

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ พิกัด 200 kV  
200 kV AC and DC Voltage Divider



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ พิกัด 200 kV  
200 kV AC and DC Voltage Divider



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 200 kV AC and DC Voltage Divider



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2014

ปีการศึกษา 2557

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ พิกัด 200 kV  
200 kV AC and DC Voltage Divider



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรฤติ ยุธโกวิท

ผศ.วรภัทร์ ลิ้มเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โวลต์เตจตีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ พิกัด 200 kV

ผู้จัดทำ

1. นาย ตรีวิชัย แสงสิทธิ์
2. นาย วิฑูรช พันธากุล
3. นาย วิฑูชนน พวงเพชร
4. นางสาว วิลาสินี วัฒนไพบูลย์



  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิรุฒิ ยุทธโกวิท)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรกรณ์ ลิ้มเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นชอบใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ พิกัด 200 kV

นาย ตรีวิษณุ แสงสิทธิ์  
นาย วิฑูรช พันธากุล  
นาย วิรุชนน พวงเพชร  
นางสาววิลาสินี วัฒนไพบูลย์  
ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยูทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2557

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอผลการออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับใช้วัดแรงดันสูง กระแสตรงและแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 200 kV โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างเป็น ชนิดตัวต้านทานย่อยขนานกับตัวเก็บประจุย่อย และต่ออนุกรมกันเป็นชุดเพื่อให้ทนต่อ แรงดันใช้งานได้ ซึ่งจากการคำนวณพบว่ามีค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินเท่ากับ 37.7 pF ในภาคแรงดันสูงใช้ตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกันและต่อขนานกับตัวต้านทานในแต่ละชั้น โดยค่าตัวเก็บประจุในภาคแรงสูงถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน และบรรจุอยู่ใน ท่อพลาสติกอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 2 บาร์ ส่วนในภาคแรงดันต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อขนาน กับตัวต้านทานโดยกระจายตัวแบบสมมาตร และถูกบรรจุอยู่ในกล่องซิลิโคนนิยัม โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการออกแบบและประกอบสร้างได้ทดสอบและประเมินคุณสมบัติอ้างอิงตาม มาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ได้แก่ การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทาน การทดสอบความคงทนอยู่ต่อแรงดัน (Withstand test) การทดสอบหาค่าอัตราส่วนลดทอน แรงดัน (Scale Factor test) การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test) และการทดสอบหา เสถียรภาพ (Stability test) ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูง มีค่าเท่ากับ 166.6 pF และความต้านทานภาคแรงดันสูงมีค่าเท่ากับ 242 MΩ ส่วนค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงดันต่ำมีค่าเท่ากับ 166.6 nF และความต้านทานภาคแรงดันต่ำมีค่าเท่ากับ 242 kΩ โดยมีอัตราส่วนลดทอนแรงดัน เท่ากับ 1000:1 ซึ่งผลการทดสอบอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการออกแบบสร้างขึ้น สามารถใช้วัดแรงดันสูงทั้งสองแบบได้เป็นอย่างดีและมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนดนอกจากนี้ยัง เป็นการเพิ่มศักยภาพให้กับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบังได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 200 kV AC and DC Voltage Divider

Mr.Treewit	Sangsit	
Mr.Witurat	Phanthakul	
Mr.Withuchanon	Phuangphat	
Miss.Wilasinee	Wattakapaiboon	
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowit	Advisor
Asst.Prof.Worrakan	Limcharoena	Advisor

Year 2014

### ABSTRACT

This project presents a design and construction of a voltage divider, which is used in measurement of DC and AC voltages at the rated value of 200 kV. The high-voltage part is designed and constructed by using a set of lump resistors connected parallel with lump capacitors and they are connected in series for having required voltage rating. From dimension of the high voltage part, the calculated stray capacitance is 37.7 pF. The capacitance in high voltage part is designed to be higher than stray capacitances. All of high-voltage components are installed in the PVC tube filled with SF<sub>6</sub> insulated gas at pressure of 2 bars. The low voltage part of the divider was constructed from capacitor parallel with resistors enclosed in an aluminum housing. The designed voltage divider has been tested according to the standard of IEC 60060-2 (2010) composing of a measurement of capacitance and resistance, a withstand voltage test, a scale factor test, a linearity test and a short-term stability test. From the experimental results, the measurement of capacitance and resistance in high voltage part are 166.6 pF and 242 M $\Omega$  respectively. The low voltage capacitances and resistances are 166.6 nF and 242 k $\Omega$  respectively. The scale factor of voltage divider is approximately 1000:1. In addition, the voltage divider has a good performance for all type of voltage measurement and characteristics met the entire of the standard requirement. Furthermore, This accomplishment will be advantage for increasing capability of high voltage engineering laboratory of KMITL.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการด้วยดีตลอดมา นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย

ขอขอบคุณ คุณปณณวิทย์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลืออีกทั้งยังช่วย แก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการประกอบสร้าง และการทดสอบมาโดยตลอด รวมไปถึงการตรวจสอบ แก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนายสุรศักดิ์ น้อยหอม ที่ช่วยเหลือเรื่องการประกอบสร้าง และช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยดูแลเรื่องการทดสอบต่างๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เช่น เรื่องความปลอดภัย, การจัดวงจรการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่เฝ้าใช้เครื่องมือ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุน ในด้านการเงิน และให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจติไวเดออร์	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ชนิดของโวลต์เตจติไวเดออร์	6
2.2.1 โวลต์เตจติไวเดออร์แบบความต้านทาน	6
2.2.2 โวลต์เตจติไวเดออร์แบบความต้านทานมีซีลด์	7
2.2.3 โวลต์เตจติไวเดออร์แบบตัวเก็บประจุ	7
2.2.4 โวลต์เตจติไวเดออร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	8
2.2.5 โวลต์เตจติไวเดออร์แบบผสม	9
2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลต์เตจติไวเดออร์	10
2.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุและคุณสมบัติ	10
2.3.2 ชนิดของตัวต้านทานและคุณสมบัติ	17
2.3.3 การฉนวน	21
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเดออร์	27
3.1 คุณสมบัติของโวลต์เตจติไวเดออร์	27
3.2 การออกแบบโวลต์เตจติไวเดออร์แบบผสม	27
3.2.1 การออกแบบภาคแรงดันสูง	27
3.2.2 การออกแบบภาคแรงดันต่ำ	32
3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจติไวเดออร์	34
3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์	38
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ใช้ในการวัดค่าได้จากโวลต์เตจติไวเดออร์	40
3.5.1 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ	40
3.5.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	41

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การอัดก๊าซ SF <sub>6</sub>	44
3.6.1 การตรวจเช็คการรั่วซึม	44
3.6.2 การอัดก๊าซ SF <sub>6</sub>	45
3.7 การจำลองการทำงานของโวลต์เดจดีไวเซอร์โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics	46
3.7.1 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่พิกัด	47
3.7.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่แรงดัน Withstand	51
<b>บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล</b>	55
4.1 บทนำ	55
4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ	55
4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง	55
4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ	55
4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง	56
4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง	56
4.4 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ	56
4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ	56
4.5 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	56
4.6 การแก้ไขค่าอัตราส่วนการสทอนแรงดันของระบบวัด	59
4.7 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	63
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	66
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	68
<b>ภาคผนวก</b>	69
ภาคผนวก ก การทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	70
ภาคผนวก ข การทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสตรง	73
ภาคผนวก ค รายละเอียดอุปกรณ์	76
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการ	86
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	วงจรมุมของโวลต์เตจติไวเตอร์	5
2.2	โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน	6
2.3	โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทานมีซีลด์	7
2.4	โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ	8
2.5	โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	8
2.6	โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม	9
2.7	การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ	10
2.8	ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ	10
2.9	ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	11
2.10	ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	11
2.11	ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	12
2.12	ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	13
2.13	โครงสร้างและรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	14
2.14	โครงสร้างและรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม	15
2.15	รูปร่างและสัญลักษณ์ของวาริเอเบิลคาปาซิเตอร์	15
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่	16
2.17	ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในแต่ละย่านความถี่	17
2.18	คาร์บอนรีซิสเตอร์	18
2.19	คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	18
2.20	เม็ททอลฟิล์มรีซิสเตอร์	19
2.21	ไวร์วาวด์รีซิสเตอร์	19
2.22	ตัวต้านทานชนิดตัวถังแบบเดี่ยว (SIP)	20
2.23	ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)	20
2.24	ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้	20
2.25	คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ	21
2.26	กลไกการเบรกดาวนของฉนวนแข็งโดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า $E_b$ แปรไปตามช่วงเวลาที่ย้อนแรงดัน	22

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 โมเลกุลของ SF <sub>6</sub>	25
2.28 แรงดันเบรกดาวาร์นของก๊าซ SF <sub>6</sub> เมื่อเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง	26
3.1 ตัวเก็บประจุเดี่ยวแบบทรงกระบอก	28
3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสลับ	29
3.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง	30
3.4 ตัวต้านทานภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	31
3.5 การต่ออิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ	33
3.6 กล่องบรรจุอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ	34
3.7 วงจรสมมูลย์	34
3.8 การจำลองการสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	35
3.9 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงดันสูงของโวลต์เตจติไวเตอร์	36
3.10 ท่อพีวีซีที่ใช้เป็นโครงสร้างของโวลต์เตจติไวเตอร์	37
3.11 อิเล็กโทรดของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่ออกแบบ	37
3.12 การวิเคราะห์โครงสร้างอิเล็กโทรด	38
3.13 ลักษณะของอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมและสนามไฟฟ้า	38
3.14 ลักษณะของอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งทรงกลมและสนามไฟฟ้า	39
3.15 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี $x = 14$ cm โค้งขอบด้านบน ( $R_1 = 3$ cm) โค้งขอบด้านล่าง ( $R_2 = 2.5$ cm)	40
3.16 สายเคเบิลชนิด RG11 AVU	40
3.17 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป	40
3.18 หัวต่อภาคต่ำ	41
3.19 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	42
3.20 การแควคัมโวลต์เตจติไวเตอร์ และการอัดก๊าซ SF <sub>6</sub>	45
3.21 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลต์เตจติไวเตอร์	46
3.22 วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับ 200 kV	47
3.23 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลต์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับ 200 kV	47
3.24 วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับ 200 kV	48
3.25 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลต์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับ 200 kV	48
3.26 วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	49
3.27 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลต์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	49
3.28 วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อังอาจอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.29	รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV	50
3.30	วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV	51
3.31	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV	51
3.32	วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV	52
3.33	รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV	52
3.34	วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV	53
3.35	รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV	53
3.36	วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV	54
3.37	รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV	54
4.1	วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	57
4.2	กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	59
4.3	การต่อตัวเก็บประจุขนานเพิ่มเข้าไป	60
4.4	กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับหลังการแก้ไข	62
4.5	วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	63
4.6	กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	65
5.1	โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์	67

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 71-1 [4]	1
1.2	วิธีการดำเนินงาน	3
2.1	ลักษณะการดิซชาร์จเบรกดาวน์ในแกป	24
2.2	คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF <sub>6</sub>	25
3.1	พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลต์เตจติไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง	27
3.2	คุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U	41
3.3	มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1	42
3.4	คุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV	43
3.5	คุณสมบัติของ FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer	43
3.6	คุณสมบัติของ Probe	44
4.1	ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง	55
4.2	ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ	55
4.3	ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง	56
4.4	ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ	56
4.5	ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	58
4.6	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	59
4.7	ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำหลังปรับค่าอัตราส่วน	60
4.8	ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับหลังการแก้ไข	61
4.9	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับหลังการแก้ไข	62
4.10	ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	64
4.11	ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และIXต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายของระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน มักมีปัญหาในเรื่องการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากแหล่งผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้า แหล่งวัตถุดิบ มักห่างไกลจากบริเวณที่ใช้กำลังไฟฟ้า เพื่อลดกำลังการสูญเสียในการส่งจ่าย และลดการเกิดแรงดันตกในสายส่ง จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันสูงในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูงทั้งหมดต้องผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามมาตรฐานกำหนดเป็นอย่างน้อย เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้า ซึ่งการทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริงภายในห้องปฏิบัติการต้องมีเครื่องมือวัดที่แม่นยำ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และเครื่องมือวัดต่างๆ ดังนั้นเมื่อต้องการวัดแรงดันสูง จึงต้องทำการลดทอนแรงดันสูงให้มีขนาดต่ำลง อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงที่ใช้งานในปัจจุบัน คือ โวลต์เตจดิไวเดอร์ (Voltage Divider) ซึ่งโวลต์เตจดิไวเดอร์จะทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์วัดแรงดันภาคแรงต่ำได้ เช่น ออสซิลโลสโคป มัลติมิเตอร์ เป็นต้น โดยใช้ข้อกำหนดของมาตรฐานสากล IEC 60060-1 [2], IEC 60060-2 [1] และ IEEE Std.4 [3] เป็นเกณฑ์การตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะการทำงาน

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปัจจุบันมีโวลต์เตจดิไวเดอร์เพื่อใช้ในการวัดแรงดันสูงพิกัดสูงสุด 100 kV เพื่อเป็นการรองรับงานวิจัยและงานทดสอบที่มีพิกัดแรงดันที่สูงขึ้น จึงได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดิไวเดอร์พิกัด 200 kV โดยสามารถวัดได้ทั้งแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันสูงกระแสตรง อีกทั้งยังเป็นการลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ประโยชน์ที่ได้เพื่อเป็นการพัฒนาบุคลากรและทักษะในการสร้างเครื่องมือใช้เอง ประหยัดงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อซึ่งสามารถใช้งานทดแทนอุปกรณ์ที่มีขายสำเร็จรูปและมีราคาสูงในห้องตลาดได้

ตารางที่ 1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 71-1 [4]

Insulation voltage $U_m$ (kV)	Rated alternating Withstand Voltage (kV)	Rated lightning Withstand Voltage (kV)
3.6	10	40
7.2	20	60
12	28	75
17.5	38	95
24	50	125
36	70	170
52	95	250
72.5	140	325
100	185	450
123	230	550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์เพื่อใช้ในการวัดแรงดันสูง กระแสสลับและแรงดันสูงกระแสตรง
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติโวลต์เตจติไวเตอร์
3. เพื่อเพิ่มศักยภาพในการทดสอบและงานวิจัยของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. เพื่อรองรับงานการทดสอบทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
5. เพื่อส่งเสริมให้เกิดพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรง ด้วยโวลต์เตจติไวเตอร์
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการใช้โปรแกรม FEM ในการวิเคราะห์การกระจายของสนามไฟฟ้า บนตัวโวลต์เตจติไวเตอร์
3. ทำการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์ ที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับพิกัดสูงสุด 200 kV และ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัด 200 kV

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดต่างๆ
2. ศึกษามาตรฐานการวัดไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจติไวเตอร์
3. ออกแบบโวลต์เตจติไวเตอร์
4. ประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์
5. ทดสอบโวลต์เตจติไวเตอร์
6. วิเคราะห์และปรับปรุงโวลต์เตจติไวเตอร์ให้ได้ตามมาตรฐานกำหนด
7. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงหรือโวลต์เตจติไวเตอร์ ที่มีคุณสมบัติในการวัดแรงดันกระแสสลับพิกัดสูงสุด 200 kV และ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV ความผิดพลาดไม่เกิน 5% เพื่อนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 1.2 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2557									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาคุณสมบัติของ โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดต่างๆ	←--→ ←--→									
2. ศึกษามาตรฐานการวัด ไฟฟ้าแรงดันสูง	←--→ ←--→									
3. ออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์		←--→ ←--→								
4. ประกอบสร้าง โวลต์เตจดีไวเดอร์				←--→ ←--→						
5. ทดสอบโวลต์เตจดีไวเดอร์							←--→ ←--→			
6. วิเคราะห์และปรับปรุง อุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้า แรงสูงให้ได้มาตรฐานและ ข้อกำหนด							←--→ ←--→			
7. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับ สมบูรณ์									←--→ ←--→	

←--→ วางแผน      ←--→ ทำจริง

### 1.6 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์ในประเทศไทย มีหลายงานวิจัยแต่ส่วนมากจะเป็นงานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยที่จะเป็นงานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณ วรา จูห้อง ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.

2. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 400 kV แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณไพศาล จิรนนตรัตน์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์ขนาด 1000 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณประเสริฐ รัชสีโสภณาภรณ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

4. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์อ้าอิงขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณอรณพ ลิมส์มาร์ตัน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

5. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงสูงแบบตัวต้านทานขนาด 100 kV ปริญญาโทของคุณอาธร ภาณี และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2547.

6. โวลต์เตจติไวเตอร์แบบวงจรร่วมราคาประหยัดสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ขนาด 100 kV ของคุณรัชกร ปานทองทอง, คุณศราวดี คลีสุวรรณ และคุณชินธรรม บุญยะกุล การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 2549.

7. โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 300 kV ของคุณปริญญา ชมลิน , คุณพีรวิฑูมิ ยุทธโกวิท, คุณนรเศรษฐ พัฒนเดช และคณะ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 2549.

8. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสมขนาด 300 kV ปริญญาโทของคุณสุชาติ มณฑปใหญ่ และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

9. โวลต์เตจติไวเตอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 100 kV ของคุณกীরติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์ และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

## บทที่ 2

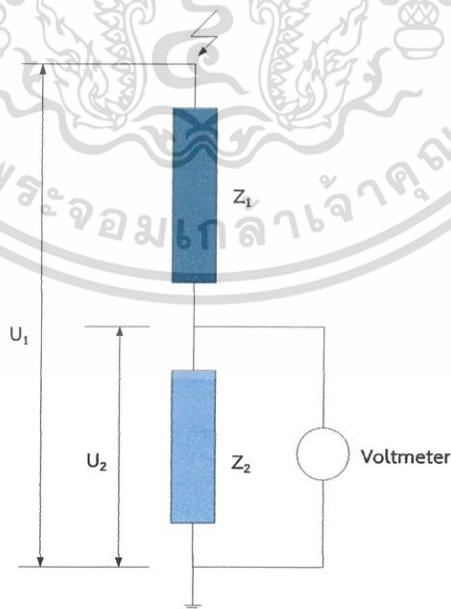
### ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจติไวเตอร์

#### 2.1 บทนำ

การวัดแรงดันสูงนอกจากกระยะระหว่างผู้วัด และอุปกรณ์วัดที่ปลอดภัยโดยอาศัยหลักการฉนวนที่ถูกต้องแล้ว การวัดแรงดันสูงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดที่สำคัญได้แก่ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชีตความสามารถของเครื่องมือวัด ความเร็วของเครื่องมือวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดแรงดันอิมพัลส์

เทคนิคการวัดแรงดันสูง[5] ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันอิมพัลส์นี้ มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ส่วนแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรงนั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ ภายในระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่าย

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่ใช้ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ 2 ชุดต่ออนุกรมกันคือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง ( $Z_1$ ) ของโวลต์เตจติไวเตอร์นั้นจะรับแรงดัน( $U_1$ ) เกือบทั้งหมดตกคร่อมตัวเอง อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ( $Z_2$ ) จะเป็นส่วนแรงดัน( $U_2$ ) ที่สามารถนำไปใช้งานกับเครื่องมือวัด อิมพีแดนซ์ทั้ง 2 ชุดของโวลต์เตจติไวเตอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่างก็ได้ ซึ่งโวลต์เตจติไวเตอร์จะได้ชื่อตามตัวประกอบวงจร และลักษณะการจัดวางอิมพีแดนซ์ เช่น โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ชนิดของโวลต์เตจติไวเตอร์ [6]

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันโดยสามารถแบ่งแรงดันออกเป็น 3 ชนิด กล่าวคือ

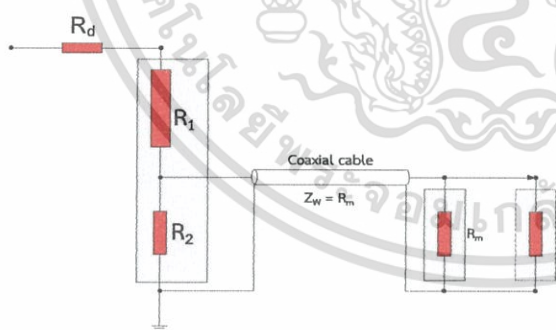
1. แรงดันสูงกระแสสลับ
2. แรงดันสูงกระแสตรง
3. แรงดันอิมพัลส์

### 2.2.1 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน คือ โวลต์เตจติไวเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดความต้านทานความเหนียวนำต่ำ แห่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้วัดแรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่า 100kV เหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจากความจุสเตรย์ลงดิน จึงนิยมใช้วัดไม่เกิน 2,300 kV

ความถูกต้องในการวัดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดแรงดันต่ำคร่อมความต้านทานของภาคแรงต่ำซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์หรือเครื่องมือวัดที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนแรงดันสูงได้ในขณะเดียวกันกระแสรั่วไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้สูงเกินไป นั่นคือ กระแสจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 mA โดยที่ความต้านทานรวมควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 M $\Omega$ /kV



ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน

ข) ตัวอย่างโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน

### รูปที่ 2.2 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน

เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง  $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทานมีซีลด์

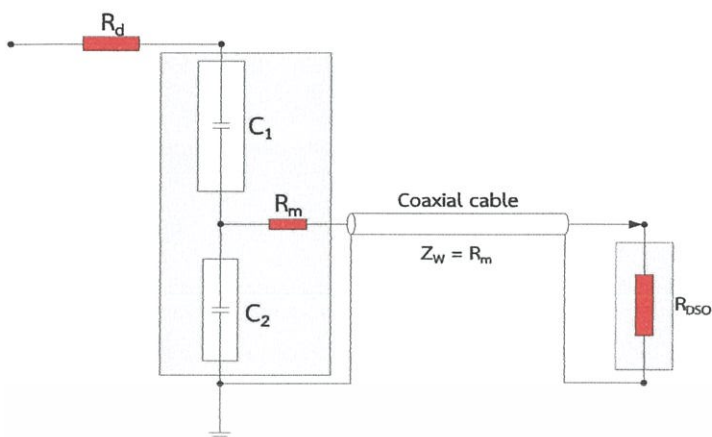
โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะสมบัติความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองรูปขึ้นได้ต่างๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรง และขนาดของซีลด์อิเล็กทรอนิกส์ และขึ้นอยู่กับการออกแบบความต้านทานในภาคแรงสูงให้เป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด เมื่อความสูงของโวลต์เตจติไวเตอร์มากขึ้น อาจใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์หลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดต่อกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไปแล้วโวลต์เตจติไวเตอร์ขนาดต่ำกว่า 500 kV ใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์อันเดียวติดตั้งตอนบนก็เพียงพอ



รูปที่ 2.3 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทานมีซีลด์

### 2.2.3 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้ มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำเป็นแบบตัวเก็บประจูดังรูปที่ 2.4(ก) ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับกัน หรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจื่อย่อยจะใช้ตัวเก็บประจื่อย่อยมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุ และแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจื่อย่อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมัน หรือแบบเซรามิก ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบอัดความดัน โดยมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม ภายในอัดก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ใช้ อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF<sub>6</sub>) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์



ก) วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

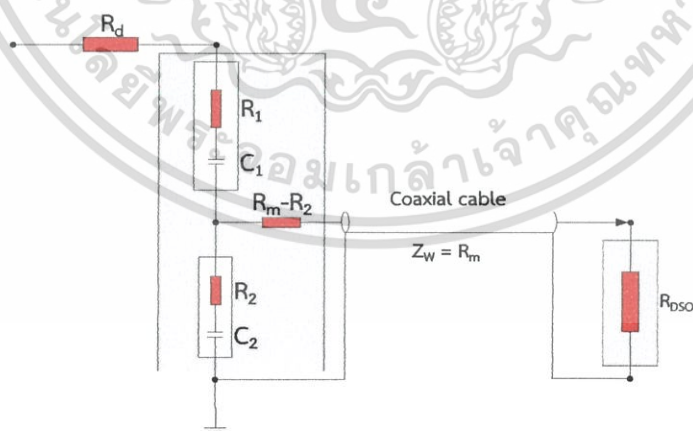
ข) ตัวอย่างโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

### รูปที่ 2.4 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

เมื่อ  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง  $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

#### 2.2.4 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ประกอบด้วย ความต้านทาน และตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.5 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวของโวลต์เตจติไวเตอร์ถ้าเลือกใช้ความต้านทานที่เหมาะสม โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดีแม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ และแรงดันสูงกระแสสลับ



### รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

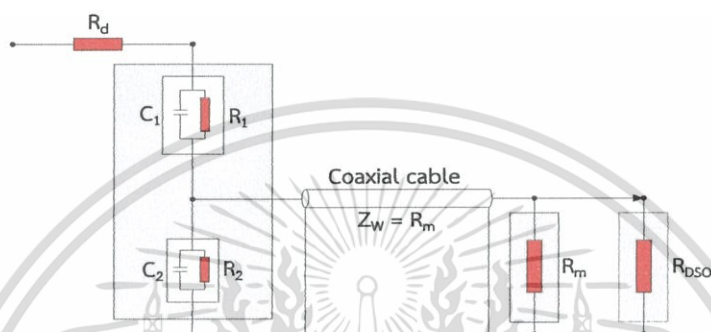
เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงสูง  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูง

$R_2$  คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงต่ำ  $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้ได้ดัดแปลงมาจากโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจุย่อยขนานเข้าไปกับความต้านทานเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่าของความจุ stray ของดิน และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูง และแรงต่ำ เท่ากันโวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้เหมาะสมสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 (ก)



ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม



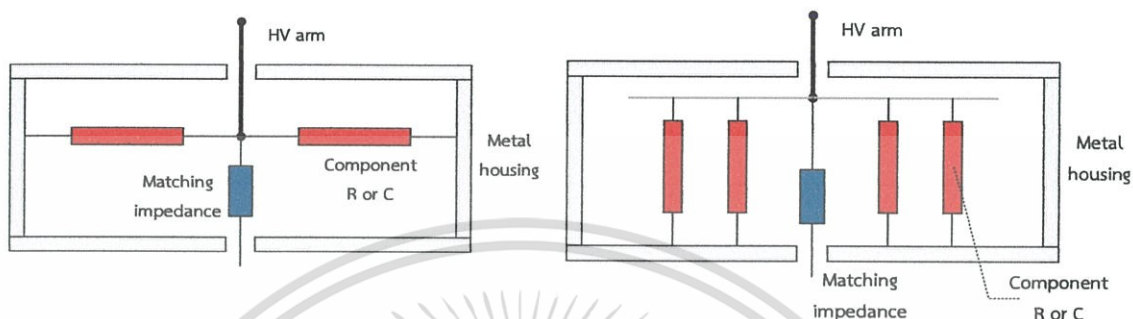
ข) ตัวอย่างโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

### รูปที่ 2.6 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

เมื่อ  $R_1$  คือความต้านทานภาคแรงสูง  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยขนานในภาคแรงสูง  
 $R_2$  คือความต้านทานภาคแรงต่ำ  $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุขนานในภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโวลต์เตจติไวเตอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องมีเวลาตอบสนองที่ไว การที่มีความเหนียวช้าในระบวัตโดยเฉพาภาคแรงต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่ง การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้มีความเหนียวช้าน้อยที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ตัวอย่างการจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้มีความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนียวช้าได้ แสดงดังรูปที่ 2.7

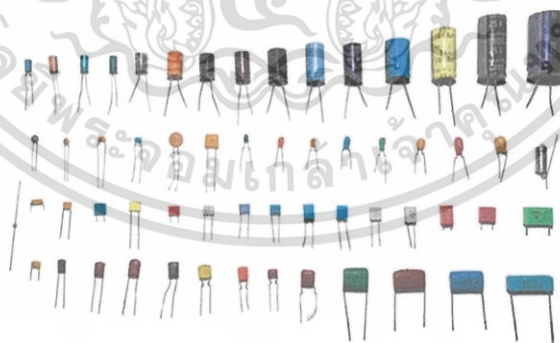


รูปที่ 2.7 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

### 2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลต์เตจติไวเตอร์ [6-7]

โวลต์เตจติไวเตอร์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน ซึ่งเราจะเรียกชื่อของโวลต์เตจติไวเตอร์แต่ละชนิด ตามลักษณะการต่ออิมพีแดนซ์ภายใน โวลต์เตจติไวเตอร์ ซึ่งการสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์จำเป็นต้องทราบรายละเอียด และคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุรวมไปถึงการฉนวน เป็นต้น

#### 2.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุ และคุณสมบัติ



รูปที่ 2.8 ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ

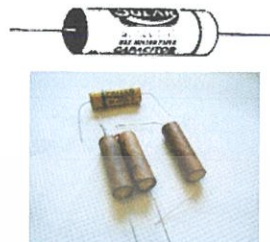
##### 2.3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่

เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าคงที่ได้ โดยส่วนมากจะเรียกชื่อตามชนิดของ ไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบซีลิ่งเป็นตัวไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นตัวนำที่ยาวมาก เพื่อให้เกิดความจุตามต้องการแล้วทำการม้วนให้เป็นทรงกระบอก ตัวเก็บประจุแบบกระดาษจะมีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 - 1  $\mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ประมาณ 200 - 1600 V<sub>DC</sub>



ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

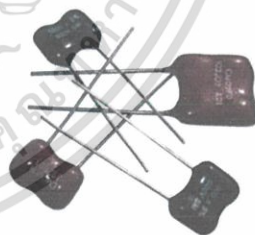
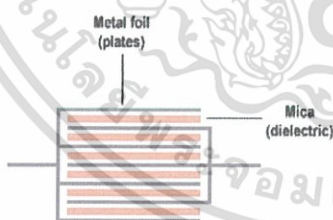
ข) รูปร่างของตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

ค) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุนิตมีค่าคงที่

รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

### 2.3.1.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ตัวเก็บประจุนิตนี้จะใช้ไมก้าเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นฉนวนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และถือเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุด ค่าความจุของตัวเก็บประจุนิตนี้มีค่าประมาณ 1 pF - 0.1  $\mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ประมาณ 100 - 2500 V<sub>DC</sub>



ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ข) รูปร่างตัวเก็บประจุแบบไมก้า

รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

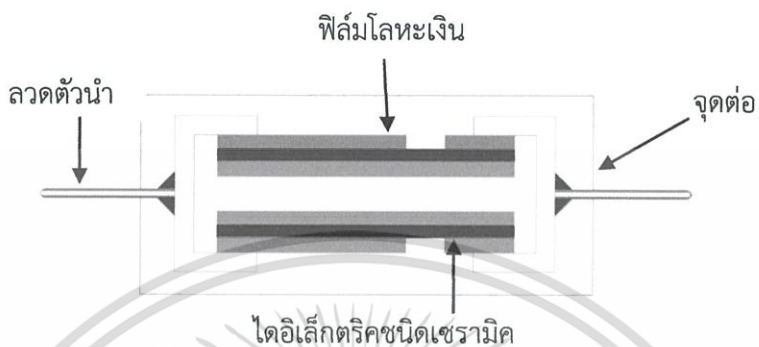
ตัวเก็บประจุนิตไมก้ายังแบ่งออกตามชนิดของแผ่นตัวนำที่นำมาใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. แบบโลหะฟอยล์ จะใช้แผ่นฟิล์มของโลหะบางๆ ทำเป็นไดอิเล็กโตรดของตัวเก็บประจุซึ่งจะเป็นแบบที่เรียกว่าไมก้าก้อน
2. แบบซิลเวอร์ไมก้า ประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กโตรด ซึ่งทำมาจากโลหะเงินบริสุทธิ์ ฉาบลงบนแผ่นไมก้า เพื่อจะทำให้คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบนี้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไดอิเล็กทริกที่ทำมาจากกระเบื้องดินเผา หรือที่เรียกว่าเซรามิก แล้วเคลือบผิวเซรามิกด้วยเงินเพื่อใช้แทนเป็นแผ่นตัวนำ ทำให้มีความจุสูงขึ้นซึ่งจะมีค่าความจุระหว่าง  $1 \text{ pF} - 2.2 \text{ }\mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ประมาณ  $3.3 - 600 \text{ V}_{\text{DC}}$



ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก



ข) ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

- 1) Low Dielectric มีขนาดใหญ่ พิกัดสูงสุดประมาณ  $500 \text{ pF}$  มีทั้งชนิดที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิเป็นศูนย์ และเป็นลบ มีคุณสมบัติที่ตีเทียมเมื่อใช้ในย่านความถี่วิทยุ และวงจรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงที่ต้องการค่าเก็บประจุน้อยๆ
- 2) Medium Dielectric มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิสูง คุณสมบัติด้อยกว่าแบบ Low Dielectric แต่ให้ค่าเก็บประจุสูงกว่า
- 3) High Dielectric นำไปใช้ในวงจรทั่วไปได้ดี ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก มีค่าเก็บประจุสูง แต่มีข้อพิงระวังคือที่แรงดันพิกัดหรืออุณหภูมิสูงๆ อาจไม่สามารถใช้งานได้ถึงค่าพิกัดที่ระบุไว้

#### 2.3.1.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมาก แต่จะใช้ไดอิเล็กทริกประเภทฟิล์มพลาสติก(Plastic film) ส่วนไดอิเล็กโตรดจะเป็นอลูมิเนียมแบบแผ่น หรืออลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นฟิล์ม ลักษณะมิติของตัวเก็บประจุแบบนี้มีหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน การแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุแบบฟิล์มแบ่งตามชนิดสารไดอิเล็กทริกได้ดังนี้

- ชนิดโพลีเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKT ออกแบบมาใช้งานในย่านอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้าง แต่มีข้อจำกัดตรงที่ต้องทำงาน ณ อุณหภูมิที่ระบุไว้เท่านั้นคุณสมบัติตัวเก็บประจุจะยังคงเดิมตามพิกัดที่ระบุ มีค่าความจุ  $0.001 - 100 \mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ถึง  $1500 \text{V}_{\text{DC}}$

- ชนิดโพลีสไตรีนคาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKS ออกแบบมาใช้งานกับแรงดันต่ำที่อุณหภูมิน้อยกว่า  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  โพลีสไตรีนมีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกที่ดีเยี่ยมแต่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่นที่พิกัดความจุไฟฟ้าเดียวกันตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุ  $10 \mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ถึง  $1000\text{V}_{\text{DC}}$

- ชนิดโพลีคาร์บอนเต ออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติที่ดี ใช้งานในย่านอุณหภูมิกว้าง

- ชนิดโพลีโพรพิลีน ขนาดมิติของตัวเก็บประจุชนิดนี้ค่อนข้างเล็กกะทัดรัด มีค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิปานกลาง

- ชนิดเทพลอน ออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดที่  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีค่าความเป็นฉนวนสูงมาก

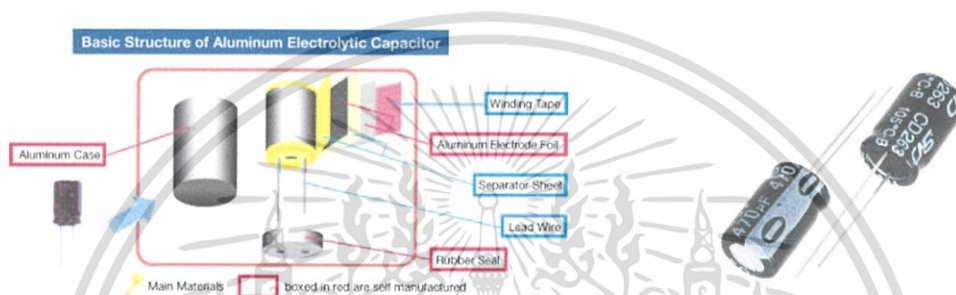


รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มนี้จะไม่มีส่วนในการใช้งาน และความต้านทานของฉนวนมีค่าสูง จึงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุเนื่องมาจากอุณหภูมिन้อยที่สุด มักนิยมใช้กับวงจรความถี่สูง วงจรตั้งเวลา วงจรอินทิเกรท แต่ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีราคาแพง

### 2.3.1.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์หรืออาจเรียกว่าอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์คาปาซิเตอร์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นโลหะทำเป็นขั้วบวก จุ่มอยู่ตรงกลางของ น้ำยาเคมี หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สารละลายพวก Ethylene, Glycol, Glycerine, Boric Acid, Liquid Ammonia และอื่นๆ ที่อยู่ในสภาพของเหลวชั้นที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกโลหะ เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ โดยป้อนไฟบวกเข้าที่แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นขั้วบวก และไฟลบเข้าที่ขั้วลบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปรากฏผลว่ามีการแยกตัวทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้ขั้วบวกเกิดอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจะเป็นสารไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นรอบๆ แผ่นบวกนี้ โดยมันจะเป็น ไดอิเล็กตริกที่บางที่สุดที่กั้นระหว่างแผ่นตัวนำบวก และลบสามารถทำให้ตัวเก็บประจุสะสมประจุได้



รูปที่ 2.13 โครงสร้าง และรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

นอกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวชั้นที่นำมาทำตัวเก็บประจุแบบนี้ หรือที่เรียกว่า ชนิดอิเล็กโทรไลต์เปียก เรายังสามารถใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นมาก คล้ายแป้งเปียกมาทำตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์แบบแห้งได้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์แห้งจะมีค่าความจุตั้งแต่  $1 \mu\text{F}$  ขึ้นไปจนถึง  $0.1 \text{ F}$  แรงดันใช้งานสูงถึง  $500 \text{ V}$  ข้อดีของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือ มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $-20$  ถึง  $+100\%$  และมีกระแสรั่วไหลสูง มักนิยมใช้กับงานที่ความถี่ต่ำ เช่น วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

### 2.3.1.1.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้สารแทนทาลัมทำเป็นขั้วบวกแทนอลูมิเนียม ส่วนสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทำเป็นไดอิเล็กตริกนั้น จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบโซลิดอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใช้  $\text{MnO}_2$  และแบบซัลฟูริคแอซิด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์แล้วปรากฏว่ามีคุณสมบัติการรั่วไหลของกระแส และคุณสมบัติทางความถี่คุณสมบัติทางอุณหภูมิดีกว่าจึงนิยมใช้กับวงจรกำลังสัญญาณรบกวน และวงจรฟิลเตอร์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุตั้งแต่  $0.001 - 1000 \mu\text{F}$  และสามารถทนแรงดันไฟได้ประมาณ  $6 - 120 \text{ V}_{\text{DC}}$  แต่ค่าความจุที่มีขายตามท้องตลาดจะมีค่า  $0.1 - 100 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 โครงสร้าง และรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

### 2.3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดเปลี่ยนค่าได้

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 ชุด หรือที่เรียกว่าแก๊งค์ คือ ชุดแผ่นโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้เรียกว่าโรเตอร์ และแผ่นโลหะที่ยึดติดอยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ โดยทั่วไปแล้ว สเตเตอร์จะมีจำนวนแผ่นมากกว่าโรเตอร์อยู่ 1 แผ่น ฉนวนที่ใช้กันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองจะใช้อากาศเป็นฉนวน ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อเราหมุนแกนโรเตอร์ โดยถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองวางขนานกันมากที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าสูง และถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองวางซ้อนกันน้อยที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุก็จะน้อยตามไปด้วย ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความจุประมาณ 10 – 400 pF



รูปที่ 2.15 รูปร่าง และสัญลักษณ์ของวาริเอเบิล คาปาซิเตอร์

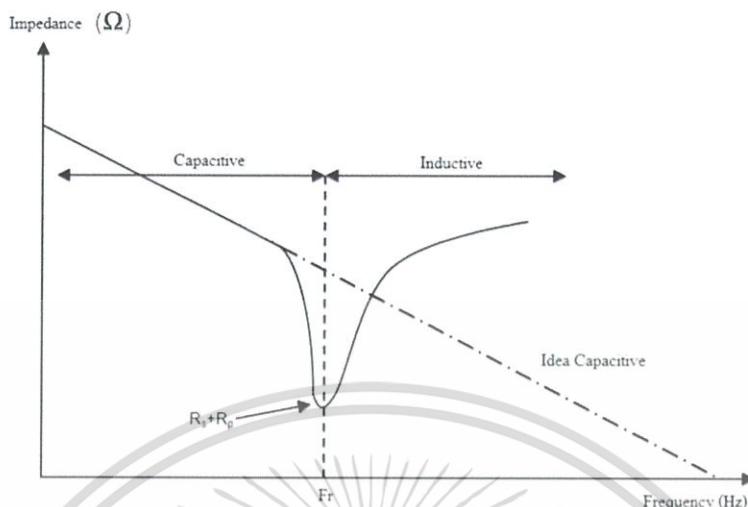
### การตรวจวัดตัวเก็บประจุ

การวัดตัวเก็บประจุโดยใช้มัลติมิเตอร์โดยจะต้องตั้งให้มิเตอร์อยู่ในย่านการวัดของโอห์มมิเตอร์แล้วเลือกใช้สเกลตามค่าความจุของตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

- ค่าความจุตั้งแต่ 100  $\mu\text{F}$  ขึ้นไป ตั้งที่สเกล R x 1
- ค่าความจุตั้งแต่ 20 - 100  $\mu\text{F}$  ตั้งที่สเกล R x 10
- ค่าความจุตั้งแต่ 1 - 10  $\mu\text{F}$  ตั้งที่สเกล R x 1K
- ค่าความจุน้อยกว่า 1  $\mu\text{F}$  ลงมาตั้งที่สเกล R x 10K

โดยที่ R คือ ย่านการวัดของโอห์มมิเตอร์

### 2.3.1.3 คุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุ [8]



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 2.16 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานจริงกับตัวเก็บประจุในอุดมคติ จะพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นค่าความเหนี่ยวนำที่ขาของตัวเก็บประจุจะมีผลมากขึ้นจนในที่สุดที่ความถี่  $F_r$  ค่าความเหนี่ยวนำจะทำให้ตัวเก็บประจุเกิดเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมขึ้นมา ค่าอิมพีแดนซ์ ของตัวเก็บประจุจะเป็นค่าความต้านทานรวมระหว่างค่าความต้านทาน  $R_s$  และ  $R_p$  เท่านั้นและเมื่อความถี่สูงกว่า  $F_r$  ตัวเก็บประจุจะมีคุณสมบัติเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปตัวเก็บประจุค่าสูงจะมีค่าความเหนี่ยวนำภายในมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าความเก็บประจุต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากต้องใช้แผ่นตัวนำที่มีพื้นที่มากกว่า เช่น ตัวเก็บประจุขนาด  $0.1 \mu\text{F}$  จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์แผ่งมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่า  $300 \text{ pF}$  (ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุชนิดเดียวกัน) อนึ่งตัวเก็บประจุ หากนำมาใช้งานที่ความถี่  $250 \text{ MHz}$  จะมีค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุเป็นตามสมการพื้นฐาน คือ

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

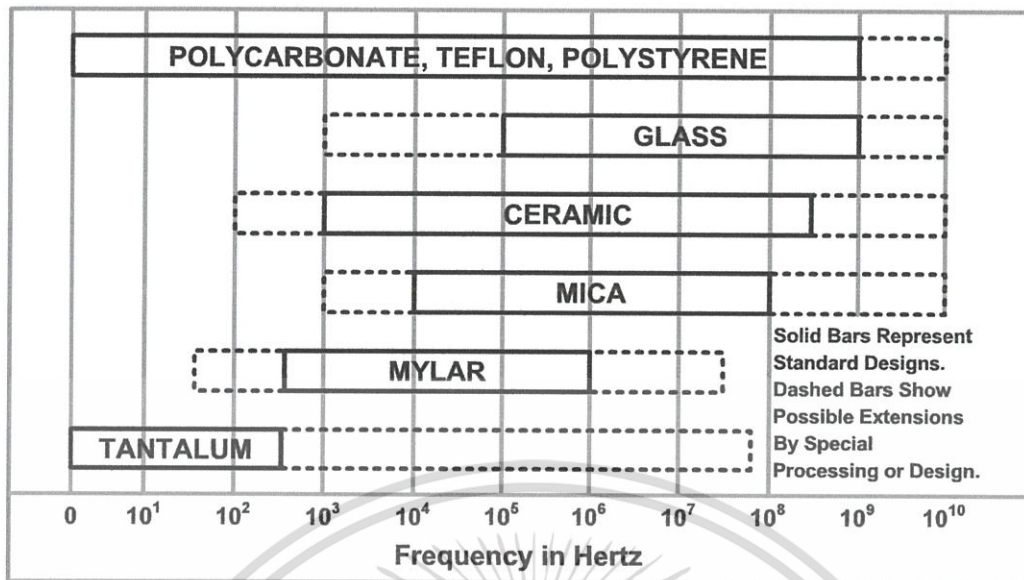
เมื่อ  $X_C$  แทนค่ารีแอคแตนซ์ : โอห์ม ( $\Omega$ )

$\omega$  แทนค่าความถี่เชิงมุม : เรเดียนต่อวินาที ( $\text{rad/s}$ )

$C$  แทนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ : ฟารัด (F)

สำหรับวงจรความถี่สูงนั้นมักจะใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุเพียงที่มีค่าความเก็บประจุอยู่ในช่วงพิโคฟารัด และไม่ใช่ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูงเนื่องจากต้องการให้ค่ารีแอคแตนซ์มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการออกแบบหรือการเลือกใช้อุปกรณ์ สำหรับใช้งานในย่าน VHF หรือสูงกว่านั้นควรใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) ในการตรวจสอบเนื่องจากจะให้ค่าที่ถูกต้อง และเชื่อถือได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในแต่ละย่านความถี่

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุที่ใช้ได้ดีในช่วงความถี่ที่มากกว่า 100 MHz มีอยู่ 5 แบบด้วยกัน คือ ไมก้า เซรามิก โพลีสไตรีน โพลีโพลีเอทิลีน และโพลีคาร์บอนเนต ซึ่งตัวเก็บประจุทั้ง 5 ชนิดนี้ นิยมใช้เซรามิกกันมากเพราะราคาถูก และมีเสถียรภาพที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพอประมาณ คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $k$ ) ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกยิ่งมากเท่าไรก็จะทำให้คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุแย่งลงเท่านั้น โดยตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำจะมีคุณสมบัติเชิงเส้นดีกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกปานกลาง และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างสูง

### 2.3.2 ชนิดของตัวต้านทาน และคุณสมบัติ [6-7]

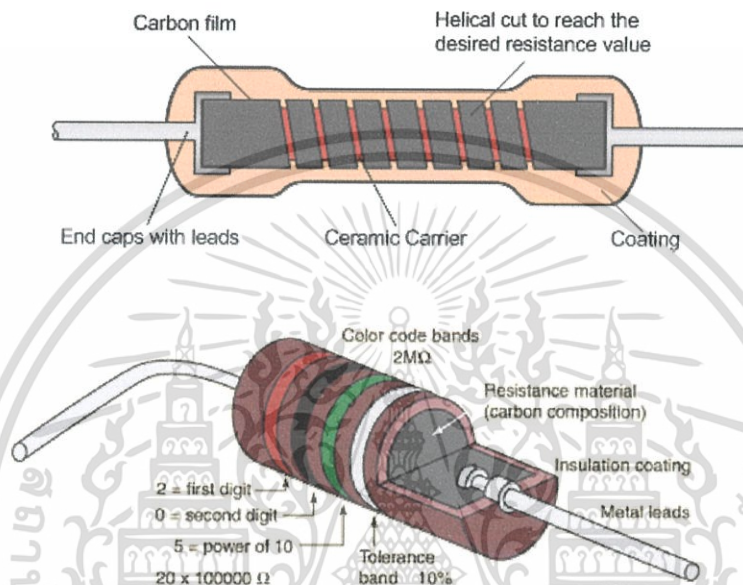
ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีรูปร่างแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และตัวต้านทานสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. ตัวต้านทานแบบดั้งเดิม
2. ตัวต้านทานแบบฟิล์มทั้งหนาและบาง

ตัวต้านทานแบบดั้งเดิมโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกัน โดยที่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน

### 2.3.2.1 คาร์บอนรีซิสเตอร์ (Carbon-Composition Resistors)

เป็นตัวต้านทานที่มีความน่าเชื่อถือสูง มีราคาต่ำ ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่า  $1 \Omega - 22M\Omega$  ความผิดพลาด 3% - 20% พิกัดกำลัง 0.125 - 2W สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ( $T_C$ ) มีค่าประมาณ  $0.1\%/^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมิ 0- 160  $^{\circ}\text{C}$  ใช้งานได้ดีในย่าน 0- 60  $^{\circ}\text{C}$  โดยที่  $T_C$  ละเลยได้ สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นจากตัวต้านทานชนิดนี้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.18 คาร์บอนรีซิสเตอร์

### 2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์ (Carbon-Film Resistor)

มีค่าความต้านทานสูงมาก พิกัด 10 - 100M $\Omega$  มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ ค่าความคาดเคลื่อน 0.5% ขึ้นไป ที่พิกัดน้อยกว่า 100k $\Omega$  มีการสร้างสัญญาณรบกวนน้อยแต่มีราคาสูง ความต้านทานชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงบางครั้งจะต้องมีการคิดผลการชดเชยอุณหภูมิด้วย อีกทั้งยังไม่สามารถทนต่อแรงดันกระชากในช่วงสั้นๆ และมีอัตราทนกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1 - 10 W

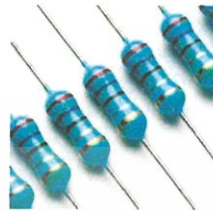


รูปที่ 2.19 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.3 เม็ดตอลฟิล์มรีซิสเตอร์ (Metal-Film Resistor)

ใช้เป็นความต้านทานในงานที่ต้องการสัญญาณรบกวนต่ำ พิกัด 0.1  $\Omega$  – 1.5M $\Omega$  การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำ (0.0001%/ $^{\circ}\text{C}$ ) สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นมีค่าน้อยมาก พิกัดกำลัง 0.1 - 1 W ความคลาดเคลื่อน 0.1 – 2% แต่มีราคาแพง



รูปที่ 2.20 เม็ดตอลฟิล์มรีซิสเตอร์

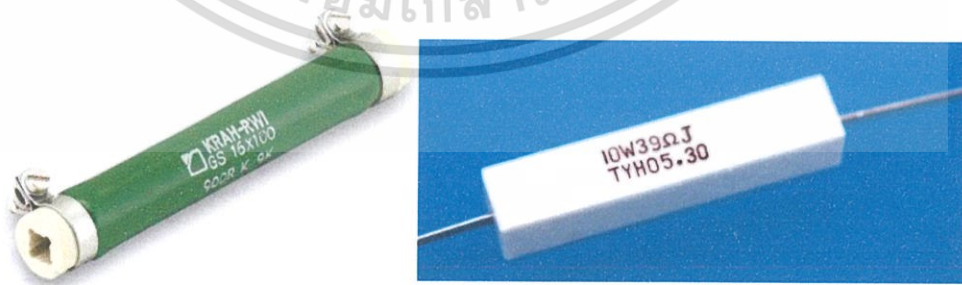
### 2.3.2.4 ไวร้วาวด์รีซิสเตอร์ (Wirewound Resistors)

ไวร้วาวด์รีซิสเตอร์ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ แบบมีกำลังสูง แบบความถูกต้องสูงและแบบใช้งานทั่วไป ปกติแล้วตัวต้านทานแบบไวร้วาวด์ จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูง แต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวต้านทานแบบไวร้วาวด์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ คือ แบบไบฟีลา (Bifilar wound Resistors) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวต้านทานไวร้วาวด์แบบไร้ความเหนี่ยวนำ (non-inductive wirewound resistor)

1) แบบมีกำลังสูง มีพิกัด 1  $\Omega$ – 100 k $\Omega$  พิกัดกำลัง 5 – 200 W และมีค่าความผิดพลาด 5 – 10% นิยมนำไปใช้งานประเภทเครื่องเสียง ต่อร่วมกับทรานซิสเตอร์

2) แบบมีความถูกต้องสูง สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมีค่าต่ำ มีเสถียรภาพสูงมากๆ โดยทั่วไปอยู่ในช่วงย่านความถูกต้อง 1% การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำ 0.0005%/ $^{\circ}\text{C}$  ความต้านทานอยู่ในช่วง 1  $\Omega$  – 100 k $\Omega$  ใช้งานประเภทที่มีความเที่ยงตรงสูง พิกัดกำลัง 0.25 – 1 W โดยที่พิกัด 3, 5, 10, 25 W ยังสามารถหาซื้อได้

3) แบบทั่วไป ช่วง  $\frac{1}{4}$   $\Omega$  - 10 k $\Omega$  พิกัดกำลัง 0.5, 1 และ 3 W เป็นความต้านทานแบบเดียวกับความต้านทานแบบคาร์บอน ค่าเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ

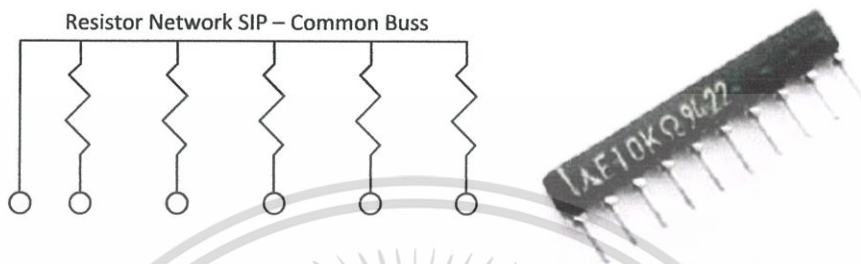


รูปที่ 2.21 ไวร้วาวด์รีซิสเตอร์

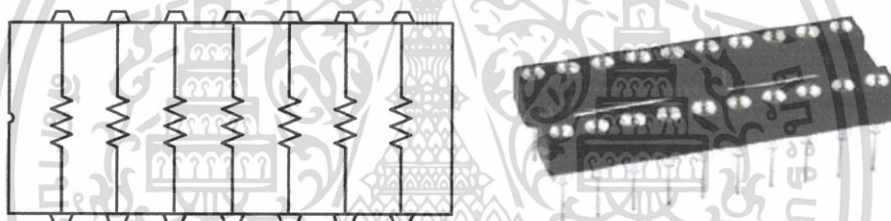
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.5 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP) และตัวถังแบบเตี้ยว (SIP)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ พิกัดประมาณ 10  $\Omega$  - 30M $\Omega$  พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงถึง 10W ค่าความคลาดเคลื่อน 0.1 - 2 % เหมาะสำหรับงานที่ต้องการเสถียรภาพ และความเที่ยงตรงสูงกว่าแบบคาร์บอน สามารถใช้กับงานในวงจรกระแสสลับได้ดี คือ จะมีย่านความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูงเป็นเมกะเฮิรตซ์ได้ และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ



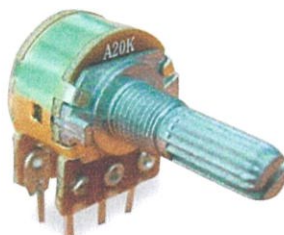
รูปที่ 2.22 ตัวต้านทานชนิดตัวถัง แบบเตี้ยว (SIP)



รูปที่ 2.23 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)

### 2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistors)

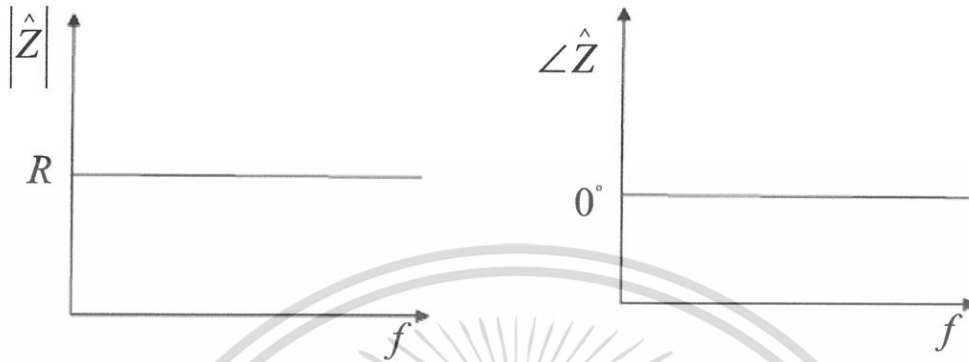
ตัวต้านทานชนิดนี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ โดยการใช้แกนหมุน (แบบวงแหวน) หรือเลื่อนแกน (แบบสไลด์) พิกัด 5  $\Omega$  - 1M $\Omega$  พิกัดกำลัง 0.2 - 1W ใช้งานเป็นรีโอสตัท (Rheostat) เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร หรือใช้เป็นแบบโพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) สำหรับควบคุมโวลต์เตจของวงจร หรือใช้สำหรับปรับสัญญาณต่างๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วอลลุ่ม (Volume), เบส(Bass) และทรีเบิล (Treble) หรือปุ่มปรับความสว่างของโทรทัศน์ (Brightness) และอื่นๆ



รูปที่ 2.24 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.7 คุณสมบัติของตัวต้านทานเชิงอุดมคติและเชิงความถี่  
จะเห็นได้ว่าในทางอุดมคติ ขนาดของค่าความต้านทานมีค่าคงที่ตลอดย่านความถี่ ในทำนองเดียวกันมุมอิมพีแดนซ์ก็มีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกๆ ความถี่ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ

### 2.3.3 การฉนวน [5-8]

การฉนวน หมายถึง การใช้วัสดุเป็นฉนวนมาคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำที่มีแรงดันกับดิน และยังทำหน้าที่รับแรงทางกล ช่วยระบายความร้อน การฉนวนมีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบ

#### 2.3.3.1 คุณสมบัติของฉนวน

วัสดุฉนวนที่ดีจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

##### 1) คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

- มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อให้ขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อย ประหยัด
- มีความต้านทานคงที่ทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เพื่อป้องกันการกั๊กกร่อน

หรือการเสื่อมสภาพฉนวน

2) คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูง เนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง

3) คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อน และช่วยระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

4) มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

5) ทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมัน ไม่ดูดซึมความชื้น และทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 ชนิดของวัสดุฉนวน

การฉนวนที่ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงแบ่งตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

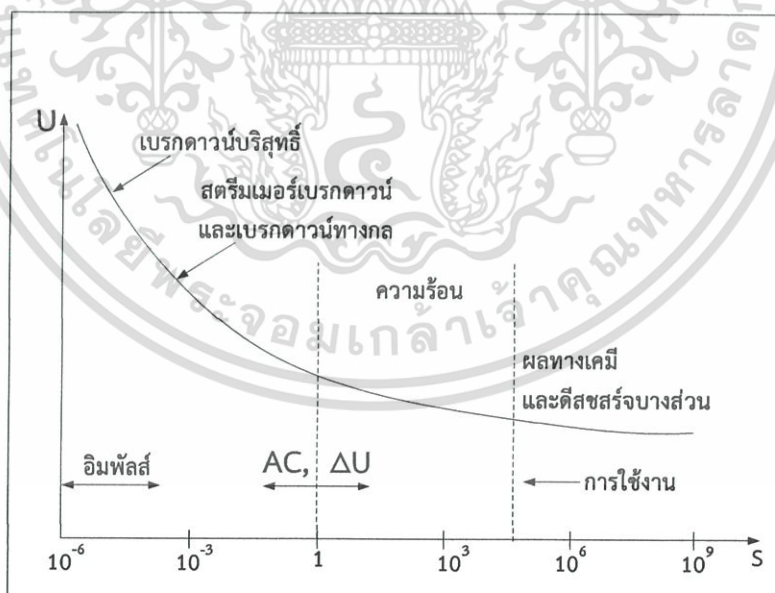
1. ฉนวนแข็ง
2. ฉนวนเหลว
3. ฉนวนก๊าซ

#### 2.3.3.2.1 ฉนวนแข็ง

ในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบร่วมกับฉนวนเหลว หรือก๊าซ เพื่อทำหน้าที่ยึด และรองรับแรงทางกล ฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวน์ หรือเจาะทะลุ จะเสียสภาพ โดยสมบูรณ์ การระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุ ทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้ทั่วไปได้แก่ กระดาษ กระดาษอัด ยาง ไมก้า แก้ว เซรามิก พอร์เลน พลาสติก เมกกะไลต์ คาสท์เรซิ่น ไฟเบอร์ ไยแก้ว พีวีซี พีโอ (PE) ครอสลิงค์ (XLPE)

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็ง

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)
2. เฟอร์มิตตีวดี
3. แพกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงทางกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี ความร้อน



รูปที่ 2.26 กลไกการเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 ฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวจะมีน้ำหนัก และความหนาแน่นมากกว่าแก๊ส มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแก๊สที่ความดันบรรยากาศเดียวกันวัดความดันไม่ได้ นิยมใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และช่วยระบายความร้อนได้ดี เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ผ่านจะทำให้เสียสภาพความเป็นฉนวนชั่วคราว เมื่อเวลาผ่านไปก็สามารถกลับสู่สภาพการฉนวนได้ แต่คุณภาพอาจต่ำลง มีความไวต่อสิ่งเจือปน ตัวอย่างฉนวนเหลวที่ใช้กันก็คือ น้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว

1. ความถ่วงจำเพาะ
2. จุดติดไฟฟ้าสูง คือมีโอกาสที่จะเกิดเพลิงไหม้น้อย
3. ความหนืดต่ำ หมายถึง ระบายความร้อนได้ดี
4. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่านั้นต่ำ

### 2.3.3.2.3 ฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซ เป็นสารที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อน คุณสมบัติก๊าซในแง่ของฉนวนก็คือ สามารถกลับคืนสู่สภาพความเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็วหลังจากเกิดเบรกดาวน์ หรือเสียสภาพการฉนวนชั่วคราว ตัวอย่างก๊าซที่ใช้กันมากในการเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูงได้แก่ อากาศ ใช้เป็นฉนวนภายนอกของอุปกรณ์ ก๊าซไนโตรเจนในอุปกรณ์ไฟฟ้า และก๊าซ SF<sub>6</sub> ใช้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบ GIS

### 2.3.3.2.4 เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวกับก๊าซ

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และฉนวนก๊าซในสนามไฟฟ้าจะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน คือ

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ฉะนั้นการระบายความร้อนจึงอาจช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ส่วนกรณีของก๊าซนั้นอาจทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่น ก็คือ การเพิ่มความดันก๊าซ
- 2) ฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวจะมีลักษณะสมบัติต่างกับของก๊าซอย่างเด่นชัด ประการหนึ่งคือ อายุการใช้งาน (Ageing) ซึ่งหมายถึงว่าเมื่อใช้งานไปนานๆ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลง
- 3) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว เมื่อได้รับแรงดันกระแสตรง จะมีค่าสูงกว่าเมื่อรับแรงดันกระแสสลับ แม้จะคิดเทียบที่ค่ายอดก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 4) ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวคิดเป็นค่าอาร์เอ็มเอส แต่ในกรณีของก๊าซจะเกิดเบรกดาวน์ที่ค่ายอดเสมอ
- 5) ชีตความสามารถการใช้เป็นฉนวนของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว กำหนดด้วยพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ และอุณหภูมิ อายุการใช้งานของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ซึ่งเป็นผลทำให้พลังงานสูญเสีย และอุณหภูมิสูงขึ้น และเป็นผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำลง อายุการใช้งานก็จะสั้นลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้

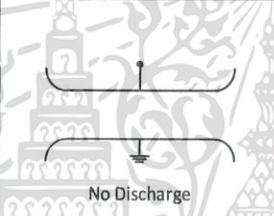

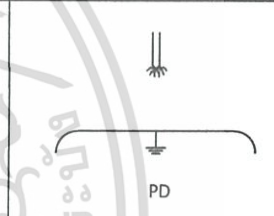

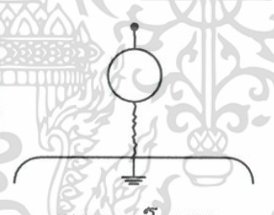

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2.5 การเสีสภาพการฉนวน [8]

ภาระหน้าที่หลักของการฉนวนก็คือ เป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่บางกรณีก็ทำหน้าที่รับแรงทางกล และทนต่อความร้อนด้วย การเสีสภาพของการฉนวน หมายถึง ฉนวนนั้นได้รับการเปลี่ยนจากสภาพการเป็นฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ไม่สามารถรับแรงดันได้ต่อไป ซึ่งการเสีสภาพอาจเกิดจากการทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ได้ หรือเสีสภาพเนื่องจากแรงทางกล หรือความร้อน กระบวนการที่ทำให้เสีสภาพการฉนวนนั้นเกิดขึ้นได้หลายประเภท เช่น

1. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากผลทางไฟฟ้า
2. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากแรงกล
3. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากความร้อน
4. การเสีสภาพการฉนวนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี และสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการดิซชาร์จเบรกดาวน์ในแก๊ส

ลักษณะในแก๊ส	สนามไฟฟ้า สม่ำเสมอ	สนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอเล็กน้อย	สนามไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอสูง
ลักษณะดิซชาร์จที่ $U_i$	 No Discharge	 No Discharge	 PD
ลักษณะเบรก ดาวน์สมบูรณ์ $U_b$	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์แบบโคโรนา
ค่าแรงดัน เบรกดาวน์ $U_b$ หรือ โคโรนาเริ่มเกิด $U_i$	$U_b = E_b \times d$	$U_b = E_b \times d \times \eta$	$U_b = E_b \times d \times \eta$ $U_b > U_i$

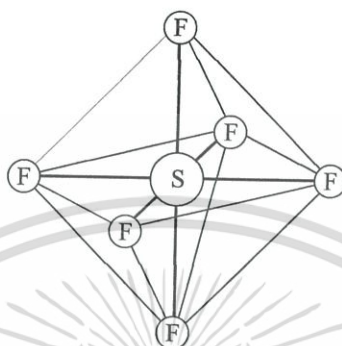
### 2.3.3.3 SF<sub>6</sub> : (Sulphur Hexafluoride) [9]

SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนประเภทฉนวนก๊าซ ปัจจุบันก๊าซ SF<sub>6</sub> ได้รับความสนใจ และมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีแห่งการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพราะ SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าดีเป็นเลิศ ทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวนด้วยก๊าซชนิดอื่น ๆ มีเสีสภาพทนต่อความร้อน และปฏิกิริยาเคมีการเลือกใช้ก๊าซเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับแพคเกจจิ้งต่างๆหลายประการที่สำคัญ คือต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันไม่สูงนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อตอบสนองปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและถ่ายเทความร้อนได้ดีลักษณะคุณสมบัติดังกล่าว จะเห็นว่า SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติครบถ้วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นสารประกอบของเทคโนโลยีอะตอมมิคโมเลกุลของกำมะถัน และฟลูออรีน ดังรูปที่ 2.28 เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ช่วยให้ติดไฟ เป็นก๊าซที่เฉื่อย ต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500 °C ภายในถังที่ปิดมิดชิด ปราศจากออกซิเจน และความชื้น คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF<sub>6</sub> สรุปได้ดังตารางที่ 2.1



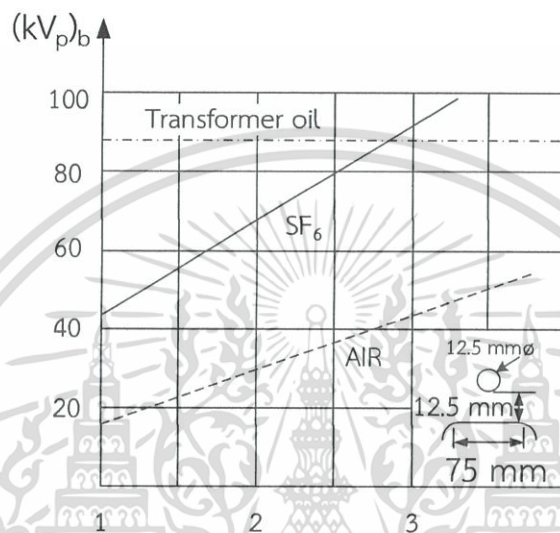
รูปที่ 2.27 โมเลกุลของ SF<sub>6</sub>

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
ความร้อนแฝงของจุดSublimation 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
Lonization Potential	19.3 eV
ความสามารถละลายในน้ำที่ 25°C, 1 atm	0.001 ml/ml water
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	87.8 kV/cm.bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีความหนาแน่น หนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบัน จึงทำให้ก๊าซ SF<sub>6</sub> มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนกัน เช่น อากาศ หรือไนโตรเจนคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ก๊าซ SF<sub>6</sub> จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่า ของอากาศ และจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่าๆ กับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF<sub>6</sub> มีความดันอัดประมาณ 3 bar (1 bar = 750 mmHg)



รูปที่ 2.28 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF<sub>6</sub>เมื่อเทียบกับอากาศ และน้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์

### 3.1 คุณสมบัติของโวลต์เตจติไวเตอร์

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่ออกแบบสร้างเป็นโวลต์เตจติไวเตอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานสามารถใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรงได้ในตัวเดียวกัน โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] กำหนด ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลต์เตจติไวเตอร์ กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบ การฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง

ชนิดของแรงดันที่ต้องการวัด	พิกัดสูงสุดที่ต้องการออกแบบสร้าง
แรงดันสูงกระแสสลับ	200 kV <sub>rms</sub>
แรงดันสูงกระแสตรง	200 kV <sub>DC</sub>

โดยโวลต์เตจติไวเตอร์ที่สร้างขึ้นลักษณะโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ องค์ประกอบภาคแรงดันสูง และองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดผ่านภาคแรงดันสูง ซึ่งในส่วนนี้จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าลดลง เพื่อส่งผ่านแรงดันที่ได้ไปยังภาคแรงดันต่ำ ในส่วนของภาคแรงดันต่ำนี้จะมีการลดระดับแรงดันที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงดันสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้ได้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่จะนำไปต่อใช้งานร่วมกับโวลต์เตจติไวเตอร์ในการวัดค่าแรงดันด้านออกของโวลต์เตจติไวเตอร์ เช่น ออสซิลโลสโคป หรือ โวลท์มิเตอร์ เป็นต้น

### 3.2 การออกแบบโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

โวลต์เตจติไวเตอร์ลักษณะดังกล่าวนี้ เป็นการนำตัวเก็บประจุย่อยมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าตัวเก็บประจุตามต้องการโดยมีตัวต้านทานต่อขนานในแต่ละชั้น และอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 2 bar เพื่อให้ไม่เกิดโคโรนาระหว่างอิเล็กโทรด

#### 3.2.1 การออกแบบสร้างภาคแรงดันสูง

##### 3.2.1.1 คำว่าบไฟตามฉนวน

ความยาวท่อพีวีซี (PVC) ซึ่งใช้เป็นโครงสร้างของโวลต์เตจติไวเตอร์ กำหนดด้วยระยะยาวไฟตามฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด และคุณสมบัติของท่อพีวีซี (PVC) ในกรณีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะใช้ระยะยาวไฟตามฉนวนมีค่าน้อย

$$0.5 \text{ m} / 100 \text{ kV}$$

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ พิกัดเท่ากับ 200 kV ดังนั้นระยะยาวไฟตามฉนวนมีค่าน้อยเท่ากับ 1 m ซึ่งในกรณีนี้ออกแบบท่อที่มีความยาว 1.5 m เนื่องจากในที่นี่ระยะความยาวท่อ (L) จะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ

### 3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน [5]

ความจุสเตรย์ลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือ ค่าความจุสเตรย์ลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงดันสูงเป็นตัวเก็บประจุย่อยเมื่อบรรจุอยู่ในท่อพีวีซี (PVC) สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.1 และสามารถหาค่าความจุสเตรย์ได้จากสมการที่ 3.1

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\left(\frac{2l}{d}\right)\left(\sqrt{\frac{4h+1}{4h+31}}\right)\right]} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจุเดี่ยวแบบทรงกระบอก

ท่อพีวีซีที่เลือกใช้มีความยาว ( $l$ ) ของท่อที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 1.50 m ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $d$ ) เท่ากับ 21.6 cm มีความสูงวัดจากพื้นดิน ( $h$ ) เท่ากับ 20 cm นำมาแทนในสมการ (3.1) จะได้

$$C_e = \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times 1.5}{\ln \left[ \frac{(2 \times 1.5)}{0.216} \left( \sqrt{\frac{(4 \times 0.2) + 1.5}{(4 \times 0.2) + (3 \times 1.5)}} \right) \right]}$$

$$= \frac{83.447 \times 10^{-12}}{2.2137}$$

$$= 37.6959 \text{ pF}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินเท่ากับ 37.6959 pF  $\approx$  37.7 pF

### 3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ [6]

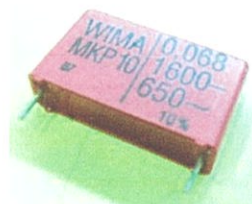
ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypropylene Film) มีขนาดความจุ 0.068  $\mu$ F พิกัด 1600 V<sub>DC</sub> / 650 V<sub>AC</sub> โดยที่ AC พิกัด 200 kV<sub>rms</sub> จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งสิ้นจำนวน 308 ตัว

เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ต่อแรงดันที่จะวัด

ที่ 1.1 เท่า หรือ 110 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน  $\frac{1.1 \times 200k}{650} = 339$  ตัว  
คิดเผื่อความปลอดภัย

ที่ 1.3 เท่า หรือ 130 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน  $\frac{1.3 \times 200k}{650} = 400$  ตัว

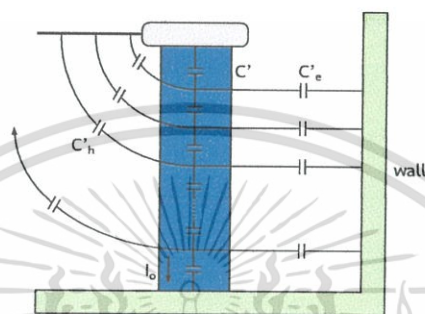
จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 413 ตัว เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบสร้าง และมีอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำใกล้เคียงกับ 1000:1 มากที่สุด ต่ออนุกรมกัน แบ่งเป็น 25 ชั้น โดยชั้นบนสุดมี 15 ตัว ชั้นล่างสุดมี 7 ตัว และชั้นที่เหลือมีชั้นละ 17 ตัว ที่ความปลอดภัย 1.3 เท่า หรือ 130 % และในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงควรมีค่ามากกว่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณ 3 เท่า ในที่นี้ค่าความจุสเตรย์ลงดินมีค่าเท่ากับ 37.7 pF เมื่อนำมาตัวเก็บประจุจำนวน 413 ตัว มาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดเท่ากับ 164.65 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์ลงดินมาก โดยกระแสที่พิกัดแรงดันมีค่าเท่ากับ 10.335 mA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งรูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด [5]

เนื่องจากการกระจายแรงดันของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตัวเก็บประจุตัวบนสุดจะรับแรงดันสูงกว่าตัวอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดัน เมื่อโวลต์เตจติไวเตอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) โดยต้องคำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Withstand test ที่ 110 % หรือ 1.1 เท่า



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

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

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C_e' + C_h')}{C_1'}} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $U$  = แรงดันคงทนได้ = 220 kV  
 $C$  = ค่าของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว = 0.068  $\mu\text{F}$   
 $C_e$  = ค่าความจุสเตรย์ = 37.6959 pF  
 $n$  = จำนวนตัวเก็บประจุ = 413 ตัว  
 $k$  = ชั้นที่ 1

$$C_e' = C_e/n = \frac{37.6959 \times 10^{-12}}{413} = 91.2733 \text{ fF}$$

$$C_1' = C_1/n = \frac{164.489 \times 10^{-12}}{413} = 398.278 \text{ fF}$$

$$C_h' = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C_e' + C_h')}{C_i'}} = 0.4787$$

จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) พบว่าที่แรงดันทดสอบ 110 % ของแรงดันพิกัด แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนสุดมีค่าเท่ากับ 512.87 V และคิดเผื่อความปลอดภัยที่แรงดัน 130 % ของแรงดันพิกัด แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนสุดมีค่าเท่ากับ 606.12 V ซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้มีพิกัดแรงดัน 650 V<sub>AC</sub> ดังนั้นจึงสามารถนำตัวเก็บประจุนี้มาใช้งานได้

### 3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ตัวต้านทานภาคแรงดันสูงของโวลต์เดจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงดันสูงตามมาตรฐานกำหนดให้  $R \leq 10 \text{ M}\Omega / 1 \text{ kV}$ ,  $1 \text{ mA} \geq I \geq 0.1 \text{ mA}$  ในที่นี้ใช้ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์ม ขนาด 10 M $\Omega$  มาต่อขนานเข้ากับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยจะใช้ตัวต้านทานทั้งหมดจำนวน 26 ตัว ชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 24 ชั้นละ 1 ตัว ส่วนชั้นสุดท้ายจะใช้ตัวต้านทานขนาด 10 M $\Omega$  จำนวนสองตัวต่อขนานกัน จะได้ความต้านทานภาคแรงดันสูงรวมทั้งหมด 245 M $\Omega$  ซึ่งจะได้

$$R = 245 \text{ M}\Omega / 200 \text{ kV}_{\text{dc}} = 1.225 \text{ M}\Omega / 1 \text{ kV}_{\text{dc}}$$

$$I = 200 \text{ kV} / 245 \text{ M}\Omega = 0.8163 \text{ mA}$$

จากที่คำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทาน และกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง

### 3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย (Loss)

จากการต่อตัวต้านทานจะเกิดค่าความสูญเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$\text{loss} = \frac{V^2}{R} = \frac{(200 \times 10^3)^2}{245 \times 10^6} = 163.2653 \text{ W} \quad (3.4)$$

ค่าความสูญเสียความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 163.2653 W เป็นค่าความสูญเสียรวมทั้งหมด เมื่อหาความสูญเสียในแต่ละชั้นได้เท่ากับ  $163.2653/25 = 6.531 \text{ W}$  จึงเลือกใช้ตัวต้านทานในแต่ละชั้นมีพิกัด 10 W

### 3.2.2 การออกแบบภาคแรงดันต่ำ [5]

ภาคแรงดันต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมาก และเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของ โวลต์เตจดีไวเซอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงดันต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

ก) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซีลด์ของเคเบิลสายวัด หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

ข) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำ และความต้านทานแมชซิ่งของเคเบิลวัดต้องระวัง ไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาระทานเขียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงดันต่ำกับความต้านทานแมชซิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

#### 3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลต์เตจดีไวเซอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้า และขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบค่าสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเซอร์ตามสมการ (3.5)

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

เมื่อ  
 $a$  คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจดีไวเซอร์  
 $C_1$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง  
 $C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออก 200 V ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันโวลต์เตจดีไวเซอร์มีค่า 1000:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุ และค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.6)

$$R_1 C_1 \equiv R_2 C_2 \quad (3.6)$$

### 3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลต์เตจติไวเดอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 200 V จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวเดอร์เท่ากับ 1000:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงดันสูงทั้งหมดเท่ากับ 164.6489 pF ซึ่งเลือกตัวเก็บประจุเป็นแบบ Polypropylene ค่าเก็บประจุภาคแรงดันต่ำคำนวณได้จาก

$$\frac{C_2}{C_1} = 1000 \quad (3.7)$$

จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ 164.6489 nF โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.033  $\mu$ F ต่อขนานกัน 5 ตัว จะได้ 165 nF

### 3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ

ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวเดอร์เท่ากับ 1000:1 ค่าความต้านทานภาคแรงดันสูงรวมทั้งหมด 245 M $\Omega$  โดยค่าความต้านทานคำนวณได้จาก

$$\frac{R_1}{R_2} = 1000 \quad (3.7)$$

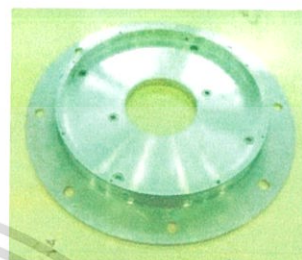
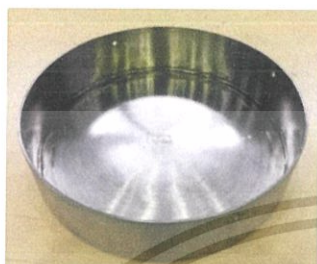
จากการคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำ 245 k $\Omega$  โดยใช้ตัวต้านทานชนิดเม็ททอลฟิล์มขนาด 1.2 M $\Omega$ , 15 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  ต่ออนุกรมกัน และนำมาต่อขนานกัน 5 ชุด จะได้ความต้านทานภาคแรงดันต่ำ 245 k $\Omega$



รูปที่ 3.5 การต่ออิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อป้องกันการแกว่ง และการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมชชิง ( $R_m$ ) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยตัวต้านทานแมชชิงนี้เลือกใช้แบบเม็ททอลฟิล์มขนาด 2 W 150  $\Omega$  จำนวน 2 ตัวต่อขนานกัน ได้ค่าความต้านทาน  $R_m = 75 \Omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำจะประกอบอยู่ภายในกระบอกอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.6



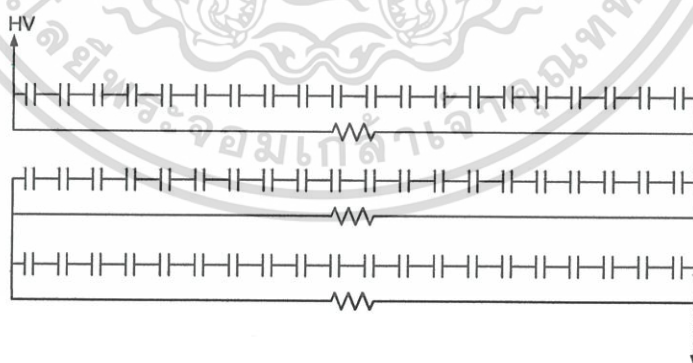
ก) ฝาอลูมิเนียมปิดกล่องบรรจุมพิแดนซ์ภาคแรงดันต่ำแรงดันต่ำ

ข) ฐานกล่องบรรจุมพิแดนซ์ภาค

รูปที่ 3.6 กล่องบรรจุมพิแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

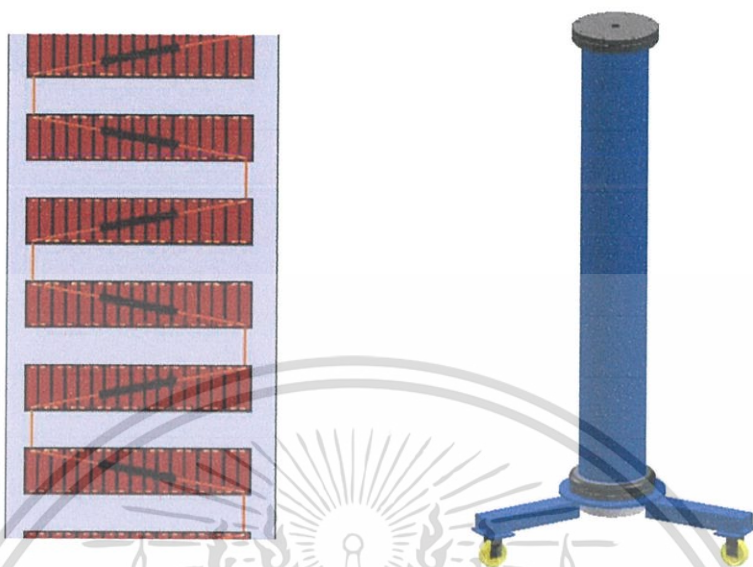
### 3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์

การต่อตัวเก็บประจุย่อย และตัวต้านทานในภาคแรงดันสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 413 ตัว และตัวต้านทานย่อยทั้งหมดจำนวน 26 ตัว การประกอบทำได้โดยใช้แผ่นอะคริลิกใสหนา 15 mm ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 17 ตัว 24 ช่อง ระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 25 mm และในชั้นสุดท้ายเจาะให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 7 ตัว จากนั้นจึงนำตัวต้านทานย่อยต่อขนานกับตัวเก็บประจุย่อยแต่ละชั้น ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุจะเป็นการต่อแบบอนุกรม และตัวต้านทานจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละท่อน ซึ่งแสดงใน รูปที่ 3.7 ถึงรูปที่ 3.8



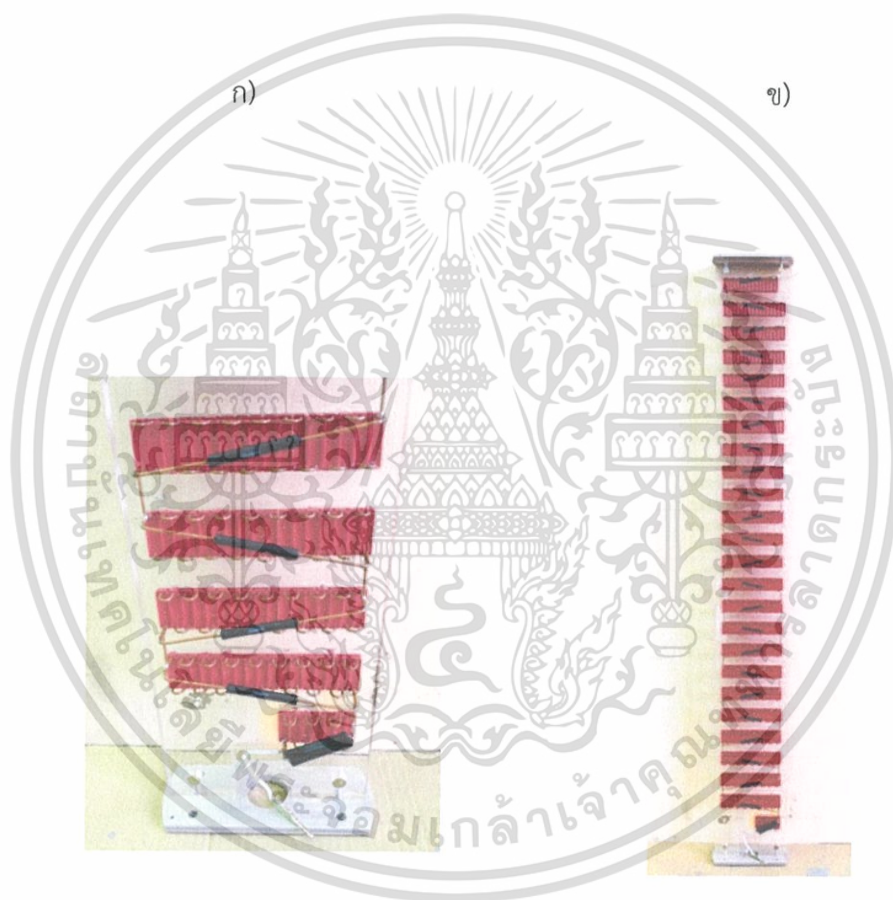
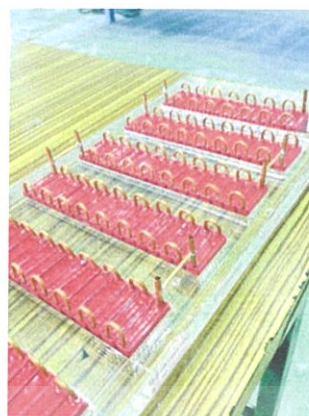
รูปที่ 3.7 วงจรสมมุติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การจำลองการสร้างโวลต์เตจดีไวเตอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์  
 ก) การจำลองการเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยแต่ละชั้น  
 ข) การจำลองโวลต์เตจดีไวเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

ข)

ค)

ง)

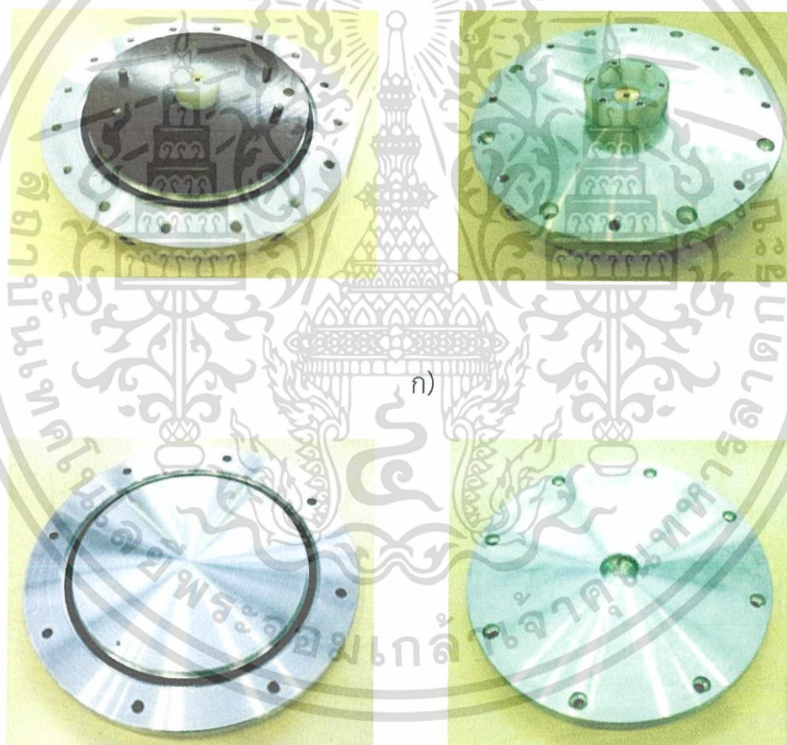
### รูปที่ 3.9 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงดันสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์

- ก) แผ่นอะคลิลิกใสเซาะร่องสำหรับจับยึดตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน
- ข) การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น
- ค) การเชื่อมต่อตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น
- ง) ภาคแรงดันสูงที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ท่อพีวีซีที่ใช้เป็นโครงสร้างของโวลต์เตจติไวเตอร์



ข)

รูปที่ 3.11 อิเล็กโทรดของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่ออกแบบ

ก) อิเล็กโทรดด้านล่างของโวลต์เตจติไวเตอร์

ข) อิเล็กโทรดด้านบนของโวลต์เตจติไวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น ควรจะออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้สะดวก การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรจะไม่ซับซ้อน เพราะจะทำให้จุดๆ นั้นเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งควรมีความแข็งแรงทางกลด้วยเมื่อนำไปประกอบเข้ากับท่อพีวีซีสะดวกในการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง หรืออุปกรณ์แรงดันสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ทำควรป้องกันการรั่วซึมเนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลว หรือก๊าซบรรจุอยู่เพื่อเพิ่มความ เป็นฉนวนระหว่างตัวอุปกรณ์กับผิวท่อ ดังนั้นเราจึงใช้โปรแกรมช่วยคำนวณสนามไฟฟ้า (FEM) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์อิเล็กทรอนิกส์รูปทรงต่างๆ ทั้งแบบพื้นฐานครึ่งวงกลม และได้ทำการทดลอง เปลี่ยนระยะ  $X$  รัศมีขอบบน และรัศมีของล่างโดยการจำลองความเครียดของสนามไฟฟ้าจากรูปทรง พื้นฐาน โดยกำหนดให้อิเล็กโทรดเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งแทนด้วยอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) = 1 และค่าคอนดักติวิตี ( $\rho$ ) =  $3.8 \times 10^7$  S/m ดังรูปที่ 3.12

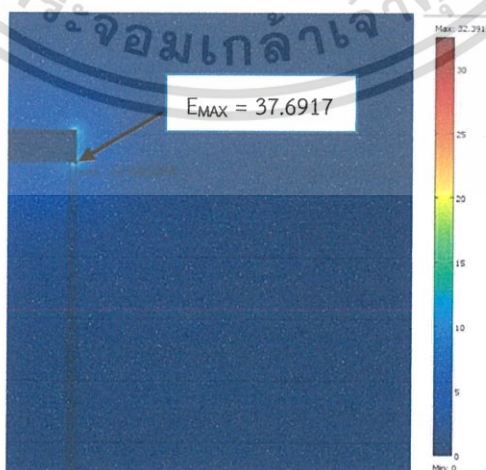


รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อ  $X$  คือ รัศมีของอิเล็กทรอนิกส์

$R_1$  คือ รัศมีขอบบนของอิเล็กทรอนิกส์

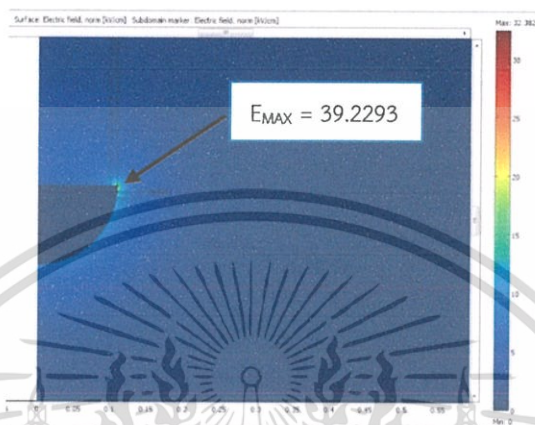
$R_2$  คือ รัศมีของล่างของอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.13 ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานรูปสี่เหลี่ยม และสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโปรแกรมจะเห็นว่าจุดที่เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอยู่ 2 จุด คือ ขอบด้านบน และขอบด้านล่าง แต่จะเกิดมากที่ขอบด้านล่างโดยมีค่าสูงสุด = 37.6917 kV/cm ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เพราะจะเกิดโคโรนา จึงต้องลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง โดยการออกแบบ อิเล็กโทรดใหม่ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ลักษณะของอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งทรงกลม และสนามไฟฟ้า

จะเห็นได้ว่าอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมในรูปที่ 3.14 จะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขอบด้านบนมีค่าน้อยกว่าในรูปที่ 3.12 แต่ใช้อิเล็กโทรดรูปทรงนี้จะใช้ค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง เพราะใช้เนื้อโลหะจำนวนมาก อีกทั้งขั้นตอนการทำส่วนโค้งให้มีผิวเรียบสม่ำเสมอสามารถทำได้ยาก ดังนั้นอิเล็กโทรดจึงควรมีลักษณะรูปร่างคล้ายครึ่งวงกลมแต่ด้านบนเรียบดังรูปที่ 3.15 โดยจะหาค่าขนาดของรัศมี (X) ที่มากที่สุดของอิเล็กโทรดได้จากการคำนวณดังนี้

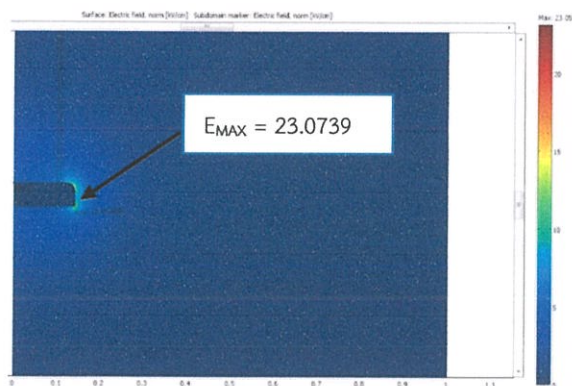
$$r = \frac{V}{E_{\max}} = \frac{260 \text{ kV} \times \sqrt{2}}{20 \text{ kV/cm}} = 18.3847 \text{ cm}$$

r คือ รัศมีของอิเล็กโทรด

v คือ ค่ายอดของแรงดันใช้งาน

$E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ 20 kV/cm

สาเหตุเราต้องเผื่อแรงดันถึง 130% เนื่องจากขนาดรัศมีของอิเล็กโทรดจากการคำนวณ มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อพีวีซีใช้งาน จึงไม่สามารถเจาะรูเพื่อใช้สกรูยึดอิเล็กโทรดได้ จึงต้องคูณเผื่อเพื่อเพิ่มขนาดอิเล็กโทรดเราใช้ในโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมนี้

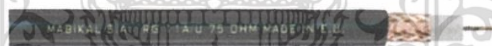


รูปที่ 3.15 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี  $x = 14$  cm โค้งขอบด้านบน ( $R_1$ ) = 3 mm  
โค้งขอบด้านล่าง ( $R_2$ ) = 2.5 cm

### 3.5 เครื่องมือ และอุปกรณ์ใช้ในการวัดค่าได้จากโวลต์เตจติไวเดอร์

#### 3.5.1 การเลือกสายเคเบิล และหัวต่อ

ชนิดของสายเคเบิลเลือกใช้ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน IEEE Std 4 – 1995 หัวข้อที่ 18.4 โดยแนะนำสายโคแอกเซียลชนิด RG11 A/U มีค่าอิมพีแดนซ์ 75  $\Omega$  โดยมีความยาวเหมาะสมไม่ควรเกิน 15 เมตร (50 ฟุต) โดยสายใช้มีการลดทอนสัญญาณน้อย และสามารถทนแรงดันได้สูง มีความถี่ใช้งานกว้าง ซึ่งในการออกแบบเราใช้สายชนิด RG11 A/U ซึ่งมีแรงดันใช้งานสูงสุด 600 V<sub>rms</sub> หรือประมาณ 850 V<sub>peak</sub> โดยมีคุณสมบัติตามตาราง 3.2



รูปที่ 3.16 สายเคเบิลชนิด RG11 A/U

ส่วนการเลือกหัวต่อใช้ชนิด N (Neill) ซึ่งเป็นหัวต่อแบบสกรู โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์เหมาะสม คือ 50  $\Omega$  และ 75  $\Omega$  ซึ่งมีแรงดันใช้งาน 1,000 V<sub>rms</sub> ระดับน้ำทะเล และแรงดัน Withstanding Dielectric ระดับน้ำทะเลโดยใช้อยานความถี่ 0 - 1.5 GHz มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ 75  $\Omega$  และย่านความถี่ 0 - 11 GHz มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  ส่วนย่านอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -65  $^{\circ}\text{C}$  ถึง 165  $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.17 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 หัวต่อภาคแรงดันต่ำ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U

คุณสมบัติสาย RG11 A/U		รายละเอียด
อิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )		$75 \pm 2.5$
ค่าความจุภายใน (pF/m)		67
การสะท้อน ( $\geq$ dB)	VHF	20
ตัวนำ	วัสดุ	แทลเลียมคาร์บอน
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	1.2
ไดอิเล็กทริก	วัสดุ	PE
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	$72 \pm 0.5$
สายถักชีลด์	วัสดุชั้น 1	ทองแดง
	วัสดุชั้น 2	-
เปลือกหุ้ม	วัสดุ	PVC
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	$10.3 \pm 0.3$
น้ำหนัก kg/km		143
อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		$-10^{\circ}\text{C} / + 80^{\circ}\text{C}$
อัตราการลดทอน $\leq$ dB / 100 m	10 MHz	1.8
	50 MHz	4.5
	100 MHz	6.5
	800 MHz	22
	1000 MHz	22.5

### 3.5.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

ในส่วนของภาคแรงดันต่ำจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือวัดสามารถวัดแรงดันขาออกของโวลต์เตจติไวเตอร์ได้ และเครื่องมือวัดแรงดันต่ำมีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล แต่ปัจจุบันเครื่องมือวัดนิยมใช้กันมาก คือแบบดิจิตอล จึงจะขอยกตัวอย่างเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลจะนำมาใช้วัดแรงดันเอาท์พุทออกจากโวลต์เตจติไวเตอร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1 [10]

Overvoltage Installation category	Working Voltage (dc or ac - rms to ground)	Peak Lmpulse Transient (20 repetitions)	Test source ( $\Omega = VA$ )
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

ก) มัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV ข) FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer



ค) Oscilloscope DL 1540/DL 1540

รูปที่ 3.19 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $^{\circ}$ C to 1350 $^{\circ}$ C (-328 $^{\circ}$ F to 2462 $^{\circ}$ F)
Frequency	0.5 Hz to 1000 kHz

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของ FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer

ระดับสัญญาณขาเข้าต่ำสุด 5 V <sub>rms</sub> (ใช้ V REFERENCE) หรือ 1 A <sub>rms</sub> (ใช้ A REFERENCE)			
การวัด แรงเคลื่อนไฟฟ้า	INPUT RANGE 0.0 V ถึง 600 V rms(ac+dc) 0.0 V +/-993 Vpeak	การวัดกระแสไฟฟ้า (TRUE RMS) (1mV/A) ISOLATED	INPUT RANGE 1.0 mV (A) ถึง 1000 mVrms (A) ถึง +/- 2000 mV (A) peak
ความถูกต้องเบื้องต้น ( 5 Hz-65 Hz,dc)	rms : +/- (0.5%+2digits) peak dc:+/- (2%+3digits)	ความถูกต้องเบื้องต้น ( 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ Probe

Item	Specifications Setting	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

### 3.6 การอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> [6]

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเป็นแบบผสมระหว่างตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ซึ่งประกอบด้วยภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ ในส่วนของภาคแรงดันต่ำ ภายนอกเป็นกระบอกอลูมิเนียมภายในใช้อากาศเป็นฉนวน ส่วนในภาคแรงดันสูงภายนอกเป็นท่อพีวีซี และภายในเลือกใช้ ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนภายใน ซึ่งคุณสมบัติความเป็นฉนวนของก๊าซ SF<sub>6</sub> ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความดันที่อัดเข้าไป แต่การที่จะอัดก๊าซเข้าไปนั้นต้องพิจารณา คุณสมบัติการทนความดันของท่อพีวีซี และขนาดของหัวต่อ วาล์วปิด - เปิด เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ

#### 3.6.1 การตรวจเช็คการรั่วซึม

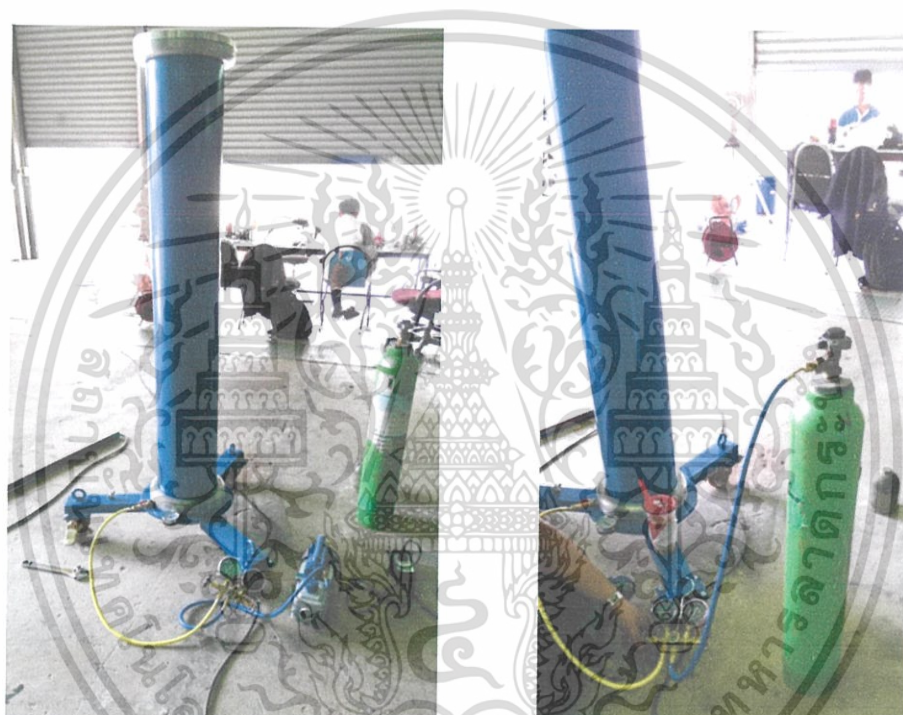
ก่อนที่จะทำการอัดก๊าซ ต้องทำการเช็คการรั่วซึมของก๊าซที่อัดภายในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์ เพื่อให้แน่ใจว่าเมื่ออัดก๊าซเข้าไปแล้วไม่ทำให้เกิดการรั่วซึม การเช็คดังกล่าวในที่นี้ใช้อากาศอัดเข้าไป ให้ได้ความดันที่ต้องการ แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หากความดันเท่าเดิมแสดงว่าไม่มีการรั่วซึม

แต่ถ้าความดันลดลงแสดงว่ามีการรั่วซึม ให้ทำการหาจุดรั่วซึมโดยการอัดอากาศเข้าไปใหม่แล้วใช้น้ำสบู่ลูบให้ทั่ว ถ้ามีฟองออกมาแสดงว่าจุดนั้นมีการรั่วซึม

### 3.6.2 การอัดก๊าซ SF<sub>6</sub>

1. การแวกคัมทำโดยการใช้เครื่องแวกคัมดูดอากาศภายในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ออกให้มากที่สุดหรือไม่มีอากาศเลย วิธีนี้ทำเพื่อให้ก๊าซที่อัดเข้าไปเป็นก๊าซที่บริสุทธิ์ โดยมีอากาศปนอยู่น้อยที่สุดหรือไม่มี

2. เมื่อทำการแวกคัมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการอัดก๊าซเข้าไป เมื่อต่อสายก๊าซเข้ากับวาล์วของตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ก็เปิดวาล์วที่ถังก๊าซแล้วดูความดันภายในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อถึงค่าที่ต้องการแล้ว ให้ทำการปิดวาล์ว

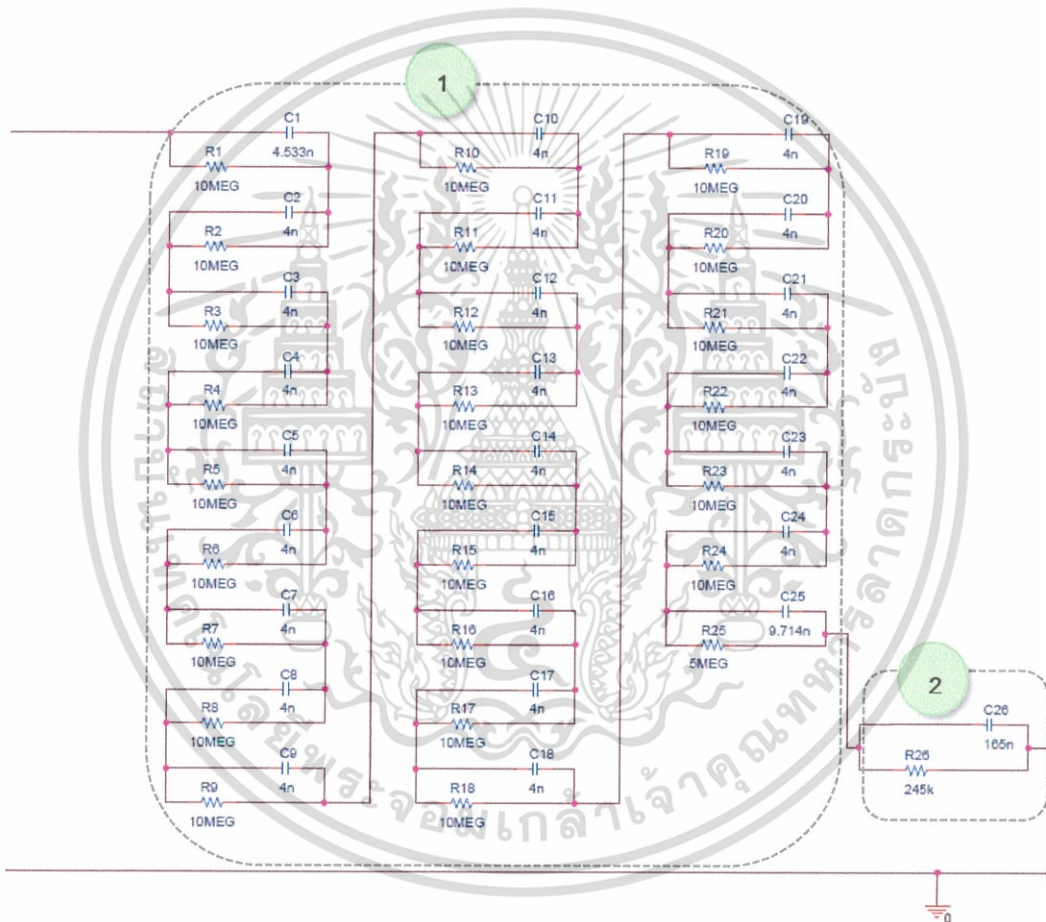


รูปที่ 3.20 การแวกคัมโวลท์เตจดีไวเดอร์ และการอัดก๊าซ SF<sub>6</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นรูปวงจรถสมมูลของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ออกแบบโดยที่ด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำจะประกอบด้วยตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุต่อขนานกัน โดยที่ด้านแรงดันสูงจะแบ่งออกเป็น 25 ชั้น ซึ่งในชั้นที่ 1 จะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 15 ตัว และในชั้นสุดท้ายจะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 7 ตัว ส่วนในชั้นอื่นๆ จะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 17 ตัว ในส่วนของตัวต้านทานที่ต่อขนานจะมีชั้นละ 1 ตัว ยกเว้นในชั้นสุดท้ายจะต่อขนานตัวต้านทาน 2 ตัว ในที่นี้ได้ทำการรวมตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน 1 ชั้น เป็นตัวเดียว เพื่อประหยัดพื้นที่ในการเขียนวงจร ส่วนทางด้านแรงดันต่ำ ก็จะมีการรวมตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานเป็นตัวเดียว เพื่อความสะดวกในการจำลองการทำงาน เมื่อเรานำค่าต่างๆ ที่คำนวณเรียบร้อยแล้วมาต่อจะได้วงจรดังรูปที่ 3.21



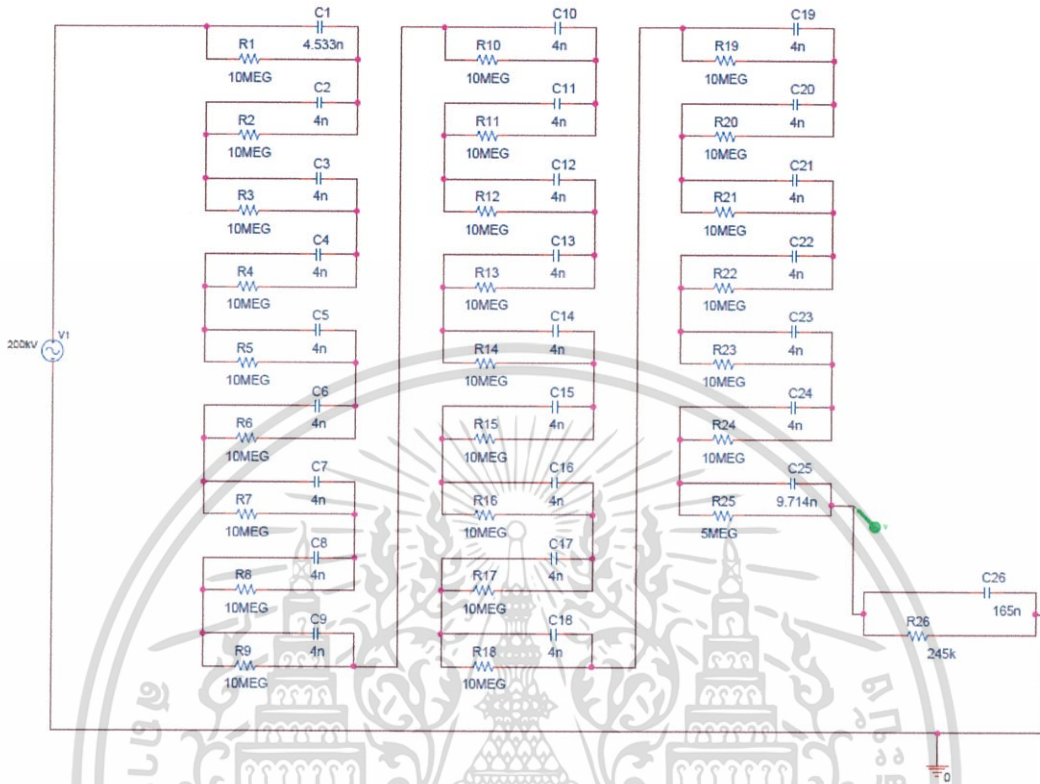
รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเดอร์

เมื่อ 1 คือ อิมพีแดนซ์ด้านแรงดันสูง ( $Z_1$ )

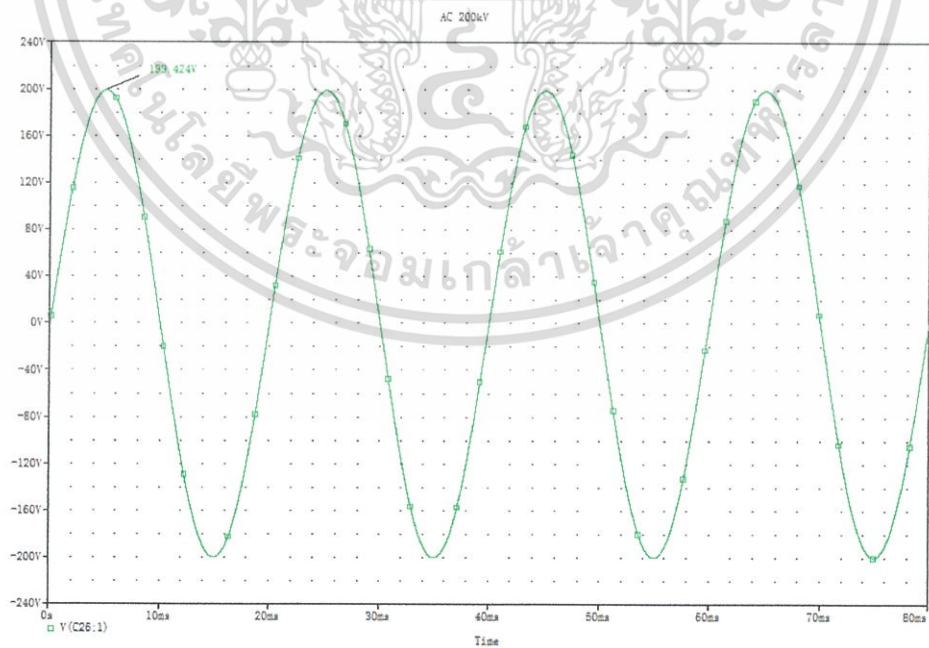
2 คือ อิมพีแดนซ์ด้านแรงดันต่ำ ( $Z_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่พิกัด  
 3.7.1.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV

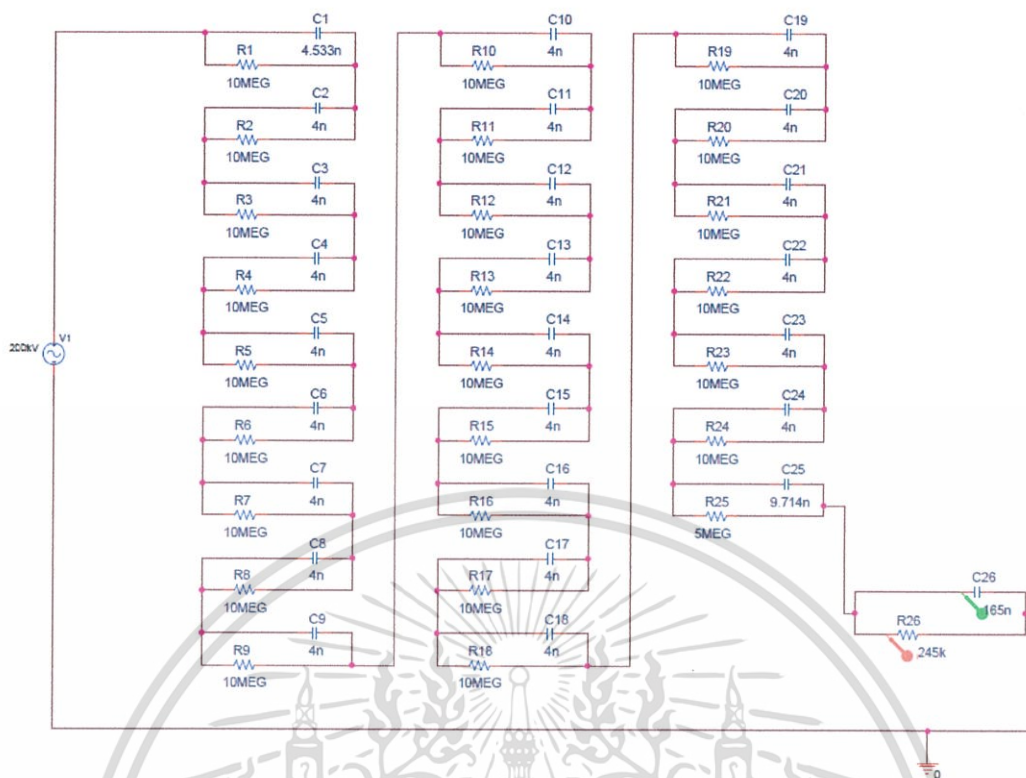


รูปที่ 3.22 วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV

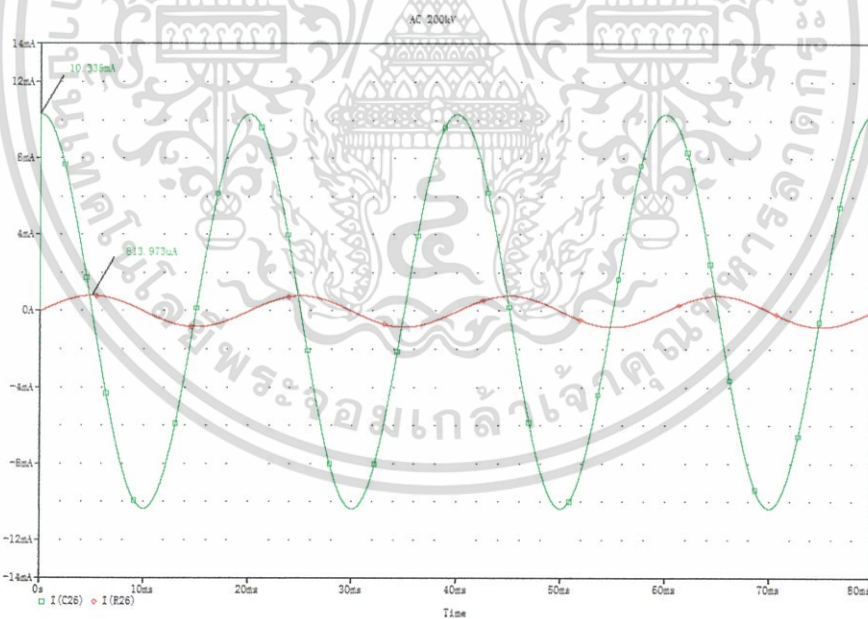


รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุทของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



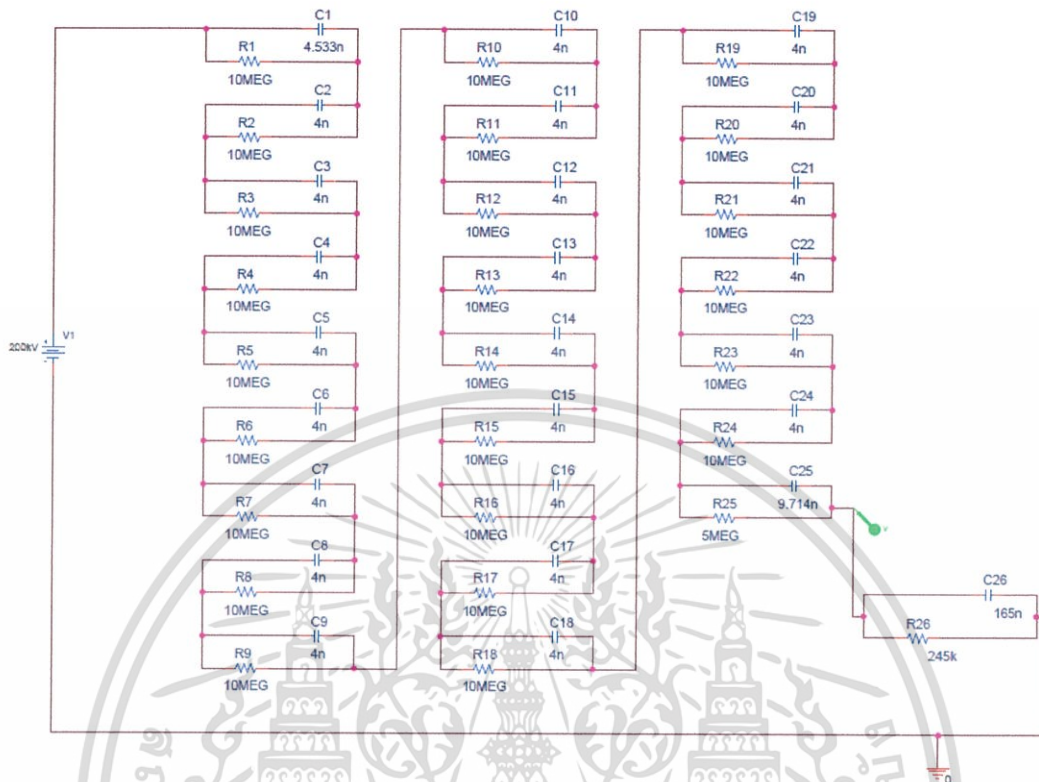
รูปที่ 3.24 วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV



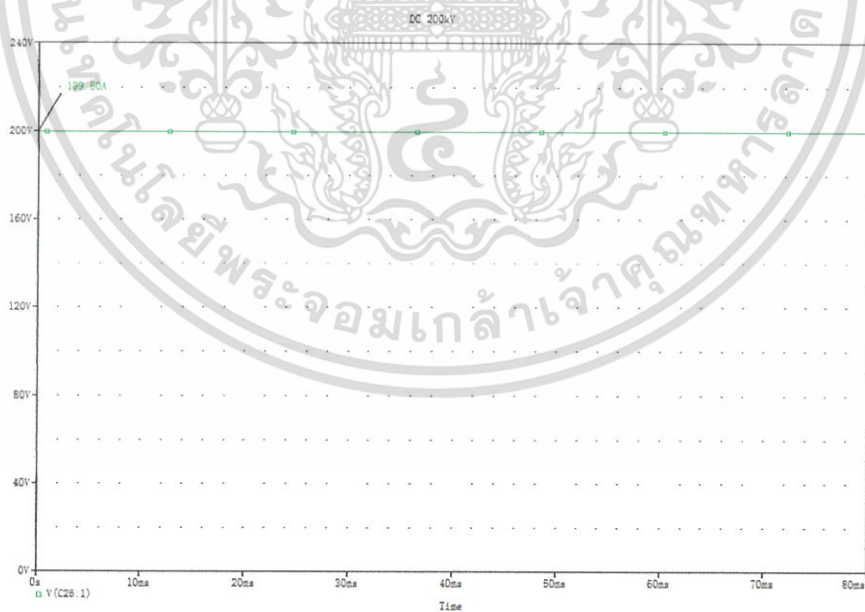
รูปที่ 3.25 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลต์เทจดีไวเซอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 200 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 10.335 mA และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 813.973  $\mu$ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV

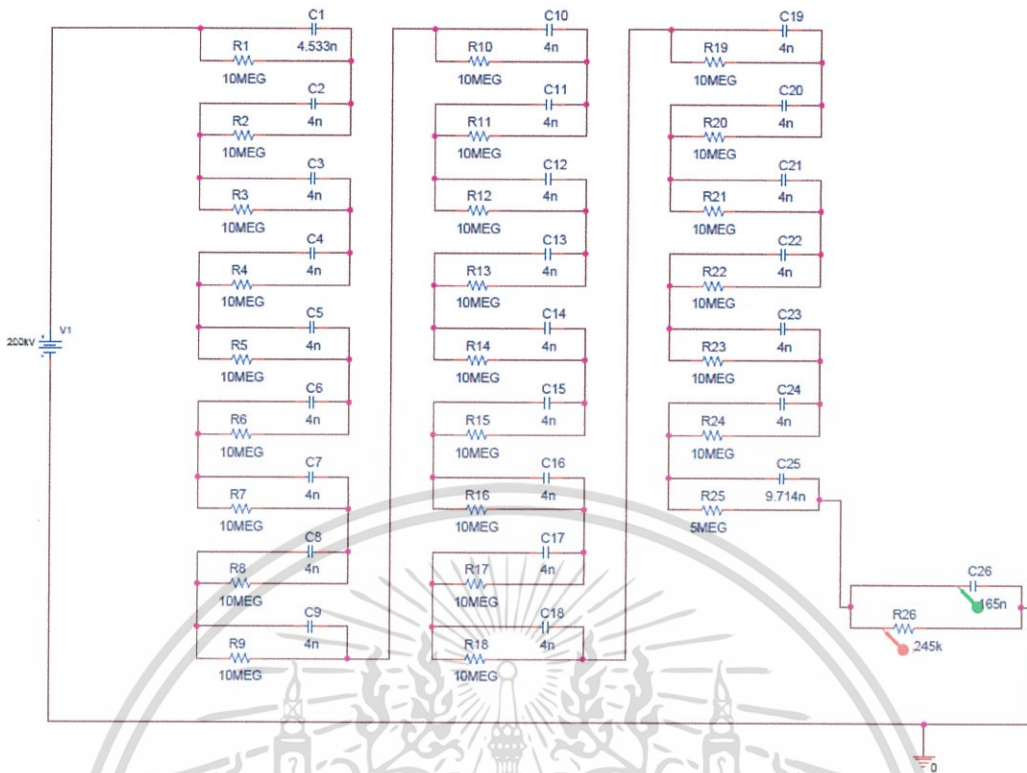


รูปที่ 3.26 วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV

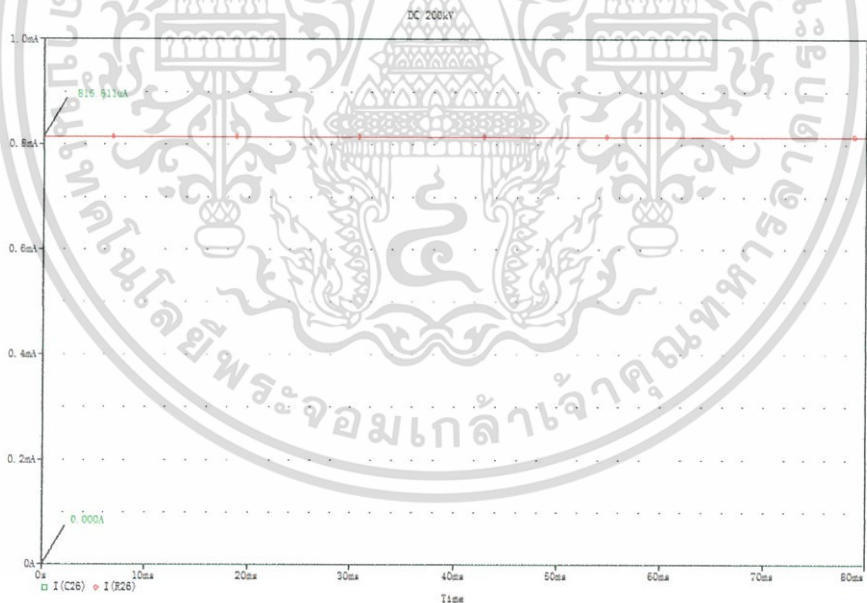


รูปที่ 3.27 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของโวลต์เตจดีไวเซอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV

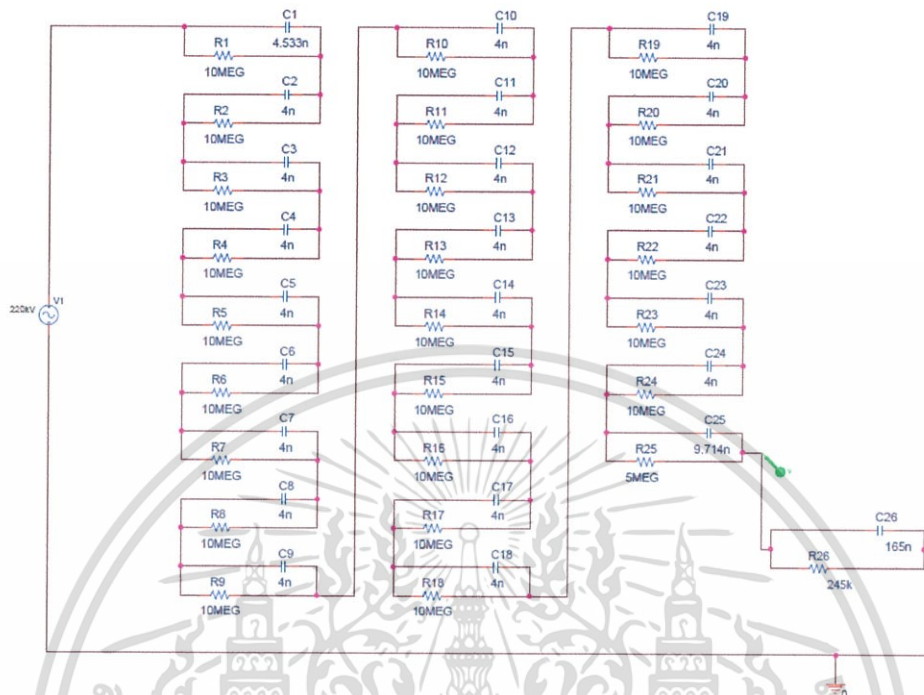


รูปที่ 3.29 รูปคลื่นกระแสเอาต์พุตของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าประมาณ 0.000 A และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 815.511  $\mu$ A

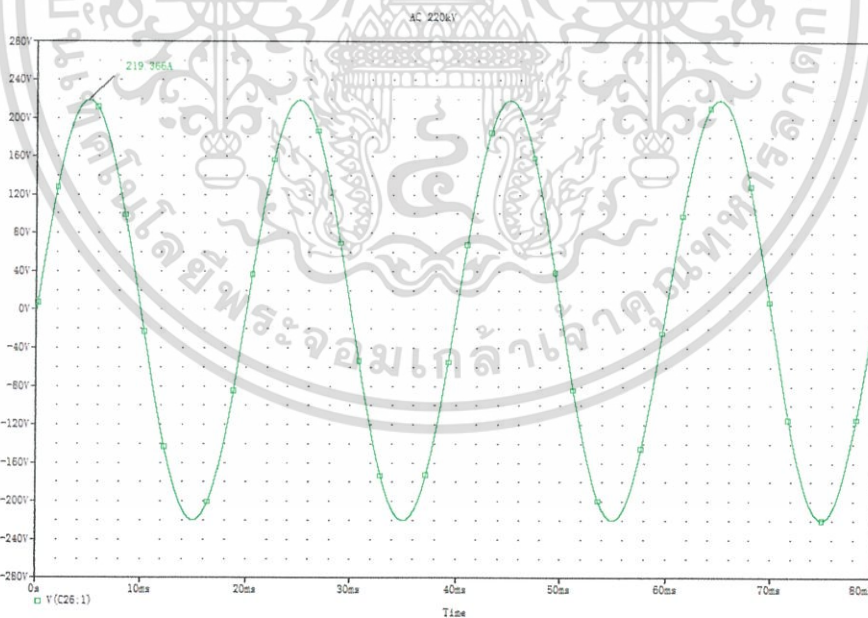
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 วงจรจำลองการทำงานของวงจรขณะทดสอบที่แรงดัน Withstand

3.7.2.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV

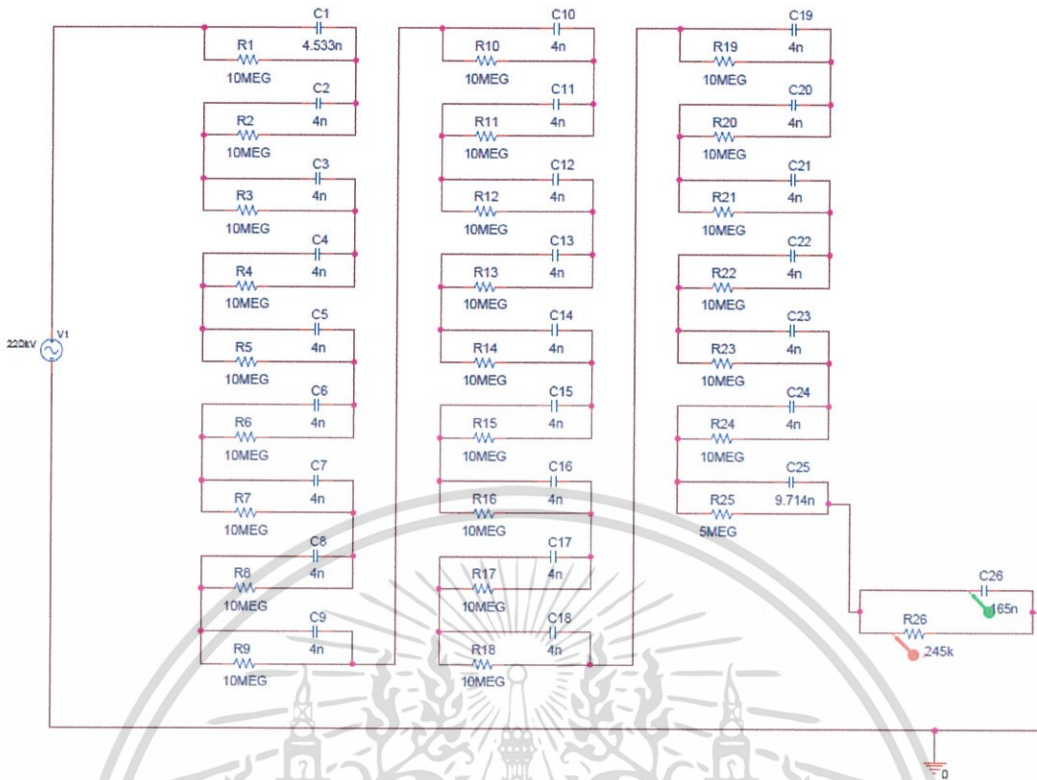


รูปที่ 3.30 วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV

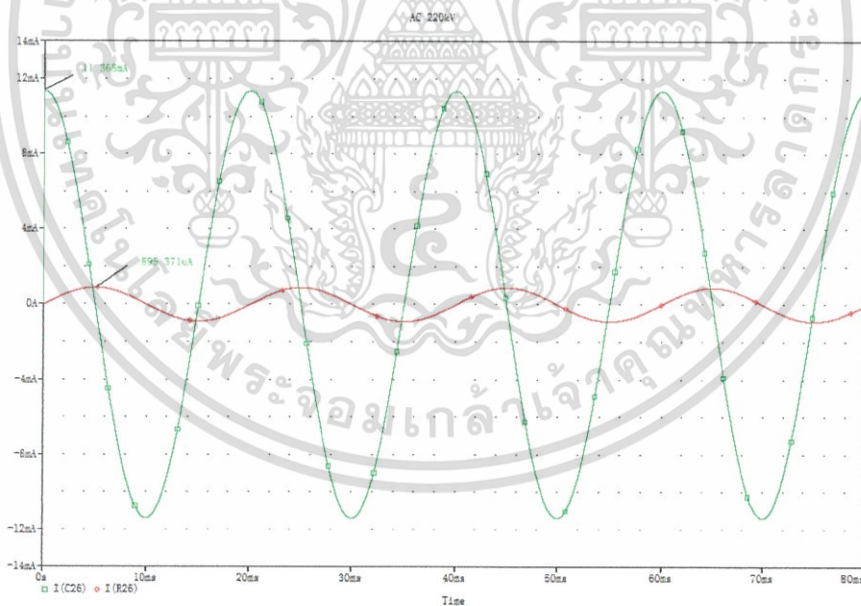


รูปที่ 3.31 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



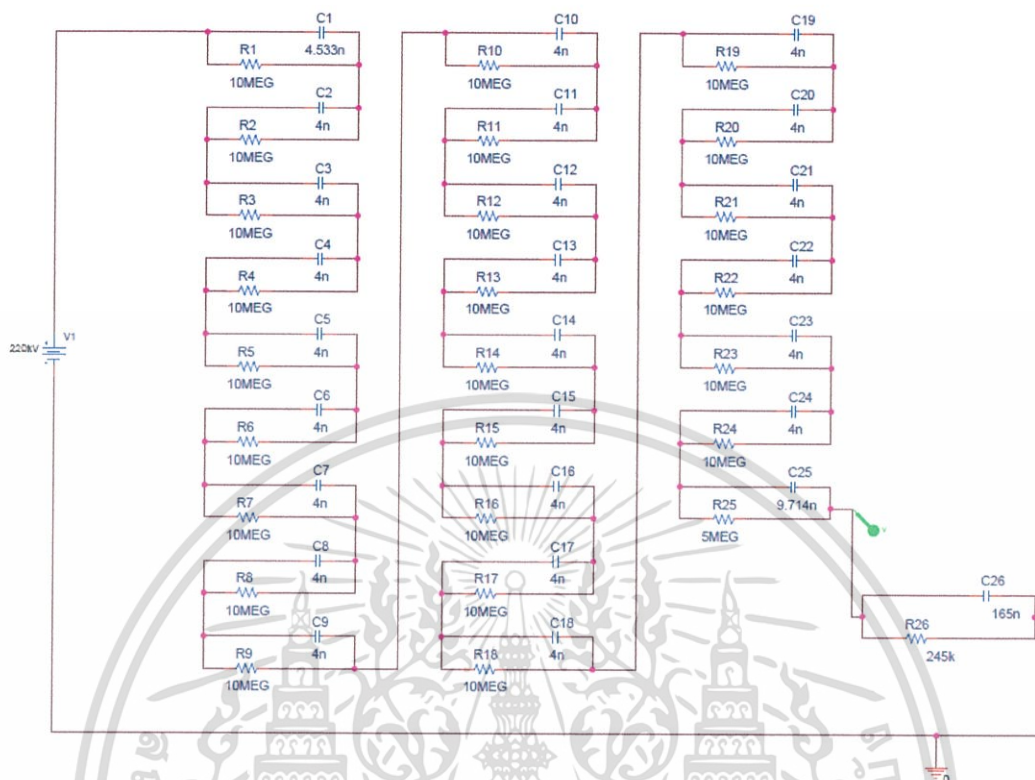
รูปที่ 3.32 วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV



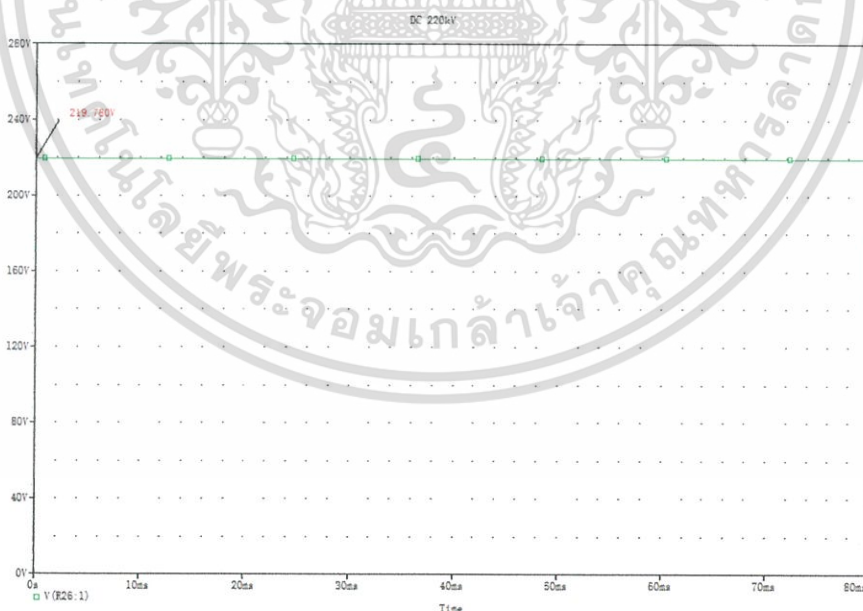
รูปที่ 3.33 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เทจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าเท่ากับ 11.368 mA และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 895.371  $\mu$ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.2.2 ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV

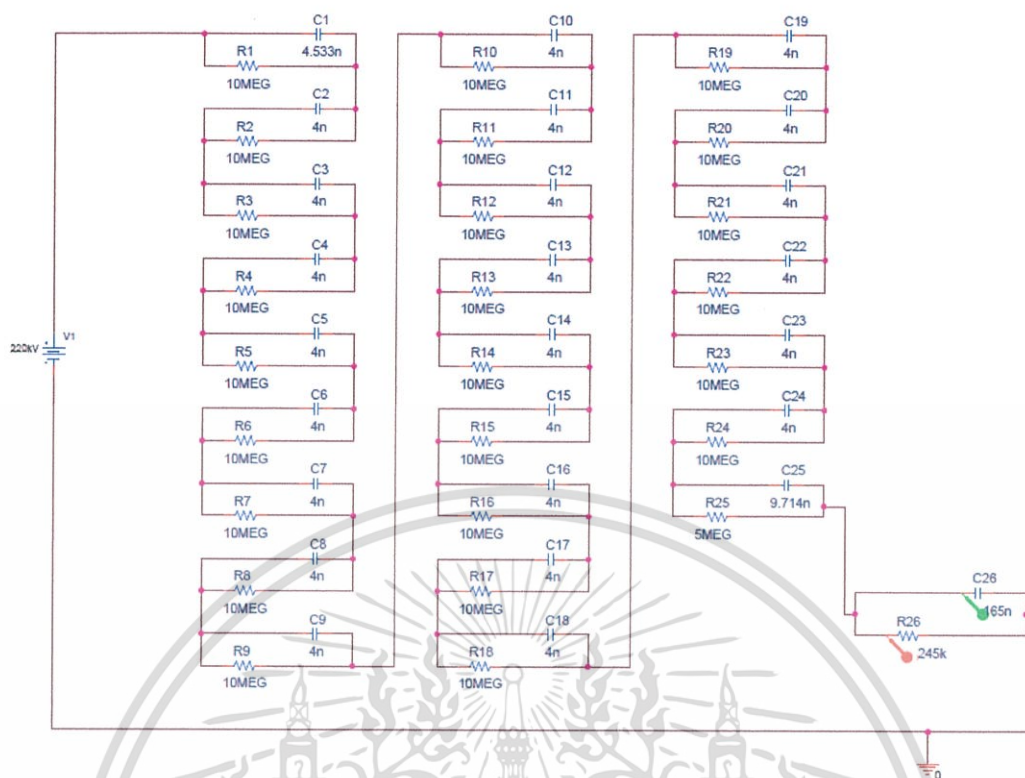


รูปที่ 3.34 วงจรแสดงการวัดแรงดัน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV

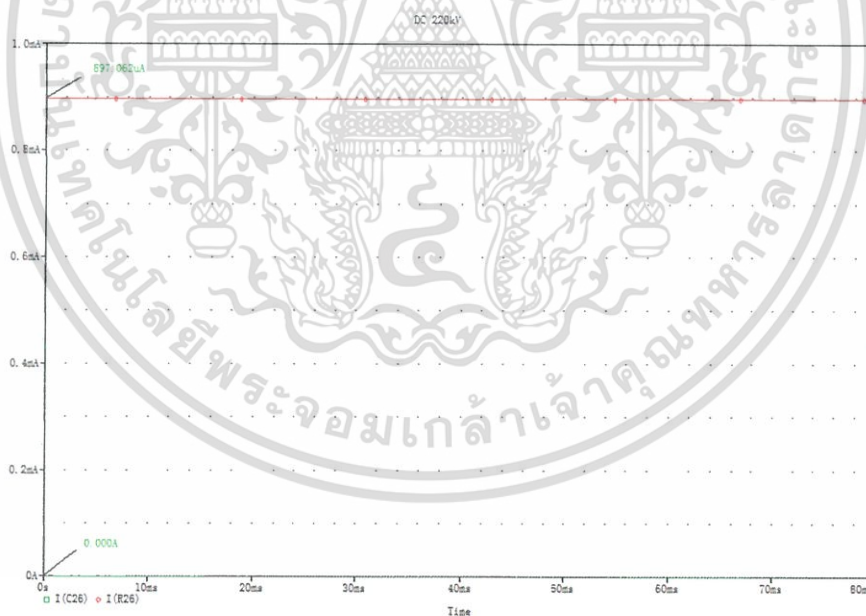


รูปที่ 3.35 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 วงจรแสดงการวัดกระแส เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV



รูปที่ 3.37 รูปคลื่นกระแสเอาท์พุทของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 220 kV โดยวัดที่ตัวเก็บประจุได้ค่าประมาณ 0.000 mA และที่ตัวต้านทานได้ค่าเท่ากับ 897.062  $\mu$ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและประเมินผล

#### 4.1 บทนำ

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันสูงกระแสสลับ เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2(2010) [1] ซึ่งการทดสอบ และการประมวลผลแบ่งหัวข้อตามลำดับต่อไปนี้

- ก) การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ
- ข) การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ
- ค) การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (withstand Test)
- ง) การทดสอบหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด (Scale Factor Test)
- จ) การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)
- ฉ) การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test)

การทดสอบหาลักษณะต่างๆ ของโวลต์เตจดีไวเดอร์จะทำการวัด ณ ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### 4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ

##### 4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

การวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูงใช้เครื่องมือวัด RLC Meter ของบริษัท HEWLETT PACKARD IMPEDANCE/GAIN-PHASE ANALYZER รุ่น 4194A การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.1

##### ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ(Hz)	C <sub>1</sub> จากการคำนวณ (pF)	C <sub>1</sub> จากการวัด (pF)	Error (%)
1000	164.65	166.6	+1.18

##### 4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงดันต่ำจะใช้วงจรถ่าย และเครื่องมือวัดชนิดเดียวกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง ผลการวัดความจุไฟฟ้าภาคแรงดันต่ำ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

##### ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ(Hz)	C <sub>2</sub> จากการคำนวณ (nF)	C <sub>2</sub> จากการวัด (nF)	Error (%)
1000	165	164.7	-0.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการหาค่าความผิดพลาดหาได้จากสมการ (4.1)

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

#### 4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง

##### 4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง

การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูงใช้เครื่องมือวัด Mega Ohm Meter ของบริษัท sanwa รุ่น MG1000 Digital Insulation Tester ผลการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูงแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง

R <sub>1</sub> จากการคำนวณ (MΩ)	R <sub>1</sub> จากการวัด (MΩ)	Error (%)
245	242	-1.2245

#### 4.4 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ

##### 4.4.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ

ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำจะใช้เครื่องมือวัด Mega Ohm Meter ของบริษัท sanwa รุ่น MG1000 Digital Insulation Tester ผลการวัดแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ

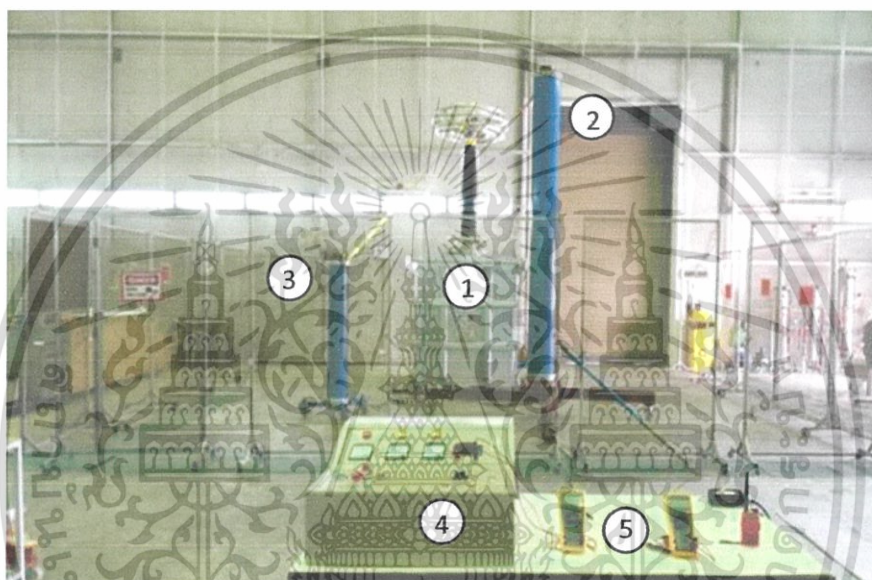
R <sub>2</sub> จากการคำนวณ (kΩ)	R <sub>2</sub> จากการวัด (kΩ)	Error (%)
245	242	-1.2245

#### 4.5 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

ในขั้นตอนแรกของการทดสอบ จะทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Test) ก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าการฉนวนภายในของภาคแรงดันสูงของโวลท์เตจดีไวเดอร์ จะไม่เกิดการเบรกดาวน์ในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหาย และอันตรายขึ้น รวมไปถึงภายนอกต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิวที่ต่อฉนวนที่นำมาใช้งานเป็นโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ มาตรฐานจึงกำหนดให้ทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัดจากการทดสอบเมื่อจ่ายแรงดันที่ 110% ของพิกัดแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที [1] ไม่เกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของท่อ และอุปกรณ์ภายในท่อ จึงสรุปได้ว่ามีความคงทนต่อแรงดันตามมาตรฐานกำหนด [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ โดยทำการต่อโวลต์เตจติไวเตอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจติไวเตอร์อ้างอิง ขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับตามรูปที่ 4.1 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 40kV 80kV 120kV 160kV และ200kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 200kV เป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันไว้ที่พิกัดเป็นเวลา 30 นาที และทำการวัดอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบวัด (Short-term Stability Test) โดยอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดจะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ
2. โวลต์เตจติไวเตอร์อ้างอิง
3. โวลต์เตจติไวเตอร์สอบเทียบ
4. ตู้ควบคุมแรงดัน
5. มัลติมิเตอร์ "Fluke" Type 179 True RMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

No.	40		80		120		160		200		200	
	Ref.	UUC	Ref.	UUC	Ref.	UUC	Ref.	UUC	Ref.	UUC	Ref.	UUC
	(kV)	(V)	(kV)	(V)	(kV)	(V)	(kV)	(V)	(kV)	(V)	(kV)	(V)
1	40.1	40.4	79.8	80.4	119.3	120.4	159.3	160.5	198.5	200.7	198.3	200.6
2	40.2	40.5	80	80.5	119.5	120.5	159.2	160.7	199.2	200.8	198.9	200.4
3	40.2	40.5	79.8	80.7	119.2	120.5	159.1	160.8	198.7	200.7	199	200.5
4	40.1	40.5	79.7	80.6	119.3	120.6	159.1	160.8	198.7	200.7	198.5	200.4
5	39.8	40.4	79.8	80.7	119.4	120.4	159.4	160.6	199	200.6	198.6	200.6
6									198.7	200.9	198.9	200.5
7									198.7	200.7	198.4	200.6
8									199	200.8	198.8	200.6
9									198.9	200.7	198.7	200.6
10									199.1	200.8	199	200.5
Average	40.08	40.46	79.82	80.58	119.34	120.48	159.22	160.68	198.85	200.74	198.71	200.53
Dev.(%)	0.04		0.04		0.05		0.01		0.04		0.01	
Scale Factor	990.6		990.6		990.5		990.9		990.6		990.9	

1. Determination of the assigned scale factor = 990.6

2. Linearity test = 0.03

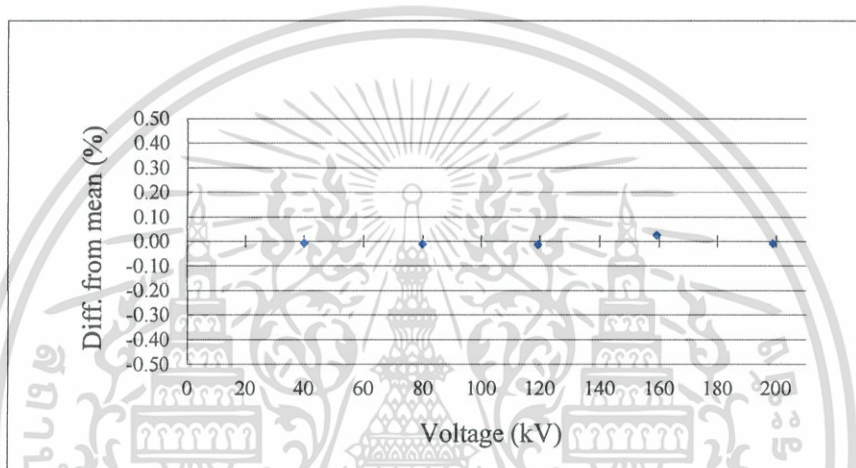
3. Short-term stability = 0.03

4. Uncertainty = 0.92

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนี้ จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งานโดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีสัญญาณผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่ทำการทดสอบที่อ่านได้จากระบบวัดจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือว่ามีความเป็นเชิงเส้น[1] ผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสลับ

REF. (kV)	UUC (kV)	REF./UUC	Diff. (%)
40.08	40.46	0.9906	-0.003
79.82	80.58	0.9906	-0.007
119.34	120.48	0.9905	-0.011
159.22	160.68	0.9909	0.027
198.85	200.74	0.9906	-0.006
	Avg. =	0.9906	



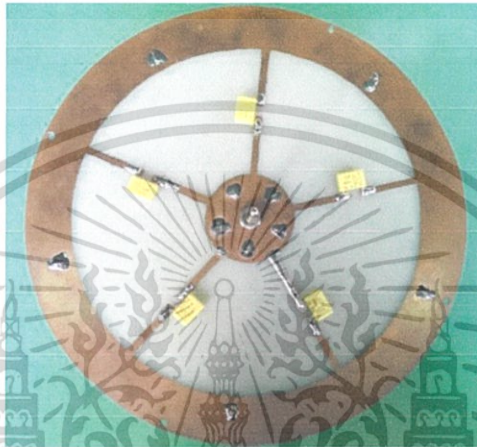
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสลับ

#### 4.6 การแก้ไขค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดเท่ากับ 990 ซึ่งไม่เป็นไปตามที่ต้องการจึงได้ทำการแก้ไขเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดเท่ากับ 1000 ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าแรงดันที่อ่านได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์ทดสอบมีค่ามากกว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 1% จึงต้องลดค่าอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำลงด้วยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำจากเดิม 165 nF อีก 1% เป็น 166.65 nF โดยการใช้ตัวเก็บประจุขนาด 330 pF 5 ตัว ต่อขนาดเข้ากับชุดเดิม ดังรูปที่ 4.3 และวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำหลังปรับค่าอัตราส่วน

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ(Hz)	C <sub>2</sub> จากการคำนวณ (nF)	C <sub>2</sub> จากการวัด (nF)	Error (%)
1000	166.65	166.6	-0.03



รูปที่ 4.3 การต่อตัวเก็บประจุขนานเพิ่มเข้าไป

จากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงอีกครั้งตามหัวข้อที่ 4.5 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับหลังการแก้ไข

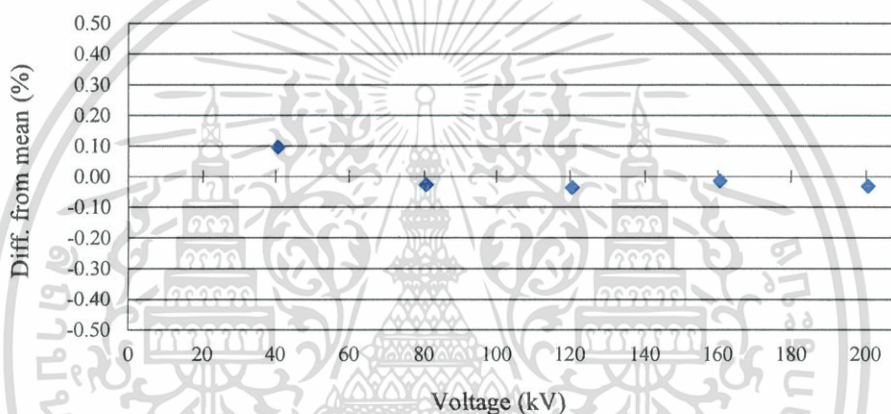
No.	40		80		120		160		200		200	
	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)
1	40.60	40.40	80.50	80.40	120.40	120.40	160.30	160.20	200.30	200.50	200.80	200.60
2	40.50	40.50	80.40	80.50	120.70	120.50	160.50	160.50	200.50	200.40	200.80	200.40
3	40.70	40.70	80.70	80.70	120.50	120.50	160.60	160.50	200.60	200.70	200.80	200.50
4	40.50	40.40	80.60	80.60	120.40	120.60	160.60	160.60	200.60	200.50	200.70	200.40
5	40.60	40.60	80.20	80.10	120.50	120.40	160.70	160.60	200.50	200.30	200.70	200.60
6									200.50	200.60	200.60	200.50
7									200.60	200.60	200.50	200.60
8									200.70	200.60	200.50	200.60
9									200.70	200.50	200.40	200.60
10									200.60	200.50	200.40	200.50
Average	40.58	40.52	80.48	80.46	120.50	120.48	160.54	160.48	200.56	200.52	200.62	200.53
Dev.(%)	0.15		0.02		0.02		0.04		0.02		0.04	
Scale Factor	1001.5		1000.2		1000.2		1000.4		1000.2		1000.4	

1. Determination of the assigned scale factor = 1000.5
2. Linearity test = 0.10
3. Short-term stability = 0.02
4. Uncertainty = 0.87

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนี้ จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งานโดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีสัญญาณผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่ทำการทดสอบที่อ่านได้จากระบบวัดจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น[10] ผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับหลังการแก้ไข

REF. (kV)	UUC (kV)	REF./UUC	Diff. (%)
40.580	40.520	1.0015	0.099
80.480	80.460	1.0002	-0.025
120.500	120.480	1.0002	-0.033
160.540	160.480	1.0004	-0.012
200.560	200.520	1.0002	-0.029
Avg. =		1.0005	



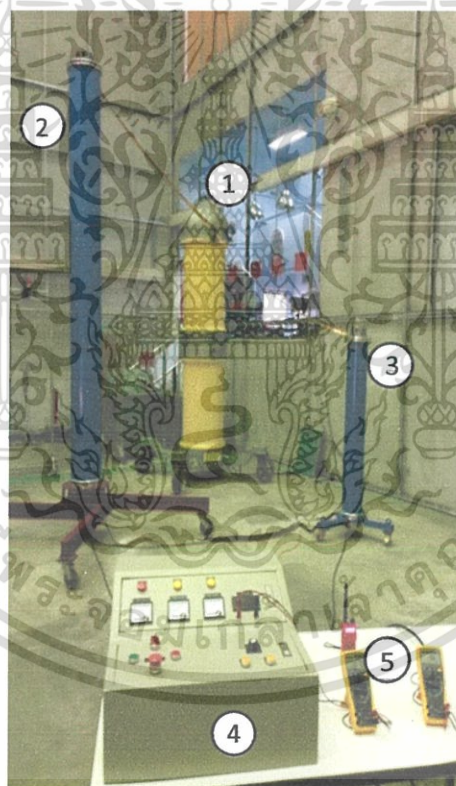
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับหลังการแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ในขั้นตอนแรกของการทดสอบ จะทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Test) ซึ่งทำในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับ แต่เปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นแรงดันกระแสตรง

หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง โดยทำการต่อโวลต์เตจติไวเดอ์ที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจติไวเดอ์อ้างอิงขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงตามรูปที่ 4.5 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 40kV 80kV 120kV 160kV และ 200kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 200kV เป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันไว้ที่พิกัดเป็นเวลา 15 นาที และทำการวัดอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบวัด (Short-term Stability Test) โดยอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดจะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน



รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง
2. โวลต์เตจติไวเดอ์อ้างอิง
3. โวลต์เตจติไวเดอ์สอบเทียบ
4. ตู้ควบคุมแรงดัน
5. มัลติมิเตอร์ "Fluke" Type 179 True RMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

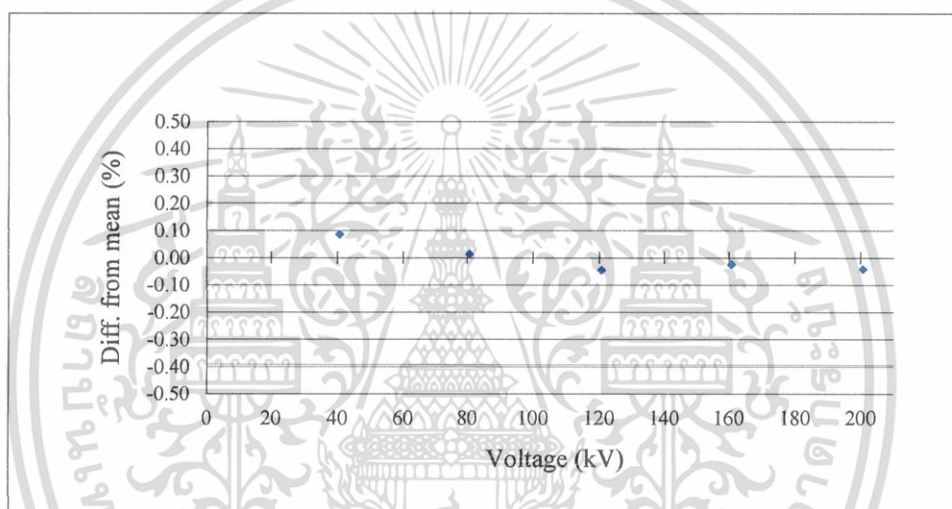
No.	40		80		120		160		200		200	
	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)
1	40.70	40.50	80.60	80.40	120.40	120.40	160.70	160.60	200.60	200.40	200.50	200.30
2	40.50	40.40	80.60	80.50	120.70	120.50	160.60	160.60	200.50	200.40	200.60	200.40
3	40.50	40.40	80.50	80.50	120.50	120.50	160.60	160.50	200.60	200.50	200.60	200.40
4	40.50	40.50	80.50	80.60	120.40	120.60	160.60	160.50	200.60	200.70	200.60	200.30
5	40.50	40.60	80.40	80.30	120.50	120.40	160.50	160.50	200.50	200.60	200.50	200.30
6									200.70	200.60	200.40	200.60
7									200.70	200.50	200.40	200.60
8									200.70	200.60	200.40	200.60
9									200.60	200.70	200.50	200.60
10									200.50	200.60	200.40	200.20
Average	40.54	40.48	80.52	80.46	120.50	120.48	160.60	160.54	200.60	200.56	200.49	200.43
Dev.(%)	0.15		0.07		0.02		0.04		0.02		0.03	
Scale	1001.5		1000.7		1000.2		1000.4		1000.2		1000.3	
Factor	1001.5		1000.7		1000.2		1000.4		1000.2		1000.3	

1. Determination of the assigned scale factor = 1000
2. Linearity test = 0.09
3. Short-term stability = 0.01
4. Uncertainty = 0.90

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนี้ จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งานโดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัดที่ต้องการทดสอบว่ามีสัญญาณผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่ทำการทดสอบที่อ่านได้จากระบบวัดจะต้องมีค่าไม่เกิน  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น[10] ผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

REF. (kV)	UUC (kV)	REF./UUC	Diff. (%)
40.540	40.480	1.0015	0.089
80.520	80.460	1.0007	0.015
120.500	120.480	1.0002	-0.043
160.600	160.540	1.0004	-0.022
200.600	200.560	1.0002	-0.039
Avg. =		1.0006	



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

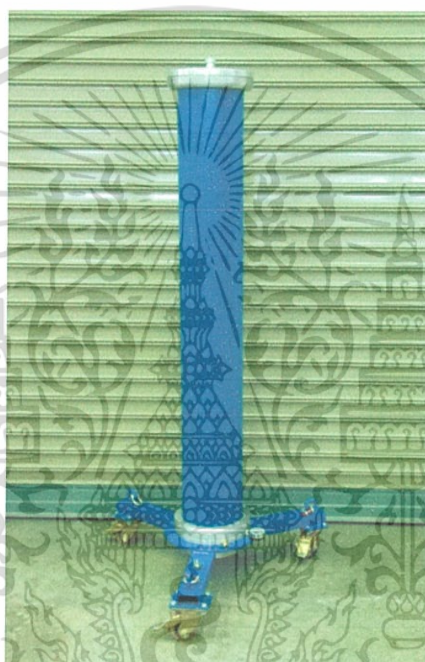
จากการทดสอบความสามารถของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรง เทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง โดยการทำการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งไม่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับแก้โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ แล้วทำการทดสอบใหม่ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นน้อยมาก และอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด [1] ทางคณะผู้จัดทำจึงขอสรุปผลการทดลองโดยใช้แบบฟอร์มรายงานที่ออกโดยห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตามเอกสารในภาคผนวก ก และภาคผนวก ข

ปัญหาโดยรวมที่พบในโครงงานโวลต์เตจดีไวเดอร์ คือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้นั้นมีความละเอียดมากในการเลือกใช้ ซึ่งจะต้องทำการคำนวณและหาข้อมูลรวมทั้งรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนนำมาใช้ รวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักมาก โดยได้ใช้เหล็กเป็นฐานโวลต์เตจดีไวเดอร์ เพราะมีราคาถูก และแข็งแรง กว่าอลูมิเนียม ทำให้เกิดความลำบาก เวลาถอดชิ้นส่วนของโวลต์เตจดีไวเดอร์เพื่อแก้ไขวงจรภายใน และส่งผลให้การขนส่งออกนอกสถานที่ที่มีความลำบากมากขึ้น

ปัญหาจากการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (withstand Test) พบว่า เริ่มเกิดโคโรนาขึ้นที่แรงดันประมาณ 100kV โดยจะเกิดขึ้นตรงส่วนของอิเล็กโทรดของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อขึ้นแรงดันไปที่ 200kV พบว่ามีโคโรนามากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผิวอิเล็กโทรดที่ชิดกับท่อพีวีซี ทำให้เกิดเป็น Triple Junctions [11] จึงได้ทำการแก้ไขด้วยการถอดอิเล็กโทรดทั้งด้านบนและด้านล่าง มาทำการขัดขอบด้านในที่ติดกับท่อพีวีซี ให้มีความโค้งมน และมีช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับท่อพีวีซีแล้วนำมาทดสอบอีกครั้งพบว่าโคโรนาที่เคยเกิดขึ้นได้หายไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรง พบว่ามีความละเอียดมากในการคำนวณ และการเลือกใช้อุปกรณ์ ซึ่งถ้าหากค่าของอุปกรณ์ที่เลือกใช้มีความคลาดเคลื่อนจะทำให้ระบบการวัด และการลดทอน มีการเปลี่ยนแปลงมาก ในส่วนของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ ซึ่งจะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมาก และเนื่องจากตัวเก็บประจุที่มีพิกัดทนแรงดันสูงมักหาซื้อได้ยากในประเทศไทย ประกอบกับถ้าหากซื้อจากต่างประเทศจะใช้ระยะเวลาในการสั่งซื้อนาน จึงต้องใช้เวลาในการหาตัวเก็บประจุให้ครบตามที่คำนวณ และการเชื่อมขาของอุปกรณ์ภายในภาคแรงสูง ซึ่งทางผู้จัดทำใช้ท่อทองเหลืองสวมเข้าไปกับขาของอุปกรณ์เพื่อลดโคโรนา



รูปที่ 5.1 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60060-2, **High Voltage test technique**, Part 2: Measuring System, 2010.
- [2] IEC 60060-1 Edition 3.0 - 2010, **High-Voltage test techniques**, Part 1: General definitions and test requirements, 2010.
- [3] IEEE Std 4<sup>TM</sup> - 2013, **standard for High-Voltage Testing Techniques**.
- [4] IEC Publication No.71, **Insulation Co-ordination**, 1976.
- [5] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] นายกীরติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์ และคณะ, **โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 100 kV**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [7] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2**, สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สำรวย สังข์สะอาด, **เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1**, ฉนวนและวัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] IEC 61010-1 Edition 2, **Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory**, Part 1: General requirements, 2010.
- [11] คุณคมสัน เพ็ชรรัักษ์ และคณะ, **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20**, แรงดันวابلไฟตามผิวท่อ PVC, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสลับ

UUC	AC/DC HIGH VOLTAGE DIVIDER	<b>Ambient condition</b>
Manufacturer	KMITL	Pressure 763±2 mm.Hg.
Model	RC Voltage Divider	Temperature 30±2 °C
Serial no.	-	Humidity 75±5 %
Client	KMITL	
Calibration date	Jan 21/15	

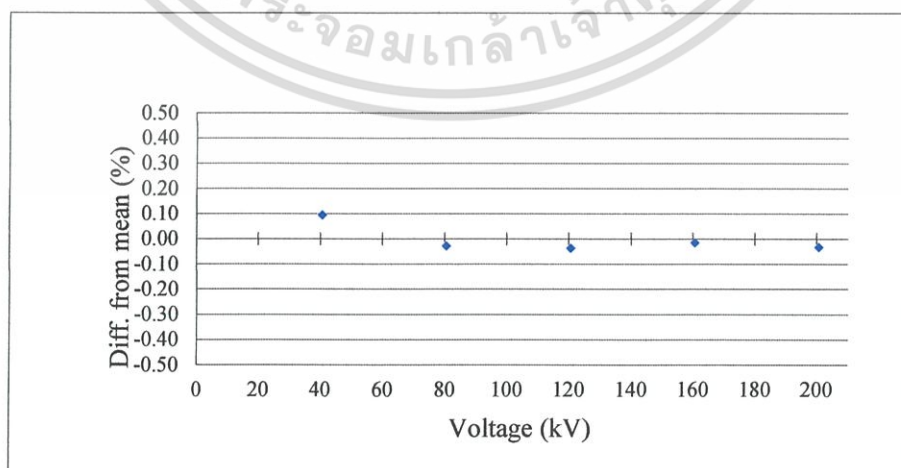
### A. Determination of the assigned scale factor

The scale factor of the high voltage divider, when compared with HVEL's measuring system is 1,000 at 200 kV.

### B. Linearity test

Reference (kV)	Unit under calibration			Estimated uncertainty (%)
	Ratio	Measured (V)	Scale factor	
40.580	1000 : 1	40.52	1001.5	0.87
80.480		80.46	1000.2	0.83
120.500		120.48	1000.2	0.84
160.540		160.48	1000.4	0.82
200.560		200.52	1000.2	0.83

The linearity of the high voltage divider is less than + 0.1 % in the range of 40 - 200 kV.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### C. Short-term stability test

The short-term stability was checked at a voltage of 200 kV for 15 minutes. Observations were proceeded immediately after application of the voltage and after 15 minutes. The change of scale factor, before and after voltage application, is less than 0.02 %.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบการวัดแรงดันสูงกระแสตรง

UUC	AC/DC HIGH VOLTAGE DIVIDER	Ambient condition
Manufacturer	KMITL	Pressure 763±2 mm.Hg.
Model	RC Voltage Divider	Temperature 30±2 °C
Serial no.	-	Humidity 75±5 %
Client	KMITL	
Calibration date	Jan 21/15	

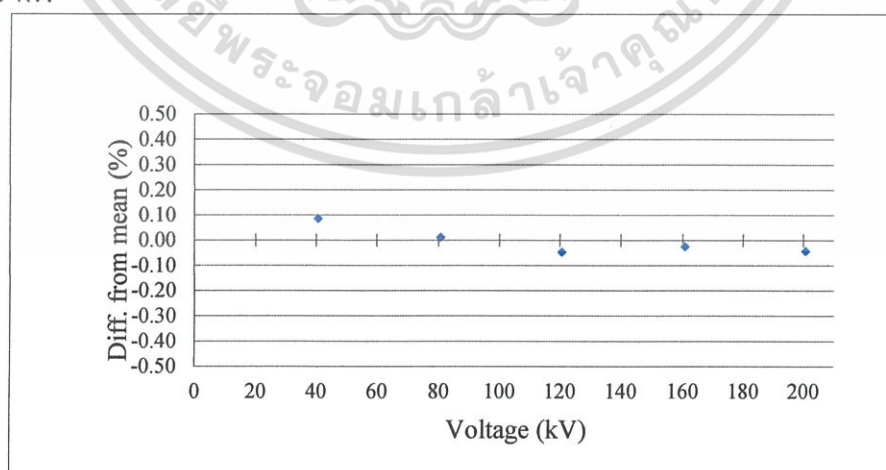
### A. Determination of the assigned scale factor

The scale factor of the high voltage divider, when compared with HVEL's measuring system is 1,000 at 200 kV.

### B. Linearity test

Reference (kV)	Unit under calibration			Estimated uncertainty (%)
	Ratio	Measured (V)	Scale factor	
40.540	1000 : 1	40.48	1001.5	0.89
80.520		80.46	1000.7	0.84
120.500		120.48	1000.2	0.84
160.600		160.54	1000.4	0.82
200.600		200.56	1000.2	0.83

The linearity of the high voltage divider is less than + 0.09 % in the range of 40 - 200 kV.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### C. Short-term stability test

The short-term stability was checked at a voltage of 200 kV for 15 minutes. Observations were proceeded immediately after application of the voltage and after 15 minutes. The change of scale factor, before and after voltage application, is less than 0.01 %.

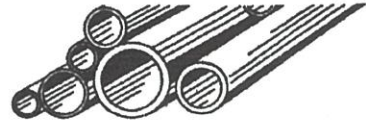


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# COPPER TUBE INCH & METRIC



**SIZES: 1/8" to 6" and 4mm to 54mm**

## DESIGN DESCRIPTION

Copper tube is made either hard or soft. Inch standard is designated type K, L, M, ACR, Refrigeration, or Heavy, depending on wall thickness and execution. With K,L,M tubing actual outside diameter is larger than nominal or "name" size.

Type K - supplied hard 20' lengths or soft 60' coils - is recommended for general plumbing and is also suitable for gas, oil, and low pressure steam.

Type L - supplied hard 20' lengths or soft 60' coils - is recommended for interior applications in plumbing and heating.

Type M - supplied hard 20' lengths - is for non-pressurized uses with solder fittings only.

ACR Grade - supplied hard 20' lengths - Has I.D. cleaned and ends capped for air conditioning and refrigeration use.

REFRIGERATION COIL - soft 50' coils - is also "cleaned and capped".

HEAVY COPPER COIL - soft 50' coils - is general purpose extra heavy wall tube. Ends are open.

METRIC COPPER TUBE - hard 5-6 meter lengths, soft 10 meter coils - is specified by O.D. and wall thickness.

Bronze Solder Joint - SJ - valves and wrought copper SJ fittings are designed for soldering onto copper tubes. (Bite type flareless compression and flare end fittings are also sized for these tubes).

Bronze Silbraze - SB - valves and fittings are designed for brazing to copper, red brass or copper-nickel pipe and have ends sized to accommodate pipe outside diameters (also called IPS sized).

**IMPORTANT NOTE:** The term "sweat" is used to describe the joining technique for both solder joint (tube size) materials and silbraze (IPS pipe size) materials. Actual O.D. of tube or I.D. of valves or fittings will establish which type is referred to when "sweat" connection is indicated.

All available Chrome Plated. Order with CP after Part #.

## COPPER WATER TUBING ASTM B88

NOM SIZE	Actual OD	Type K 752000 Wall	Type L 753000 Wall	Type M 754000 Wall	ACR 755000 Wall
1/4	3/8	.035	.030	.025	.030
3/8	1/2	.049	.035	.025	.035
5/8	3/4	.049	.040	.028	.040
3/4	7/8	.065	.045	.030	.042
1	1 1/8	.065	.050	.035	.050
1 1/4	1 3/8	.065	.055	.042	.055
1 1/2	1 5/8	.072	.060	.049	.060
2	2 1/8	.083	.070	.058	.070
2 1/2	2 5/8	.095	.080	.065	.080
3	3 1/8	.109	.090	.072	.090
3 1/2	3 5/8	.120	.100	.083	.100
4	4 1/8	.134	.110	.095	.110
5	5 1/8	.160	.125	.109	.125
6	6 1/8	.192	.140	.122	.140

## METRIC COPPER TUBING

NOM Size	Actual OD	5-6 Meter Lgths Plain Finish 873000 Wall	2 Meter Lgths Chrome Plate 874000 Wall	10m Soft Coil Plain Chrome 800000 800001 Wall
4	4	0.8		0.8
6	6	0.8	1.0	0.8
8	8	0.8	1.0	0.8
10	10	0.8	1.0	1.0
12	12	1.0	1.0	1.0
14	14	1.0		1.0
15	15	1.0	1.0	1.0
16	16	2.0		1.0
18	18	1.0		1.0
20	20	2.0		-
22	22	1.0		1.0
25	25	2.0		
28	28	1.2		
35	35	1.5		
42	42	1.5		

\* Note: Other walls available

## COPPER REFRIGERATION COILS

NOM Size	Actual OD	Standard 761000 Wall	Heavy 761001 Wall
1/8	1/8	.030	.065
3/16	3/16	.030	.065
1/4	1/4	.030	.065
5/16	5/16	.032	.065
3/8	3/8	.032	.065
1/2	1/2	.032	.065
5/8	5/8	.035	.065
3/4	3/4	.035	.065
7/8	7/8	.045	
1 1/8	1 1/8	.050	
1 3/8	1 3/8	.055	
1 5/8	1 5/8	.060	

# PRESSURE TUBING

**MATERIAL:** Carbon Steel Welded or Seamless  
Stainless Steel 304 Welded or Seamless  
316 Welded or Seamless

For use with flareless compression/Bite/Lok type fittings or flare fittings (pg 101) or tube socket weld fittings (pg 91). Mounting clamps (pg 103). Metric (pg 113).

**ORDERING INFO:** Material + OD + Wall Thickness + Welded or Seamless

SIZES (OD)	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1	1 1/8	1 1/4	1 1/2	2
Common walls	.035-.049	.035	.035	.035	.035	.035	.035	.049	.035	.065	.065	.065
Standard length 20"	.065	.065	.065	.065	.065	.065	.065	.083	.095	.120	.120	.188

**W & O SUPPLY INC**

111

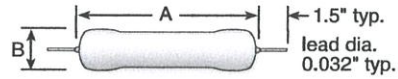
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Maxi-Mox

## Precision Thick Film Axial Terminal High Voltage/High Resistance

### DIMENSIONS

Ohmite Series	Power	A max. (in/mm)	B max. (in/mm)
<b>• High-temperature (silicone coated)</b>			
MOX-1-12	2.5W	1.120" / 28.45	0.310" / 7.87
MOX-2-12	5.0W	2.120" / 53.85	0.310" / 7.87
MOX-3-12	7.5W	3.120" / 79.24	0.310" / 7.87
MOX-4-12	10.0W	4.120" / 104.65	0.310" / 7.87
MOX-5-12	12.5W	5.120" / 130.05	0.310" / 7.87
<b>• Standard (epoxy coated)</b>			
MOX-1-13	2.0W	1.140" / 28.96	0.345" / 8.76
MOX-2-13	3.0W	2.140" / 54.36	0.345" / 8.76
MOX-3-13	4.0W	3.140" / 79.76	0.345" / 8.76
MOX-4-13	5.0W	4.140" / 105.16	0.345" / 8.76
MOX-5-13	6.0W	5.140" / 130.56	0.345" / 8.76



### PERFORMANCE DATA

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

### TEMP. AND VOLTAGE COEFFICIENTS OF RESISTANCE

Resistor Series	Temp. Coeff. of Resistance*			Voltage Coeff. of Resistance**	
	25 PPM/°C	50 PPM/°C	100 PPM/°C	< 2PPM/Volt	< 5PPM/Volt
MOX-1	1K-99M	100M-450M	451M-30,000M	250Ω-1,000M	1,001M-100,000M
MOX-2	1K-199M	200M-1,000M	1,001M-60,000M	500Ω-2,600M	2,601M-200,000M
MOX-3	1K-299M	300M-1,500M	1,501M-90,000M	750Ω-4,000M	4,001M-300,000M
MOX-4	1K-399M	400M-2,000M	2,001M-120,000M	1K-5,300M	5,301M-400,000M
MOX-5	1K-499M	500M-2,500M	2,501M-150,000M	1.25K-6,700M	6,701M-500,000M

\*TCR of 25ppm for temperature range of 0°C-85°C. TCR of 50ppm and 100ppm for -55°C to 125°C. Consult factory for TCR values operating higher than 125°C

\*\*For tighter VCs please contact Ohmite.

### ORDERING INFORMATION

Coating	Non-inductive optional	RoHS Compliant
2 = Black silicone		
3 = Epoxy		
6 = No coating		

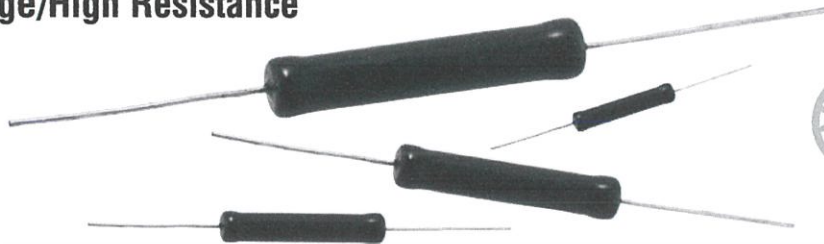
**MOX-1N-131006FE**

Maxi Mox Series	Style	Terminal	Ohms	Tolerance
	1,2,3,4,5,8	1 = 0.032"	First 3 digits are significant; 4th digit is multiplier (# of zeroes to follow). Examples: 1000 = 100Ω 1503 = 150,000Ω 5005 = 50,000,000Ω	D = 0.5% F = 1% G = 2% J = 5% K = 10% M = 15% P = 20%

Not all tolerances available in all values.

# Maxi-Mox

Precision Thick Film Axial Terminal High Voltage/High Resistance



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

## FEATURES

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

## APPLICATIONS

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

## SERIES SPECIFICATIONS

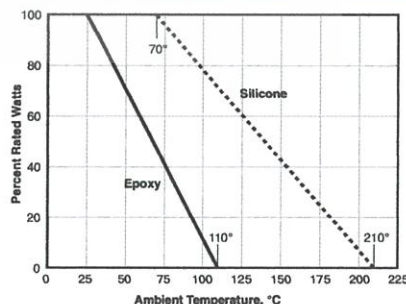
Ohmite Series	Resistance Range (Ω)	Power @70°C	Voltage Rating	Available Tolerances*	Capacitance (pf)
<b>• High-temperature (silicone coated)</b>					
MOX-1-12	250Ω to 300,000M	2.5W	10.0KV	1% to 20%	0.75
MOX-2-12	500Ω to 700,000M	5.0W	20.0KV	1% to 20%	0.60
MOX-3-12	750Ω to 1,000,000M	7.5W	30.0KV	1% to 20%	0.50
MOX-4-12	1K to 1,000,000M	10.0W	40.0KV	1% to 20%	0.40
MOX-5-12	1.25K to 1,000,000M	12.5W	50.0KV	1% to 20%	0.30
<b>• Standard (epoxy coated)</b>					
MOX-1-13	250Ω to 300,000M	2.0W	10.0KV	0.1% to 20%	0.75
MOX-2-13	500Ω to 700,000M	3.0W	20.0KV	0.1% to 20%	0.60
MOX-3-13	750Ω to 1,000,000M	4.0W	30.0KV	0.1% to 20%	0.50
MOX-4-13	1K to 1,000,000M	5.0W	40.0KV	0.1% to 20%	0.40
MOX-5-13	1.25K to 1,000,000M	6.0W	50.0KV	0.1% to 20%	0.30

\*Some tolerances are not available over the entire resistance range.

## CHARACTERISTICS

<b>Core</b>	Alumina
<b>Resistor</b>	Thick Film
<b>Terminal</b>	RoHS solder composition is 96% Sn, 3.5% Ag, 0.5% Cu
<b>Resistance Range</b>	250Ω to 1 Teraohm
<b>Power Rating</b>	2.0W to 12.5W
<b>Voltage Rating</b>	10KV to 50KV
<b>Tolerance</b>	0.5% to 20%; not all tolerances available in all values
<b>Operating Temperature</b>	-55°C to +210°C
<b>Temperature Coefficient</b>	25ppm/°C 0° to 85°C available

## DERATING



(continued)

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

### Special Features

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

### Typical Applications

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

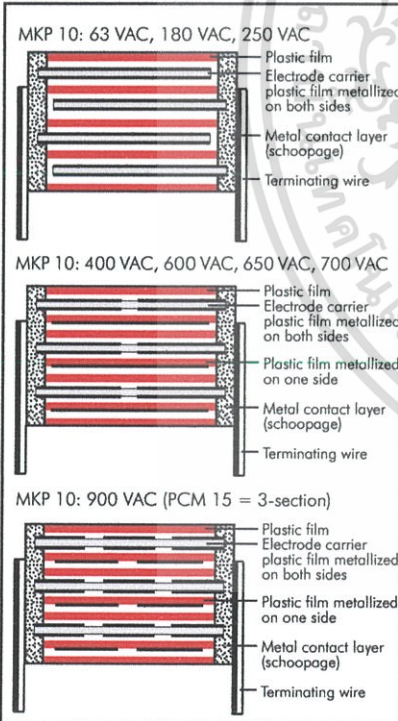
### Construction

**Dielectric:** Polypropylene (PP) film

**Capacitor electrodes:**

Double-sided metallized plastic film

**Internal construction:**



### Encapsulation:

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

**Terminations:** Tinned wire.

**Marking:** Colour: Red.

Marking: Black. Epoxy resin seal: Red

### Electrical Data

#### Capacitance range:

1000 pF to 15 µF (IE12-values on request)

#### Rated voltages:

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

#### Capacitance tolerances:

±20%, ±10%, ±5%

#### Operating temperature range:

-55° C to +100° C

#### Climatic test category:

55/100/56 in accordance with IEC

#### Insulation resistance at +20° C:

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

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

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

(mean value: 100000 sec)

Measuring voltage: 100 V/1 min.

#### Dissipation factors at +20° C: $\tan \delta$

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

**Test voltage:**  $1.6 U_r$ , 2 sec.

#### Dielectric absorption:

0.05%

#### Voltage derating:

A voltage derating factor of 1.35 % per K must be applied from +85° C for DC voltages and from +75° C for AC voltages.

#### Reliability:

Operational life > 300 000 hours

Failure rate < 1 fit (0.5 x  $U_r$  and 40° C)

### Maximum pulse rise time:

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

for pulses equal to the rated voltage

### Mechanical Tests

#### Pull test on leads:

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

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

according to IEC 60068-2-21

#### Vibration:

6 hours at 10 ... 2000 Hz and 0.75 mm

displacement amplitude or 10 g in

accordance with IEC 60068-2-6

#### Low air density:

1 kPa = 10 mbar in accordance with

IEC 60068-2-13

#### Bump test:

4000 bumps at 390 m/sec<sup>2</sup>

in accordance with IEC 60068-2-29

### Packing

Available taped and reeled up to and

including case size 15 x 26 x 31.5 /

PCM 27.5 mm.

Detailed taping information and graphs

at the end of the catalogue.

For further details and graphs please

refer to Technical Information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไข ใด ๆ ภายใต้นามการการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# WIMA MKP 10

Continuation

General Data

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

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

\*\* PCM = Printed circuit module = lead spacing

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

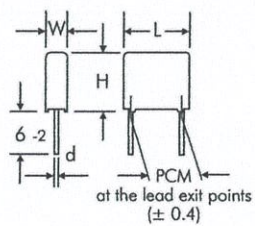
\*\* Admissible AC voltage 280 VAC max.

Dims. in mm.

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

Taped version see page 104.

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



Rights reserved to amend design data without prior notification.

## Continuation

### General Data

Capacitance	1000 VDC/600 VAC*				1600 VDC/650 VAC*				2000 VDC/700 VAC*				2500 VDC/900 VAC*			
	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**	W	H	L	PCM**
1000 pF	4	9	10	7.5*	4	9	13	10	4	9	13	10	5	11	18	15*
1500 "	4	9	13	10*	4	9	13	10	4	9	13	10	6	15	26.5	22.5*
	4	9	10	7.5*									5	11	18	15*
2200 "	4	9	13	10*	4	9	13	10	5	11	13	10*	6	15	26.5	22.5
	4	9	10	7.5*									5	11	18	15*
3300 "	4	9	10	7.5*	4	9	13	10	5	11	18	15	6	15	26.5	22.5*
	4	9	13	10*									5	11	18	15*
4700 "	4.5	9.5	10.3	7.5*	5	11	13	10	5	11	18	15*	6	15	26.5	22.5*
	4	9	13	10*									6	15	26.5	22.5*
6800 "	5.7	12.5	10.3	7.5*	6	12	13	10*	6	12.5	18	15*	7	14	18	15*
	5	11	13	10*									6	15	26.5	22.5*
0.01 µF	5	11	13	10*	5	11	18	15	7	14	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5
	5	11	18	15*												
0.015 "	6	12	13	10*	6	12.5	18	15*	8	15	18	15*	10.5	19	26.5	22.5
	5	11	18	15*												
0.022 "	6	12.5	18	15*	7	14	18	15*	9	16	18	15*	11	21	26.5	22.5
	6	15	26.5	22.5*												
0.033 "	7	14	18	15*	8	15	18	15*	8.5	18.5	26.5	22.5*				
	6	15	26.5	22.5*												
0.047 "	8	15	18	15*	7	16.5	26.5	22.5*	10.5	19	26.5	22.5*				
	6	15	26.5	22.5*												
0.068 "	6	15	26.5	22.5*	9	19	31.5	27.5*	11	21	31.5	27.5*				
	7	16.5	26.5	22.5												
0.1 µF	8.5	18.5	26.5	22.5*	11	21	26.5	22.5*	13	24	31.5	27.5				
	11	21	31.5	27.5*												
0.15 "	11	21	26.5	22.5*	13	24	31.5	27.5	15	26	31.5	27.5*				
	11	21	31.5	27.5*												
0.22 "	11	21	31.5	27.5	15	26	31.5	27.5*	17	34.5	31.5	27.5*				
	11	21	31.5	27.5												
0.33 "	15	26	31.5	27.5*	17	34.5	31.5	27.5*	19	32	41.5	37.5				
	13	24	41.5	37.5*												
0.47 "	17	29	31.5	27.5*	20	39.5	31.5	27.5*	20	39.5	41.5	37.5				
	13	24	41.5	37.5*												
0.68 "	20	39.5	31.5	27.5*	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5				
	17	29	41.5	37.5*												
1.0 µF	20	39.5	41.5	37.5	24	45.5	41.5	37.5								
1.5 "	24	45.5	41.5	37.5												

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

\*\* PCM = Printed circuit module = lead spacing

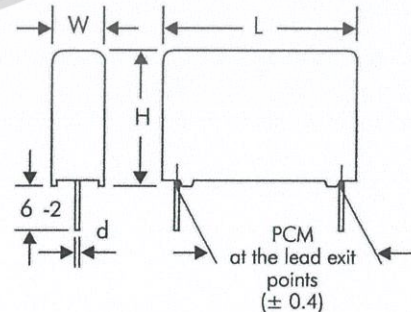
\* On ordering please state the required PCM (lead spacing)!  
If not specified, smaller PCM will be booked.

Dims. in mm.

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

Taped version see page 104.

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



Rights reserved to amend design data without prior notification.

Continuation page 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

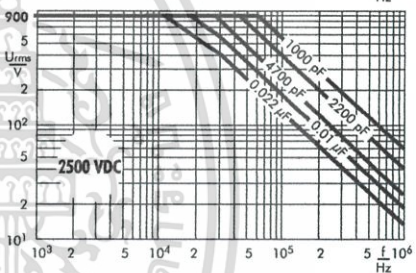
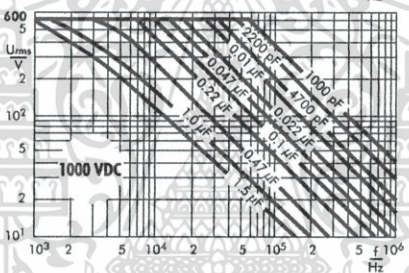
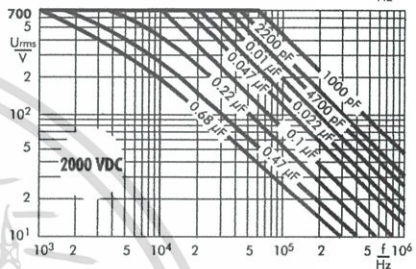
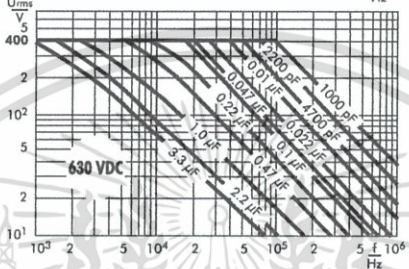
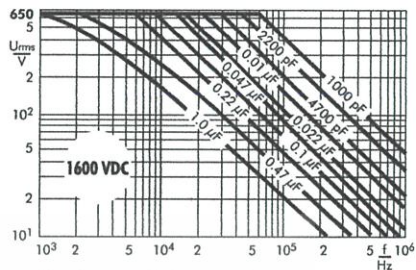
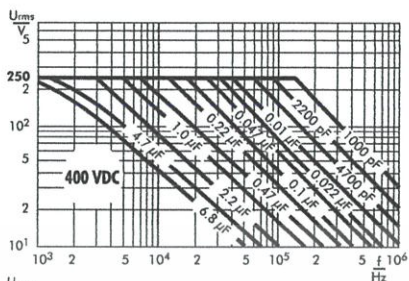
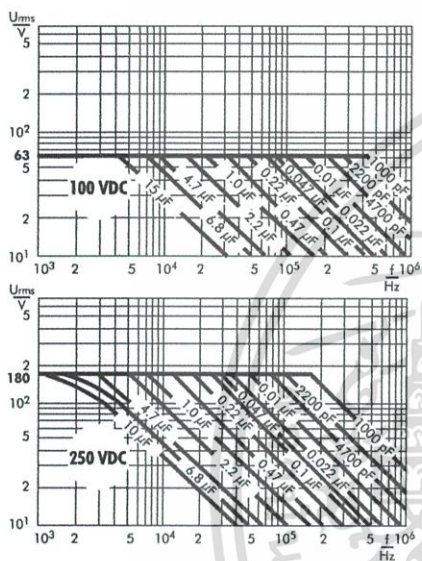
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# WIMA MKP 10

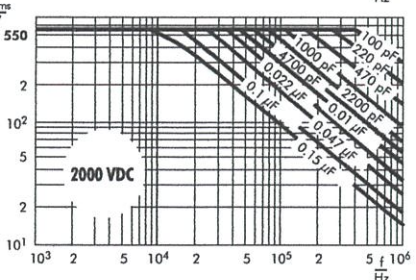
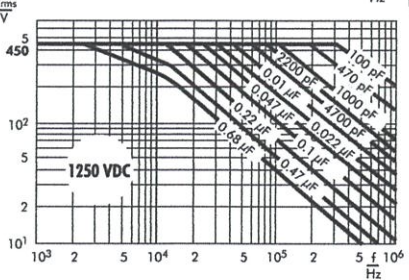
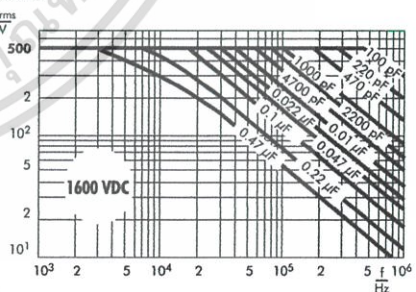
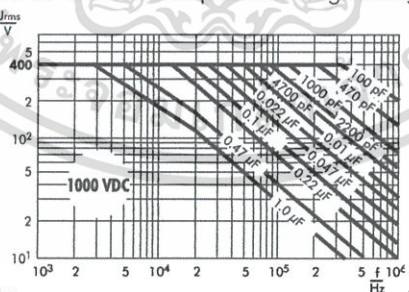
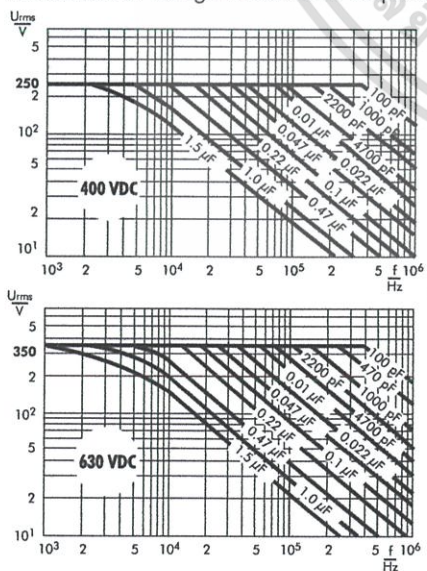
## Continuation

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



# WIMA FKP 4

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



Technical information and general data see page 72.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไข ใดๆ โดยนโยบายด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Recommendation for Processing and Application of Through-Hole Capacitors

### Soldering Process

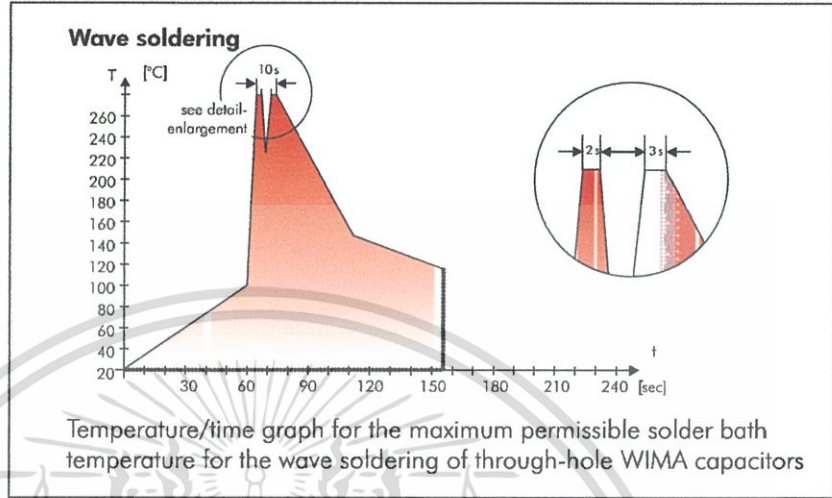
A preheating of through-hole WIMA capacitors is allowed for temperatures  $T_{max}$  ( 100° C.  
In practice a preheating duration of  $t$  ( 5 min. has been proven to be best.

#### Single wave soldering

Soldering bath temperature:  $T$  ( 260° C  
Immersion time:  $t$  ( 5 sec

#### Double wave soldering

Soldering bath temperature:  $T$  ( 260° C  
Immersion time:  $2 \times t$  ( 3 sec



## WIMA Quality and Environmental Philosophy

### ISO 9001:2000 Certification

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

### WIMA WPCS

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

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

### WIMA Environmental Policy

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

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

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

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

We almost completely refrain from using packing materials such as:

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

### RoHS Compliance

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

WIMA Quality Management System certified according to ISO 9001:2000  
WIMA capacitors: RoHS-compliant  
Packaging materials: RoHS-compliant

Tape for lead-free WIMA capacitors

### DIN EN ISO 14001:2005

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไข ใด ๆ ภายใต้งานโครงการใด ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Typical Dimensions for Taping Configuration

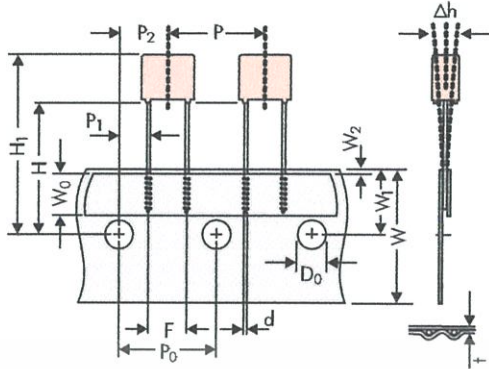


Diagram 1:  
PCM 2.5/5/7.5mm

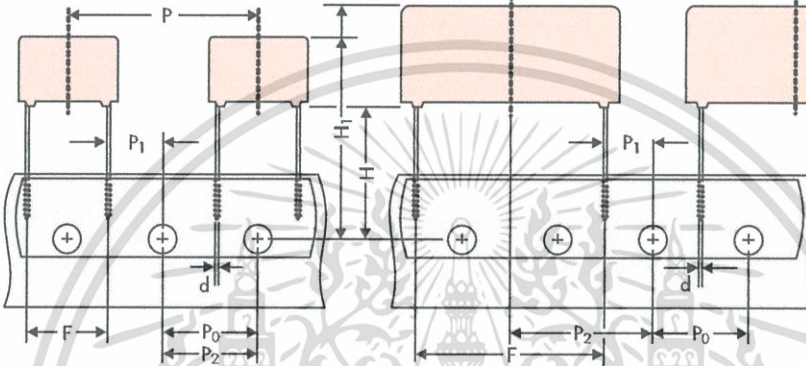


Diagram 2: PCM 10/15 mm

Diagram 3: PCM 22.5 and 27.5\*mm

\*PCM 27.5 taping possible with two feed holes between components

## Dimensions for Radial Taping

Designation	Symbol	PCM 2.5 taping	PCM 5 taping	PCM 7.5 taping	PCM 10 taping*	PCM 15 taping*	PCM 22.5 taping	PCM 27.5 taping	
Carrier tape width	W	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	
Hold-down tape width	W <sub>0</sub>	6.0 for hot-sealing adhesive tape	6.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	
Hole position	W <sub>1</sub>	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	
Hold-down tape position	W <sub>2</sub>	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	
Feed hole diameter	D <sub>0</sub>	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	
Pitch of component	P	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	25.4 ±1.0	25.4 ±1.0	38.1 ±1.5	38.1 ±1.5 or 50.8 ±1.5	
Feed hole pitch	P <sub>0</sub>	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	
Feed hole centre to lead	P <sub>1</sub>	5.1 ±0.5	3.85 ±0.7	2.6 ±0.7	7.7 ±0.7	5.2 ±0.7	7.8 ±0.7	5.3 ±0.7	
Hole centre to component centre	P <sub>2</sub>	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	12.7 ±1.3	12.7 ±1.3	19.05 ±1.3	19.05 ±1.3	
Feed hole centre to bottom edge of the component	H <sub>▲</sub>	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	
Feed hole centre to top edge of the component	H <sub>1</sub>	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 32.25 max.	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 32.25 max.	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 24.5 to 31.5	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 25.0 to 31.5	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 26.0 to 37.0	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 30.0 to 43.0	H+H <sub>component</sub> < H <sub>1</sub> 35.0 to 45.0	
Lead spacing at upper edge of carrier tape	F	2.5 ±0.5	5.0 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.2</sub>	7.5 ±0.8	10.0 ±0.8	15 ±0.8	22.5 ±0.8	27.5 ±0.8	
Lead diameter	d	0.4 ±0.05	0.5 ±0.05	*0.5 ±0.05 or 0.6 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	*0.5 ±0.05 or 0.6 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	0.8 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.05</sub>	0.8 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.05</sub>	0.8 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.05</sub>	
Component alignment	Δh	± 2.0 max.	± 2.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	
Total tape thickness	t	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	
Package (see also page 105)	▲	ROLL/AMMO			AMMO				
		REEL	φ 360 max. φ 30 ±1	B 52 ±2 38 ±2	depending on compo. dimensions	REEL	φ 360 max. φ 30 ±1	B 52 ±2 38 ±2	φ 500 max. φ 25 ±1
Unit		see details page 107.							

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

Dims in mm.

\* Diameter of leads see General Data.

Please clarify customer-specific deviations with the manufacturer.

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

Position of components according to PCM 7.5 (sketch 1); P<sub>0</sub> = 12.7 or 15.0 is possible



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง และกระแสสลับ พิกัด 200 kV

## 200 kV AC and DC Voltage Divider

นายตรีวิษณุ แสงสิทธิ์, นายวิฑูรย์ พันชากุล, นายวิฑูรย์ พงษ์เพชร และนางสาววิลาสินี วัฒนไพบูลย์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ถลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925,

E-mail: treewit01@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลการออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรงและแรงดันสูงกระแสสลับ พิกัด 200 kV โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างเป็นชนิดตัวต้านทานย่อยขนานกับตัวเก็บประจุย่อย และต่ออนุกรมกันเป็นชุด เพื่อให้ทนต่อแรงดันใช้งานได้ในภาคแรงดันสูงใช้ตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกัน และต่อขนานกับตัวต้านทานในแต่ละชั้น บรรจุอยู่ในท่อพลาสติกอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 2 บาร์ ส่วนในภาคแรงดันต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทานโดยกระจายตัวแบบสมมาตร และถูกบรรจุอยู่ในกล่องซิลิโคนนิยัม โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการออกแบบสร้างได้ทดสอบ และประเมินคุณสมบัติอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010)[1] ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการออกแบบสร้างขึ้นสามารถใช้วัดแรงดันสูงทั้งสองแบบได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ และมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

**คำสำคัญ:** โวลต์เตจดีไวเดอร์, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, แรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันสูงกระแสตรง, ความคงทนอยู่ใต้ต่อแรงดัน, อัตราส่วนลดทอนแรงดัน

### ABSTRACT

This paper presents a design and construction of a voltage divider, which is used in measurement of DC and AC voltages at the rated value of 200 kV. The high-voltage part is designed and constructed by using a set of lump resistors connected parallel with lump capacitors and they are connected in series for having required voltage rating. All of high-voltage components are installed in the PVC tube filled with SF<sub>6</sub> insulated gas at pressure of 2 bars. The low voltage part of the divider was constructed from capacitor parallel with resistors enclosed in an aluminum housing. The designed voltage divider has been tested according to the standard of IEC 60060-2 (2010) composing

of a measurement.. In addition, the voltage divider has a good performance for all type of voltage measurement and characteristics met the entire of the standard requirement. Furthermore, This accomplishment will be advantage for increasing capability of high voltage engineering laboratory of KMITL.

**Keywords:** Voltage divider, High-voltage engineering, AC High-voltage, DC high-voltage, withstand voltage, scale factor, linearity, short term stability

### 1. บทนำ

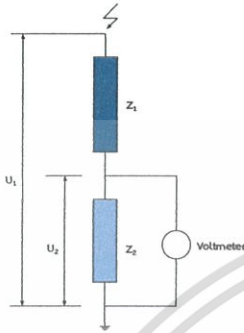
ในการวัดแรงดันสูง ต้องทำการลดทอนแรงดันให้มีขนาดต่ำลง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ทำการวัดและเครื่องมือวัดต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่มาก โวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider) เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันสูงชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งโวลต์เตจดีไวเดอร์จะทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์วัดแรงดันภาคแรงต่ำได้ เช่น ออสซิลโลสโคป มัลติมิเตอร์ เป็นต้น โดยใช้ข้อกำหนดของมาตรฐานสากล IEC 60060-1[2], IEC 60060-2[1] และ IEEE Std.4[3] เป็นเกณฑ์การตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะการทำงาน

### 2. เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์ [2]

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ 2 ชุดต่ออนุกรมกัน คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูงจะรับแรงดัน U<sub>1</sub> และอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ จะรับแรงดัน U<sub>2</sub> ดังรูปที่ 1 ซึ่งในภาคแรงดันต่ำสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ โดยอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 ชุดของโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทานล้วน ตัวเก็บประจุล้วน หรืออาจเป็นทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อร่วมกัน ซึ่งโวลต์เตจดีไวเดอร์จะได้ชื่อตามองค์ประกอบของวงจร และลักษณะการจัดวางอิมพีแดนซ์ในภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งได้แก่ ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ซึ่คความสามารถของเครื่องมือวัด ความเร็วของเครื่องมือวัด ซึ่งการตรวจสอบคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันที่วัด แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของโวลท์เตจดีไวเดอร์

3. การออกแบบและประกอบสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์

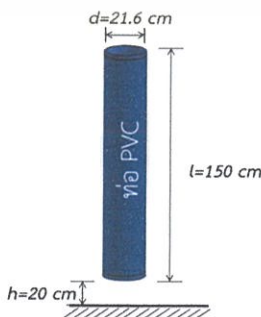
3.1 คุณลักษณะของโวลท์เตจดีไวเดอร์

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างเป็นโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานสามารถใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรงได้ในตัวเดียวกัน โดยมีการออกแบบและการทดสอบอ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2(2010)[1] พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างมีขนาดแรงดันสูงกระแสสลับ 200 kV<sub>ac</sub> และแรงดันสูงกระแสตรง 200 kV<sub>dc</sub>

3.2 การออกแบบภาคแรงดันสูงของโวลท์เตจดีไวเดอร์

3.2.1 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

ความจุสเตรย์ล่งคินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ค่าความจุสเตรย์ล่งคินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ ดังรูปที่ 2 และสามารถหาค่าความจุสเตรย์ได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 2 ตัวเก็บประจุเดี่ยวแบบทรงกระบอก

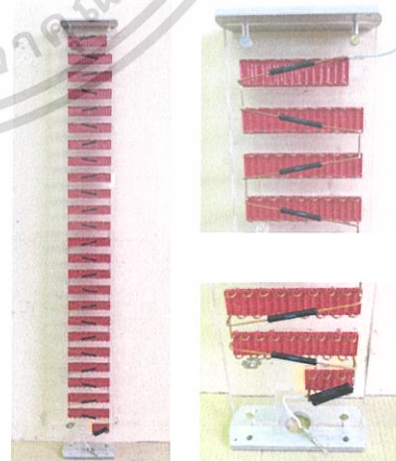
$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\left(\frac{2l}{d}\right)\left(\sqrt{\frac{4h+l}{4h+3l}}\right)\right]} \quad (1)$$

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิด โพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypropylene Film) มีขนาดความจุ 0.068 μF พิกัด 1600 VDC / 650 VAC เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสสลับที่ 1.1 เท่าของแรงดันทดสอบ และคิดเผื่อความปลอดภัยที่ 1.3 เท่าของแรงดันทดสอบ จึงใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 400 ตัว

นอกจากนี้ การเลือกใช้ตัวเก็บประจุต้องคำนึงถึงค่าความจุสเตรย์ล่งคิน ซึ่งตัวเก็บประจุภาคแรงสูงจะต้องมีขนาดรวมกันมากกว่าค่าความจุสเตรย์ล่งคินประมาณ 3 เท่า ในที่นี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 413 ตัวต่ออนุกรมกันเพื่อให้สะดวกต่อการประกอบสร้าง และมีอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงต่อภาคแรงต่ำใกล้เคียงกับ 1000:1 มากที่สุด ตัวเก็บประจุด้านแรงสูงถูกแบ่งเป็น 25 ชั้น โดยชั้นบนสุดมี 15 ตัว ชั้นล่างสุดมี 7 ตัว ชั้นที่เหลือมีชั้นละ 17 ตัว เมื่อนำตัวเก็บประจุจำนวน 413 ตัว มาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 164.65 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์ล่งคินมาก

3.2.2 ตัวต้านทานภาคแรงดันสูง

ตัวต้านทานภาคแรงสูงของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐานกำหนดให้  $R \leq 10 \text{ M}\Omega / 1 \text{ kV}$  และ  $1 \text{ mA} \geq I \geq 0.1 \text{ mA}$  ในที่นี้ใช้ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์มขนาด 10 MΩ มาต่อขนานเข้ากับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยจะใช้ตัวต้านทานทั้งหมดจำนวน 26 ตัว ชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 24 ชั้นละ 1 ตัว ส่วนชั้นสุดท้ายจะใช้ตัวต้านทานขนาด 10 MΩ จำนวนสองตัวต่อขนานกัน จะให้ความต้านทานภาคแรงสูงรวมทั้งหมด 245 MΩ



รูปที่ 3 การต่อตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานภาคแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบภาคแรงดันต่ำของโวลต์เตจดีไวเซอร์

การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

1) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องกรวัด

2) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำ และความต้านทานเมซจิ่งของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่ออุณหภูมิจากเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกับความต้านทานเมซจิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

#### 3.3.1 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลต์เตจดีไวเซอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 200 V จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจดีไวเซอร์เท่ากับ 1000:1 จากการคำนวณ ได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงต่ำ 164.6 nF โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบ Polypropylene ขนาด 0.033  $\mu$ F ต่อขนานกันจำนวน 5 ตัว จะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวม 165 pF ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้

#### 3.3.2 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจดีไวเซอร์เท่ากับ 1000:1 จากการคำนวณ ได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ 245 k $\Omega$  โดยใช้ตัวต้านทานชนิดเม็ทคอลลฟิล์มตัวต้านทานขนาด 1.2 M $\Omega$  ต่ออนุกรมกับ 15 k $\Omega$  อนุกรมกับ 10 k $\Omega$  ขนานกัน 5 ชุด จะได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำรวม 245 k $\Omega$  เพื่อป้องกันการแกว่ง และการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานเมซจิ่ง (Rm) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยตัวต้านทานเมซจิ่งนี้เลือกใช้แบบเม็ทคอลลฟิล์มขนาด 2 W 150  $\Omega$  จำนวน 2 ตัวต่อขนานกัน จึงได้ค่าความต้านทานเมซจิ่งมีค่าเท่ากับ 75  $\Omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด



รูปที่ 3 การต่อตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

### 4. การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูง กระแสตรง และแรงดันสูงกระแสสลับเป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2(2010)[1] ซึ่งการทดสอบ และการประมวลผลแบ่งหัวข้อตามลำดับต่อไปนี้

#### 4.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานของภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงดันสูงใช้เครื่องมือวัด RLC Meter และการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงดันสูงใช้เครื่องมือวัด Mega Ohm Meter ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความผิดพลาดไม่สูงจนเกินไปนัก

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทาน

องค์ประกอบ	Design	Measurement	Error
C ภาคแรงดันสูง	164.65 pF	166.6 pF	+1.18%
C ภาคแรงดันต่ำ	166.65nF	166.6nF	-0.03%
R ภาคแรงดันสูง	245 M $\Omega$	242 M $\Omega$	-1.22%
R ภาคแรงดันต่ำ	245 k $\Omega$	242 k $\Omega$	-1.22%

#### 4.2 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand test)

เป็นการทดสอบในขั้นตอนแรกเพื่อให้มั่นใจว่าการคำนวณภายในของภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์จะไม่เกิดการเบรกควาน์ในขณะที่ใช้งานตามมาตรฐานการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน กระแสตรง และแรงดันสูงกระแสสลับด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัดจากการทดสอบเมื่อจ่ายแรงดันแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที [1] ไม่เกิดวาวไฟตามผิวฉนวนของท่อ และอุปกรณ์ภายในท่อ จึงสรุปได้ว่ามีความคงทนต่อแรงดันตามมาตรฐานกำหนด [1]

#### 4.3 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูง กระแสสลับ

การทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูง กระแสสลับโดยทำการต่อโวลต์เตจดีไวเซอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจดีไวเซอร์อ้างอิง ขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับตามรูปที่ 4 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 40kV 80kV 120kV 160kV และ 200kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 200kV เป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อทดสอบหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด (Scale factor Test) และทดสอบค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันไว้ที่พิกัดเป็นเวลา 30 นาที และทำการวัดอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบวัด (Short-term Stability Test) โดยอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัดจะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันมีค่าเท่ากับ 1000.5 ค่าความเป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.10 และความมีเสถียรภาพของระบบวัดมีค่าเท่ากับ 0.02 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน



รูปที่ 4 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

#### 4.4 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

เนื่องจากทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันสูงกระแสสลับไปแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันกระแสตรง สามารถทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงได้เลย

การทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง จะทำการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับซึ่งมีวงจรทดสอบตามรูปที่ 5 แต่ในส่วนของ การทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบวัดจะจ่ายแรงดันไว้ที่พิกัดเป็นเวลาเพียง 15 นาทีก่อนทำการวัด

จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันมีค่าเท่ากับ 1000 ค่าความเป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.09 และความมีเสถียรภาพของระบบวัดมีค่าเท่ากับ 0.01 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน



รูปที่ 5 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

#### 5. สรุปผลการทดลอง

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบและประกอบสร้างในงานวิจัยนี้สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ 200 kV และแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 200 kV ได้ในคราวเดียวกัน การทดสอบพบว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC 60060-2[1] กำหนด

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.พิรุณ ภูทกโกวิท ผศ.วรภัตต์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ข้อแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ อีกทั้งยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการ

ขอขอบคุณ คุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้การดูแลช่วยเหลือ และแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ได้ช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60060-2, **High Voltage test technique**, Part 2: Measuring System, 2010.
- [2] IEC 60060-1 Edition 3.0 - 2010, **High-Voltage test techniques**, Part 1: General definitions and test requirements, 2010.
- [3] IEEE Std 4<sup>TM</sup>-2013, standard for High-Voltage Testing Techniques.
- [4] ดร.สำราญ สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายตรีวิชัย แสงสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหล่มสักวิทยาคม อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 ฝึกงานที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อาคารปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ระหว่างเดือนเมษายนถึงมิถุนายน พ.ศ. 2557  
E-mail: treewit01@gmail.com



นายวิฑูริช พันธากุล เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหล่มเก่าพิทยาคม อำเภอหล่มเก่า จังหวัดเพชรบูรณ์ เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 ฝึกงานที่บริษัท เคมีแมน จำกัด อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ระหว่างเดือนเมษายนถึงมิถุนายน พ.ศ. 2557  
E-mail: joke\_nsa@hotmail.com



นายวิฑูชนน พวงเพชร เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 ฝึกงานที่ บริษัท เช็กโก้ เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด ระหว่างเดือนเมษายนถึงมิถุนายน พ.ศ. 2557  
E-mail: peempeemm@outlook.com



นางสาววิลาสินี วัฒกไพบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2536 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศสตรีวิทยา พุทธรณชล เขตทวีวัฒนา จังหวัดกรุงเทพ เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 ฝึกงานที่ บริษัท นันทวัน จำกัด จังหวัดกรุงเทพ ระหว่างเดือนเมษายนถึง มิถุนายน พ.ศ. 2557  
E-mail: jane\_conan1412@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้