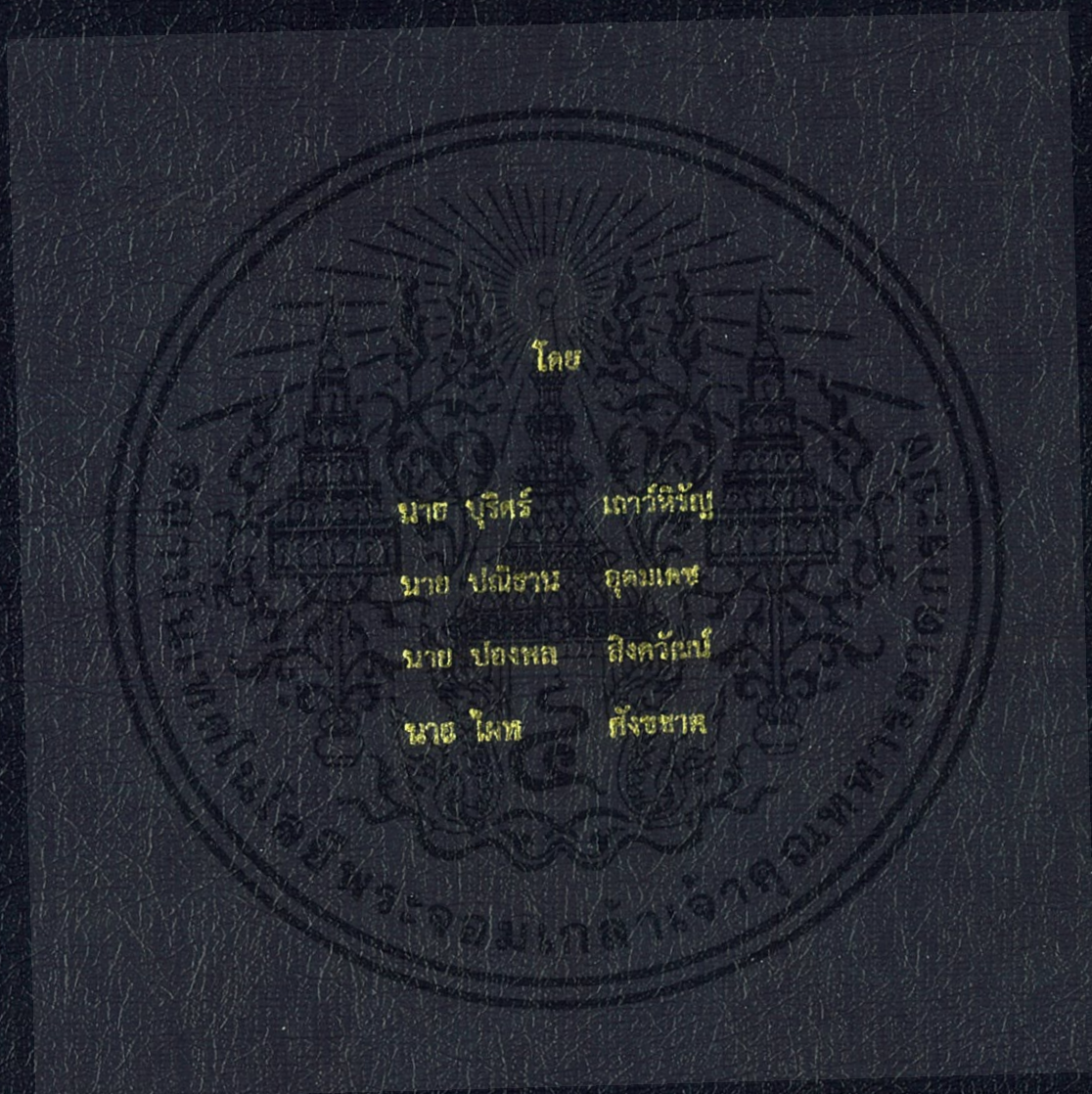


โวลต์เกจดิโวลเตอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 1000 kV
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคำานหนักสุตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2554

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 1000 kV

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER



T121613

โดย

นาย บุริศร์ เถาว์หิรัญ

นาย ปณิธาน อุดมเดช

นาย ปองพล สิงควัฒน์

นาย ไผท คังขชาติ

ร/พ.
๑๒๔๗๗
๒๕๕๔

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน, เดือน, ปี.....

121613

๒.๓.๒๕๕๕

b.....
i.....

๑๒๔๗๗๘๐

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๔

ปีการศึกษา 2554

โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 1000 kV

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

ดร.พีรวุฒิ ยุทธโววิท

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง กระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์พิกัด 1000kV

ผู้จัดทำ

1. นาย บุริศร์ เถาว์หิรัญ
2. นาย ปณิธาน อุดมเดช
3. นาย ปองพล สิงควัฒน์
4. นาย ไผท ศังขชาติ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท)

การออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม พิกัด 1000 kV

นาย บุริศร์	เถาว์หิรัญ	
นาย ปณิธาน	อุดมเดช	
นาย ปองพล	สิงควัฒน์	
นาย ไผท	ศังขชาติ	
รศ.ดร. อานันทวัฒน์	คุณากร	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. พีรุฒิ	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2554		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม ซึ่งมีพิกัดแรงดันกระแสสลับ 300 kV แรงดันกระแสตรง 300 kV และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 1000 kV ภาคแรงสูงประกอบด้วย ตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์โพลีโพรพิลีนฟิล์มต่ออนุกรมกันซึ่งมีค่าเก็บประจุภาคแรงสูงประมาณ 316 pF และมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน 870 M Ω ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ภาคแรงสูงบรรจุในท่อฉนวนพีวีซีสูงประมาณ 3 เมตร ภาคแรงต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์โพลีโพรพิลีนฟิล์ม 176 nF และมีตัวต้านทานชนิดเมทัลฟิล์ม 1.56 M Ω ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกระบอกทองเหลือง จากนั้นทำการทดสอบหาคุณสมบัติของระบบวัดตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) กำหนดได้แก่ ผลตอบสนองรูปคลื่น สเกลแฟคเตอร์ ค่าความเป็นเชิงเส้น ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER

Burit	Thaohiran	
Panithan	Udomdat	
Pongpon	Singkhawat	
Pathai	Sangkachart	
Assoc.Prof.Dr. Anantawat	Kunakorn	Supervisor
Dr. Peerawut	Yutthagowit	Supervisor
Year 2011		

ABSTRACT

This paper presents the design and construction of universal voltage divider for measuring DC, AC and impulse voltages at rated 300 kV, 300 kV and 1000 kV, respectively. The high voltage part consists of a metalized polypropylene film capacitor and a carbon film resistor. The capacitors are connected in series and are connected parallelly with resistor. The total capacitance and total resistance of the high voltage part are 316 pF and 870 M Ω respectively. The high voltage part with a height of 3 meters is contained inside a PVC pipe. The low voltage part consists of a metalized polypropylene film and a metal film resistor. Both are connected in parallel symmetrically. The total capacitance and total resistance of low voltage part are 176 nF and 1.56 M Ω , respectively. The characteristic performance of the voltage divider is tested according to the reference standard, i.e. unit step response, scale factor, linearity and withstand voltage tests.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รศ. ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาและดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท รวมไปถึงคุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณปิยะพล ถีทอง คุณสรรัชย์ อานอาชา คุณกฤษณ์ กิจวัฒนา คุณชยศ กองจันทร์ดี คุณบุญเลิศ เมฆลอย คุณบุษยพล เพาพาน คุณชาติอริยะ ประเสริฐสังข์ และคุณบัญญัติ ลีลาจริยกุล พี่ๆป.โท ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยแก้ไขปัญหาด้วยดี มาตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิก ใ้ใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การ สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการ จัดหาอุปกรณ์ต่างๆ 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 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ชนิดต่างๆ ของโวลท์เตจติไวเดอร์	7
2.2.1 โวลท์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน	7
2.2.2 โวลท์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทานมีซีลด์	8
2.2.3 โวลท์เตจติไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	9
2.2.4 โวลท์เตจติไวเดอร์แบบผสม	9
2.2.5 โวลท์เตจติไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง	10
2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เตจติไวเดอร์	11
2.3.1 ตัวเก็บประจุ	11
2.3.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	11
2.3.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	12
2.3.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	12
2.3.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	13
2.3.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	13
2.3.1.6 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	13
2.3.2 ตัวต้านทาน	14
2.3.2.1 คาร์บอนรีซิสเตอร์	14
2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	14
2.3.2.3 เมทัลฟิล์มรีซิสเตอร์	15
2.3.2.4 ไวร็วาร์ดรีซิสเตอร์	15
2.3.2.5 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบและตัวถังแบบเดี่ยว	16
2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การฉนวน	17
2.3.3.1 คุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุฉนวน	17
2.3.3.2 ประเภทของฉนวน	18
2.3.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด	21
2.3.4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น (Step response)	22
2.3.4.2 สเกลแฟกเตอร์	26
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	28
3.1 คุณลักษณะของโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่กำหนด	28
3.2 การออกแบบโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบผสม	28
3.2.1 การออกแบบภาคแรงสูง	28
3.2.1.1 ค่าวปไฟตามผิวฉนวน	29
3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน	29
3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ	30
3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจื่อย่อยตัวบนสุด	30
3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	31
3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย	32
3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์	32
3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ	33
3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก	34
3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	34
3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	34
3.3 รายละเอียดการประกอบสร้างโวลต์เตจดีไวเซอร์	35
3.3.1 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง	35
3.3.2 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ	36
3.3.3 โครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเซอร์	37
3.3.4 โวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์	38
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างตัวลดทอน	39
3.4.1 รายละเอียดการประกอบสร้างตัวลดทอน	40
3.5 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจดีไวเซอร์โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics	41
3.5.1 วงจรวัดแรงดันกระแสสลับ	41
3.5.2 วงจรวัดแรงดันกระแสตรง	43
3.5.3 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	44
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	46
4.1 การหาผลตอบสนองรูปขึ้น	46
4.1.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลดทอน	47
4.1.2 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เตจดีไวเซอร์	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2.1 กรณีไม่มีความต้านทานหน่วยภายนอกต่อผลตอบสนองรูปชั้น	48
4.1.3 ผลตอบสนองรูปชั้นของระบบวัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน	48
4.2 การหาสเกลแพกเตอร์	52
4.2.1 สเกลแพกเตอร์โดยการคำนวณ	52
4.2.2 สเกลแพกเตอร์โดยการวัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกพร้อมกัน	52
4.3 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	52
4.4 การทดสอบวัดแรงดันกระแสตรง	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลโวลต์เตจดีไวเดอร์	6
2.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	7
2.3 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน	8
2.4 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีซีลต์	8
2.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	9
2.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม	10
2.7 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหนึ่งวง	10
2.8 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ	11
2.9 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	11
2.10 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	12
2.11 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	12
2.12 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	13
2.13 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	14
2.14 คาร์บอนรีซิสเตอร์	14
2.15 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์	14
2.16 เมทัลฟิล์มรีซิสเตอร์	15
2.17 ไวราร์วาร์ดรีซิสเตอร์	15
2.18 ตัวต้านทานแบบดินตะขาบและตัวถังแบบเดี่ยว	16
2.19 รีโอสตาท (Rheostat)	16
2.20 โพลเทนทีโอมิเตอร์ (Potentiometer)	16
2.21 โมเลกุลของ SF ₆	20
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรกควาน์กับความดันของอากาศ และ SF ₆ เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง	21
2.23 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนของฉนวนตามธรรมชาติ	21
2.24 ผลตอบสนองรูปขึ้น g(t) และเวลาตอบสนอง T	22
2.25 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน	22
2.26 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	24
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x โดยที่ T_x คือเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์	24
2.28 ค่าแอมพลิจูดที่คลาดเคลื่อน	25
2.29 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่มีต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ แบบความต้านทาน	26
2.30 ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ	27
3.1 ท่อฉนวนพีวีซีวางอยู่บนพื้นที่ระนาบ	29
3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ	30
3.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	30
3.4 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์	33
3.6 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง	35
3.7 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ	36
3.8 โครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์	37
3.9 โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์	38
3.10 วงจรสมมูลของตัวลวดทองแบบผสม	39
3.11 ตัวลวดทองแบบผสม	40
3.12 วงจรการวัดแรงดันกระแสสลับ	41
3.13 แรงดันกระแสสลับอินพุต	41
3.14 แรงดันกระแสสลับเอาต์พุต	42
3.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรวัดแรงดันกระแสสลับ	42
3.16 วงจรการวัดแรงดันกระแสตรง	43
3.17 แรงดันกระแสตรงอินพุต	43
3.18 แรงดันกระแสตรงเอาต์พุต	43
3.19 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรวัดแรงดันกระแสตรง	44
3.20 วงจรการวัดแรงดันอิมพัลส์	44
3.21 แรงดันอิมพัลส์อินพุต	45
3.22 แรงดันอิมพัลส์เอาต์พุต	45
3.23 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	45
4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองของรูปขึ้น	46
4.2 วงจรการทดสอบผลตอบสนองของรูปขึ้นของตัวลวดทอง	47
4.3 ผลตอบสนองของรูปขึ้นของตัวลวดทอง	47
4.4 ไม่มีความต้านทานหน่วงภายนอก	48
4.5 ผลตอบสนองของรูปขึ้นของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน	50
4.6 ผลตอบสนองของรูปขึ้น	51
4.7 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	53
4.8 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูง	54
4.9 วงจรการทดสอบวัดแรงดันกระแสตรง	56
4.10 กราฟผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของโวลท์เตจดีไวเดอร์ ที่ระบบทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	58
5.1 โวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสมขนาด 300 kV	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำโครงการ	2
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF ₆	20
2.2 เงื่อนไขที่กำหนดของพารามิเตอร์ผลตอบสนองกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น	25
2.3 ข้อกำหนดลักษณะสมบัติของสเกลแพกเตอร์	26
3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง	28
4.1 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	57
5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบผสมขนาด 300 kV	59



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น การใช้เครื่องมือวัดโดยตรงเป็นเรื่องที่อันตราย ซึ่งต่างกับการวัดในระบบแรงดันต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการทราบค่าแรงดันในระบบไฟฟ้าแรงสูง จึงใช้หลักการการลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงก่อน ซึ่งมีความปลอดภัยในการวัดมากกว่าการวัดโดยตรง และทำให้มีความเหมาะสมต่อเครื่องมือที่วัด ดังนั้นจึงมีการออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ (Voltage Divider) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการลดทอนแรงดัน และเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นได้ว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างนั้นมีประสิทธิภาพพอสามารถที่จะนำไปใช้งานได้ เราจึงควรที่จะเข้าใจในหลักการทำงานของอุปกรณ์และออกแบบสร้างให้ตรงตามที่มาตราฐานสากลได้กำหนด โดยมาตราฐานสากลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ IEC60060-1 [1], IEC60060-2 [2], IEEE (standard 4)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดไฟฟ้าแรงดันสูง โดยสามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการออกแบบของโวลต์เตจดีไวเดอร์
3. เพื่อรองรับงานการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูง
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดงานวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูงของประเทศ
5. เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษามาตราฐานและวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยทำการสืบค้นค้นจากฐานข้อมูลของ IEC, ปรินูญานิพนธ์ และวิทยานิพนธ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการวัดแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์
3. ออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดสูงสุด 300 kV แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดสูงสุด 300 kV และสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัดสูงสุด 1000 kV
4. ทดสอบโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการออกแบบสร้าง ให้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามมาตราฐานกำหนด

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
4. ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
5. วิเคราะห์และปรับปรุงอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้ตามมาตรฐานกำหนด
6. จัดทำเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำโครงการ

แผนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2554											
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
1.ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง	←	→										
2.ศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง		←	→									
3.ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง		←				→						
4.ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง				←		→						
5.วิเคราะห์และปรับปรุงอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้ตามมาตรฐานกำหนด					←					→		
6.รวบรวมเนื้อหาและทฤษฎีทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										←		→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

สามารถออกแบบสร้างได้สำเร็จ และนำไปใช้ในการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปีพ.ศ. 2524 มีการออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์ ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยคุณวรา จุฑทอง [3] งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ความต้านทานแบบเส้นลวดพันแบบปลอดภัยอินดักแตนซ์ มีค่าความต้านทาน 7.17 กิโลโอห์ม ผลการทดสอบลักษณะสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้น ได้เวลาตอบสนองของระบบวัด 27 นาโนวินาที เมื่อปรับปรุงโดยใส่ซิลด์ ซึ่งสามารถลดเวลาตอบสนองลงได้ เหลือเพียง 20 นาโนวินาที ความเที่ยงตรงในการวัดเมื่อเทียบกับโวลต์เตจดีไวเดอร์มาตรฐาน มีความคลาดเคลื่อน 2.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตามมาตรฐานไออีซียอมให้คลาดเคลื่อนได้ 3 เปอร์เซ็นต์

ในปีพ.ศ. 2539 มีการออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงขนาด 1000 กิโลโวลต์ ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยคุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ [4] พบว่ากรณีโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่มีการใส่ซิลด์จะได้เวลาตอบสนองที่เร็วกว่ากรณีไม่มีซิลด์ เนื่องจากค่าเก็บประจุสเตรย์มีค่าลดลง แต่ควรระวังไม่ให้ซิลด์มีขนาดใหญ่เกินไปเพราะจะทำให้เกิดค่าเก็บประจุนานกับโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งจะเกิดเรโซแนนซ์กับค่าความเหนี่ยวนำของสายนำ ทำให้เกิดการแกว่งของผลตอบสนองรูปคลื่น สำหรับความต้านหน่วงนั้นมีผลต่อผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุนั้นคือจะได้เวลาตอบสนองที่ช้ามาก โดยค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองเกินค่ามาตรฐานที่แนะนำไว้แต่เมื่อต่อตัวต้านทานหน่วงอนุกรมกระจายภายในตลอดภาคแรงสูง จะได้เวลาตอบสนองที่เร็วแต่จะหน่วงการแกว่งเนื่องจากคลื่นสะท้อนภายในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์เท่านั้น ซึ่งยังคงต้องใช้ตัวต้านทานหน่วงภายนอกเพื่อหน่วงการแกว่งที่เกิดจากการเรโซแนนซ์ของระบบวัด และยังพบอีกว่าในการใช้ตัวต้านทานหน่วงชนิดฟิล์มโลหะพบว่าไม่เหมาะสมเนื่องจากตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะนี้มีมวลความต้านทานน้อยทำให้ขีดจำกัดความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากพลังงานสูญเสียในตัวความต้านทานต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยใช้ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนแทน

ในปีพ.ศ. 2543 มีการพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น โดยคุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ และคุณสำรวย สังข์สะอาด [5] งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ขนาด 500 กิโลโวลต์ โดยภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุน้อย ชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มต่ออนุกรมกัน ได้ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงประมาณ 400 พิโคฟารัด บรรจุอยู่ในท่อพีวีซีสูง 1 เมตร ผลการทดสอบที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1211-Technical Report Type2 (1994)

ในปีพ.ศ. 2543 มีการออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 กิโลโวลต์ ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยคุณนิภัทร์ ทุ่งสี และคุณะวิชัย[6] งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ โดยมีองค์ประกอบหลักแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุน้อย แรงสูงขนาดพิกัด 100 กิโลโวลต์ ซึ่งนำตัวเก็บประจุน้อยชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม มาต่ออนุกรมมีค่าความจุไฟฟ้ารวม 95.82 พิโคฟารัด แล้วเคลือบด้วยเรซินทั้งหมดบรรจุอยู่ในท่อพลาสติกใส และทำการฉนวนภายในด้วยน้ำมันหม้อแปลง ภาคแรงต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุนิดเดียวกับภาคแรงสูง มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 67.123 นาโนฟารัด บรรจุอยู่ในกล่องโลหะติดอยู่ที่ฐานตัวเก็บประจุภาคแรงสูง สเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์มีค่า 700 การออกแบบและทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60 (1994) โดยงานวิจัยนี้มีข้อสังเกตคือ การต่อตัวเก็บประจุน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างตัวเก็บประจุ และการบัดกรีระหว่างตัวเก็บประจุต้องพยายามไม่ให้มีส่วนแหลมคมอันจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงตรงจุดที่มีความแหลมคมซึ่งอาจจะทำให้เกิดการเบรกดาวน การเติมน้ำมันหม้อแปลงต้องระวังเรื่องฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะเติมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเป็นฉนวนและควรตรวจสอบเป็นประจำว่ามีการรั่วซึมของน้ำมันหม้อแปลงหรือไม่

ในปีพ.ศ. 2543 มีการออกแบบและสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสตรงแบบความต้านทาน ขนาด 100 กิโลโวลต์ ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยคุณเจษฎา ฟ้าเลิศ และคณะวิจัย [7] งานวิจัยนี้ได้เสนอผลการศึกษาค้นคว้าและออกแบบเพื่อจัดสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน ขนาด 100 กิโลโวลต์ สำหรับแรงดันกระแสตรง โดยความต้านทานภาคแรงสูงมีขนาด 100 เมกะโอห์ม สร้างจากตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) ขนาดตัวละ 1 เมกะโอห์ม จำนวน 100 ตัว โดยแต่ละตัวทำการหล่อทับด้วยเรซินเพื่อป้องกันน้ำมันหม้อแปลงซึมเข้าไปในตัวความต้านทานซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานได้ ตัวความต้านทานแต่ละตัวจะต่ออนุกรมกันบนแผ่นอาคริลิกใสเป็นชั้นๆ ในลักษณะเกลียวสว่าน โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นการฉนวน ส่วนความต้านทานภาคแรงต่ำขนาด 100 กิโลโอห์ม ใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะขนาดตัวละ 1 เมกะโอห์ม จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน ซึ่งมีอัตราส่วนแรงดันของตัวแบ่งแรงดันที่ 1000 : 1 ผลที่ได้จากการสร้างตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทานนี้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [2] กล่าวคือ มีค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) $\pm 1\%$

ในปีพ.ศ. 2545 มีการพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นโดยรองศาสตราจารย์สำรวย สังข์สะอาด และคณะวิจัย [8] งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ขนาด 500 กิโลโวลต์ โดยภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจูงยอ ชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มต่ออนุกรมกัน ได้ค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 387 พิโคฟารัด เวลาตอบสนองบางส่วนของระบบวัดมีค่า 2.2 นาโนวินาที และได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ 14,412 ทำการทดสอบคุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [2] โดยงานวิจัยนี้มีข้อสังเกตคือ เวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้มีค่ามากกว่าที่คำนวณ โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Leakage inductance) ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่นำมาประกอบสร้าง ซึ่งทำการแก้ไขโดยการใส่ตัวเหนี่ยวนำในภาคแรงต่ำเพื่อชดเชยผลดังกล่าว วิธีการปรับปรุงผลตอบสนองรูปขึ้นเพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนด สามารถทำได้โดยการลดค่าเก็บประจุสูง

ในปีพ.ศ. 2551 มีการพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนายจิรสิทธิ์ ชัยประภา และคณะวิจัย [9] งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงด้านต่างๆ ได้แก่ ผลของขนาดตัวต้านทานและขนาดของตัวเก็บประจุต่อผลตอบสนองรูปขึ้นรูปแบบการต่อตัวต้านทานหน่วงแบบต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ และลักษณะของผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูงเกิดความเหนี่ยวนำค่าต่างๆ ทั้งภาคแรงสูงและต่ำ

ในปีพ.ศ. 2551 มีการออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม สำหรับวัดแรงดันสูง กระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 100 kV ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยคุณกীরติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์ และคณะวิจัย [10] งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยใช้เทคนิควงจรร่วม R-C ประกอบด้วยวงจรงยอที่มี

คุณสมบัติตอบสนองต่อแรงดันที่ต้องการวัดแตกต่างกัน ต่อซ้อนกันเป็นองค์ประกอบร่วมภาคแรงสูง และแรงต่ำเดียวกัน ใช้ตัวเก็บประจุย่อยชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์มและตัวต้านทานย่อยชนิดฟิล์มโลหะต่อ อันดับเป็นองค์ประกอบภาคแรงสูงและแรงต่ำ ภาคแรงสูงทั้งหมดบรรจุในท่อฉนวนภายในอัดด้วย ฉนวนก๊าซ SF₆ ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกล่องซิลิโคนอะลูมิเนียม การทดสอบและประเมินผล คุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [2] จากผลการทดสอบ พบว่า โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ออกสร้างขึ้นสามารถใช้วัดแรงดันสูงทั้ง 3 แบบ ได้เป็นอย่างดีและมี คุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด



บทที่ 2

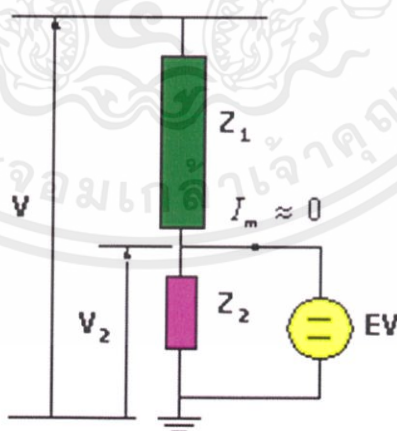
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การวัดแรงดันสูงนอกจากกระยะระหว่างผู้วัดและอุปกรณ์วัดที่ปลอดภัยโดยอาศัยหลักการฉนวนที่ถูกต้องแล้ว การวัดแรงดันสูงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วย ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญได้แก่ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ในขีดความสามารถของเครื่องวัด ความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดแรงดันอิมพัลส์

เทคนิคการวัดแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสดตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันอิมพัลส์นี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสดตรง นั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และในระบบส่งจ่ายจำหน่าย

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์สองชุดต่ออนุกรมกันอยู่คือ ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) ของโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้นจะรับแรงดันแทบทั้งหมดตกคร่อมตัวมัน อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) จะเป็นส่วนแรงดันตกคร่อมเข้าเครื่องวัด ปกติปลายด้านบนของโวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นขั้วต่อแรงดันสูง ส่วนปลายด้านล่างของโวลต์เตจดีไวเดอร์เป็นศักย์ดิน ตัวประกอบวงจรทั้งสองภาคของโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่างโวลต์เตจดีไวเดอร์จะได้ชื่อตามตัวประกอบวงจรและลักษณะการจัดวางตัวประกอบ วงจรเหล่านั้น คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ และ โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมตามลำดับ



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลโวลต์เตจดีไวเดอร์

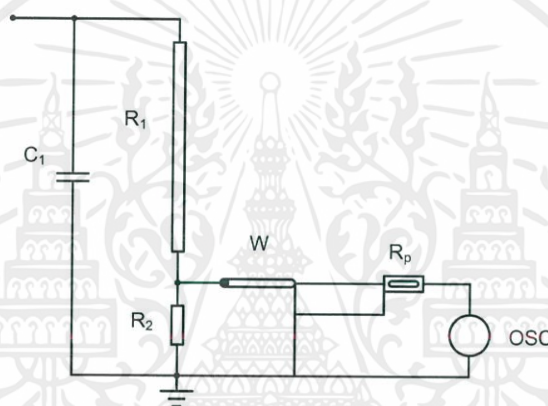
2.2 ชนิดต่างๆ ของโวลท์เตจติไวเดอร์ [10,11]

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- แรงดันกระแสสลับ
- แรงดันกระแสตรง
- แรงดันอิมพัลส์

ซึ่งการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลท์เตจติไวเดอร์ เป็นการวัดที่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นอุปกรณ์วัดด้านแรงต่ำ

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



รูปที่ 2.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

โวลท์เตจติไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิดสามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้ดังนี้

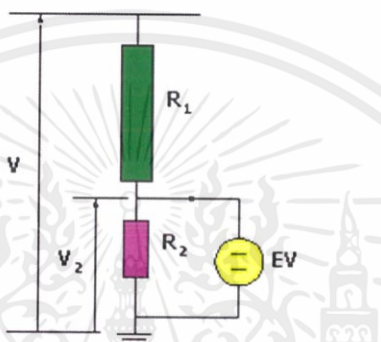
- แบบความต้านทาน (Resistor voltage divider)
- แบบความต้านทานมีชีลด์ (Shielded resistor voltage divider)
- แบบตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor voltage divider)
- แบบผสม (Mixed voltage divider)
- แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitor voltage divider)

2.2.1 โวลท์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลท์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน คือ โวลท์เตจติไวเดอร์ที่อิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดพันให้เกิดความเหนียวนำต่ำ แห่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง

โวลต์เตจติไวเตอร์ชนิดนี้ใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่า 100 กิโลโวลต์เหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัดแรงดันสูงอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจากความจุสเตรย์ลงดิน จึงนิยมใช้วัดไม่เกิน 2,300 กิโลโวลต์

ความถูกต้องในการวัดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทานและขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันต่ำคร่อมความต้านทานของภาคแรงต่ำซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์สูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่งก็คือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวเนื่องจากศักย์แรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนแรงดันสูงได้ ในขณะที่เดียวกันกระแสรั่วไหลตามผิวอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ถ้าหากความต้านทานที่ใช้แรงดันสูงเกินไป นั่นคือ $I \geq 0.1$ มิลลิแอมป์, $R \leq 10$ เมกกะโอห์ม/กิโลโวลต์



รูปที่ 2.3 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน

2.2.2 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทานมีซิลด์

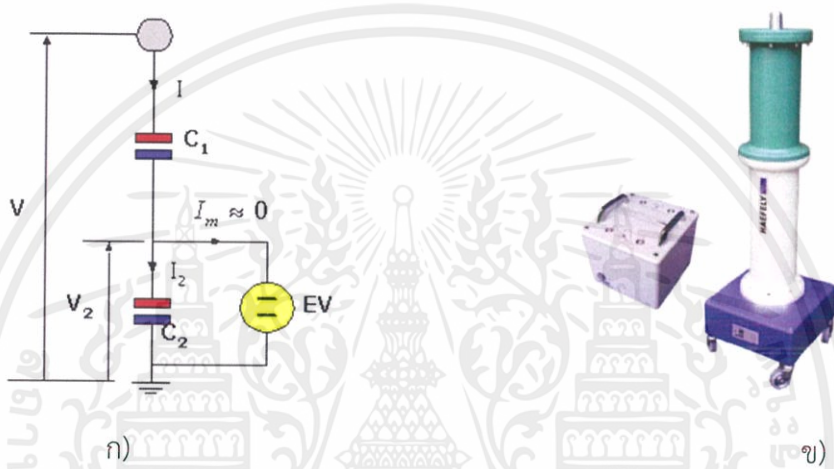
โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะสมบัติความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองรูปคลื่นได้ต่างๆ กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของซิลด์อิเล็กทรอนิกส์ และขึ้นอยู่กับารออกแบบความต้านทานในภาคแรงสูงให้เป็นเชิงเส้นมากขึ้นเพียงใด เมื่อความสูงของโวลต์เตจติไวเตอร์มากขึ้นอาจใช้ซิลด์อิเล็กทรอนิกส์หลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดต่อกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไป โวลต์เตจติไวเตอร์ขนาดต่ำกว่า 500 กิโลโวลต์ ใช้ซิลด์อิเล็กทรอนิกส์อันเดียวติดตั้งตอนบนก็เพียงพอ



รูปที่ 2.4 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวต้านทานมีซิลด์

2.2.3 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำเป็นแบบตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุย้อยหรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุย้อยจะใช้ตัวเก็บประจุย้อยมาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าความเก็บประจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุย้อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมันหรือแบบเซรามิกเป็นต้น ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบอัดความดัน มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม ก๊าซอัดความดันที่ใช้อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซซิลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันที่คงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ ใช้ในการวัดแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 2.5 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

ก) วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเตอร์

เมื่อ C_1 คือตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ข) โวลต์เตจติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ

2.2.4 โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสม

โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้ได้ดัดแปลงมาจากโวลต์เตจติไวเตอร์แบบความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจุย้อยขนานเข้าไปกับความต้านทานเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่าของความจุสเตรย์ลงดิน และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน โวลต์เตจติไวเตอร์แบบนี้เหมาะสมสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป โวลต์เตจติไวเตอร์แบบผสมแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม

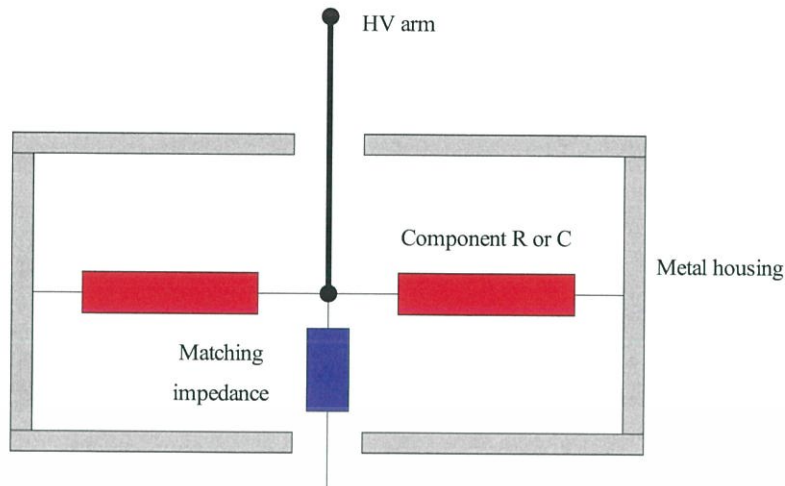
2.2.5 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ภาคแรงสูง และภาคแรงดันต่ำ ประกอบด้วยความต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.7 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ถ้าเลือกใช้ตัวต้านทานที่เหมาะสม โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดี แม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 2.7 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องใช้เวลาตอบสนองที่ไวการที่มีความเหนียวช้าลงในระบบวัดโดยเฉพาะภาคแรงต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่งการจืดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้ความเหนียวช้าลงน้อยที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างมาก การจืดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้มีความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนียวช้าได้ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เตจดีไวเดอร์

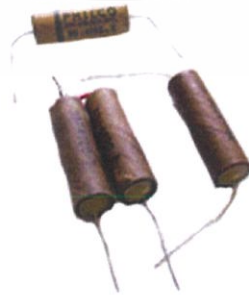
โวลท์เตจดีไวเดอร์จะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์จำนวน 2 ชุด ต่อกันซึ่งเราจะเรียกชื่อของโวลท์เตจดีไวเดอร์แต่ละชนิด ตามลักษณะการต่ออุปกรณ์ภายในโวลท์เตจดีไวเดอร์ภายในอิมพีแดนซ์ ซึ่งการสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์จำเป็นต้องทราบรายละเอียดและคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างโวลท์เตจดีไวเดอร์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ การฉนวน เป็นต้น

2.3.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานในรูปแบบไฟฟ้า ในวงจรกำลังมักจะใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้าไปในวงจรเพื่อแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ ตัวเก็บประจุที่ใช้งานมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปดัง ชนิดของตัวเก็บประจุแบ่งออกเป็น 6 ชนิดดังนี้ [12]

2.3.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

ใช้กระดาษชุบขี้ผึ้งเป็นไดอิเล็กตริก มีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัดถึง 1 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 200 ถึง 1600 โวลท์



รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

2.3.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ใช้งานที่ความถี่สูงได้ดี (มากกว่า 200 เมกะเฮิรตซ์) มีค่าความจุต่ำ สัมประสิทธิ์ค่าเก็บประจุต่ออุณหภูมิสามารถควบคุมให้เป็นบวกหรือลบก็ได้ ค่าความสูญเสีย้น้อยมากถึงแม้ว่าจะใช้ในย่านความถี่สูง ตัวเก็บประจุแบบไมก้าอาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบโลหะฟอยล์ (Metal foil) โครงสร้างจะเป็นแผ่นไมก้าเรียงสลับกับแผ่นโลหะฟอยล์ และแบบซิลเวอร์ไมก้า (Silvered mica) โครงสร้างจะเป็นแผ่นไมก้าเรียงสลับกับแผ่นไมก้าฉาบด้วยเงิน ซึ่งจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงค่าเก็บประจุต่ออุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

2.3.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามค่าไดอิเล็กตริก

ดังนี้

- ไดอิเล็กตริกต่ำ (Low Dielectric) ขนาดโต พิกัดสูงสุดประมาณ 5000 พิโคฟารัด มีทั้งชนิดที่สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิเป็น 0 และเป็นลบ มีคุณสมบัติที่ตีเยี่ยมเมื่อใช้ในย่านความถี่เชิงวิทยุและวงจรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงที่ต้องการค่าเก็บประจุน้อยๆ
- ไดอิเล็กตริกปานกลาง (Medium Dielectric) มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิสูง คุณสมบัติดีกว่าแบบ Low Dielectric แต่ให้ค่าเก็บประจุสูงกว่า
- ไดอิเล็กตริกสูง (High Dielectric) นำไปใช้งานในวงจรทั่วไปได้ดี ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก มีค่าเก็บประจุสูง แต่มีข้อพิงระวังคือที่แรงดันพิกัดหรืออุณหภูมิสูงๆ อาจไม่สามารถใช้งานได้ถึงค่าพิกัดที่ระบุไว้



รูปที่ 2.11 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

2.3.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

สารไดอิเล็กตริกที่ใช้จะเป็นประเภทฟิล์มพลาสติก (Plastic film) ส่วนอิเล็กโตรดจะเป็นอลูมิเนียมแบบแผ่นหรืออลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นฟิล์ม ลักษณะมิติของตัวเก็บประจุแบบนี้มีหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อค่าความเหนียวนำแฝงที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน การแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุแบบฟิล์มแบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กตริกได้ดังนี้

- ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ ออกแบบมาใช้งานในย่านอณหภูมิค่อนข้างกว้าง แต่มีข้อจำกัดตรงที่จะต้องใช้งาน ณ จุดอุณหภูมิที่ระบุไว้เท่านั้น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุจะยังคงเดิมตามพิกัดที่ระบุ
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีสไตรีน ออกแบบมาใช้งานกับแรงดันต่ำ ที่อุณหภูมिन้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส โพลีสไตรีนมีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีเยี่ยม แต่ว่ามีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีขนาดโตกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่นที่พิกัดความจุไฟฟ้าเดียวกัน
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีคาบอนเนต ออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติดี ใช้งานในย่านอณหภูมิกว้าง
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรพิลีน ขนาดมิติของตัวเก็บประจุชนิดนี้ค่อนข้างเล็กกะทัดรัด มีค่าเสถียรภาพทางอณหภูมิปานกลาง
- ตัวเก็บประจุแบบเทพลอน ออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียสและมีค่าความเป็นฉนวนสูงมาก

2.3.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลต์

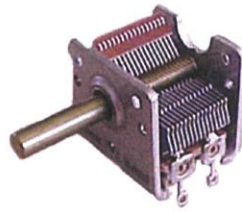
มีค่าเก็บประจุสูง โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1 ไมโครฟารัดถึง 0.1 ฟารัด พิกัดแรงดันใช้งานสูงถึง 500 โวลต์ ข้อด้อยของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือ มีความคลาดเคลื่อนสูงอยู่ในช่วง -20 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และมีกระแสรั่วไหลสูง ตัวเก็บประจุชนิดนี้อาจจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อยด้วยกันตามชนิดของอิเล็กโตรดได้แก่อลูมิเนียมหรือแทนทาลัมซึ่งมีทั้งแบบมีขั้วหรือไม่มีขั้วก็ได้ โดยทั่วไปจะเป็นแบบมีขั้ว สารไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะเป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นรอบแผ่นอิเล็กโตรดโดยวิธีแอโนไดเซชัน (Anodization)



รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลต์

2.3.1.6 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

พิกัดค่าเก็บประจุอยู่ในช่วงพิโคฟารัดไปจนถึงหลายร้อยพิโคฟารัด พิกัดแรงดันอยู่ในช่วงประมาณ 200 โวลต์จนถึง 3000 โวลต์ มีค่าความสูญเสียเล็กน้อยมากประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

2.3.2 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลในวงจร ตัวต้านทานมีหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป แบ่งออกเป็น 6 ชนิดดังนี้ [12]

2.3.2.1 คาร์บอนรีซิสเตอร์

มีความน่าเชื่อถือสูง มีราคาถูก ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่า 1 โอห์มถึง 22 เมกะโอห์ม มีค่าความผิดพลาด 3 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ พิกัดกำลัง 0.125 ถึง 2 วัตต์ สัมประสิทธิ์เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ (T_c) มีค่าประมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ต่อองศาเซลเซียสที่อุณหภูมิ 0 ถึง 160 องศาเซลเซียส ใช้งานได้ดีในย่าน 0 ถึง 60 องศาเซลเซียสโดยที่ค่า T_c สามารถละลายได้ สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นจากตัวต้านทานชนิดนี้มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.14 คาร์บอนรีซิสเตอร์

2.3.2.2 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์

มีค่าความต้านทานสูงมากอยู่ในช่วง 10 โอห์มถึง 100 เมกะโอห์ม มีค่า T_c เป็นลบ ค่าความคลาดเคลื่อน 0.5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปที่พิกัดน้อยกว่า 100 กิโลโอห์ม มีการสร้างสัญญาณรบกวนน้อย แต่ราคาแพง



รูปที่ 2.15 คาร์บอนฟิล์มรีซิสเตอร์

2.3.2.3 เมทัลฟิล์มรีซิสเตอร์

ใช้ในงานที่ต้องการสัญญาณรบกวนต่ำพิกัด 0.1 โอห์มถึง 1.5 เมกะโอห์ม ค่า T_c ต่ำ (0.0001 เพอร์เซ็นต์ต่อองศาเซลเซียส) สัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้นมีค่าน้อยมาก พิกัดกำลัง 0.1 ถึง 1 วัตต์ ความคลาดเคลื่อน 0.1 ถึง 2 เพอร์เซ็นต์ แต่มีราคาแพง

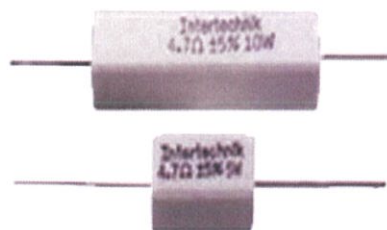


รูปที่ 2.16 เมทัลฟิล์มรีซิสเตอร์

2.3.2.4 ไวร็วาวด์รีซิสเตอร์

ไวร็วาวด์รีซิสเตอร์แบ่งเป็นประเภทใหญ่ได้ 3 ประเภทคือ แบบมีกำลังสูง, ความถูกต้องสูง และแบบใช้งานทั่วไป ปกติแล้วตัวต้านทานแบบไวร็วาวด์ จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูง แต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวต้านทานแบบไวร็วาวด์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำคือแบบไบฟีลาร์ (Bifilar wound Resistors) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวต้านทานไวร็วาวด์แบบไร้ความเหนี่ยวนำ (Non-inductive wirewound resistors)

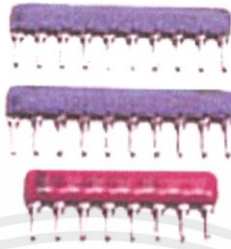
- แบบมีกำลังสูง มีพิกัด 1 โอห์มถึง 100 กิโลโอห์ม พิกัดกำลัง 5 ถึง 200 วัตต์ มีค่าความผิดพลาด 5 ถึง 10 เพอร์เซ็นต์ นำไปใช้งานประเภทเครื่องเสียง ต่อร่วมกับทรานซิสเตอร์
- แบบมีความถูกต้องสูง ค่า T_c มีค่าต่ำคือ 0.0005 เพอร์เซ็นต์ต่อองศาเซลเซียสมีเสถียรภาพสูงมากๆ โดยทั่วไปอยู่ในช่วงย่านความถูกต้อง 1 เพอร์เซ็นต์ ความต้านทานอยู่ในช่วง 1 โอห์มถึง 100 กิโลโอห์ม ใช้งานประเภทที่ความเที่ยงตรงสูง พิกัดกำลัง 0.25 ถึง 1 วัตต์ โดยที่พิกัด 3, 5, 10 และ 25 วัตต์ยังสามารถหาซื้อได้
- แบบทั่วไปค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 0.25 โอห์มถึง 10 กิโลโอห์ม พิกัดกำลัง 0.5, 1 และ 3 วัตต์ เป็นความต้านทานแบบเดียวกับความต้านทานแบบคาร์บอน ค่า T_c ต่ำ



รูปที่ 2.17 ไวร็วาวด์รีซิสเตอร์

2.3.2.5 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบและตัวถังแบบเดี่ยว

พิกัดประมาณ 10 โอห์มถึง 30 เมกะโอห์ม พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงถึง 10 วัตต์ ค่าความคลาดเคลื่อน 0.1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสำหรับงานซึ่งต้องการเสถียรภาพและความเที่ยงตรงสูงกว่าแบบคาร์บอน สามารถใช้งานในวงจรกระแสสลับได้ดีคือ จะมีย่านความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูงเป็นเมกะเฮิรตซ์ได้และจะมีค่า T_c ต่ำ



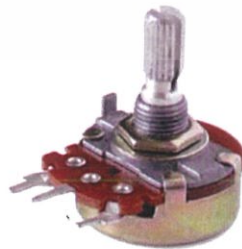
รูปที่ 2.18 ตัวต้านทานแบบตีนตะขาบและตัวถังแบบเดี่ยว

2.3.2.6 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้

ตัวต้านทานชนิดนี้สามารถเปลี่ยนค่าได้โดยการใช้แกนหมุนแบบวงแหวน หรือเลื่อนแกน พิกัด 5 โอห์มถึง 1 เมกะโอห์ม พิกัดกำลัง 0.2 ถึง 1 วัตต์ ใช้งานเป็นรีโอสเตท (Rheostat) เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรหรือใช้เป็นแบบโพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) สำหรับควบคุมโวลต์เตจของวงจรหรือใช้สำหรับปรับสัญญาณต่างๆในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เช่น โวลุ่ม (Volume), เบส (Bass) และทรีเบิล (Treble) หรือปุ่มปรับความสว่างของโทรทัศน์และอื่นๆ



รูปที่ 1.19 รีโอสเตท (Rheostat)



รูปที่ 1.20 โพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer)

2.3.3 การฉนวน [11,13]

ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าให้กับตัวนำหรือส่วนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดลัดวงจรถึงกัน

2.3.3.1 คุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุฉนวน

คุณสมบัติที่ต้องการของวัสดุฉนวนที่ดีและเงื่อนไขการออกแบบการฉนวนวัสดุฉนวนที่ดีจะพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

1) คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (E_b) สูง เพื่อให้ขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อย
- มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน
- มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก (P_d) ต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด
- มีความคงทนต่อร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (tracking) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน (corrosion) หรือการเสื่อมสภาพของฉนวน
- คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความทนต่อแรงกล เนื่องจากในทางปฏิบัติ วัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้ว ยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง ตัวอย่าง เช่น แรงระเบิดจากความดันของก๊าซภายใน เป็นต้น

2) คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกันขณะเกิดผิวดร็อทก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมากมาย ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนฉนวนเหล่านี้ได้ ช่วยระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์ขยายตัวทางความร้อนต่ำ

3) มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้

4) คุณสมบัติของฉนวนที่ดีต้องทนต่อสภาพแวดล้อม ณ. ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมัน ทนต่อโอโซน ไม่ดูดซึมความชื้น ทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

การออกแบบฉนวนขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของฉนวน
- คุณสมบัติของฉนวน ลักษณะรูปแบบสนามไฟฟ้า และความเครียดสนามไฟฟ้า ชนิดแบบหรือรูปคลื่นแรงดัน (กระแสสลับ กระแสตรง และทรานเซียนต์)
- ระดับแรงดันระบบ HV, EHV และ UHV
- สภาพแวดล้อม ความเปราะเปื้อน และสภาพบรรยากาศ รวมปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
- ลักษณะการฉนวน (การฉนวนภายนอก และการฉนวนภายใน การฉนวนคืนสู่สภาพเดิมได้กับคืนสู่สภาพเดิมไม่ได้)
- ความสำคัญของการฉนวนที่แตกต่างกัน

2.3.3.2 ประเภทของฉนวน

โดยทั่วไปฉนวนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวและฉนวนก๊าซ โดยฉนวนแต่ละประเภทนอกจากจะทำหน้าที่ทางไฟฟ้าแล้วยังมีหน้าที่ด้านต่างๆอีกเช่น ฉนวนเหลวและฉนวนก๊าซ ยังช่วยระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอีกด้วย ในขณะที่ฉนวนแข็งยังรองรับแรงทางกลของตัวนำไฟฟ้าที่ฉนวนนั้นรองรับอยู่

การฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมักจะเป็นการใช้งานฉนวนร่วมกันมากกว่าหนึ่งประเภท

2.3.3.2.1 ฉนวนแข็ง

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength)
- เพอร์มิตติวิตี (ϵ)
- แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)
- ความคงทนต่อแรงกล
- ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมีและความร้อน

ฉนวนแข็ง ทำหน้าที่รองรับน้ำหนัก ยึดให้มั่นคง มีค่า E_b สูงกว่าก๊าซและของเหลว แต่จะเสียดสภาพฉนวนอย่างถาวรหลังเกิดเบรกดาวน กลับคืนสู่สภาพฉนวนไม่ได้ มี P_d ระบายความร้อนได้ยาก ถ้ามีฟองก๊าซจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ฉนวนแข็ง เช่น พอร์ซเลน, PE, XLPE, คาสท์เรซิน หรือไฟเบอร์โกลแอส

ฉนวนแข็งที่มีการใช้งานทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่

- กระดาษและกระดาษอัดแรง (Paper and Boards) ความหนาและความหนาแน่นของกระดาษขึ้นอยู่กับหน้าที่การใช้งาน กระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุความถี่สูงและเป็นฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง (1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในตัวเก็บประจุแบบมีขั้วเพื่อเก็บพลังงาน หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง และกระดาษยังมีคุณสมบัติที่ดีอีกอย่างหนึ่งคือดูดซับความชื้นได้
- แก้ว คือเซรามิกที่ถูกทำขึ้นจากสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง แก้วที่นิยมนำไปใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังจะอยู่ในรูปแบบของ Fiber Glass ซึ่งมีการนำไปใช้ในหม้อแปลง นำไปผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อให้เป็น Resin-impregnated Fiberglass สำหรับการทำลูกถ้วยฉนวนผสม (Composite Insulator)
- เซรามิก ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะและอโลหะรวมกันอยู่ด้วยพันธะไอออนิกและหรือพันธะโควาเลนต์ที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดในการเคลื่อนที่เป็นผลทำให้เซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและทางความร้อนที่ดี และมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงแต่ค่อนข้างเปราะ มีความทนต่อแรงดึงต่ำ มีความเหนียวต่ำสามารถทนต่อแรงกดได้มากกว่าแรงดึงประมาณ 5-10 เท่า
- ยาง เป็นวัสดุประเภทโพลีเมอร์ชนิดที่มีทั้งตามธรรมชาติและเกิดจากสารสังเคราะห์ มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นได้ดี
- โพลีเมอร์ ตัวอย่างโพลีเมอร์เด่นๆ ที่ใช้กันทั่วไปคือ โพลีเอทิลีน (PE), โพลีเอสเตอร์, โพลีสไตรีน (PS), โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC), ไนลอนและอีพ็อกซี-เรซิน

2.3.3.2.2 ฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวมีค่าความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์สูงกว่าอากาศที่สภาวะความดันบรรยากาศ มีความสามารถในการคืนตัวเป็นฉนวนอีกครั้งหลังจากเกิดเบรกดาวน์ มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำ (ประมาณ 2-2.5) และความสูญเสียต่ำ ($\tan\delta \leq 10^{-4}$) และสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างต่างๆเพื่อระบายความร้อนได้เกือบทุกส่วนของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวยังมีข้อเสียอยู่ด้วย เช่น จำเป็นที่จะต้องมีการบำรุงรักษา และมีโอกาสที่จะติดไฟได้

ฉนวนเหลวที่ใช้กันมาก ก็คือน้ำมันหม้อแปลง ใช้เป็นฉนวนแทรกซึมในหม้อแปลงไฟฟ้าในเคเบิลแรงสูง ตัวเก็บประจุ ปลอกฉนวนตัวนำ และเซอร์กิตเบรกเกอร์

คุณสมบัติที่ต้องการของฉนวนเหลว

- ความถ่วงจำเพาะ
- จุดติดไฟสูง คือมีโอกาสที่จะเกิดเพลิงไหม้น้อย
- ความหนืดต่ำ หมายถึงระบายความร้อนได้ดี
- แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า มีค่าต่ำ

2.3.3.2.3 ฉนวนก๊าซ

ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนแทรกซึม และตัวระบายความร้อน เป็นฉนวนที่กลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้เร็ว ไม่มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก P_d มีความคงทนทางไฟฟ้า $E_b = f(p)$ ฉนวนก๊าซที่ใช้มาก คือ อากาศ เป็นฉนวนภายนอกของอุปกรณ์ที่ติดตั้งกลางแจ้ง ก๊าซ SF_6 ใช้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบ GIS ค่าแรงดัน U_b โดยใช้ทฤษฎีสตรีมเมอร์ได้

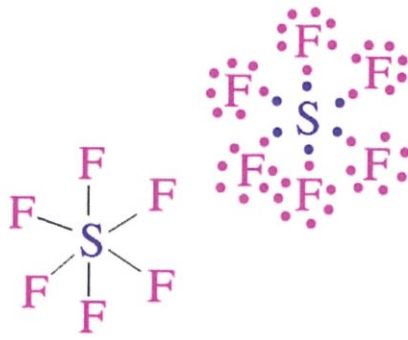
2.3.3.2.3.1 การใช้ก๊าซ SF_6 (Sulphur Hexafluoride) เป็นฉนวน

SF_6 เป็นสารชนิดหนึ่งที่ยินยอมมาใช้เป็นฉนวน เมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ โดยปกติแล้ว SF_6 อาจอยู่ในสถานะของแข็ง, ของเหลวหรือก๊าซก็ได้ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของ SF_6

ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยมมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่ความดันค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนด้วยก๊าซชนิดอื่นๆ มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี คุณลักษณะเด่นของก๊าซ SF_6 คือมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ที่ความดันไม่สูงนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เชื้อต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและถ่ายเทความร้อนดีแต่อย่างไรก็ตาม SF_6 ได้กลายเป็นสารที่ไม่พึงประสงค์ต่อสภาวะบรรยากาศของโลก แต่ถึงกระนั้นในปัจจุบันนี้ก็ยังไม่สามารถที่จะหาก๊าซ ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่า SF_6 ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ก๊าซ SF_6 กันอยู่ การศึกษาคุณสมบัติและการใช้งาน SF_6 ตลอดจนการป้องกันไม่ให้ SF_6 แพร่กระจายขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศจึงยังคงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

2.3.3.2.3.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF_6

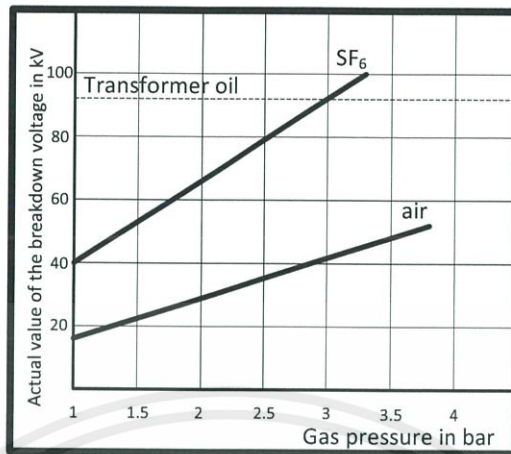
ก๊าซ SF_6 ประกอบด้วยโมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีน ดังรูป เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟและไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง $500^\circ C$

รูปที่ 2.21 โมเลกุลของ SF₆ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆

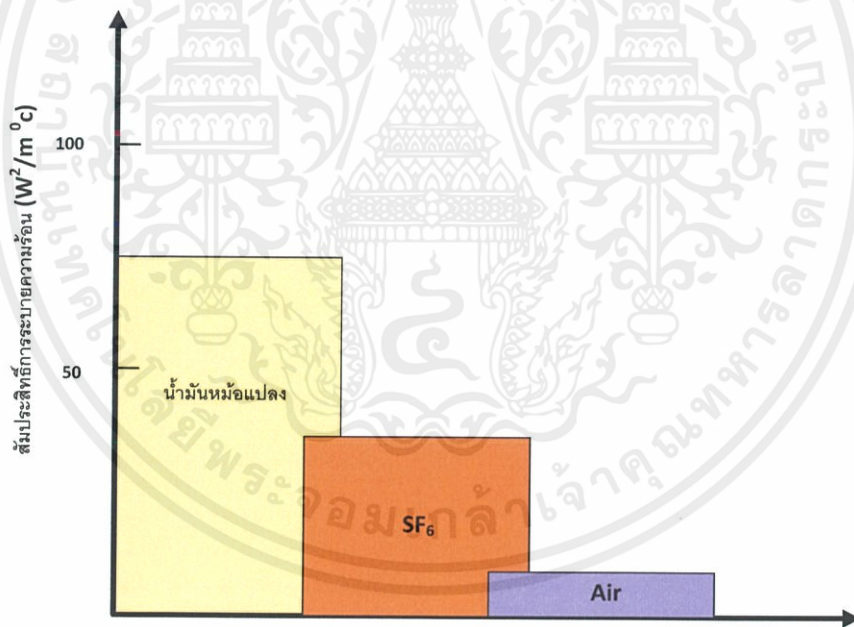
น้ำหนักโมเลกุล	146.054
ความดันขณะเป็นไอที่ 70°F, 1atm	320 psig
ปริมาตรจำเพาะที่ 70°F, 1atm	25 ft ² / lb
อุณหภูมิของจุด Sublimation ที่ 1 atm	-82.8 °F(-63.8 °c)
จุดเยือกแข็งที่ 2.21 atm	-69.4 °F(-50.8 °c)
ความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซที่ 20 °c, 1 atm	6.11
ความหนาแน่นในสถานะก๊าซที่ 0 °c ,1 atm	6.52 g/l
ความหนาแน่นในสถานะของเหลวที่ -50.8 °c	1.88 g/l
อุณหภูมิวิกฤต	114 °F(45.55 °c)
ความดันวิกฤต	38.35 kg/cm ² abs
ความหนาแน่นวิกฤต	0.734 g/ml
ความร้อนแฝงของจุด Sublimation ที่ 1 atm	38.62 cal/g
ความร้อนแฝงของจุดหลอมเหลวที่ -50.8 °c, 2.21atm	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	0.001ml/ml water
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	87.8 kV/cm.bar

ก๊าซ SF₆ มีความหนาแน่นหนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุดในบรรดาก๊าซที่รู้จักกันในปัจจุบัน จึงทำให้ก๊าซ SF₆ มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆที่ใช้เป็นฉนวนกัน เช่น อากาศหรือไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ก๊าซ SF₆ จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่า ของอากาศและจะมีความคงทนต่อ

แรงดันไฟฟ้าได้เท่าๆกับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF₆ มีความดันอัดประมาณ 3 บาร์ (1 บาร์= 750 มิลลิเมตรปรอท)



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเบรกดาวน์กับความดันของอากาศ และ SF₆ เปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลง



รูปที่ 2.23 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการระบายความร้อนของฉนวนตามธรรมชาติ [10]

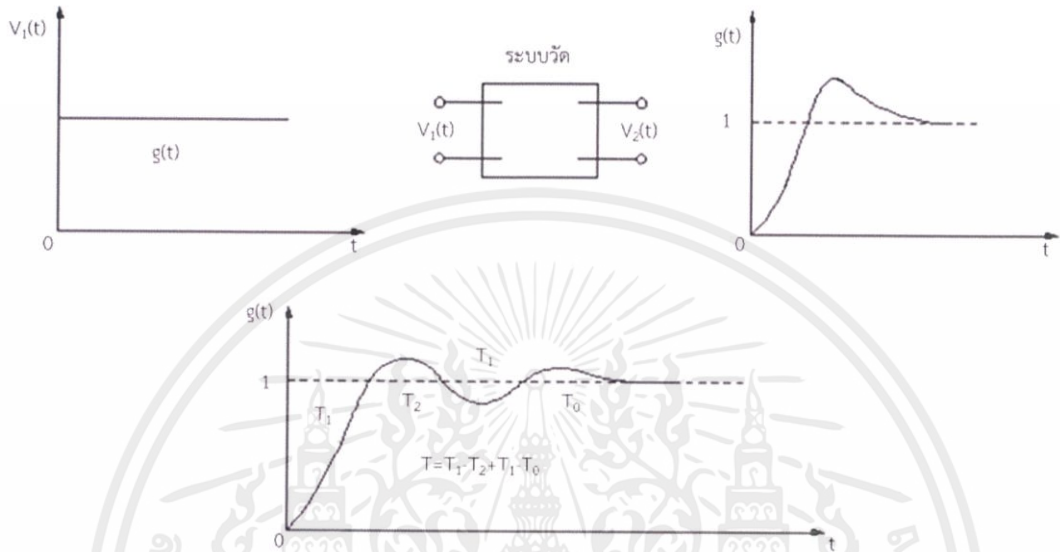
2.3.4 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

ลักษณะสมบัติของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์สามารถกำหนดได้ด้วยเวลาตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิธของระบบวัด ระบบวัดที่ดีต้องมีแบนด์วิธที่กว้างกว่าแบนด์วิธของลูกคลื่นที่ต้องการวัดเพื่อที่จะสามารถถ่ายโอนสัญญาณอย่างไม่ผิดเพี้ยน ทั้งขนาดและลักษณะของรูปคลื่น

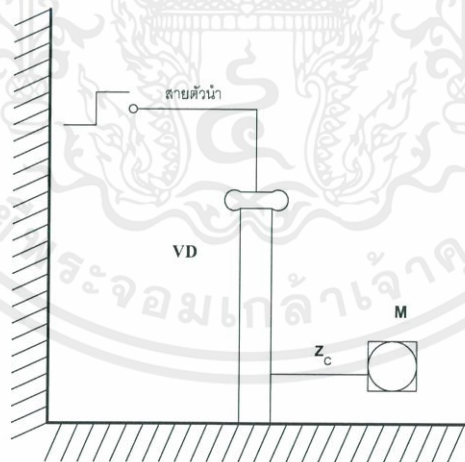
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัดมีสองประการคือ ผลตอบสนองรูปขึ้น (Step response) และสัดส่วนแรงดัน (Scale factor) เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติถ่ายโอนโวลต์เตจดิไวเดอร์ ซึ่งขึ้นกับความถี่ได้ดีขึ้นจึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการ

2.3.4.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น (Step response) [14]



รูปที่ 2.24 ผลตอบสนองรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T



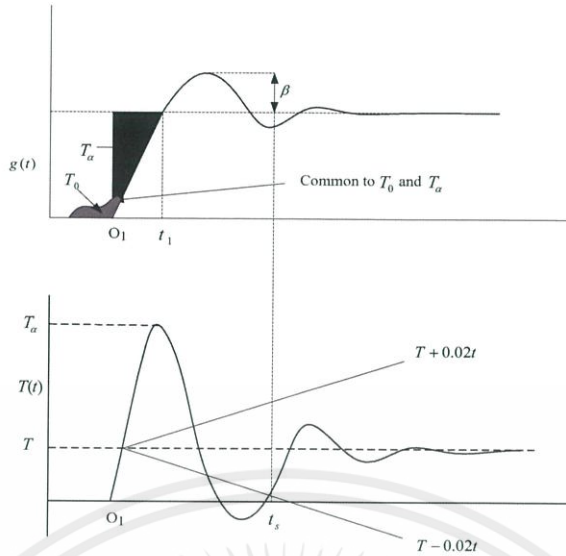
รูปที่ 2.25 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน

ดังนี้

มาตรฐานได้กำหนดนิยามพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นไว้

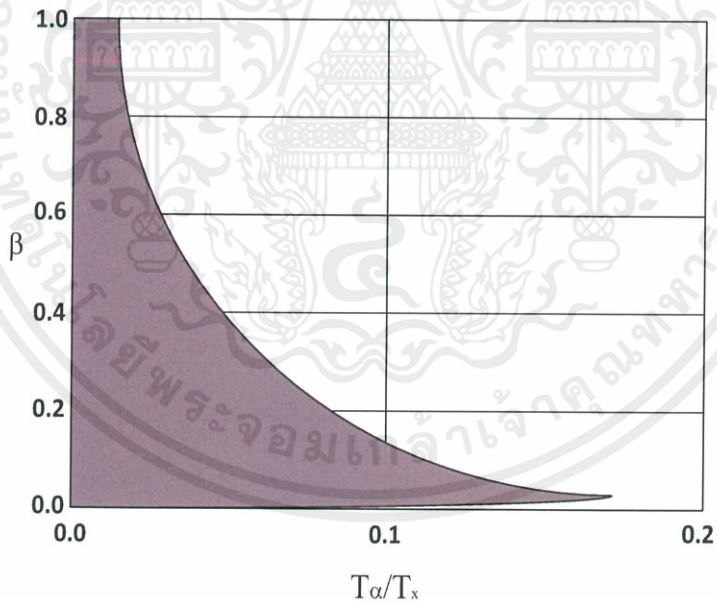
- พารามิเตอร์ตอบสนองหมายถึงพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีที่กำหนด
- จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น O_1 หมายถึงจุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้นในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่ง และใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น
- ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มอลไลซ์ $G(t)$ หมายถึงผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มอลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็น 1 หน่วย
- อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น $T(t)$ หมายถึงอินทิกรัลจาก $O_1 - t$ ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น $G(t)$ เท่ากับ $T(t) = \int_{O_1}^t (1-G(t)) dt$
- เวลาตอบสนองจากการทดลอง T_N หมายถึงค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{Max} จากสมการ $T_N = T(t_{Max})$
- เวลาตอบสนองบางส่วน T_α หมายถึงค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น
- เวลาตอบสนองที่เหลือ $T_R(t_i)$ (residual response time) หมายถึงเวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดยที่ $t_i < t_{Max}$, $T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$
- ส่วนพุ่งเกิน β (Overshoot) หมายถึงค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มอลไลซ์ $G(t)$ ที่เกิน 1 หน่วย
- เวลาผิตเพี้ยนเริ่มต้น T_0 หมายถึงพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้น 0 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มอลไลซ์ $G(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1
- เวลาเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว T_s หมายถึงเวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองที่เหลือ $T_R(t_1)$ มีค่าน้อยกว่า 2% ของ t , $|T_N - T(t)| < 0.02t_s$ สำหรับทุกๆค่าของ t ในช่วงจาก $t_s - t_{Max}$

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้กำหนดค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ดังนี้



รูปที่ 2.26 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [2]

กรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นของรูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่น T_x พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไข $\beta \geq T_\alpha/T_x$ จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาดังรูปที่ 1.27



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x โดยที่ T_x คือเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่วัด

กรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นที่เวลาคลื่นตัด T_c พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขดังนี้

2.3.4.2 สเกลแฟกเตอร์ [2,11]

มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้นิยามความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดไว้ว่า “สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า”

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือความไม่แน่นอน (uncertainty) และความมีเสถียรภาพ (stability)

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดลักษณะสมบัติของสเกลแฟกเตอร์

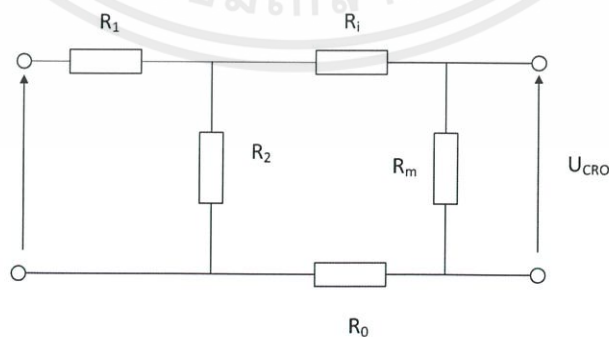
คุณสมบัติ	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น
ความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอด(uncertainty)	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$
การเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงแรงดันใช้งาน คือความมีเสถียรภาพ(stability)	$\pm 1\%$	$\pm 3\%$

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์สามารถหาได้จากวิธีหนึ่งต่อไปนี้

- การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน
- ใช้วงบริดจ์
- คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

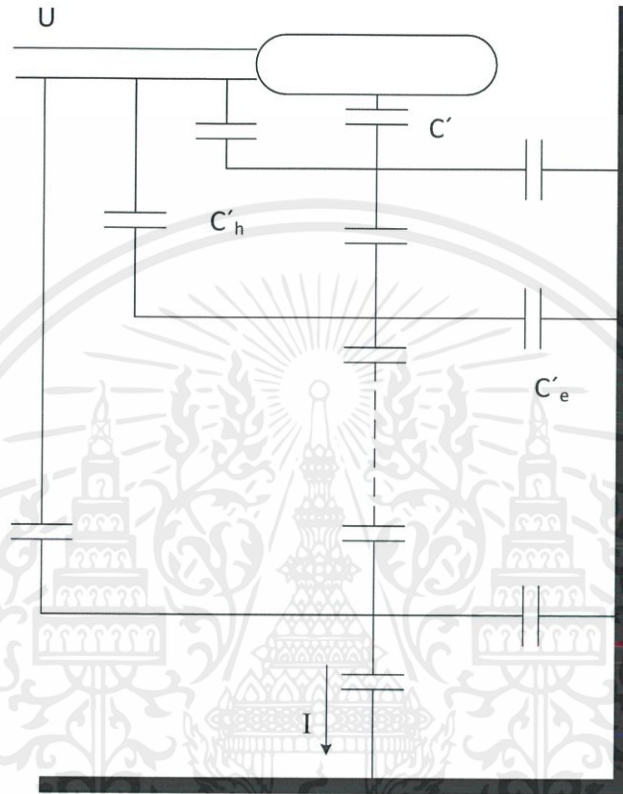
การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ โดยการใช้วิธีคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) ได้ให้ข้อแนะนำไว้ดังนี้ [2]

ในกรณีของโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ค่าความต้านทานของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำสามารถวัดได้โดยใช้แรงดันต่ำกระแสตรง ซึ่งอาจเป็น Wheatstone bridge หรือ โอห์มมิเตอร์ที่มี ความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลวัดที่มีความยาวมาก ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ (ตัวนำในและซีลด์) จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่าง R_2 กับ R_m ลดลงดังแสดงในรูป ดังนั้น ค่าความต้านทานของเคเบิลวัดควรนำมาพิจารณาด้วย



รูปที่ 2.29 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่ต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ในกรณีของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าเก็บประจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ ภาพแสดงสเกดซ์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งประกอบด้วยค่าเก็บประจุย่อย C' ต่ออันดับกัน และมีค่าเก็บประจุสเตรย์ C'_h และ C'_e ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.30 ภาพสเกดซ์ของค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 คุณสมบัติของโวลต์เตจติไวเดอร์ที่กำหนด

โวลต์เตจติไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง เป็นโวลต์เตจติไวเดอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ เป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน โดยมีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน IEC60060-2 (1994) [2] กำหนด

ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลต์เตจติไวเดอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเหตุผลที่ออกแบบโวลต์เตจติไวเดอร์แบบผสม เพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสถานะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้น และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเท่ากัน ซึ่งเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลต์เตจติไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง

ชนิดของแรงดันที่ต้องการวัด	พิกัดสูงสุดที่ต้องการออกแบบ
แรงดันสูงกระแสสลับ	300 kV _{rms}
แรงดันสูงกระแสตรง	300 kV
แรงดันสูงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน	1000 kV _p

3.2 การออกแบบโวลต์เตจติไวเดอร์แบบผสม

โวลต์เตจติไวเดอร์ที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงๆนั้น ถ้าการฉนวนมีเพียงบรรยากาศ จะทำให้การฉนวนเสียหายที่แรงดันไม่กี่สิบกิโลโวลต์ เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อวัสดุความต้านทานและที่ผิวของความต้านทาน เนื่องจากความหนาแน่นของกระแส $J = \sigma E$ ซึ่งเสริมกับความเครียดสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากการป้อนแรงดันสูงกับดิน ฉะนั้นจึงต้องใช้การฉนวนที่มีค่าฉนวนสูง

โดยในการออกแบบโวลต์เตจติไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีสร้างชั้นได้ใช้ก๊าซ SF₆ ที่ความดัน 3 บาร์ บรรจุในท่อฉนวน PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) 0.317 เมตร ความยาวท่อ (l) 3.37 เมตร และมีความสูงจากพื้น (h) 0.464 เมตร

3.2.1 การออกแบบภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลต์เตจติไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นตัวเก็บประจួយ่อยต่ออนุกรมกัน ให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันที่ต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมีค่ามากพอที่ทำให้ค่าเก็บประจุสเตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลต์เตจติไวเดอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลต์เตจติไวเดอร์ควรเป็นเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจួយ่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆกัน มิฉะนั้น อาจทำให้เกิดเบรกดาวนหรือวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจួយ่อยได้และในขณะเดียวกัน ค่าเก็บประจุต้องไม่มากจนทำให้โวลต์เตจติไวเดอร์กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด จะเห็นได้ว่าค่าเก็บประจุภาคแรงสูงมีทั้งขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติควรมีค่ามากกว่า 50 พิโคฟารัดต่อความสูงของโวลต์เตจติไวเดอร์ 1 เมตรแต่ไม่ควรเกิน 1000 พิโคฟารัด [15]

3.2.1.1 ค่าวาทไฟตามพินฉนวน [8,11]

ความยาวท่อฉนวน PVC กำหนดด้วยระยะวาทไฟตามพินฉนวน ความยาวตามพินฉนวนที่ใช้ในอาคาร ถ้าพินเรียบ คือไม่มีครีบ ใช้ความยาวจำเพาะดังนี้

- ความยาวตามพินฉนวนสำหรับแรงดันกระแสสลับ 5 เมตรต่อเมกะโวลต์
- ความยาวตามพินฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ 2.5 เมตรต่อเมกะโวลต์

ซึ่งในการออกแบบมีความยาวของท่อฉนวนพีวีซีพินเรียบ 3.37 เมตร



รูปที่ 3.1 ท่อฉนวนพีวีซีวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

3.2.1.2 ความจุสเตรย์ลงดิน

ความจุสเตรย์ลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ค่าความจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแพกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ

ค่าความจุสเตรย์สามารถหาได้จากสมการ

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

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

$$= 70.94 \text{ พิโคฟารัด}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุสเตรย์ลงดินเท่ากับ 70.94 พิโคฟารัด

3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันกระแสสลับ

ตัวเก็บประจุเลือกใช้ชนิดโพลีโพรพิลีน(Polypropylene Film) ยี่ห้อ Vishay MKP 1845 ขนาดความจุ $0.22 \mu\text{F} \pm 10\%$ พิกัดทนแรงดัน $1.6 \text{ kV}_{\text{dc}}/650 \text{ V}_{\text{ac}}$

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

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

จึงออกแบบใช้ Capacitor จำนวนทั้งหมด 696 ตัว ซึ่งสามารถทดสอบ Withstand Test ได้

ที่ 1.508 เท่าของพิกัด Voltage Divider โดยค่า C_1 รวมมีค่าเท่ากับ $\frac{0.22 \mu\text{F}}{696} = 316$ พิโคฟารัด

ในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุควรให้มามีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรย์ลงดินประมาณ 3 เท่าหรือมากกว่า ในที่นี้มีค่ามากกว่าความจุสเตรย์ลงดินถึง 4.47 เท่า

โดยหาค่ากระแสพิกัดได้จาก $I = Vj\omega C = 300\text{k} \times j2\pi 50 \times 316\text{p} = 29.78$ มิลลิแอมป์

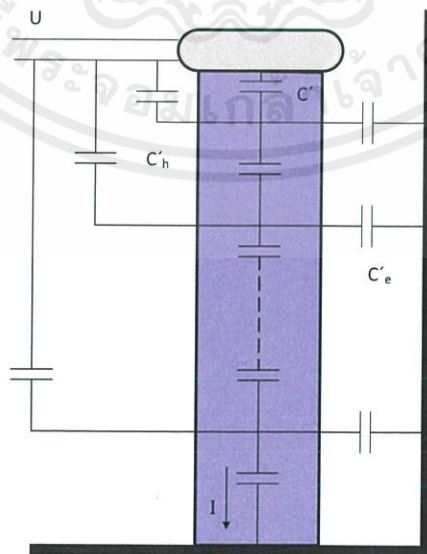


รูปที่ 3.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันกระแสสลับ

3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด

3.2.1.4.1 แรงดันกระแสสลับ

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนว่าสามารถทนแรงดัน เมื่อโวลต์เตจดีไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ โดยต้องคำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Withstand test ที่ 110%



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

จาก

$$U_k = \frac{U}{C'_e + C'_h} \left[\frac{C'_e \sinh \frac{\alpha k}{n}}{\sinh \alpha} + C'_h \left\{ 1 - \frac{\sinh \alpha \left(n - \frac{k}{n} \right)}{\sinh \alpha} \right\} \right] \quad (3.2)$$

$$\alpha = \sqrt{(C'_e + C'_h)/C'} \quad (3.3)$$

เมื่อ $U_k =$ แรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย k เมื่อเทียบกับดิน

$U =$ แรงดันที่คงทนได้ = 330 กิโลโวลต์

$C'_h = 0$

$C' =$ ค่าเก็บประจุย่อยแต่ละตัว = 0.22 ไมโครฟารัด

$n =$ จำนวนตัวเก็บประจุ = 696 ตัว

$k =$ ชั้นที่ 1

$C'_e = C_e/n = 0.102$ พิโคฟารัด

จะได้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดเท่ากับ 474.138 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าค่าแรงดันกระแสสลับพิกัดของตัวเก็บประจุย่อย 650 โวลต์ จึงสามารถใช้งานได้ตามต้องการ

3.2.1.4.2 แรงดันอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุขนาด 0.22 ไมโครฟารัดทนแรงดันกระแสตรงได้ 1.6 กิโลโวลต์ ที่พิกัด 300 กิโลโวลต์ จะต้องใช้ C จำนวน $300k/1.6k = 188$ ตัว แต่เนื่องจากในการวัดแรงดันกระแสสลับใช้ตัวเก็บประจุ จำนวน 696 ตัว จึงสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ได้ 3 เท่าของพิกัดแรงดันกระแสสลับโดยประมาณ คือสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัด 1000 กิโลโวลต์

3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ตัวความต้านทานภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะต้องอยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูงตามมาตรฐานกำหนดให้ $R \geq 10 \text{ M}\Omega/\text{kV}$, $1 \text{ mA} \geq I \geq 0.1 \text{ mA}$ โดยเราจะใช้ตัวต้านทาน ชนิดคาร์บอนฟิล์มขนาด 10 เมกะโอห์มมาต่อขนานกับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยจะใช้ตัวต้านทาน จำนวน 87 ตัว จะได้ตัวต้านทานรวมทั้งหมด 870 เมกะโอห์มซึ่งจะได้

$$R = 870 \text{ M}\Omega / 300 \text{ kV}_{dc} = 2.9 \text{ กิโลโอห์มต่อโวลต์กระแสตรง}$$

$$I = 300 \text{ kV}_{dc} / 870 \text{ M}\Omega = 0.345 \text{ มิลลิแอมป์}$$

จากที่คำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานและกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันสูงกระแสตรง

3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย

จากการต่อตัวต้านทานจะเกิดค่าสูญเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Total Loss} = \frac{V^2}{R} = \frac{(300k)^2}{870M} = 103.45 \text{ วัตต์} \quad (3.4)$$

ค่าสูญเสียจากความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 103.45 วัตต์เป็นค่าการสูญเสียรวมทั้งหมดเมื่อหาที่แต่ละชั้นจะได้ 1 ชั้น (ความต้านทานแต่ละตัว) $= \frac{103.45}{87} = 1.189$ วัตต์ เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทานที่มีค่า 5 วัตต์

3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัตต์แรงดันอิมพัลส์

ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงจะต่อกระจายตลอดภาคแรงสูงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดการเรโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในสายตัวนำแรงสูงและตัวเก็บประจุภาคแรงสูง การต่อตัวต้านทานกระจายนี้ยังสามารถช่วยหน่วงการแกว่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลท์เตจดีไวเดอร์เองได้ดีกว่าการต่อความต้านทานหน่วงภายนอกโวลท์เตจดีไวเดอร์

จากการคำนวณโดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์ด้วยความเร็วแสงซึ่งมีค่าประมาณ 3.33 ns/m จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Z_t = \frac{\tau_t}{C_e} \quad (3.5)$$

โดยที่

Z_t คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์

C_e คือ ค่าเก็บประจุสเตรย์ของโวลท์เตจดีไวเดอร์

τ_t คือ เวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลท์เตจดีไวเดอร์

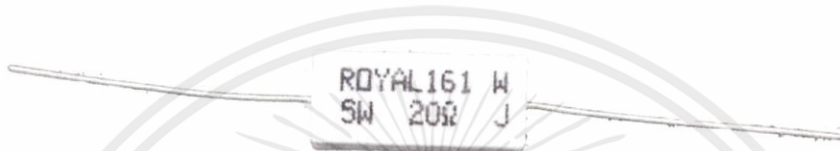
แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} Z_t &= \frac{\tau_t}{C_e} = \frac{3.33 \text{ ns/m}}{70.94 \text{ pF}} \\ &= 46.94 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_d &= 4 \cdot Z_t & (3.6) \\
 &= 4 \times 46.94 \\
 &= 187.76 \text{ โอห์ม}
 \end{aligned}$$

แต่โดยปกติแล้ว ค่าความต้านทานหน่วยภาคแรงสูงนั้นจะอยู่ในช่วง 500 ถึง 1000 โอห์ม [16] ซึ่งจากการคำนวณได้ค่าไม่ถึง 500 โอห์ม จึงต้องเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วยใหม่

ภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ตัวนี้สามารถอนุกรมความต้านทานหน่วยสูงสุด 84 ตัว เลือกใช้ตัวที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาดคือ 20 โอห์ม จะได้ค่าความต้านทานหน่วยใหม่เท่ากับ 1680 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.5 ตัวต้านทานหน่วยภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลต์เตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆดังนี้

- แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซีลด์ของเคเบิลวัด หรือ จากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ในระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดมีค่าต่ำเกินไป จะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด
- การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมทซ์ซิงของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำ และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำเข้าไปในภาคแรงสูงมีค่าลดลง ดังนั้น จึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำกับตัวความต้านทานแมทซ์ซิงให้อยู่ในลักษณะแกนร่วม

3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลท์เตจติไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจติไวเดอร์โดยอาศัยสมการ

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

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลท์เตจติไวเดอร์

C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออก 1.8 กิโลโวลท์ ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันโวลท์เตจติไวเดอร์มีค่าประมาณ 557:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุและค่าความต้านทานภาคแรงต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลท์เตจติไวเดอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 1.8 กิโลโวลท์ จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลท์เตจติไวเดอร์เท่ากับ 557:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงสูงทั้งหมดเท่ากับ 316.09 พิโคฟารัด ซึ่งเลือกเป็นแบบโพลีโพรพิลีนฟิล์ม ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำคำนวณได้จาก

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = 557 \quad (3.9)$$

จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงต่ำ 175.75 นาโนฟารัดโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.022 ไมโครฟารัดต่อขนานกัน 8 ตัว จะได้ค่าความเก็บประจุแรงต่ำจริง 176 นาโนฟารัด

3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

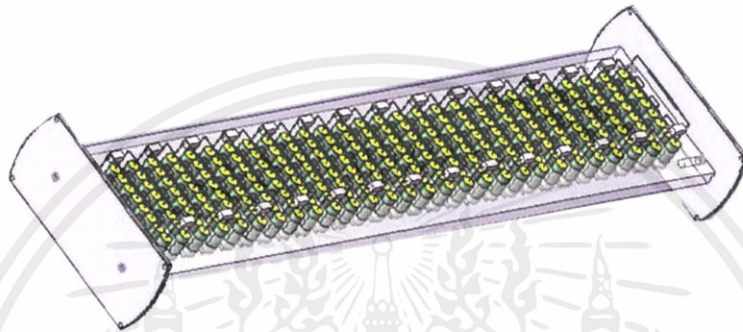
ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลท์เตจติไวเดอร์เท่ากับ 557:1 ค่าความต้านทานภาคแรงสูงรวมทั้งหมด 870 เมกะโอห์มโดยค่าความต้านทานคำนวณได้จากสมการที่ (3.8) จากการคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ 1.56 เมกะโอห์มโดยใช้ตัวต้านทานชนิดเมทัลฟิล์มขนาด 12 เมกะโอห์ม 1 วัตต์ต่อขนานกัน 8 ตัว

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมทซ์ซิง (R_m) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยความต้านทานแมทซ์ซิงนี้เลือกใช้แบบคาร์บอนฟิล์มขนาด 1 วัตต์ 75 โอห์ม จำนวน 1 ตัว ได้ค่าความต้านทาน $R_m = 75$ โอห์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

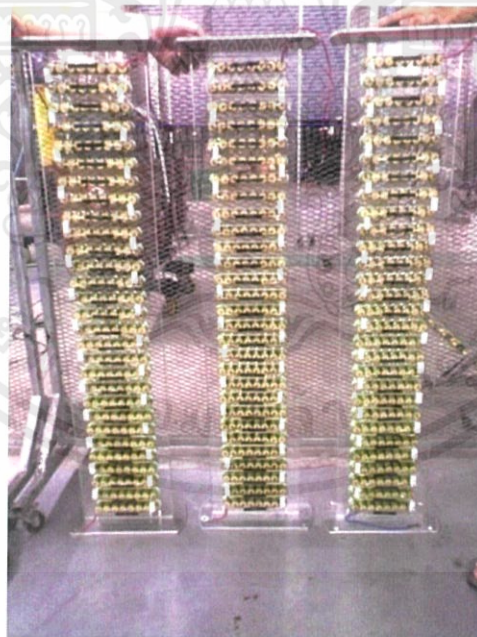
3.3 รายละเอียดการประกอบสร้างโวลต์เดจดีไวเดอร์

3.3.1 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

การต่อตัวเก็บประจุย่อยและตัวต้านทานในภาคแรงสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 696 ตัว ตัวต้านทานย่อยทั้งหมดจำนวน 87 ตัว และตัวต้านทานหน่วงจำนวน 84 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นอะคลิลิกใสจำนวน 3 แผ่น โดยแต่ละแผ่นจะมีตัวเก็บประจุจำนวน 232 ตัว ตัวต้านทานย่อยจำนวน 29 ตัว และตัวต้านทานหน่วงจำนวน 28 ตัว ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 8 ตัว จำนวน 29 ชั้นเพื่อใส่ตัวเก็บประจุย่อย 8 ตัวที่ต่ออนุกรมกัน หลังจากนั้นจึงนำตัวต้านทานย่อยต่อขนานกับตัวเก็บประจุย่อยแต่ละชั้นและตัวต้านทานหน่วงต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุระหว่างชั้น โดยภาคแรงสูงทั้งสามแผ่นนี้จะนำมาต่ออนุกรมกัน



ก)



ข)

รูปที่ 3.6 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

ก) ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Solidwork

ข) ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

3.3.2 การประกอบอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำมีทั้งหมด 8 ขา โดยแต่ละขาประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 12 เมกะโอห์ม ต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 0.022 ไมโครฟารัด จากนั้นต่อความต้านทานหน่วงกระจายเข้าไปในแต่ละขาขนาด 29 โอห์ม และมี $R_m=75$ โอห์ม อยู่ตรงกลางซึ่งจะต่อกับหัวแปลงเพื่อนำไปต่อสายเคเบิล



รูปที่ 3.7 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

ก) ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Solidwork

ข) ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

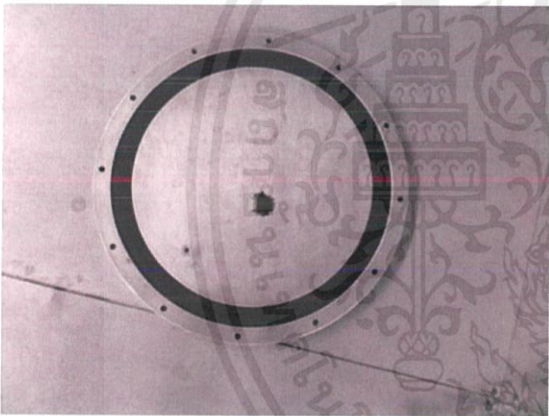
3.3.3 โครงสร้างของโวลท์เตจติไวเตอร์



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 3.8 โครงสร้างของโวลท์เตจติไวเตอร์

ก) ท่อฉนวน PVC

ข) ฐานรองรับโวลท์เตจติไวเตอร์

ค) ฝาอิเล็กทรอนิกส์บน

ง) ฝาอิเล็กทรอนิกส์ล่าง

3.3.4 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3.9 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ต้องการใช้ดิจิทัลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและประเมินค่าพารามิเตอร์ของแรงดัน ซึ่งออสซิลโลสโคปที่ใช้สามารถแสดงผลได้สูงสุด 50 V ดังนั้น จำเป็นต้องออกแบบสร้างตัวลดทอนขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลท์เตจดีไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่ดิจิทัลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนอาศัยหลักการเดียวกับโวลท์เตจดีไวเดอร์ กล่าวคือแรงดันขาออกสูงสุดของตัวลดทอน กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของดิจิทัลออสซิลโลสโคป เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะสามารถหาสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนได้โดยอาศัยสมการ

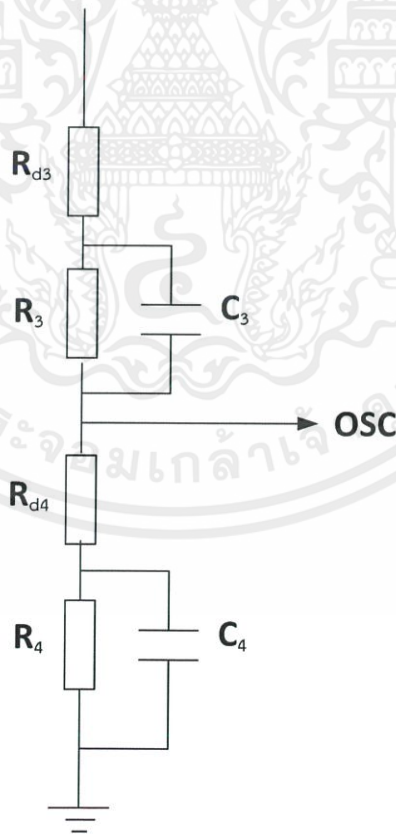
$$F_A = \frac{Z_3 + Z_4}{Z_4} \quad (3.10)$$

เมื่อ F_A คือ ค่าสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอน

Z_3 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคปฐมภูมิของตัวลดทอน

Z_4 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคหตุยภูมิของตัวลดทอน

ในที่นี้ เลือกค่าแรงดันขาออกของตัวลดทอน 45 V ซึ่งจะทำให้ได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนประมาณ 40



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบผสม

3.4.1 รายละเอียดการประกอบสร้างตัวลดทอน

ภาคปฐมภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม ขนาด $2.5 \mu\text{F}$ 2 kV_{dc} ต่อขนานกับตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะขนาด 1 W $20 \text{ M}\Omega$ และมีตัวต้านทานหน่วงอนุกรมด้วยขนาด 1 W 1000Ω

ภาคทุติยภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม ขนาด $200 \mu\text{F}$ 2 kV_{dc} ต่อขนานกับตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะขนาด 1 W $0.5 \text{ M}\Omega$ และมีตัวต้านทานหน่วงอนุกรมด้วยขนาด 1 W 25Ω

โดยองค์ประกอบทั้งหมดบรรจุอยู่ในกล่องซีลด์อลูมิเนียม ตัวลดทอนที่ประกอบเสร็จแล้ว แสดงในรูปที่ 3.11



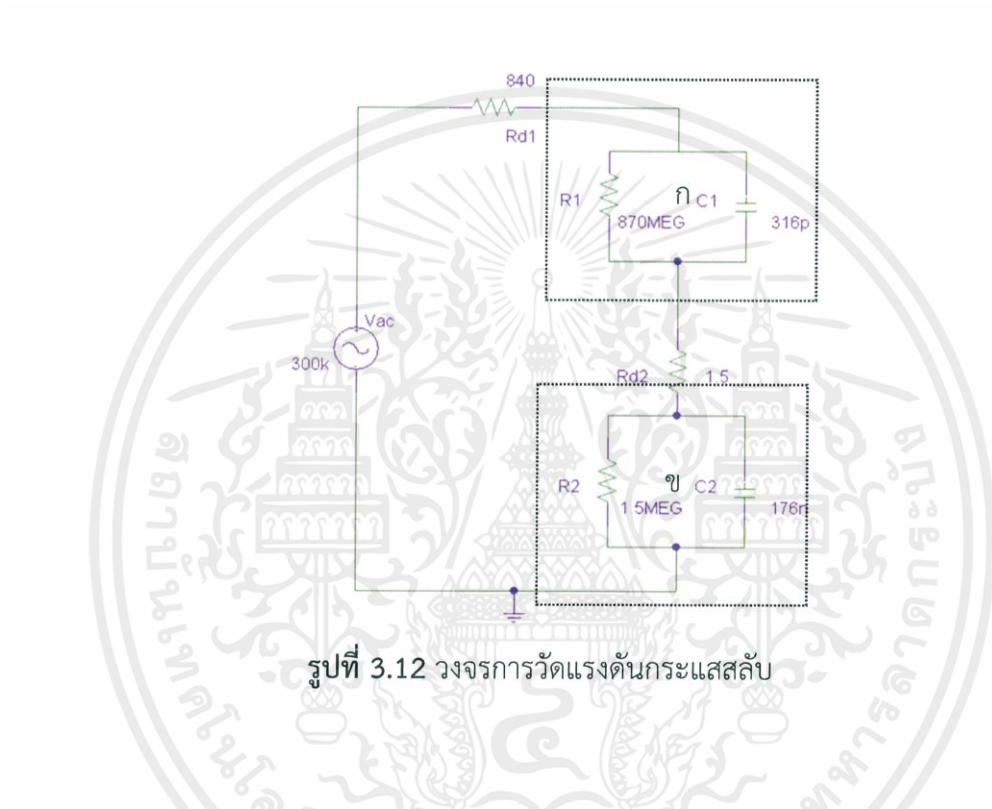
รูปที่ 3.11 ตัวลดทอนแบบผสม

3.5 การจำลองการทำงานของโวลต์เตจติวเดอร์โดยใช้โปรแกรม Microsim Schematics

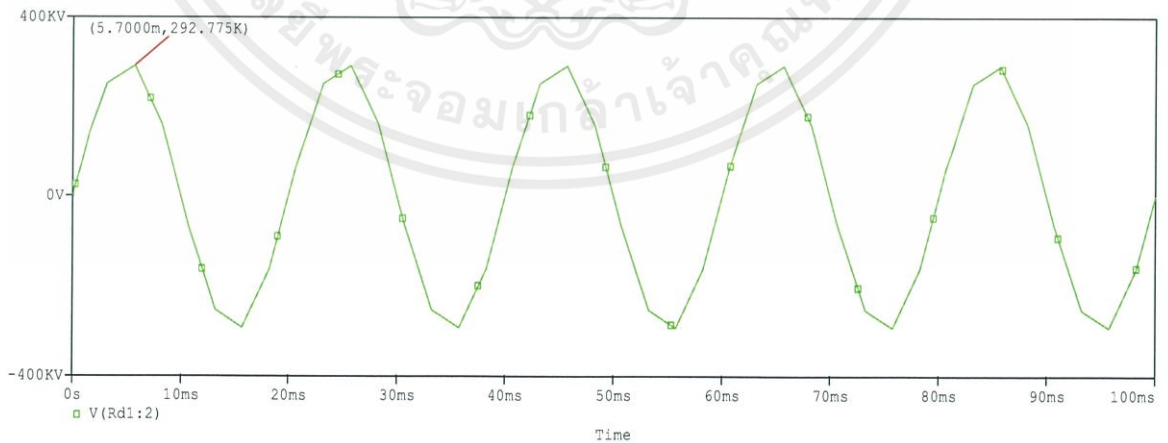
ก่อนที่จะสามารถสร้างจริงได้นั้น ต้องมีการตรวจสอบค่าที่คำนวณมาก่อนว่าใช้ได้หรือไม่ โดยใช้โปรแกรมจำลองต่างๆ ในที่นี้ใช้โปรแกรม Microsim Schematics

3.5.1 วงจรวัดแรงดันกระแสสลับ

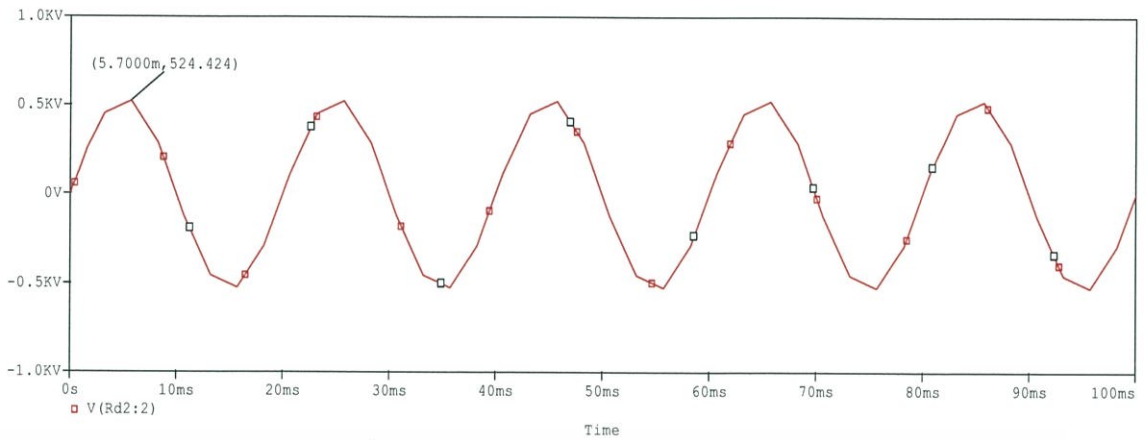
วงจรจะแบ่งเป็นสองส่วนโดยส่วน ก คืออิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และส่วน ข คืออิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ โดยแรงดันเอาต์พุตคือแรงดันที่ตกคร่อมส่วน ข ส่วนกระแสเอาต์พุตนั้นจะวัดที่ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ



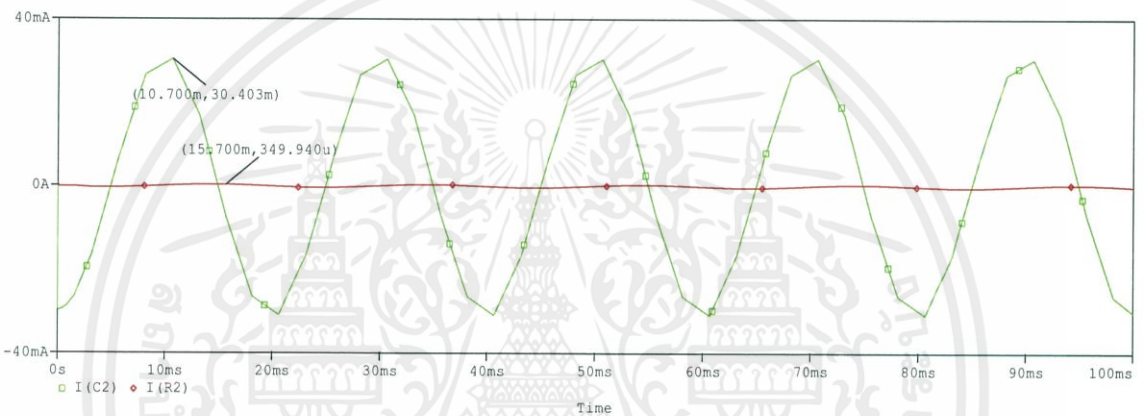
รูปที่ 3.12 วงจรการวัดแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 3.13 แรงดันกระแสสลับอินพุต



รูปที่ 3.14 แรงดันกระแสสลับเอ้าท์พุท

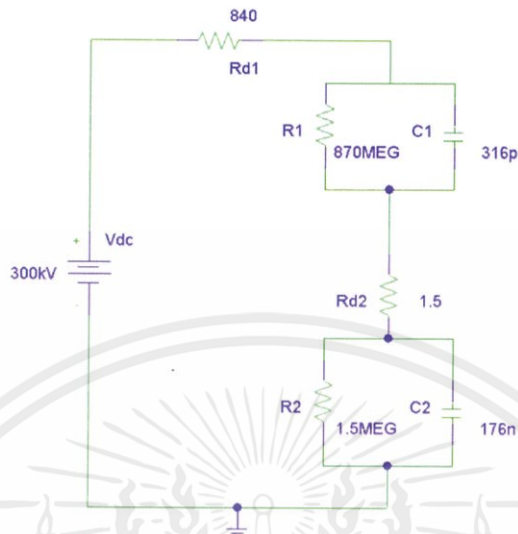


รูปที่ 3.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรวัดแรงดันกระแสสลับ

จากรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15 จะได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันอินพุท 300 กิโลโวลท์กระแสสลับ จะได้แรงดันเอ้าท์พุทเป็น 524.24 โวลท์ ส่วนกระแสนั้นจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ 30.4 มิลลิแอมป์ แต่ไม่ไหลผ่านตัวต้านทาน

3.5.2 วงจรวัดแรงดันกระแสตรง

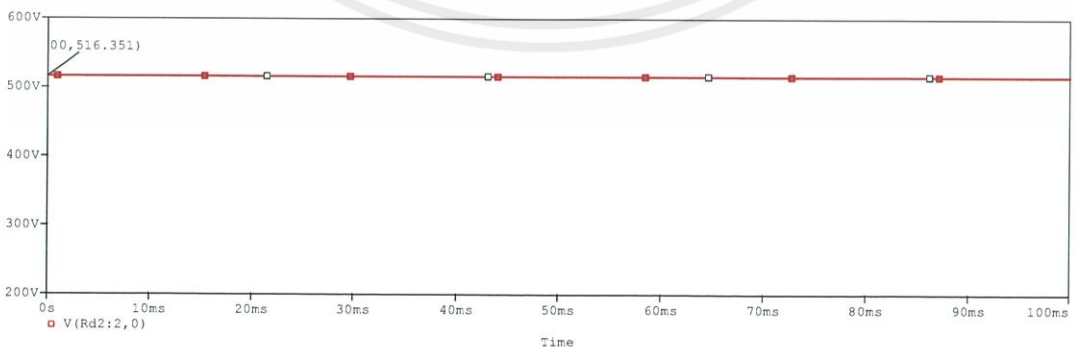
วงจรแบ่งออกเป็นสองส่วนเหมือนกับกระแสตรง เพียงแต่เปลี่ยนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงเท่านั้น การวัดแรงดันและกระแสยังคงวัดที่จุดเดิม



รูปที่ 3.16 วงจรการวัดแรงดันกระแสตรง

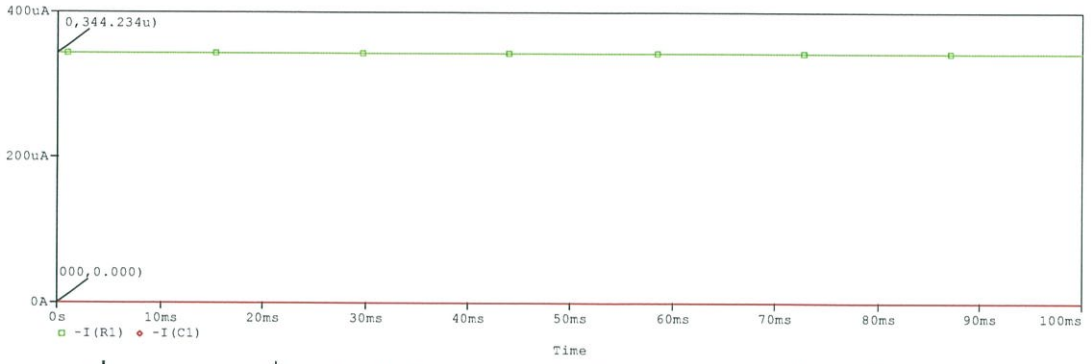


รูปที่ 3.17 แรงดันกระแสตรงอินพุต



รูปที่ 3.18 แรงดันกระแสตรงเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

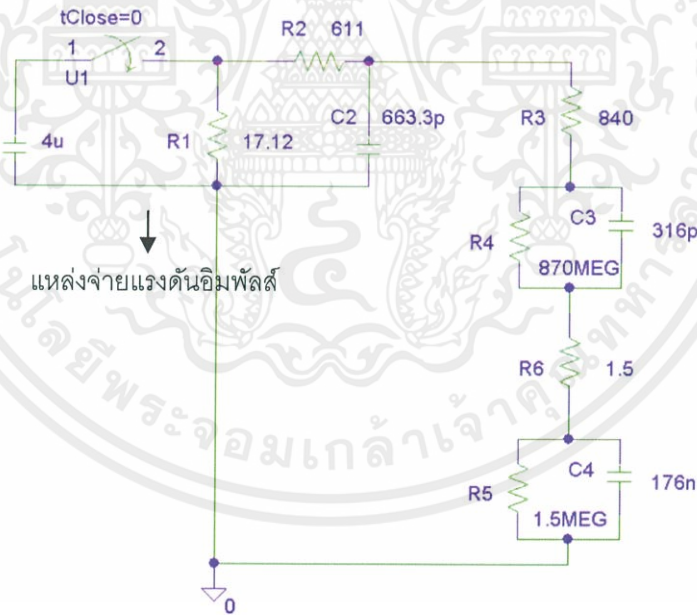


รูปที่ 3.19 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรวัดแรงดันกระแสตรง

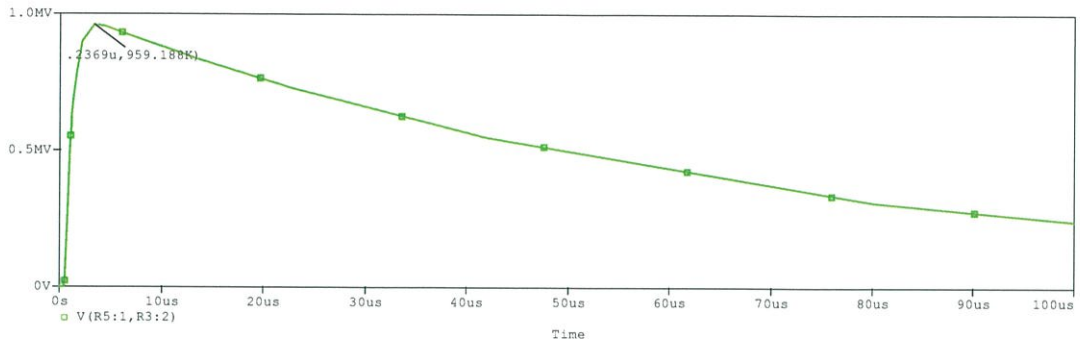
จากรูปที่ 3.17, 3.18 และ 3.19 จะได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันอินพุต 300 กิโลโวลต์กระแสตรง จะได้แรงดันเอาท์พุตเป็น 516.35 โวลต์ ส่วนกระแสนั้นจะไหลผ่านตัวต้านทาน 234 ไมโครแอมป์ แต่ไม่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

3.5.3 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

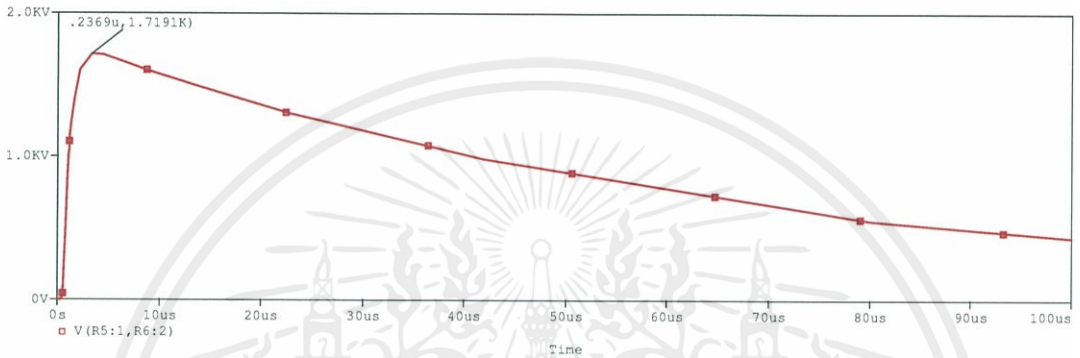
วงจรมีความแตกต่างกับวงจรสองวงจรก่อนหน้านี้ตรงแหล่งจ่ายแรงดัน ที่ใช้ค่าสภาวะเริ่มต้นของตัวเก็บประจุและสวิตช์เป็นตัวจ่ายแรงดัน ส่วนการวัดแรงดันและกระแสยังคงวัดที่เดิม



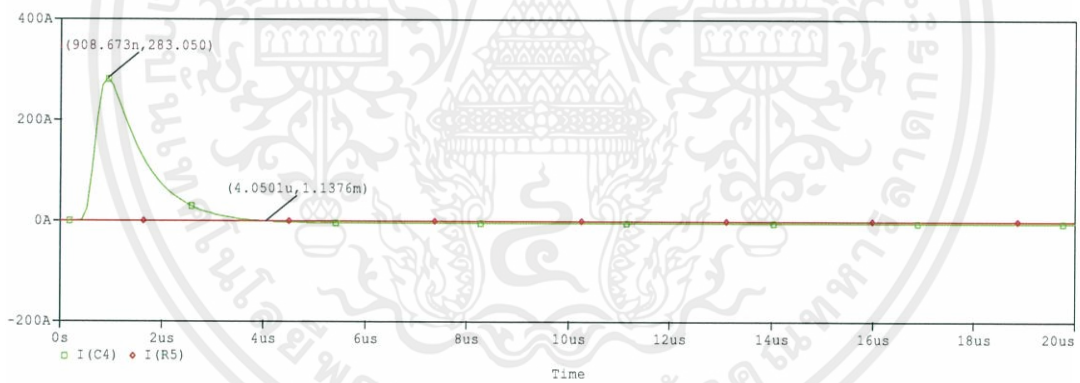
รูปที่ 3.20 วงจรการวัดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 3.21 แรงดันอินพุตอินพุต



รูปที่ 3.22 แรงดันอินพุตเอาต์พุต



รูปที่ 3.23 กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานและตัวเก็บประจุของวงจรวัดแรงดันอินพุต

จากรูปที่ 3.21, 3.22 และ 3.23 จะได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันอินพุต 1 เมกะโวลต์เป็นแรงดันอินพุต จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น 1.7 กิโลโวลต์ ส่วนกระแสนั้นจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ 283 แอมป์ แต่ไม่ไหลผ่านตัวต้านทาน

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

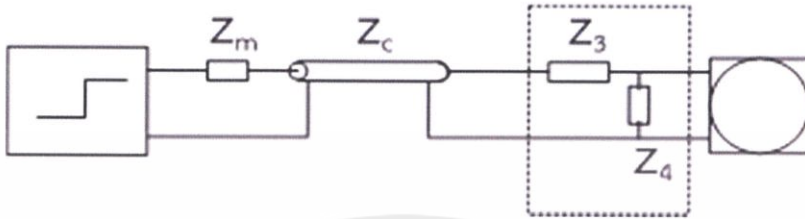
การหาผลตอบสนองรูปขั้นใช้วงจรตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] (1994) โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (Unit step generator) ของ DR.STRAUSS รุ่น RIG 1000-H



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น

4.1.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง

เนื่องจากตัวลวดทองก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบวัดที่ประกอบสร้าง ดังนั้นก่อนที่เราจะทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์นั้น เราต้องทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทองให้เป็นไปตามมาตรฐานก่อน เพื่อจะได้ปรับปรุงผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ต่อไป โดยวงจรที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเดียวกับโวลต์เตจดีไวเดอร์



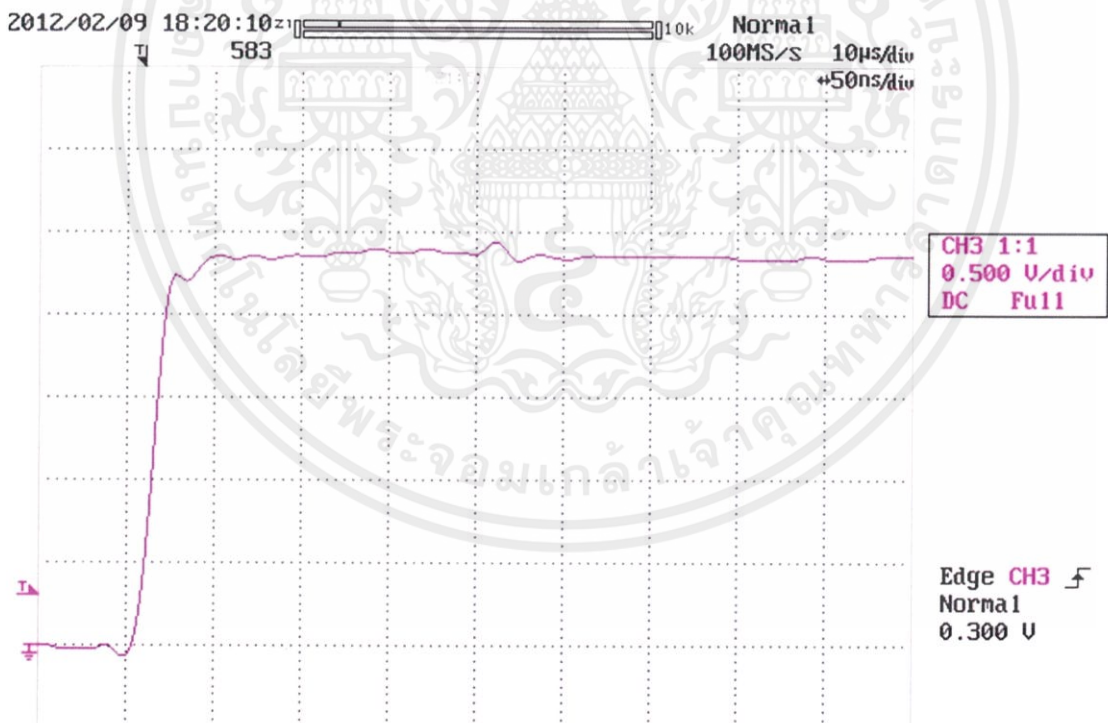
รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง

Z_m คือ ความต้านทานแมชชิง 75Ω

Z_c คือ เคเบิลวัด 75Ω ยาว 15 m

Z_3 คือ อิมพีแดนซ์ภาคปฐมภูมิของตัวลวดทอง

Z_4 คือ อิมพีแดนซ์ภาคทุติยภูมิของตัวลวดทอง



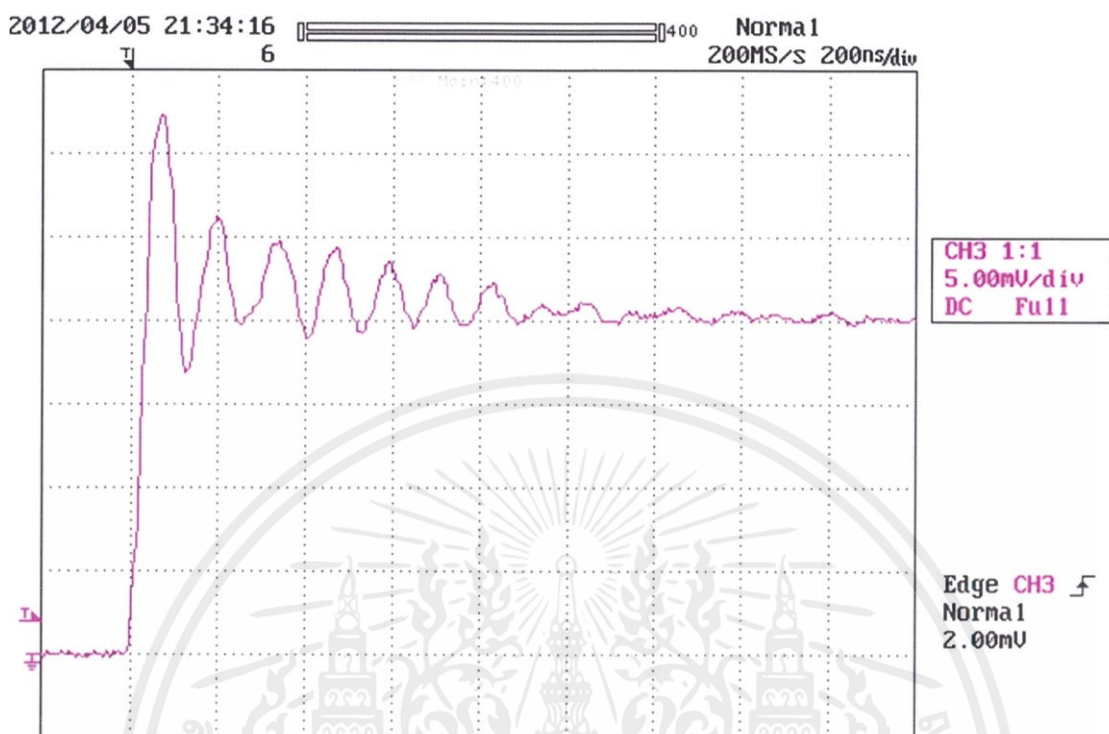
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอง

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าตัวลวดทองที่ประกอบสร้างมีค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองเป็นไปตามข้อกำหนด กล่าวคือ ได้เวลาตอบสนองบางส่วน (T_α) 25 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์

4.1.2.1 กรณีไม่มีความต้านทานหน่วงภายนอกต่อผลตอบสนองรูปชั้น

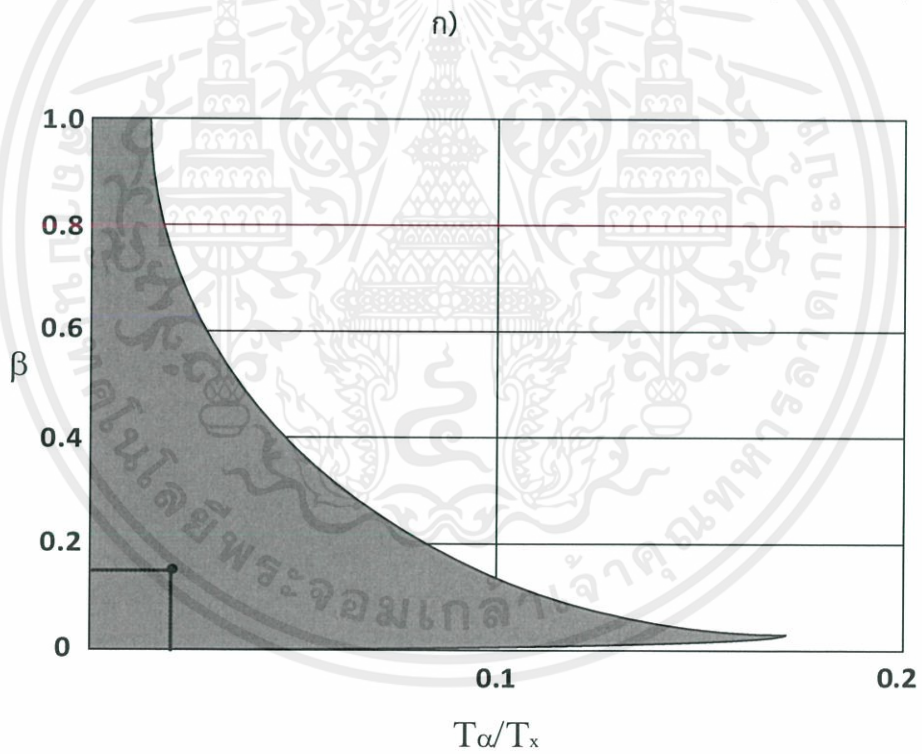
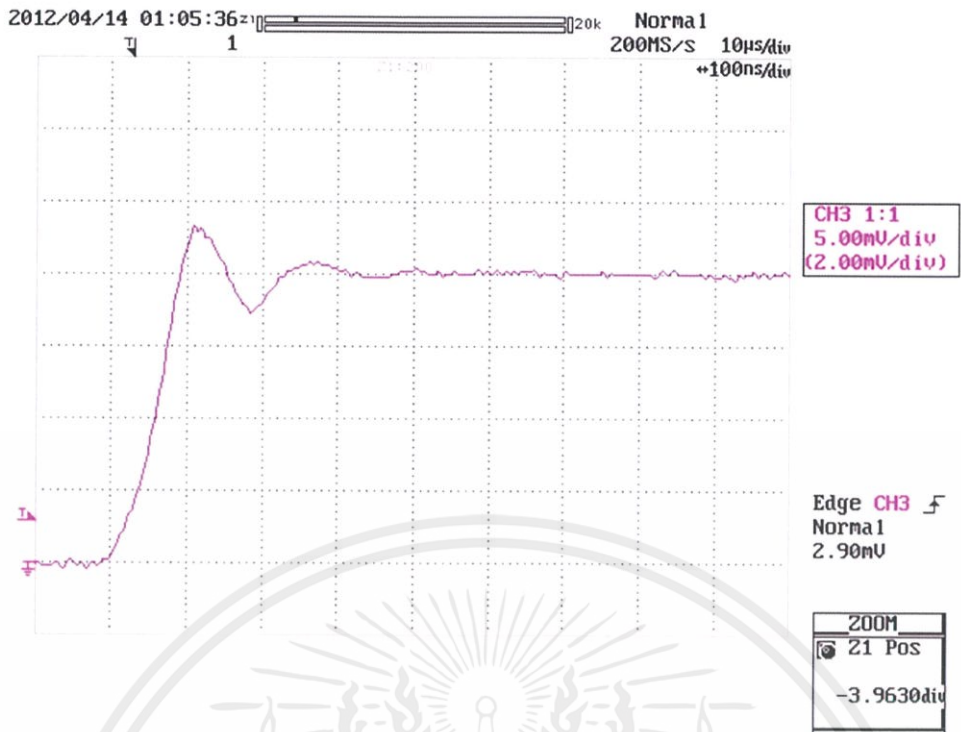


รูปที่ 4.4 ไม่มีความต้านทานหน่วงภายนอก

4.1.3 ผลตอบสนองรูปชั้นของระบบวัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน

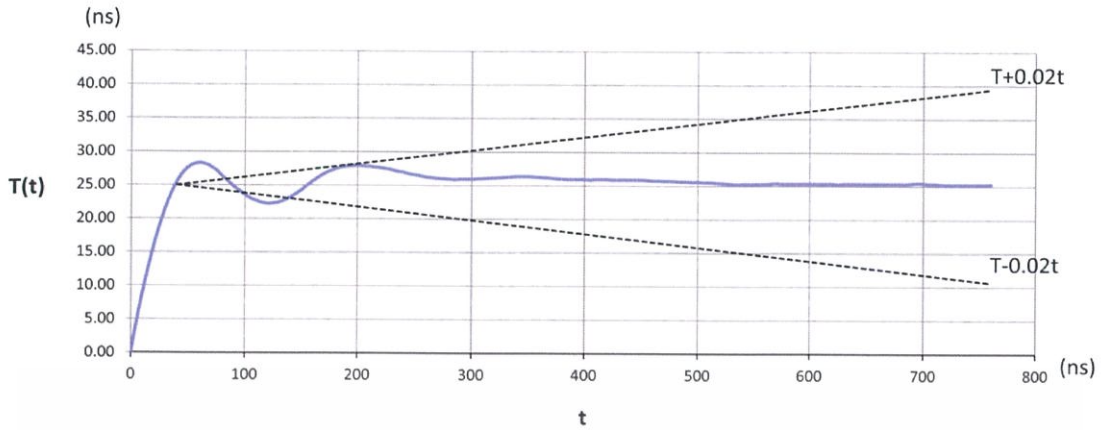
จากการทดสอบผลตอบสนองรูปชั้นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าขององค์ประกอบต่างๆ ทั้งองค์ประกอบภายในและภายนอก จนเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด พบว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์มีความไวต่อการตอบสนองดี แต่ยังมีการออสซิลเลตของรูปคลื่นเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.5 ก) ซึ่งในรูปนี้จะเป็นการทดสอบผลตอบสนองรูปชั้นโดยการต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์กับตัวลวดทอง โดยมีความต้านทานหน่วงกระจายภายในภาคแรงสูง 1680 โอห์มและภาคแรงต่ำ 3 โอห์ม มีการต่อกราวด์ที่ตัวบันได ความต้านทานหน่วงภายนอก 282 โอห์มและใส่ชิลด์อิลเล็กโตรด

จากรูปเมื่อลองคำนวณหาค่า T_{α} และค่า Overshoot (β) จะพบว่าได้ค่า $T_{\alpha} = 28$ ns และ $\beta = 0.17$ โดยค่า T_x คือช่วงเวลาของหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่เราต้องการทดสอบในที่นี้คือ 1.2 ns ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_x / T_{α} พบว่าค่าที่ได้อยู่ในพื้นที่ที่แรงเงา ซึ่งเป็นพื้นที่ตามมาตรฐานกำหนดไว้ดังรูปที่ 4.5 ข)



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)

รูปที่ 4.5 ผลตอบผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน

ก) ผลการตอบสนองรูปขึ้นของโวลท์เตจดีไวเดอร์จากออสซิลโลสโคป

ข) กราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T / T_{α}

ค) พารามิเตอร์ของผลตอบสนองของโวลท์เตจดีไวเดอร์

โดยพารามิเตอร์ผลตอบสนองมีรายละเอียดดังนี้

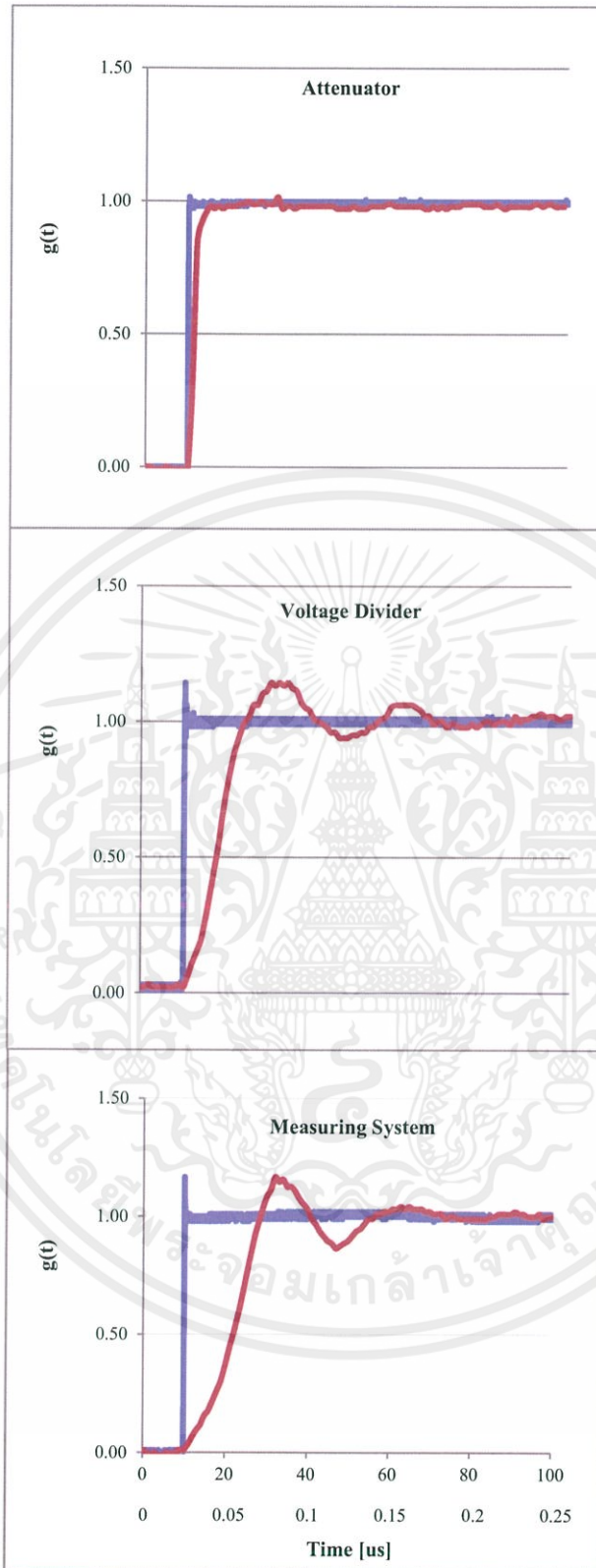
$$\beta = 17\%$$

$$T = 28 \text{ ns}$$

$$T_{\alpha}$$

$$T_n = 25 \text{ ns}$$

$$T_s = 185 \text{ ns}$$



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองรูปขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาสเกลแฟกเตอร์

ผลการทดลองผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นทำให้ทราบค่าความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม เมื่อทราบค่าความต้านทานหน่วง ความต้านทานแรงสูง ความต้านทานแรงต่ำ ความเก็บประจุแรงสูง ความเก็บประจุแรงต่ำ และเสิร์จอิมพีแดนซ์ของระบบวัด จึงหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) โดยวิธีคำนวณ
- 2) โดยการวัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกพร้อมกัน

4.2.1 สเกลแฟกเตอร์โดยการคำนวณ

เมื่อทราบค่าความเก็บประจุของแต่ละส่วนในระบบวัด จะคำนวณหาสเกลแฟกเตอร์ a ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ได้จากสมการ ดังนี้

$$a = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (4.1)$$

จากข้อมูลค่าความเก็บประจุของแต่ละส่วนของโวลต์เตจดีไวเดอร์ จะได้สเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 557

4.2.2 สเกลแฟกเตอร์โดยการวัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกพร้อมกัน

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมวิธีที่สะดวกอีกวิธีหนึ่ง ทำโดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 200 โวลต์ เข้าทางขาเข้าของโวลต์เตจดีไวเดอร์ วัดแรงดันทั้งขาเข้าและขาออกพร้อมกันโดยใช้โวลต์มิเตอร์สองเครื่องที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ในที่นี้ใช้มัลติมิเตอร์รุ่น 973A HEWLETT PACKARD 2 เครื่อง วัดแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกในเวลาเดียวกัน คำนวณสเกลแฟกเตอร์ได้จากสมการ ดังนี้

$$a = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.2)$$

ผลการทดลองพบว่าได้สเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 582

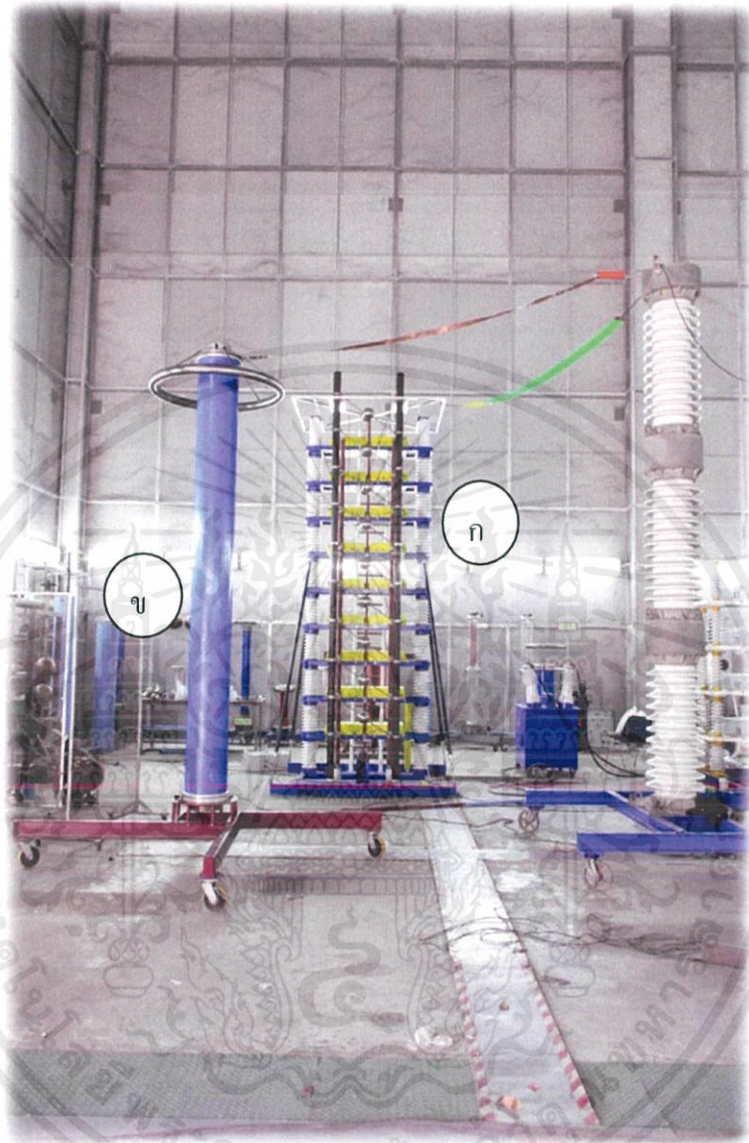
4.3 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวนในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ด้วยค่าแรงดัน 110 % ของแรงดันพิกัด แต่ในที่นี้เนื่องจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และขอบเขตของออสซิลโลสโคปในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จึงทดสอบที่แรงดันพิกัดของโวลต์เตจดีไวเดอร์

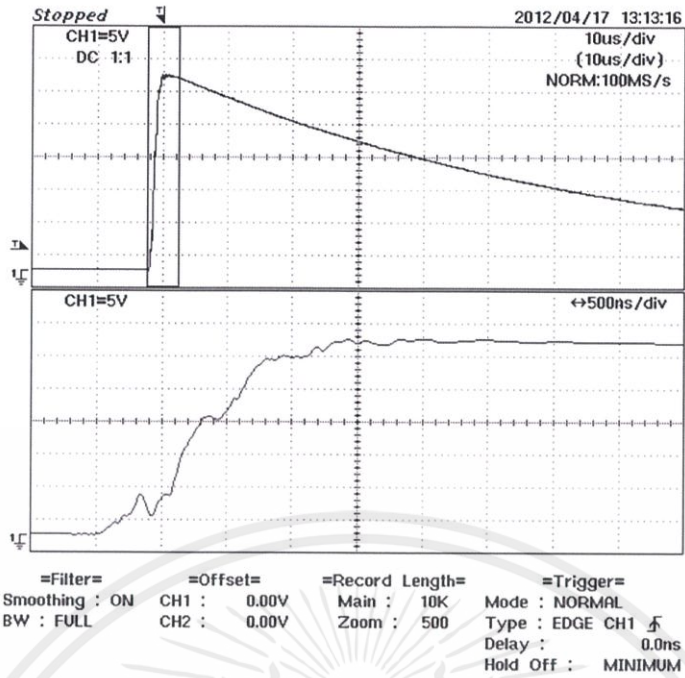
การทดสอบฉนวนที่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังเกิดการเบรกดาวน จะทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นที่กำหนดทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วละ 10 ครั้ง ที่ระดับแรงดันที่กำหนด ถ้ามีการเบรกดาวนหรือวาวไฟตามผิวเกิดขึ้นไม่เกิน 2 ครั้ง จะถือว่าฉนวนนั้นผ่านการทดสอบ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

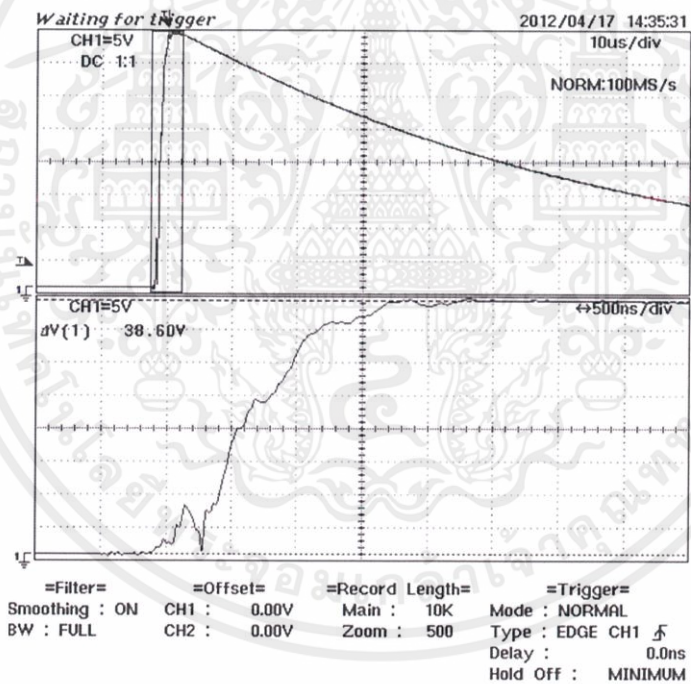
โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีค่าแรงดันพิกัด 1000 kV จึงทดสอบตัวความต้านทานภาคแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ขนาด 1000 kV ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ ชั่วละ 10 ครั้งดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์
 ก. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 ข. โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการทดสอบ



ก)

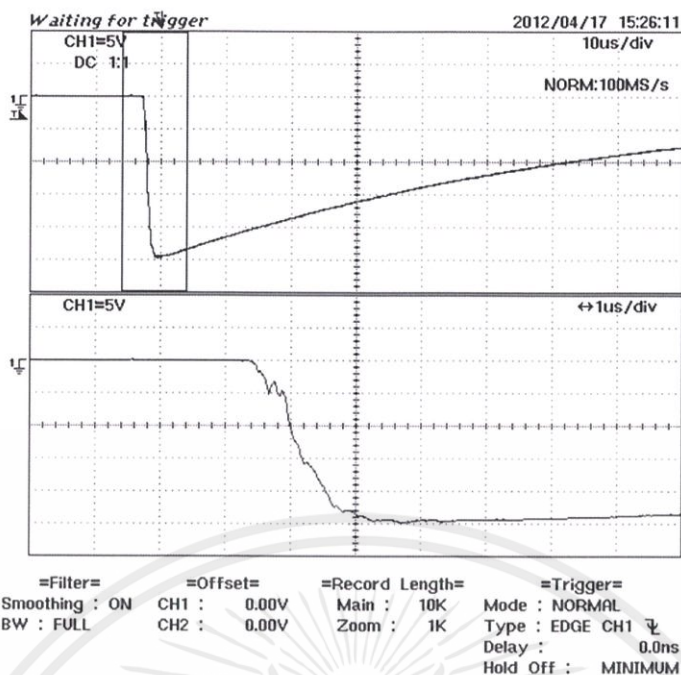


ข)

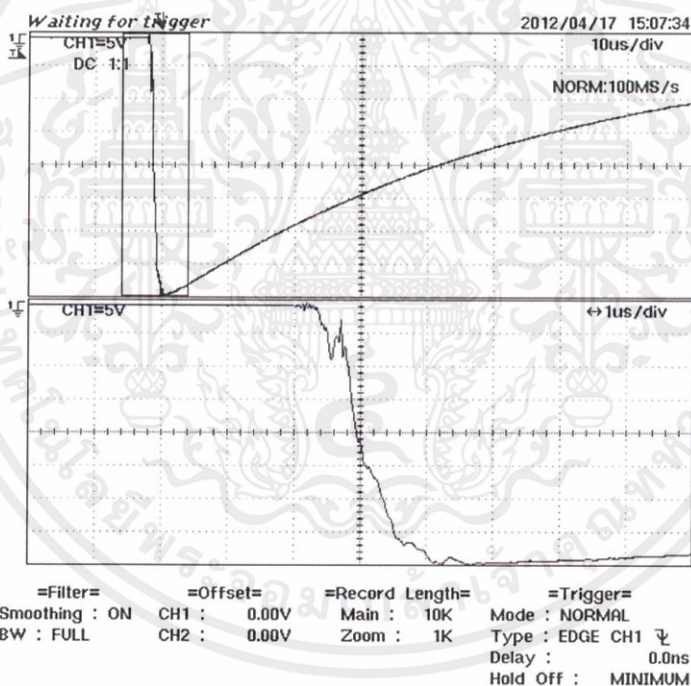
รูปที่ 4.8 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูง

ก) แรงดันลวดระดับ ชั่วบวก 650 kV รูปคลื่น 1.25/52 ns

ข) แรงดันทดสอบ ชั่วบวก 1000 kV



ค)



ง)

รูปที่ 4.8(ต่อ) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูง

ค) แรงดันลดระดับ ชั่วลบ 650 kV รูปคลื่น 1.23/49 ns

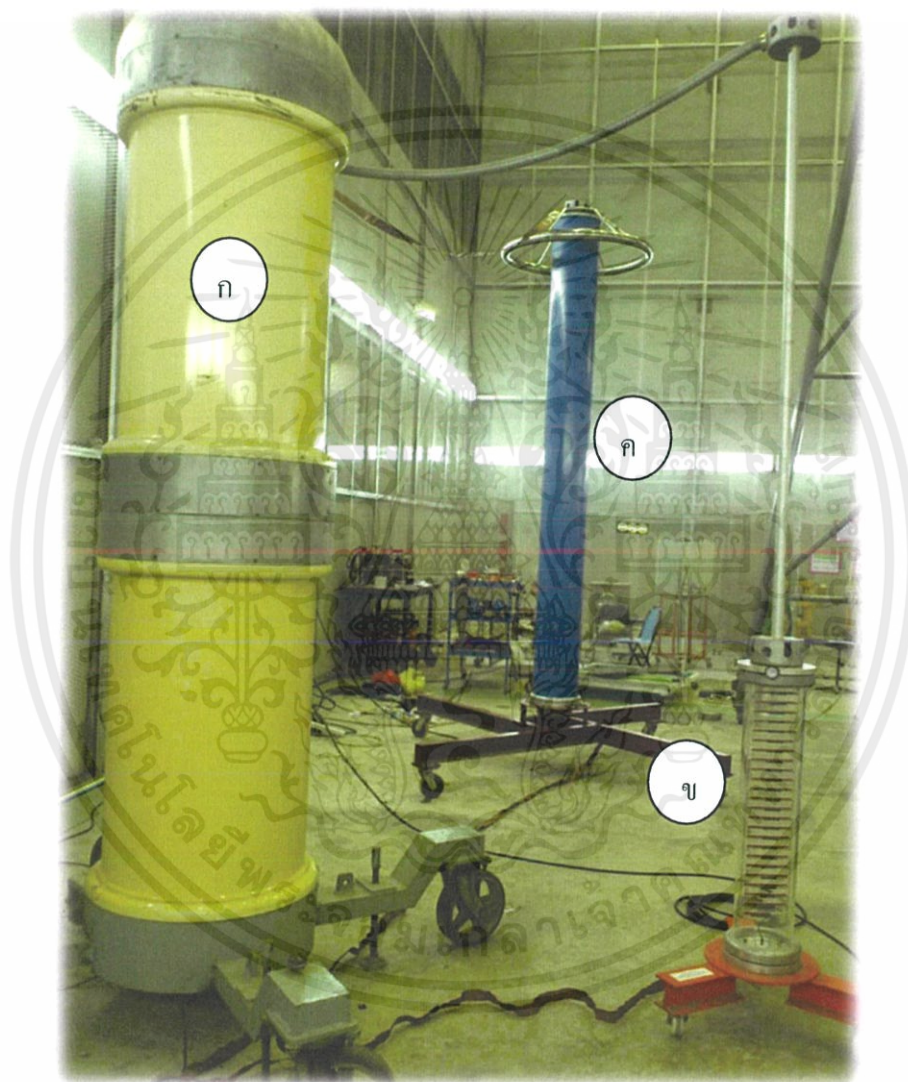
ง) แรงดันทดสอบ ชั่วลบ 1000 kV

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า องค์ประกอบภาคแรงสูงที่สร้างขึ้นสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วบวกและชั่วลบขนาด 1000 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบวัดแรงดันกระแสตรง

สามารถทำการทดสอบหาค่าคุณลักษณะต่างๆของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงได้โดยทำการต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสตรงที่จะทำการสอบเทียบ และโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงตามรูปที่ 4.19 โดยจะทำการป้อนแรงดัน และทำการบันทึกขนาดแรงดันที่ 10kV ถึง 100kV เพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale factor Test) และค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test) โดยสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสตรง



รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบวัดแรงดันกระแสตรง

- ก. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง
- ข. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง
- ค. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

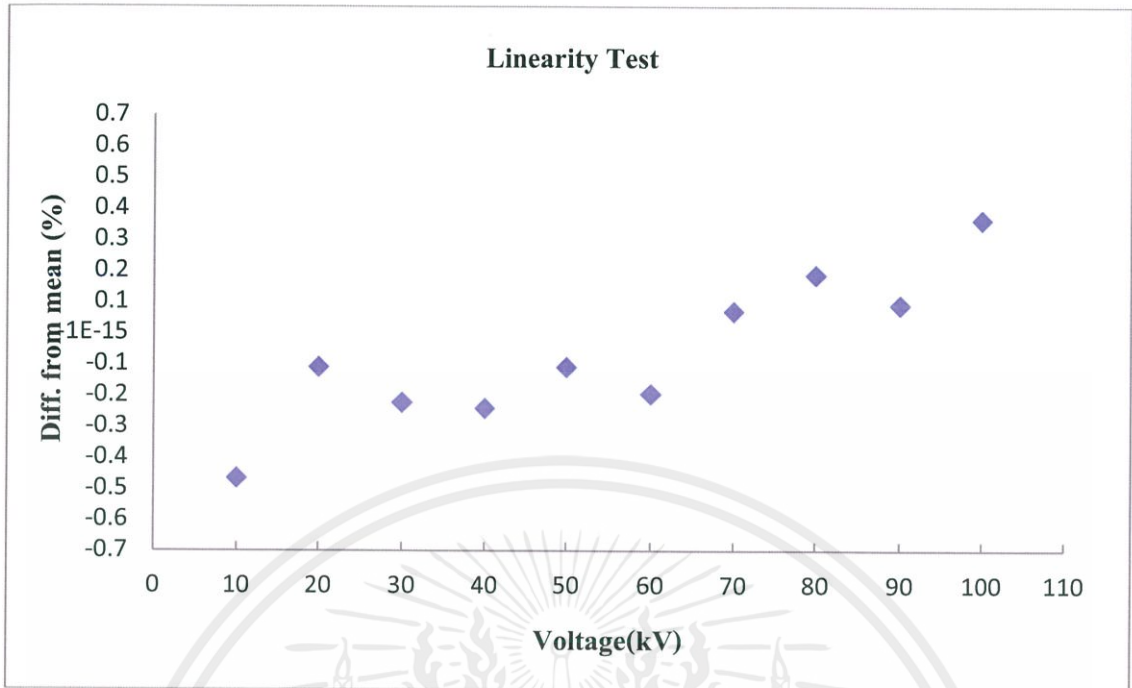
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

TEST REPORT FOR HIGH VOLTAGE DIVIDER				
TEMPERATURE 29 ° C		HUMIDITY 75%		PRESSURE 760 hPa
SET RATIO NORMA (REF.) 1000		SET RATIO NORMA (UUC) 1		Ratio Divider (UUC) 26316
Level (kVdc)	Ref. (kV)	UCC (V)	Dev (%)	SCALE FACTOR
10	10.100	0.387	0.83	26098.2
20	20.220	0.772	0.47	26191.7
30	30.060	1.149	0.59	26161.9
40	40.020	1.530	0.61	26156.9
50	50.000	1.909	0.47	26191.7
60	59.980	2.292	0.56	26169.3
70	69.900	2.664	0.29	26238.7
80	80.200	3.053	0.18	26269.2
90	90.200	3.437	0.28	26243.8
100	100.00	3.80	0.00	26315.8
Average Ratio				26204

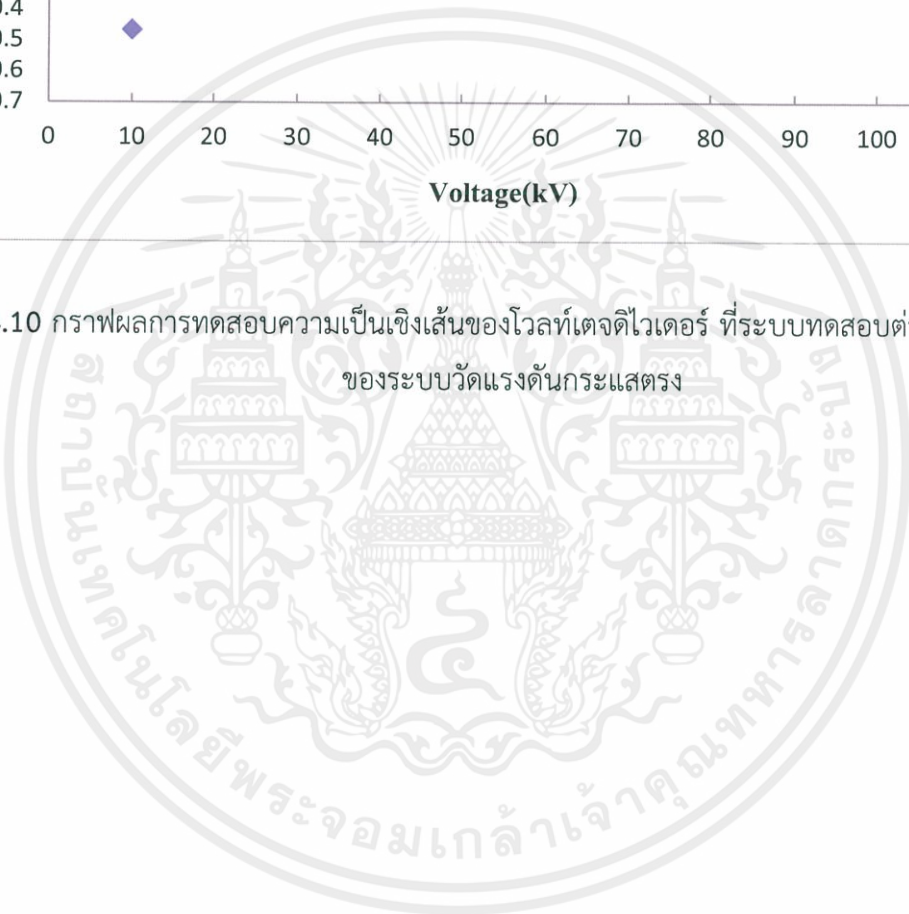
อุปกรณ์ที่ใช้:

- อุปกรณ์ที่ใช้: UNIVERSAL REFERENCE VOLTAGE DIVIDER 100kV
- FLUKE 189 True rms Multimeter
- ชุดควบคุม DC High voltage Generator HI-TESTER
- DC Transformer - 600kV 10mA

1. Determination of the assigned scale factor = Ratio x Factor = 26316
2. Linearity Test = 0.47 %



รูปที่ 4.10 กราฟผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของโวลต์เตจติไวเดอร์ ที่ระบบทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง



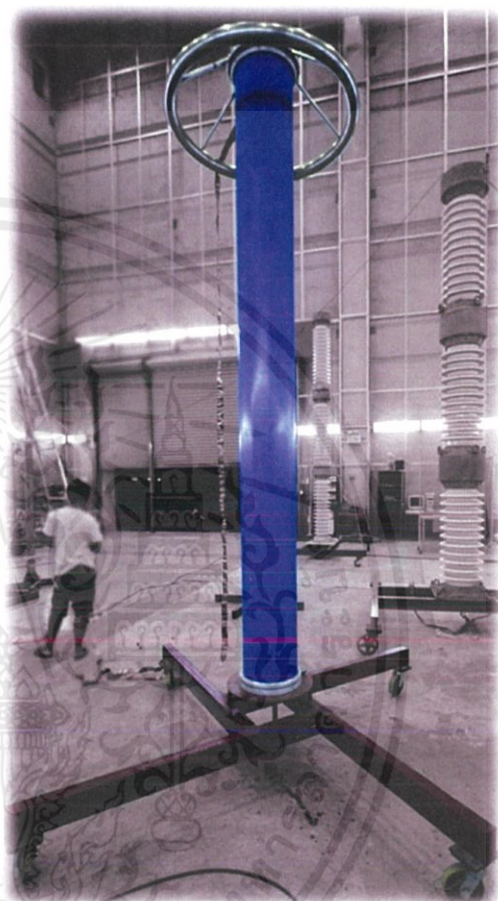
บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมขนาด 300 kV

คุณลักษณะ	ขนาด	หน่วย
พิกัดแรงดันสูงสุด		
- กระแสสลับ	300	kV
- กระแสตรง	300	kV
- แรงดันอิมพัลส์	1,000	kV
ความต้านทานภาคแรงสูง	870	M Ω
ความต้านทานภาคแรงต่ำ	1.56	M Ω
ความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง	316	pF
ความจุไฟฟ้าภาคแรงต่ำ	176	nF
ความต้านทานห่วงภาคแรงสูง	1,680	Ω
ความต้านทานห่วงภาคแรงต่ำ	3.4	Ω
สเกลแพกเตอร์จากการวัด		
- แรงดัน	26316	-
- กระแสตรง	26300	-
- แรงดันอิมพัลส์		



รูปที่ 5.1 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมขนาด 300 kV

1) จากการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ซึ่งมีพิกัดแรงดันกระแสสลับ 300 kV แรงดันกระแสตรง 300 kV และแรงดันอิมพัลส์พิกัด 1000 kV จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ ซึ่งภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์โพลีโพรพิลีนฟิล์มขนาดพิกัด 0.22 μF จำนวน 696 ตัวต่ออนุกรมกันซึ่งมีค่าเก็บประจุภาคแรงสูงประมาณ 316 pF และมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอนขนาด 10 M Ω 5W จำนวน 87 ตัวต่ออนุกรมกันมีค่าความต้านทานภาคแรงสูงประมาณ 870 M Ω และต่อขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นพร้อมทั้งมีความต้านทานชนิดเซรามิกไวร์วาวด์ขนาด 20 Ω 5 W กระจายห่วงในภาคแรงสูงจำนวน 84 ตัวซึ่งมีค่าความต้านทานห่วงรวมเป็น 1,680 Ω ภาคแรงสูงบรรจุในท่อนวนพีวีซีสูงประมาณ 3 เมตร ภาคแรงต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์โพลีโพรพิลีนฟิล์มขนาด 0.022 μF จำนวน 8 ตัวต่อขนานกันมีค่าเก็บประจุ 176 nF และมีตัวต้านทานชนิดเมทัลฟิล์มมีค่าความต้านทานรวม 1.56 M Ω

ต่อขนานกับตัวเก็บประจุพร้อมทั้งมีความต้านทานหน่วงรวม 3.4 Ω ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกระบอกทองเหลือง

2) ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ พบว่าการใส่ตัวความต้านทานหน่วงภายในหรือภายนอกเพียงอย่างเดียว จะได้ผลตอบสนองรูปคลื่นที่ไม่ดีนัก อาจจะได้เวลาตอบสนองที่ช้าไป ดังนั้นเราจะต้องกระจายความต้านทานหน่วงทั้งภายในตัวดีไวเดอร์และภายนอกด้วย

3) จากการทดสอบหาค่าสเกลแพกเตอร์โดยการใช้อุปกรณ์ประกอบภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำที่วัดได้จริงจะมีสเกลแพกเตอร์ไม่ตรงกับที่คำนวณเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบโดยจากการทดสอบพบว่าค่าความเป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงได้ 0.47% ซึ่งไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

4) ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของตัวต้านทานภาคแรงสูง โดยทดสอบที่ระดับแรงดันที่พิกัด ปรากฏว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์สามารถทนได้ทั้งชั่ววงและชั่วลบ

5) จากการที่ออกแบบจะใช้ฉนวนก๊าซ SF₆ แต่ในการประกอบจริงใช้ฉนวนอากาศความดันสูง 2.5 บาร์แทนเนื่องจากหาใช้ได้สะดวกกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การเลือกตัวเก็บประจุและความต้านทานที่จะนำมาใช้ควรเป็นตัวที่ทนแรงดันได้สูง และมีความผิดพลาดต่ำ

2) ในกรณีของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมมีความต้านทานหน่วงใช้ความต้านทานแบบเมทัลฟิล์มเป็นตัวต้านทานหน่วงต่ออนุกรมกระจายภายในตลอดภาคแรงสูง ปรากฏว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เนื่องจากตัวต้านทานชนิดนี้มีมวลความต้านทานน้อยทำให้ขีดจำกัดความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียในตัวความต้านทานต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยใช้ตัวต้านทานแบบเซรามิกไวร์วาวด์แทน

3) การต่ออุปกรณ์ภายในจะต้องคำนึงถึงการบัดกรีเพื่อไม่ให้มีขอบแหลมคม เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าจะสูงทำให้ง่ายต่อการเบรกดาวน

4) ควรตรวจสอบเป็นประจำว่ามีการรั่วซึมของก๊าซในท่อฉนวนหรือไม่

5) ควรออกแบบโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้มีส่วนแหลมคม

6) ควรออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์ให้ซ่อมบำรุงและเคลื่อนที่ได้ง่าย

7) สภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิและความชื้นมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน

8) เนื่องด้วยปัจจุบันมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้ประกาศใช้อย่างเป็นทางการแล้ว ซึ่งวิธีการทดสอบที่กำหนดไว้ส่วนใหญ่จะใช้วิธีทดสอบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของสถาบัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication60060-1, **High Voltage Test Techniques**, Part 1: General Definition and Test Requirements, 1989.
- [2] IEC Publication60060-2, **High Voltage Test Techniques**, Part 2: Measuring System, 1994.
- [3] วรา จูห้อง, การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
- [4] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, การออกแบบและสร้างโวลต์เตจติไวเตอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- [5] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ และสำรวย สังข์สะอาด, การพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น, **สัมมนาเชิงวิชาการเรื่อง “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอีเอ็มซี”**, 2543
- [6] นิภัทร์ ทุงสี, นิमित พัฒโนทัย, บุญสม ละออรัตนศักดิ์ และปณิธาน ภูมิวิชชเวช, การออกแบบสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 กิโลโวลต์, **ปริญญาวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [7] เจษฎา ฟ่ำเลิศ, ธนินทร์ อินทร์ประดับ และศักดิ์ดา ชาตวิงศากุล, การออกแบบสร้างตัวแบ่งแรงดันกระแสตรงแบบความต้านทาน ขนาด 100 กิโลโวลต์, **ปริญญาวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [8] อนันท์ คัมภีรานนท์ และรุจี จันท์ขาว, **ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น**, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี.
- [9] จีรสิทธิ์ ชัยประภา, ณรงค์ ทิมทอง, ต่อสกุล โอภิชากรณ์ และทิวา ชุนเที่ยง, การพัฒนาชุดทดลองการแบ่งแรงดันสูง, **ปริญญาวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.

- [10] กิรติวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์, ปุณยวีร์ ทองเขียว, พรศักดิ์ สงวน และศุภวัฒน์ กลั่นเรืองแสง, โวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันกระแสตรง, กระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ พิกัด 100 กิโลโวลท์, **ปริญญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [11] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2549.
- [12] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2**, ตัวนำ แม่เหล็ก สารกึ่งตัวนำ ตัวนำยิ่งยวด วัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1**, ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] ประเสริฐ รัชสีโสภณอาภรณ์ และสำรวย สังข์สะอาด, “การออกแบบสร้างอิมพัลส์ โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน 1000 กิโลโวลท์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21. ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี 2541.
- [15] Kuffel, E. and Zaengl, W.S., **High Voltage Engineering Fundamental**, Pergamon Press, Oxford, 1st ed., 1984
- [16] รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด และคณะวิจัย, **โครงการการพัฒนา ออกแบบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นซัน**, 2545.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม พิกัด 1000 kV

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A UNIVERSAL VOLTAGE DIVIDER

บุรีศร์ เถาว์หิรัญ ปณิธาน อุดมเดช ปองพล สิงควัฒน์ ไผท สังขชาติ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ :0-2326-4550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ซึ่งมีพิกัดแรงดันกระแสสลับ 300 kV แรงดันกระแสตรง 300 kV และ แรงดันอิมพัลส์พิกัด 1000 kV ภาคแรงสูงประกอบด้วย ตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์โพลีโพรพิลีนฟิล์มต่ออนุกรมกันและมีตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอนต่อขนานกับตัวเก็บประจุภาคแรงสูงบรรจุในท่ออลูมิเนียมพีวีซีสูงประมาณ 3 เมตร ภาคแรงต่ำประกอบด้วยตัวเก็บประจุชนิดเมทัลไลซ์โพลีโพรพิลีนฟิล์ม และมีตัวต้านทานชนิดเมทัลฟิล์ม ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ภายในกระบอกทองเหลือง จากนั้นทำการทดสอบหาคุณสมบัติของระบบวัดตามมาตรฐาน IEC กำหนด ได้แก่ ผลตอบสนองรูปขึ้น สเกลแฟคเตอร์ ค่าความเป็นเชิงเส้น ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

คำสำคัญ : โวลต์เตจดีไวเดอร์,แรงดันอิมพัลส์,ผลตอบสนองรูปขึ้น

Abstract

This paper presents the design and construction of a universal voltage divider for measuring DC, AC and impulse voltages at rated 300 kV, 300 kV and 1000 kV, respectively. The high voltage part consists of a metalized polypropylene film capacitor and a carbon film resistor. The capacitors are connected in series and are connected parallelly with resistor. The high voltage part with a height of 3 meters is contained inside a PVC pipe. The low voltage part consists of a metalized polypropylene film and a metal film resistor. Both are connected in parallel symmetrically. The characteristic performance of the voltage divider is tested according to the reference standard

Keyword : Voltage Divider, Impulse Voltage, Step Response

1. บทนำ

การวัดแรงดันสูงจะใช้การลดทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงก่อนซึ่งมีความปลอดภัยในการวัดมากกว่าการวัดโดยตรง และทำให้มีความเหมาะสมต่อเครื่องมือที่วัด ดังนั้นจึงมีการออกแบบและสร้างโวลต์เตจ

ดีไวเดอร์ (Voltage Divider) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการลดทอนแรงดันและเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นได้ว่าโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างนั้นมีประสิทธิภาพพอสามารถที่จะนำไปใช้งานได้ เราจึงควรที่จะเข้าใจในหลักการทำงานของอุปกรณ์และออกแบบสร้างให้ตรงตามมาตรฐานสากลได้กำหนด โดยมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องได้แก่ IEC60060-1 [1], IEC60060-2 [2], IEEE (standard 4)

ทั่วไปแล้วโวลต์เตจดีไวเดอร์ผสมแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน้าที่ได้ออกแบบและประกอบสร้างนี้ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ ประกอบด้วยความต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวของโวลต์เตจดีไวเดอร์ ถ้าเลือกใช้ตัวต้านทานที่เหมาะสม โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดี แม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ เนื่องจากโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ต้องใช้เวลาตอบสนองที่ไวการจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้มีความเหนียวแน่นที่สุด การจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้มีความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนียวน้ำได้

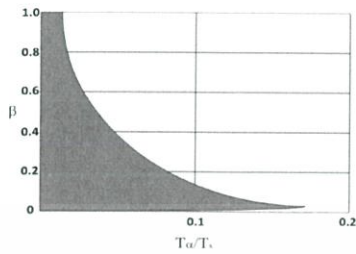
2. คุณสมบัติระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

ในส่วนของคุณสมบัติของระบบที่ต้องการวัดแรงดันอิมพัลส์สามารถกำหนดได้ด้วยเวลาตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิธของระบบวัด ระบบวัดที่ดีต้องมีแบนด์วิธที่กว้างกว่าแบนด์วิธของคลื่นที่ต้องการวัดเพื่อที่จะสามารถถ่ายโอนสัญญาณอย่างไม่มีผิดเพี้ยน ทั้งขนาดและลักษณะของรูปคลื่นแรงดัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัดมีสองประการคือ ผลตอบสนองรูปขึ้น (Step response) และสัดส่วนแรงดัน (Scale factor) เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติถ่ายโอนของโวลต์เตจดีไวเดอร์ซึ่งขึ้นกับความถี่ได้ดียิ่งขึ้นจึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการ

2.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น (Step response)[3]

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้กำหนดค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์ว่ากรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น

เต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นของรูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่น T_x พารามิเตอร์ผลตอบแทนของควอรอยู่ในเงื่อนไข β กับ T_α/T_x จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรงจลรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x โดยที่ T_x คือเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

2.2 สเกลแฟกเตอร์[2,4]

มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) ได้นิยามความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดไว้ว่า "สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัด เพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า" โดยตามมาตรฐานสเกลแฟกเตอร์ที่ระบุผิดพลาดได้ไม่เกิน 3%

3. การออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างเป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน โดยมีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) กำหนดค่าแรงดันที่กำหนดของโวลต์เตจดีไวเดอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเหตุผลที่ออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสมเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ผลตอบแทนจะดีขึ้น และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำเท่ากัน ซึ่งเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

3.1 การออกแบบสร้างภาคแรงสูง

โดยในการออกแบบโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีบรรจุนำทองแดง PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) 0.317 m ความยาวท่อ (l) 3.37 m และมีความสูงจากพื้น (h) 0.464 m ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นตัวเก็บประจุยอต่ออนุกรมกัน ให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันที่ต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมีค่ามากพอที่ทำให้ค่าเก็บประจุสเตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลต์เตจดีไวเดอร์ไม่มากนัก ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติควรมีค่ามากกว่า 50 pF ต่อความสูงของโวลต์เตจดีไวเดอร์ 1 m แต่ไม่ควรเกิน 1000 pF

ค่าวบบไฟตามผิวฉนวน[3,4]ความยาวท่อฉนวนPVC กำหนดด้วยระยะวบบไฟตามผิวฉนวน ความยาวตามผิวฉนวนที่ใช้ในอาคาร ถ้าผิวเรียบ คือไม่มีครีบ ใช้ความยาวจำเพาะดังนี้

-ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดัน AC 5 m/MV

-ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ 2.5 m/MV

ซึ่งโวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ได้ประกอบสร้างมีความยาวตามผิวฉนวนอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด

การต่อตัวเก็บประจุยอและตัวต้านทานในภาคแรงสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุยอทั้งหมดจำนวน 696 ตัว ตัวต้านทานยอทั้งหมดจำนวน 87 ตัว และตัวต้านทานหน่วงจำนวน 84 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นอะคริลิกใสจำนวน 3 แผ่น นำตัวต้านทานยอต่อขนานกับตัวเก็บประจุยอแต่ละชั้นและตัวต้านทานหน่วงต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุระหว่างชั้น โดยภาคแรงสูงทั้งสามแผ่นนี้จะนำมาต่ออนุกรมกันโดยตัวเก็บประจุยอที่ใช้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์มขนาดความจุ 0.22 μF พิกัดทนแรงดัน 1.6 kVdc/650 Vac มีค่าเก็บประจุรวม 316 pF ความต้านทานยอที่ใช้เป็นชนิดคาร์บอนฟิล์มขนาด 10 M Ω ทั้งหมด 87 ชั้น จึงมีความต้านทานรวม 870 M Ω และความต้านทานหน่วงที่นำมาอนุกรมได้สูงสุด 84 ตัว ตัวละ 20 Ω มีค่าความต้านทานหน่วงรวม 1680 Ω



รูปที่ 2 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงเมื่อประกอบเสร็จ

3.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ

การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำแบบ Radial และเลือกแรงดันขาออกเป็น 1.8 kV ซึ่งสามารถคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ของดีไวเดอร์ได้ประมาณ 557 อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำมีทั้งหมด 8 ขา โดยแต่ละขาประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 12 M Ω ต่อขนานกับตัวเก็บประจุขนาด 0.022 μF จากนั้นต่อความต้านทานหน่วงกระจายเข้าไปในแต่ละขาขนาด 29 Ω และมี $R_m = 75 \Omega$



รูปที่ 3 ชุดอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำเมื่อประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบสร้างตัวลดทอน

ออสซิลโลสโคปที่ใช้สามารถแสดงผลได้สูงสุด 50 V ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบสร้างตัวลดทอนขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลต์เทจดีไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่ดิจิตอลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนอาศัยหลักการเดียวกับโวลต์เทจดีไวเดอร์ กล่าวคือแรงดันขาออกสูงสุดของตัวลดทอน กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของดิจิตอลออสซิลโลสโคป เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะสามารถหาสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนได้โดยอาศัยสมการ

$$F_A = \frac{Z_3 + Z_4}{Z_4} \quad (1)$$

ในที่นี้เลือกค่าแรงดันขาออกของตัวลดทอน 45 V ซึ่งจะทำให้ได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนประมาณ 40

ภาคปฐมภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม ขนาด 2.5 μF 2 kV_{DC} ต่อขนานกับตัวต้านทานแบบฟิล์ม โลหะขนาด 1 W 20 M Ω และมีตัวต้านทานห้วงอนุกรมด้วยขนาด 1 W 1000 Ω

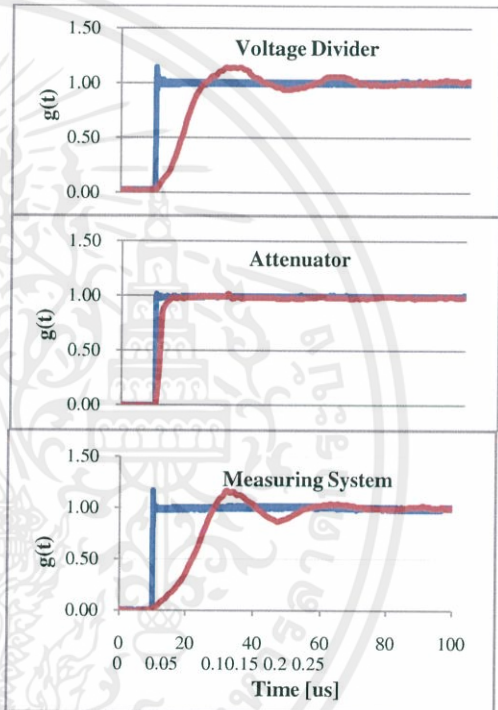
ภาคทุติยภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม ขนาด 200 μF 2 kV_{DC} ต่อขนานกับตัวต้านทานแบบฟิล์ม โลหะขนาด 1 W 0.5 M Ω และมีตัวต้านทานห้วงอนุกรมด้วยขนาด 1 W 25 Ω โดยองค์ประกอบทั้งหมดบรรจุอยู่ในกล่องซีลดีอะลูมิเนียม ตัวลดทอนที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวลดทอนที่ประกอบสร้าง

จากการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นของโวลต์เทจดีไวเดอร์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าขององค์ประกอบต่างๆ ทั้งองค์ประกอบภายในและภายนอก จนเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด พบว่าโวลต์เทจดีไวเดอร์มีความไวต่อการตอบสนองดี แต่ยังมีการออสซิลเลชันของรูปคลื่นเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 6 ซึ่งในรูปนี้จะเป็นการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นโดยการต่อโวลต์เทจดีไวเดอร์กับตัวลดทอนโดยมีความต้านทานห้วงกระจายภายในภาคแรงสูง 1680 Ω และภาคแรงต่ำ 3 Ω มีการต่อกราวด์ที่ตัวบันไดความต้านทานห้วงภายนอก 282 โอห์มและใส่ซิลด์อิมพีเดียเตอร์

จากรูปที่ 6 เป็นรูปผลตอบสนองรูปขั้นของ ตัวลดทอน โวลต์เทจดีไวเดอร์ และของระบบวัด



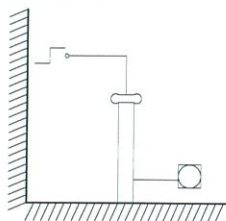
รูปที่ 6 ผลการตอบสนองรูปขั้น

4. การทดสอบและประเมินผล

4.1 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

การหาผลตอบสนองรูปขั้นใช้วงจรตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 [2] (1994) โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (Unit step generator) ของ DR.STRAUSS รุ่น RIG 1000-H

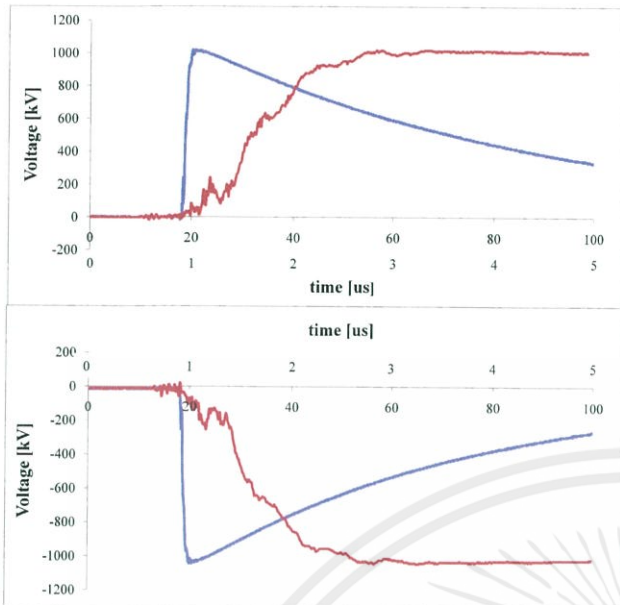
การศึกษาวิจัยหลักขณะสมบัติของ โวลต์เทจดีไวเดอร์และระบบวัด จะเลือกใช้วงจรที่มาตรฐานแนะนำคือ วงจรดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น

4.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

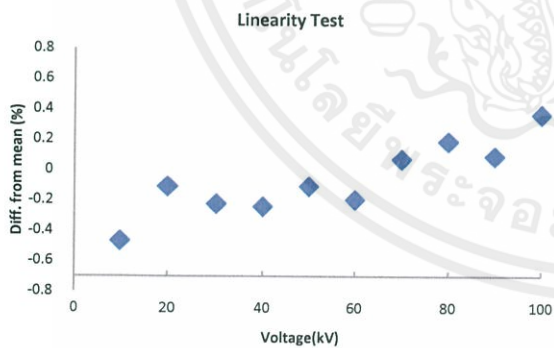
การทดสอบฉนวนที่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังเกิดการเบรกดาวน จะทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นที่กำหนดทั้งชั่ววอกและชั่วลบ ชั่วละ 10 ครั้ง ที่ระดับแรงดันที่กำหนด ถ้ามีการเบรกดาวนหรือวาวไฟตามผิวเกิดขึ้นไม่เกิน 2 ครั้ง จะถือว่าฉนวนนั้นผ่านการทดสอบ จึงทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ขนาด 1000 kV ทั้งชั่ววอกและชั่วลบ ชั่วละ 10 ครั้ง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูงแรงดันทดสอบชั่วคราว 1000 kV

4.3 การทดสอบวัดแรงดันกระแสตรง

ทำการทดสอบระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงได้โดยทำการต่อโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบและโวลต์เตจดีไวเซอร์อ้างอิงขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรงแล้วทำการป้อนแรงดันและบันทึกขนาดแรงดันที่ 10 kV – 100 kV เพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์และค่าความเป็นเชิงเส้นโดยสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของโวลต์เตจดีไวเซอร์ที่ระบบกระแสตรง

5. สรุป

จากการออกแบบและประกอบสร้างโวลต์เตจดีไวเซอร์แบบผสม ซึ่งมีพิคคแรงดันกระแสตรง 300 kV แรงดันกระแสตรง 300 kV และแรงดันอิมพัลส์พิคค 1000 kV จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ภาค

แรงสูงและภาคแรงต่ำ ซึ่งภาคแรงสูงประกอบด้วย ค่าความเก็บประจุ 316 pF ค่าความต้านทานภาคแรงสูง 870 MΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นและความต้านทานหน่วงต่ออนุกรมกระจายกันแต่ละชั้นรวมเป็น 1,680 Ω ภาคแรงสูงบรรจุในท่อฉนวนพีวีซีสูงประมาณ 3 เมตร ภาคแรงต่ำประกอบด้วยค่าเก็บประจุ 176 nF ค่าความต้านทานรวม 1.56 MΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ และความต้านทานหน่วงขนาดรวม 3.4 Ω ภาคแรงต่ำบรรจุอยู่ในกระบอกทองเหลือง

จากการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์พบว่าความเป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.47% ซึ่งไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน

ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ขององค์ประกอบภาคแรงสูงโดยทดสอบที่ระดับแรงดันพิคคปรากฏว่าโวลต์เตจดีไวเซอร์สามารถทนแรงดันได้ทั้งชั่วคราวและชั่วคราว



รูปที่ 9 โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบผสมที่ประกอบสร้าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication 60060-1, High Voltage Test Techniques, Part 1 : General Definition and Test Requirements, 1989.
- [2] IEC Publication 60060-2, High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring System, 1994.
- [3] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ และสำรวย สังข์สะอาด, “การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน 1000 กิโลโวลต์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21. ทีมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี 2541.
- [4] ดร. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2549.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Impulse High Voltage Generator

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Unit Step Generator

DR.STRAUSS RIG 1000-H

- Output Voltage: 0 – 1000 V
- Input Voltage : 220 - 250 V
- Polarity : +/-



Digital Phosphor Oscilloscope

- Tektronix DPO 4054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Digital Oscilloscope

- YOKOGAWA DL 1640 200MS/s 200MHz

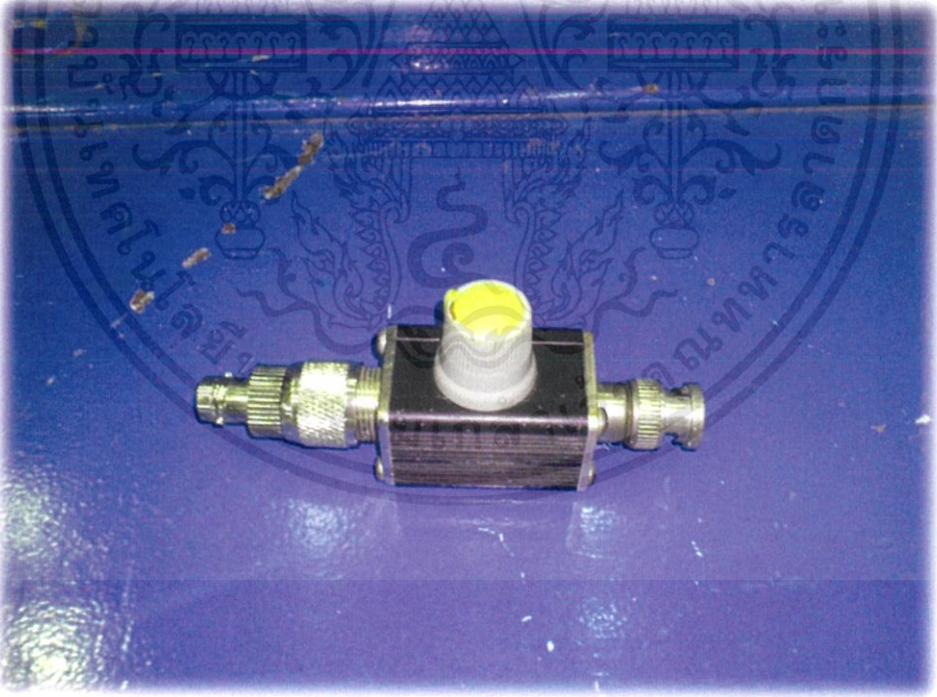


- FLUKE 179 TRUE RMS MULTIMETER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ความต้านทานชนิดลวดนิโครม ขนาด 282Ω



ความต้านทานปรับค่าได้ 0 - 600 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

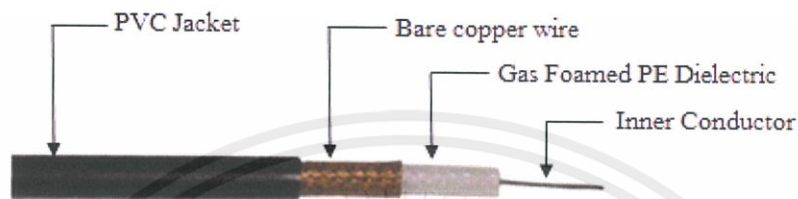


ภาคผนวก ค
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าที่ได้จากโวลต์เตจติไวเดอร์

การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ

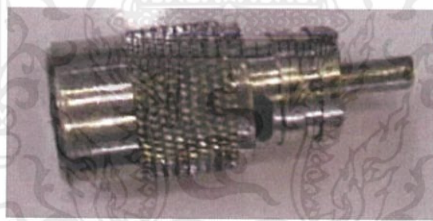
ชนิดของสายเคเบิลที่เลือกใช้ตามข้อแนะนำของมาตรา IEEE Std 4 – 1995 หัวข้อที่ 18.4 โดยแนะนำสายโคแอกเซียชนิด RG11 A/U ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 75 Ω โดยมีความยาวที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 15 เมตร (50 ฟุต)

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



สายเคเบิลชนิด RG11 A/U

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



หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป

ตารางคุณสมบัติของสายเคเบิล RG11 A/U

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

เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

ในส่วนของภาคแรงดันต่ำจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือวัดที่สามารถวัดแรงดันขาออกของโวลต์เตจดีไวเดอร์ได้ และเครื่องมือวัดแรงดันต่ำมีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล แต่ปัจจุบันเครื่องมือวัดที่นิยมใช้กันมากคือ แบบดิจิตอล จึงจะขอยกตัวอย่างเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลที่จะนำมาใช้วัดแรงดันเอาท์พุทที่ออกจากโวลต์เตจดีไวเดอร์ดังนี้

มาตรฐานการทดสอบพิกัดความปลอดภัยของมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 61010-1 [2]

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



ก)



ข)

เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

ก) มัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV

ข) Oscilloscope DL 1540/DL 1540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางคุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUKE 87 & 89 series IV

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

คุณสมบัติของ Oscilloscope DL 1540/DL 1540L

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

ตารางคุณสมบัติของ Probe

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายบุรีศร์ เถาว์หิรัญ เกิดเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียน สารวิทยาและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Email:burid.th@gmail.com



นายปณิธาน อุดมเดช เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียน เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Email:maxky@windowslive.com



นายปองพล สิงควัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Email:peep_307@hotmail.com



นายไพฑูรย์ คังขชาติ เกิดเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Email: psangkachat@gmail.com