

การพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง  
DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE MEASURING SYSTEM IN KMITL HIGH  
VOLTAGE LABORATORY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง  
DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE MEASURING SYSTEM IN KMITL HIGH  
VOLTAGE LABORATORY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE MEASURING SYSTEM IN KMITL HIGH  
VOLTAGE LABORATORY



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง  
DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE MEASURING SYSTEM IN KMITL HIGH  
VOLTAGE LABORATORY



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.วรศิลป์ ลีเมธี  
ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

ผู้จัดทำ

1. นาย ศุภกร อังคสิทธิ์
2. นาย สันติ กิระติยศ
3. นาย อติศักดิ์ สิทธิชนะศรี



  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรศิลป์ ลิ้มเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

นาย ศุภกร อังคสิทธิ์  
นาย สันติ กীরติยุต  
นาย อติศักดิ์ สิทธิชนะศรี  
ผศ.วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2559

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาและออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 300 kV. และแรงดันสูงอิมพัลส์ ขนาดพิกัด 1000 kV. โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างเป็นชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง จากการคำนวณพบว่ามีค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน (Stray capacitance) เท่ากับ 70.94 pF ในการออกแบบภาคแรงดันสูงใช้ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีนต่ออนุกรมกันมีค่า 316 pF และในระหว่างชั้นจะมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะต่ออนุกรมกันไว้ ซึ่งมีค่าความต้านทานทั้งหมดเท่ากับ 1680 โอห์ม โดยค่าตัวเก็บประจุในภาคแรงสูงถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินเป็นอย่างมาก และบรรจุอยู่ในท่อพลาสติกอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 2 บาร์ ส่วนในภาคแรงดันต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีนมีค่าทั้งหมด 340 nF ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานมีค่าทั้งหมด 1.66 โอห์ม โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการปรับปรุงได้มีการทดสอบและประเมินคุณสมบัติอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 ได้แก่ การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทาน การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน การทดสอบหาอัตราส่วนลดทอนแรงดัน การทดสอบความเป็นเชิงเส้น และการทดสอบหาเสถียรภาพ โดยมีอัตราส่วนลดทอนแรงดันสูงกระแสสลับเท่ากับ 1012:1 และอัตราส่วนลดทอนแรงดันสูงอิมพัลส์เท่ากับ 1077:1 ซึ่งจากผลการทดสอบที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ได้ทำการปรับปรุงสามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงอิมพัลส์ได้เป็นอย่างดีอีกทั้งยังมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนดซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพให้กับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอีกด้วย

# Development of A High-Voltage Measuring System in KMITL High Voltage Laboratory

Mr. Suphakorn	Angkasith	
Mr. Santi	Keeratiyut	
Mr. Adisak	Sitnasri	
Asst.Prof.Worrakan	Limcharoen	Advisor
Asst.Prof.Dr.Peerawut	Yutthagowith	Advisor

Year 2016

## ABSTRACT

This project presents development and design of a voltage divider, which is used for AC and impulse voltage measurement. The rated voltages of AC and impulse voltages are 300 kV. and 1000 kV, respectively. The developed damped capacitor voltage divider has calculated stray capacitance of 70.94 pF. In the design, the high voltage part consists of polypropylene film capacitors connected in series with metal-film resistors. The total capacitance and resistance are 316 pF and 1680 ohm, respectively. The capacitance of the high voltage part is designed to be much higher than stray capacitances. All high voltage components are installed in a PVC tube filled with SF<sub>6</sub> insulated gas at 2 bars. Also, the low voltage part of voltage divider consists of polypropylene film capacitors connected in series with metal film resistors. The total capacitance and resistance of the low voltage part are 340 nF and 1.66 ohm, respectively. The developed voltage divider were tested according to the standard of IEC 60060-2, 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. The scale factors of the developed divider are 1012:1 for AC voltage and 1077:1 for impulse voltage. From all experimental results, the developed voltage divider can measure AC and impulse high voltage with high reliability. In addition, the characteristics meet all standard requirements. Furthermore, this accomplishment will be advantage for increasing capability of high voltage engineering laboratory of KMITL.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พิรุณ ฤทธิโกวิท ผศ.วรภัทร์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำและความคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการด้วยดีตลอดมาอีกทั้งยังให้ความกรุณาตรวจแก้ไขปริญญาโทฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย

ขอขอบคุณ บริษัท Meidensha Corporation ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเรื่องทุนสนับสนุนในการทำโครงการทั้งหมด ทำให้สามารถหาซื้ออุปกรณ์มาใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ คุณปณยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลืออีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการปรับปรุง วิเคราะห์ และทดสอบมาโดยตลอด รวมไปถึงการตรวจสอบแก้ไขปริญญาโทฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณที่ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยเหลือเรื่องการปรับปรุง แรงกาย และช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ช่วยลงแรง เช่น การจัดวงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงกำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกรื้อเครื่องมือ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ชนิดของโวลต์เตจติไวเตอร์	4
2.1.1 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน	4
2.1.2 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทานมีซิลด์	5
2.1.3 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ	5
2.1.4 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	6
2.1.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม	7
2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลต์เตจติไวเตอร์	8
2.2.1 ชนิดของตัวเก็บประจุและคุณสมบัติ	8
2.2.2 ชนิดของตัวต้านทานและคุณสมบัติ	16
2.3 การฉนวน	20
2.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด	26
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์	32
3.1 คุณลักษณะของโวลต์เตจติไวเตอร์	32
3.2 การออกแบบโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	32
3.2.1 การออกแบบภาคแรงดันสูง	33
3.2.2 การออกแบบภาคแรงดันต่ำ	37
3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจติไวเตอร์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง	39
3.3.2 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ	39
3.3.3 โครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์	40
3.3.4 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์	41
3.4 การออกแบบและสร้างตัวลวดทอน	42
3.4.1 รายละเอียดการประกอบสร้างตัวลวดทอน	43
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ใช้ในการวัดค่าได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์	44
3.5.1 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ	44
3.5.2 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	45
3.6 การอัดก๊าซ SF <sub>6</sub>	48
3.6.1 การตรวจเช็คการรั่วซึม	48
3.6.2 การอัดก๊าซ SF <sub>6</sub>	49
3.7 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเดอร์โดยใช้โปรแกรม Pspice	49
3.7.1 วงจรวัดแรงดันกระแสสลับ	50
3.7.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	52
<b>บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล</b>	<b>55</b>
4.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ	55
4.1.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	55
4.1.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	55
4.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง	56
4.2.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง	56
4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	56
4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	56
4.4 การทดสอบการตอบสนองรูปขึ้น	56
4.4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอน	57
4.4.2 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์	59
4.4.3 ผลตอบสนองรูปขึ้นของระบบวัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน	60
4.5 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	62
4.6 การแก้ไขค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด	64
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>67</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก บทควมวิชาการ	71
ภาคผนวก ข รายละเอียดอุปกรณ์	76
ภาคผนวก ค เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบโวลต์เตจดีไวเซอร์	83
ประวัติผู้เขียน	87



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเดอร์	3
2.2 โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทาน	4
2.3 โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทานมีซีลด์	5
2.4 โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ	6
2.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	6
2.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	7
2.7 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ	8
2.8 ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ	8
2.9 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	9
2.10 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	9
2.11 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	10
2.12 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	11
2.13 โครงสร้างและรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	12
2.14 โครงสร้างและรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม	13
2.15 รูปร่างและสัญลักษณ์ของวาริเอเบิลคาปาซิเตอร์	13
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่	14
2.17 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในแต่ละย่านความถี่	15
2.18 คาร์บอนรีซิสเตอร์	16
2.19 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	17
2.20 เม็ดทอลฟิล์มรีซิสเตอร์	17
2.21 ไวรัวร์รีซิสเตอร์	18
2.22 ตัวต้านทานชนิดตัวถังแบบเดี่ยว (SIP)	18
2.23 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)	19
2.24 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้	19
2.25 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ	20
2.26 กลไกการเบรกดาว์นของฉนวนแข็งโดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า $E_b$ แปรไปตามเวลาที่ป้อนแรงดัน	21
2.27 โมเลกุลของ $SF_6$	24
2.28 แรงดันเบรกดาว์นของก๊าซ $SF_6$ เมื่อเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง	25
2.29 ผลตอบสนองรูปขึ้น $\epsilon(t)$ และเวลาตอบสนอง	26
2.30 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับวัดแรงดัน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.31	นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	28
2.32	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta$ กับ $T_\alpha / T_x$	28
2.33	ค่าแอมพลิจูดที่คลาดเคลื่อน	30
2.34	ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่ต่อสเกลแพกเตอร์ของโวลท์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน	31
2.35	ภาพสเก็ทซ์ของค่าเก็บประจุสมมูล $C_{eq}$ ของโวลท์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ	31
3.1	ท่อนวนพีวีซีวางอยู่บนผิวระนาบ	33
3.2	ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ	35
3.3	วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง	35
3.4	ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง	39
3.5	ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ	40
3.6	โครงสร้างของโวลท์เตจติไวเตอร์	41
3.7	โวลท์เตจติไวเตอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์	41
3.8	วงจรสมมูลของตัวลวดทองชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่งวง	42
3.9	ตัวลวดทองชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่งวง	43
3.10	สายเคเบิลชนิด RG11 A/U	44
3.11	หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป	44
3.12	หัวต่อภาคแรงดันต่ำ	44
3.13	เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ	46
3.14	การแควคัมโวลท์เตจติไวเตอร์ และการอัดก๊าซ SF <sub>6</sub>	49
3.15	วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลท์เตจติไวเตอร์	50
3.16	วงจรแสดงการวัดแรงดันอินพุท เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 kV	50
3.17	รูปคลื่นแรงดันขาเข้าของโวลท์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 kV	51
3.18	วงจรแสดงการวัดแรงดันขาออก เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 kV	51
3.19	รูปคลื่นแรงดันขาออกของโวลท์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 kV	52
3.20	วงจรแสดงการวัดแรงดันขาเข้า เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV	52
3.21	รูปคลื่นแรงดันขาเข้าของโวลท์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV	53
3.22	วงจรแสดงการวัดแรงดันขาออก เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV	53
3.23	รูปคลื่นแรงดันขาออกของโวลท์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV	54
4.1	วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้น	57
4.2	วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	ผลตอบสนองรูปชั้นของตัวลวดทอง	58
4.4	ไม่มีความต้านทานหน่วงภายนอก	59
4.5	ผลตอบผลตอบสนองรูปชั้นของโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน	61
4.6	วงจรถ่ายทอดทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	62
4.7	การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	63
4.8	วงจรถ่ายทอดทดสอบหาคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	64
4.9	กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	66



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำโครงการ	2
2.1 ลักษณะการดิสชาร์จเบรกดาวนในแกป	23
2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF <sub>6</sub>	24
2.3 เงื่อนไขที่กำหนดของพารามิเตอร์ผลตอบสนองกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น	29
2.4 ข้อกำหนดลักษณะสมบัติของสเกลแฟกเตอร์	30
3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจติไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง	32
3.2 คุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U	45
3.3 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1	46
3.4 คุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV	47
3.5 คุณสมบัติของ FLUKE 41B Power Harmonics Analyzer	47
3.6 คุณสมบัติของ Probe	48
4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง	55
4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ	56
4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงดันสูง	56
4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ	56
4.5 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	65
4.6 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	66
5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลท์เตจติไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่ง	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบันส่งจ่ายด้วยระบบไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อลดการสูญเสีย และแรงดันตกในสายส่งเนื่องมาจากแหล่งผลิตไฟฟ้า และแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ห่างไกลจากระบบจำหน่ายหรือบริเวณที่มีผู้ใช้กำลังไฟฟ้า จึงต้องส่งจ่ายด้วยแรงดันสูง อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นต้องผ่านการทดสอบเพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ก่อนนำไปติดตั้ง และในการทดสอบต้องมีเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำ การใช้เครื่องมือวัดแรงดันสูงโดยตรงเป็นเรื่องที่อันตรายซึ่งต่างกับการวัดในระบบแรงดันต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการทราบค่าแรงดันในระบบไฟฟ้าแรงสูง จึงใช้หลักการลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงก่อนซึ่งมีความปลอดภัยมากกว่าการวัดโดยตรง ดังนั้นจึงมีการออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider) เพื่อเป็นอุปกรณ์ลดทอนแรงดัน

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้มีการสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ขึ้นมาและได้ผ่านการใช้งานมานานทำให้มีอุปกรณ์บางส่วนมีการชำรุดเสียหาย และไม่มีการเปรียบเทียบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ทำให้ไม่สามารถนำไปทดสอบวัดค่าได้ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงซ่อมแซมและเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นได้ว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ ที่ได้รับการปรับปรุงซ่อมแซมให้มีประสิทธิภาพและสามารถนำมาใช้งานได้จึงต้องมีการทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ IEC60060-1 [1], IEC60060-2 [2] และ IEEE standard 4 [3]

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทำการปรับปรุง และเปรียบเทียบโวลต์เตจดีไวเดอร์ ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. เพื่อลดการนำเข้าเครื่องมือวัดแรงดันสูงจากต่างประเทศ
3. เพื่อรองรับการทดสอบทางไฟฟ้าแรงสูง
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษามาตรฐาน และวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยทำการสืบค้นจากฐานข้อมูลของ IEC, ปรินซิเพิล และวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์
3. ปรับปรุงซ่อมแซมโวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่กักสูงสุด 300 kV. และสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัดสูงสุด 1000 kV.
4. ทดสอบโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ได้ทำการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
3. ปรับปรุงซ่อมแซมเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
4. ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
5. วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเครื่องมือให้ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด
6. จัดทำเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำโครงการ

แผนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2559									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง	←-----→		←-----→							
2.ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง	←-----→		←-----→							
3.ปรับปรุงซ่อมแซมอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง		←-----→					←-----→			
4.ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง			←-----→			←-----→				
5.วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาให้ได้ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้				←-----→			←-----→			
6.จัดทำเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								←-----→		

←-----→ วางแผน      ←-----→ ปฏิบัติจริง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

สามารถนำโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ได้รับการปรับปรุงซ่อมแซมแล้ว ไปใช้ในการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

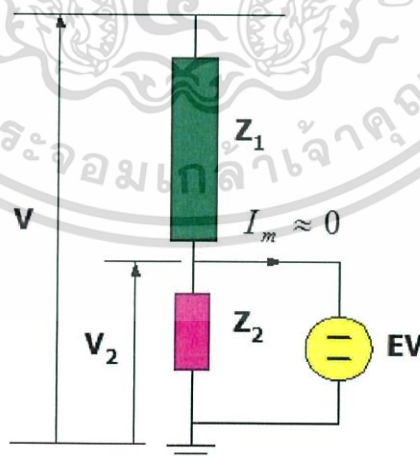
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวัดแรงดันสูงนอกจากกระยะระหว่างผู้วัด และอุปกรณ์วัดที่ปลอดภัยโดยอาศัยหลักการฉนวนที่ถูกต้องแล้ว การวัดแรงดันสูงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดที่สำคัญ ได้แก่ ความถูกต้องเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชีตความสามารถของเครื่องมือวัด ความเร็วของเครื่องมือวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดแรงดันอิมพัลส์

เทคนิคการวัดแรงดันสูง [4] ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันอิมพัลส์นี้มักจะหมายถึง แรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ส่วนแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงกระแสตรง นั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ ภายในระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่าย

โวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage divider) ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ 2 ชุดต่อกันคือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง ( $Z_1$ ) ของโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้นจะรับแรงดัน ( $V$ ) เกือบทั้งหมดตกคร่อมตัวเอง อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ( $Z_2$ ) จะเป็นส่วนแรงดัน ( $V_2$ ) ที่สามารถนำไปใช้งานกับเครื่องมือวัด อิมพีแดนซ์ทั้ง 2 ชุดของโวลต์เตจดีไวเดอร์นี้อาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่างซึ่งโวลต์เตจดีไวเดอร์จะได้ชื่อตามตัวประกอบวงจร และลักษณะการจัดวางอิมพีแดนซ์ เช่น โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทาน โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุ และโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 ชนิดของโวลต์เตจติไวเดอร์ [5]

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงด้วยโวลต์เตจติไวเดอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันโดยสามารถแบ่งแรงดันออกเป็น 3 ชนิด คือ

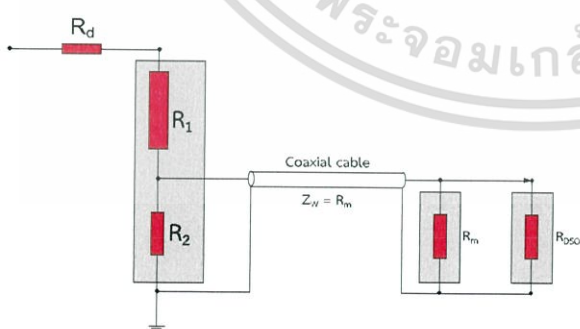
1. แรงดันสูงกระแสสลับ
2. แรงดันสูงกระแสตรง
3. แรงดันอิมพัลส์

### 2.1.1 โวลต์เตจติไวเดอร์ชนิดความต้านทาน

โวลต์เตจติไวเดอร์ชนิดความต้านทาน คือ โวลต์เตจติไวเดอร์ที่มีอิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดความต้านทานความเหนียวนำต่ำ แห่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

โวลต์เตจติไวเดอร์ชนิดนี้วัดแรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่า 100 กิโลโวลต์ เหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจากความจุไฟฟ้าวลงดิน จึงนิยมใช้วัดไม่เกิน 2,300 กิโลโวลต์

ความถูกต้องในการวัดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดแรงดันต่ำคร่อมความต้านทานของภาคแรงต่ำซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์หรือเครื่องมือวัดที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนแรงดันสูงได้ ในขณะที่ผิวกระแสรั่วไหลตามผิว อาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้สูงเกินไป นั่นคือ กระแสจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 มิลลิแอมป์ โดยที่ความต้านทานรวมควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เมกะโอห์มต่อกิโลโวลต์



ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเดอร์ชนิดความต้านทาน



ข) ตัวอย่างโวลต์เตจติไวเดอร์  
ชนิดความต้านทาน

### รูปที่ 2.2 โวลต์เตจติไวเดอร์ชนิดความต้านทาน

เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง  $R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทานมีซีลด์

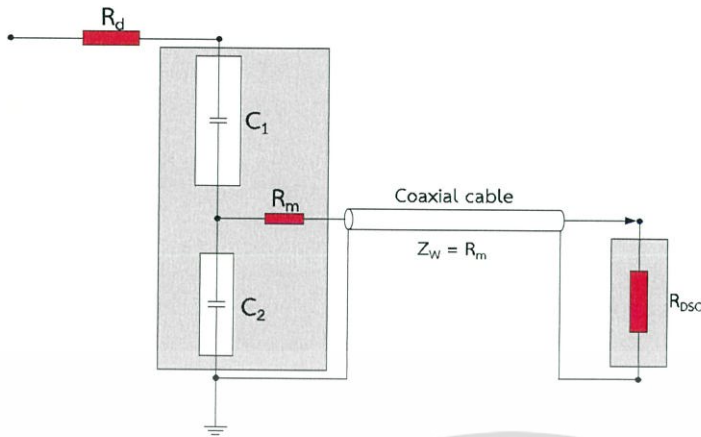
โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองรูปคลื่นได้ต่างๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรง ขนาดของซีลด์อิเล็กทรอนิกส์ และขึ้นอยู่กับการออกแบบความต้านทานในภาคแรงสูงให้เป็นเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด เมื่อความสูงของโวลต์เตจติไวเตอร์มากขึ้นอาจใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์หลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดต่อกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไปแล้วโวลต์เตจติไวเตอร์ขนาดต่ำกว่า 500 kV ใช้ซีลด์อิเล็กทรอนิกส์เพียงแค่อันเดียวติดตั้งด้านบนก็เพียงพอ



รูปที่ 2.3 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดความต้านทานมีซีลด์

### 2.1.3 โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำเป็น แบบตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.4 ก) ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจួយต่ออันดับกัน หรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจួយจะใช้ตัวเก็บประจួយมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจួយอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมัน หรือแบบเซรามิก ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบอัดความดัน โดยมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม ภายในอัดก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ใช้ อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน หรือ ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF<sub>6</sub>) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์



ก) วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดตัวเก็บประจุ

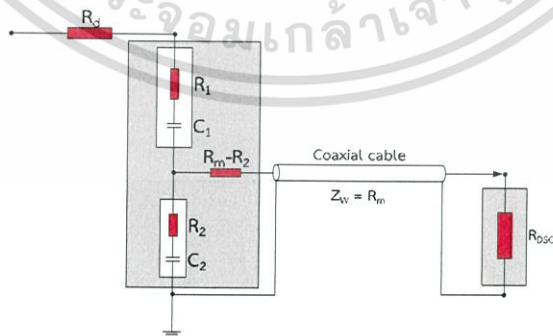
ข) ตัวอย่างโวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.4 โวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดตัวเก็บประจุ

เมื่อ  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง  $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

### 2.1.4 โวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดนี้ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ประกอบด้วย ความต้านทาน และตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.5 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวของโวลต์เตจติไวเดอ์ ถ้าเลือกใช้ความต้านทานที่เหมาะสม โวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดีแม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์ และแรงดันสูงกระแสสลับ



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของโวลต์เตจติไวเดอ์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

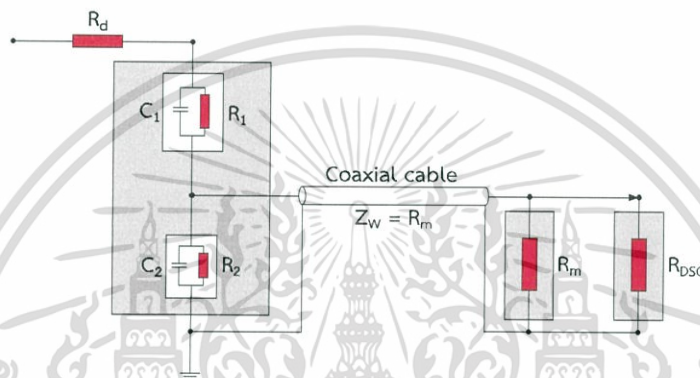
เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงสูง  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูง

$R_2$  คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงต่ำ  $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม

โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดนี้ได้ดัดแปลงมาจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจุย่อยขนานเข้าไปกับความต้านทานเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่าของความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน ส่งผลให้ค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ เท่ากันโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้เหมาะสมสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ก)



ก) วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม



ข) ตัวอย่างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม

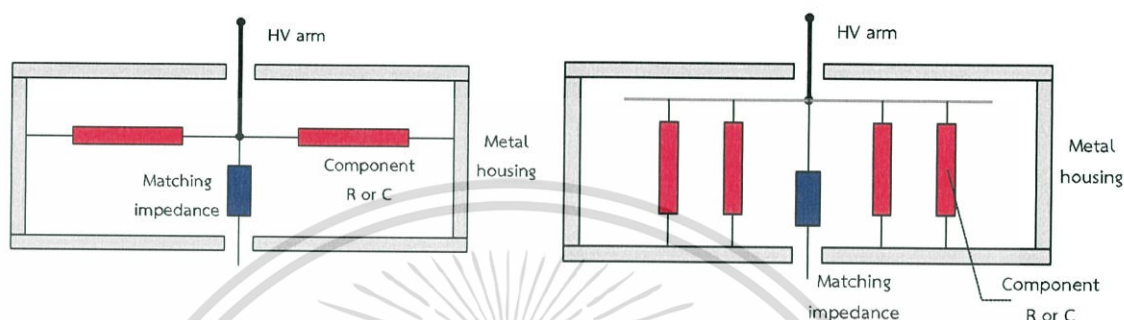
### รูปที่ 2.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม

เมื่อ  $R_1$  คือ ความต้านทานภาคแรงสูง  $C_1$  คือ ตัวเก็บประจุย่อยขนานในภาคแรงสูง

$R_2$  คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ  $C_2$  คือ ตัวเก็บประจุขนานในภาคแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโวลท์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องใช้เวลาตอบสนองที่ไว การที่มีความเหนียวแน่นในระบวัตต์โดยเฉพาะภาคแรงต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่ง การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้ความเหนียวแน่นน้อยที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ตัวอย่างการจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้มีความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนียวแน่นได้ แสดงดังรูปที่ 2.7

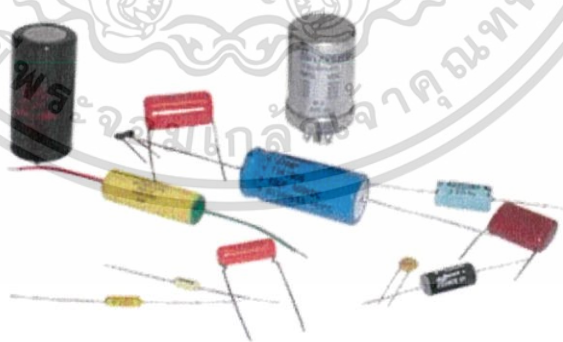


รูปที่ 2.7 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

## 2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เตจดีไวเดอร์ [5,6]

โวลท์เตจดีไวเดอร์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์จำนวน 2 ชุดต่ออนุกรมกัน ซึ่งเราจะเรียกชื่อของโวลท์เตจดีไวเดอร์แต่ละชนิด ตามลักษณะการต่ออิมพีแดนซ์ภายในโวลท์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งการสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์จำเป็นต้องทราบรายละเอียด และคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุรวมไปถึงการฉนวน เป็นต้น

### 2.2.1 ชนิดของตัวเก็บประจุ และคุณสมบัติ



รูปที่ 2.8 ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ

#### 1) ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่

เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าคงที่ได้ โดยส่วนมากจะเรียกชื่อตามชนิดของไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้กระดาษชุบซีมี้งเป็นตัวไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นตัวนำที่ยาวมาก เพื่อให้เกิดความจุตามต้องการแล้วทำการม้วนให้เป็นทรงกระบอก ตัวเก็บประจุแบบกระดาษจะมีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 - 1  $\mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ประมาณ 200 - 1600  $\text{V}_{\text{DC}}$



ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

ข) รูปร่างของตัวเก็บประจุแบบกระดาษ



ค) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุชนิดมีค่าคงที่

รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

- ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะใช้ไมก้าเป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นฉนวนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และถือเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุด ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าประมาณ 1  $\text{pF}$  - 0.1  $\mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ประมาณ 100 - 2500  $\text{V}_{\text{DC}}$



ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ข) รูปร่างตัวเก็บประจุแบบไมก้า

รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

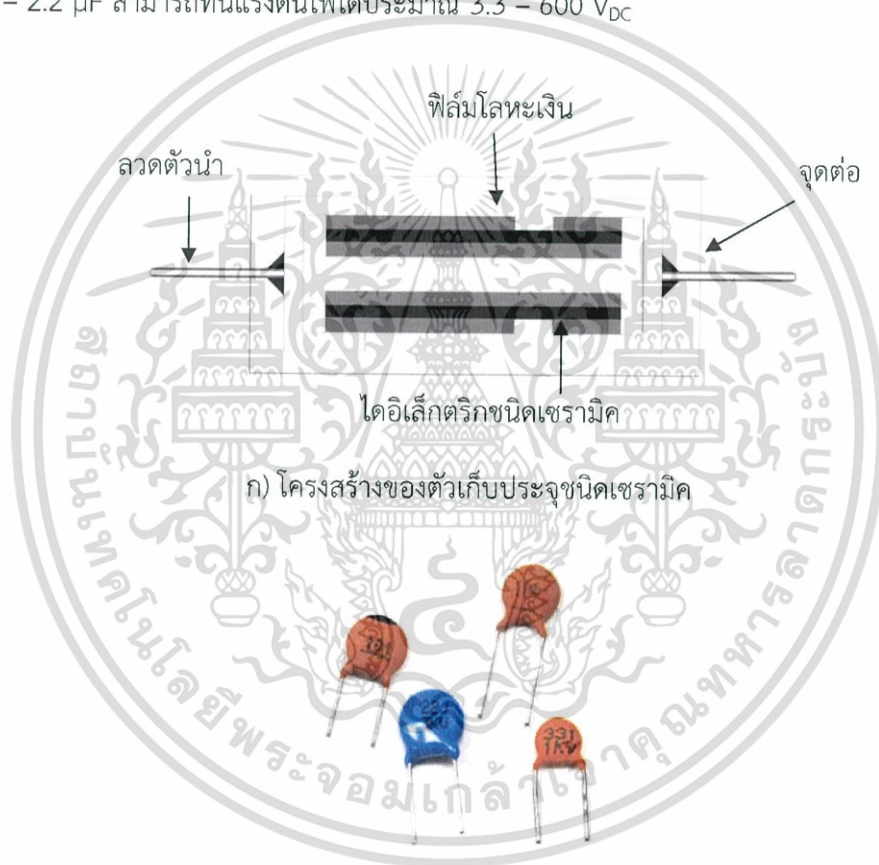
ตัวเก็บประจุชนิดไม่ก้ำยังแบ่งออกตามชนิดของแผ่นตัวนำที่มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1.) แบบโลหะพอยล์ จะใช้แผ่นฟิล์มของโลหะบางๆ ทำเป็นไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุซึ่งจะเป็นแบบที่เรียกว่าไมก้าก่อน

2.) แบบซิลเวอร์ไมก้า ประกอบด้วยแผ่นไดอิเล็กทริก ซึ่งทำมาจากโลหะเงินบริสุทธิ์ฉาบลงบนแผ่นไมก้า เพื่อจะทำให้คุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบนี้ดีขึ้น

- 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  $500 \text{ pF}$  มีทั้งชนิดที่สัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิเป็นศูนย์ และเป็นลบ มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมเมื่อใช้ในย่านความถี่วิทยุ และวงจรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงที่ต้องการค่าเก็บประจุน้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Medium Dielectric มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิสูง คุณสมบัติดีกว่าแบบ Low Dielectric แต่ให้ค่าเก็บประจุสูงกว่า

3) High Dielectric นำไปใช้ในวงจรทั่วไปได้ดี ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก มีค่าเก็บประจุสูง แต่มีข้อพิงระวังคือที่แรงดันพิกัดหรืออุณหภูมิสูงๆ อาจไม่สามารถใช้งานได้ถึงค่าพิกัดที่ระบุไว้

- ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมาก แต่จะใช้ไดอิเล็กทริกประเภทฟิล์มพลาสติก (Plastic film) ส่วนไดอิเล็กทริกจะเป็นอลูมิเนียมแบบแผ่น หรืออลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นฟิล์ม ลักษณะมิติของตัวเก็บประจุแบบนี้มีหลายรูปแบบ ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน การแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุแบบฟิล์มแบ่งตามชนิดสารไดอิเล็กทริกได้ดังนี้

1) ชนิดโพลีเอสเตอร์คาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKT ออกแบบมาใช้งานในย่านอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้าง แต่มีข้อจำกัดตรงที่ต้องทำงาน ณ อุณหภูมิที่ระบุไว้เท่านั้น คุณสมบัติตัวเก็บประจุจะยังคงเดิมตามพิกัดที่ระบุมีค่าความจุ  $0.001 - 100 \mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ถึง  $1500 \text{ V}_{\text{DC}}$

2) ชนิดโพลีไทรินคาปาซิเตอร์ ทางการค้าเรียกว่า MKS ออกแบบมาใช้งานกับแรงดันต่ำที่อุณหภูมिन้อยกว่า  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  โพลีไทรินมีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกที่ดีเยี่ยมแต่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่นที่พิกัดความจุไฟฟ้าเดียวกัน ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุ  $10 \mu\text{F}$  สามารถทนแรงดันไฟได้ถึง  $1000 \text{ V}_{\text{DC}}$

3) ชนิดโพลีคาร์บอนเนต ออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติที่ดี ใช้งานในย่านอุณหภูมิกว้าง

4) ชนิดโพลีโพรพิลีน ขนาดมิติของตัวเก็บประจุชนิดนี้ค่อนข้างเล็กกะทัดรัด มีค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิปานกลาง

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



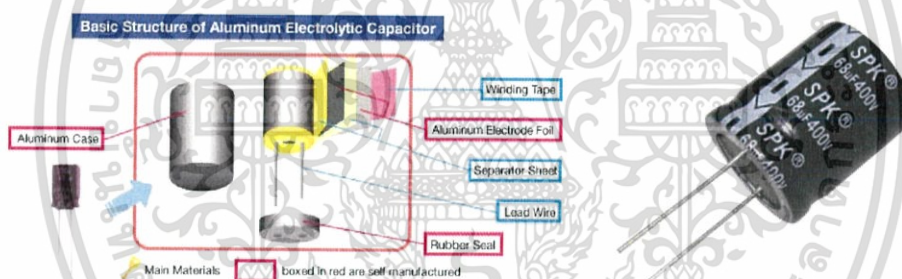
รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มนี้จะไม่ช้าในการใช้งาน และความต้านทานของฉนวนมีค่าสูง จึงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุเนื่องมาจากอุณหภูมิที่น้อยที่สุด มักนิยมใช้กับวงจรความถี่สูง วงจรตั้งเวลา วงจรอินทิเกรต แต่ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีราคาแพง

#### - ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ หรืออาจเรียกว่าอลูมิเนียมอิเล็กโทรไลต์คาปาซิเตอร์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นโลหะทำเป็นขั้วบวก จุ่มอยู่ตรงกลางของน้ำยาเคมี หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อะโรมาติกพวก Ethylene, Glycol, Glycerine, Boric Acid, Liquid Ammonia และอื่นๆ ที่อยู่ในสภาพของเหลวชั้นที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกโลหะ เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ โดยป้อนไฟบวกเข้าที่แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นขั้วบวก และไฟลบเข้าที่ขั้วลบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปรากฏว่ามีการแยกตัวทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้ขั้วบวกเกิดอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจะเป็นสารไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นรอบๆ แผ่นบวกนี้โดยมันจะเป็นไดอิเล็กตริกที่บางที่สุดที่กั้นระหว่างแผ่นตัวนำบวก และลบสามารถทำให้ตัวเก็บประจุสะสมประจุได้



รูปที่ 2.13 โครงสร้าง และรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

นอกจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวชั้นที่นำมาทำตัวเก็บประจุแบบนี้ หรือที่เรียกว่า ชนิดอิเล็กโทรไลต์เปียก เรายังสามารถใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นมากคล้ายแป้งเปียกมาทำตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์แบบแห้งได้ ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์แห้งจะมีค่าความจุตั้งแต่  $1 \mu\text{F}$  ขึ้นไปจนถึง  $0.1 \text{ F}$  แรงดันใช้งานสูงถึง  $500 \text{ V}$  ข้อดีของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $-20$  ถึง  $+100 \%$  และมีกระแสรั่วไหลสูง มักนิยมใช้กับงานที่ความถี่ต่ำ เช่น วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

#### - ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้สารแทนทาลัมทำเป็นขั้วบวกแทนอลูมิเนียม ส่วนสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ใช้ในการทำเป็นไดอิเล็กตริกนั้น จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบโซลิดอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งใช้  $\text{MnO}_2$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแบบซัลฟริกแอซิด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ชนิดโพสิทีฟแล้วปรากฏว่ามีคุณสมบัติการรั่วไหลของกระแส คุณสมบัติทางความถี่ และคุณสมบัติทางอุณหภูมิดีกว่าจึงนิยมใช้กับวงจรกำจัดสัญญาณรบกวน และวงจรฟิลเตอร์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 - 1000  $\mu\text{F}$  และสามารถทนแรงดันได้ประมาณ 6 - 120  $\text{V}_{\text{DC}}$  แต่ค่าความจุที่มีขายตามท้องตลาดจะมีค่า 0.1 - 100  $\mu\text{F}$

รูปที่ 2.14 โครงสร้าง และรูปร่างของตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

### 2) ตัวเก็บประจุชนิดเปลี่ยนค่าได้

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 ชุด หรือที่เรียกว่าแก๊งค์ คือ ชุดแผ่นโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้เรียกว่าโรเตอร์ และแผ่นโลหะที่ยึดติดอยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ โดยทั่วไปแล้ว สเตเตอร์จะมีจำนวนแผ่นมากกว่าโรเตอร์อยู่ 1 แผ่น ฉนวนที่ใช้กันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองจะใช้อากาศเป็นอเล็กทริก ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อเราหมุนแกนโรเตอร์ โดยถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองวางขนานกันมากที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าสูง และถ้าหมุนให้แผ่นโลหะทั้งสองวางซ้อนกันน้อยที่สุดค่าความจุของตัวเก็บประจุก็จะน้อยตามไปด้วย ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความจุประมาณ 10 - 400  $\text{pF}$



รูปที่ 2.15 รูปร่าง และสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุชนิดเปลี่ยนค่าได้

### 3) การตรวจวัดตัวเก็บประจุ

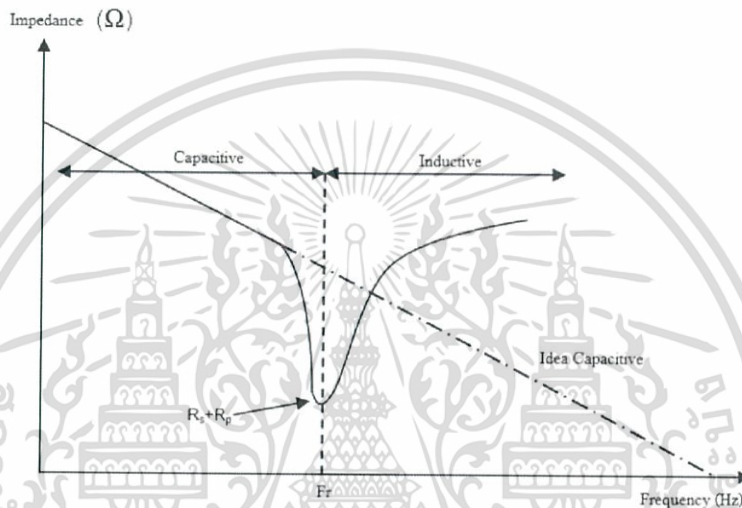
การวัดตัวเก็บประจุโดยใช้มัลติมิเตอร์โดยจะต้องตั้งให้มิเตอร์อยู่ในย่านการวัดของโอห์มมิเตอร์แล้วเลือกใช้สเกลตามค่าความจุของตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ R คือ ย่านการวัดของโอห์มมิเตอร์

#### 4) คุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุ [7]



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 2.16 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวเก็บประจุที่ใช้งานจริงกับตัวเก็บประจุในอุดมคติ จะพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นค่าความเหนี่ยวนำที่หาของตัวเก็บประจุจะมีผลมากขึ้นจนในที่สุดที่ความถี่  $F_r$  ค่าความเหนี่ยวนำจะทำให้ตัวเก็บประจุเกิดเป็นวงจรเรโซแนนซ์ขนานขึ้นมากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะเป็นค่าความต้านทานรวมระหว่างค่าความต้านทาน  $R_s$  และ  $R_p$  เท่านั้น และเมื่อความถี่สูงกว่า  $F_r$  ตัวเก็บประจุจะมีคุณสมบัติเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ

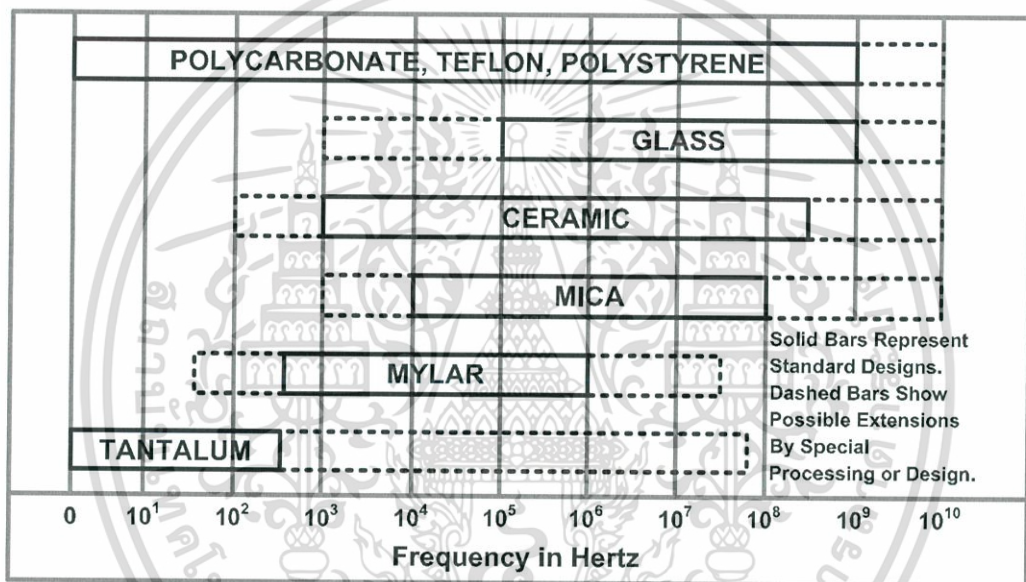
โดยทั่วไปตัวเก็บประจุค่าสูงจะมีค่าความเหนี่ยวนำภายในมากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าความเก็บประจุต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากต้องใช้แผ่นตัวนำที่มีพื้นที่มากกว่า เช่น ตัวเก็บประจุขนาด 0.1  $\mu\text{F}$  จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์แผ่มากกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่า 300 pF (ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุชนิดเดียวกัน) อนึ่งตัวเก็บประจุ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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $X_c$  แทนค่ารีแอกแตนซ์ : โอห์ม ( $\Omega$ )  
 $\omega$  แทนค่าความถี่เชิงมุม : เรเดียนต่อวินาที (rad/s)  
 C แทนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ : ฟารัด (F)

สำหรับวงจรความถี่สูงนั้นมักจะใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุเพียงที่มีค่าความเก็บประจุอยู่ในช่วงพิโคฟารัด และไม่ใช่ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูงเนื่องจากต้องการให้ค่ารีแอกแตนซ์มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการออกแบบหรือการเลือกใช้อุปกรณ์ สำหรับใช้งานในย่าน VHF หรือสูงกว่านั้นควรใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) ในการตรวจสอบเนื่องจาก จะให้ค่าที่ถูกต้อง และเชื่อถือได้มากที่สุด



รูปที่ 2.17 ความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ ในแต่ละย่านความถี่

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุที่ใช้ได้ดีในช่วงความถี่ที่มากกว่า 100 MHz มีอยู่ 5 แบบด้วยกัน คือ ไมก้า เซรามิก โพลีสไตรีน โพลีโพลีเอทิลีน และโพลีคาร์บอนเนต ซึ่งตัวเก็บประจุทั้ง 5 ชนิดนี้ นิยมใช้เซรามิกกันมาก เพราะราคาถูก และมีเสถียรภาพที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพอประมาณ คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $k$ ) ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกยิ่งมากเท่าไรก็จะทำให้คุณสมบัติทางอุณหภูมิของตัวเก็บประจุแย่งเท่านั้น โดยตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ จะมีคุณสมบัติเชิงเส้นดีกว่าตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกปานกลาง และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งตัวเก็บประจุที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 ชนิดของตัวต้านทาน และคุณสมบัติ [5,6]

ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีรูปร่างแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน และตัวต้านทานสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. ตัวต้านทานแบบดั้งเดิม
2. ตัวต้านทานแบบฟิล์มทั้งหนาและบาง

ตัวต้านทานแบบดั้งเดิมโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกัน โดยที่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน

#### - คาร์บอนรีซิสเตอร์ (Carbon-Composition Resistors)

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

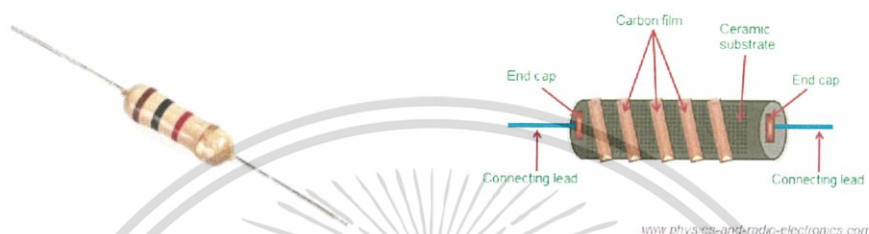


รูปที่ 2.18 คาร์บอนรีซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน (Carbon-Film Resistor)

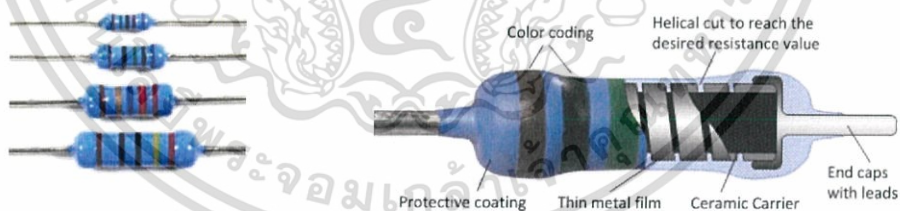
มีค่าความต้านทานสูงมาก พิกัด 10 - 100 M $\Omega$  มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ ค่าความคาดเคลื่อน 0.5 % ขึ้นไป ที่พิกัดน้อยกว่า 100 k $\Omega$  มีการสร้างสัญญาณรบกวนน้อยแต่มีราคาสูง ความต้านทานชนิดนี้ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องสูงบางครั้งจะต้องมีการคิดผลการชดเชยอุณหภูมิด้วย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



รูปที่ 2.19 ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

- ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ (Metal-Film Resistor)

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



รูปที่ 2.20 ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ

- ไวร้วาวด์รีซิสเตอร์ (Wirewound Resistors)

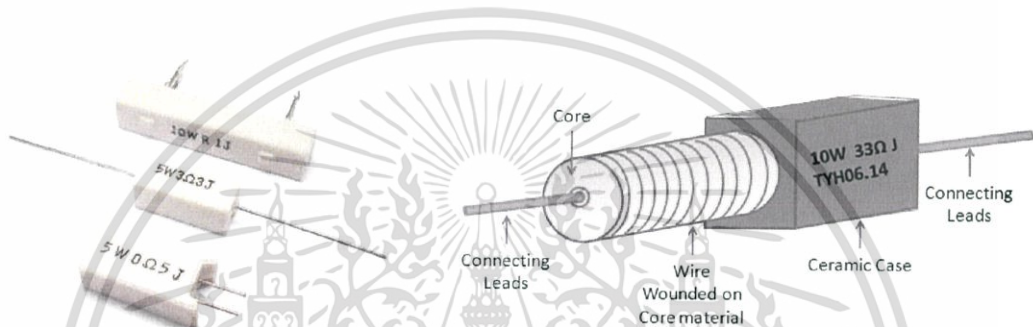
ไวร้วาวด์รีซิสเตอร์ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ แบบมีกำลังสูง แบบความถูกต้องสูง และแบบใช้งานทั่วไป ปกติแล้วตัวต้านทานแบบไวร้วาวด์ จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงแต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวต้านทานแบบไวร้วาวด์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ คือ แบบไบฟิลลา (Bifilar wound Resistor) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวต้านทานไวร้วาวด์แบบไร้ความเหนี่ยวนำ (non-inductive wirewound resistor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

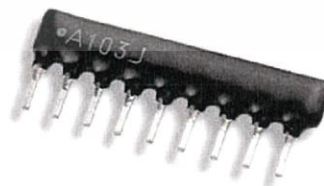
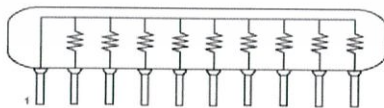
3) แบบทั่วไป ช่วง  $\frac{1}{4}$   $\Omega$  - 10 k $\Omega$  พิกัดกำลัง 0.5, 1 และ 3 W เป็นความต้านทานแบบเดียวกับความต้านทานแบบคาร์บอน ค่าเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.21 ไวร้วาวด์รีซิสเตอร์

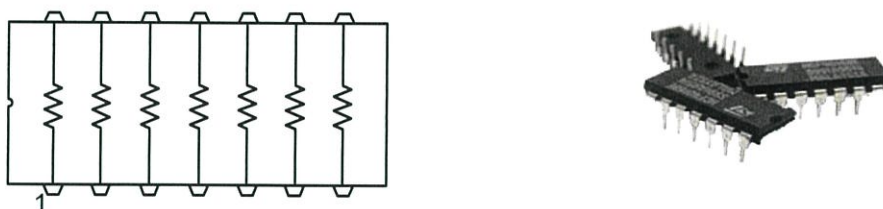
- ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP) และตัวถังแบบเดี่ยว (SIP)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะ พิกัดประมาณ 10  $\Omega$  - 30 M $\Omega$  พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงถึง 10 W ค่าความคลาดเคลื่อน 0.1 - 2 % เหมาะสำหรับงานซึ่งต้องการเสถียรภาพ และความเที่ยงตรงสูงกว่าแบบคาร์บอน สามารถใช้กับงานในวงจรกระแสสลับได้ดี คือ จะมีย่านความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูง เป็นเมกกะเฮิรตซ์ได้ และจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.22 ตัวต้านทานชนิดตัวถัง แบบเดี่ยว (SIP)

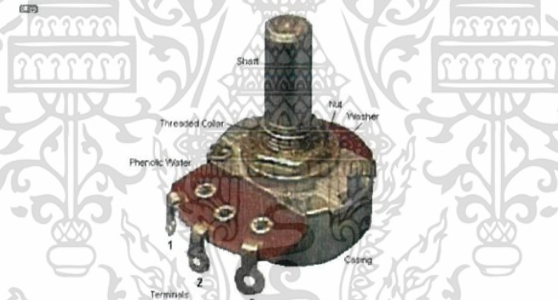
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบ (DIP)

- ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistors)

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

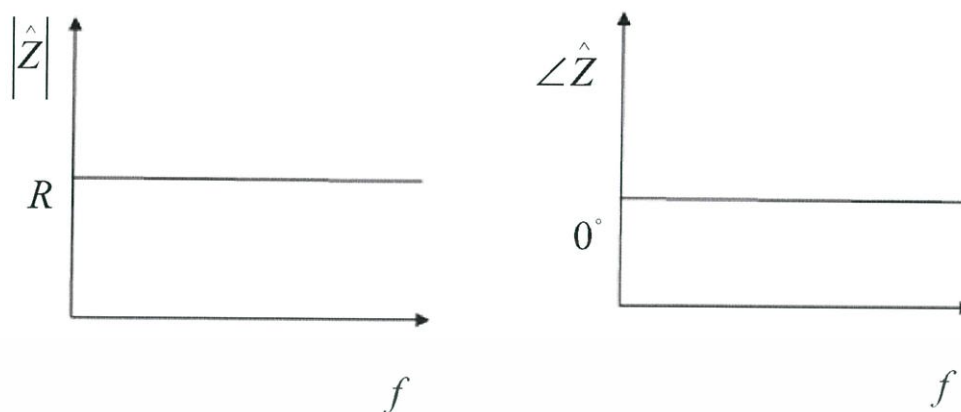


รูปที่ 2.24 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้

- คุณสมบัติของตัวต้านทานเชิงอุดมคติและเชิงความถี่

ในทางอุดมคติ ขนาดของค่าความต้านทานมีค่าคงที่ตลอดย่านความถี่ ในทำนองเดียวกันมุมอิมพีแดนซ์ก็มีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกๆ ความถี่ดังรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 คุณสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติ

### 2.3 การฉนวน [4,7,8]

การฉนวน หมายถึง การใช้วัสดุเป็นฉนวนมาคั่นระหว่างตัวนำที่มีแรงดันต่างกัน หรือระหว่างตัวนำที่มีแรงดันกับดิน และยังทำหน้าที่รับแรงทางกล ช่วยระบายความร้อน การฉนวนมีบทบาทสำคัญต่อเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบ

#### - คุณสมบัติของฉนวน

วัสดุฉนวนที่ดีจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

#### 1) คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

- มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อให้ขนาดเล็กลง ใช้วัสดุเนื้อย่น ประหยัด
- มีความต้านทานคงที่ทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือ

การเสื่อมสภาพฉนวน

#### 2) คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูง เนื่องจากในทางปฏิบัติ

วัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง

3) คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อน และช่วยระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

4) มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

5) ทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมัน ไม่ดูดซึมความชื้น และทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประเภทของวัสดุฉนวน

การฉนวนที่ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงแบ่งตามสถานะได้เป็น 3 ประเภท คือ

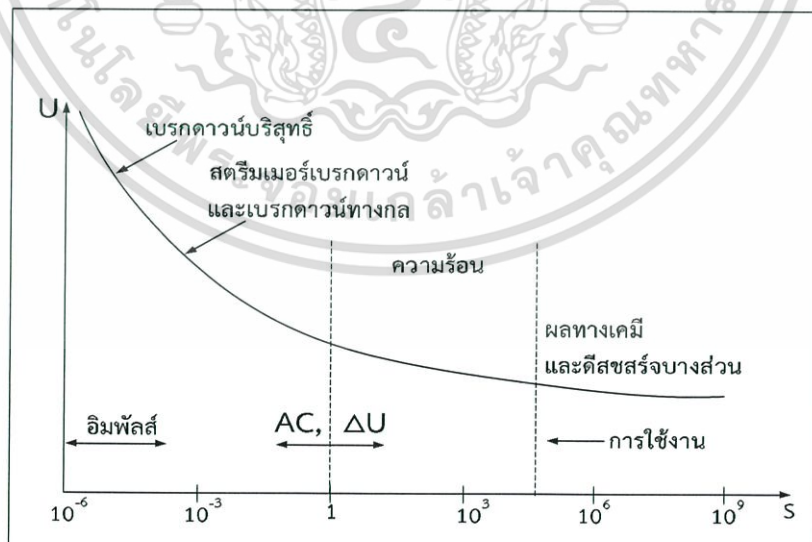
1. ฉนวนแข็ง
2. ฉนวนเหลว
3. ฉนวนก๊าซ

#### 1. ฉนวนแข็ง

ในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จะต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบร่วมกับฉนวนเหลว หรือก๊าซ เพื่อทำหน้าที่ยึด และรองรับแรงทางกล ฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวน หรือเจาะทะลุ จะเสียสภาพ โดยสมบูรณ์ การระบายความร้อนได้น้อยกว่าฉนวนเหลว ถ้ามีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อฉนวนจะเป็นต้นเหตุ ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด ฉนวนแข็งที่ใช้ทั่วไปได้แก่ กระจก, กระจกอัด, ยาง, ไม้ก้ำ, แก้ว, เซรามิกพอร์เลนพลาสติก, เมกกะไลท์คาสท์เรซิน, โฟเบอร์, ไยแก้ว, พีวีซี (PVC), พีอี (PE) และครอสลิงค์ (XLPE)

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็ง

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength)
2. เพอร์มิตติวิตี
3. แפקเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงทางกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี ความร้อน



รูปที่ 2.26 กลไกการเบรกดาวนของฉนวนแข็ง โดยความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_0$  แปรไปตามช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวจะมีน้ำหนัก และความหนาแน่นมากกว่าก๊าซ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซที่ความดันบรรยากาศเดียวกันวัดความดันไม่ได้ นิยมใช้เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และช่วยระบายความร้อนได้ดี เมื่อเกิดการเบรกดาวน์ผ่านจะทำให้เสียสภาพความเป็นฉนวนชั่วคราว เมื่อเวลาผ่านไปก็สามารถกลับสู่สภาพการฉนวนได้ แต่คุณภาพอาจต่ำลง มีความไวต่อสิ่งเจือปน ตัวอย่างฉนวนเหลวที่ใช้กันก็คือ น้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว

1. ความถ่วงจำเพาะ
2. จุดติดไฟที่สูง คือมีโอกาสที่จะเกิดเพลิงไหม้น้อย
3. ความหนืดต่ำ หมายถึง ระบายความร้อนได้ดี
4. แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่านั้นมีค่าต่ำ

## 3. ฉนวนก๊าซ

ฉนวนก๊าซ เป็นสารที่ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และระบายความร้อน คุณสมบัติของก๊าซในแง่ของฉนวนก็คือ สามารถกลับคืนสู่สภาพความเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็วหลังจากเกิดเบรกดาวน์ หรือเสียสภาพการฉนวนชั่วคราว ตัวอย่างก๊าซที่ใช้กันมากในการเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ อากาศ ใช้เป็นฉนวนภายนอกของอุปกรณ์ ก๊าซไนโตรเจนในอุปกรณ์ไฟฟ้า และก๊าซ SF<sub>6</sub> ใช้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบ GIS

### 4. เปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวกับก๊าซ

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะของฉนวนแข็ง, ฉนวนเหลว และฉนวนก๊าซในสนามไฟฟ้าจะเห็นว่ามีความแตกต่างกัน คือ

1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ฉะนั้นการระบายความร้อนจึงอาจช่วยให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นได้ ส่วนกรณีของก๊าซนั้นอาจทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่น ก็คือ การเพิ่มความดันก๊าซ

2) ฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวจะมีลักษณะสมบัติต่างกับของก๊าซอย่างเด่นชัด ประการหนึ่งคือ อายุการใช้งาน (Ageing) ซึ่งหมายถึง ว่าเมื่อใช้งานไปนานๆ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลง

3) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว เมื่อได้รับแรงดันกระแสตรงจะมีค่าสูงกว่าเมื่อรับแรงดันกระแสสลับ แม้จะคิดเทียบที่ค่ายอดก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

4) ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของฉนวนแข็งและฉนวนเหลวคิดเป็นค่าอาร์เอ็มเอส แต่ในกรณีของก๊าซจะเกิดเบรกดาวน์ที่ค่ายอดเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

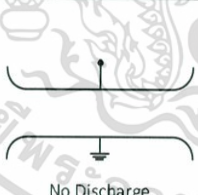

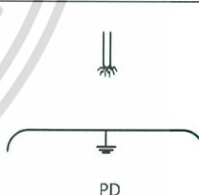
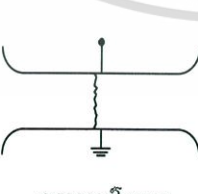
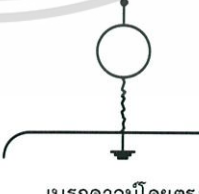

5) ชีตความสามารถการใช้เป็นฉนวนของฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว กำหนดด้วยพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ และอุณหภูมิ อายุการใช้งานของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ซึ่งเป็นผลทำให้พลังงานสูญเสีย, อุณหภูมิสูงขึ้น และเป็นผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำลง อายุการใช้งานก็จะสั้นลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้

#### 5. การเสียสภาพการฉนวน [7]

ภาระหน้าที่หลักของการฉนวนก็คือ เป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่บางกรณีก็ทำหน้าที่รับแรงทางกล และทนต่อความร้อนด้วย การเสียสภาพของการฉนวน หมายถึง ฉนวนนั้นได้รับการเปลี่ยนจากสภาพการเป็นฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ไม่สามารถรับแรงดันได้ต่อไป ซึ่งการเสียสภาพอาจเกิดจากการทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าไม่ได้ การเสียสภาพเนื่องจากแรงทางกล หรือความร้อน กระบวนการที่ทำให้เสียสภาพการฉนวนนั้นเกิดขึ้นได้หลายประเภท เช่น

1. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากผลทางไฟฟ้า
2. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากแรงทางกล
3. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากความร้อน
4. การเสียสภาพการฉนวนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี และสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการดิสชาร์จเบรกดาวน์ในแก๊ป

ลักษณะในแก๊ป	สนามไฟฟ้า สม่ำเสมอ	สนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอเล็กน้อย	สนามไฟฟ้า ไม่สม่ำเสมอสูง
ลักษณะดิสชาร์จที่ $U_i$	 No Discharge	 No Discharge	 PD
ลักษณะเบรกดาวน์ สมบูรณ์ $U_b$	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์โดยตรง	 เบรกดาวน์แบบโคโรนา
ค่าแรงดัน เบรกดาวน์ $U_b$ หรือ โคโรนาเริ่มเกิด $U_i$	$U_b = E_b \times d$	$U_b = E_b \times d \times \eta'$	$U_b = E_b \times d \times \eta'$ ; $U_b > U_i$

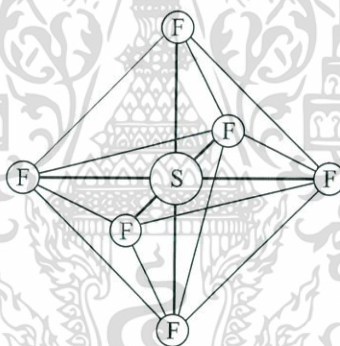
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- SF<sub>6</sub> : (Sulphur Hexafluoride) [8]

SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนประเภทฉนวนก๊าซ ปัจจุบันก๊าซ SF<sub>6</sub> ได้รับความสนใจ และมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีแห่งการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพราะ SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าดีเป็นเลิศ ทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวนด้วยก๊าซอัดชนิดอื่นๆ มีเสถียรภาพ คงต่อความร้อน และปฏิกิริยาเคมีการเลือกใช้ก๊าซเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับแพคเกจจิ้งต่างๆ หลายประการที่สำคัญ คือต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงที่ความดันไม่สูงนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และถ่ายเทความร้อนได้ดี ลักษณะคุณสมบัติดังกล่าว จะเห็นว่า SF<sub>6</sub> มีคุณสมบัติครบถ้วน

1. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของก๊าซ SF<sub>6</sub>

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



รูปที่ 2.27 โมเลกุลของ SF<sub>6</sub>

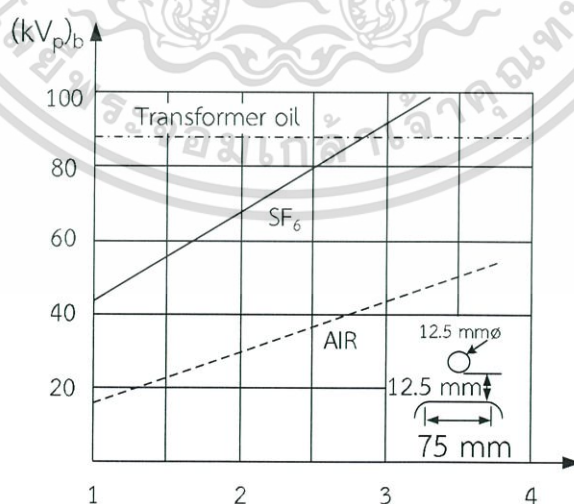
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF<sub>6</sub>

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



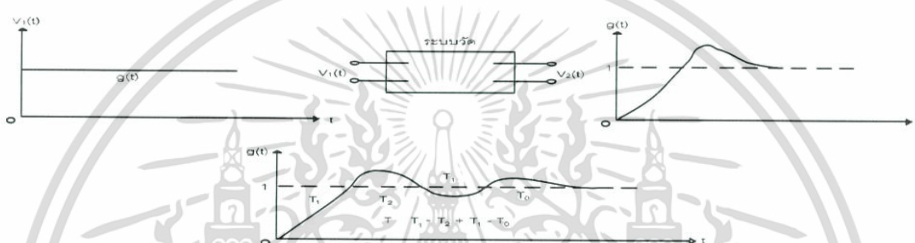
รูปที่ 2.28 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF<sub>6</sub> เมื่อเทียบกับอากาศ และน้ำมันหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

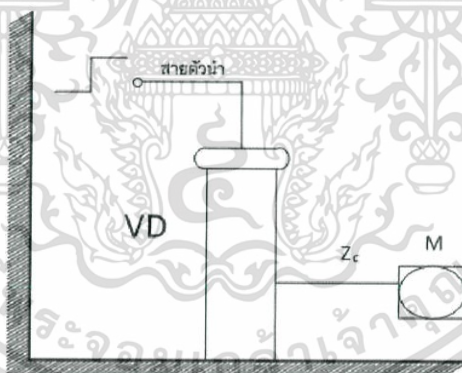
## 2.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

ลักษณะสมบัติของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์สามารถกำหนดได้ด้วยเวลาตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิธของระบบวัด ระบบวัดที่ดีต้องมีแบนด์วิธที่กว้างกว่าแบนด์วิธของลูกคลื่นที่ต้องการวัดเพื่อที่จะสามารถถ่ายโอนสัญญาณอย่างไม่ผิดเพี้ยน ทั้งขนาด และลักษณะของรูปคลื่นแรงดัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัดมีสองประการคือ ผลตอบสนองรูปขั้น (Step response) และสัดส่วนแรงดัน (Scale factor) เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติถ่ายโอนโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งขึ้นกับความถี่ได้ดีขึ้นจึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความ หรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการ

- ผลตอบสนองรูปขั้น (Step response)



รูปที่ 2.29 ผลตอบสนองรูปขั้น  $g(t)$  และเวลาตอบสนอง



รูปที่ 2.30 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับวัดแรงดัน

มาตรฐานได้กำหนดนิยามพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นไว้ดังนี้

- พารามิเตอร์ตอบสนอง (Parameter response) หมายถึง พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นโดยวิธีที่กำหนด
- จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น (The beginning image point of a step response)  $O_1$  หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นของผลตอบสนองรูปขึ้นในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่ง และใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

- ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มอลไลซ์ (Normalized step response)  $G(t)$  หมายถึงผลตอบสนองรูปขึ้นที่นอร์มอลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็น 1 หน่วย

- อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขึ้น (Integral to the step response)  $T(t)$  หมายถึง อินทิกรัล

จาก  $O_1-t$  ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขึ้น  $G(t)$  เท่ากับ  $T(t) = \int_0^t (1-G(t))dt$

- เวลาตอบสนองจากการทดลอง (Response time of the experiment)  $T_N$  หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขึ้นที่  $t_{max}$  จากสมการ  $T_N = T(t_{max})$

- เวลาตอบสนองบางส่วน (A partial response)  $T_\alpha$  หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขึ้น

- เวลาตอบสนองที่เหลือ  $T_r(t)$  (Residual response time) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขึ้นที่เวลาที่กำหนด  $t$  โดยที่  $t_i < t_{max}$ ,  $T_r(t_i) = T_N - T(t_i)$

- ส่วนพุ่งเกิน  $\beta$  (Overshoot) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มอลไลซ์  $G(t)$  ที่เกิน 1 หน่วย

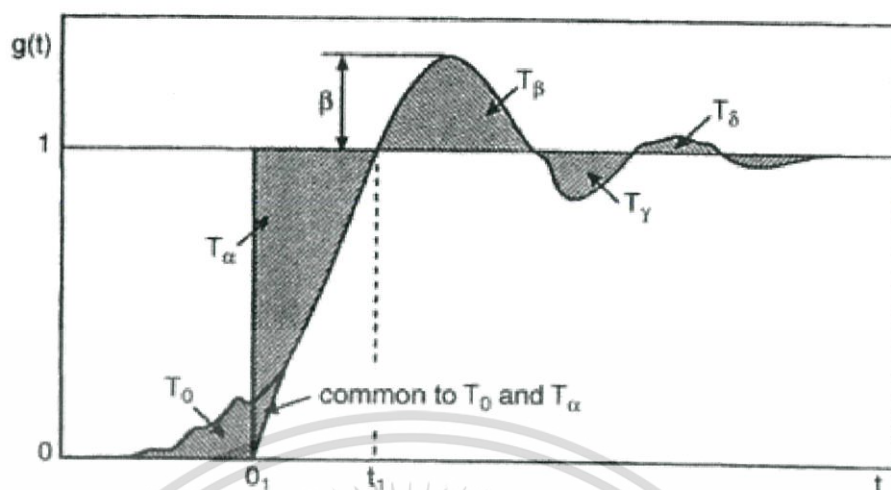
- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (Start time distortion)  $T_0$  หมายถึง พื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้น 0 ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มอลไลซ์  $G(t)$  และเส้นตรงที่ใช้หา  $O_1$

- เวลาเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว (Time to steady state)  $T_s$  หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองที่เหลือ  $T_r(t)$  มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ  $t$ ,  $|T_N - T(t)| < 0.02t_s$  สำหรับทุกๆ ค่าของ  $t$  ในช่วงจาก  $t_s - t_{max}$

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้กำหนดค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ดังนี้

กรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม และรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นของรูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่น  $T_x$  พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไข  $\beta - T_\alpha / T_x$  จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาดังรูปที่

2.32



รูปที่ 2.31 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha / T_x$

โดยที่  $T_x$  คือเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัด

กรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นที่เวลาคลื่นตัด  $T_0$  พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

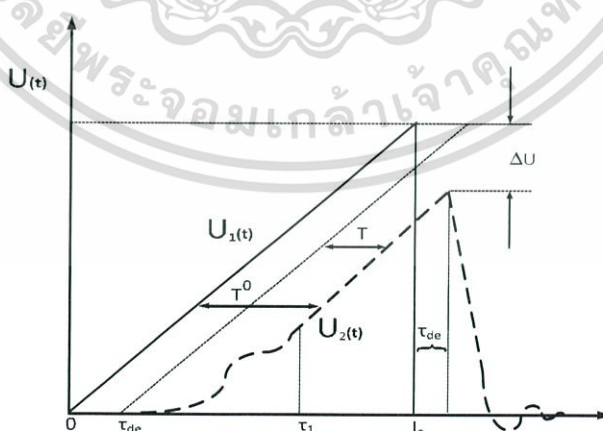
ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขที่กำหนดของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของกรณีวัตแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

พารามิเตอร์ผลตอบสนอง	เงื่อนไขที่กำหนด
เวลาตอบสนองจากการทดลอง	$T_\alpha - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$
เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว	$t_\alpha \leq T_c$
เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น	$T_0 \leq 0.005T_c$

จากนิยามของ  $g(t)$  และ  $T$  ผลก็คือดังรูป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแรงดันในเชิงเส้น  $U_1(t)$  นั้น ผลตอบสนอง  $U_2(t)$  จะมีรูปคลื่นในลักษณะเดียวกับ  $U_1(t)$  เพียงแต่มีเวลาช้าไปเท่ากับเวลาตอบสนอง  $T$  ดังนั้นค่าแอมพลิจูดของแรงดันอิมพัลส์จึงต้องมีการแก้ความผิดพลาดด้วย  $T$  ในกรณีในช่วงแรงดันเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น และเกิดคลื่นตัดขึ้นในช่วงหน้าคลื่นแรงดันด้านออก  $U_2(t)$  จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันด้านเข้า  $U_1(t)$  คือ  $\Delta U = U_1(t) - U_2(t)$  ความคลาดเคลื่อนของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดค่ายอดของคลื่นตัดอาจคำนวณจาก  $\Delta U = \frac{T}{T_c} U = ST$  ความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์ของขนาดแรงดันที่วัดจะหาได้จากช่วงคลื่นตัด  $T_c$  และเวลาตอบสนองของระบบวัด  $T_c$  คือ

$$\epsilon = \frac{\Delta U}{U} = \frac{T}{T_c} = \frac{S}{U} T \tag{2.2}$$

เมื่อ  $S$  คือ ความชัน (Steepness) ของแรงดันในช่วงที่เพิ่มขึ้น สมการความคลาดเคลื่อนใช้ได้เฉพาะกรณีที่แรงดันช่วงหน้าคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ค่าแอมพลิจูดที่คลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สเกลแฟกเตอร์ [2,8]

มาตรฐาน IEC 60060-2 ได้นิยามความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดได้ว่า “สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า”

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความไม่แน่นอน (uncertainty) และความมีเสถียรภาพ (stability)

#### ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดลักษณะสมบัติของสเกลแฟกเตอร์

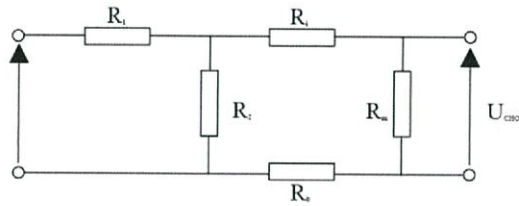
คุณสมบัติ	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น
ความไม่แน่นอนในการวัดค่า ยอด (uncertainty)	± 3%	± 5%
การเปลี่ยนแปลงตลอดช่วง แรงดันใช้งานคือความมี เสถียรภาพ (stability)	± 1%	± 3%

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจติไวเดอร์สามารถหาได้จากวิธีหนึ่งต่อไปนี้

- การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน
- ใช้วงบริดจ์
- คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

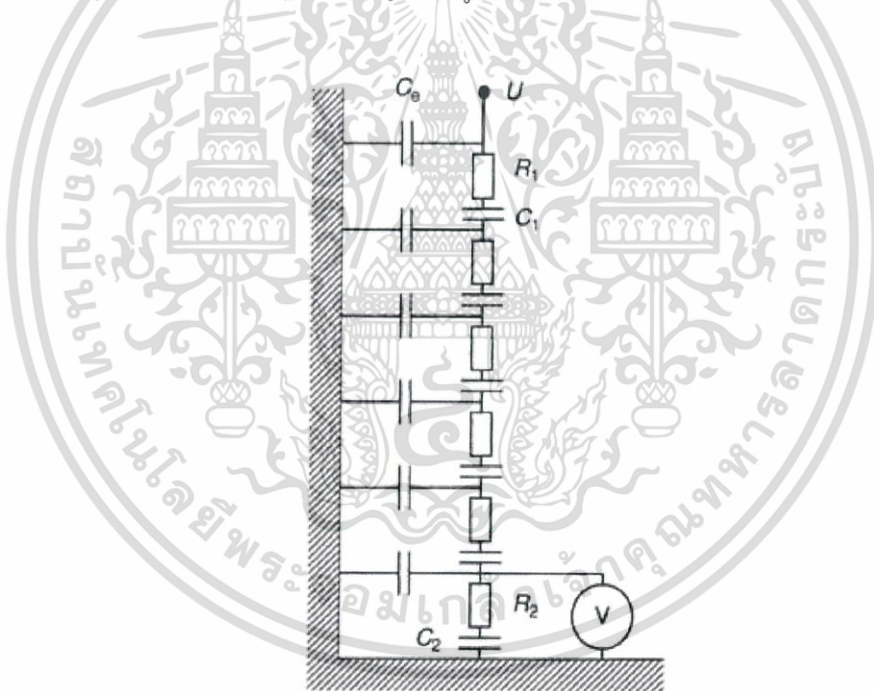
การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจติไวเดอร์ โดยการใช้วิธีคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ มาตรฐาน IEC 60060-2 ได้ให้ข้อแนะนำไว้ดังนี้ [2]

ในกรณีของโวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทานค่าความต้านทานของภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำสามารถวัดได้โดยใช้แรงดันต่ำกระแสดตรงซึ่งอาจเป็น Wheatstone bridge หรือโอห์มมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลที่มีความยาวมาก ค่าความต้านทานกระแสดตรงของตัวนำ (ตัวนำในและชีลด์) จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่าง  $R_2$  กับ  $R_m$  ลดลงดังแสดงในรูป ดังนั้น ค่าความต้านทานของเคเบิลวัดควรนำมาพิจารณาด้วย



รูปที่ 2.34 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัตต์ที่ต่อสเกลแพกเตอร์  
ของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน

ในกรณีของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินจะมีผลต่อสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจติไวเตอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจติไวเตอร์ คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ ภาพแสดงตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งประกอบด้วยค่าเก็บประจุน้อย  $C'$  ต่ออันดับกัน และมีค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน  $C''_n$  และ  $C''_o$  ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.35 ภาพสเกตซ์ของค่าเก็บประจุสมมูล  $C_{eq}$  ของโวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและประกอบสร้าง

##### 3.1 คุณสมบัติของโวลต์เตจติไวเตอร์

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่ต้องการปรับปรุง เป็นโวลต์เตจติไวเตอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] กำหนดไว้

ค่าแรงดันพิกัดของโวลต์เตจติไวเตอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเหตุผลที่ออกแบบโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง เพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้น และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเท่ากัน ซึ่งเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลต์เตจติไวเตอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง

ชนิดของแรงดันที่ต้องการวัด	พิกัดสูงสุดที่ต้องการออกแบบ
แรงดันสูงกระแสสลับ	300 KV <sub>rms</sub>
แรงดันสูงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน	1000 KV <sub>p</sub>

โดยโวลต์เตจติไวเตอร์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ องค์ประกอบภาคแรงสูง และองค์ประกอบภาคแรงต่ำ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดผ่านภาคแรงสูง ซึ่งในส่วนนี้จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าน้อยลง เพื่อส่งผ่านแรงดันที่ได้ไปยังภาคแรงต่ำ ในส่วนของภาคแรงต่ำนี้จะมีการลดระดับแรงดันที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้ได้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่จะนำไปต่อใช้งานร่วมกับโวลต์เตจติไวเตอร์ในการวัดค่าแรงดันด้านออกของโวลต์เตจติไวเตอร์ เช่น ออสซิลโลสโคป หรือ โวลท์มิเตอร์ เป็นต้น

##### 3.2 การออกแบบโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงนั้น ถ้าการฉนวนมีเพียงอากาศจะทำให้การฉนวนเสียหายที่แรงดันไม่กี่สิบลิโลโวลต์ เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อวัสดุความต้านทานและที่ผิวของตัวต้านทาน เนื่องจากความหนาแน่นของกระแส  $J = \sigma E$  ซึ่งเสริมกับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันสูงกับดิน ฉะนั้นจึงต้องใช้การฉนวนที่มีค่าฉนวนสูง

โดยในการออกแบบโวลต์เตจติไวเตอร์ที่สร้างขึ้นได้ใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 2 บาร์ บรรจุในท่อฉนวน PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) 0.317 เมตร ความยาวท่อ (l) 3.37 เมตร และมีความสูงจากพื้น (h) 0.464 เมตร

### 3.2.1 การออกแบบภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นเป็นตัวเก็บประจួយ่อยต่ออนุกรมกัน ให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันที่ต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมีความพอที่ทำให้ค่าเก็บประจุไฟฟ้าที่ร่วงลงดินมีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลต์เตจดีไวเซอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลต์เตจดีไวเซอร์ควรเป็นเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจួយ่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆ กันมีฉะนั้น อาจทำให้เกิดเบรกดาวนหรือวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจួយ่อยได้ และในขณะเดียวกัน ค่าตัวเก็บประจุต้องไม่มากจนทำให้โวลต์เตจดีไวเซอร์กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งเป็นลักษณะคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีทั้งขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง ค่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติควรมีค่ามากกว่า 50 พิโคฟารัดต่อความสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์ 1 เมตร แต่ไม่ควรเกิน 1000 พิโคฟารัด [9]

-ค่าวาบไฟตามผิวฉนวน [4]

ความยาวท่อฉนวน PVC กำหนดด้วยระยะวาบไฟตามผิวฉนวน ความยาวตามผิวฉนวนที่ใช้ในอาคาร ถ้าผิวเรียบ คือ ไม่มีครีบ ใช้ความยาวจำเพาะดังนี้

- 1.) ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันกระแสสลับ 5 เมตรต่อเมกะโวลต์
- 2.) ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ 2.5 เมตรต่อเมกะโวลต์

โวลต์เตจดีไวเซอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันอิมพัลส์ พิกัดเท่ากับ 1000 กิโลโวลต์ ดังนั้นระยะวาบไฟตามผิวควรมีค่าน้อยเท่ากับ 2.5 เมตร ซึ่งในกรณีนี้ออกแบบความยาวท่อที่ความยาว 3.37 เมตร เนื่องจากในที่นี้ระยะความยาวท่อ ( $l$ ) จะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.1 ท่อฉนวนพีวีซีวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -ความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน

ความจุไฟฟ้ารั่วลงดินเป็นลักษณะคุณสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เพราะ ค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงดันสูงเป็นตัวเก็บประจุย่อยเมื่อบรรจุอยู่ในท่อ PVC สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอกดังรูปที่ 3.1 และสามารถหาค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินได้จากสมการที่ (3.1)

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

ท่อพีวีซีที่เลือกใช้มีความยาวท่อ (l) ที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 3.37 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 0.317 เมตร และมีความสูงวัดจากพื้นดิน (h) เท่ากับ 0.464 เมตรตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นำมาแทนในสมการ (3.1) จะได้

$$C_e = \frac{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 3.37}{\ln\left[\left(\frac{2(3.37)}{0.317}\right)\left(\sqrt{\frac{4(0.464)+3.37}{4(0.464)+3(3.37)}}\right)\right]}$$

$$= 70.94 \text{ พิโคฟารัด}$$

ดังนั้นจะได้ความจุไฟฟ้ารั่วลงดินเท่ากับ 70.94 พิโคฟารัด

- ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ [10]

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิดฟิล์มโพลีพรอพิลีน (Polypropylene Film) ยี่ห้อ Vishay MKP 1845 มีขนาดความจุ  $0.22 \mu\text{F} \pm 10\%$  พิกัดแรงดัน 1600 VDC / 650 VAC

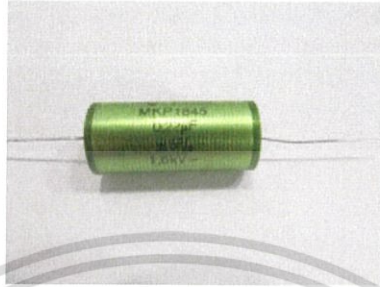
ทดสอบ Withstand Test ที่ 1.1 เท่าของพิกัดโวลท์เตจดีไวเดอร์ใช้  $\frac{330\text{kV}}{650} = 508$  ตัว

ทดสอบ Withstand Test ที่ 1.5 เท่าของพิกัดโวลท์เตจดีไวเดอร์ใช้  $\frac{450\text{kV}}{650} = 693$  ตัว

จึงออกแบบใช้ Capacitor จำนวนทั้งหมด 696 ตัว ซึ่งสามารถทดสอบ Withstand Test ได้ที่ 1.506 เท่าของพิกัดโวลท์เตจดีไวเดอร์ โดยค่า  $C_1$  รวมมีค่าเท่ากับ  $\frac{0.22\mu\text{F}}{696} = 316$  พิโคฟารัด

จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 696 ตัว เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบสร้าง และมีอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำใกล้เคียงกับ 1000:1 มากที่สุด ต่ออนุกรมกันแบ่งเป็น 3 ท่อน โดยแต่ละท่อนมี 232 ตัว ที่ความปลอดภัย 1.5 เท่า หรือ 150 % และในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงควรมีค่ามากกว่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินประมาณ 3 เท่า หรือมากกว่าใน

ที่นี้มีค่ามากกว่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินถึง 4.47 เท่า เมื่อนำมาตัวเก็บประจุจำนวน 696 ตัว มาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดเท่ากับ 316 พิโคฟารัด ซึ่งมีความมากกว่าค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินมาก โดยกระแสที่พิกัดแรงดันมีค่าเท่ากับ 29.78 มิลลิแอมป์

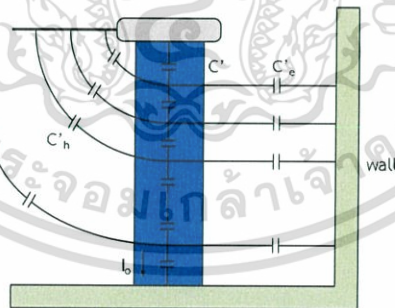


รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงสำหรับวัตต์แรงดันกระแสสลับ

- แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด [4]

1. แรงดันกระแสสลับ

เนื่องจากการกระจายแรงดันของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตัวเก็บประจุตัวบนสุดจะรับแรงดันสูงกว่าตัวอื่น ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดัน เมื่อโวลต์เตจดีไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) โดยต้องคำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Withstand test ที่ 110 %



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- เมื่อ  $U_k$  = แรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย  $k$  เมื่อเทียบกับดิน  
 $U$  = แรงดันคงทนได้ = 330 kV  
 $C$  = ค่าของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว = 0.068  $\mu$ F  
 $n$  = จำนวนตัวเก็บประจุ = 696 ตัว  
 $k$  = ชั้นที่ 1  
 $C_e'$  =  $C_e/n$  = 0.102 pF  
 $C_h'$  = 0

จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) พบว่าที่แรงดันทดสอบ 110 % ของแรงดันพิกัด แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนสุดมีค่าเท่ากับ 474.138 โวลต์ และคิดเผื่อความปลอดภัยที่แรงดัน 150 % ของแรงดันพิกัด แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนสุดมีค่าเท่ากับ 647 โวลต์ ซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้มีพิกัดแรงดัน 650 V<sub>AC</sub> ดังนั้นจึงสามารถนำตัวเก็บประจุนี้มาใช้งานได้

## 2.แรงดันอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุขนาด 0.22 ไมโครฟารัดทนแรงดันกระแสตรงได้ 1.6 กิโลโวลต์ ที่พิกัด 300 กิโลโวลต์ จะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวน  $300k/1.6k = 188$  ตัว แต่เนื่องจากในการวัดแรงดันกระแสสลับใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 696 ตัว จึงสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ได้ 3 เท่า ของพิกัดแรงดันกระแสสลับโดยประมาณ คือสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัด 1000 กิโลโวลต์

- ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงจะต่อกระจายตลอดภาคแรงสูงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในสายตัวนำแรงสูง และตัวเก็บประจุภาคแรงสูง การต่อตัวต้านทานกระจายนี้ยังสามารถช่วยหน่วงแกว่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลต์เตจดีไวเดอร์เองได้ดีกว่าการต่อความต้านทานหน่วงภายนอกโวลต์เตจดีไวเดอร์

จากการคำนวณโดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์ด้วยความเร็วแสงซึ่งมีค่าประมาณ 3.33 ns/m จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Z_c = \frac{\tau_c}{C_e} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$Z_t$  คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์

$C_e$  คือ ค่าเก็บประจุไฟฟ้ารั่วของโวลต์เตจดีไวเดอร์

$\tau$  คือ เวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์

แทนค่าลงในสมการ

$$Z_t = \frac{\tau}{C_e} = \frac{3.33 \text{ ns} / \text{m}}{70.94 \text{ pF}}$$

$$= 46.94$$

$$R_d = 4 \times Z_t$$

$$= 4 \times 46.94$$

$$= 187.76 \text{ โอห์ม}$$

แต่ปกติแล้วค่าความต้านทานหน่วยภาคแรงสูงนั้นจะอยู่ในช่วง 500 ถึง 1000 โอห์ม [11] ซึ่งจากการคำนวณได้ค่าไม่ถึง 500 โอห์ม จึงต้องเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วยใหม่

ภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ตัวนี้สามารถนุกรมความต้านทานสูงสุด 84 ตัว เลือกใช้ตัวที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด คือ 20 โอห์ม จะได้ความต้านทานที่เหมาะสมที่สุด

### 3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ [4]

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆต่อไปนี้

1.) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซิลด์ของเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆในระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดมีค่าต่ำเกินไป จะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

2.) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำ และความต้านทานแมชซิ่งของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงดันต่ำกับความต้านทานแมชซิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

-การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลต์เตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้า และขาออกที่กำหนดจะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ตามสมการที่ (3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลต์เตจติไวเตอร์

$C_1$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

$C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออก 929 โวลต์ ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันโวลต์เตจติไวเตอร์มีค่าประมาณ 1077:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุ และค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ ได้จากสมการที่ (3.8)

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

-ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลต์เตจติไวเตอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 929 โวลต์ จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวเตอร์เท่ากับ 1077:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงดันสูงทั้งหมดเท่ากับ 316.09 พิโคฟารัด ซึ่งเลือกตัวเก็บประจุเป็นแบบฟิล์มโพลีโพรพิลีน ค่าเก็บประจุภาคแรงดันต่ำคำนวณได้จาก

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = 1077 \quad (3.7)$$

จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ 340 นาโนฟารัด โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.068 ไมโครฟารัด ต่อขนานกัน 5 ตัว จะได้ค่าความเก็บประจุแรงต่ำจริง 340 นาโนฟารัด

-ตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ

ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลต์เตจติไวเตอร์เท่ากับ 1012:1 ค่าความต้านทานภาคแรงดันสูงรวมทั้งหมด 1680 โอห์ม โดยค่าความต้านทานคำนวณได้จาก

$$\frac{R_1}{R_2} = 1012 \quad (3.8)$$

จากการคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำ 1.66 โอห์ม โดยใช้ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 3.3 โอห์ม และ 5 โอห์ม มาต่ออนุกรมกัน แล้วนำมาต่อขนานกัน 5 ชุดจะได้ความต้านทานภาคแรงดันต่ำ 1.66 โอห์ม

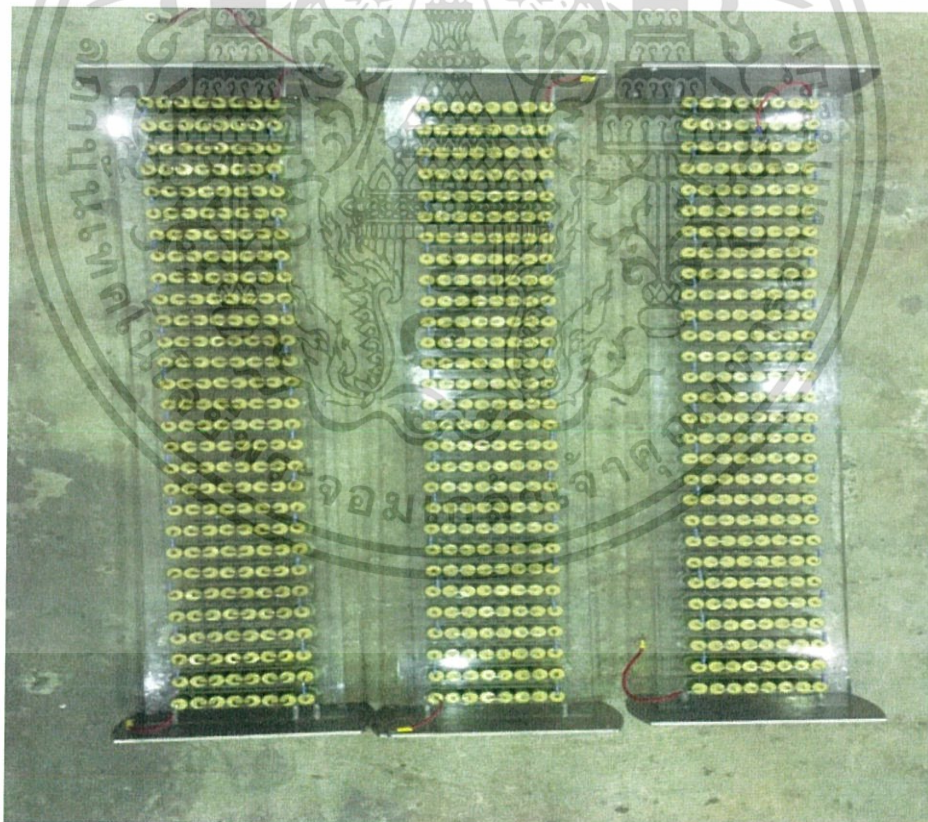
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อป้องกันการแกว่ง และการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมชซิ่ง ( $R_m$ ) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยตัวต้านทานแมชซิ่งนี้เลือกใช้แบบฟิล์มโลหะขนาด 2 วัตต์ 75 โอห์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จจิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำจะประกอบอยู่ภายในกระบอกอลูมิเนียม

### 3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์

#### 3.3.1 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

การต่อตัวเก็บประจุน้อย และตัวต้านทานในภาคแรงดันสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุน้อยทั้งหมดจำนวน 696 ตัว และตัวต้านทานหน่วยจำนวน 84 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นอะคริลิกใสจำนวน 3 แผ่น โดยแต่ละแผ่นจะมีตัวเก็บประจุจำนวน 232 ตัว และตัวต้านทานหน่วยจำนวน 28 ตัว ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 8 ตัว จำนวน 29 ชั้น เพื่อใส่ตัวเก็บประจุน้อย 8 ตัวที่ต่ออนุกรมกัน หลังจากนั้นจึงนำตัวต้านทานหน่วยต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุระหว่างชั้น โดยภาคแรงสูงทั้งสามแผ่นนี้จะนำมาต่ออนุกรมกัน

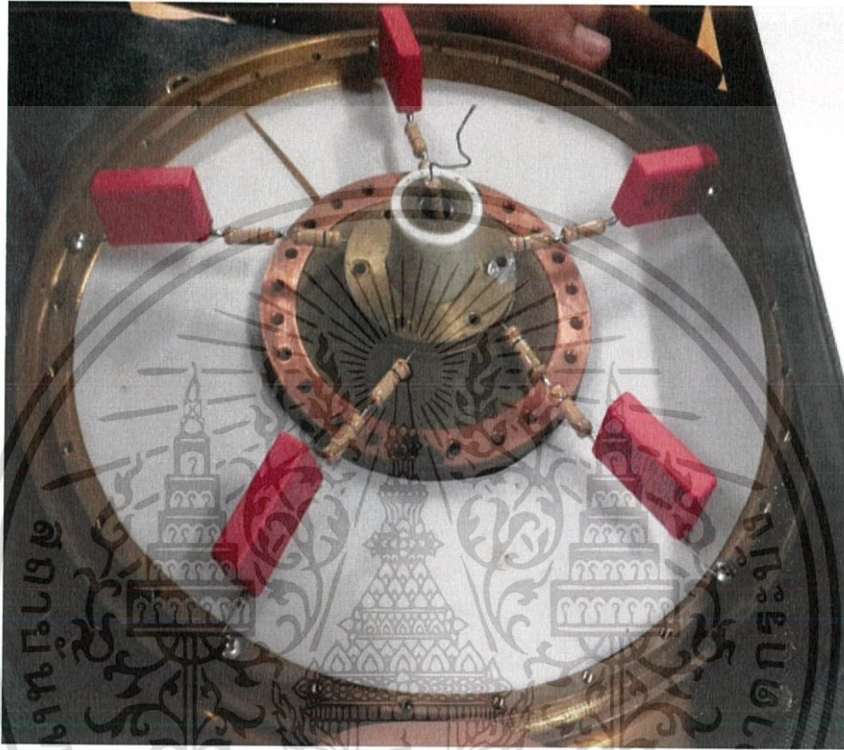


รูปที่ 3.4 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำมีทั้งหมด 5 ขา โดยแต่ละขาประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 3.3 โอห์ม และ 5 โอห์ม ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาด 0.068 ไมโครฟารัด และมี  $R_m = 75$  โอห์ม อยู่ตรงกลางซึ่งจะต่อกับหัวแปลงเพื่อนำไปต่อสายเคเบิล



รูปที่ 3.5 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

### 3.3.3 โครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์

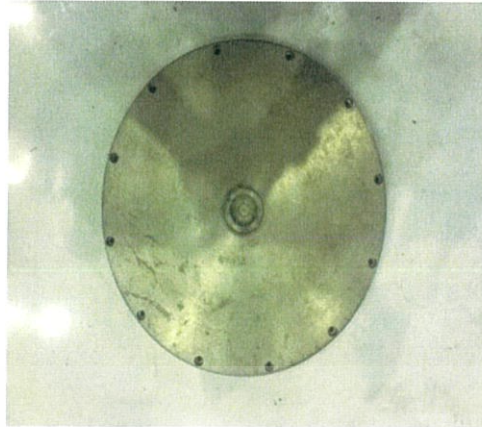


ก)



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)

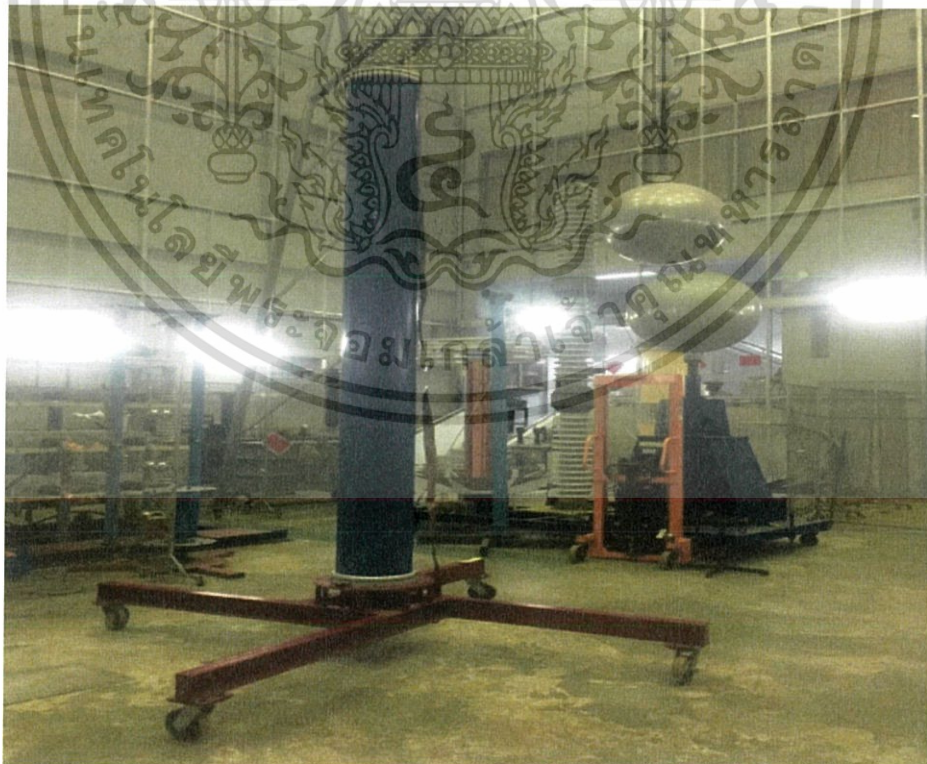
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์

ก) ท่อฉนวน PVC

ข) ฝาอิเล็กทรอนิกส์ล่าง

ค) ฝาอิเล็กทรอนิกส์บน

### 3.3.4 โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3.7 โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบและสร้างตัวลวดทอง

ปริญญาวิพนธ์ฉบับนี้ ต้องการใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและประเมินค่าพารามิเตอร์ของแรงดัน ซึ่งออสซิลโลสโคปที่ใช้สามารถแสดงผลได้สูงสุด 50 V ดังนั้น จำเป็นต้องออกแบบสร้างตัวลวดทองขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลต์เตจดีไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่ดิจิตอลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลวดทองอาศัยหลักการเดียวกับโวลต์เตจดีไวเดอร์ กล่าวคือแรงดันขาออกสูงสุดของตัวลวดทอง กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของดิจิตอลออสซิลโลสโคป เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะสามารถหาสเกลแฟกเตอร์ของตัวลวดทองได้โดยอาศัยสมการ

$$F_A = \frac{Z_3 + Z_4}{Z_4} \quad (3.9)$$

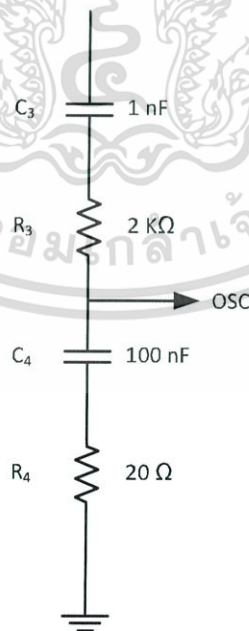
เมื่อ

$F_A$  คือ ค่าสเกลแฟกเตอร์ของตัวลวดทอง

$Z_3$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคปฏุมภูมิของตัวลวดทอง

$Z_4$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคหตุยภูมิของตัวลวดทอง

ในที่นี้ เลือกค่าแรงดันขาออกของตัวลวดทอง 10 V ซึ่งจะทำให้ได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลวดทองประมาณ 1.01



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของตัวลวดทองชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

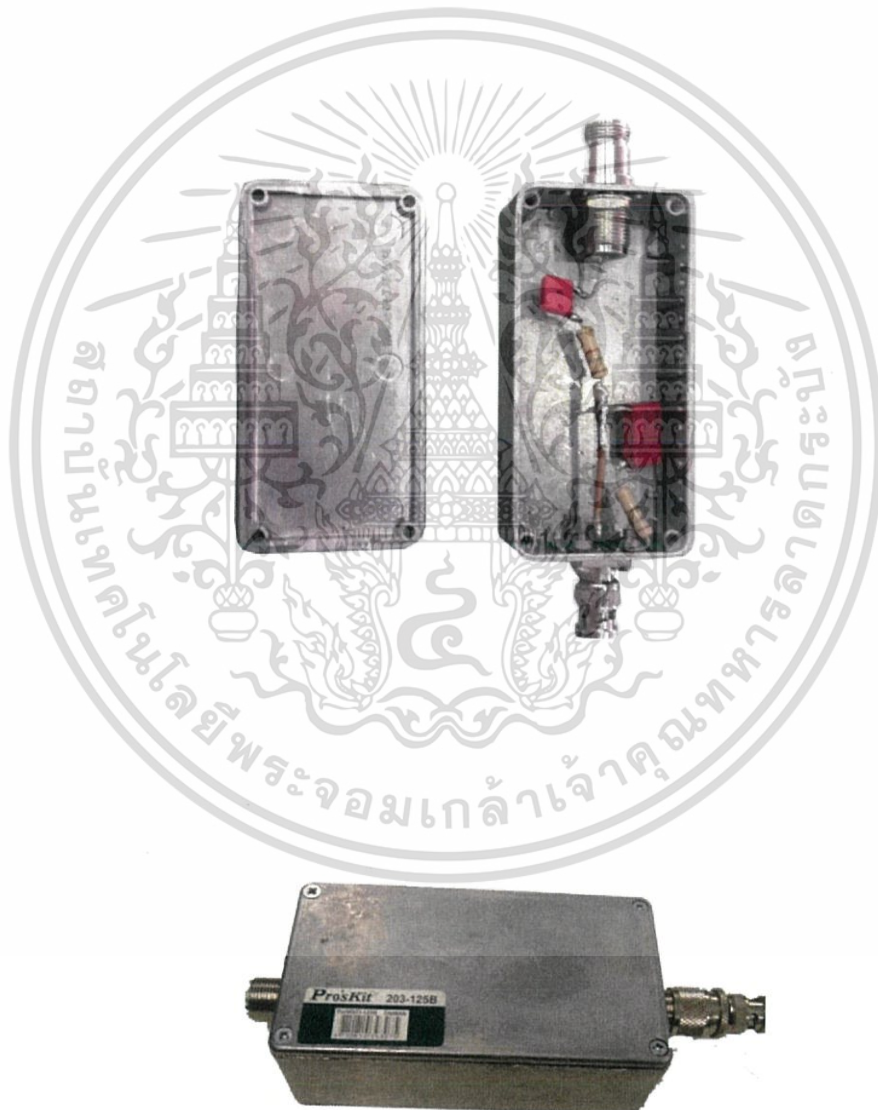
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 รายละเอียดการประกอบสร้างตัวลดทอน

ภาคปฐมภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม ขนาด  $1 \text{ nF}$   $630 \text{ V}_{\text{dc}}$  ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานหน่วยแบบฟิล์มคาร์บอนขนาด  $1 \text{ W}$   $2 \text{ k}\Omega$

ภาคทุติยภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม ขนาด  $100 \text{ nF}$   $250 \text{ V}_{\text{dc}}$  ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานหน่วยแบบฟิล์มคาร์บอนขนาด  $1 \text{ W}$   $20 \text{ }\Omega$

โดยองค์ประกอบทั้งหมดบรรจุอยู่ในกล่องซีลด์อลูมิเนียม ตัวลดทอนที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวลดทอนชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 เครื่องมือ และอุปกรณ์ใช้ในการวัดค่าได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์

#### 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) โดยสายมีการลดทอนสัญญาณน้อย และสามารถทนแรงดันได้สูงมีความถี่ใช้งานกว้าง ซึ่งในการออกแบบเราใช้สายชนิด RG11 A/U ซึ่งมีแรงดันใช้งานสูงสุด 600  $V_{rms}$  หรือประมาณ 850  $V_{peak}$  โดยมีคุณสมบัติตามตาราง 3.2



รูปที่ 3.10 สายเคเบิลชนิด RG11 A/U

ส่วนการเลือกหัวต่อใช้ชนิด N (Neill) ซึ่งเป็นหัวต่อแบบสกรู โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมคือ 50  $\Omega$  และ 75  $\Omega$  ซึ่งมีแรงดันใช้งาน 1,000  $V_{rms}$  ระดับน้ำทะเล และแรงดัน Withstanding Dielectric ระดับน้ำทะเลโดยใช้ย่านความถี่ 0-1.5 GHz มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 75  $\Omega$  และย่านความถี่ 0-11 GHz มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 50  $\Omega$  ส่วนย่านอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $-65^{\circ}\text{C}$  ถึง  $165^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.11 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.12 หัวต่อภาคแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในส่วนของภาคแรงดันต่ำจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือวัดสามารถวัดแรงดันขาออกของโวลต์เตจดีไวเซอร์ได้ และเครื่องมือวัดแรงดันต่ำมีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบอนาล็อก และแบบดิจิตอล แต่ปัจจุบันเครื่องมือวัดนิยมใช้กันมาก คือแบบดิจิตอล จึงจะขอยกตัวอย่างเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลจะนำมาใช้วัดแรงดันขาออกออกจากโวลต์เตจดีไวเซอร์ดังนี้

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1

Overvoltage Installation category	Working Voltage (dc or ac - rms to ground)	Peak Impulse 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 3.13 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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)			
การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า	INPUT RANGE 0.0 V ถึง 600 V rms (ac+dc) 0.0 V +/-993 V <sub>peak</sub>	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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ Probe

Item	Specifications Setting	Setting 1 : 1	Conditions
Input Impedance/capacitance	10 MΩ ± 2% approx. 14 pF	10 MΩ ± 1.5% approx. 100 pF	When used with this instrument
Attenuation	ratio 10 : 1 ± 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> [10]

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเป็นชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงซึ่งประกอบด้วยภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ ในส่วนของภาคแรงดันต่ำ ภายนอกเป็นกระบอกอลูมิเนียมภายในใช้อากาศเป็นฉนวน ส่วนในภาคแรงดันสูงภายนอกเป็นท่อพีวีซี และภายในเลือกใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนภายใน ซึ่งคุณสมบัติความเป็นฉนวนของก๊าซ SF<sub>6</sub> ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความดันที่อัดเข้าไป แต่การที่จะอัดก๊าซเข้าไปนั้นต้องพิจารณา คุณสมบัติการทนความดันของท่อพีวีซี และขนาดของขั้วต่อวาล์วปิด-เปิด เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ

#### 3.6.1 การตรวจเช็คการรั่วซึม

ก่อนที่จะทำการอัดก๊าซ ต้องทำการเช็คการรั่วซึมของก๊าซที่อัดภายในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ เพื่อให้แน่ใจว่าเมื่ออัดก๊าซเข้าไปแล้วไม่ทำให้เกิดการรั่วซึม การเช็คดังกล่าวในที่นี้ใช้อากาศอัดเข้าไป

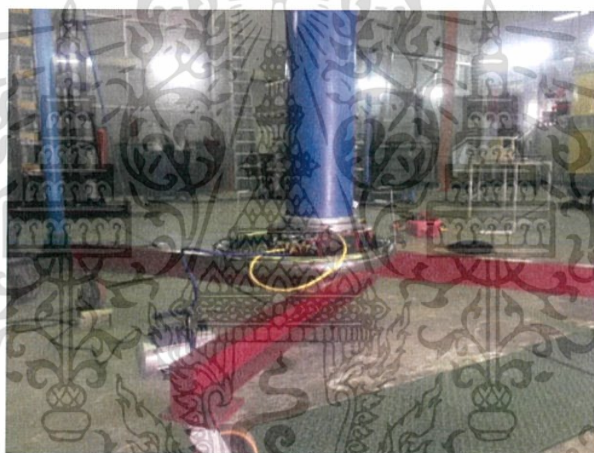
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ได้ความดันที่ต้องการ แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หากความดันเท่าเดิมแสดงว่าไม่มีการรั่วซึม แต่ถ้าความดันลดลงแสดงว่ามีการรั่วซึม ให้ทำการหาจุดรั่วซึมโดยการอัดอากาศเข้าไปใหม่แล้วใช้น้ำสบู่ลูบให้ทั่ว ถ้ามีฟองออกมาแสดงว่าจุดนั้นมีการรั่วซึม

### 3.6.2 การอัดก๊าซ SF<sub>6</sub>

1. การแวกคัมทำโดยการใช้อุปกรณ์แวกคัมดูดอากาศภายในตัวโวลท์เตจดีไวเซอร์ออกให้มากที่สุดหรือไม่มีอากาศเลย วิธีนี้ทำเพื่อให้ก๊าซที่อัดเข้าไปเป็นก๊าซที่บริสุทธิ์ โดยมีอากาศปนอยู่น้อยที่สุดหรือไม่

2. เมื่อทำการแวกคัมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการอัดก๊าซเข้าไป เมื่อต่อสายก๊าซเข้ากับวาล์วของตัวโวลท์เตจดีไวเซอร์ก็เปิดวาล์วที่ถึงก๊าซแล้วดูความดันภายในตัวโวลท์เตจดีไวเซอร์ เมื่อถึงค่าที่ต้องการแล้ว ให้ทำการปิดวาล์ว



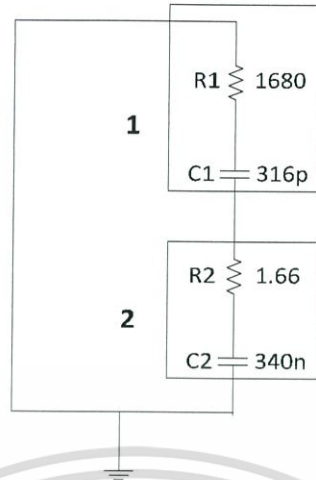
รูปที่ 3.14 การแวกคัมโวลท์เตจดีไวเซอร์ และการอัดก๊าซ SF<sub>6</sub>

### 3.7 การจำลองการทำงานของโวลท์เตจดีไวเซอร์โดยใช้โปรแกรม Pspice

ก่อนที่จะสามารถซ่อมแล้วใช้งานได้จริงแล้วนั้น ต้องมีการตรวจสอบค่าที่คำนวณมาก่อนว่าใช้ได้หรือไม่ โดยใช้โปรแกรมจำลองต่างๆ ในที่นี้ใช้โปรแกรม Pspice

จากวงจรสมมูลของโวลท์เตจดีไวเซอร์แบบที่ออกแบบ โดยด้านภาคแรงดันสูง และด้านภาคแรงดันต่ำจะประกอบด้วยตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน โดยที่ด้านแรงดันสูงจะแบ่งออกเป็น 87 ชั้น ซึ่งในแต่ละชั้นจะมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 8 ตัว ในส่วนของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมระหว่างชั้นจะมีชั้นละ 1 ตัว ในที่นี้ได้ทำการรวมตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน โดยแยกเป็นทางด้านภาคแรงสูง และทางด้านภาคแรงต่ำ เพื่อประหยัดพื้นที่ในการเขียนวงจร และเพื่อความสะดวกในการจำลองการทำงาน เมื่อเรานำค่าต่างๆ ที่คำนวณเรียบร้อยแล้วมาต่อจะได้วงจรดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



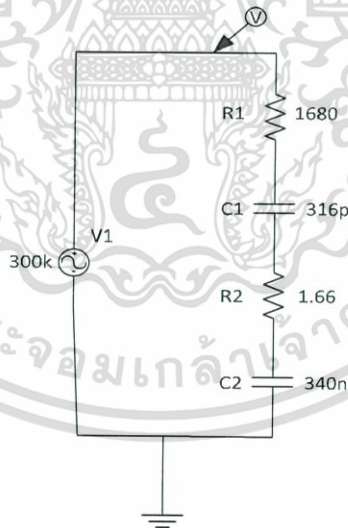
รูปที่ 3.15 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเซอร์

เมื่อ 1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูง ( $Z_1$ )

2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ ( $Z_2$ )

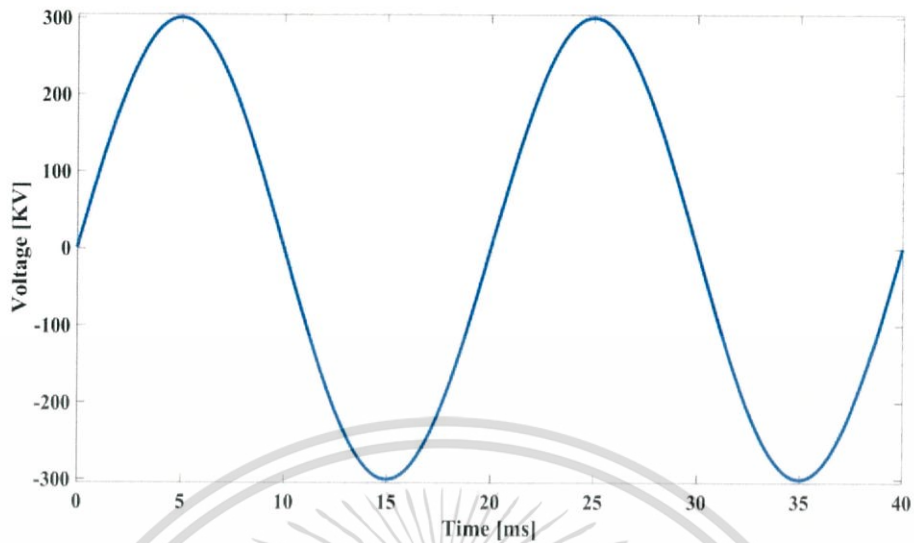
### 3.7.1 วงจรวัดแรงดันกระแสสลับ

- บ่อนแรงดันกระแสสลับ 300 KV

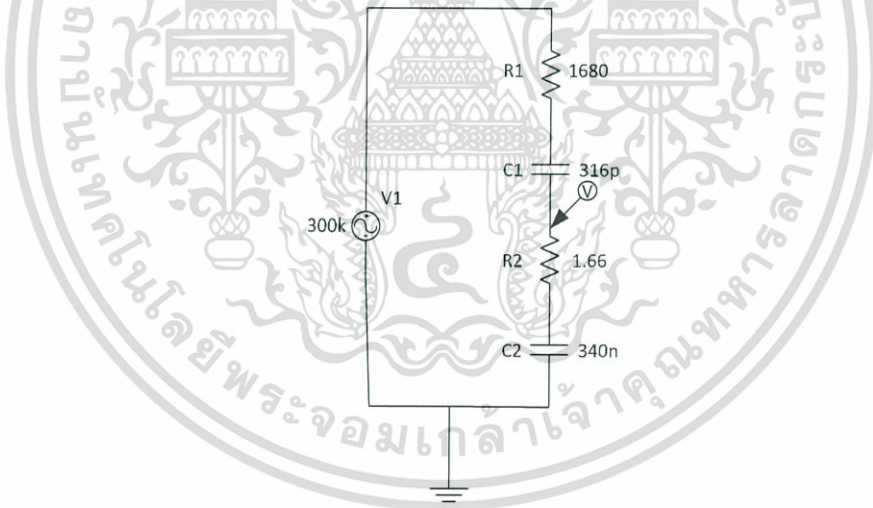


รูปที่ 3.16 วงจรแสดงการวัดแรงดันขาเข้า เมื่อบ่อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

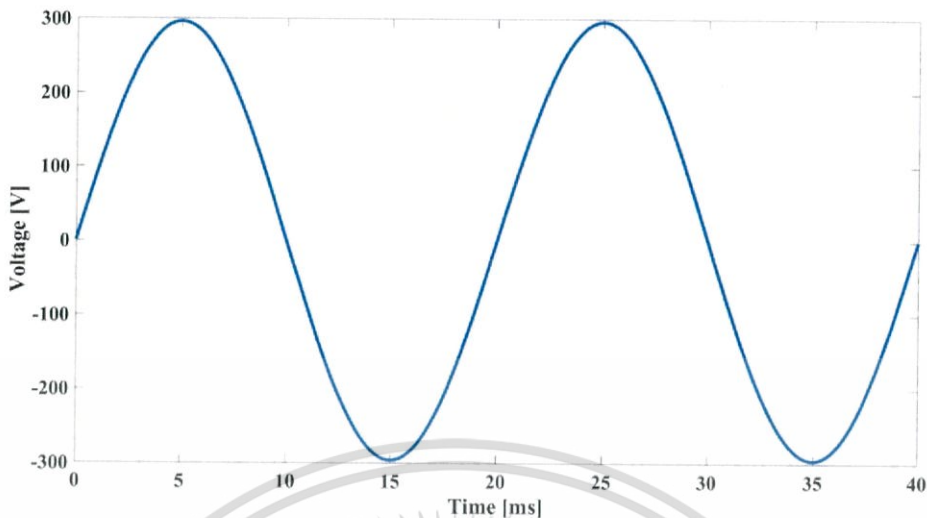


รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันขาเข้าของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 KV



รูปที่ 3.18 วงจรแสดงการวัดแรงดันขาออก เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



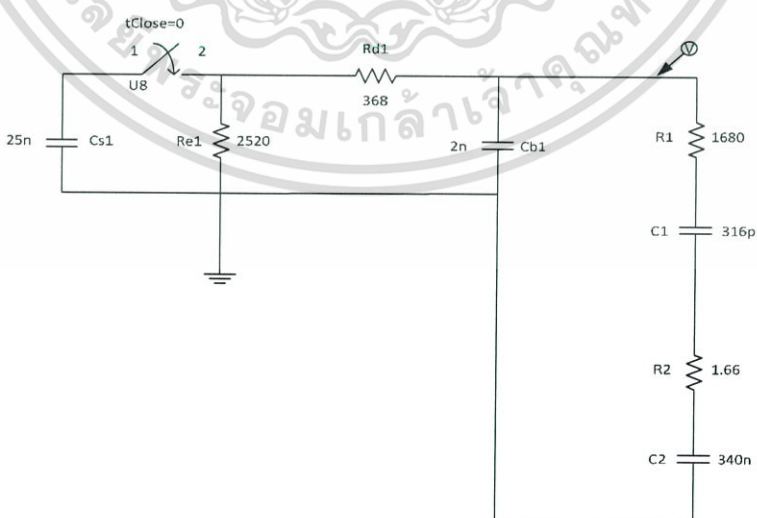
รูปที่ 3.19 รูปคลื่นแรงดันขาออกของโวลท์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 300 kV

จากรูปที่ 5.16, 3.17, 3.18 และ 3.19 จะได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันขาเข้า 300 กิโลโวลท์กระแสสลับ จะได้แรงดันขาออกเป็น 296.1 โวลท์

### 3.7.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

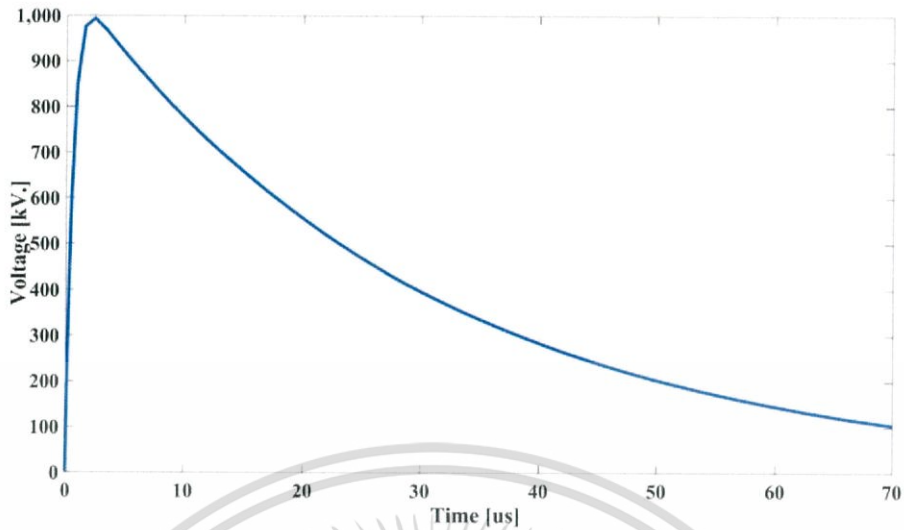
-ป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 KV

วงจรมีความแตกต่างกับวงจรสองวงจรก่อนหน้านี้ตรงแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ค่าสภาวะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุและสวิตช์เป็นตัวจ่ายแรงดัน ส่วนการวัดและกระแสยังคงวัดที่เดิม

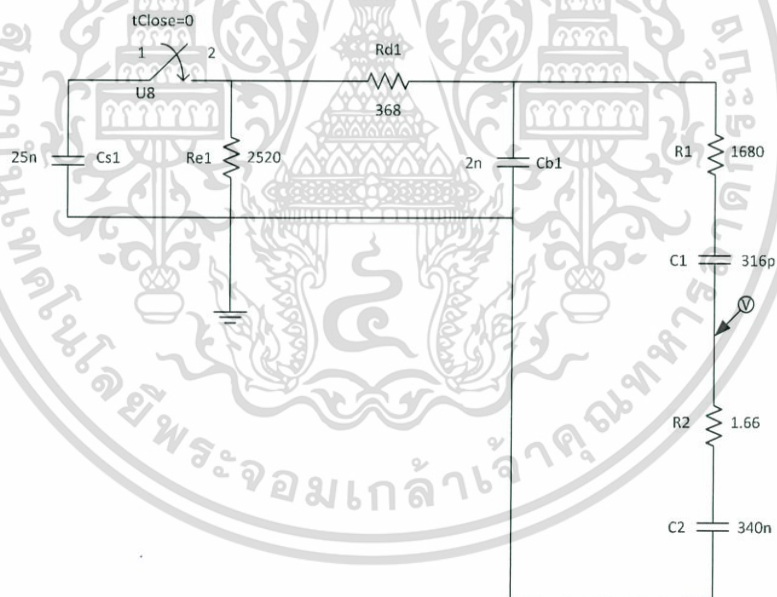


รูปที่ 3.20 วงจรแสดงการวัดแรงดันขาเข้า เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

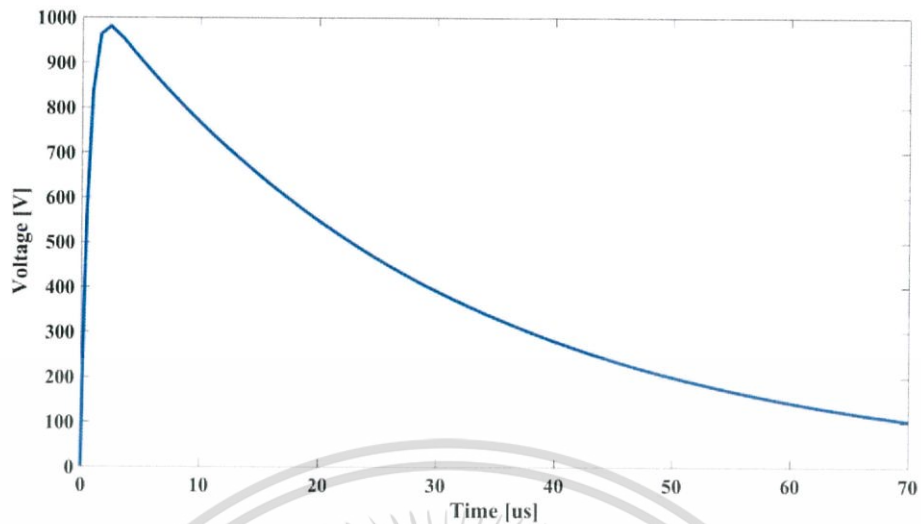


รูปที่ 3.21 รูปคลื่นแรงดันขาเข้าของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV



รูปที่ 3.22 วงจรแสดงการวัดแรงดันขาออก เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันขาออกของโวลต์เตจติไวเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV

จากรูปที่ 3.20, 3.21, 3.22 และ 3.23 จะได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันขาเข้า 1 เมกะโวลต์เป็นแรงดันอิมพัลส์ จะได้แรงดันขาออกเป็น 988 โวลต์

## บทที่ 4

### การทดลองและประเมินผล

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงอิมพัลส์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] ซึ่งการทดสอบและการประมวลผลแบ่งหัวข้อตามลำดับต่อไปนี้

- ก) การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ
- ข) การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ
- ค) การทดสอบการตอบสนองต่อรูปขั้น (Unit step test)
- ง) การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (withstand Test)
- จ) การทดสอบหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัด (Scale Factor Test)
- ฉ) การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)
- ช) การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test)

การทดสอบหาลักษณะต่างๆ ของโวลต์เตจดีไวเดอร์จะทำการวัด ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### 4.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ

##### 4.1.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

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

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ (Hz)	$C_1$ จากการคำนวณ (pF)	$C_1$ จากการวัด (pF)	Error (%)
1000	316.09	315.18	0.28

##### 4.1.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำจะใช้วงจรและเครื่องมือวัดชนิดเดียวกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงผลการวัดความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

#### ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ (Hz)	C <sub>2</sub> จากการคำนวณ (nF)	C <sub>2</sub> จากการวัด (nF)	Error (%)
1000	340	337.5	0.74

โดยการหาค่าความผิดพลาดได้จากสมการ (4.1)

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

#### 4.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง

##### 4.2.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง

การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงใช้เครื่องมือวัด Mega Ohm Meter ของบริษัท sanwa รุ่น MG1000 Digital Insulation Tester ผลการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงแสดงดังตารางที่ 4.3

#### ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูง

R <sub>1</sub> จากการคำนวณ (Ω)	R <sub>1</sub> จากการวัด (Ω)	Error (%)
1680	1670	0.60

#### 4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

##### 4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

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

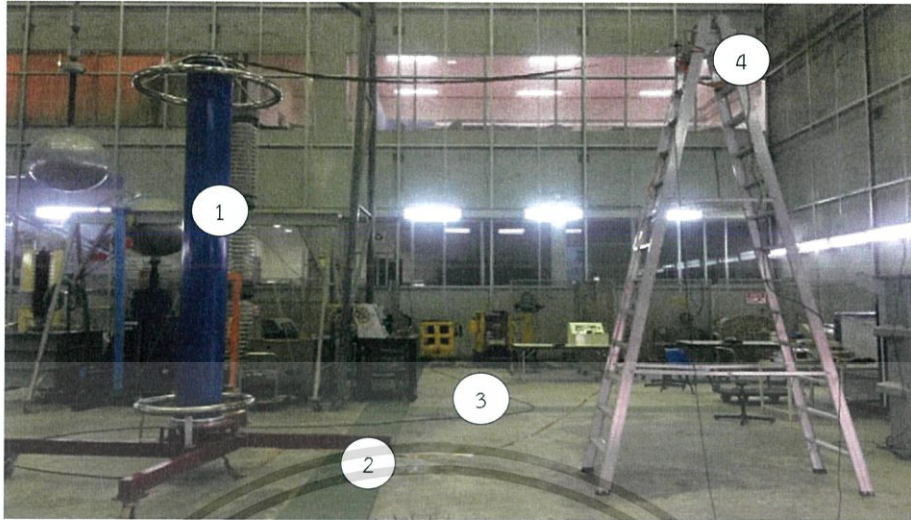
#### ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

R <sub>2</sub> จากการคำนวณ (Ω)	R <sub>2</sub> จากการวัด (Ω)	Error (%)
1.66	1.65	0.60

#### 4.4 การทดสอบการตอบสนองรูปคลื่น

การหาผลตอบสนองรูปคลื่นใช้วงจรตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่น (Unit step generator) ของ DR.STRAUSS รุ่น RIG 1000-H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

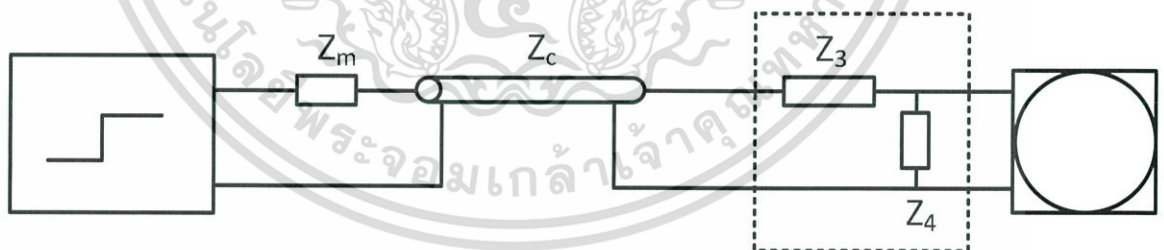


รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองของรูปขั้น

1. โวลต์เตจดีไวเดอร์ 2. สายเคเบิล RG11
3. สายกราวด์ 4. เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

#### 4.4.1 ผลตอบสนองรูปขั้นของตัวลวดทอง

เนื่องจากตัวลวดทองก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบวัดที่ประกอบสร้าง ดังนั้นก่อนที่เราจะทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ตานั้น เราต้องทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นของตัวลวดทองให้ เป็นไปตามมาตรฐานก่อน เพื่อจะได้ปรับปรุงผลตอบสนองรูปขั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ต่อไป โดย วงจรที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเดียวกับโวลต์เตจดีไวเดอร์



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นของตัวลวดทอง

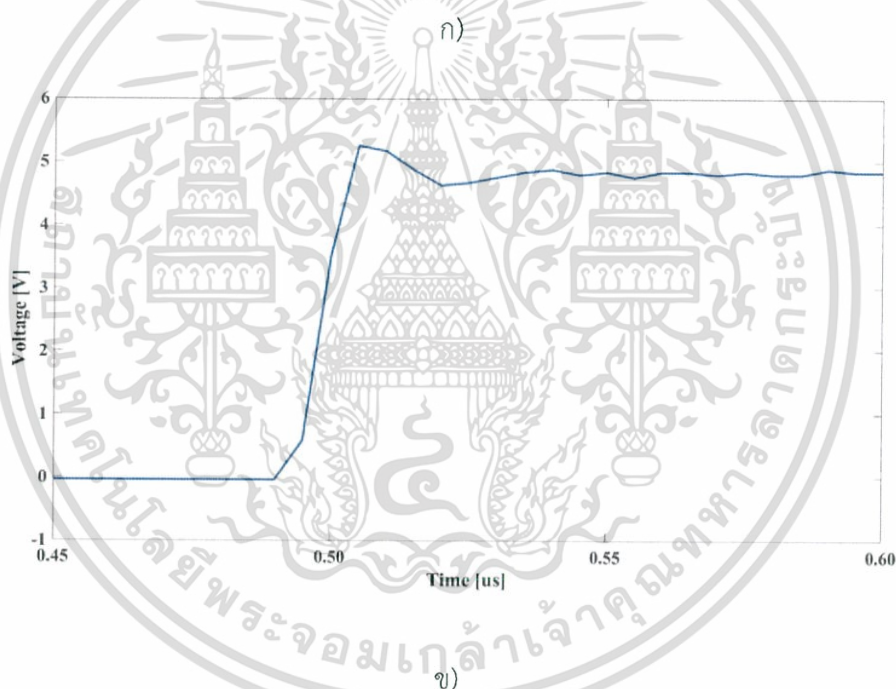
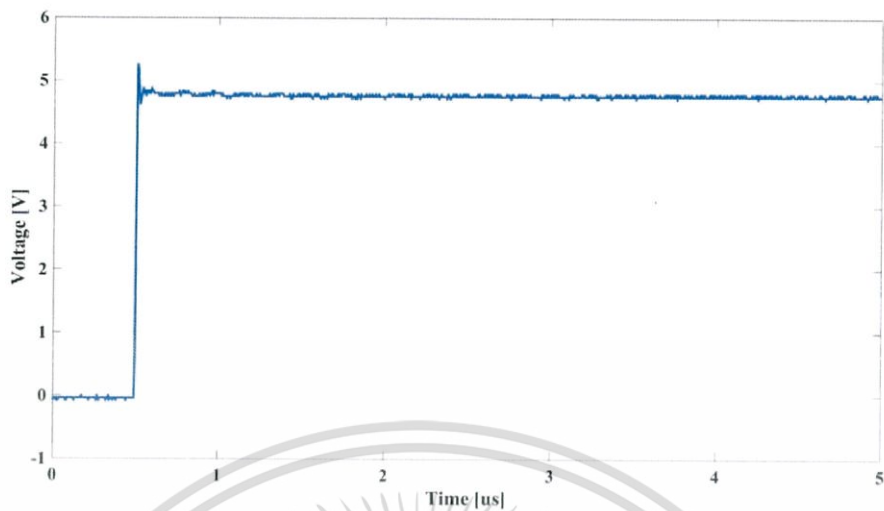
$Z_m$  คือ ความต้านทานแมชชิง  $75 \Omega$

$Z_c$  คือ เคเบิลวัด  $75 \Omega$  ยาว  $20 \text{ m}$

$Z_3$  คือ อิมพีแดนซ์ภาคปฐมภูมิของตัวลวดทอง

$Z_4$  คือ อิมพีแดนซ์ภาคทุติยภูมิของตัวลวดทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองรูปคลื่นของตัวลวดทอง

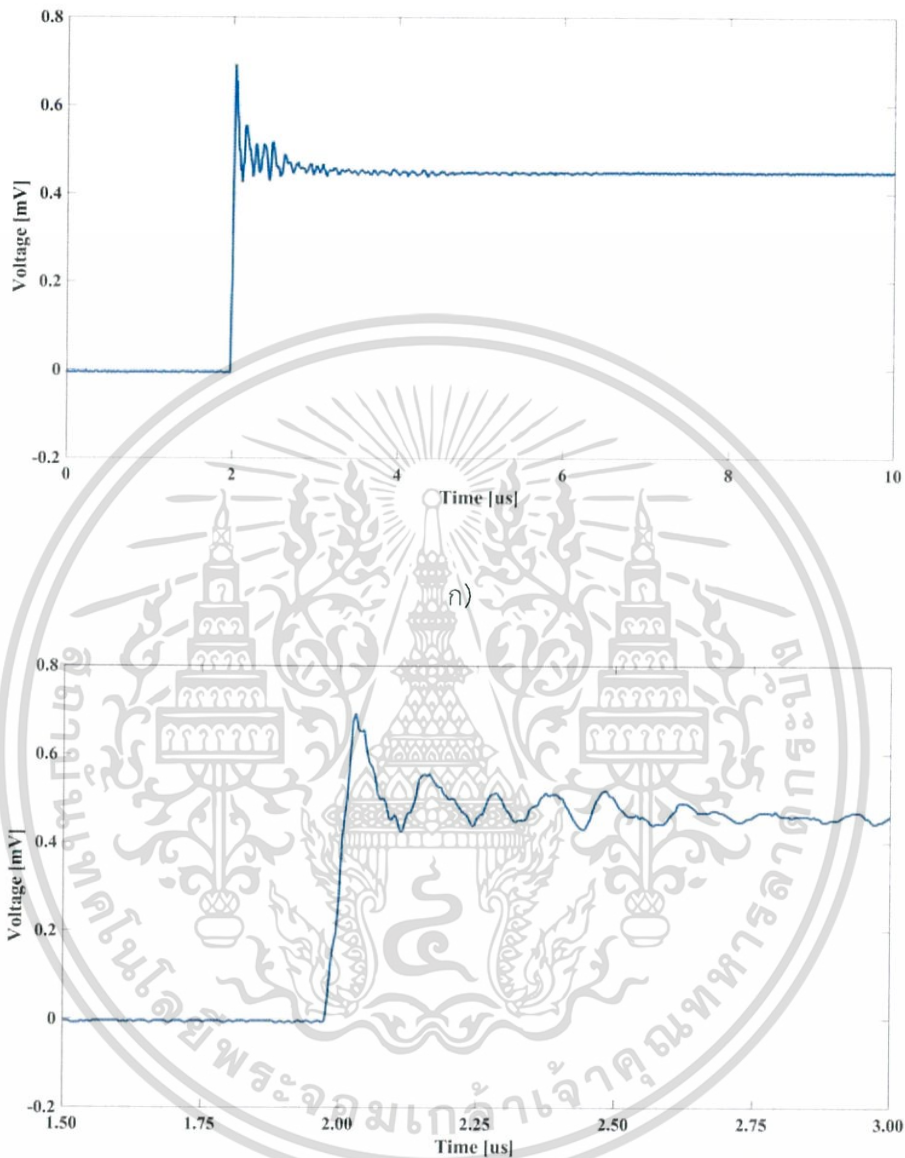
ก) ผลการตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์

ข) ผลการตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ในช่วง 0.45 – 0.60 us

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์

-กรณีไม่มีความต้านทานหน่วงภายนอกต่อผลตอบสนองรูปชั้น



ข)

รูปที่ 4.4 ไม่มีความต้านทานหน่วงภายนอก

ก) ผลการตอบสนองรูปชั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์

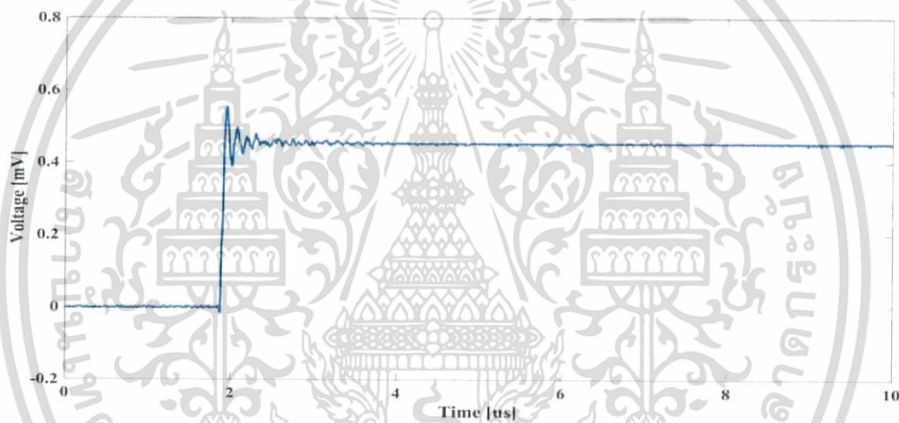
ข) ผลการตอบสนองรูปชั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ในช่วง 1.50 – 3.00 us

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

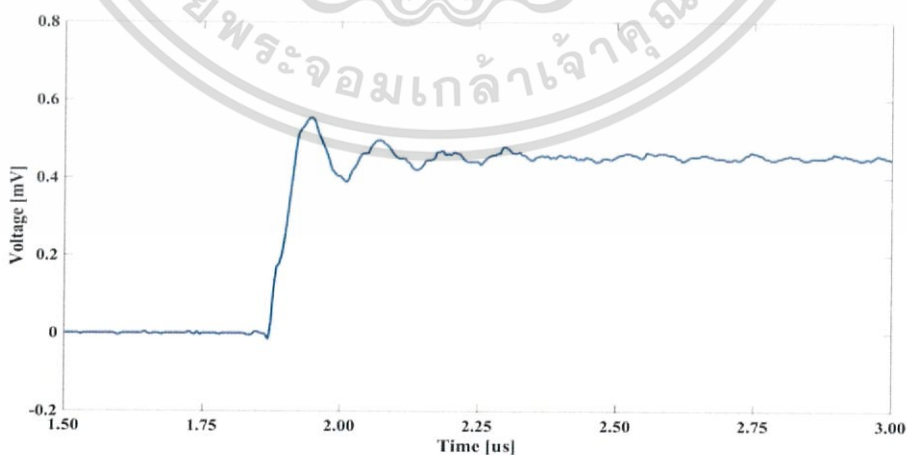
#### 4.4.3 ผลตอบสนองรูปคลื่นของระบบวัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน

จากการทดสอบผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าขององค์ประกอบต่างๆ ทั้งองค์ประกอบภายในและภายนอก จนเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด พบว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์มีความไวต่อการตอบสนองดี แต่ยังมีการออสซิลเลตของรูปคลื่นเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.5 ก) ซึ่งในรูปนี้จะเป็นการทดสอบผลตอบสนองรูปคลื่นโดยการต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์กับตัวลวดทอง โดยมีความต้านทานหน้ากระจายภายในภาคแรงสูง 1680 โอห์ม และภาคแรงต่ำ 1.66 โอห์ม มีการต่อกราวด์ที่ตัวบันได ความต้านทานหน้าภายนอก 282 โอห์มและใส่ซิลด์อิเล็กทรอนิกส์

จากรูปเมื่อลองคำนวณหาค่า  $T_\alpha$  และค่า Overshoot ( $\beta$ ) จะพบว่าได้ค่า  $T_\alpha = 25$  ns และ  $\beta = 22.6$  % โดยค่า  $T_x$  คือช่วงเวลาของหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่เราต้องการทดสอบในที่นี้คือ 1.2 ns ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha / T_x$  พบว่าค่าที่ได้อยู่ในพื้นที่แรเงา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ตามมาตรฐานกำหนดไว้ดังรูปที่ 4.5 ค)

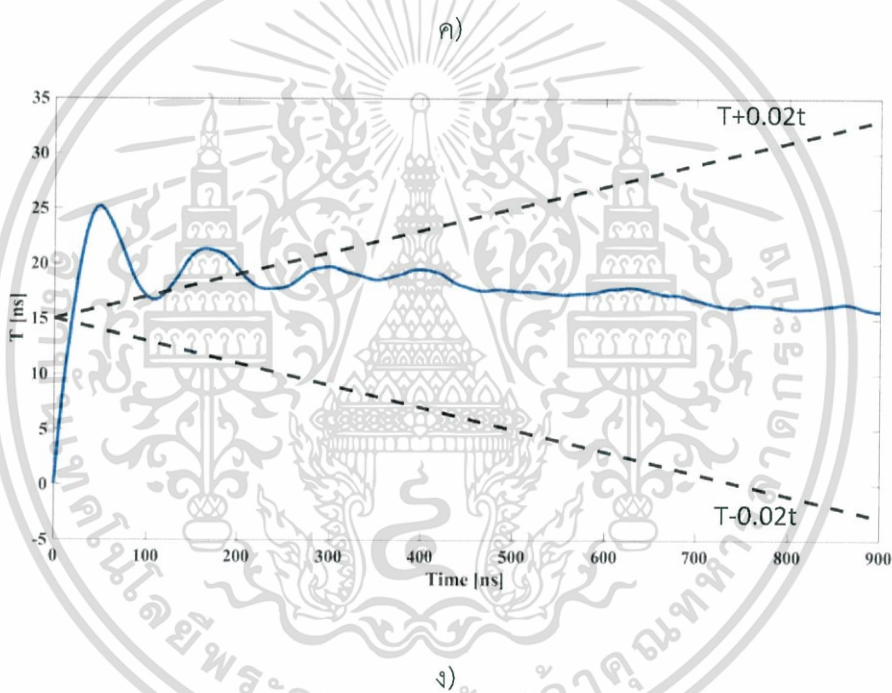
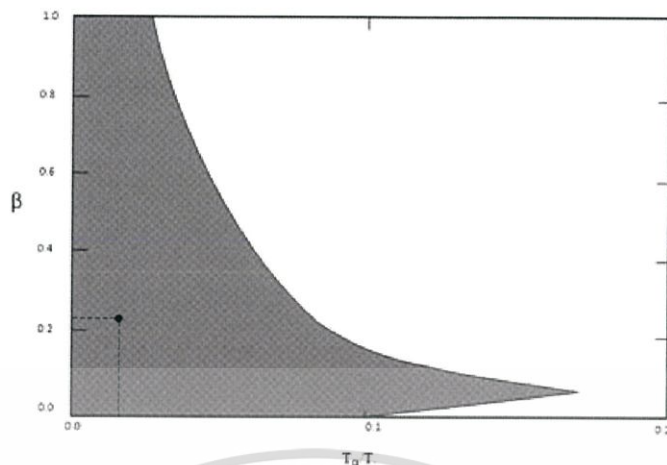


ก)



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ผลตอบผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจติไวเดอร์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน

ก) ผลการตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจติไวเดอร์

ข) ผลการตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจติไวเดอร์ในช่วง 1.50 – 3.00 us

ค) กราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha / T_x$

ง) พารามิเตอร์ของผลตอบสนองของโวลต์เตจติไวเดอร์

โดยพารามิเตอร์ผลตอบสนองมีรายละเอียดดังนี้

$$\beta = 22.6 \% \quad T_n = 15 \text{ ns}$$

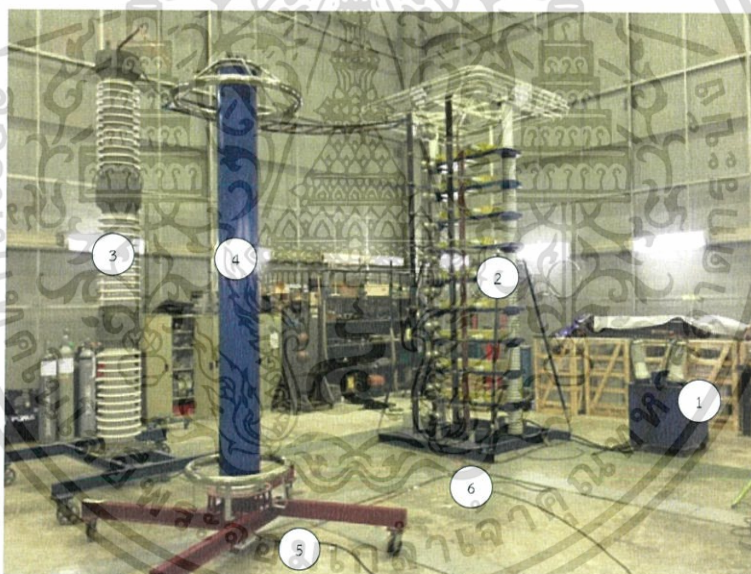
$$T_s = 200 \text{ ns} \quad T_\alpha = 25 \text{ ns}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวน ในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ด้วยค่าแรงดัน 110 % ของแรงดันพิกัด แต่ในที่นี้ ข้อจำกัดของประสิทธิภาพจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และขอบเขตของออสซิลโลสโคปในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จึงทดสอบที่แรงดันพิกัดของโวลต์เตจดีไวเดอร์

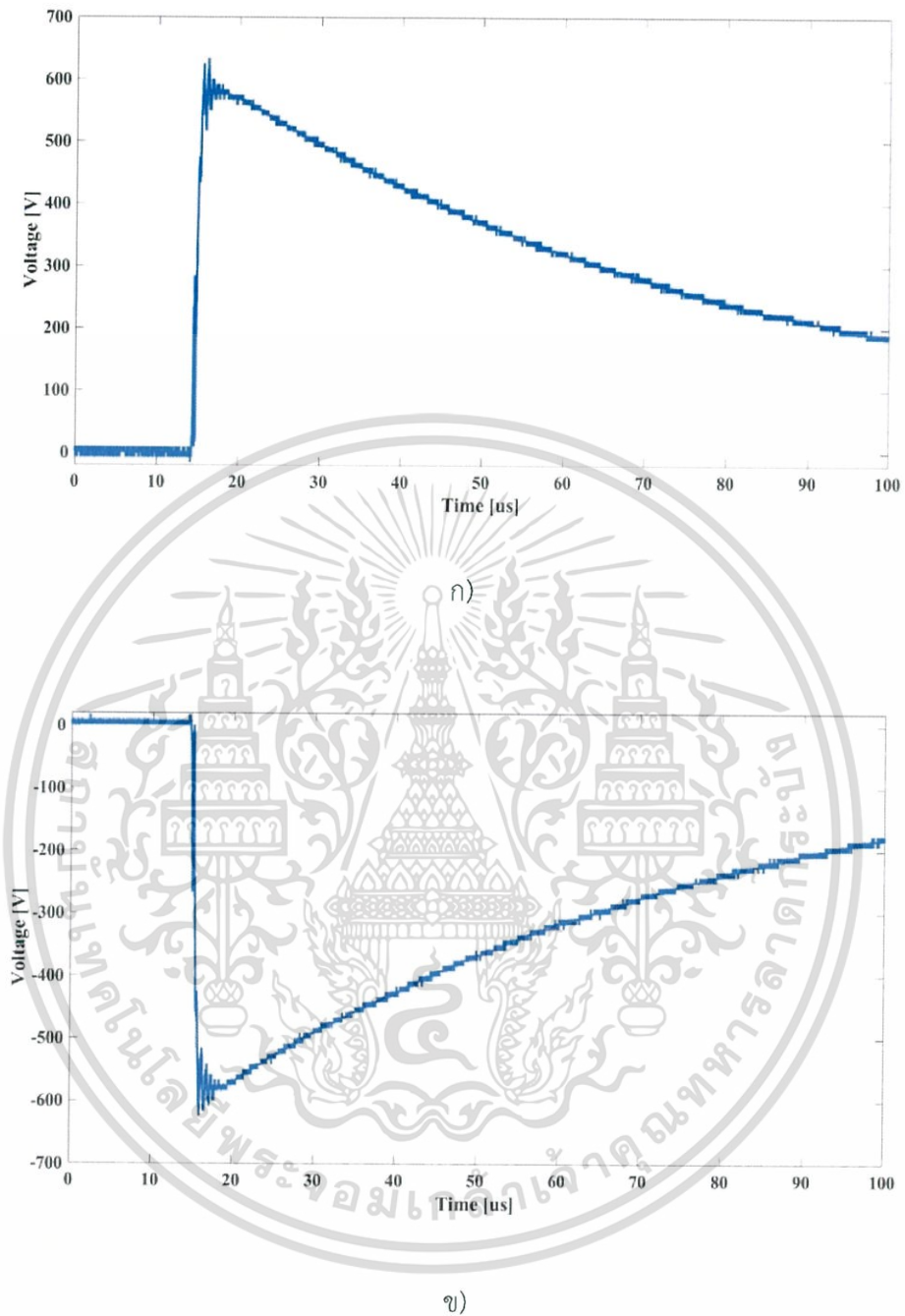
การทดสอบฉนวนที่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังเกิดการเบรกดาวน จะทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นที่กำหนดทั้งชั่วบวก และชั่วลบ ชั่วละ 10 ครั้ง ที่ระดับแรงดันที่กำหนด ถ้ามีการเบรกดาวนหรือวาบไฟตามผิวเกิดขึ้นไม่เกิน 2 ครั้ง จะถือว่าฉนวนนั้นผ่านการทดสอบ เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีค่าแรงดันพิกัด 1000 kV จึงทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ขนาด 1000 kV ทั้งชั่วบวก และชั่วลบ ชั่วละ 10 ครั้ง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง
2. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
3. ตัวเก็บประจุไหลต
4. โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการทดสอบ
5. สายเคเบิล RG11
6. สายกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



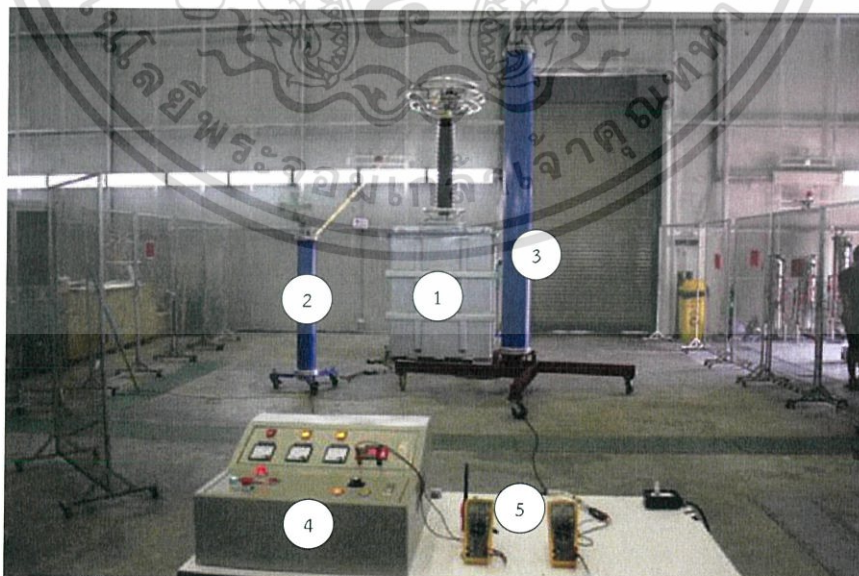
รูปที่ 4.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์  
 ก) แรงดันอิมพัลส์ ขั้วบวก 810 kV รูปคลื่น 1.16/55  $\mu$ s  
 ข) แรงดันลตระดับ ขั้วลบ 810 kV รูปคลื่น 1.14/55  $\mu$ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัตต์แรงดันสูงกระแสสลับ

ในขั้นตอนแรกของการทดสอบ จะทำการทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Test) ก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าการฉนวนภายในของภาคแรงดันสูงของโวลต์เตจดีไวเซอร์ จะไม่เกิดการเบรกดาวน์ในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหาย และอันตรายขึ้น รวมไปถึงภายนอกต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิวที่ท่อนวนที่นำมาใช้งานเป็นโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเซอร์ มาตรฐานจึงกำหนดให้ทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับด้วย ค่าแรงดัน 110 % ของแรงดันพิกัดจากการทดสอบเมื่อจ่ายแรงดันที่ 110 % ของพิกัดแล้วทิ้งไว้ เป็นเวลา 1 นาที ไม่เกิดวาบไฟตามผิวฉนวนของท่อ และอุปกรณ์ภายในท่อ จึงสรุปได้ว่ามีความคงทนต่อแรงดันตามมาตรฐานกำหนด [2]

หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัตต์แรงดันสูงกระแสสลับ โดยทำการต่อโวลต์เตจดีไวเซอร์วัตต์แรงดันสูงกระแสสลับที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจดีไวเซอร์อ้างอิงขนาดเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับตามรูปที่ 4.9 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 40 kV, 80 kV, 120 kV, 160 kV และ 200 kV โดยอ่านค่าที่ระดับแรงดันต่างๆ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และที่ 200 kV เป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัตต์ (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) พร้อมทั้งทำการจ่ายแรงดันไว้ที่พิกัดเป็นเวลา 30 นาที และทำการวัดอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัตต์ที่พิกัดอีกครั้ง เพื่อทดสอบความมีเสถียรภาพของระบบวัตต์ (Short-term Stability Test) โดยอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของระบบวัตต์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $\pm 1\%$  ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน



รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัตต์แรงดันสูงกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ  
4. ตู้ควบคุมแรงดัน 5. มัลติมิเตอร์ "Fluke" Type 179 True RMS

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

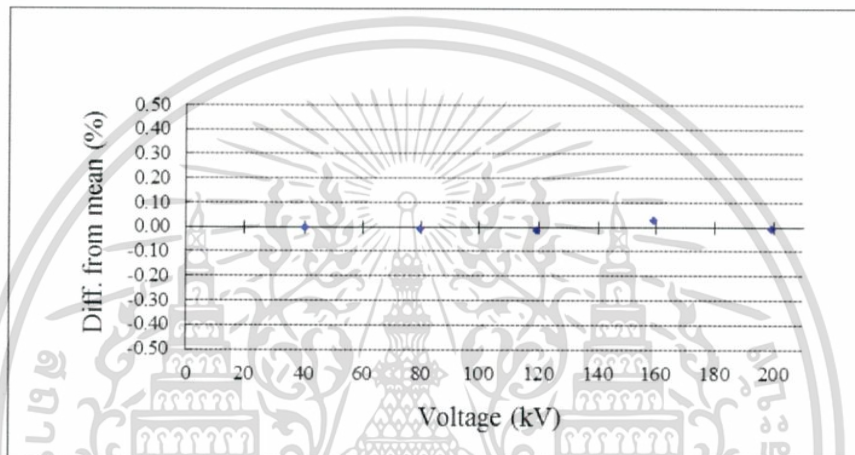
No	40		80		120		160		200		200	
	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)	Ref. (kV)	UUC (V)
1	40.1	40.4	79.8	80.4	119.3	120.4	159.3	160.5	198.5	200.7	198.3	200.6
2	40.2	40.5	80	80.5	119.5	120.5	159.2	160.7	199.2	200.8	198.9	200.4
3	40.2	40.5	79.8	80.7	119.2	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	
Scalar 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  $\pm 1\%$  ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น [1] ผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

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 4.9 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

คุณลักษณะ	ขนาด	หน่วย
พิกัดแรงดันสูงสุด		
- แรงดันกระแสสลับ	300	kV
- แรงดันอิมพัลส์	1,000	kV
ความต้านทานหน่วง ภาคแรงสูง	1680	$\Omega$
ความต้านทานหน่วง ภาคแรงต่ำ	1.66	$\Omega$
ความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง	316	pF
ความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ	340	nF
สเกลแพกเตอร์จากการวัด		
- แรงดันกระแสสลับ	1012:1	-
- แรงดันอิมพัลส์	1077:1	-

1) จากการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ซึ่งมีพิกัดแรงดันกระแสสลับ 300 kV และแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ ซึ่งภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีนขนาด 0.22  $\mu\text{F}$  จำนวน 696 ตัวต่ออนุกรมกันซึ่งทำให้มีค่าเก็บประจุภาคแรงสูงประมาณ 316 pF และมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 20  $\Omega$  จำนวน 84 ตัวต่ออนุกรมระหว่างชั้นทำให้มีค่าความต้านทานภาคแรงสูงประมาณ 1680  $\Omega$  โดยภาคแรงสูงบรรจุในท่อฉนวนพีวีซีสูงประมาณ 3.37 เมตร ภาคแรงต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีนขนาด 0.068  $\mu\text{F}$  จำนวน 5 ตัว ต่อขนานกันมีค่าเก็บประจุรวม 340 nF และมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะซึ่งมีค่าความต้านทานรวม 1.66  $\Omega$  ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ โดยภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกระบอกทองเหลือง

2) ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ พบว่าการใส่ตัวต้านทานหน่วงภายในหรือภายนอกเพียงอย่างเดียว จะได้ผลตอบสนองรูปคลื่นที่ไม่ดีนัก อาจจะได้เวลาตอบสนองที่ช้าไป ดังนั้นเราจะต้องกระจายความต้านทานหน่วงทั้งภายในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์ และภายนอกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) จากการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยการใช้องค์ประกอบภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำที่วัดได้จริงจะมีสเกลแฟกเตอร์ไม่ตรงกับที่คำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบ โดยจากการทดสอบพบว่าค่าความเป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงได้ 0.03 % ซึ่งไม่เกิน  $\pm 1$  % ตลอดช่วงแรงดันใช้งานซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

4) ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของตัวต้านทานภาคแรงสูง โดยทดสอบที่ระดับแรงดันพิกัด ปรากฏว่าโวลต์เตจติไวเตอร์สามารถทนได้ทั้งชั่วบวก และชั่วลบ

5) จากการออกแบบใช้ฉนวนก๊าซ SF<sub>6</sub> ความดัน 2 บาร์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การเลือกตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานที่จะนำมาใช้สามารถทนแรงดันได้สูง และมีความผิดพลาดต่ำ

2) ในกรณีของโวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่ง ใช้ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะเป็นตัวต้านทานหนึ่งต่ออนุกรมภายในภาคแรงสูง ปรากฏว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้ เนื่องจากตัวต้านทานชนิดนี้มีความเหนียวแน่นน้อยกว่าตัวต้านทานแบบไวร์วาร์ด

3) การต่ออุปกรณ์ภายในจะต้องคำนึงถึงการบัดกรีเพื่อไม่ให้มีขอบแหลมคม เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงทำให้ง่ายต่อกาเกิดเรบกดาวน

4) ควรตรวจสอบเป็นประจำว่ามีการรั่วซึมของก๊าซในท่อนวนหรือไม่

5) ควรออกแบบโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้มีส่วนแหลมคม

6) ควรออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจติไวเตอร์ให้ซ่อมบำรุงและเคลื่อนที่ได้ง่าย

7) สภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และความชื้นมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน

8) การทดสอบผลตอบสนองรูปคลื่นต้องทดสอบในพื้นที่โล่ง เพื่อลดผลของความจุไฟฟ้ารั่วลง

ดิน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60060-1 Edition 3.0 - 2010, **High-Voltage test techniques**, Part 1: General definitions and test requirements, 2010.
- [2] IEC 60060-2, **High Voltage test technique**, Part 2: Measuring System, 2010.
- [3] IEEE Std 4<sup>TM</sup> - 2013, **standard for High-Voltage Testing Techniques**.
- [4] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] นายตรีวิษณุ แสงสิทธิ์ และคณะ, **โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ พิกัด 200 kV**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
- [6] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2**, สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] สำรวย สังข์สะอาด, **เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1**, ฉนวนและวัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] kuffel, E. and Zaengl, W.S., **High Voltage Engineering Fundamental**, Pergamon Press, Oxford, 1<sup>st</sup> ed, 1984
- [10] นายกীরติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์ และคณะ, **โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 100 KV**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [11] รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด และคณะวิจัย, **โครงการพัฒนาออกแบบสร้าง โวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น**, 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาและปรับปรุงระบบวัดไฟฟ้าแรงสูงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

### Development of A High-Voltage Measuring System in KMITL High-Voltage Laboratory

นายศุภกร อังคสิทธิ์, นายสันติ กิริติบุตร และนายอดิศักดิ์ สิทธิชนะศรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

E-mail: mike\_17123\_mvsn@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลการพัฒนาและออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ ขนาดพิกัด 300 kV. และแรงดันสูงอิมพัลส์ ขนาดพิกัด 1000 kV. โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างเป็นชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่ง ในการออกแบบภาคแรงดันสูงใช้ตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีนต่ออนุกรมกันและในระหว่างชั้นจะมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะต่ออนุกรมกันไว้ โดยค่าตัวเก็บประจุในภาคแรงดันสูงถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินเป็นอย่างมาก และบรรจุอยู่ในท่อพลาสติกอัดก๊าซ SF<sub>6</sub> ที่ความดัน 2 บาร์ ส่วนในภาคแรงดันต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มโพลีโพรพิลีนต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการปรับปรุงได้มีการทดสอบและประเมินคุณสมบัติอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ได้ทำการปรับปรุงสามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงอิมพัลส์ได้อย่างดีอีกทั้งยังมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

**คำสำคัญ:** โวลต์เตจดีไวเดอร์, แรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันสูงอิมพัลส์, ความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน, อัตราส่วนลดทอนแรงดัน

#### ABSTRACT

This paper presents development and design of a voltage divider, which is used for AC and impulse voltages measurement. The rated voltages of AC and impulse voltages are 300 kV. and 1000 kV.. The developed voltage divider is damped capacitor voltage divider. In the design, the high voltage part consists of polypropylene film capacitors connected in series with metal-film resistors. The capacitance of the high voltage part is designed to be much higher than stray capacitances. All high-voltage components are installed in a PVC tube filled with SF<sub>6</sub> insulated gas at 2 bars. Also, the low voltage part of voltage divider consists of polypropylene film capacitors connected in

series with metal-film resistors. The developed voltage divider were tested according to the standard of IEC 60060-2 [2]. In addition, the characteristics meet all standard requirements.

**Keywords:** Voltage divider, AC high-voltage, impulse high-voltage, withstand voltage, scale factor, linearity

#### 1. บทนำ

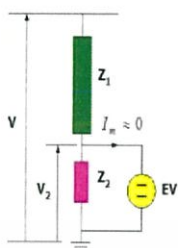
ในการวัดแรงดันสูง อาจมีอันตรายต่อผู้ทำการวัดและเครื่องมือวัด จึงต้องทำการลดทอนแรงดันให้มีขนาดต่ำลง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงมีอยู่หลายชนิด โดยโวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider) เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันสูงชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์วัดแรงดันภาคแรงต่ำได้ เช่น ออสซิลโลสโคป มัลติมิเตอร์ เป็นต้น โดยใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC 60060-1 [1], IEC 60060-2 [2] และ IEEE Std.4 [3] เป็นเกณฑ์การตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะการทำงาน

#### 2. เทคนิคการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจดีไวเดอร์ [1]

โวลต์เตจดีไวเดอร์โดยทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูงจะรับแรงดัน V และอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ จะรับแรงดัน V<sub>2</sub> ดังรูปที่ 1 ซึ่งในภาคแรงดันต่ำสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ โดยอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 ชุดของโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทานล้วน ตัวเก็บประจุล้วน หรืออาจเป็นทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อร่วมกัน ซึ่งโวลต์เตจดีไวเดอร์จะใช้ชุดค่าองค์ประกอบของวงจร และลักษณะการจัดวางอิมพีแดนซ์ในภาคแรงดันสูง และภาคแรงดันต่ำ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เครื่องมือวัดจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งได้แก่ ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชัดความสามารถของเครื่องมือวัด ความเร็วของเครื่องมือวัด ซึ่งการตรวจสอบคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์

### 3. การออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดีไอเคเตอร์

#### 3.1 คุณลักษณะของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์

คุณสมบัติที่ต้องการของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์ในการพัฒนา และปรับปรุงสร้างเป็นโวลต์เตจดีไอเคเตอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง คือ ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานสามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงอิมพัลส์ โดยมีการออกแบบ และการทดสอบอ้างอิงความช้อก้าหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างมีขนาดแรงดันสูงกระแสสลับ 300 kV<sub>AC</sub> และแรงดันสูงอิมพัลส์ 1000 kV.

#### 3.2 การออกแบบภาคแรงดันสูงของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์

##### 3.2.1 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

ความจุไฟฟ้ารั่วลงดินเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์ ดังรูปที่ 2 และสามารถหาค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินได้จากสมการที่ 1

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

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิดฟิล์ม โพลี โพรพิลีน (Polypropylene Film) มีขนาดความจุ 0.22  $\mu$ F พิกัด 1600 V<sub>DC</sub>/ 650 V<sub>AC</sub> เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ใต้ต่อแรงดันกระแสสลับที่ 1.1 เท่าของแรงดันทดสอบ และคิดเผื่อความปลอดภัยที่ 1.5 เท่าของแรงดันทดสอบ จึงใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 696 ตัว

นอกจากนี้การเลือกใช้ตัวเก็บประจุต้องคำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน ซึ่งตัวเก็บประจุภาคแรงสูงจะต้องมีขนาดรวมกันมากกว่าค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดินประมาณ 3 เท่า ในที่นี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุ

จำนวน 696 ตัว แบ่งเป็น 87 ชั้น โดยแต่ละชั้นมี 8 ตัว จะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 316 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้ารั่วลงดิน และมีอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าภาคแรงสูงต่อภาคแรงต่ำใกล้เคียงกับ 1000:1 มากที่สุด

#### 3.2.2 ตัวต้านทานภาคแรงดันสูง

ตัวต้านทานภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐานกำหนดให้  $500 \Omega \leq R \leq 1000 \Omega$  ในที่นี้ใช้ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 20  $\Omega$  มาต่ออนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยจะใช้ตัวต้านทานทั้งหมดจำนวน 84 ตัว จะให้ความต้านทานภาคแรงสูงรวมทั้งหมด 1680  $\Omega$



รูปที่ 2 การต่ออิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

#### 3.3 การออกแบบภาคแรงดันต่ำของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์

การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

1) แรงดันขาออกไม่ดับกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

2) การจี้ควางองก็ประกอบภาคแรงต่ำ และความต้านทานเมฆซึ่งของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่ออุปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกับ ความต้านทานเมฆซึ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

##### 3.3.1 ตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 929 V จะได้อัตราส่วนสทของโวลต์เตจดีไอเคเตอร์เท่ากับ 1077:1 จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงต่ำ 340 nF โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม โพลี โพรพิลีนขนาด 0.068  $\mu$ F ต่อขนานกันจำนวน 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัว จะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวม 340 nF ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าตรงกับค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้

### 3.3.2 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลต์เดจดีไวเคอร์เท่ากับ 1012:1 จากกรคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ 1.66  $\Omega$  โดยใช้ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 3.3  $\Omega$  และ 5  $\Omega$  ต่ออนุกรมกัน แล้วนำมาต่อขนานกัน 5 ชุด จะได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำรวม 1.66  $\Omega$  เพื่อป้องกันการแกว่ง และการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมชซิ่ง ( $R_m$ ) ต่ออนุกรมกับแคเบิ้ลวัด โดยตัวต้านทานแมชซิ่งนี้เลือกใช้แบบฟิล์มโลหะขนาด 2 w 75  $\Omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของแคเบิ้ลวัด



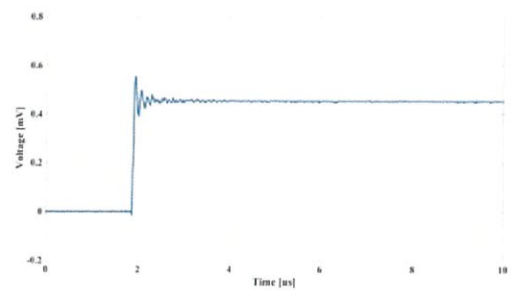
รูปที่ 3 การต่ออิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

## 4. การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบหลักคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงกระแสสลับ และแรงดันสูงอิมพัลส์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าโวลต์เดจดีไวเคอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] ซึ่งการทดสอบและการประมวลผลแบ่งหัวข้อตามลำดับต่อไปนี้

### 4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นของระบบวัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน

จากการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เดจดีไวเคอร์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าขององค์ประกอบต่างๆ ทั้งองค์ประกอบภายในและภายนอก จนเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด พบว่าโวลต์เดจดีไวเคอร์มีความไวต่อการตอบสนองดี แต่ยังมีการออสซิลเลชันของรูปคลื่นเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 5 ซึ่งในรูปนี้จะเป็นการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นโดยการต่อโวลต์เดจดีไวเคอร์กับตัวลดทอน โดยมีความต้านทานหน้าวงกระจายภายในภาคแรงสูง 1680  $\Omega$  และภาคแรงต่ำ 1.66  $\Omega$  มีการต่อกราวด์ที่ตัวบันได ความต้านทานหน้าวงภายนอก 282  $\Omega$  และใส่ชิลด์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4 ผลการตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เดจดีไวเคอร์

จากรูปเมื่อลองคำนวณหาค่า  $T_\alpha$  และค่า Overshoot ( $\beta$ ) จะพบว่าได้ค่า  $T_\alpha = 25$  ns และ  $\beta = 22.6$  % โดยค่า  $T_x$  คือ ช่วงเวลาของหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่เราต้องการทดสอบในที่นี้คือ 1.2 ns ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha/T_x$  พบว่าค่าที่ได้อยู่ในพื้นที่ที่เรง ซึ่งพื้นที่ที่ตามมาตรฐานกำหนดไว้ดังรูปที่ 6

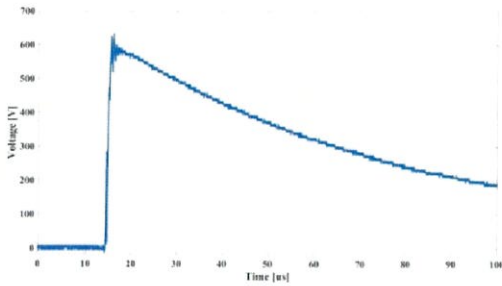


รูปที่ 5 กราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับ  $T_\alpha/T_x$

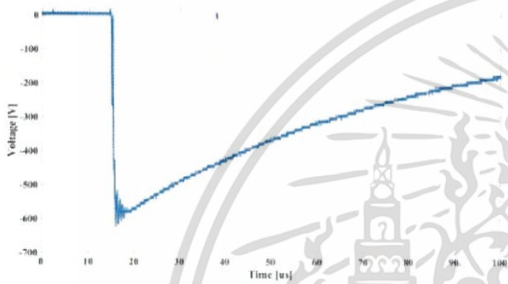
### 4.2 การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์

เพื่อให้มั่นใจว่าการคำนวณภายในภาคแรงสูงของโวลต์เดจดีไวเคอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวน์ในขณะใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเนื่องจากโวลต์เดจดีไวเคอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ด้วยค่าแรงดัน 110 % ของแรงดันพิกัด แต่ในที่นี้ข้อจำกัดของประสิทธิภาพจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ และขอบเขตของออสซิลโลสโคปในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จึงทดสอบที่แรงดันพิกัดของโวลต์เดจดีไวเคอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 แรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูงชั่วคราว 810 kV 1.16/55  $\mu$ s



รูปที่ 7 แรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูงชั่วคราว 810 kV 1.14/55  $\mu$ s

#### 4.3 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของระบบวัดแรงดันสูงกระแสลับ

การทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสลับโดยทำการต่อโวลต์เตจดีไวเซอร์วัดแรงดันสูงกระแสลับที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจดีไวเซอร์อ้างอิง ขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสลับตามรูปที่ 4 โดยจะทำการป้อนแรงดันและทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 40kV., 80kV., 120kV., 160kV. และ 200kV. 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

จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันมีค่าเท่ากับ 990.6 ค่าความเป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.03 และความมีเสถียรภาพของระบบวัดมีค่าเท่ากับ 0.03 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-1[1]

#### 5. สรุปผลการทดลอง

โวลต์เตจดีไวเซอร์ที่พัฒนา และปรับปรุงในงานวิจัยนี้สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสลับ 300 kV. และแรงดันสูงอิมพัลส์ขนาด 1000 kV. ได้ในตัวเดียวกัน การทดสอบพบว่าโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ประกอบสร้างอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] ที่กำหนด

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.พิรุณ ภูทอกวิท ผศ.วรกมล ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ข้อแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการทั้งหมด

ขอขอบคุณ คุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้การดูแลช่วยเหลือ และแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขปริญญาบัตรจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณทุกๆ ท่านๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ได้ช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 Silbraz - 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 silbraz (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 #.

## 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	.095
Standard length 20"	.065	.065	.065	.065	.065	.065	.065	.083	.095	.120	.120	.188

### 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 Plated 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	

W & O SUPPLY INC

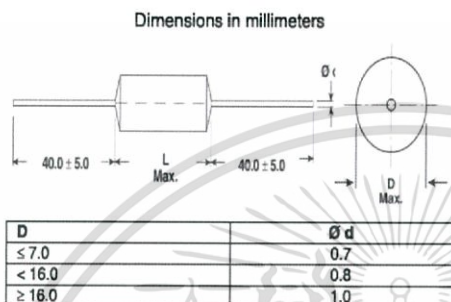
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MKP 1845

Vishay Roederstein

## Metallized Polypropylene Film Capacitor Related Document: IEC 60384-16

**FEATURES**

Product is completely lead (Pb)-free.  
Product is RoHS compliant.

RoHS  
COMPLIANT**CAPACITANCE TOLERANCES**

± 20% (M), ± 10% (K), ± 5% (J)

**RATED VOLTAGES ( $U_R$ ):**

160 VDC, 250 VDC, 400 VDC, 630 VDC,  
1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC

**PERMISSIBLE AC VOLTAGES (RMS) UP TO 60Hz**

100 VAC, 160 VAC, 220 VAC, 400 VAC, 600 VAC, 650 VAC,  
700 VAC

**TEST VOLTAGE (ELECTRODE/ELECTRODE)**

1.6 x  $U_R$  for 2 s

**INSULATION RESISTANCE**

Measured at 100 VDC after one minute

For  $C < 0.33 \mu\text{F}$ :

100,000 M $\Omega$  minimum value (150,000 M $\Omega$  typical value)

**TIME CONSTANT**

Measured at 100 VDC after one minute

For  $C > 0.33 \mu\text{F}$ :

30,000 s minimum value (50,000 s typical value)

**TEMPERATURE COEFFICIENT**

-250 x 10<sup>-5</sup>/°C (typical value)

**CAPACITANCE DRIFT**

Up to + 40°C, ± 0.5% for a period of two years

**DERATING FOR DC AND AC CATEGORY VOLTAGE  $U_C$** 

At + 85°C:  $U_C = 1.0 U_R$

At + 100°C:  $U_C = 0.7 U_R$

**SELF INDUCTANCE**

~ 12 nH measured with 6mm long leads

**PULL TEST ON LEADS**

≥ 20 N in direction of leads according to IEC 60068-2-21

**BEND TEST ON LEADS**

2 bends through 90°C with half of the force used in pull test

**RELIABILITY**

Operational life > 300,000 h

Failure rate < 10 FIT (40°C and 0.5 x  $U_R$ )

For further details, please refer to the general information  
available at [www.vishay.com/?26033](http://www.vishay.com/?26033).

**MAIN APPLICATIONS**

High voltage, high current and high pulse operations,  
deflection circuits in TV sets (S-correction and fly-back  
tuning). Protection circuits in SMPS's. Snubber and  
electronic ballast circuits. Input and output filtering in SPS  
designs, storage, timing and integrating circuits.

**MARKING**

Manufacturer's logo/type/C-value/rated voltage/tolerance/  
date of manufacture

**DIELECTRIC**

Polypropylene film

**ELECTRODES**

Vacuum deposited aluminum

**COATING**

Metal-foil-wrapped, insulated, epoxy resin sealed, flame  
retardant

**CONSTRUCTION**

Extended double-sided metallized polyester film, internal  
series connection (630 to 2000 VDC), double-sided  
metallized polyester carrier film, (refer to general  
information)

**LEADS**

Tinned wire

**IEC TEST CLASSIFICATION**

55/100/56, according to IEC 60068

**OPERATING TEMPERATURE RANGE**

- 55°C to + 100°C

**CAPACITANCE RANGE**

1000pF to 4.7 $\mu\text{F}$

**MAXIMUM PULSE RISE TIME**

CAPACITOR LENGTH (MM)	Maximum Pulse Rise Time $d_1/d_2$ [V/ $\mu\text{s}$ ]						
	160 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC
17	900	1140	1840	—	—	—	—
22	450	580	910	3430	—	—	—
29	260	320	520	2120	2800	3800	6200
34	202	240	400	1524	2000	2680	4200
44	140	170	280	980	1280	1690	2600

If the maximum pulse voltage is less than the rated voltage higher  $d_1/d_2$  values can be permitted.

Document Number: 26023  
Revision: 04-Jul-05

For technical questions contact: [dc-film@vishay.com](mailto:dc-film@vishay.com)

[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MKP 1845**

Vishay Roederstein

Metallized Polypropylene Film Capacitor  
Related Document: IEC 60384-16**DISSIPATION FACTOR TAN δ**

MEASURED AT	C ≤ 0.1µF	0.1µF < C ≤ 1.0µF	C > 1.0µF
1kHz	0.3 × 10 <sup>-3</sup>	0.3 × 10 <sup>-3</sup>	0.3 × 10 <sup>-3</sup>
10kHz	0.4 × 10 <sup>-3</sup>	0.4 × 10 <sup>-3</sup>	—
100kHz	1.5 × 10 <sup>-3</sup>	—	—
Maximum values			

CAPACITANCE	CAPACITANCE CODE	VOLTAGE CODE 16 160 VDC/100 VAC		VOLTAGE CODE 25 250 VDC/160 VAC		VOLTAGE CODE 40 400 VDC/220 VAC		VOLTAGE CODE 63 630 VDC/250 VAC	
		D	L	D	L	D	L	D	L
		1000pF	-210	—	—	—	—	—	—
1500pF	-215	—	—	—	—	—	—	—	—
2200pF	-222	—	—	—	—	—	—	—	—
3300pF	-233	—	—	—	—	—	—	—	—
4700pF	-247	—	—	—	—	—	—	—	—
6800pF	-268	—	—	—	—	—	—	—	—
0.01µF	-310	—	—	—	—	6.0	17.0	7.0	22.0
0.015µF	-315	—	—	—	—	6.5	17.0	8.0	22.0
0.022µF	-322	—	—	6.0	17.0	7.5	17.0	9.5	22.0
0.033µF	-333	6.0	17.0	7.0	17.0	7.0	22.0	9.0	29.0
0.047µF	-347	8.5	17.0	8.0	17.0	8.0	22.0	10.5	29.0
0.068µF	-368	7.5	17.0	7.0	22.0	9.0	22.0	12.5	29.0
0.1µF	-410	7.0	22.0	8.0	22.0	11.0	22.0	12.5	34.0
0.15µF	-415	8.0	22.0	9.5	22.0	10.0	29.0	15.0	34.0
0.22µF	-422	9.5	22.0	9.0	29.0	12.0	29.0	14.5	44.0
0.33µF	-433	9.0	29.0	10.5	29.0	13.5	29.0	17.5	44.0
0.47µF	-447	10.0	29.0	12.0	29.0	15.0	34.0	21.0	44.0
0.68µF	-468	12.0	29.0	13.0	34.0	17.5	34.0	25.0	44.0
1.0µF	-510	12.5	34.0	15.5	34.0	17.5	44.0	—	—
1.5µF	-515	15.5	34.0	15.5	44.0	21.5	44.0	—	—
2.2µF	-522	15.5	44.0	18.5	44.0	26.0	44.0	—	—
3.3µF	-533	18.5	44.0	22.5	44.0	—	—	—	—
4.7µF	-547	22.0	44.0	—	—	—	—	—	—

Further C-values on request  
pcm = L + 3.5

**RECOMMENDED PACKAGING**

LETTER CODE	TYPE OF PACKAGING	REEL DIAMETER (mm)	ORDERING CODE EXAMPLES	
G	AMMO	—	MKP 1845-310-135-G	X
R	REEL	350	MKP 1845-310-135-R	X
—	BULK for L > 31.5mm	—	MKP 1845-410-135	X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Metallized Polypropylene Film Capacitor  
Related Document: IEC 60384-16

**MKP 1845**  
Vishay Roederstein

CAPACITANCE	CAPACITANCE CODE	VOLTAGE CODE 10 1000 VDC/600VAC		VOLTAGE CODE 13 1600 VDC/650 VAC		VOLTAGE CODE 20 2000 VDC/700 VAC	
		D	L	D	L	D	L
1000pF	- 210	—	—	—	—	6.5	29.0
1500pF	- 215	—	—	—	—	6.5	29.0
2200pF	- 222	—	—	—	—	6.5	29.0
3300pF	- 233	—	—	—	—	7.0	29.0
4700pF	- 247	—	—	—	—	8.0	29.0
6800pF	- 268	—	—	—	—	9.5	29.0
0.01µF	- 310	6.5	29.0	8.0	29.0	11.0	29.0
0.015µF	- 315	8.0	29.0	9.5	29.0	11.5	34.0
0.022µF	- 322	9.0	29.0	11.0	29.0	13.0	34.0
0.033µF	- 333	11.0	29.0	11.5	34.0	16.0	34.0
0.047µF	- 347	11.0	34.0	13.5	34.0	15.0	44.0
0.068µF	- 368	13.0	34.0	16.0	34.0	18.0	44.0
0.1µF	- 410	15.5	34.0	15.0	44.0	21.0	44.0
0.15µF	- 415	15.0	44.0	18.5	44.0	—	—
0.22µF	- 422	18.0	44.0	22.0	44.0	—	—
0.33µF	- 433	—	—	—	—	—	—
0.47µF	- 447	—	—	—	—	—	—
0.68µF	- 468	—	—	—	—	—	—
1.0µF	- 510	—	—	—	—	—	—
1.5µF	- 515	—	—	—	—	—	—
2.2µF	- 522	—	—	—	—	—	—
3.3µF	- 533	—	—	—	—	—	—
4.7µF	- 547	—	—	—	—	—	—

Further C-values on request  
pcm = L + 3.5

#### RECOMMENDED PACKAGING

LETTER CODE	TYPE OF PACKAGING	REEL DIAMETER (mm)	ORDERING CODE EXAMPLES	
G	AMMO	—	MKP 1845-310-135-G	X
R	REEL	350	MKP 1845-310-135-R	X
—	BULK for L > 31.5mm	—	MKP 1845-410-135	X

Document Number: 28023  
Revision: 04-Jul-05

For technical questions contact; [dc-film@vishay.com](mailto:dc-film@vishay.com)

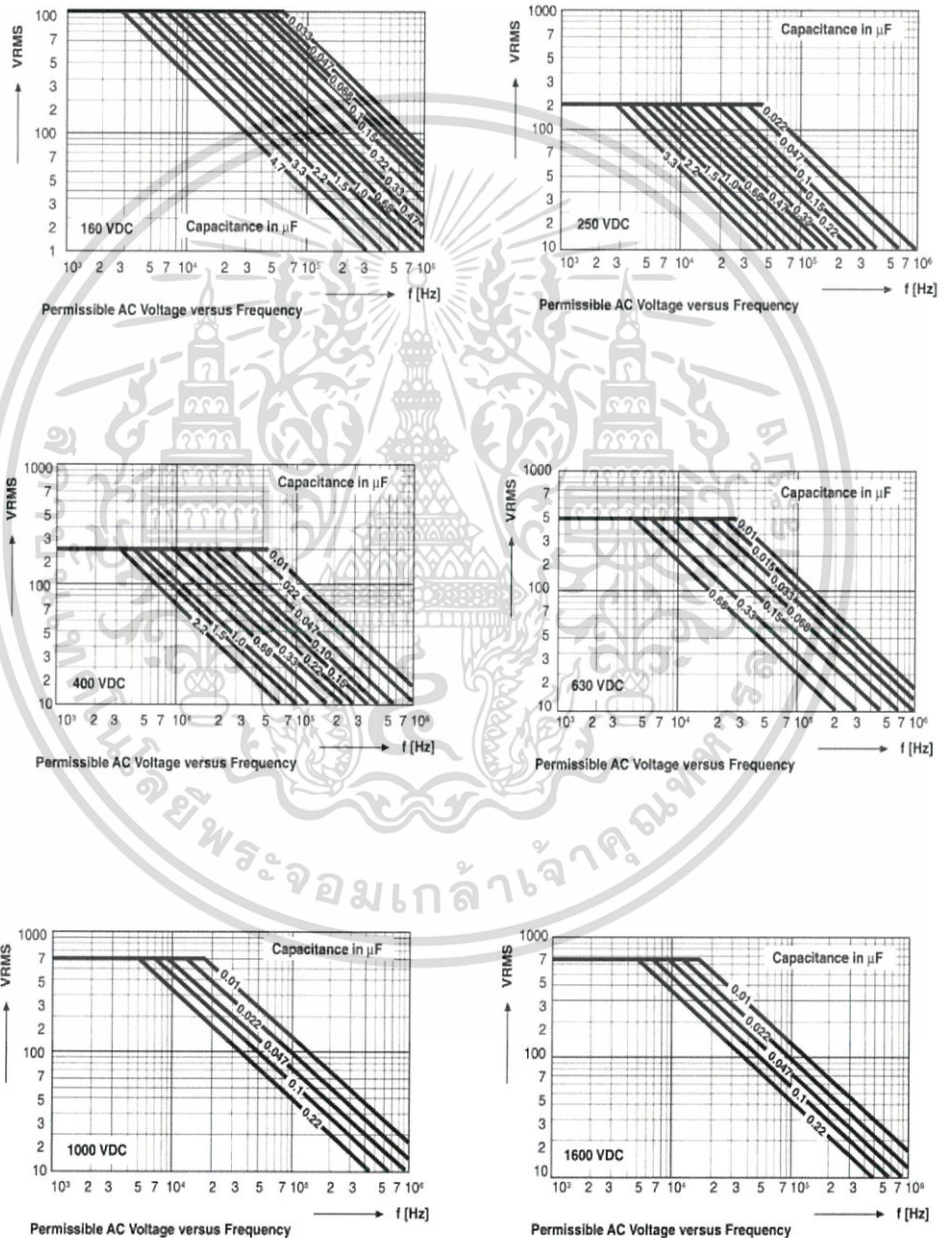
[www.vishay.com](http://www.vishay.com)  
3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MKP 1845**

Vishay Roederstein

Metallized Polypropylene Film Capacitor  
Related Document: IEC 60384-16

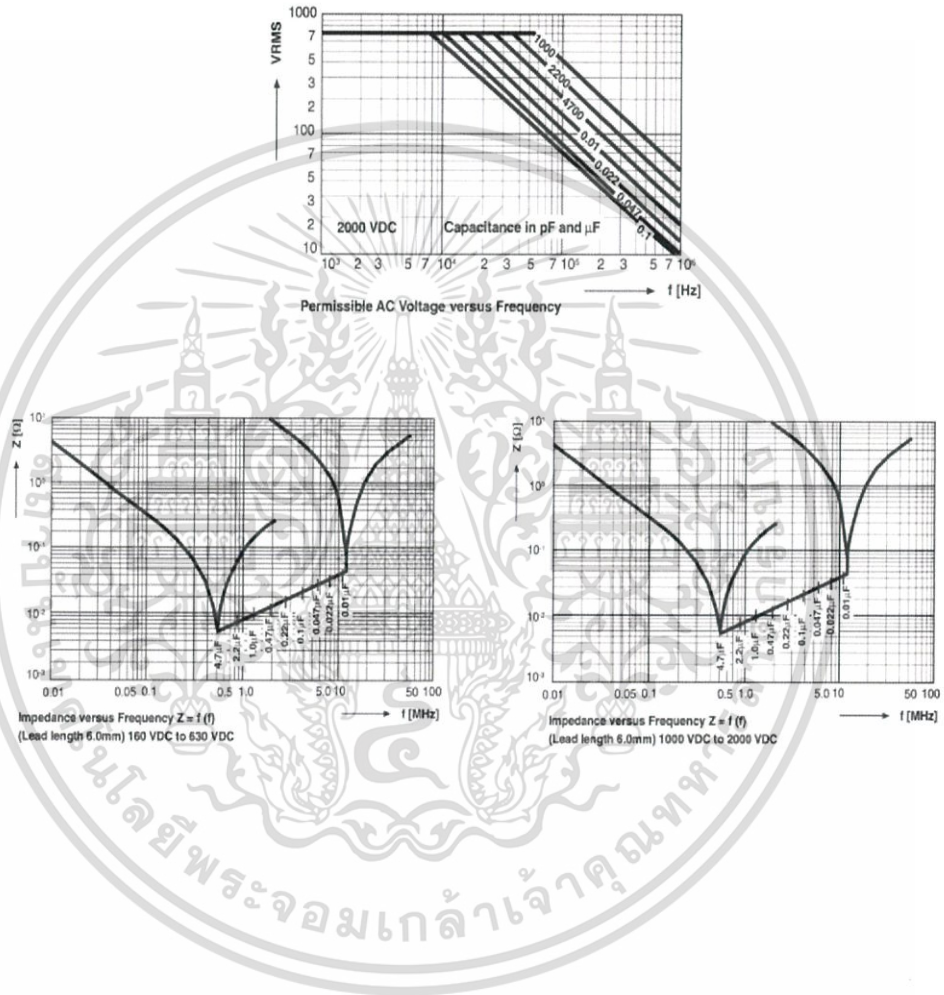


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Metallized Polypropylene Film Capacitor**  
 Related Document: IEC 60384-16

**MKP 1845**  
 Vishay Roederstein



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

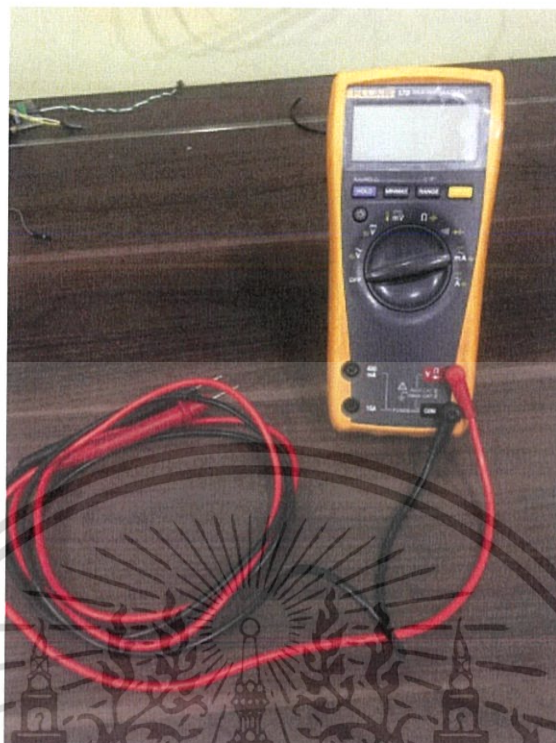


### Impulse High Voltage Generator

- Nominal Voltage : 1200 kV
- Charging Voltage :  $\pm 75$  kV
- Static Capacitance : 0.025  $\mu\text{F}$
- Charging Energy : 22.5 kJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





FLUKE 179 TRUE RMS MULTIMETER



ความต้านทานปรับค่าได้ 0 – 1000  $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายศุภกร อังคสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม พ.ศ.2538 ที่จังหวัด สุรินทร์ สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา และสำเร็จการ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุนทหารลาดกระบัง

E-mail: mike\_17123\_mvn@hotmail.com



นายสันติ กิรติยุต เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ.2537 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)๒ และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: santi\_keera@hotmail.com



นายอดิศักดิ์ สิทธิชนะศรี เกิดเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ.2537 ที่จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนวัดสุทธิวาราม และ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: vasbi-mr.ken@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้