lane 560, Chung Cheng Road,  
Hsin Tien Taipei, Taiwan, ROC  
(台北縣新店市中正路 560 巷 5 號 3 樓)  
Tel. 886-2-2218-2139  
Fax. 886-2-6629-8898
- B. China Dongguan Plant  
7-1, Gaoli Road, Gaoli Industrial Zone  
Tangxia Zhen, Dongguan, Guangdong, China  
(廣東省東莞市塘廈鎮高麗工業區高麗路 7-1 號)  
Tel. 86-769-772 0275  
Fax. 86-769-772 0295
- C. China MuDu Plant  
No.158, Fengjiang Road, No.1 Building of NanBangIND.Zone,  
Mu Du New District, Suzhou, China  
(江蘇省蘇州市木瀆新區楓江路 158 號南濱工業區 1 號)  
Tel. 86-512-66518889  
Fax. 86-512-66519889

## ประวัติผู้เขียน



นายฐาปกรณ์ กุณาทลต์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาวិชากรรมศาสตร์บัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
E-mail : b\_boss\_zone@hotmail.com



นาย ทศพล สีหสุทธิฤทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนาวิธรรมสาศิต และสำเร็จการศึกษาวิชากรรมศาสตร์บัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
E-mail : nun\_cg@hotmail.com



นายเดชสิทธิ์ ถาวร เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนปราจิณราษฎรอำรุง และสำเร็จการศึกษาวิชากรรมศาสตร์บัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
E-mail : detchsithz@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นาย วงศรณ เจียรวิจิตร เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมต้นและมัธยมปลายจากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัยสมบูรณกุลกันยา และสำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Email: korakot2499@hotmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้