

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์
แบบตัวเก็บประจุ**

Design and Characterization of A Capacitive Voltage Divider Toolkit

โดย

นาย ชัยรัตน์ จิรัชัยมงคล

นาย ชาญณรงค์ วินยางค์กุล

นาย ฐิตินันท์ นันทะแสน



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82965
วัน,เดือน,ปี..... 30 ก.ค. 2551

b. 11958315
i.

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุ
Design and Characterization of A Capacitive Voltage Divider Toolkit



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

อ. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

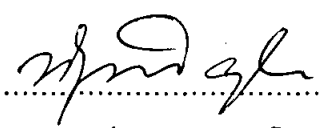
เรื่อง การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของชุดทดลองโวลเตจดีไวเตอร์แบบตัวเก็บ
ประจุ

ผู้จัดทำ

1. นาย ชัยวัฒน์ จีระชัยมงคล
2. นาย ชาญณรงค์ วินยางค์กุล
3. นาย รุติพันธ์ นันทะแสน


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อานันทวัฒน์ คุณากร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ พีรุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและศึกษาคูณลักษณะของชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ แบบตัวเก็บประจุ

นาย ชัยรัตน์ จีระชัยมงคล

นาย ชาญณรงค์ วินยางค์กุล

นาย จูตินันท์ นันทะแสน

รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. พิรุณี ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบและศึกษาคูณลักษณะของชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ แบบตัวเก็บประจุ เป็นการศึกษาคูณลักษณะของโวลเตจดีไวเซอร์ในการนำไปใช้งาน โดยการนำเอาตัวเก็บประจุ 3 ชนิด คือ โพลีโพลีลีน ไมลาร์ และเซรามิก มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์กัน และมีการนำตัวความต้านทานห้วงมาใช้ในการศึกษาถึงผลตอบสนองของดีไวเซอร์ และผลตอบสนองผ่านการทดสอบตามข้อกำหนด ของมาตรฐาน IEC 60-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Characterization of A Capacitive Voltage Divider Toolkit

Chairat Jeerachaimongkon

Chanarong Winyangkul

Thitinan Nantasaen

Assoc.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn Supervisor

Norraset Pathanadej Supervisor

Perawut Yutakowit Supervisor

2007

ABSTRACT

This thesis presents design and studying result of characteristics of capacitive divider experimental kits. Three types of capacitor as follows; Polypropylene, Mila and Ceramic are used in the experimental kit in order to study their effects in the operation of the divider. In addition, a damping resistor is connected to the experimental kit to study the responses of the divider. The experimental kit has a scaling factor and responses according to IEC 60-2.

ii

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนัฐศึกษาซึ่งต่อความกรุณาที่ รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช และอาจารย์ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ที่เสียสละเวลามาช่วยคณะผู้จัดทำในการทดสอบ และให้คำปรึกษา ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ ดร. สมภพ ผลไม้ รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้เบิกใช้เครื่องมือในการทดสอบ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ธุรการ และผู้จัดทำต้องขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ร่วมห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Lab) ที่คอยเอาใจใส่ ให้กำลังใจและคอยให้คำแนะนำต่าง ๆ เสมอ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ๆ ทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจให้ไม่ทอดทิ้งในการทำงาน และสนับสนุนทางการเงิน ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสสลับ.....	4
2.1.1 การวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์.....	4
2.1.2 การวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม.....	5
2.1.3 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพัลส์ต่ออันดับ.....	5
2.1.4 การวัดแรงดันด้วยโวลต์จติไวเตอร์.....	6
2.2 โวลต์จติไวเตอร์.....	6
2.2.1 โวลต์จติไวเตอร์แบบความต้านทานวัดแรงดันกระแสตรง.....	7
2.2.2 โวลต์จติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ.....	9
2.3 การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับด้วยโวลต์จติไวเตอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	11
2.4 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลต์จติไวเตอร์.....	12
2.5 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด.....	14
2.5.1 ผลตอบสนองรูปขั้ว.....	14
2.5.2 สเกลแฟกเตอร์.....	19
2.6 องค์ประกอบของโวลต์จติไวเตอร์.....	20
2.7 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลต์จติไวเตอร์.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 สายต่อแรงสูงเข้าโวลเตจดีไวเดอร์.....	25
2.9 อุปกรณ์วัดแรงดันภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์.....	25
2.9.1 เครื่องบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	25
2.9.2 เคเบิลวัด.....	26
2.10 ความต้านทานสมคู่.....	27
บทที่ 3 การออกแบบ.....	29
3.1 ตัวเก็บประจุ.....	29
3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่.....	30
3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดที่ปรับเปลี่ยนค่าได้.....	33
3.2 ตัวต้านทาน.....	34
3.2.1 ตัวต้านทานชนิดที่มีค่าคงที่.....	34
3.2.2 ตัวต้านทานปรับค่าได้.....	35
3.2.3 ตัวต้านทานชนิดที่เปลี่ยนแปลงค่าได้.....	35
3.3 การออกแบบภาคแรงสูง.....	36
3.4 การออกแบบภาคแรงต่ำ.....	38
3.5 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ.....	39
3.6 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและการประเมินผล.....	42
4.1 วงจรและการต่ออุปกรณ์ในการทดสอบ.....	42
4.2 การทดสอบคุณสมบัติของชุดล่องโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	43
4.3 การทดสอบคุณสมบัติตัวต้านทานหน่วยที่เหมาะสม.....	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วยกับเวลาหน้าคลื่น.....	55
บทที่ 5 สรุปและข้อแนะนำ.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบหาค่าผลตอบสนองรูปชั้นตามทฤษฎี	
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบด้วย Impedance analyzer	
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบด้วย เครื่อง Discharge Before Connecting	
ประวัติผู้เขียน	63



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเซอร์.....	7
2.2 วงจรของโวลเตจดีไวเซอร์แบบความต้านทาน.....	8
2.3 วงจรของโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ.....	9
2.4 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับ.....	10
2.5 วงจรเรกติฟายเออร์โวลเตจดีไวเซอร์วัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ.....	12
2.6 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์.....	13
2.7 ข่ายวงจร 4 ขั้วเขียนแทนระบบวัด.....	15
2.8 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน.....	16
2.9 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง.....	17
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_u/T_x	18
2.11 ค่าแอมพลิจูดที่คลาดเคลื่อน.....	19
2.12 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเซอร์องค์ประกอบย่อย.....	22
2.13 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์.....	23
2.14 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเซอร์แบบมีความต้านทานหน่วง.....	24
2.15 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน.....	26
2.16 การต่อความต้านทานสมมูลกันในวงจรภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเซอร์.....	28
3.1 พื้นฐานโครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	29
3.2 รูปตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่.....	30
3.3 รูปตัวเก็บประจุแบบไมก้า.....	31
3.4 รูปตัวเก็บประจุแบบเซรามิก.....	31
3.5 รูปตัวเก็บประจุโพลีโพลีเอสเตอร์.....	32
3.6 รูปตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	32
3.7 รูปตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม.....	33
3.8 รูปตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้.....	34
3.9 รูปตัวต้านทานแบบมีค่าคงที่.....	35
3.10 รูปชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์.....	36
3.11 แสดงการต่อตัวเก็บประจุลงในภาคแรงดันสูง.....	37
3.12 แสดงภาคแรงดันต่ำของชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์.....	38
3.13 สายเคเบิลชนิด RG8 A/U.....	39
3.14 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับภาคแรงต่ำ.....	40
3.15 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.16 หัวต่อภาคแรงต่ำ.....	41
3.17 เครื่องมือวัดแรงต่ำ.....	41
4.1 วงจรการทดสอบชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์.....	42
4.2 การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์.....	43
4.3 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดเซรามิก ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง.....	45
4.4 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม.....	45
4.5 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม	46
4.6 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม.....	46
4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 1000 โอห์ม	47
4.8 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดไมลาร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง.....	47
4.9 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม.....	48
4.10 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม	48
4.11 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม.....	49
4.12 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 1000 โอห์ม	49
4.13 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดโพลีโพลีลีน ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง.....	50
4.14 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดโพลีโพลีลีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม.....	50
4.15 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดโพลีโพลีลีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ VIII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดโพลีโพลีไพรีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม.....	51
4.17 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดโพลีโพลีไพรีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 1000 โอห์ม	52
4.18 ผลตอบสนองรูปชั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดเซรามิก.....	53
4.19 ผลตอบสนองรูปชั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดไมลาร์.....	53
4.20 ผลตอบสนองรูปชั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดโพลีโพลีไพรีน.....	54
4.21 ความสัมพันธ์ของ T_0/T_x กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก $T_x = 1.2\mu s$	55
4.22 ความสัมพันธ์ของ T_0/T_x กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ $T_x = 1.2\mu s$	55
4.23 ความสัมพันธ์ของ T_0/T_x กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีไพรีน $T_x = 1.2\mu s$	56
4.24 ความสัมพันธ์ของ T_0/T_x กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก $T_x = 0.3\mu s$	56
4.25 ความสัมพันธ์ของ T_0/T_x กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ $T_x = 0.3\mu s$	57
4.26 ความสัมพันธ์ของ T_0/T_x กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีไพรีน $T_x = 0.3\mu s$	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เงื่อนไขที่กำหนดของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง.....	18
4.1 ผลการทดสอบหาเวลาผลตอบสนองรูปปั้นของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์.....	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ **x** การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมในประเทศ ได้เจริญก้าวหน้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง จะต้องผ่านการทดสอบเพื่อให้มีคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการที่จะนำมาติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้จริง เพราะถ้านำไปติดตั้งโดยไม่ผ่านการทดสอบ อาจจะมีข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ผลิตไม่ได้ตามมาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำไปติดตั้งแล้วจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ ซึ่งต้องเสียงบประมาณในการซ่อมแซมเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์ให้ได้ก่อนนำไปติดตั้ง แต่เนื่องจากการทดสอบอุปกรณ์นั้นใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก จึงไม่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นในการวัดแรงดันแต่ละครั้งจะต้องมีอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนแรงดันสูง โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้มีราคาแพง โวลเตจดีไวเซอร์ดังกล่าวเมื่อใช้ไปสักระยะเวลาหนึ่ง เช่น 1-3 ปีก็มักจะมีปัญหาเกิดขึ้นจำเป็นที่จะต้องส่งตัวโวลเตจดีไวเซอร์กลับไปซ่อมยังต่างประเทศ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงมาก เนื่องจากเทคโนโลยีในการออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเซอร์มีการศึกษาและสร้างกันอย่างแพร่หลายแล้วในประเทศ โวลเตจดีไวเซอร์ที่ออกแบบสร้างมาส่วนใหญ่มักจะมีอายุการใช้งานในช่วงระยะเวลาที่สั้นเช่นกัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษา วิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเซอร์ในแง่ต่างๆ เช่น ผลกระทบของชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการออกแบบ ผลของตัวเหนี่ยวนำที่อาจจะเกิดขึ้นและอื่นๆ โครงการนี้จึงได้จัดสร้างชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์สำหรับเป็นตัวแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุขึ้นมา สำหรับการศึกษาวิจัยในแง่ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาและสร้างชุดทดลองตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุ และเพิ่มตัวความต้านทานหน่วงเข้าไป สำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของตัวเก็บประจุและตัวความต้านทานหน่วง ที่นำมาใช้ทำชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้
3. สามารถวิเคราะห์โวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ และเปรียบเทียบตัวเก็บประจุหลายๆชนิด และนำมาพัฒนาใช้กับชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. เพื่อศึกษาทฤษฎีของการวัดแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบโวลเตจดีไวเซอร์ ชนิดตัวเก็บประจุ
6. สามารถออกแบบชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาและสร้างชุดทดลองตัวแบ่งแรงดันแบบตัวเก็บประจุและเพิ่มตัวความต้านทานหน่วงเข้าไป สำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์ได้
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวเก็บประจุและตัวความต้านทานหน่วง ที่นำมาใช้ทำชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้
3. สามารถวิเคราะห์โวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ และเปรียบเทียบตัวเก็บประจุหลายๆชนิด และนำมาพัฒนาใช้กับชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลมาตรฐานและศึกษาทฤษฎีของโวลเตจดีไวเซอร์
2. การออกแบบภาคแรงสูงและแรงต่ำของชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์
3. ตรวจสอบวัสดุและอุปกรณ์
4. ดำเนินการทดสอบตัวเก็บประจุแต่ละชนิดว่ามีความเหมาะสมที่จะใช้กับย่านความถี่ใด โดยใช้ Impedance Analyzer ในการทดสอบ
5. ประกอบและทดสอบชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์รวมทั้งแก้ไขข้อบกพร่องของชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์
6. วิเคราะห์เปรียบเทียบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุหลายๆ ชนิด
7. สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. สามารถใช้ชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ในการวัดค่าทางด้านแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถออกแบบชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้
3. วิเคราะห์ชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุต่างชนิดกันและเปรียบเทียบผลการทดสอบ เพื่อนำมาใช้พัฒนาชุดทดลองโวลเตจดีไวเซอร์ได้
4. เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยหรือออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเซอร์แบบอื่นๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโวลเตจดีไวเดอร์ในประเทศไทย มีหลายงานวิจัยแต่ส่วนมากจะเป็นไปที่งานวิจัยโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยที่จะเป็นงานวิจัยโวลเตจดีไวเดอร์แบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

1. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 300 kV เป็นวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ คุณวรา จุห้อง ภาควิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2524 ออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ภาคแรงสูงพันด้วยลวดความต้านทานวางบนท่อพีวีซี แบบสเตอรินดักแดนซ์ต่ำ แซ่น้ำมันหม้อแปลงซึ่งบรรจุในท่อพีวีซีชั้นหนึ่ง ภาคแรงต่ำสร้างจากตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะแบบออกไซด์

2. การออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แรงสูงแบบคาปาซิเตอร์ขนาด 100 kV โดย รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด และ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2532 โดยออกแบบคาปาซิเตอร์ภาคแรงดันสูงเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมใช้กระดาษฉนวนชุบน้ำมันหม้อแปลงมีขนาด 129.5 pF และคาปาซิเตอร์ภาคแรงดันต่ำออกแบบโดยคาปาซิเตอร์หลายๆ ตัวต่อขนานกันจนมีค่าเท่ากับ 0.1319 ไมโครฟารัด ต่ออยู่ในกล่องทองเหลือง

3. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ ขนาด 1,000 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ คุณประเสริฐ รัสสีโสภณอารมณ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539 ออกแบบสร้างภาคแรงดันสูงโดยใช้ลวดความต้านทานพันแบบไว้ความเหนียวภาคแรงดันต่ำใช้ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะ ฉนวนภายในเป็นอากาศ ส่วนฉนวนภายนอกเป็นท่อ PVC โดยมีการต่อซิลด์เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของดีไวเดอร์

4. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบตัวเก็บประจุ ขนาด 100 kV ปริญญาโทของ คุณเพิ่มศักดิ์ นิลขำ คุณวิทยา ใจสะอาด คุณปรีชา พานิช และคุณณรงค์ฤทธิ์ ขอบพานิช ภาควิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , 2547 การออกแบบสร้างภาคแรงดันสูงโดยใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ และภาคแรงดันต่ำใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ขนาดกัน โดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวัดแรงดันสูงกระแสสลับ [1]

การวัดแรงดันสูงกระแสสลับในห้องปฏิบัติการอาจวัดได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้ คือ

1. โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันสูงแบบอิเล็กทรอนิกส์ (High-Voltage Electrostatics Voltmeter)
2. ช่องว่างทรงกลม (Sphere gap)
3. อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (Series impedance)
4. โวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage divider)

2.1.1 การวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์

หลักการวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะอาศัยผลการเกิดแรงจากสนามไฟฟ้า (Electric field) ระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่นที่วางขนานกันโดยทำขอบของวิธีอิเล็กทรอนิกส์ให้มีลักษณะที่ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเท่ากันตลอดหน้าแผ่นโลหะ แรงที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$|F| = \frac{\epsilon A}{2S^2} (U_{\text{rms}})^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ F	คือ แรงดึงดูดระหว่างแผ่นระนาบ	(นิวตัน)
ϵ	คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนระหว่างแผ่นระนาบ	(ฟารัดต่อเมตร)
A	คือ พื้นที่แผ่นระนาบ	(ตารางเมตร)
D	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบ	(เซนติเมตร)
S	คือ ระยะแยกที่ขนานกับอิเล็กทรอนิกส์	(เมตร)
U_{rms}	คือ แรงดันทดสอบ	(โวลต์)

การวัดแรงดันสูงด้วยอิเล็กทรอนิกส์โวลต์มิเตอร์เป็นการวัดแรงดึงดูดระหว่างแผ่นระนาบ ซึ่งเป็นวิธีวัดค่าสัมบูรณ์ (Absolute value) แรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยมาก ฉะนั้นการวัดแรงดันสูงต้องใช้วิธีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพื้นที่กว้างๆ เพื่อให้ได้แรงมากพอที่จะวัด เมื่อด้านหนึ่งของอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ได้ แรงกระทำบนอิเล็กทรอนิกส์ก็สามารถวัดได้โดยวัดการยืดของสปริง ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดแรงดันสูงนั้นส่วนที่เคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยก็สามารถวัดขนาดแรงดันได้ เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกำลังสองของแรงดันที่ป้อนระหว่างแผ่นระนาบจึงเป็นการวัดค่า rms ถ้ามีตัวชี้สำหรับอ่านค่าแรงดันโดยตรงต้องมีการแบ่งเทียบมาตรฐาน (Calibration)

การวัดแรงดันอิเล็กทรอนิกส์โวลต์มิเตอร์ มีคุณลักษณะสมบัติดังนี้

1. ย่านวัดแรงดัน : ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบ
2. แรงดันที่วัด : วัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ความถูกต้องเที่ยงตรง : อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1% จนถึง 1.0%
4. ย่านความถี่ของแรงดันที่วัด : วัดแรงดันในย่านความถี่สูงได้ถึงย่าน MHz

ในทางปฏิบัติโวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถใช้วัดแรงดันได้สูงถึง 500 kVac และ 600 kVdc ซึ่งพลังงานที่ใช้มีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เพราะมีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงมาก ($R_i \gg 10^{13}$ โอห์ม คาปาซิแตนซ์ 5 ถึง 50 pF) จึงทำให้ดึงกระแสจากแหล่งที่วัดแรงดันน้อยมาก

2.1.2 การวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม

เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีตัวชี้ คือไม่ทราบว่าจะขณะนี้แรงดันที่ป้อนเข้าไปนั้นมีค่าเท่าใด แต่อาศัยการเกิดสปาร์ค หรือการเกิดเบรกดาวนระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศหรือก๊าซ การวัดแรงดันโดยใช้ช่องว่างทรงกลมมีลักษณะสมบัติดังนี้คือ

1. ใช้วัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง,แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์
2. มีความถูกต้องเที่ยงตรง $\pm 3 \%$
3. เป็นอุปกรณ์วัดที่ไม่มีตัวชี้ จะสังเกตได้จากการเกิดสปาร์คหรือเบรกดาวน
4. เป็นการวัดค่ายอดเท่านั้น
5. ค่าที่ถูกต้องได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆครั้ง (ประมาณ 10-15 ครั้ง)

2.1.3 การวัดแรงดันสูงด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับ

การวัดแรงดันด้วยอิมพีแดนซ์ต่ออันดับเป็นการวัดกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่ทราบค่าด้วยแอมป์มิเตอร์ แล้วคำนวณหาค่าแรงดันที่ต้องการวัดได้เท่ากับผลคูณของกระแสและค่าอิมพีแดนซ์ต่อ อันดับ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ต่อโดยตรงกับแรงดันสูงจึงต้องมีความคงทนต่อแรงดันสูงความถูกต้องเที่ยงตรงขึ้นอยู่กับแอมป์มิเตอร์และความคงตัวของอิมพีแดนซ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Low resistance temperature coefficient) ปรอทจากโคโรนาและกระแสรั่วตามผิวของฉนวนรองรับต้องน้อยที่สุดการวัดแรงดันสูงด้วยความต้านทานต่ออันดับไม่นิยมใช้วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแต่ใช้วัดแรงดันกระแสตรง ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะวัดด้วยตัวเก็บประจุมากกว่า

อิมพีแดนซ์ต่ออันดับที่สร้างขึ้นใช้งานโดยทั่วไป จำแนกได้ดังนี้

1. ตัวต้านทานต่ออันดับ (High ohmic series resistors)
2. ตัวเก็บประจุต่ออันดับวัดค่าอาร์เอ็มเอส (Series capacitors)
3. ตัวเก็บประจุต่ออันดับวัดค่ายอด (Chubb-Fortescue method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การวัดแรงดันด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

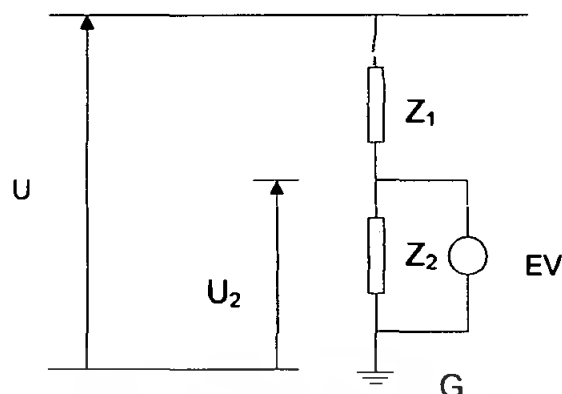
โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลมิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำๆ วัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่ต้องการวัด แล้วแบ่งทอนเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมา วัดความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เปลี่ยน โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมักใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรงและใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับได้ไม่เกิน 20-30 กิโลโวลต์ ดังนั้นในการวัดแรงดันสูงกระแสสลับจึงนิยมใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้งานโดยทั่วไป จำแนกตามองค์ประกอบของวงจรที่ใช้ ดังต่อไปนี้ คือ

1. โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (Resistor voltage divider)
2. โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitor voltage divider)
3. โวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม (Mixed voltage divider)
4. โวลเตจดีไวเดอร์แบบมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitive voltage divider)

2.2 โวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลมิเตอร์ หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำๆ วัดโดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูงต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัดแล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด ฉะนั้นโวลเตจดีไวเดอร์จึงแบ่งออกเป็นภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่ออยู่กับสายแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำ อีกข้างหนึ่งมักจะต่อกับดิน ตรงรอยต่อระหว่างภาคแรงสูงกับภาคแรงต่ำนี้เองจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำโวลมิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำๆ ที่จะนำมาต่อเข้ากับดีไวเดอร์นี้จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด นั่นคือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ เช่น อิเล็กโตรสแตติกส์โวลมิเตอร์ กล่าวคือ อิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของดีไวเดอร์ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของโวลเตจติไวเดอร์

เมื่อ Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูง

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำ

U คือ แรงดันที่ต้องการวัด

U_2 คือ แรงดันที่แบ่งออกมาวัด ซึ่งเป็นภาคแรงต่ำ

EV คือ เครื่องมือที่มีอิมพีแดนซ์ทางขาเข้าสูง

เมื่อวัด U_2 ด้วยเครื่องมือวัดจึงคำนวณหาแรงดันที่ต้องการวัดได้จากสมการ
ความสัมพันธ์

$$U = \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \right) U_2 \quad (2.2)$$

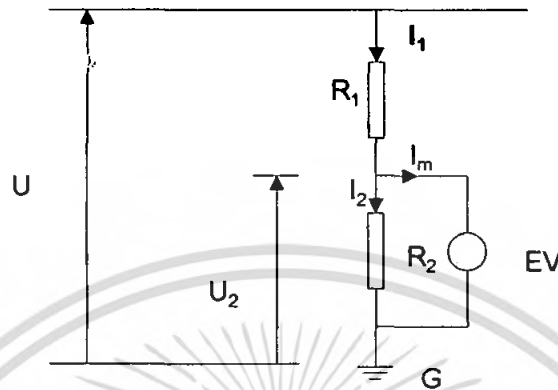
การวัดแรงดันสูงด้วยโวลเตจติไวเดอร์ ความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะหมดไป เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 เป็นวัตถุหรือสารประเภทเดียวกัน ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่งก็คือองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ผลกระทบจากความร้อนของอิมพีแดนซ์ที่ทำให้โวลเตจติไวเดอร์อาจเป็นความต้านทานหรือตัวเก็บประจุก็ได้ แบบความต้านทานใช้วัดแรงดันสูง กระแสตรง และใช้วัดแรงดันกระแสสลับได้ในย่านยี่สิบถึงสามสิบ กิโลโวลต์ ส่วนการวัดแรงดันกระแสสลับด้วยโวลเตจติไวเดอร์จะนิยมใช้แบบตัวเก็บประจุเป็นเครื่องมือวัด

2.2.1 โวลเตจติไวเดอร์แบบความต้านทานวัดแรงดันกระแสตรง

โวลเตจติไวเดอร์แบบความต้านทานประกอบด้วยความต้านทานภาคแรงสูง R_1 และภาคความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ดังในรูปที่ 2.2 ความต้านทานที่ใช้จะเป็นทำนองเดียวกับความต้านทานที่ใช้ต่ออันดับกับแอมมิเตอร์วัดแรงดันสูงดังกล่าวแล้ว คือ จะต้องคำนึงถึง

ขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่าน R_1 และ R_2 ค่าเก็บประจุสแตตริค และการฉนวนเป็นต้น สารที่ใช้ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นความต้านทาน R_1 และ R_2 ควรเป็นสารชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดความผิดพลาด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิ นั่นคือแรงดันที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทานทั้งสอง คือ



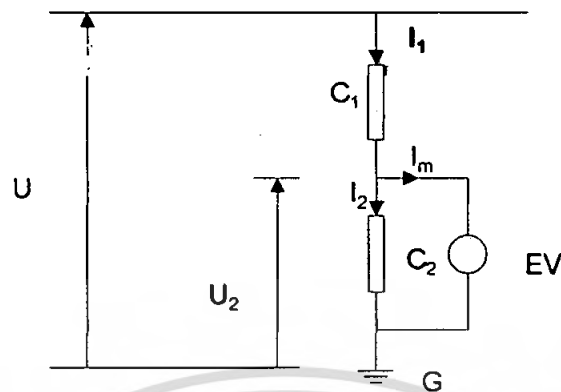
รูปที่ 2.2 วงจรของโวลต์จดีโวลต์เอร์แบบความต้านทาน

$$U = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) U_2 \quad (2.3)$$

ความถูกต้องก็จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความต้านทาน และขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของเครื่องวัดแรงดันคร่อมความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ซึ่งจะต้องเป็นโวลต์มิเตอร์ หรือเครื่องวัดที่มีอิมพีแดนซ์ทางขาเข้าสูง เช่น โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต EV หรือโวลต์มิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์

ปัญหาสำคัญที่ควรให้ความสนใจประการหนึ่ง คือความเครียดสนามไฟฟ้าที่ฉนวนเนื่องจากแรงสูง ฉะนั้นฉนวนที่หุ้มความต้านทานจะต้องทนต่อแรงดันสูงได้ ในขณะเดียวกันกระแสรั่วที่ไหลตามผิว อาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ หากความต้านทานที่ใช้วัดแรงดันนั้นสูงเกินไป ฉะนั้นค่าความต้านทานจึงมีขีดจำกัดบน คือ ค่า R จะต้องไม่สูงมากเกินไป กระแสที่วัดจะต้องไม่ต่ำเกินไป ฉะนั้นการเลือกฉนวนที่จะนำมาใช้กับความต้านทาน หรือบรรจุความต้านทานต้องเลือกให้เหมาะสม และอาจจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยออกแบบการจัดวางความต้านทาน และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณล้อมรอบความต้านทาน ซึ่งอาจใช้ความต้านทานย่อยมาต่ออันดับบนแท่งฉนวนในลักษณะเป็นเกลียวสวนจุ่มในน้ำมัน หรือใช้ก๊าซอัดความดัน เช่น ก๊าซ SF_6 เป็นต้น

2.2.2 โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 2.3 วงจรของโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจูดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วย

C_1 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

โดยหลักการแล้วกระแสที่เข้าเครื่องวัด นั้นต้องมีค่าน้อยมากเกือบๆ ศูนย์ นั่นคือ กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจะต้องเท่ากัน คือ

$$I_1 = \frac{\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_2 \quad (2.4)$$

$$I_2 = \omega C_2 U_2 = I_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ $I_m \cong 0$ ฉะนั้น
$$U_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2 \quad (2.6)$$

เมื่อ $C_2 \gg C_1$ สามารถประมาณหาค่าได้ คือ
$$U_1 \approx \frac{C_2}{C_1} U_2 \quad (2.7)$$

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุแรงสูงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปมีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือ ตัวเก็บประจุก๊าซ

อัดความดัน และ ตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับ

1) ตัวเก็บประจุก๊าซอัดความดัน

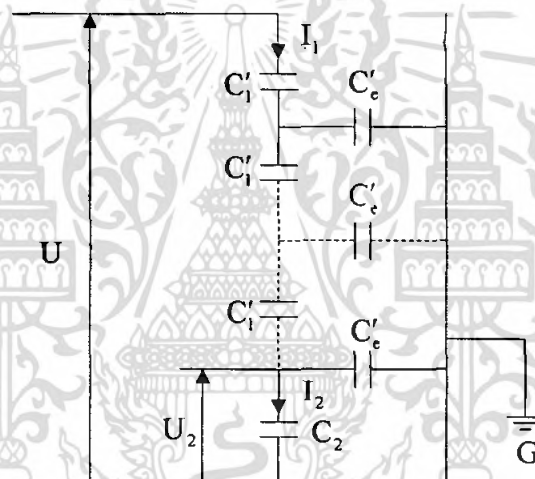
ตัวเก็บประจุแรงสูงแบบอัดความดันนี้ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial Cylinder Configuration) เพื่อให้มีขนาดเล็กๆ แต่สามารถทนแรงดันได้สูงๆ จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนด้วยก๊าซอัดความดันสูงก๊าซที่นิยมใช้กัน ได้แก่ N_2 , CO_2 ที่ความดัน 10-20 บาร์ หรือก๊าซ SF_6 ที่ความดันในช่วงประมาณ 1-3 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของตัวเก็บประจุแบบก้ำซ้อัดความดันก็คือมีค่าพลังงานสูญเสียเปล่าต่ำ (Loss Factor) $\tan \delta$ ต่ำ คือ น้อยกว่า 10^{-5} และโดยที่ใช้อิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมเป็นภาคแรงสูงทางด้านภาคแรงสูงก็ใส่แหวนเกราะ (Shielding Ring) จึงทำให้ไม่มีสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอก

2) ตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับ

ตัวเก็บประจุแรงสูงชนิดนี้ได้จากการเอาตัวเก็บประจุประเภทเซรามิกหรือตัวเก็บประจุกระดาษชุบน้ำมันฉนวนจำนวนหลาย ๆ ตัวมาต่ออันดับกันในลักษณะนี้ย่อมมีสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดของตัวเก็บประจื่อย่อยแต่ละตัวกับสิ่งห้อมล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับส่วนที่ต่อลงดิน จึงมีคาปาซิแตนซ์กับดินซึ่งจะตัดทิ้งไม่นำมาคิดไม่ได้ดังรูปที่ 2.4 แสดงถึงวงจรสมมูลของตัวเก็บประจื่อย่อยแรงสูง C_1' กับ ตัวเก็บประจุลงดินย่อย C_2'



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับ

เมื่อ C_1' คือ ตัวเก็บประจื่อย่อยแรงสูง

C_2' คือ ตัวเก็บประจุแรงต่ำ

C_2' คือ ตัวเก็บประจื่อย่อยลงดิน

การหาค่าคาปาซิแตนซ์แรงสูงรวม C_1 จะคำนวณจากคาปาซิแตนซ์ย่อย C_1' โดยตรงไม่ได้แต่อาจคำนวณได้จากกระแส I_2 ที่ไหลผ่านคาปาซิแตนซ์แรงต่ำ C_2' ที่มีแรงดันคร่อม ดังนั้น ตัวเก็บประจุผลรวมจะหาได้จากความสัมพันธ์

$$I_2 = \omega C_1 U_1 \quad (2.8)$$

ดังนั้นอัตราส่วนแรงดันต่ำต่อแรงดันสูงจะหาได้จากสมการ

$$\frac{U_2}{U} = \frac{n}{N} \left[1 - \frac{C_c}{6C_1} \right] = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 - \frac{C_c}{6C_1} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ n คือ จำนวนตัวเก็บประจุย่อย

N คือ จำนวนตัวเก็บประจุแรงสูงต่ออันดับ

$$C_1 = C'_1 / N \quad (2.10)$$

$$C_c = NC'_c \quad (2.11)$$

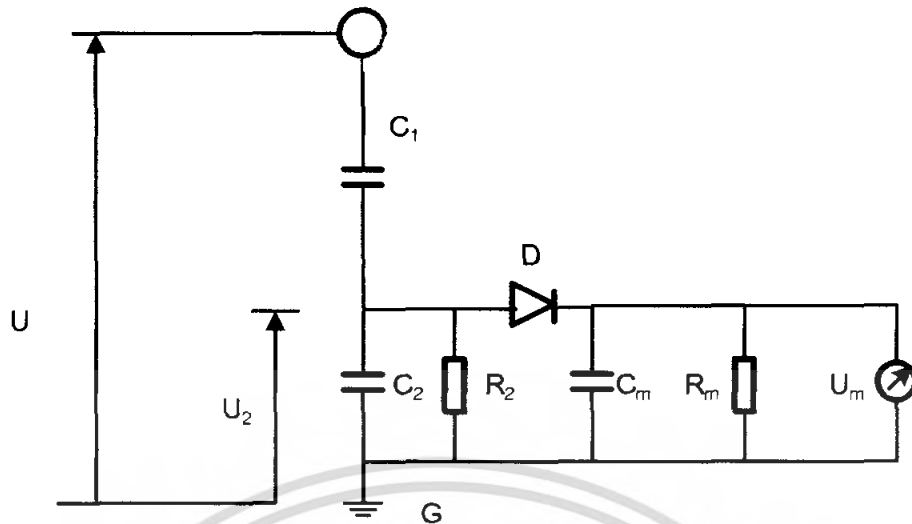
ค่ายังผลของคาปาซิแตนซ์ลงดินรวมทั้งหมด C_c ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของโวลเตจดีไวเดอร์ และสภาพแวดล้อมฝาดผนัง ในทางปฏิบัติสามารถทำให้ความผิดพลาดให้น้อยลงได้โดยทำให้ค่า C_c/C_1 มีค่าน้อยลง นั่นคือทำให้ตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าสูงขึ้น ปกติค่า C_1 ที่เหมาะสมควรมีค่าประมาณ 10 pF ถึง 40 pF ต่อเมตรของความสูง

2.3 การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับด้วยโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

วิธีการวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ นอกจากวิธีวัดตัวเก็บประจุต่ออันดับกับแอมมิเตอร์ผ่านไดโอดตามวงจรของ Chubb กับ Fortescue แล้ว เพื่อเป็นพื้นฐานในการวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ ที่มีใช้ในทางปฏิบัติ โดยใช้วงจรเรกติฟายเออร์ภาคแรงต่ำ

วงจรวัดค่าแรงดันกระแสสลับ

หลักการสร้างแรงดันกระแสตรงจากตัวจ่ายแรงดันกระแสสลับ โดยใช้วงจรเรกติฟายเออร์เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น และมีตัวเก็บประจุกรองกระแสเป็นพื้นฐานในการวัดค่ายอดของแรงดัน ดังวงจรรูปที่ 2.5 ตัวเก็บประจุ C_m จะเป็นตัวเก็บอัดประจุไว้ในขณะที่แรงดันกระแสสลับ U_2 เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่ายอด U_2 เครื่องวัด เช่น โวลต์มิเตอร์ที่ต่อวัดคร่อม C_m ก็วัดแรงดัน U_m เท่ากับค่ายอด U_2 ขั้วของแรงดันที่วัดขึ้นอยู่กับขั้วไดโอด D ที่ต่ออยู่ในวงจร



รูปที่ 2.5 วงจรเรกติฟายเออร์โวลเตจดีไวเดอร์วัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับ

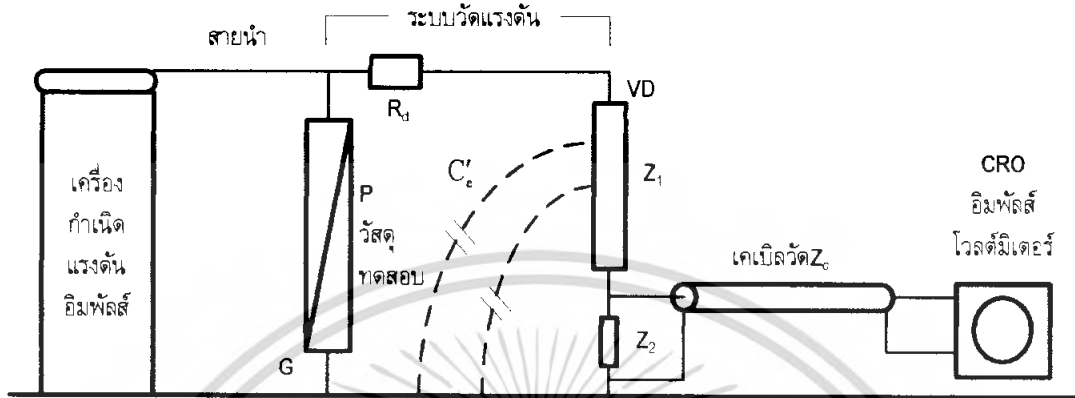
- เมื่อ C_1 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง
 C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ
 U คือ แรงดันสูงที่ต้องการวัด
 U_2 คือ แรงดันสูงที่ต้องการวัด
 R_m คือ ความต้านทานดิสชาร์จประจุใน C_m
 R_2 คือ ความต้านทานขนาน C_2

การวัดค่ายอดด้วยวงจรที่มีไดโอดเรียงกระแสดังกล่าว เนื่องจากไดโอดนั้นรับแรงดันได้ไม่สูงฉะนั้นต้องใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน หรือแบบตัวเก็บประจุแบ่งทอนแรงดันที่วัดลงมาให้ต่ำมากพอ ซึ่งจะเป็นเหตุให้มีผลกระทบในรูปของความต้านทานภายในต่อค่าแรงดันที่วัด ฉะนั้นการสร้างวงจรจึงต้องตระหนักถึงเรื่องนี้ด้วย และอีกประการหนึ่ง การวัดค่ายอดนั้นมิใช่เพียงแต่ติดตามการเพิ่มของแรงดัน หากแต่ต้องติดตามทันการเปลี่ยนแปลงค่ายอดแรงดันได้ทุกขณะ

2.4 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรองกลมนั้นทราบแต่ค่ายอดเท่านั้นแต่ไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา คือรูปคลื่นแรงดันซึ่งจำเป็นต้องทำการวัดและมีทางทำได้โดยใช้ออสซิลโลสโคป (CRO) หรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์ ถ้าแรงดันที่วัด มีค่ายังสูงไม่มากนัก คือ ต่ำกว่า 100 kV เทคนิคและปัญหาการวัดก็มีมากขึ้นตามขนาดแรงดันที่วัด ยิ่งในปัจจุบันนี้มีการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าสูงหลายล้านโวลต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสร้างขึ้นมาก็ต้องการวิธีวัดให้ได้การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ สายตัวนำแรงสูง ตัวดีไวเดอร์ Z_1 , Z_2 สูงประมาณ 2.5 m/MV เคเบิลวัดแกนร่วม Z_C และออสซิลโลสโคป CRO ดังในรูป



รูปที่ 2.6 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

จากวงจรในรูป 2.6 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆดังนี้

1. ตัวความต้านทานหน่วง R_d ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวทรานเซียนต์ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าตัวเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ โดยอาจต่อที่ต้นสายตัวนำ หรือที่อิเล็กทรอนิกส์แรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ ในกรณีที่สายตัวนำมีความยาวมาก การต่อตัวความต้านทานหน่วงที่ต้นสายตัวนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำจะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายตัวนำกับวงจรกำเนิดแรงดันและโวลเตจดีไวเดอร์

2. สายตัวนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดีไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากอุปกรณ์ทดสอบ ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์ ขนาดของสายตัวนำควรจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบวัดแรงดันได้ ในวงจรทดสอบทั่วไป สายตัวนำมักอยู่ในแนวระดับ เวลาเคลื่อนที่ทาง τ_L จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง c

$$\text{จากสูตร} \quad Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad \text{และ} \quad \tau_L = \sqrt{L_L C_L} = \frac{1}{c} \quad (2.12)$$

โดย L_L คือ ความยาวของสายตัวนำตามลำดับ

ดังนั้น จะได้ $Z_L = 1/(cC_L)$ ค่าเก็บประจุของสายตัวนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมุติว่าสายตัวนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน

สมการหาค่าเก็บประจุของสายตัวนำ คือ

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{B} \quad (2.13)$$

โดยที่ $B = \ln\left(4\frac{H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2(H/l)^2}\right)$ (2.14)

เนื่องจาก $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ เมื่อ μ_0 คือค่าเพอร์มีบิลิตี และ ϵ_0 คือค่าเพอร์มิตติวิตีของอากาศ ตามลำดับดังนั้นจะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำเป็น

$$(Z_L)_{hor} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} B \approx 60B(l, d, H) \quad \Omega \quad (2.15)$$

3. โวลเตจดีไวเดอร์ VD ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4. เคาเบิลวัต Z_c ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

5. อุปกรณ์วัดและบันทึกที่รูปคลื่นอาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคปหรือเครื่องบันทึกอิมพัลส์ อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชีลด์เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6. ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบาง เช่น ทองแดงแผ่นบาง

2.5 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

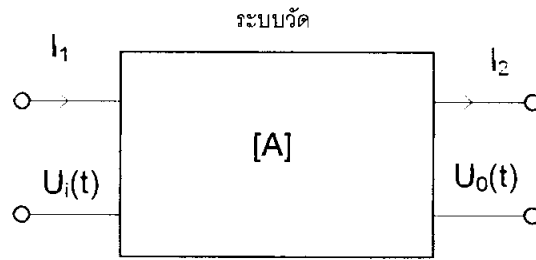
เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันทั่วไป จะพิจารณาจากลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ

- 1) ผลตอบสนองรูปร่าง (step response)
- 2) สเกลแฟกเตอร์ (อัตราส่วนแรงดัน)

2.5.1 ผลตอบสนองรูปร่าง

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งขึ้นกับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความ หรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการ

โวลเตจดีไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้วดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ข่ายวงจร 4 ขั้วเขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปรลาปลาซ

ในกรณีที่ $I_2 = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ได้เป็น

$$[H(s)] = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (2.17)$$

ค่า $H(s)$ จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ ที่ความถี่ต่างๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป 3 dB เรียกว่าความถี่จำกัด ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลส์ จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (2.18)$$

เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์มักมีค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่ จึงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีที่นิยมในทางปฏิบัติคือ การหาผลตอบสนองรูปขั้น $G(t)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} H(s) \right] \quad (2.19)$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกจากแรงดันขาเข้า $U_i(t)$ ได้จาก

$$U_o(t) = \int_0^t U_i'(t-\tau) G(\tau) d\tau \quad (2.20)$$

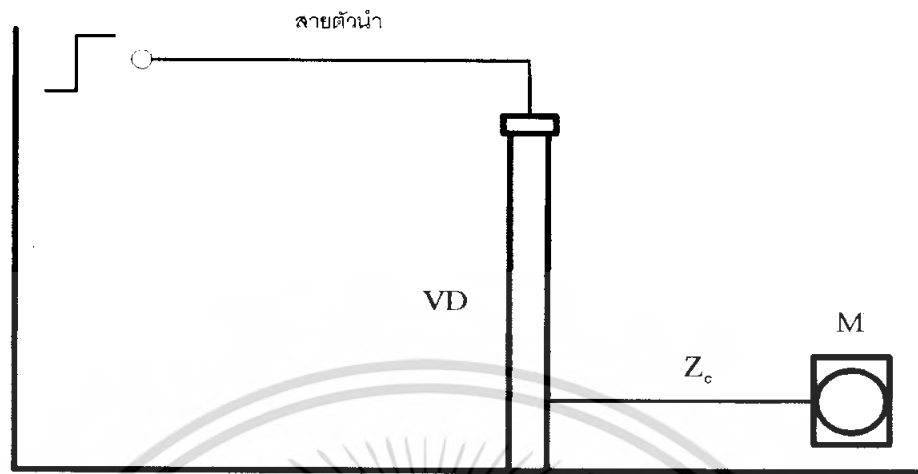
เมื่อ $U_i'(t-\tau)$ คืออนุพันธ์ของ $U_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลส์ไลค์ดังสมการ

$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{[1-h(s)]}{s} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปคลื่นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2 [2] แสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรวัดผลตอบสนองรูปคลื่นสำหรับระบบวัดแรงดัน

มาตรฐานได้กำหนดนิยามพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปคลื่นไว้ดังนี้

- 1) พารามิเตอร์ผลตอบสนอง หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปคลื่นโดยวิธีที่กำหนด
- 2) จุดเริ่มต้นเสมือน ของผลตอบสนองรูปคลื่น O_1 หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปคลื่น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่น จะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่ง และใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น
- 3) ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ หมายถึง ผลตอบสนองรูปคลื่นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย ดังรูปที่ 2.9 a)
- 4) อินทิกรัลผลตอบสนองรูปคลื่น $T(t)$ หมายถึง อินทิกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปคลื่น $g(t)$ จากรูปที่ 2.9 b)

$$T(t) = \int_0^t (1 - g(t)) dt \quad (2.22)$$

- 5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง T_N หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปคลื่นที่ t_{max}

$$T_N = T(t_{max}) \quad (2.23)$$

- 6) เวลาตอบสนองบางส่วน T_α หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปคลื่น
- 7) เวลาตอบสนองที่เหลือ $T_R(t_i)$ หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปคลื่นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย t_i น้อยกว่า t_{max}

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

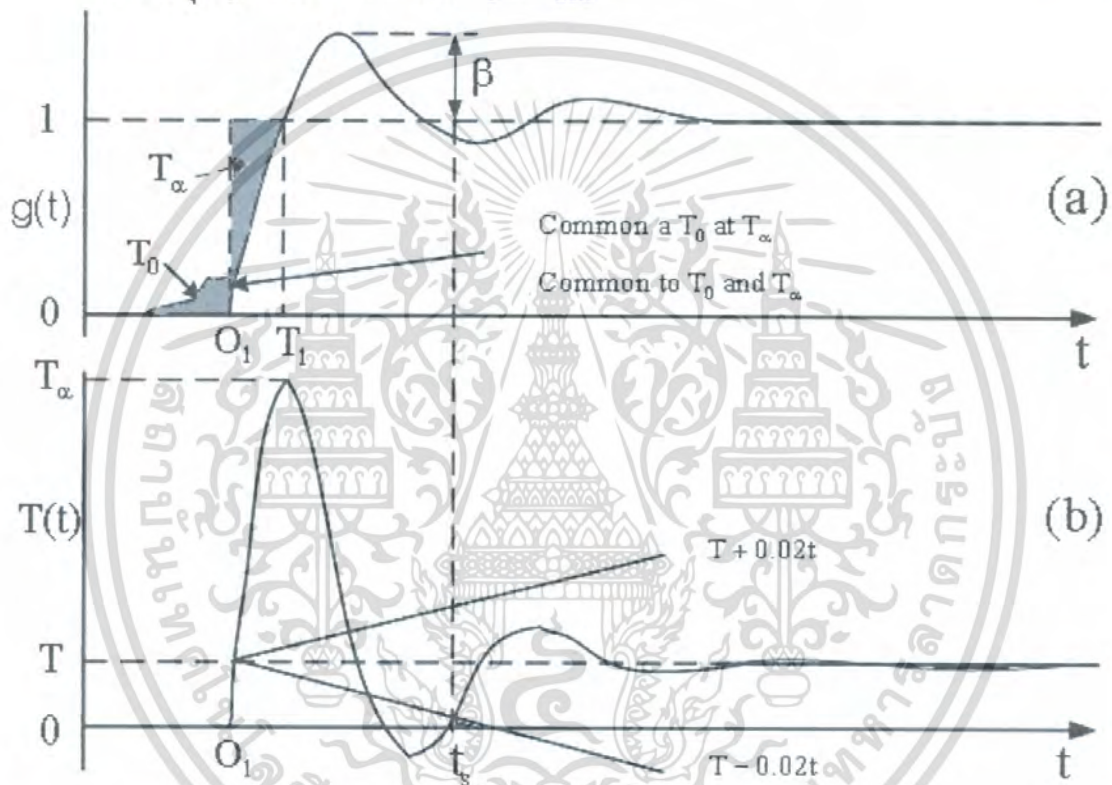
8) ส่วนพุ่งเกิน β หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่ง หน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น T_0 หมายถึง พื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์ ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

10) เวลาเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว t_s หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองที่เหลือ $T_R(t_s)$ มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

$$|T_N - T(t)| < 0.012t_s \quad (2.25)$$

สำหรับทุกๆค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง t_{max}

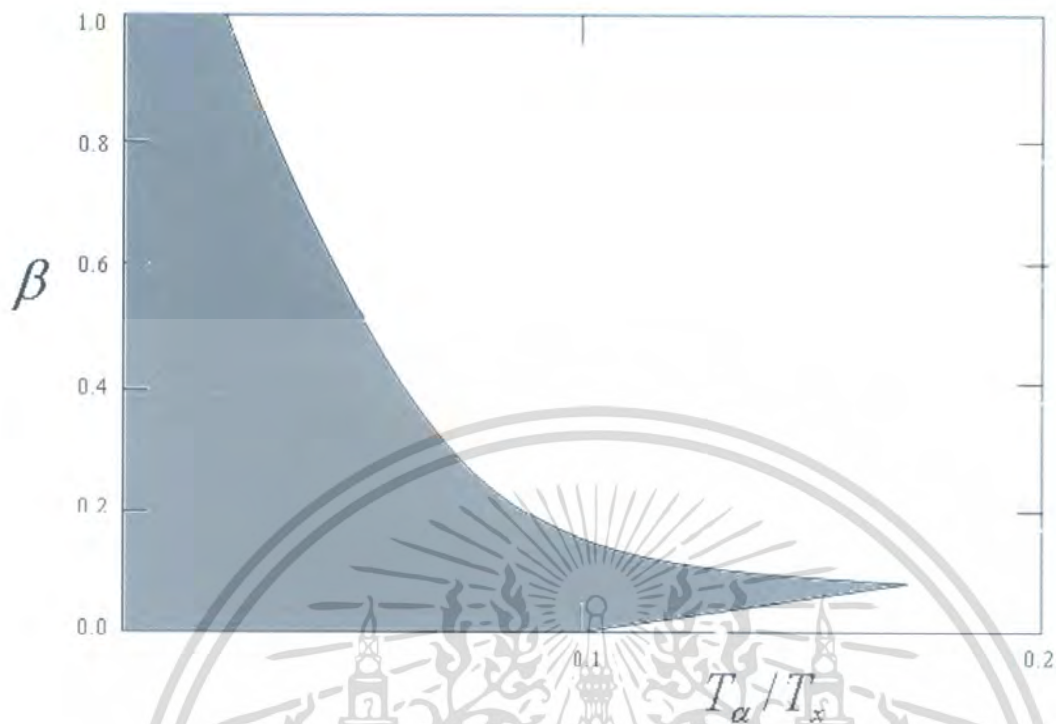


รูปที่ 2.9 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง
 (a) เมื่อเทียบกับ $g(t)$ (b) เมื่อเทียบกับ $T(t)$

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้กำหนดค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ ดังนี้

กรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นของรูปคลื่นที่มีเวลาหน้าคลื่น T_x พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไข : $\beta - T_\alpha / T_x$ จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรงงา ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x

โดยที่ T_x คือ เวลาค้นคืนของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการจะวัด
กรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นที่เวลาค้นคืน T_c พารามิเตอร์
ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขดังในตาราง 2-1

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขที่กำหนดของพารามิเตอร์ผลตอบสนองกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด
ที่หน้าคลื่น

พารามิเตอร์ผลตอบสนอง	เงื่อนไขที่กำหนด
เวลาตอบสนองจากการทดลอง	$T_\alpha - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$
เวลาเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว	$t_s \leq T_c$
เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น	$T_0 \leq 0.005T_c$

จากนิยามของ $g(t)$ และ T ในรูปที่ 2.9 ผลก็คือดังในรูปที่ 2.11 นั้นเอง ซึ่งแสดงให้เห็น
ว่าการเพิ่มแรงดันในเชิงเส้น $U_1(t)$ นั้น ผลตอบสนอง $U_2(t)$ จะมีรูปคลื่นในลักษณะทำนอง
เดียวกับ $U_1(t)$ เพียงแต่มีเวลาช้าไปเท่ากับเวลาตอบสนอง T ฉะนั้นค่าแอมพลิจูดของแรงดัน
อิมพัลส์จึงต้องมีการแก้ความผิดพลาดด้วย T ในกรณีที่ช่วงแรงดันเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น และเกิด
คลื่นตัดขึ้นในช่วงหน้าคลื่นแรงดันด้านออก $U_2(t)$ จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันด้านเข้า $U_1(t)$ คือ

$$\Delta U = U_1(t) - U_2(t) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

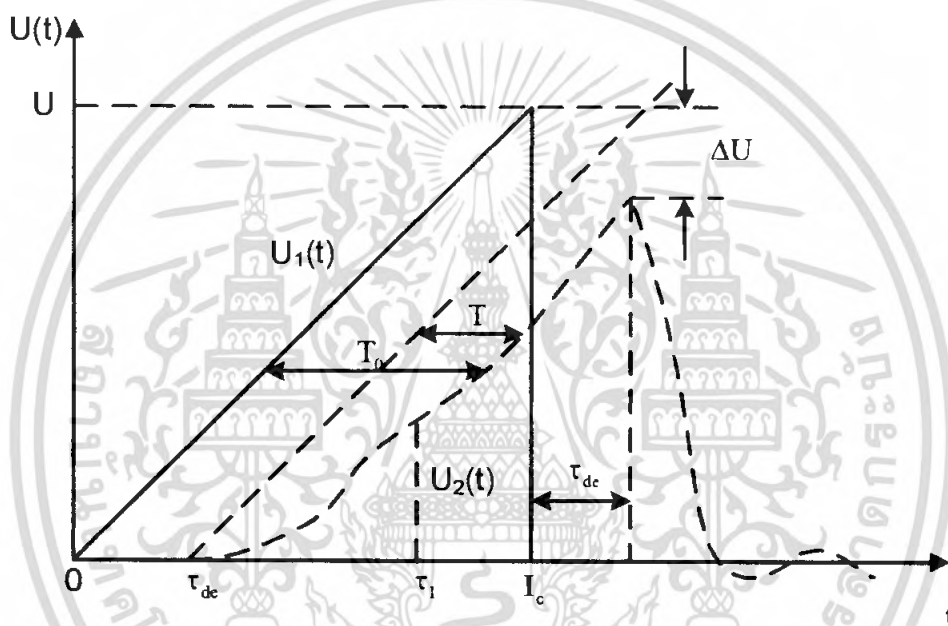
ความคลาดเคลื่อนของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดค่ายอดของคลื่นตัดอาจคำนวณได้จาก

$$\Delta U = \frac{T}{T_c} U = ST \quad (2.27)$$

ความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์ของขนาดแรงดันที่วัดจะหาได้จากเวลาช่วงคลื่นตัด T_c และเวลาตอบสนองของระบบวัด T คือ

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} = \frac{T}{T_c} = \frac{S}{U} T \quad (2.28)$$

เมื่อ S คือ ความชัน (steepness) ของแรงดันในช่วงที่เพิ่มขึ้น สมการความคลาดเคลื่อนใช้ได้เฉพาะกรณีที่แรงดันช่วงหน้าคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น ดังในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ค่าแอมพลิจูดที่คลาดเคลื่อน

2.5.2 สเกลแฟกเตอร์

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดมาตรฐาน IEC 60-2 [2] ให้นิยามไว้ดังนี้ “สเกลแฟกเตอร์ หมายถึงตัวประกอบที่นำไปคูณจากค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัด แล้วนำผลของการคูณที่ได้ไปหาค่าแรงดันป้อนเข้า”

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญไว้ 2 ประการ คือ

1. ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการวัดค่ายอดหรือค่า rms ของแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับที่ทดสอบ จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดหรือค่า rms ไม่เกิน $\pm 3\%$
2. ความมีเสถียรภาพ (Stability) ในการวัดค่ายอดแรงดันไฟฟ้าเสถียรภาพของสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบใดๆ อาจหาด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด
2. เทียบกับโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันที่แน่นอนแล้ว
3. การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน

วิธีการคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าแน่นอนเหมาะสำหรับหาอัตราส่วนในทางทฤษฎีอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงได้ ส่วนการหาสเกลแฟกเตอร์โดยเทียบกับโวลเตจดีไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้วซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ โดยทั้งสองวิธีนี้ใช้ได้สำหรับโวลเตจดีไวเดอร์ทุกแบบ

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้จากการทดลองนั้น ถ้าทำการทดลองในสถานที่ต่าง ๆ กัน ค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันที่ได้อาจมีค่าแตกต่างกันไป เพราะค่าเก็บประจุสเตรย์ลงดินของโวลเตจดีไวเดอร์ที่เกิดขึ้นจะมีผลกับค่าอัตราส่วนแรงดัน เพราะฉะนั้นการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งที่จะติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ในการใช้งานจริง

ในกรณีของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ค่าความต้านทานของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ สามารถวัดได้โดยใช้แรงดันต่ำกระแสตรง ซึ่งอาจเป็น Wheatstone bridge หรือ โอห์มมิเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลวัดที่มีความยาวมาก ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่างความต้านทานด้านแรงต่ำกับแรงดันตกคร่อม ซึ่งจะทำให้แรงดันตกคร่อมลดลง

ในกรณีของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าเก็บประจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ

2.6 องค์ประกอบตัวโวลเตจดีไวเดอร์

องค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำโวลเตจดีไวเดอร์นั้น คือ ความต้านทาน หรือตัวเก็บประจุ เทคนิคของโวลเตจดีไวเดอร์แรงสูงจะแตกต่างไปจากแรงต่ำที่สำคัญก็คือ ความคงทนต่อแรงดันขององค์ประกอบ แรงดันกระจาย และความเครียดสนามไฟฟ้ากระจาย คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ของการฉนวนโดยรอบความต้านทาน คือ อากาศหรือน้ำมันฉนวน

ปัญหาเบื้องต้นของโครงสร้างของโวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงสูงคือ การฉนวนและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยรอบองค์ประกอบย่อย หรือ การฉนวนภายนอกของโวลเตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน การคำนวณด้วยอากาศตามความยาวของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สภาวะของห้อง อาจหาได้ประมาณดังนี้

ความยาวตามผิวฉนวนที่ใช้ภายในอาคาร ถ้าผิวเรียบ คือไม่มีครีบ ใช้ความยาวจำเพาะดังนี้

- ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดัน AC 5 m/MV
- ความยาวตามผิวฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 2.5 m/MV

ในกรณีที่แรงดันอยู่ในช่วงเมกะโวลต์ ความสูงของดีไวเดอร์จะสูงมาก ระยะห่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรดยอดบนสุดกับดิน อาจใช้ระยะห่างจำเพาะของแรงดันชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

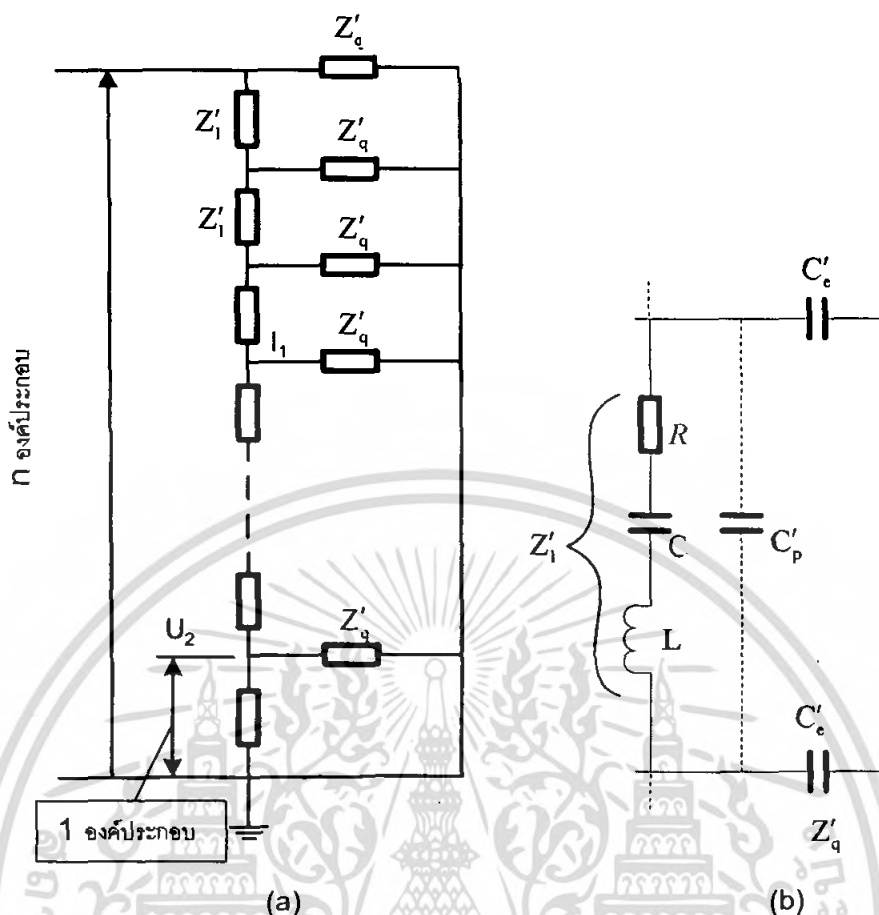
- แรงดันกระแสตรง $2.5 - 3 \text{ m/MV}$
- แรงดันกระแสสลับ $\geq 5 \text{ m/MV}$
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า $2 - 2.5 \text{ m/MV}$
- แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง $\geq 4 \text{ m/MV}$

2.7 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์

การวิเคราะห์หาความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายของโวลเตจดีไวเดอร์ อาจหาได้ด้วยวิธีจำลองแบบ คือใช้วงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยๆ โดยถือว่าองค์ประกอบย่อยเหล่านี้ต่อกันเป็นลูกโซ่ต่อเนื่องดังในรูปที่ 2.12 สมมติว่าโวลเตจดีไวเดอร์ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยต่ออันดับ มีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ n และรับแรงดันสูงเท่ากับ U ส่วนภาคแรงต่ำ คือ ปลายขั้วโวลเตจดีไวเดอร์ด้านที่จะต่อลงดิน ต่อกับมาวัดแรงดัน U_2 เพียง 1 องค์ประกอบย่อย แต่ละตัว Z'_i จะเขียนแทนได้ด้วย R' และ C' อันเป็นองค์ประกอบที่ต้องการ แต่เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านดีไวเดอร์ จึงทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเขียนแทนด้วย L' ต่ออันดับกับ R' และ C' ดังในรูปที่ 2.12 (b) ในขณะเดียวกันก็มีสนามไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าที่โวลเตจดีไวเดอร์ จึงทำให้เกิดค่าเก็บประจุ สตรีย์กับดินในลักษณะขนานกัน จึงเขียนแทนด้วย C'_q และเป็นตัวอิมพีแดนซ์ขวาง Z'_q

จากองค์ประกอบย่อย Z'_i และ Z'_q คิดเป็นอิมพีแดนซ์รวม Z_1 และ Z_q จะหาอัตราส่วนของแรงดันด้านออก ต่อแรงดันด้านเข้าโดยฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ได้ดังนี้

$$h(s) = \frac{nU_2}{U} = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{Z_1(s)/Z_q(s)}}{\sinh \sqrt{Z_1(s)/Z_q(s)}} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.12 (a) วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์องค์ประกอบดีไวเดอร์ทั้งหมด = n
 (b) วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์องค์ประกอบย่อย = 1 องค์ประกอบ

โดยอาศัยความสัมพันธ์สมการ (2.29) จึงหาผลตอบสนองนอร์มัลไลซ์ $g(t) = L^{-1} \frac{1}{s} h(s)$ ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบต่างๆ ได้ ซึ่งจะได้วิเคราะห์แต่ละแบบของโวลเตจดีไวเดอร์ เป็นแบบความต้านทาน (คือ $C \rightarrow \infty$) แบบตัวเก็บประจุ (คือ $R \rightarrow 0$ และ $C_p \rightarrow 0$) และแบบผสมเป็นลำดับต่อไป

โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ในกรณีที่ความต้านทานในวงจรสมมูล (รูปที่ 2.12 b) มีค่าเป็นศูนย์ โวลเตจดีไวเดอร์นั้นจะเป็นแบบตัวเก็บประจุ แต่ค่า L' ที่ความถี่สูงๆ ไม่อาจตัดทิ้งได้ ดังนั้น ผลตอบสนองรูปขั้วนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น

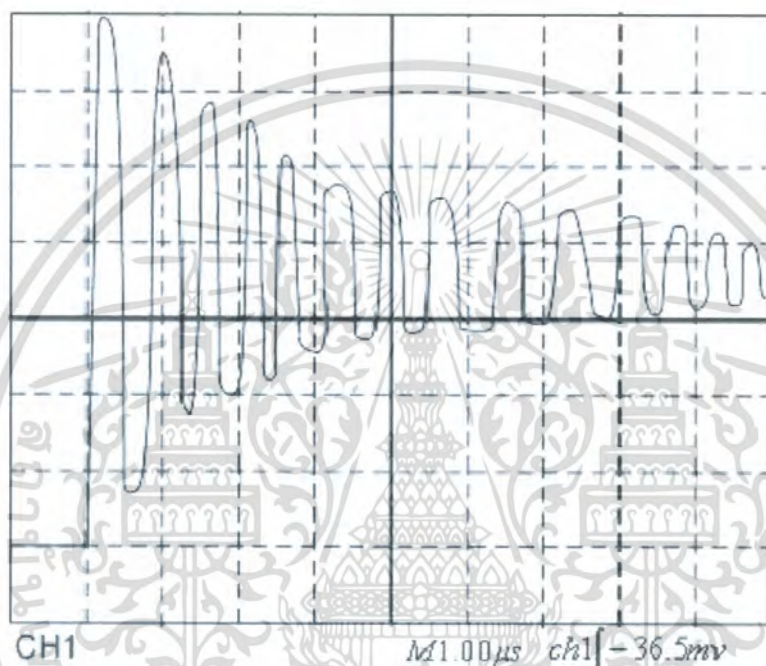
$$g(t) = 1 - \frac{C_c}{6(C + C_p)} + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{AB} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } A = \left[1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_c}{Ck^2\pi^2} \right], \quad a = R/2L \quad (2.31)$$

$$B = \left[1 + \frac{C_p k^2 \pi^2}{C_c} \right], \quad b_k = \sqrt{\frac{k^2 \pi^2 \cdot A}{LC_c \cdot B}} \quad (2.32)$$

ในรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองรูปซันที่ได้จากโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 1.000 kV มี $C' = 0.2 \mu\text{F}$ จำนวน $n = 504$, $C'_c = 0.137 \text{ pF}$, $C'_l = 0$ และ $R_1 = 0$



รูปที่ 2.13 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปซันของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเมื่อ $R_1 = 0$

การแกว่งที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองรูปซัน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลเตจดีไวเดอร์ คือ $\tau = \sqrt{LC}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยประมาณจากความเร็วแสงและความถี่ของการแกว่งคำนวณได้จาก

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_c}} \quad (2.33)$$

แสดงว่าโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน มีความไวต่อแรงดันขาเข้า ที่เวลาขึ้นเร็ว แรงดันขาออกจะออสซิลเลทหรือแกว่งมาก ซึ่งเมื่อไปต่อเข้ากับระบบวัด จึงเกิดเรโซแนนซ์กับสายตัวนำ ทำให้ระบบวัดแกว่ง ดังนั้น โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน จึงใช้วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดไม่ได้

การแกว่งหรือออสซิลโลชัน ของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุนี้ อาจขจัดได้โดยต่อเอกสควีม์ต้านทานอันดับย้อย R เข้ากับตัวเก็บประจุ ผลรวมความต้านทานที่ต่อเข้าไปจะเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R = nR'$ เรียกว่า ความต้านทานหน่วง ถ้าเลือกให้ได้พอเหมาะ โวลเตจดีไวเดอร์นั้นก็เรียกว่า โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ มีความต้านทานหน่วงพอเหมาะ (damped capacitor voltage divider) ที่ความถี่สูงๆ ดีไวเดอร์นี้จะเป็นดีไวเดอร์แบบความต้านทาน และที่ความถี่ต่ำๆจะเป็นดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

ค่าความต้านทานหน่วง (damping resistor) ที่พอเหมาะอาจหาได้จากความสัมพันธ์

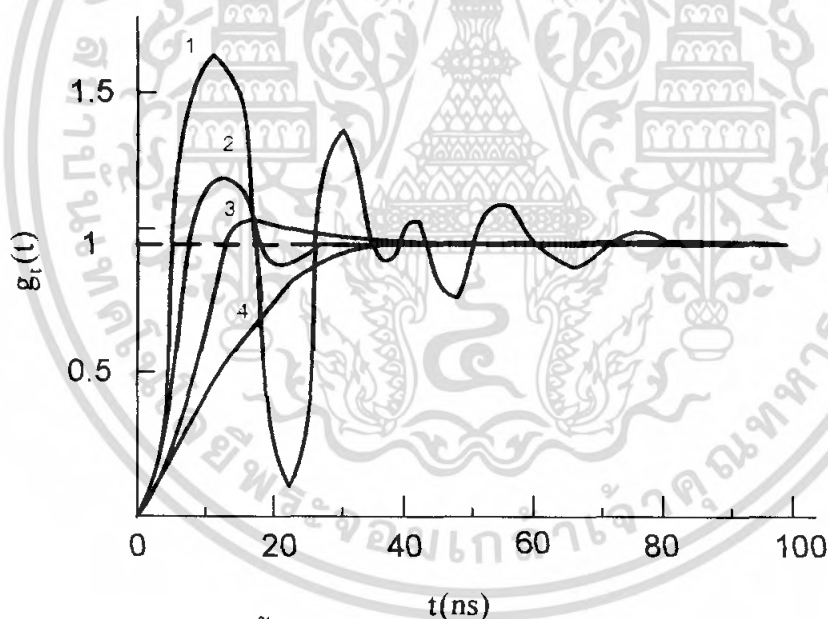
$$R \approx 4 \sqrt{\frac{L}{C_c}} \quad (2.34)$$

และเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์สามารถคำนวณได้เป็น

$$T = \frac{RC_c}{6} \quad (2.35)$$

ความต้านทานคลื่นจร $\sqrt{\frac{L}{C_c}}$ ของดีไวเดอร์มีค่าประมาณ 100 โอห์ม ฉะนั้นควรให้ค่าของความต้านทาน $R \approx 500$ ถึง 1000 โอห์ม

การใส่ความต้านทานหน่วงจะมีผลต่อผลตอบสนองรูปขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ โดย $R_1 = 250$, $R_2 = 500$, $R_3 = 1000$, $R_4 = 2000$ โอห์ม

ลักษณะโครงสร้างประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้วัดแรงดันอิมพัลส์สูงๆ เช่น 6 MV มักนิยมใช้แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง เพราะโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานล้วน ไม่อาจทำให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากพอตามที่ต้องการ ในขณะที่เวลาตอบสนองของวงจร

อันดับ R', C' มีค่าเพียง $T = \frac{RC_c}{6}$ ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับค่าเก็บประจุ C หรือ C' เมื่อใช้วัตต์แรงดันที่มีความถี่ต่ำ ความต้านทาน R' ก็จะมีกระแสไหลผ่านน้อย หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ ไม่เป็นโหลดแก่แหล่งกำเนิดแรงดันที่วัตต์ ทั้งนี้เพราะว่ากระแสกำหนดด้วยค่าเก็บประจุอันดับ C' ฉะนั้นโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้วัตต์แรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ จึงมักใช้ความต้านทานโอห์มสูงต่อขนานเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สามารถวัตต์แรงดันกระแสตรงได้

โครงสร้างของโวลเตจดีไวเดอร์ทุกรูปแบบ จะต้องใช้องค์ประกอบความต้านทาน และตัวเก็บประจุ จะต้องเลือกออกแบบด้วยความรอบคอบ ผลทางภาคปฏิบัติมักจะไม่เป็นไปตามทฤษฎี อันอาจเนื่องจากองค์ประกอบไม่ตีพอ หรือไม่ก็โครงสร้างภาคแรงต่ำผิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้กับแรงดันความถี่สูง ๆ จะมีความยุ่งยากพอสมควร

2.8 สายต่อแรงสูงเข้าโวลเตจดีไวเดอร์

จากรูปวงจรวัตต์แรงดันอิมพัลส์ในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์ต้องอยู่ห่างจากวัสดุทดสอบ หรือแหล่งแรงสูงที่ต้องการวัด ความยาวของสายตัวนำแรงสูงนี้จะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของดีไวเดอร์ เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดค่าเก็บประจุสแตตริคัลลงดิน C_s' ให้มีค่าน้อยลง คือ ให้สายตัวนำมีลักษณะเป็นซิลด์นั่นเอง การเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็วที่วัสดุทดสอบ (ในกรณีเบรกดาวน) จะทำให้เกิดคลื่นจอร์ชันบนสายตัวนำ จึงมักใส่ความต้านทานหน่วง R_d ต่ออันดับไว้ในสายตัวนำ ขนาดของท่อหรือสายตัวนำควรจะต้องมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นคลื่นรบกวนต่อวงจรวัตต์แรงดันได้

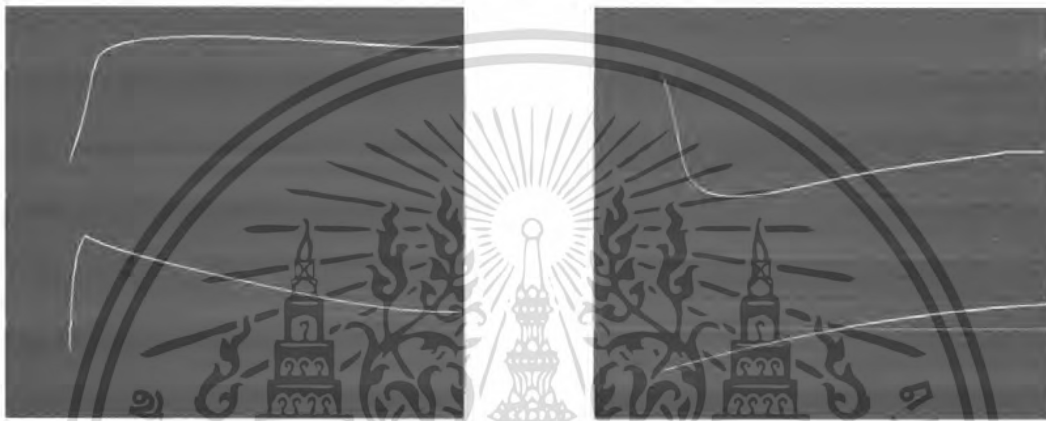
2.9 อุปกรณ์วัดแรงดันภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์

ในวงจรวัดภาคแรงต่ำจากโวลเตจดีไวเดอร์ในรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย ออสซิลโลสโคป หรือ โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันอิมพัลส์ค่ายอด และสายเคเบิล

2.9.1 เครื่องบันทึกรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

โดยเหตุที่แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่คลื่นไม่ซ้ำเดิม มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นมาก ฉะนั้นอุปกรณ์ที่ใช้บันทึกรูปคลื่น เช่น ออสซิลโลสโคป บันทึกภาพจะต้องมีความเร็วสูง แรงดันอิมพัลส์ที่วัดอาจมีรูปคลื่นเต็ม รูปคลื่นตัดช่วงทางหรือช่วงหน้า เมื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นสเปกตรัม จะพบว่ามีความถี่ต่าง ๆ เป็นช่วงกว้างมาก ฉะนั้นออสซิลโลสโคปที่จะใช้สำหรับบันทึกแรงดันอิมพัลส์ จึงต้องมีแบนด์วิดท์กว้างมากพอ และมีเวลา

ขึ้นสั้นมาก ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน หรือกระแสอย่างรวดเร็ว ย่อมทำให้เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ฉะนั้นออสซิลโลสโคปที่ใช้บันทึกแรงดันในบริเวณนั้นจะต้องมีการป้องกัน หรือไม่ไวต่อคลื่นรบกวนที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียง หรือจากภายนอก และควรจะมีค่าแรงดันป้อนเข้าสูง คือ ไม่ต้องมีการขยายในแกนตั้ง ซึ่งเป็นผลดีในการขจัดคลื่นรบกวน ฉะนั้นออสซิลโลสโคปที่ใช้สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ จึงต้องมีลักษณะพิเศษ ดังเช่น อิมพัลส์ออสซิลโลสโคปสองลำแสงของบริษัท Haefely ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ (358 kV) บันทึกด้วยอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปแบบสองลำแสงฐานเวลาแยกอิสระมีสเกลเวลา บน: $1 \mu\text{s}/\text{div}$. ล่าง: $10 \mu\text{s}/\text{div}$.

ปัจจุบันออสซิลโลสโคปสองลำแสงแบบอนาล็อก ได้เลิกผลิตแล้ว จึงหันมาใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลที่มีความถี่สูงแทน เป็นออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล Tektronix 2 GHz ยิ่งกว่านั้น เทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้เจริญก้าวหน้าไปมาก คอมพิวเตอร์ก็มีความเร็วสูง วิศวกรจึงหันมาพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ (ทั้งแรงดันและกระแส) โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

2.9.2 เคเบิลวัด

ถึงแม้ว่าจะใช้วัดหรือบันทึกภาพแรงดันอิมพัลส์ด้วยอิมพัลส์โวลต์มิเตอร์ หรือออสซิลโลสโคปที่มีค่าแรงดันป้อนเข้าที่กำหนดสูงก็ตาม เวลาใช้งานจริงๆ ก็ไม่สามารถจะนำไปต่อเข้าโดยตรงกับภาคแรงต่ำของดิไวเดอร์ได้ เพราะจะไม่ปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติ และเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้น้อยลง จำเป็นต้องตั้งออสซิลโลสโคปและมิเตอร์วัด ให้อยู่ห่างจากดิไวเดอร์พอสมควร ฉะนั้นการส่งสัญญาณแรงดันจากภาคแรงต่ำของดิไวเดอร์มายังออสซิลโลสโคป จึงต้องใช้สายเคเบิลวัดโดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม เคเบิลแกนร่วมที่ใช้ควรจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีลต์สองชั้น เพื่อป้องกันมิให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในซีลต์ อันเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัด แรงดันอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นรบกวน ไปบนสัญญาณที่วัด

ในกรณีที่วัดสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ไม่มีองค์ประกอบของความถี่สูงเคเบิลและสายวัดอาจจะคิดเป็น C หรือ L ขึ้นอยู่กับลักษณะโหลดที่ปลายสายวัด แต่ถ้าวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น แรงดันอิมพัลส์ เคเบิลวัดจะต้องพิจารณาเป็นวงจรที่มีพารามิเตอร์กระจาย คือ คิดสัญญาณเป็นแบบคลื่นจร (traveling wave) เมื่อคลื่นจรเข้ามาที่ต้นสายเคเบิลจะมองเห็นเคเบิลเป็นความต้านทานบริสุทธิ์เท่ากับเสรีร์จิมพีแดนซ์ Z_w ไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ปลายสายเคเบิลลัดวงจร หรือมีโหลดอื่นใด โหลดที่ปลายทางจะไม่มีผลถึงสัญญาณต้นทาง จนกว่าถึงเวลา 2 เท่าของเวลาคลื่นเดินทาง (transit time) สายเคเบิลวัดจะต้องคิดเป็นแบบสายส่ง เมื่อเวลาคลื่นเดินทางมีค่าใกล้เคียงกับเวลาขึ้นของคลื่น

เวลาช่วงเดินทางของสัญญาณอาจหาได้จากความเร็วแผ่กระจาย (propagation) ของคลื่น คือ

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (2.36)$$

เมื่อ l คือ ความยาวของสายเคเบิลวัด และความเร็วแผ่กระจายคลื่น หาได้จากความสัมพันธ์

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2.37)$$

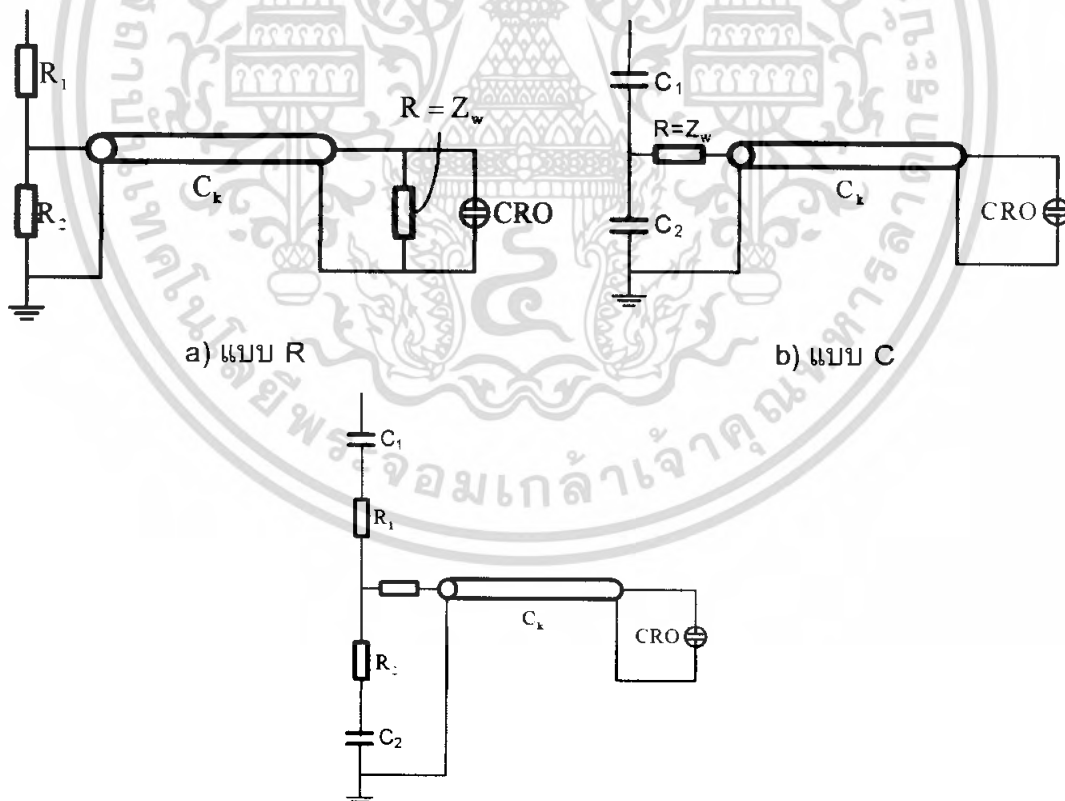
เมื่อ c คือ ความเร็วแสงและ μ_r คือ เปรอริมิตติวิตี และเปรอริมิบิลิตีสัมพัทธ์ตามลำดับของฉนวนสายเคเบิล ปกติสายเคเบิลวัดจะมีค่า $\mu_r = 1$

สายเคเบิลวัดที่ใช้กันอยู่มีฉนวนเป็น Polyethylene (PE) หรือ Teflon ซึ่งมีค่าประมาณ 2.1-2.3 ฉะนั้นความเร็วของสัญญาณจะประมาณ 60-70% ของความเร็วแสง

ความยาวของเคเบิลยังมีผลต่อการวัดแรงดัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม การวัดแรงดันอิมพัลส์โดยเฉพาะที่มีการตัดช่วงหน้าคลื่นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ เพราะจะทำให้ค่ายอดที่วัดได้ผิดพลาด โดยทั่วไปสายเคเบิลแกนร่วมที่ยาวไม่เกิน 10 เมตร อาจจะทิ้งผลกระทบจากแรงดันตกคร่อมได้ ถ้าต้องใช้เคเบิลสายยาวๆ จึงควรเลือกที่มีค่าความต้านทาน และอิมพีแดนซ์ลักษณะที่มีค่าต่ำๆ

2.10 ความต้านทานสมคู่ (Matching Resistor)

ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ ประกอบกับโวลมิเตอร์หรือออสซิลโลสโคปโดยส่งสัญญาณที่วัดจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังโวลมิเตอร์หรือ CRO ด้วยเคเบิลแกนร่วม เพื่อมิให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับ อันจะทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าแรงดันที่วัด จึงต้องใส่ความต้านทานสมคู่กันระหว่างดีไวเดอร์กับเครื่องวัด ถ้าโวลเตจดีไวเดอร์เป็นแบบความต้านทาน จะต่อความต้านทานสมคู่กัน $R = Z_w$ (ความต้านทานคลื่นจร) ไว้ปลายสายเคเบิลที่ต่อเข้า CRO ในลักษณะขนานกับ CRO ดังแสดงในรูป 2.16 a) ถ้าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ หากต่อความต้านทานสมคู่กันไว้ที่ปลายสายเคเบิลเข้าโวลต์มิเตอร์ หรือ CRO จะทำให้เป็นโหลดของโวลเตจดีไวเดอร์ จึงต่อ $R = Z_w$ ไว้ที่ต้นทวนสายเคเบิลวัดในลักษณะอันดับกับสายเคเบิลดังในรูปที่ 2.16 b) ในกรณีเช่นนี้สัญญาณแรงดันที่วิ่งไปบนสายเคเบิลเพียง $U_2/2$ เมื่อสัญญาณแรงดันที่วัด $U_2/2$ ไปถึงปลายสายเคเบิล ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรเปิดจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเท่าตัว ($= U_2/2$) ที่เครื่องวัด ค่าแรงดันที่วัดได้จะเท่ากับ $U_2/2 + U_2/2 = U_2$ เท่ากับแรงดันที่ต้องการวัดทางภาคแรงต่ำของดีไวเดอร์ (แรงดันคร่อม C_2) เมื่อแรงดันที่สะท้อนกลับมาถึงต้นทวนที่มี $R = Z_w$ ต่ออันดับอยู่ก็จะไม่เกิดคลื่นสะท้อนซ้ำอีก



C) แบบ C มีความต้านทานหน่วงกระจาย (damped capacitive VD)

รูปที่ 2.16 การต่อความต้านทานสมคู่กันในวงจรภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

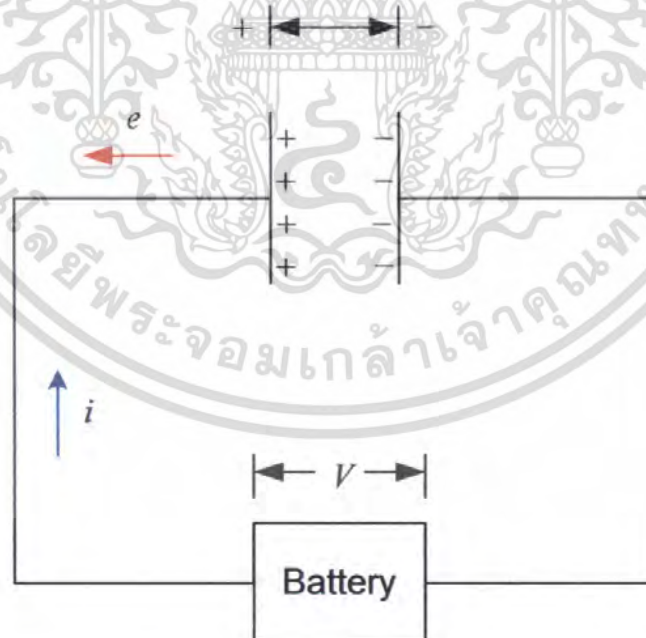
การออกแบบ

ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างเป็นแบบตัวเก็บประจุ มีความต้านทานหนึ่งวง โดยสร้างขึ้นเพื่อใช้วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ เนื่องจากชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อย ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถแบ่งตามชนิดได้ 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

- 1.1 ตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่
- 1.2 ตัวเก็บประจุชนิดที่เปลี่ยนค่าได้

3.1 ตัวเก็บประจุ [3]

ตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วย แผ่นโลหะตัวนำ 2 แผ่นวางห่างกัน โดยมีสารไดอิเล็กทริกกันอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้ง 2 ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ มีการนำไปใช้ในวงจรวัดแรงดัน วงจรกรองความถี่ใช้ในการถ่ายถอดสัญญาณ (coupling)



รูปที่ 3.1 พื้นฐานโครงสร้างของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่

จะเป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าคงที่ได้ โดยมากจะเรียกชื่อตามชนิดของไดอิเล็กตริกที่ใช้เป็นตัวคั่นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีขั้วบวกและขั้วลบบอกไว้ ส่วนใหญ่จะเป็นแบบกลมดังนั้น การนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงการต่อขั้วให้กับ Capacitor ด้วย จะสังเกตขั้วง่าย ๆ ขั้วไหนที่เป็นขั้วลบจะมีลูกศรชี้ไปที่ขั้วนั้น และในลูกศรจะมีเครื่องหมายลบบอกไว้



รูปที่ 3.2 รูปตัวเก็บประจุชนิดที่มีค่าคงที่

3.1.1.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาศ ตัวเก็บประจุแบบกระดาศ นำไปใช้งานที่ซึ่งต้องการค่าความต้านทานของฉนวนที่มีค่าสูง และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงได้ดี มีค่าความต้านทานของฉนวนที่มีค่าสูง และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงได้ดี มีค่าความจุที่ดีในย่านอุณหภูมิที่กว้าง มีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด ถึง 1 ไมโครฟารัด อัตราทนไฟสูงประมาณ 200 – 1,600 โวลต์

3.1.1.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า ตัวเก็บประจุแบบไมก้านี้ จะมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ และ ความถี่ดี มีค่าตัวประกอบการสูญเสียต่ำ และสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในงานหลายอย่าง เช่น ในวงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรกรองสัญญาณ และวงจรขยายความถี่วิทยุกำลังสูง จะไม่มีการผลิตตัวเก็บประจุแบบไมก้าค่าความจุสูงๆ ออกมา เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมก้ามีราคาแพง จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงเกินไป ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่า 1 พิโกฟารัด - 0.1 ไมโครฟารัด อัตราทนกำลังไฟประมาณ 100 - 2500 Vdc



รูปที่ 3.3 รูปตัวเก็บประจุแบบไมก้า

3.1.1.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกนี้ โดยทั่วไปตัวเก็บประจุชนิดนี้มีลักษณะกลมๆ แบนๆ บางครั้งอาจพบแบบสี่เหลี่ยมแบนๆ ส่วนใหญ่ตัวเก็บประจุชนิดนี้ มีค่าน้อยกว่า 1 ไมโครฟารัด และเป็นตัวเก็บประจุชนิดที่ไม่มีขั้ว (ไม่ต้องคำนึงเวลาใช้งาน) และสามารถทนแรงดันได้ประมาณ 3.3 - 600 Vdc ค่าความจุของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่มีใช้กันในปัจจุบันอยู่ในช่วง 1 พิโกฟารัด ถึง 2.2 ไมโครฟารัด



รูปที่ 3.4 รูปตัวเก็บประจุแบบเซรามิค

3.1.1.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบกระดาษมากแต่จะใช้ไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นฟิล์มที่ทำจากสารหรือวัสดุอื่น ซึ่งจะเรียกชื่อต่างกันตามชนิดของสารไดอิเล็กตริก ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชนิดโพลีเอสเตอร์ตัวเก็บประจุ มีค่าความจุ 0.001 – 100 ไมโครฟารัด อัตรา
ทนแรงดันได้ถึง 1500 Vdc
- ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ตัวเก็บประจุ มีค่าความจุ 10 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดัน
ได้ถึง 400 Vdc และ 270 Vac
- ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ตัวเก็บประจุ มีค่าความจุ 10 ไมโครฟารัด อัตราทนแรงดันได้
ถึง 1000 Vdc
- ชนิดโพลีคาร์บอเนตตัวเก็บประจุ มีค่าความจุ 50 ไมโครฟารัด อัตราทน
แรงดันได้ถึง 1000 Vdc



รูปที่ 3.5 รูปตัวเก็บประจุโพลีโพลีเอสเตอร์แบบฟิล์ม

3.1.1.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์ ตัวเก็บประจุชนิดนี้ต้องระวังในการนำไปใช้งานด้วย เพราะมีขั้วที่แน่นอนพิมพ์ติดไว้ด้านข้างตัวถังอยู่แล้ว ถ้าป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุผิดขั้วละก็ อาจเกิดความเสียหายกับตัวมันและอุปกรณ์ที่ประกอบร่วมกับตัวมันได้ ขั้วของตัวเก็บประจุชนิดนี้สังเกตได้ง่ายๆ เมื่อตอนซื้อ มา คือ ขาที่ยาวจะเป็นขั้วบวก และขาที่สั้นจะเป็นขั้วลบ



รูปที่ 3.6 รูปตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัมจะให้ค่าความจุสูงในขณะที่ตัวถังที่บรรจุมีขนาดเล็ก และมีอายุในการเก็บไว้เฉยๆ ดีมาก ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัมนี้มีหลายชนิดให้เลือกใช้ เช่น ชนิด โซลิด (solid type) ชนิดซินเทอร์สลัก (sintered slug) ชนิดฟอยล์ธรรมดา (plain foil) ชนิดเอ็ชฟอยล์ (etched foil) ชนิดเว็ทสลัก (wet slug) และ ชนิดชิ้นสี่เหลี่ยม (chip) การนำไปใช้งานต่างๆ ประกอบด้วยวงจรรองความถี่ต่ำ วงจรส่งผ่านสัญญาณชนิดโซลิดนั้นไม่ไวต่ออุณหภูมิและมีค่าคุณสมบัติระหว่างค่าความจุ อุณหภูมิต่ำกว่า ตัวเก็บประจุแบบขี้เหล็กทรอไลติก ชนิดใดๆ สำหรับงานที่ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัมไม่เหมาะได้แก่ วงจรตั้งเวลาที่ใช้ RC ระบบกระตุ้น (triggering system) หรือ วงจรเลื่อนเฟส (phase-shift net work) เนื่องจากตัวเก็บประจุแบบนี้ มีค่าคุณสมบัติของการดักคลื่นของไดโอดีลทริกสูง ซึ่งหมายถึงเมื่อตัวเก็บประจุถูกคายประจุ สารไดโอดีลทริกยังคงมีประจุหลงเหลืออยู่ ดังนั้นแม้ว่าตัวเก็บประจุที่มีคุณสมบัติของการดักคลื่นของสารไดโอดีลทริกสูงจะถูกคายประจุจนเป็นศูนย์แล้วก็ตาม จะยังคงมีประจุเหลืออยู่เป็นจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดปัญหาในวงจรตั้งเวลา และวงจรอื่นที่คล้ายกัน



รูปที่ 3.7 รูปตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดปรับเปลี่ยนค่าได้

เป็นตัวเก็บประจุซึ่งการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ตัวเก็บประจุชนิดนี้ปกติแล้วจะประกอบด้วยอุปกรณ์ภายใน 2 ส่วน ได้แก่ แผ่นเพลตที่เคลื่อนที่ได้ และแผ่นเพลตที่ติดตั้งอยู่กับที่โดยแผ่นเพลตทั้งสองจะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับวงจรภายนอก การแบ่งประเภทของตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้นี้ จะแบ่งตามไดโอดีลทริกที่ใช้ โดยแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ อากาศ ไมก้า เซรามิค และพลาสติก ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความจุประมาณ 10 – 400 พิโคฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 รูปตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้

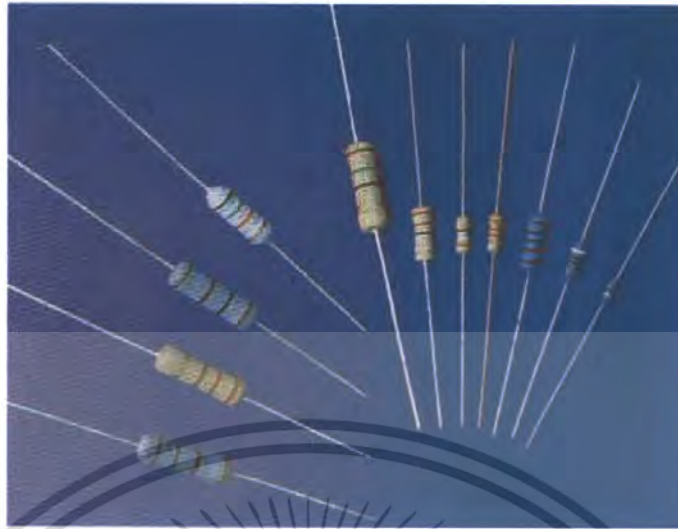
3.2 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่นักวิทยาศาสตร์ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อต่อร่วมกับวงจรเพื่อ บังคับให้กระแสไฟฟ้าในวงจรเปลี่ยนแปลงตามต้องการ ทำจากวัสดุที่ปล่อยให้ไอเล็กตรอนหลุด จากตัวมันได้น้อยตัวต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm) ตัวต้านทานแบ่งตามลักษณะการ ใช้งานได้ดังนี้

ตัวต้านทานแบบมีค่าคงที่

ตัวต้านทานทั่วไปอาจมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยที่มีสารตัวต้านทานอยู่ที่แกนกลาง หรือ เป็นฟิล์มอยู่ที่ผิว และมีแกนโลหะตัวนำออกมาจากปลายทั้งสองข้าง ตัวต้านทานที่มีรูปร่าง นี้เรียกว่า ตัวต้านทานรูปร่างแบบแอกเซียล ตัวต้านทานใช้สำหรับกำลังสูงจะถูกออกแบบให้มี รูปร่างที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยมักจะเป็น ตัวต้านทานแบบขดลวด ตัวต้านทานที่ มักจะพบเห็นบนแผงวงจร เช่นคอมพิวเตอร์นั้น โดยปกติจะมีลักษณะเป็น ตัวต้านทานแบบ ประกะบนผิวหน้า (surface-mount) ขนาดเล็ก และไม่มีขาโลหะตัวนำยื่นออกมา นอกจากนั้นตัว ต้านทานอาจจะถูกรวมอยู่ใน อุปกรณ์วงจรรวม (IC-integrated circuit) โดยตัวต้านทานจะ ถูกสร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต และแต่ละ IC อาจมีตัวต้านทานถึงหลายล้านตัวอยู่ ภายใน ตัวต้านทานมีค่าที่เรียกว่าความต้านทาน(resistance)มีหน่วยเป็นโอห์ม(Ohm :W) แต่ หน่วยโอห์มนี้น้อยมาก โดยหน่วยของความต้านทานที่นิยมใช้คือกิโลโอห์ม (Kilo ohm : kW) และ เมกกะ (Mega ohm :MW) ซึ่งจะถูกพิมพ์ไว้บนตัวต้านทานแทนด้วยรหัสสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 รูปตัวต้านทานแบบมีค่าคงที่

3.2.2 ตัวต้านทานปรับค่าได้

ตัวต้านทานปรับค่าได้ เป็นตัวต้านทาน ที่ค่าความต้านทานสามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยอาจมีปุ่มสำหรับหมุนหรือเลื่อนเพื่อปรับค่าความต้านทานและบางครั้งก็เรียก โปเทนติโอมิเตอร์ (potentiometers) หรือ รีโอสแตต (rheostats) ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ มีทั้งแบบที่หมุนได้เพียงรอบเดียว จนถึง แบบที่หมุนแบบเป็นเกลียวได้หลายรอบ บางชนิดมีอุปกรณ์แสดงนิบรอบที่หมุน เนื่องจากตัวต้านทานปรับค่าได้นี้ มีส่วนของโลหะที่ขัดสีสึกกร่อน บางครั้งจึงอาจขาดความน่าเชื่อถือ ในตัวต้านทานปรับค่าได้รุ่นใหม่ จะใช้วัสดุซึ่งทำจากพลาสติกที่ทนทานต่อการสึกกร่อนจากการขัดสีและกัดกร่อน

3.2.3 ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Variable Resistor)

เป็นตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าความต้านทานได้อย่างต่อเนื่อง ในช่วงค่าความต้านทานที่กำหนดไว้ จะใช้ในงานที่ต้องการปรับค่าความต้านทานบ่อยๆ ตัวต้านทานชนิดนี้จะมีหน้าคอนแทคสำหรับใช้ในการหมุนเลื่อนหน้าคอนแทค

ในการปรับค่าความต้านทานโดยมีแกนยื่นออกมา เพื่อใช้สำหรับหมุนปรับค่า อย่างเช่น วอลุ่มเร่งเสียงแบบธรรมดา หรือแบบสไลด์ อีกแบบหนึ่งไม่มีแกนหมุนเราเรียกกันว่า วอลุ่มเกือกม้า หรือ Trimpot วารีโอเบิ้ลรีซีสเตอร์ อาจจะทำมาจาก คาร์บอน เซอร์เมท (เซรามิกผสมเงิน) หรือพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบภาคแรงสูง

ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสวางเป็นแบบตัวเก็บประจุต่ออันดับย่อย และมีตัวต้านทานหน่วง ซึ่งสามารถวัดแรงดันการแอสลับและแรงดันอิมพัลส์ได้ เมื่อเอาตัวต้านทานหน่วงเข้ามาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

เงื่อนไขการออกแบบตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

เพื่อไม่ให้เป็นโหลดเครื่องกำเนิดแรงดัน ค่าความจุไฟฟ้าจะต้องไม่สูงเกินไป และค่าความจุไฟฟ้าจะต้องมีความแม่นยำและมีเสถียรภาพ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้น อีกทั้งการออกแบบชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุต่ออันดับและมีตัวต้านทานหน่วงนี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ผลของ Stray Capacitance (C_s) ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดความสูงของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ ในการออกแบบนี้ได้เพื่อผลของค่าของ C_{stray} ไว้แล้วโดยยอมให้เกิด Error เนื่องจากผลของ C_{stray} ได้ 5% โดยค่า C_s มีค่าประมาณ 10-15 pF/m จากเหตุผลนี้จึงทำให้หาค่า C_1 ได้ดังนี้ [1]

$$\text{จากสูตร} \quad \%Error = \frac{C_s}{6C_1} ; C_1 = \frac{C_s}{6 \times \%Error} \quad (3.1)$$

$$\text{จะได้} \quad C_1 = \frac{15 \text{ pF/m}}{6 \times 0.05} = 50 \text{ pF/m} \quad (3.2)$$

เนื่องจาก ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์มีค่าความสูงประมาณ 1 เมตร จากเงื่อนไขดังกล่าวเราจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยที่จะใช้ต่ออันดับเป็นแบบโพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypropylene) เซรามิก (Ceramic) และแบบไมลาร์ (Mila) โดยทดสอบทุกชนิด โดยมีขนาดรวม 50 pF

จากชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ที่มีอยู่แล้ว ดังรูปที่ 3.10 มีจำนวนช่อง slot ในภาคแรงดันสูงเท่ากับ 32 ช่อง จึงสามารถนำไปออกแบบภาคแรงดันสูงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.10 รูปชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ของภาคแรงดันสูง มีช่อง Slot 32 ช่อง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากจำนวนช่อง slot 32 ช่องดังรูปที่ 3.10 จะสามารถออกแบบได้ว่า ภาคแรงสูงมีช่อง slot ที่สามารถบรรจุตัวเก็บประจุได้จำนวน 31 ตัว จึงเลือกใช้จำนวนตัวเก็บประจุ 31 ตัว มาต่ออนุกรมกันทางภาคแรงสูง โดยหาค่าตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ใช้ในด้านภาคแรงสูงซึ่งหาได้จากสูตรดังนี้

$$\text{จากสูตรพื้นฐาน} \quad \frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N} \quad (3.3)$$

โดย N คือจำนวนตัวเก็บประจุที่ต้องการรวม

จากสูตร $C_{\text{total}} = 50\text{pF}$ หาค่า $C_1 - C_{31}$ แต่ละตัวได้ดังนี้

$$\frac{1}{50\text{pF}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_{31}}; \text{ โดย } C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_{31} \quad (3.4)$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{1}{50\text{pF}} = \frac{31}{C_1}; C_1 = 31 \times 50\text{pF} = 1550\text{pF} \approx 1.5\text{nF} \quad (3.5)$$

ดังนั้น C_1 จะมีขนาดตัวละ 1.5 nF และทางด้านภาคแรงสูงจะใช้ตัวต้านทานหน่วงที่มีค่าคงที่มีค่าประมาณ 500 ถึง 1000 โอห์ม มาต่ออนุกรมก่อนถึงภาคแรงสูงของชุดทดลอง โวลเตจดีไวเดอร์เพื่อป้องกัน การแกว่งของผลทดลองที่อาจเกิดขึ้นได้โดยจะให้ความต้านทานที่มีความต้านทานได้แก่ 100, 300, 500 และ 1,000 โอห์ม มาต่ออนุกรมทางด้านแรงดันสูงทีละตัวเพื่อเปรียบเทียบว่าตัวต้านทานใดช่วยลดการแกว่งมากกว่ากัน



รูปที่ 3.11 แสดงการต่อตัวเก็บประจุลงในภาคแรงดันสูง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานเพื่อประเทศไทย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ภาคแรงต่ำถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นการออกแบบภาคแรงต่ำจะต้องคำนึงถึงแรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซิลด์ของสายเคเบิล หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆของระบบ ถ้าสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไป จะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

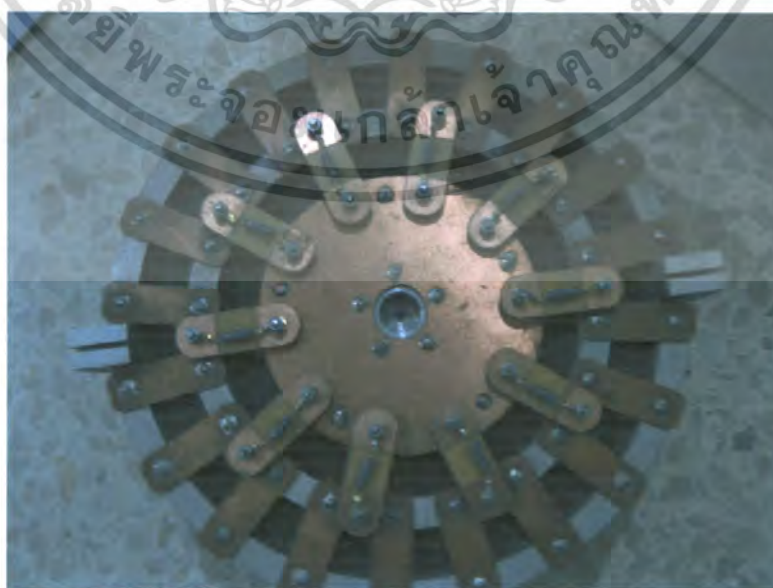
โดยเลือกใช้อัตราส่วนภาคแรงสูงต่อภาคแรงต่ำคือ 100:1 โดย $C_1 = 50 \text{ pF}$ ทำโดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้ [4]

$$\text{จากสูตร} \quad a = 1 + \frac{C_2}{C_1} \quad (3.6)$$

$$\text{จะได้} \quad 100:1 = \frac{C_2}{C_1}; C_2 = 1000 \times 50 \text{ pF} = 50 \text{ nF} \quad (3.7)$$

การเลือกแรงดันขาออกเราพิจารณาจากคุณสมบัติของสายตัวนำสัญญาณจากตัวดีไวเดอร์ไปยังตัวเครื่องวัดแรงดันต่ำ จะใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypopylene) เซรามิก (Ceramic) และไมลาร์ (Mila) มาใช้ทดสอบโดยด้านภาคแรงต่ำจะใช้ตัวเก็บประจุมรวมขนาด 50 nF

จากรูปแสดงภาคแรงดันต่ำของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ (รูปที่ 3.12) เราสามารถออกแบบภาคแรงดันต่ำได้ โดยใช้ตัวเก็บประจุทั้งหมด 10 ตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ของหน่วยงานที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.12 แสดงภาคแรงดันต่ำของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่าตัวเก็บประจุแต่ละตัวของภาคแรงดันต่ำได้ดังนี้

จากสูตร $C_{\text{total}} = 50\text{nF}$ หาค่า $C_1 - C_{10}$ แต่ละตัวได้ดังนี้

$$50\text{nF} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_{10}; \quad \text{โดย } C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_{10} \quad (3.8)$$

$$\text{จะได้} \quad 50\text{nF} = 10C_2; C_2 = 5\text{nF} \quad (3.9)$$

โดยจะได้ตัวเก็บประจุทางภาคแรงต่ำขนาดตัวละ 5 nF จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน โดยในทางปฏิบัติไม่มีตัวเก็บประจุขนาด 5 nF ขายตามท้องตลาดจึงได้ทำการเลือก ตัวเก็บประจุขนาด 4.7 nF ซึ่งมาค่าใกล้เคียงมาใช้ในการทดลองแทน

3.5 การเลือกสายเคเบิลและหัวต่อ

ชนิดของสายเคเบิลที่เลือกใช้ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน โดยแนะนำให้ใช้โคแอกเชียล ชนิด RG8A/U ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม โดยมีความยาวที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 15 เมตร (50 ฟุต)

โดยใช้สายที่มีการลดทอนของสัญญาณน้อยและสามารถทนแรงดันได้สูงมีความถี่ใช้งานกว้าง ซึ่งในการออกแบบเราใช้สายชนิด RG8A/U ซึ่งมีแรงดันใช้งาน $600 V_{\text{rms}}$ หรือประมาณ $850 V_{\text{peak}}$



รูปที่ 3.13 สายเคเบิลชนิด RG8A/U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเลือกใช้หัวต่อโดยใช้ชนิด N (Neill) ซึ่งเป็นตัวต่อแบบสกรู โดยใช้ค่าที่อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมคือ 50 โอห์ม และ 75 โอห์มซึ่งมีแรงดันใช้งาน $1000 V_{rms}$ ที่ระดับน้ำทะเลและแรงดัน Withstanding Dielectric ที่ระดับน้ำทะเลโดยใช้ที่ย่านความถี่ 0 – 1.5 GHz มีค่าเสริจอิมพีแดนซ์ 75 โอห์ม และที่ย่านความถี่ 0 - 11 GHz มีค่าเสริจอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ส่วนย่านอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -65 องศาถึง 165 องศา



รูปที่ 3.14 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับภาควงจรถ่าย

รูปที่ 3.15 หัวต่อปลายสายเคเบิลกับออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 หัวต่อภาคแรงต่ำ

3.6 เครื่องมือวัดแรงดันต่ำ

ในส่วนของภาคแรงดันต่ำจะต้องคำนึงถึงเครื่องมือที่สามารถวัดแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ได้ และเครื่องมือวัดแรงดันต่ำมีด้วยกัน 2 ชนิดหลักคือ แบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล แต่ปัจจุบันเครื่องมือวัดที่นิยมใช้กันมากคือ แบบดิจิตอล จึงจะขอยกตัวอย่างเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลที่จะนำมาใช้วัดแรงดันเอาท์พุทที่ออกจากโวลเตจดีไวเดอร์ดังนี้



ก)



ข)

รูปที่ 3.17 เครื่องมือวัดแรงต่ำ

ก) มัลติมิเตอร์ FLUK 87 & 89 series IV

ข) Oscilloscope DL 1520

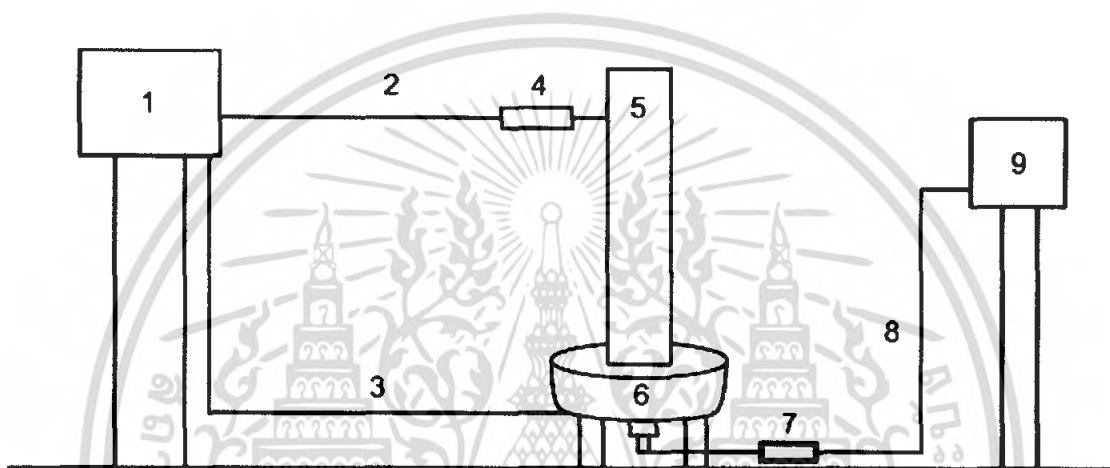
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการประเมินผล

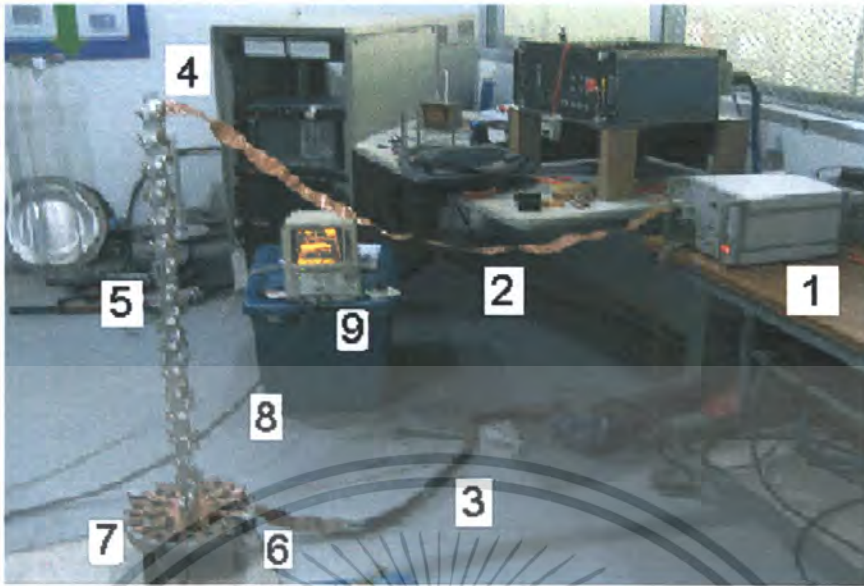
4.1 วงจรและการต่ออุปกรณ์ในการทดสอบ

การทดลองผลตอบสนองรูปชั้นของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ และแบบมีตัวต้านทานหน่วง สามารถทำได้โดยใช้วงจรสมมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์

โดยการทดสอบจะเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบคุณลักษณะของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ 3 ชั้น ได้แก่ เซรามิก, ไมลาร์ และโพลีโพรพิลีน และเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวต้านทานหน่วง โดยใช้ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนฟิล์มเป็นตัวต้านทานหน่วงที่มีค่า 100, 300, 500, 1,000 โอห์ม และแบบไม่ต่อตัวต้านทานหน่วงมาเปรียบเทียบกัน โดยนำตัวต้านทานหน่วงมาต่ออนุกรมเข้ากับชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ทางด้านภาคแรงดันสูง โดยในการทดสอบชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์จะต่ออุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การต่ออุปกรณ์ในการทดสอบชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์

- โดย
- 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดัน Unit step response
 - 2 คือ สายส่งตัวนำ ทำจากแผ่นทองแดง
 - 3 คือ กราวด์ของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ ทำจากแผ่นทองแดง
 - 4 คือ ความต้านทานเหน่ง (เมื่อต่อตัวต้านทานเหน่ง)
 - 5 คือ ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ภาคแรงดันสูง
 - 6 คือ ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ภาคแรงดันต่ำ
 - 7 คือ ตัวต้านทานสมคู่ (matching resistor)
 - 8 คือ สายเคเบิล
 - 9 คือ ออสซิลโลสโคป

4.2 การทดสอบคุณสมบัติของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

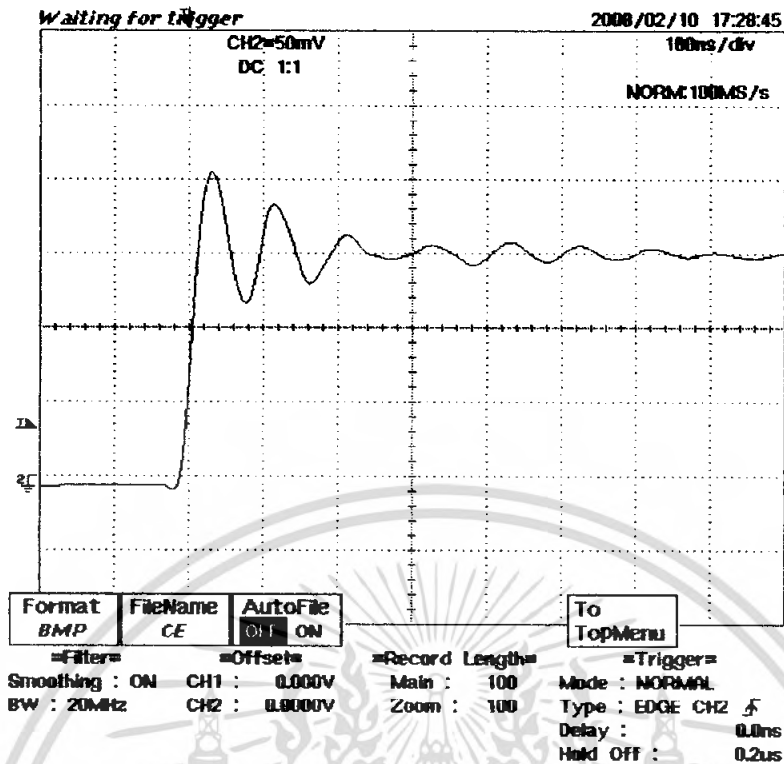
การออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุนั้น ชนิดของตัวเก็บประจุมีผลต่อเวลาผลตอบสนองรูปขึ้น ดังนั้นการเลือกชนิดตัวเก็บประจุมาทำชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ หรือโวลเตจดีไวเดอร์นั้น จำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่มีผลตอบสนองต่อความถี่ที่ดี จึงได้ทำการเลือกตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสมทั้งหมด 3 ชนิด มาศึกษาเปรียบเทียบโดยทำการทดลองหาผลตอบสนองรูปขึ้น (Unit Step Response) โดยทำการทดสอบด้วยแรงดัน 200 โวลต์ แล้ววัดค่าแรงดันขาออกโดยใช้ออสซิลโลสโคป แล้วเก็บค่ามาวิเคราะห์ คำนวณหาเวลาผลตอบสนอง และนำมาเปรียบเทียบกัน ได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

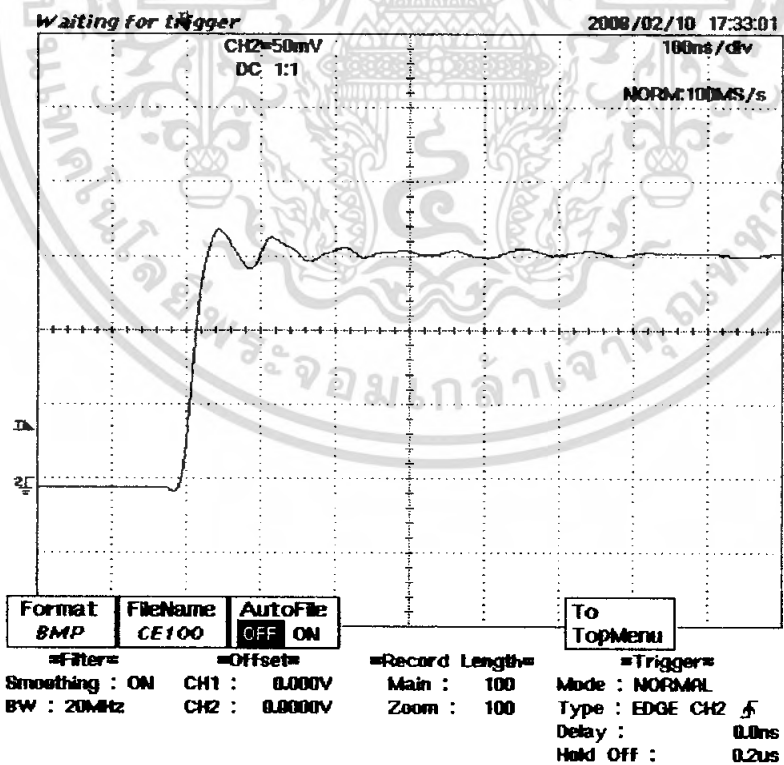
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาเวลาผลตอบสนองรูปขึ้นของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์

กรณีทดสอบชุดทดลอง โวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุ	ชนิด เซรามิก	ชนิด ไมลาร์	ชนิด โพลีโพลีลีน
ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง	$T_{\alpha} = 9.6\text{ns}$ $T = 8.53\text{ns}$ $\beta = 0.75$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.008$	$T_{\alpha} = 16.8\text{ns}$ $T = 15.99\text{ns}$ $\beta = 0.66$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.014$	$T_{\alpha} = 18\text{ns}$ $T = 6.37\text{ns}$ $\beta = 0.57$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.015$
ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม โดยต่ออนุกรมเข้าทาง ภาคแรงดันสูงของชุดทดลอง โวลเตจดีไวเดอร์	$T_{\alpha} = 9.625\text{ns}$ $T = 8.48\text{ns}$ $\beta = 0.42$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.008$	$T_{\alpha} = 19.6\text{ns}$ $T = 13.13\text{ns}$ $\beta = 0.37$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.0163$	$T_{\alpha} = 21.1\text{ns}$ $T = 12.03\text{ns}$ $\beta = 0.31$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.0176$
ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม โดยต่ออนุกรมเข้าทาง ภาคแรงดันสูงของชุดทดลอง โวลเตจดีไวเดอร์	$T_{\alpha} = 24.17\text{ns}$ $T = 12.8\text{ns}$ $\beta = 0.08$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.02$	$T_{\alpha} = 36\text{ns}$ $T = 3242\text{ns}$ $\beta = 0.04$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.03$	$T_{\alpha} = 23.36\text{ns}$ $T = 20.62\text{ns}$ $\beta = 0.21$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.0195$
ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม โดยต่ออนุกรมเข้าทาง ภาคแรงดันสูงของชุดทดลอง โวลเตจดีไวเดอร์	$T_{\alpha} = 79.1\text{ns}$ $T = 80.99\text{ns}$ $\beta = 0.01$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.066$	$T_{\alpha} = 40\text{ns}$ $T = 39.4\text{ns}$ $\beta = 0.1$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.033$	$T_{\alpha} = 36.75\text{ns}$ $T = 35.35\text{ns}$ $\beta = 0.13$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.0306$
ต่อตัวต้านทานหน่วง 1,000 โอห์ม โดยต่ออนุกรมเข้าทาง ภาคแรงดันสูงของชุดทดลอง โวลเตจดีไวเดอร์	$T_{\alpha} = 57.25\text{ns}$ $T = 65.42\text{ns}$ $\beta = 0.03$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.048$	$T_{\alpha} = 42\text{ns}$ $T = 45.33\text{ns}$ $\beta = 0.04$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.035$	$T_{\alpha} = 65.04\text{ns}$ $T = 67.1\text{ns}$ $\beta = 0.03$ $\frac{T_{\alpha}}{T_x} = 0.0542$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

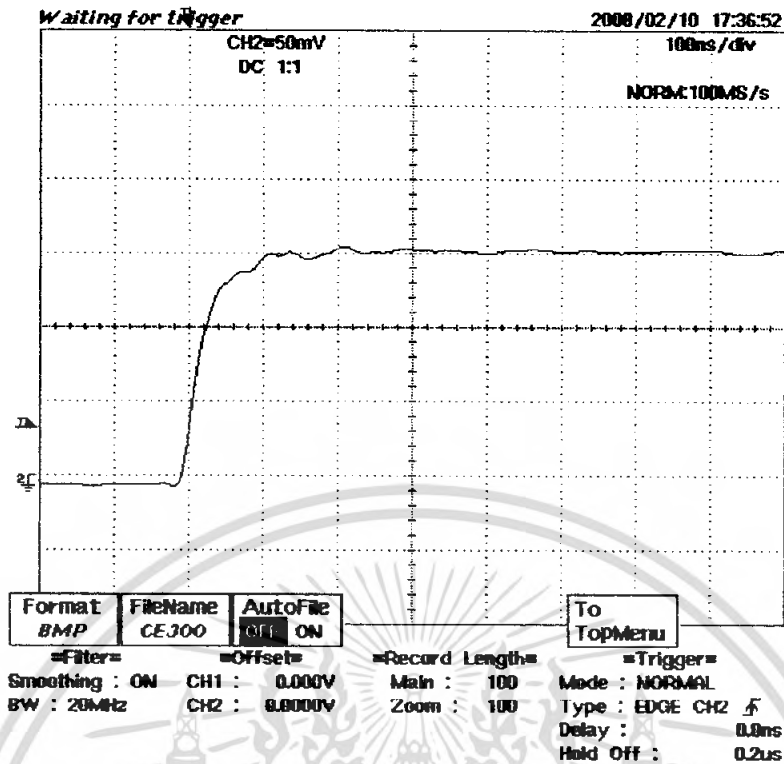


รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดเซรามิก ไม่ต่อตัวต้านทาน
หนึ่ง

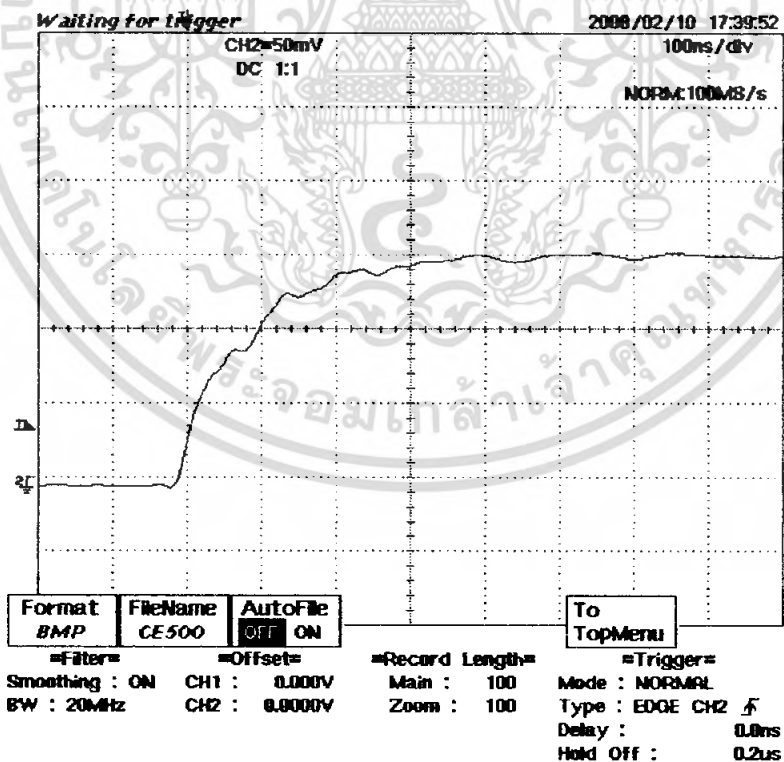


รูปที่ 4.4 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน
หนึ่ง 100 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

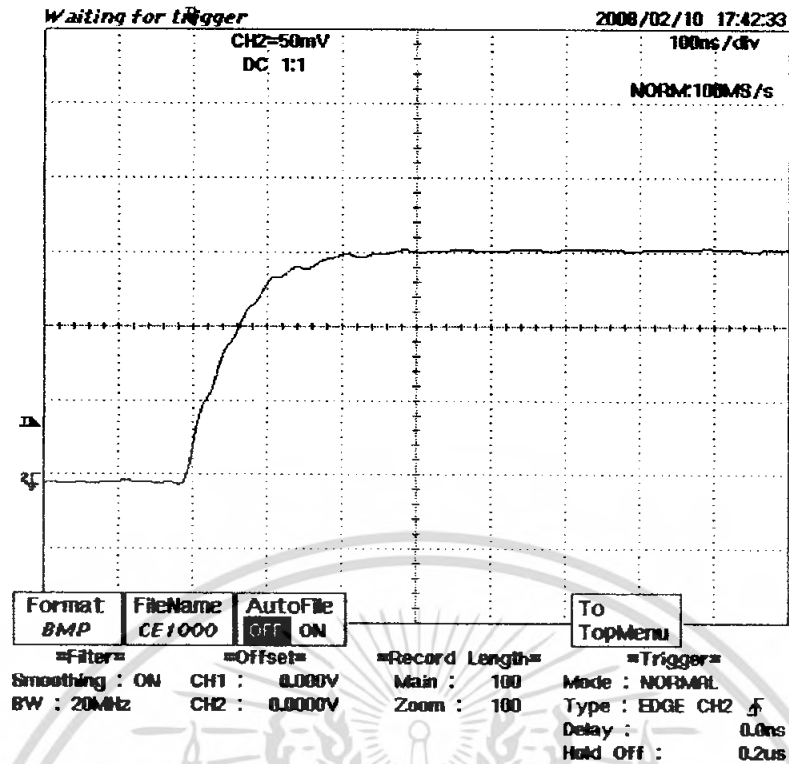


รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน
หน้าวง 300 โอห์ม

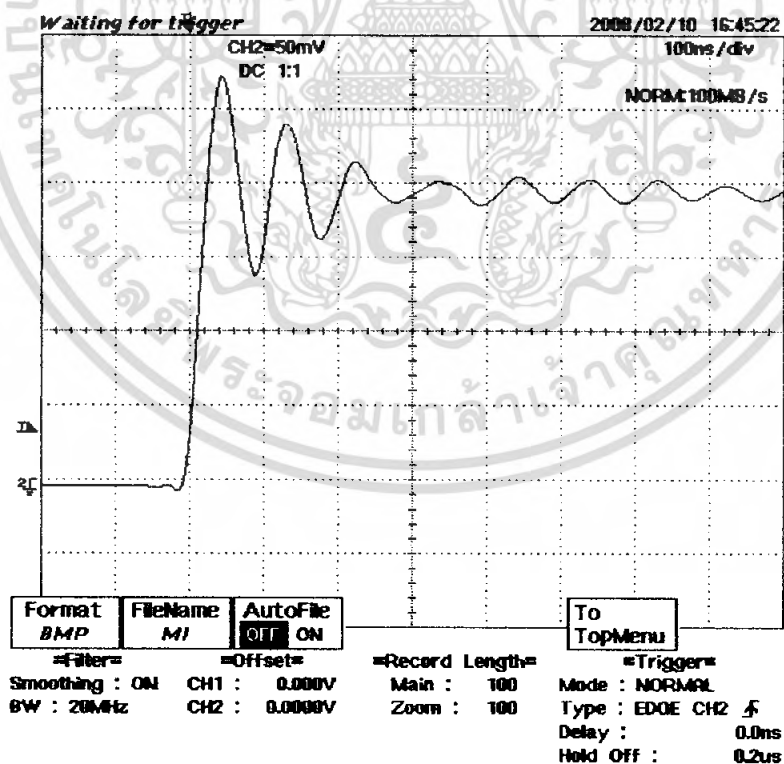


รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน
หน้าวง 500 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

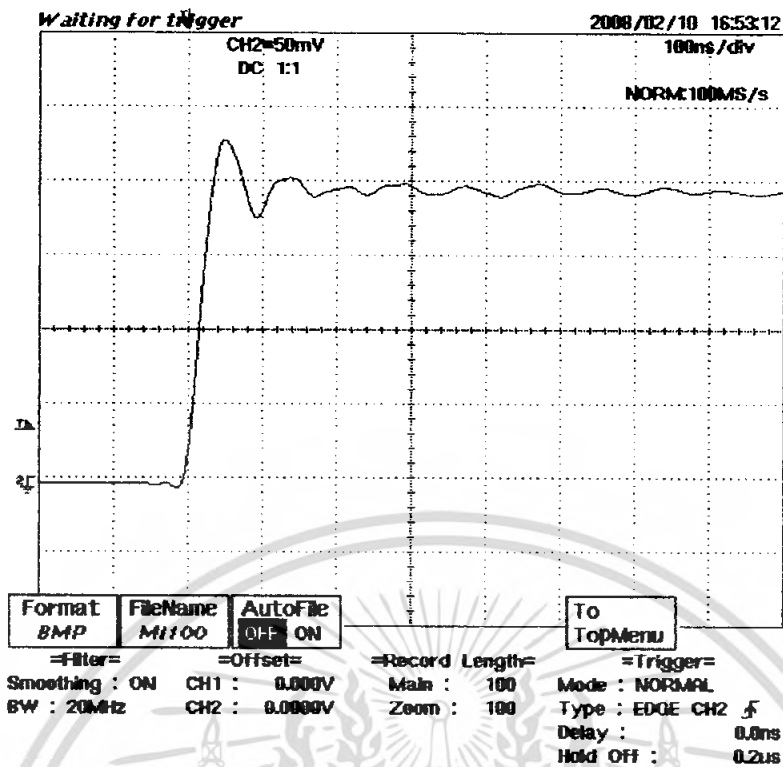


รูปที่ 4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน
หน่วง 1,000 โอห์ม

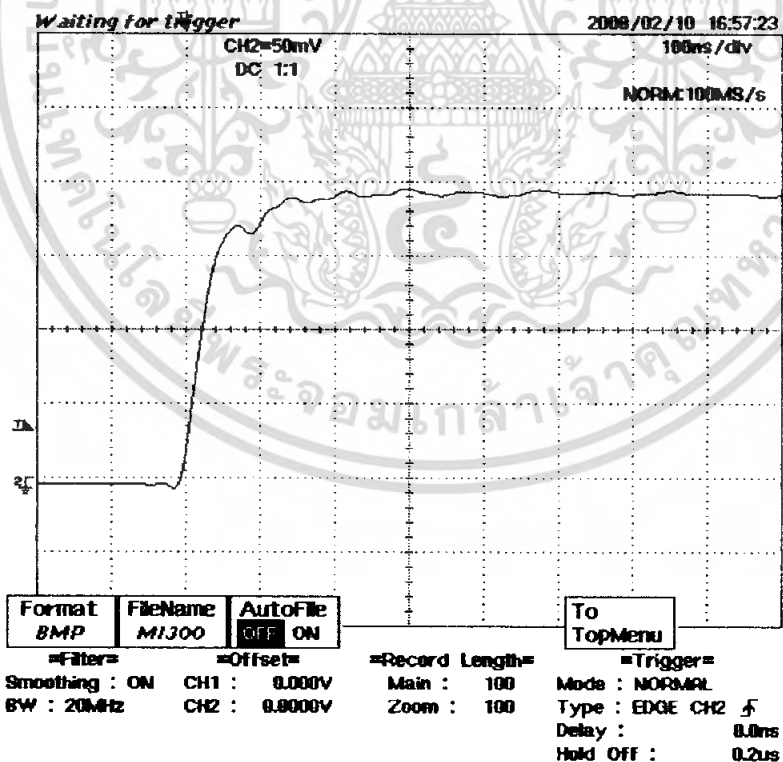


รูปที่ 4.8 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ไม่ต่อตัวต้านทาน
หน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

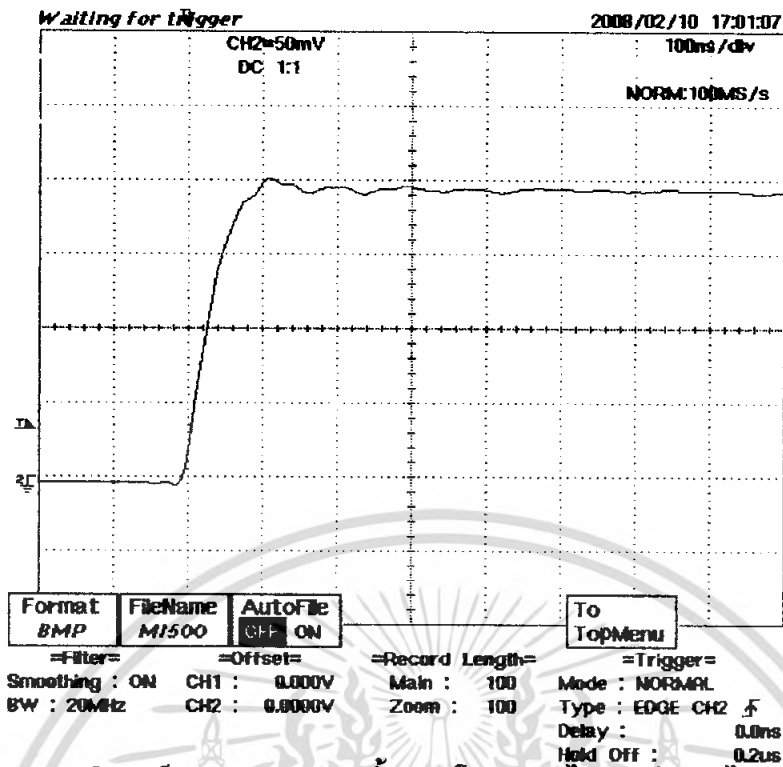


รูปที่ 4.9 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน
หน่วง 100 โอห์ม

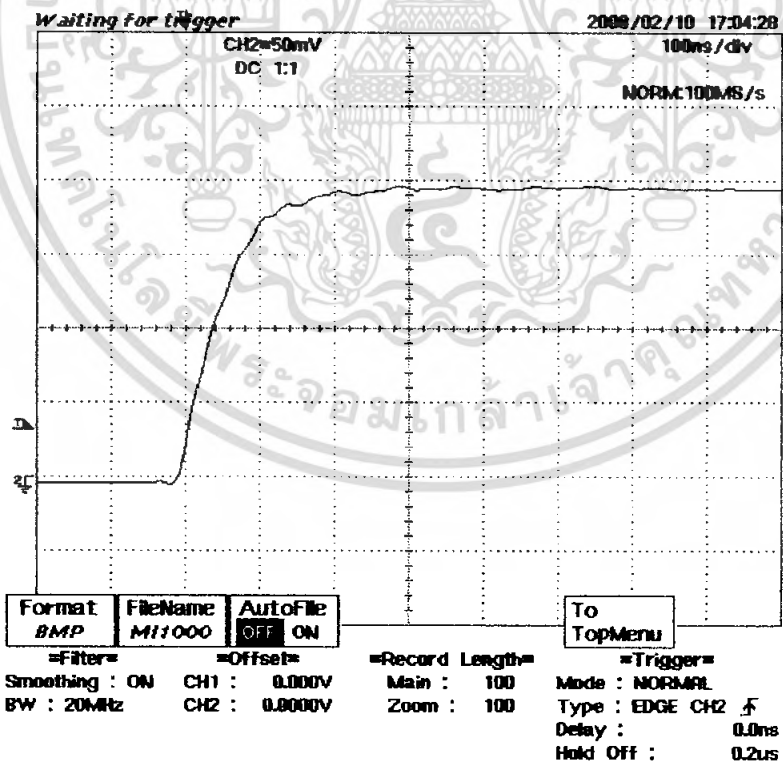


รูปที่ 4.10 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน
หน่วง 300 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

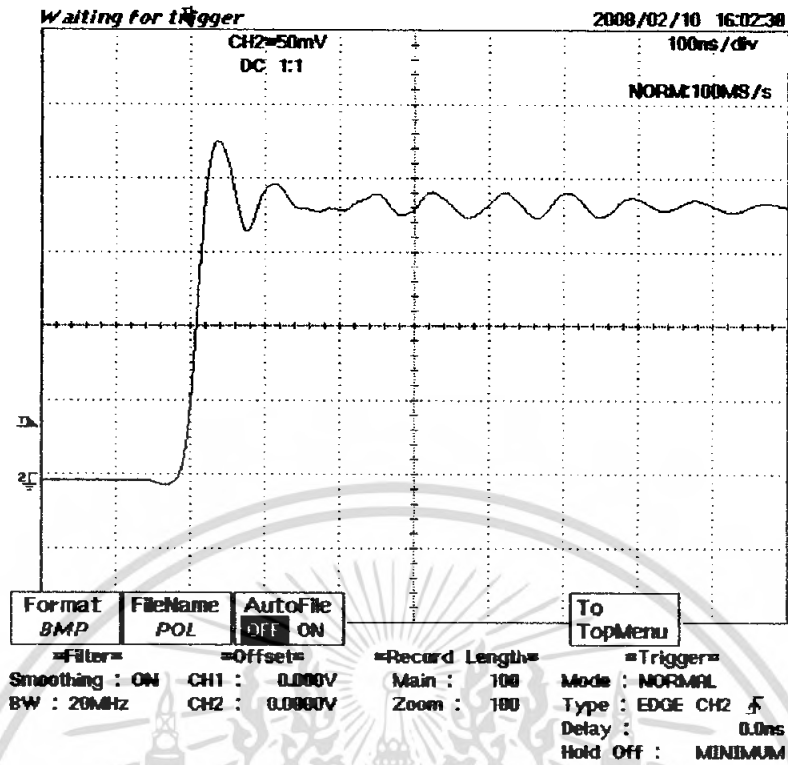


รูปที่ 4.11 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน
 หนึ่ง 500 โอห์ม

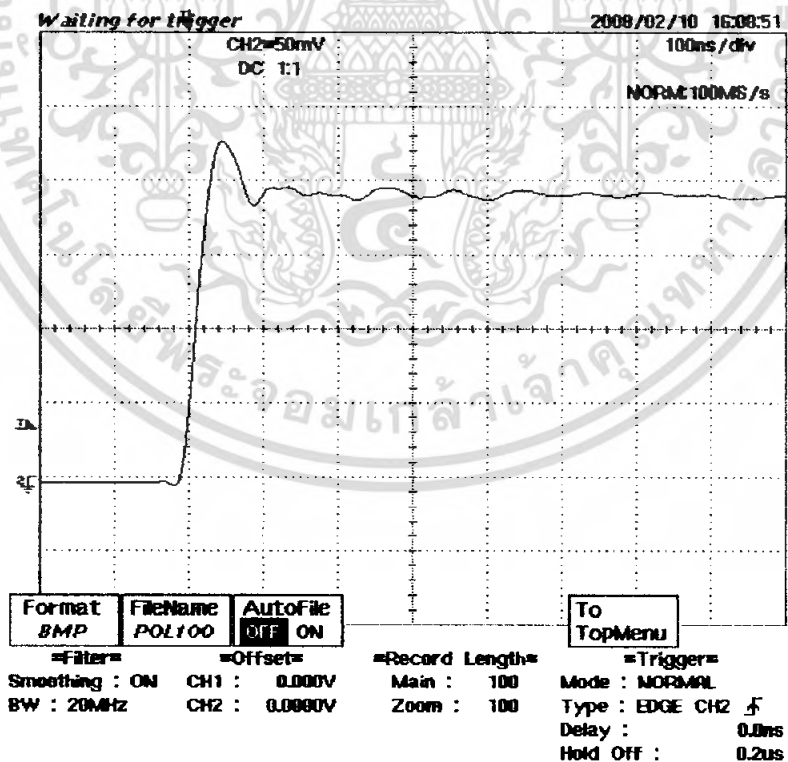


รูปที่ 4.12 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน
 หนึ่ง 1,000 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

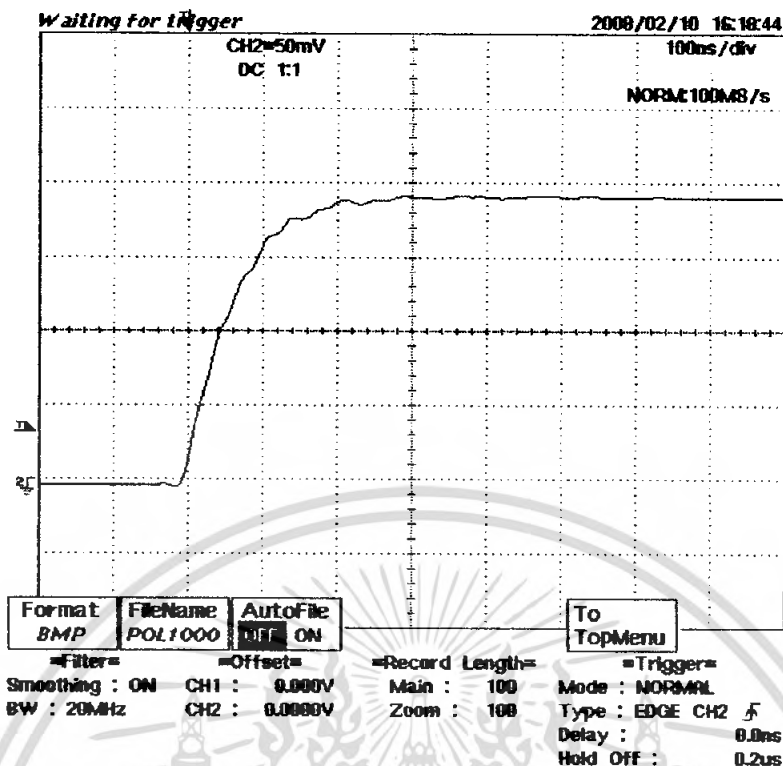


รูปที่ 4.13 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีไลน์ ไม่ต่อตัว
ด้านทานหน่วง



รูปที่ 4.14 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีไลน์ ต่อตัว
ด้านทานหน่วง 100 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีไพลิน ต่อตัวต้านทานหน่วง 1,000 โอห์ม

จากการทดลอง

สามารถสรุปได้ 2 กรณีดังนี้

1. เปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวเก็บประจุแต่ละชนิด กรณีไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง

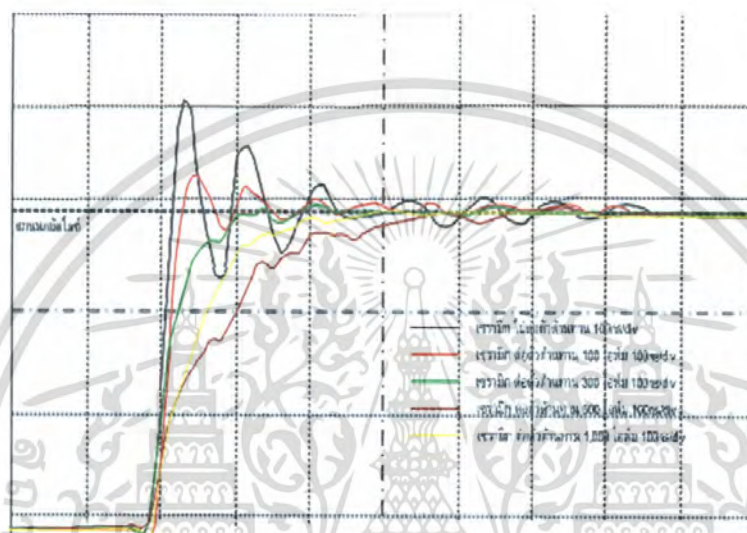
จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์สรุปผลได้ว่า ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ทั้งสามชนิดที่ไม่ได้ต่อตัวต้านทานหน่วง เวลาตอบสนองของโพลีโพลีไพลินมีค่าน้อยที่สุด หรือมีการตอบสนองต่อความถี่สูงดีกว่าชนิดเซรามิก และไมลาร์ตามลำดับ

2. การเลือกใช้ตัวเก็บประจุในการทำชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์

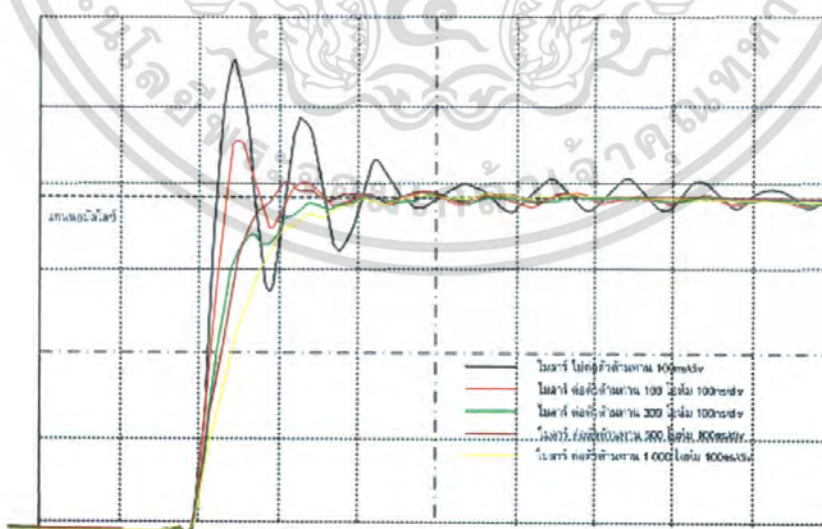
จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์สรุปผลได้ว่า ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ทั้งสามชนิดที่ต่อตัวต้านทานหน่วง เมื่อต่อตัวต้านทานหน่วงที่มีค่า 100, 300, 500 และ 1,000 โอห์ม ต่ออนุกรมทางด้านภาคแรงดันสูงของชุดทดลอง ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกมีเวลาตอบสนองเร็วกว่าโพลีโพลีไพลิน และไมลาร์ ตามลำดับ แต่ไม่สามารถวัดค่าแรงดันขาออกได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกในการทำชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ หรือโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งต่างกับโพลีโพลีไพลิน ที่สามารถวัดแรงดันขาออกได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าไมลาร์ ดังนั้นควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีไพลินในการทำชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ หรือโวลเตจดีไวเดอร์

4.3 การทดสอบคุณสมบัติตัวต้านทานหน่วงที่เหมาะสมกับชุดทดลองทั้ง 3 ชนิด

การทดลองผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อไม่ต่อตัวต้านทานหน่วงจะทำให้เกิดการแกว่ง หรือเกิดส่วนพุ่งเกินที่ทำให้เวลาผลตอบสนองมีค่าน้อย จึงเลือกใช้ตัวต้านทานหน่วงชนิดคาร์บอนฟิล์ม 4 ค่า ได้แก่ 100, 300, 500 และ 1,000 โอห์ม นำมาต่ออนุกรมกันในภาคแรงดันสูง มาใช้ในการทดสอบผลตอบสนองรูปขึ้น และได้ทำการวิเคราะห์หาความเหมาะสมของตัวต้านทานหน่วงที่ใช้กับชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์แต่ละชนิดได้ดังนี้



รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองรูปขึ้นของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก แบบมีตัวต้านทานหน่วง $R_1=0$, $R_2=100$, $R_3=300$, $R_4=500$ และ $R_5=1,000$ โอห์ม

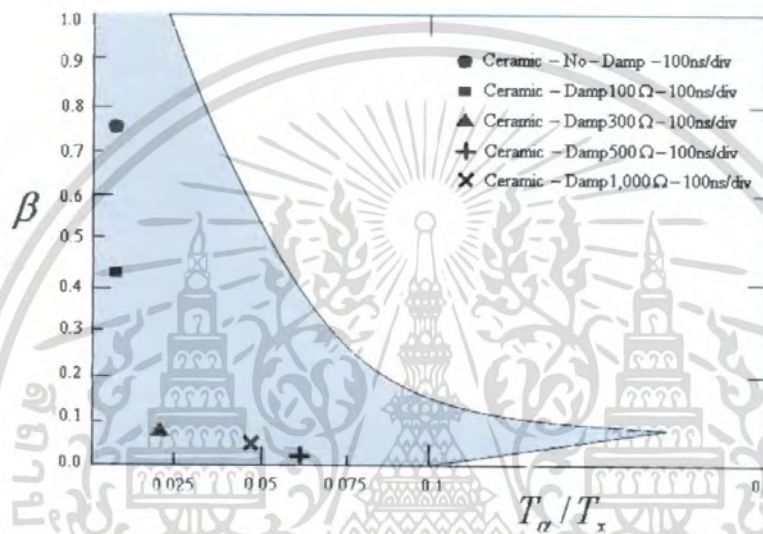


รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองรูปขึ้นของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ แบบมีตัวต้านทานหน่วง $R_1=0$, $R_2=100$, $R_3=300$, $R_4=500$ และ $R_5=1,000$ โอห์ม

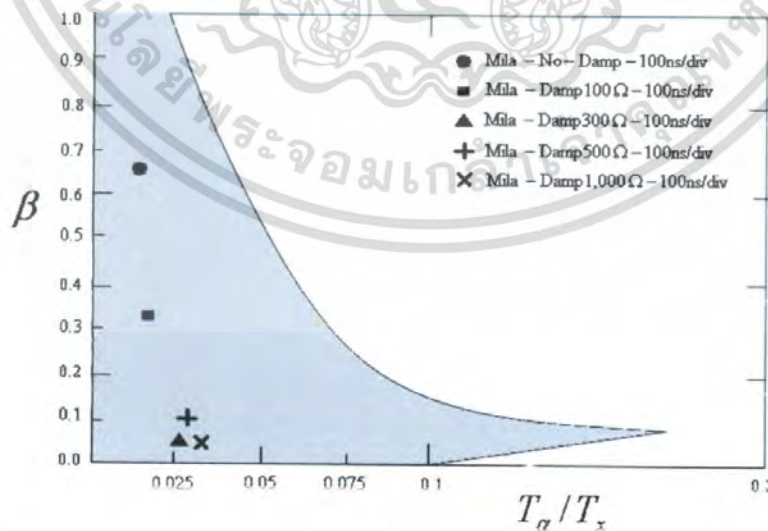
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานหน่วงกับเวลาหน้าคลื่น

เนื่องจากตัวเก็บประจุแต่ละชนิดมีความสามารถในการวัดเวลาหน้าคลื่นได้แตกต่างกัน โดยแต่ละชนิดจะมีเวลาตอบสนองไม่เท่ากัน เมื่อนำตัวต้านทานหน่วงมาต่ออนุกรมเข้ากับชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ในภาคแรงดันสูง จะมีผลอย่างไรกับชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์ เมื่อเวลาหน้าคลื่นที่ต้องการวัดมีค่าเปลี่ยนแปลง ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์จะมีผลอย่างไร ค่าที่ได้จากการทดลองจะอยู่ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_a}{T_x}$ กับ β หรือไม่

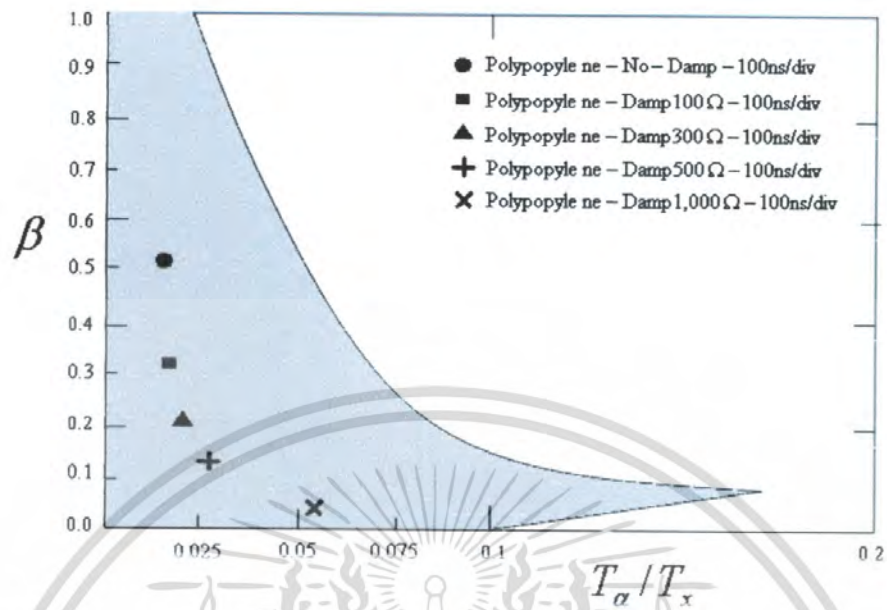


รูปที่ 4.21 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_a}{T_x}$ กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่ $T_x = 1.2\mu s$

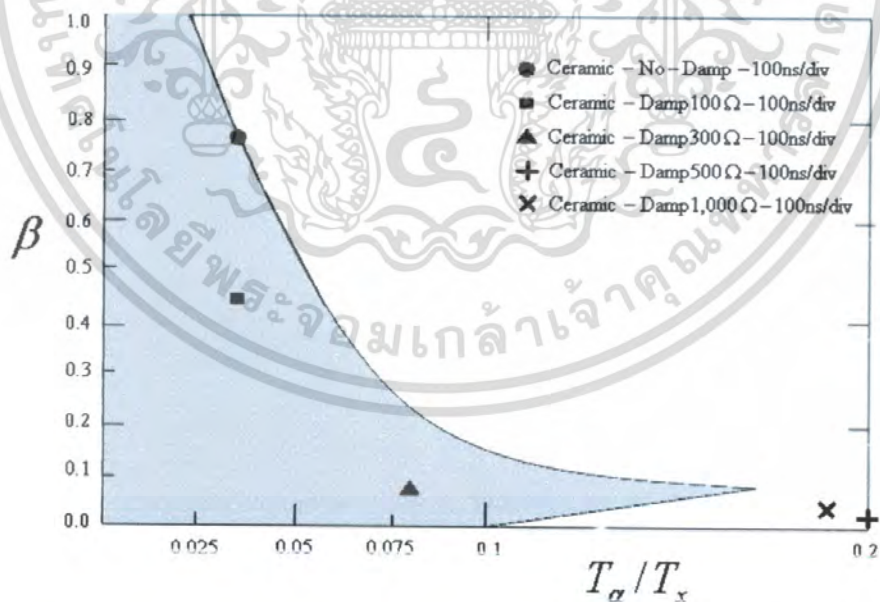


รูปที่ 4.22 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_a}{T_x}$ กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ที่ $T_x = 1.2\mu s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

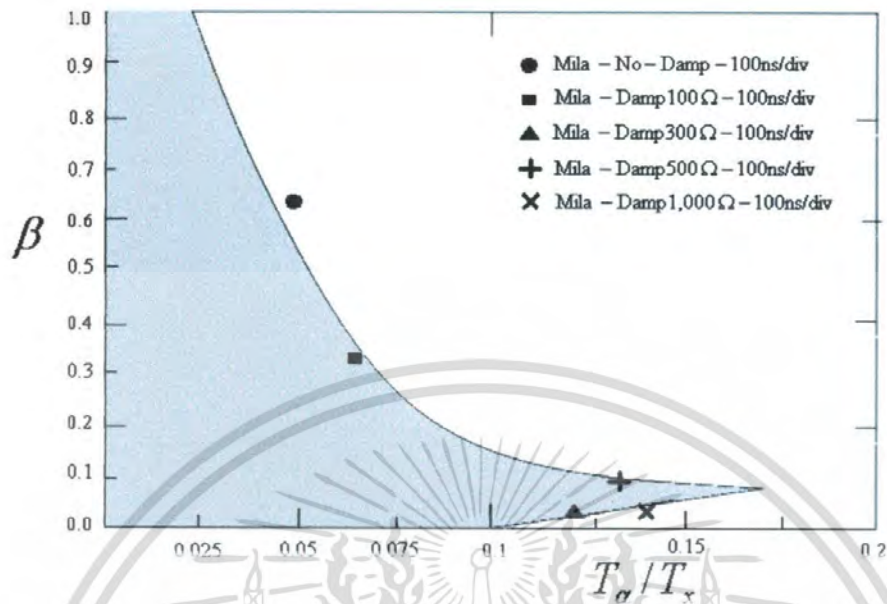


รูปที่ 4.23 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_a}{T_x}$ กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพรพิลีน
ที่ $T_x = 1.2\mu s$

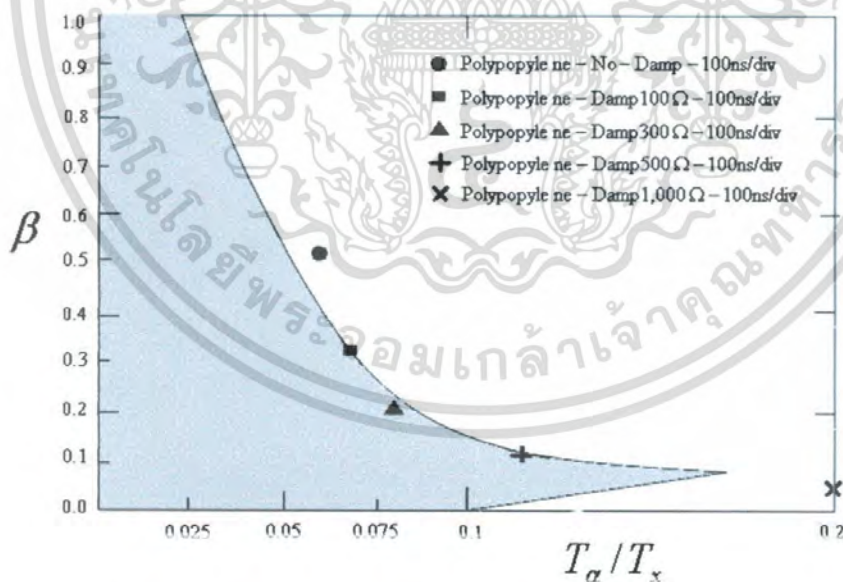


รูปที่ 4.24 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_a}{T_x}$ กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกที่ $T_x = 0.3\mu s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_\alpha}{T_x}$ กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ที่ $T_x = 0.3\mu\text{s}$



รูปที่ 4.26 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{T_\alpha}{T_x}$ กับ β ของตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีเน
ที่ $T_x = 0.3\mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

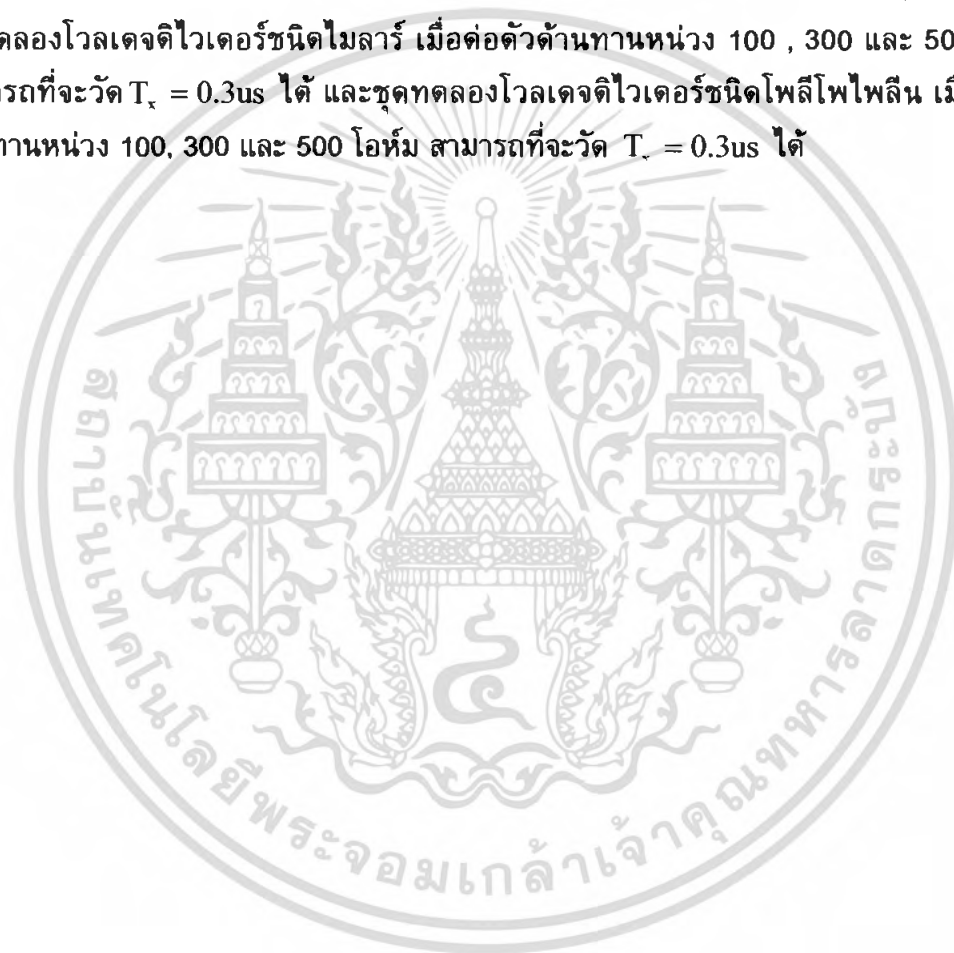
จากผลการทดลอง

สามารถสรุป กรณี ($T_x = 1.2\mu s$) ได้ว่า

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง T_n/T_x กับ β ของชุดทดลองโวลเตจติไวเตอร์ ทั้ง 3 ชนิด ที่ $T_x = 1.2\mu s$ จะเห็นว่า ชุดทดลองโวลเตจติไวเตอร์ทั้งสามชนิดสามารถวัดเวลาหน้าคลื่นได้ทั้ง 3 ชนิด

สามารถสรุป กรณี ($T_x = 0.3\mu s$) ได้ว่า

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง T_n/T_x กับ β ของชุดทดลองโวลเตจติไวเตอร์ ทั้ง 3 ชนิด ที่ $T_x = 0.3\mu s$ จะเห็นว่าชุดทดลองโวลเตจติไวเตอร์ชนิดเซรามิก แบบไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง รวมทั้งต่อตัวต้านทานหน่วง 100 และ 300 โอห์ม สามารถที่จะวัด $T_x = 0.3\mu s$ ได้ ชุดทดลองโวลเตจติไวเตอร์ชนิดไมลาร์ เมื่อต่อตัวต้านทานหน่วง 100 , 300 และ 500 โอห์ม สามารถที่จะวัด $T_x = 0.3\mu s$ ได้ และชุดทดลองโวลเตจติไวเตอร์ชนิดโพลีโพลีลีน เมื่อต่อตัวต้านทานหน่วง 100, 300 และ 500 โอห์ม สามารถที่จะวัด $T_x = 0.3\mu s$ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การใช้งานชุดทดลองโวลต์เดจดีไวเตอร์ชนิดตัวเก็บประจุแต่ละชนิดมีเวลาตอบสนองไม่เท่ากันซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเปรียบเทียบมี 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ และตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ สามารถสรุปเป็นกรณีได้ดังนี้

1. เปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวเก็บประจุแต่ละชนิด กรณีไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง

จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์สรุปผลได้ว่า ชุดทดลองโวลต์เดจดีไวเตอร์ทั้งสามชนิดที่ไม่ได้ต่อตัวต้านทานหน่วง เวลาตอบสนองของโพลีโพลีเอสเตอร์มีค่าน้อยที่สุดหรือมีการตอบสนองต่อความถี่สูงดีกว่าชนิดเซรามิก และไมลาร์ตามลำดับ โดยสามารถอ้างอิงผลโดย การทดสอบด้วยเครื่อง Discharge Before Connecting ที่อยู่ในภาคผนวก ค ซึ่งจะเห็นว่าโพลีโพลีเอสเตอร์สามารถตอบสนองต่อความถี่สูงได้ดีหรือตัวเก็บประจุชนิดนี้ทำงานในย่านความถี่สูงๆได้ดี

2. การเลือกใช้ตัวเก็บประจุในการทำชุดทดลองโวลต์เดจดีไวเตอร์

จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์สรุปผลได้ว่า ชุดทดลองโวลต์เดจดีไวเตอร์ทั้งสามชนิดที่ต่อตัวต้านทานหน่วง เมื่อต่อตัวต้านทานหน่วงที่มีค่า 100, 300, 500 และ 1,000 โอห์ม ต่ออนุกรมทางด้านภาคแรงดันสูงของชุดทดลอง ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกมีเวลาตอบสนองเร็วกว่าโพลีโพลีเอสเตอร์ และไมลาร์ ตามลำดับ แต่ไม่สามารถวัดค่าแรงดันขาออกได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกในการทำชุดทดลองโวลต์เดจดีไวเตอร์ หรือโวลต์เดจดีไวเตอร์ ซึ่งต่างกับโพลีโพลีเอสเตอร์ ที่สามารถวัดแรงดันขาออกได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าไมลาร์ ดังนั้นควรเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ในการทำชุดทดลองโวลต์เดจดีไวเตอร์ หรือโวลต์เดจดีไวเตอร์

3. เปรียบเทียบคุณสมบัติตัวต้านทานหน่วงที่เหมาะสมกับชุดทดลองทั้ง 3 ชนิด

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก เมื่อต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์มเข้าไปแบบอนุกรมทางด้านแรงดันสูง จะมีเวลาผลตอบสนองมากกว่าต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์มอยู่มากซึ่งก็คือมีความตอบสนองต่อความถี่สูงไม่ดี ดังนั้นควรเลือกต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม จะดีกว่าการเลือกต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม แบบอนุกรมทางด้านแรงสูง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ เนื่องจากเวลาผลตอบสนองของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์มีค่าใกล้เคียงกัน จึงได้สรุปผลตอบสนองรูปคลื่นของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์มาวิเคราะห์ แล้วสรุปได้ว่าเมื่อต่อตัวต้านทาน 500 โอห์ม สามารถวัดแรงดันได้ใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บริเวณที่เป็นจุดตัดหรือระหว่างตัวเก็บประจุควรมีขนาดใหญ่และกลมกลืนหรือให้ท่อทองแดงสวมบริเวณจุดต่อ ไม่ควรมีส่วนที่แหลมคมเพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้าบริเวณจุดต่อนั้นและควรรำน้ำถึงระยะห่างของตัวเก็บประจุ ระยะห่างระหว่างชั้นของตัวเก็บประจุเพื่อป้องกันการเบรกดาวน์

4. การออกแบบตัวเก็บประจุควรเลือกตัวเก็บประจุย่อยที่สามารถทนแรงดันได้สูงและมีค่าความผิดพลาดต่ำ

5. ควรศึกษาสถานที่ที่จะทำการทดสอบและควรติดต่อประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องล่วงหน้า

6. การออกแบบตัวต้านทานหน่วง ควรเลือกตัวต้านทานหน่วงให้เหมาะสม เพื่อใช้ในการลดส่วนพุ่งเกินหรือการแกว่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำราญ สังข์สะอาด วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พิมพ์ครั้งที่ 1 เมษายน 2547 (ฉบับปรับปรุง) ISBN 974-92125-5-X
- [2] Schwab, A.J., **High Voltage Measurement Techniques**, The M.I.T. Press, Cambridge 1972, pp. 206-207
- [3] เพิ่มศักดิ์ นิลขำ, วิทยา ใจสะอาด, ปรีชา พานูช และณรงค์ฤทธิ์ ชอบพานิช การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบตัวเก็บประจุขนาด 100 kV มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2547
- [4] เอกสารประกอบการบรรยาย นครเศรษฐ์ พัฒนเดช เทคนิคการวัดแรงดันสูงและกระแสสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

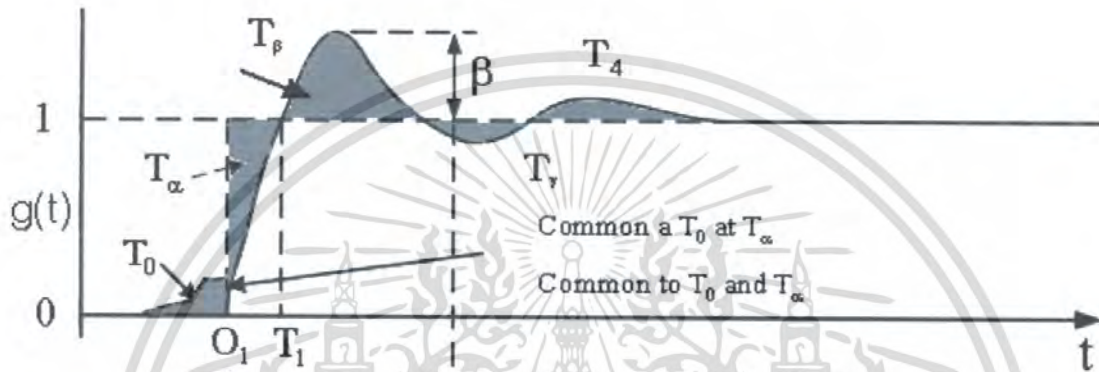


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบหาค่าผลตอบสนองรูปชั้นตามทฤษฎี

การหาค่าผลตอบสนองรูปชั้นนั้นจำเป็นต้องใช้ความเข้าใจในทฤษฎีการหาผลตอบสนองรูปชั้น โดยสามารถศึกษาและนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการทดลองต่อไป ซึ่งการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ได้มาจากทฤษฎีการหาผลตอบสนองรูปชั้น ดังนี้



รูปที่ ก-1 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง เมื่อเทียบกับ $g(t)$

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้กำหนดค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ ดังนี้

$T(t_{max})$ คือ เวลาตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (s)

โดย $T(t_{max}) = T_n$

$T_n = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 + \dots$

T_α คือ เวลาตอบสนองบางส่วน หรือการอินทิเกรตของ 1-ฟังก์ชันทอมัลลิสซ์ โดยอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนดโดย เริ่มจาก O_1 ถึง T_1

T_β คือ เวลาตอบสนองบางส่วน (s)

T_γ คือ เวลาตอบสนองบางส่วน (s)

T_4 คือ เวลาตอบสนองบางส่วน (s)

จากรูป ก-1 จะหาค่า $T(t_{max})$ ได้ดังนี้

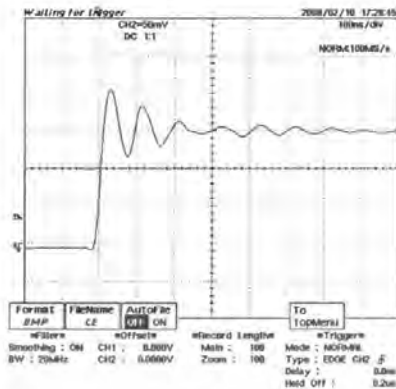
$T_n = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4$

β คือ ส่วนพุ่งเกิน

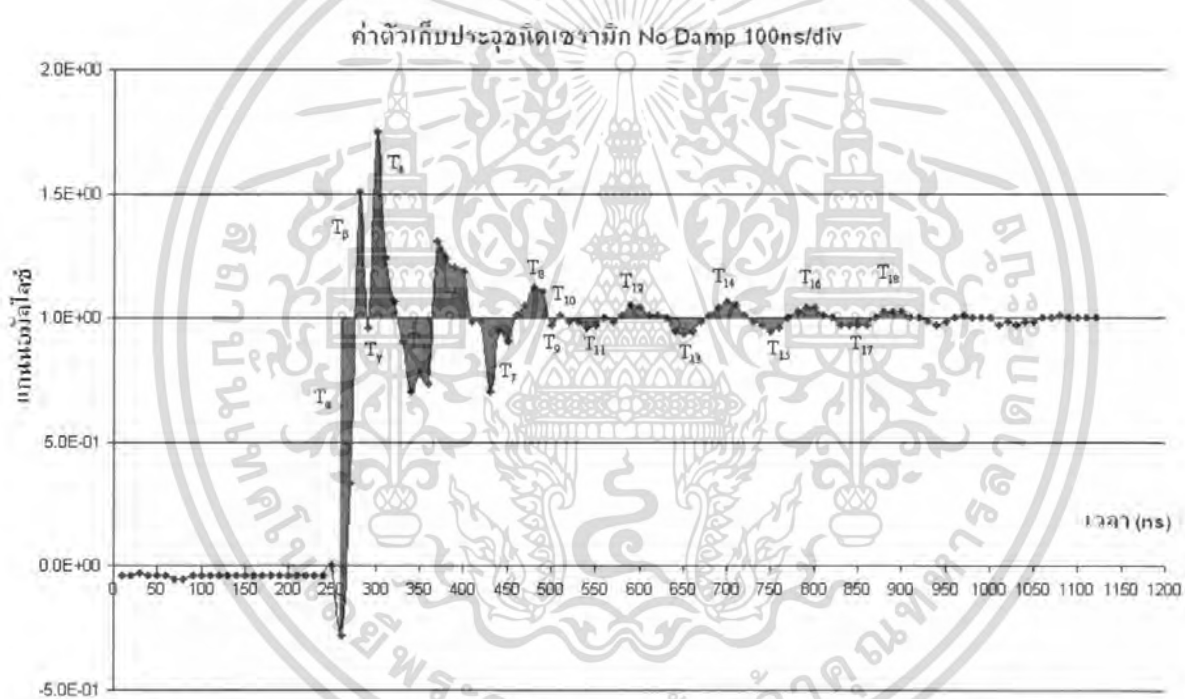
การใช้โปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากจำนวนจุดหน้าคลื่นในการทดลองที่ได้น้อยไปเนื่องจากเครื่องออสซิลโลสโคปที่มีอยู่ไม่สามารถบันทึกจุดหน้าคลื่นได้มากพอสำหรับการใช้ในโปรแกรมที่มีอยู่ จึงทำให้ไม่สามารถใช้โปรแกรมคำนวณได้ ดังนั้นจึงได้เลือกวิธีการคำนวณตามทฤษฎีซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ชนิดเซรามิก ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง



รูปที่ ก-2 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-3 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 9.6\text{ns}, T_\beta = 3.83\text{ns}, T_\gamma = 0.02\text{ns}, T_4 = 13.13\text{ns}, T_5 = 5.86\text{ns}, T_6 = 6.98\text{ns}$$

$$T_7 = 1.88\text{ns}, T_8 = 2.4\text{ns}, T_9 = 0.14\text{ns}, T_{10} = 0.03\text{ns}, T_{11} = 1\text{ns}, T_{12} = 0.75\text{ns}, T_{13} = 1.34\text{ns}$$

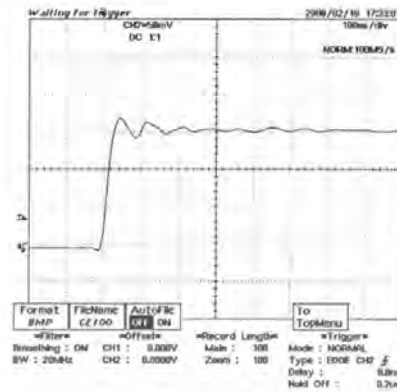
$$T_{14} = 1.75\text{ns}, T_{15} = 1.33\text{ns}, T_{16} = 0.8\text{ns}, T_{17} = 1.35\text{ns}, T_{18} = 1.2\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} - T_{16} + T_{17} - T_{18} = 8.53\text{ns}$$

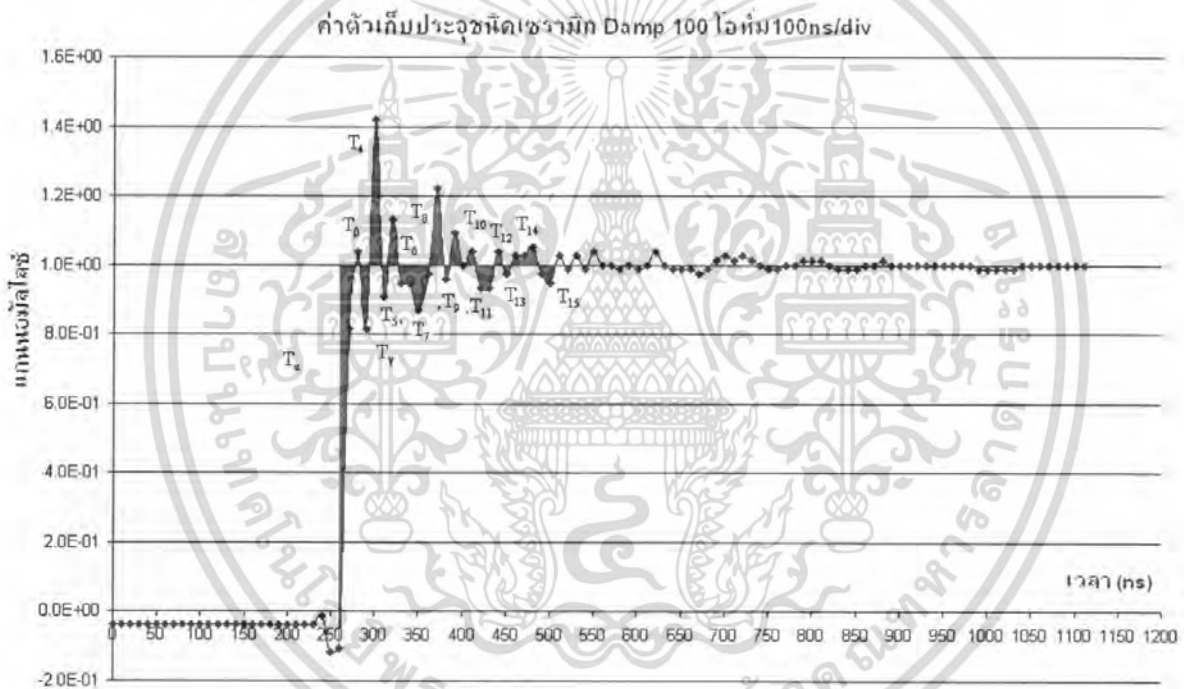
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{9.6 \cdot 10^{-9}}{1.2 \cdot 10^{-6}} = 0.008, \beta = 0.75$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด เซรามิก ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 100 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-4 ผลตอบสนองรูปขั้วนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 100 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-5 ผลตอบสนองรูปขั้วนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 100 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_{\alpha} = 9.625\text{ns}, T_{\beta} = 0.1\text{ns}, T_{\gamma} = 0.92\text{ns}, T_4 = 2.1\text{ns}, T_5 = 0.23\text{ns}, T_6 = 0.65\text{ns}$$

$$T_7 = 3.19\text{ns}, T_8 = 2.2\text{ns}, T_9 = 0.0975\text{ns}, T_{10} = 1.2\text{ns}, T_{11} = 0.96\text{ns}, T_{12} = 0.2\text{ns}$$

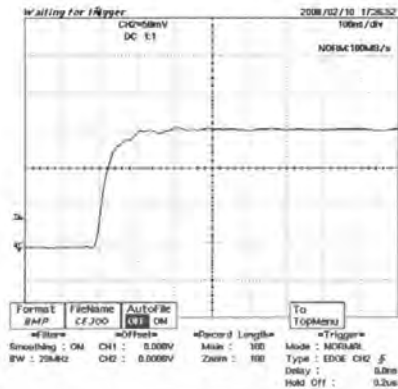
$$T_{13} = 0.13\text{ns}, T_{14} = 0.75\text{ns}, T_{15} = 0.53\text{ns}$$

$$T = T_{\alpha} - T_{\beta} + T_{\gamma} - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} = 8.478\text{ns}$$

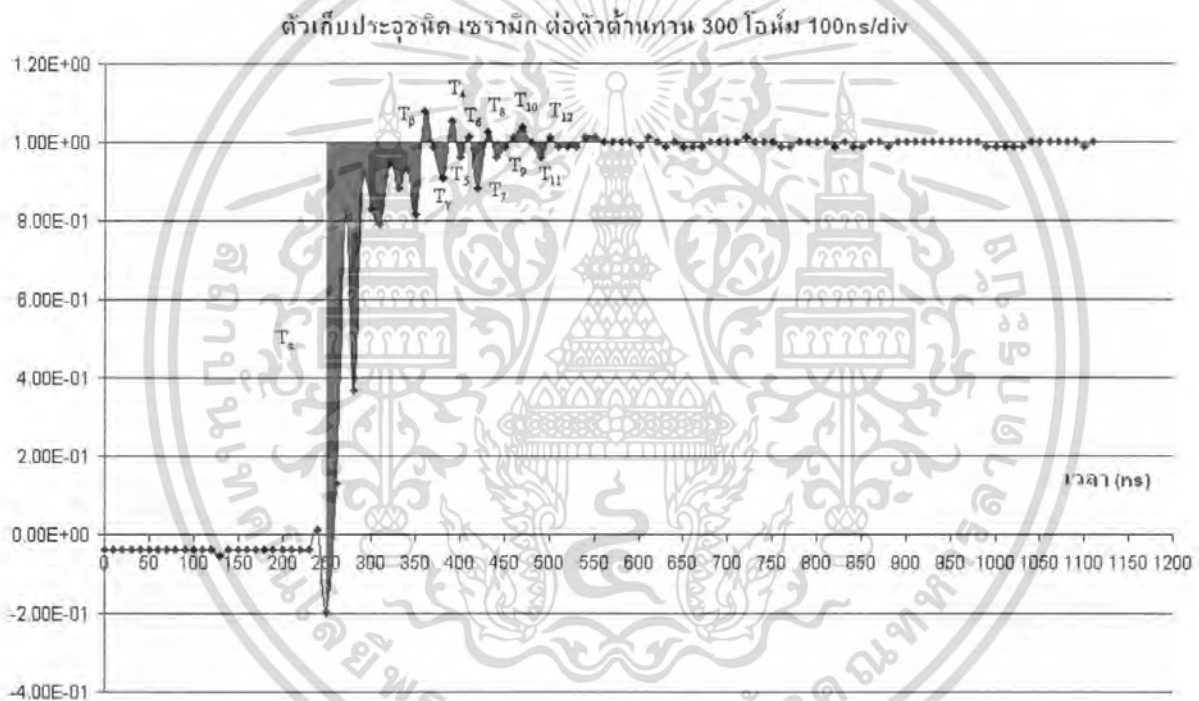
$$\frac{T_{\alpha}}{T_x} = \frac{9.625\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.008021, \beta = 0.42$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด เซรามิก ต่อตัวต้านทาน 300 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-6 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน 300 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-7 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน 300 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_{\alpha} = 24.17\text{ns}, T_{\beta} = 0.6\text{ns}, T_{\gamma} = 0.69\text{ns}, T_4 = 0.25\text{ns}, T_5 = 0.2\text{ns}, T_6 = 0.25\text{ns}$$

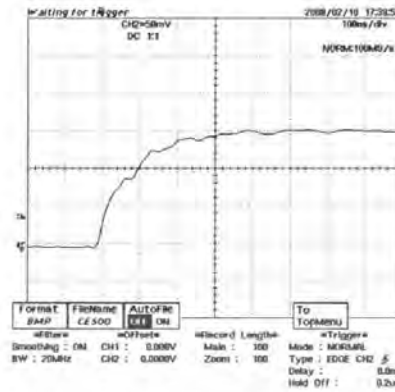
$$T_7 = 0.6\text{ns}, T_8 = 0.075\text{ns}, T_9 = 0.4875\text{ns}, T_{10} = 0.6\text{ns}, T_{11} = 0.4\text{ns}, T_{12} = 0.025\text{ns}$$

$$T = T_{\alpha} - T_{\beta} + T_{\gamma} - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} = 12.8\text{ns}$$

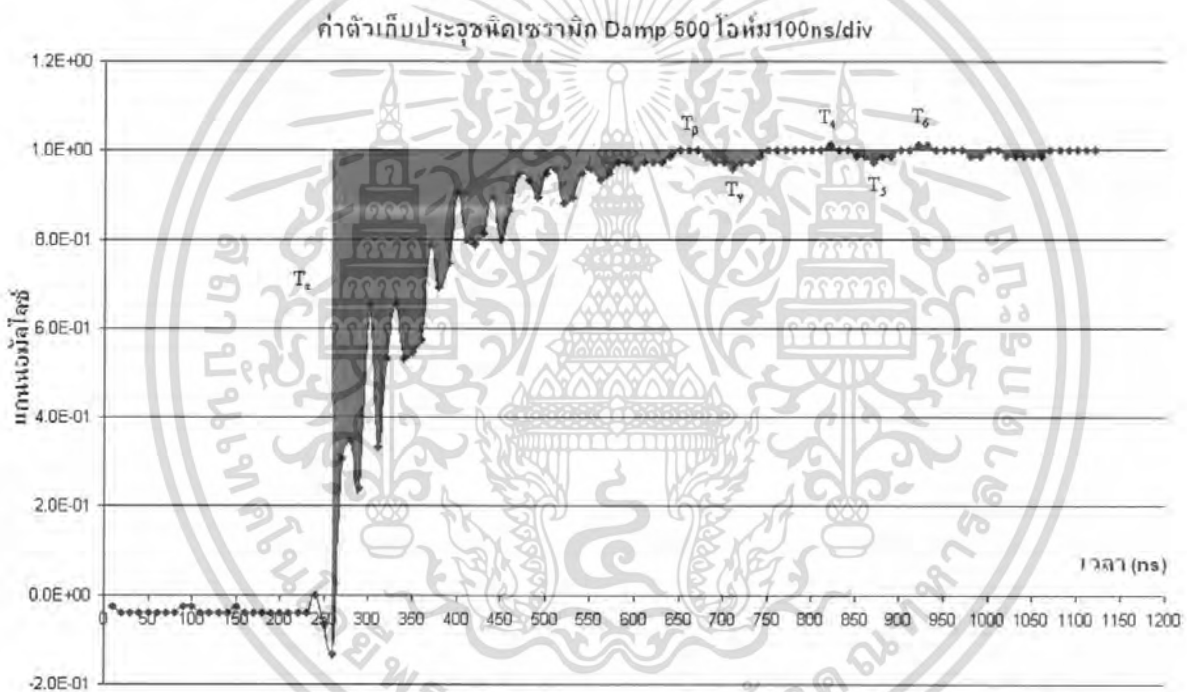
$$\frac{T_{\alpha}}{T_x} = \frac{24.17\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.02, \beta = 0.08$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด เซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-8 ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-9 ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

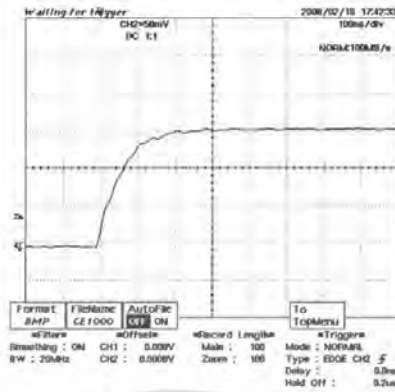
$$T_\alpha = 79.1\text{ns}, T_\beta = 0, T_\gamma = 1.6\text{ns}, T_4 = 0.1\text{ns}, T_5 = 0.69\text{ns}, T_6 = 0.3\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 = 80.99\text{ns}$$

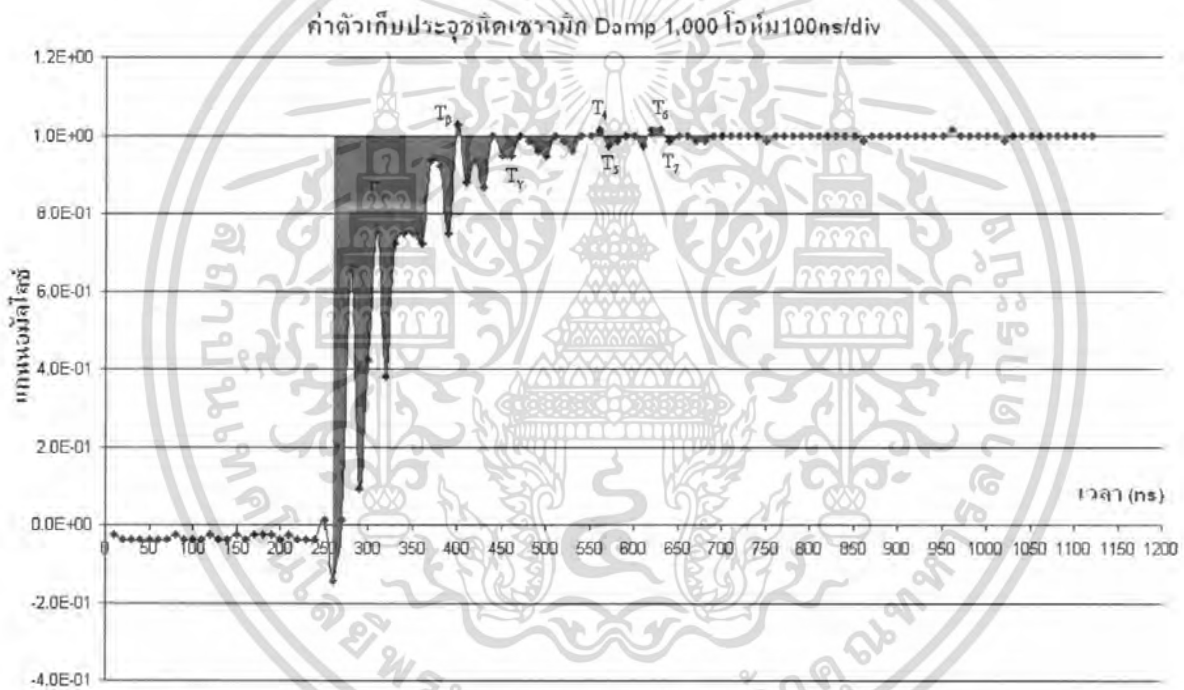
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{79.1\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.066, \beta = 0.01$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด เซรามิก ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 1,000 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-10 ผลตอบสนองรูปชั้มนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 1,000 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-11 ผลตอบสนองรูปชั้มนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดเซรามิก ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 1,000 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 57.25\text{ns}, T_\beta = 0.075\text{ns}, T_\gamma = 8\text{ns}, T_4 = 0.075\text{ns}, T_5 = 0.52\text{ns}, T_6 = 0.3\text{ns}$$

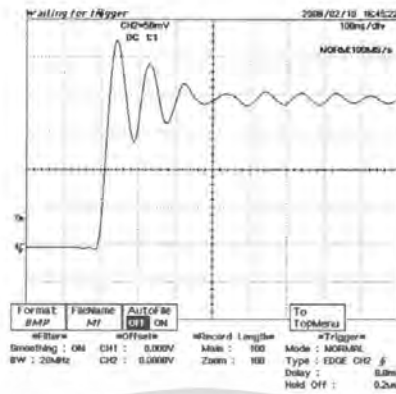
$$T_7 = 0.0975\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 = 65.42\text{ns}$$

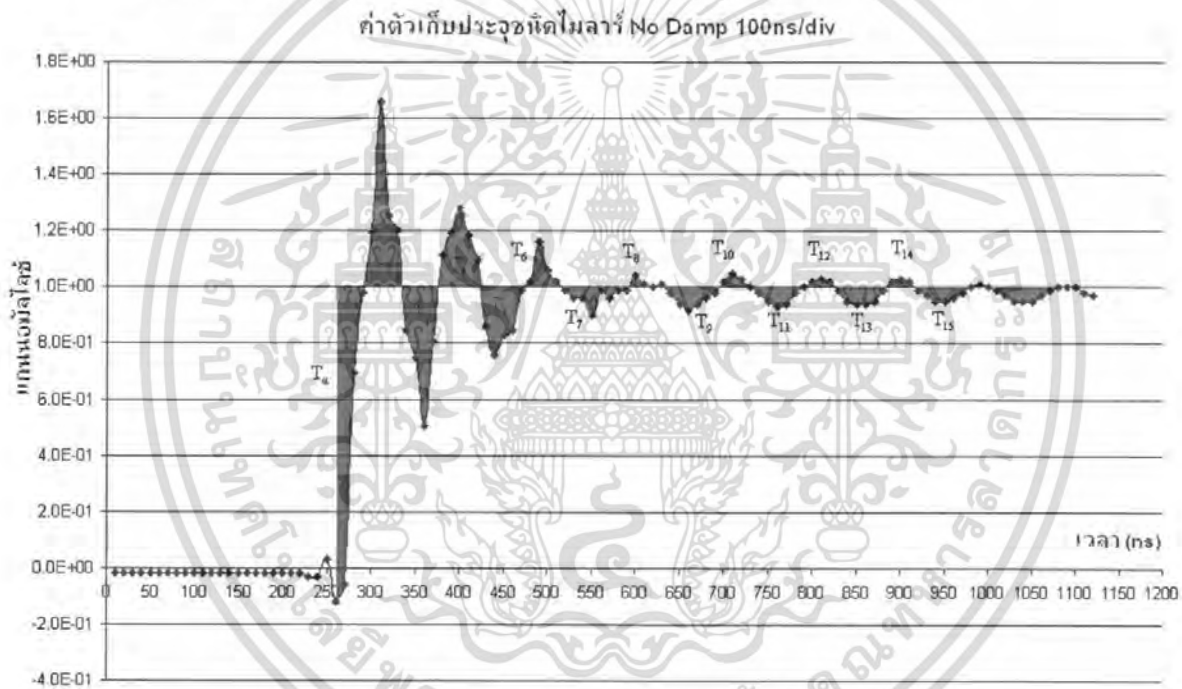
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{57.25\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.048, \beta = 0.03$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด ไมลาร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 ns/div



รูปที่ ก-12 ผลตอบสนองรูปขั้ันนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-13 ผลตอบสนองรูปขั้ันนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 16.8\text{ns}, T_\beta = 14.85\text{ns}, T_\gamma = 9.9\text{ns}, T_4 = 7\text{ns}, T_5 = 5.45\text{ns}, T_6 = 4\text{ns}, T_7 = 2.62\text{ns}$$

$$T_8 = 0.6\text{ns}, T_9 = 3.04\text{ns}, T_{10} = 0.875\text{ns}, T_{11} = 2.13\text{ns}, T_{12} = 0.6\text{ns}, T_{13} = 3.05\text{ns}$$

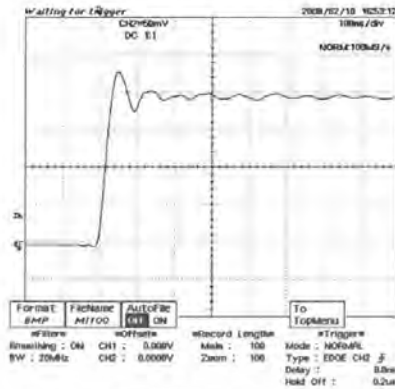
$$T_{14} = 0.6\text{ns}, T_{15} = 1.53\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} = 15.99\text{ns}$$

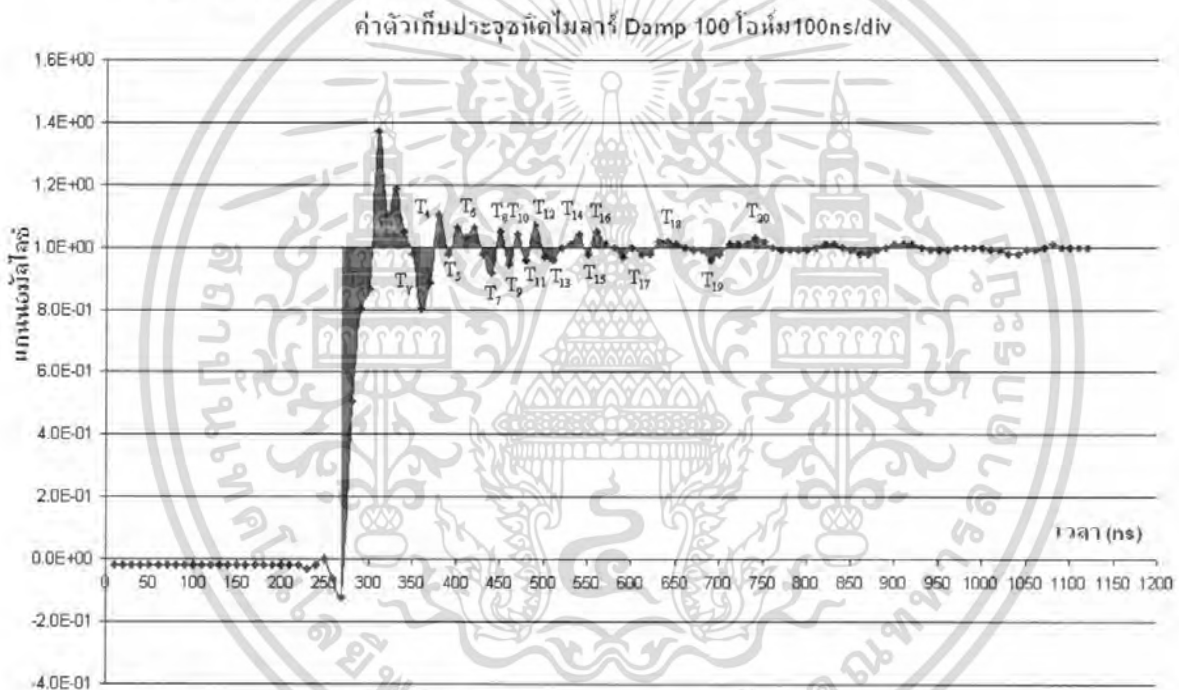
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{16.8\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.014, \beta = 0.66$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด ไมลาร์ ต่อตัวต้านทานห้วง 100 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-14 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน
ห้วง 100 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-15 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเตอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน
ห้วง 100 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 19.6\text{ns}, T_\beta = 8.33\text{ns}, T_\gamma = 2.55\text{ns}, T_4 = 0.75\text{ns}, T_5 = 0.025\text{ns}, T_6 = 1.2\text{ns}$$

$$T_7 = 0.615\text{ns}, T_8 = 0.25\text{ns}, T_9 = 0.26\text{ns}, T_{10} = 0.2\text{ns}, T_{11} = 0.21\text{ns}, T_{12} = 0.438\text{ns}$$

$$T_{13} = 1.38\text{ns}, T_{14} = 0.55\text{ns}, T_{15} = 0.0525\text{ns}, T_{16} = 0.44\text{ns}, T_{17} = 0.728\text{ns}, T_{18} = 0.4\text{ns}$$

$$T_{19} = 1.025\text{ns}, T_{20} = 0.75\text{ns}$$

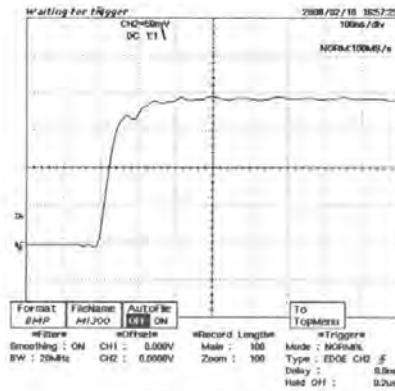
$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15}$$

$$- T_{16} + T_{17} - T_{18} + T_{19} - T_{20} = 13.13\text{ns}$$

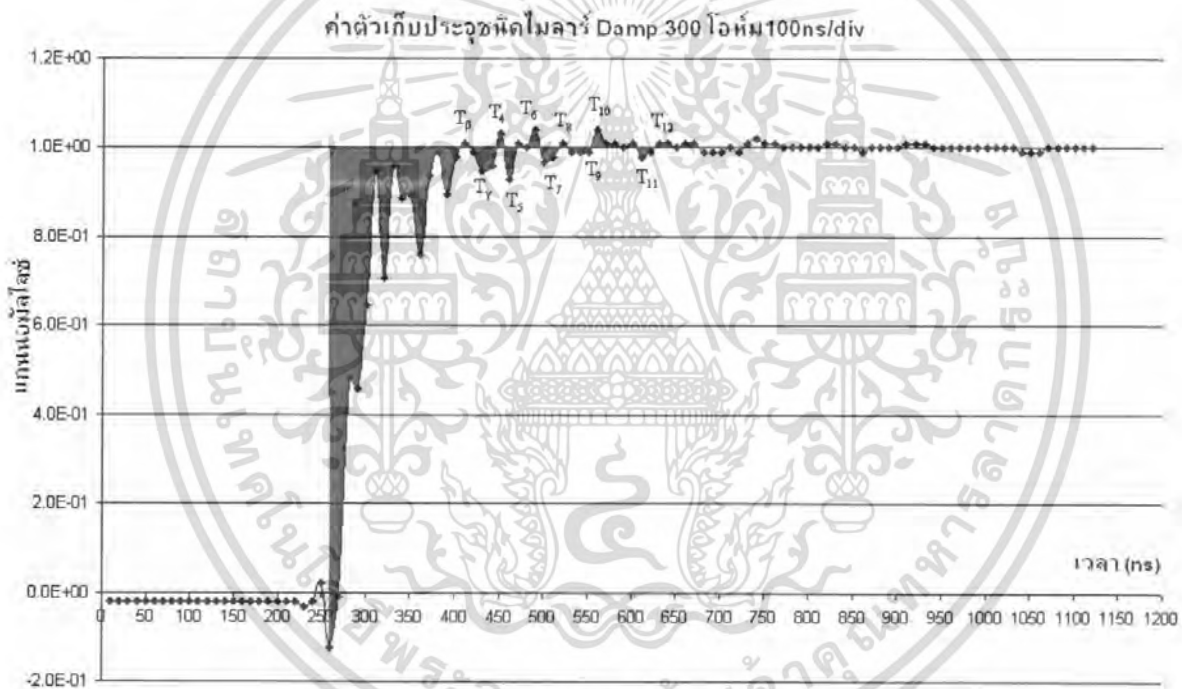
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{19.6\text{ns}}{2 * 10^{-6}} = 0.0163, \beta = 0.37$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด ไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 300 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-16 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 300 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-17 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 300 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 36\text{ns}, T_\beta = 0.75\text{ns}, T_\gamma = 0.65\text{ns}, T_4 = 3.75\text{ns}, T_5 = 0.55\text{ns}, T_6 = 0.25\text{ns}$$

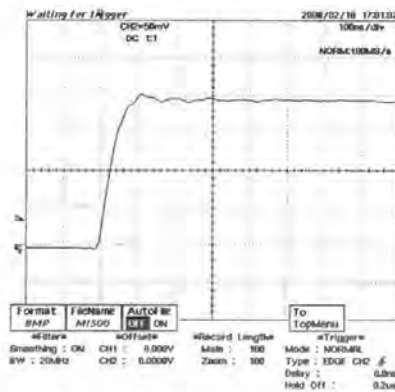
$$T_7 = 0.388\text{ns}, T_8 = 0.05\text{ns}, T_9 = 0.375\text{ns}, T_{10} = 0.5\text{ns}, T_{11} = 0.263\text{ns}, T_{12} = 0.5\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} = 32.42\text{ ns}$$

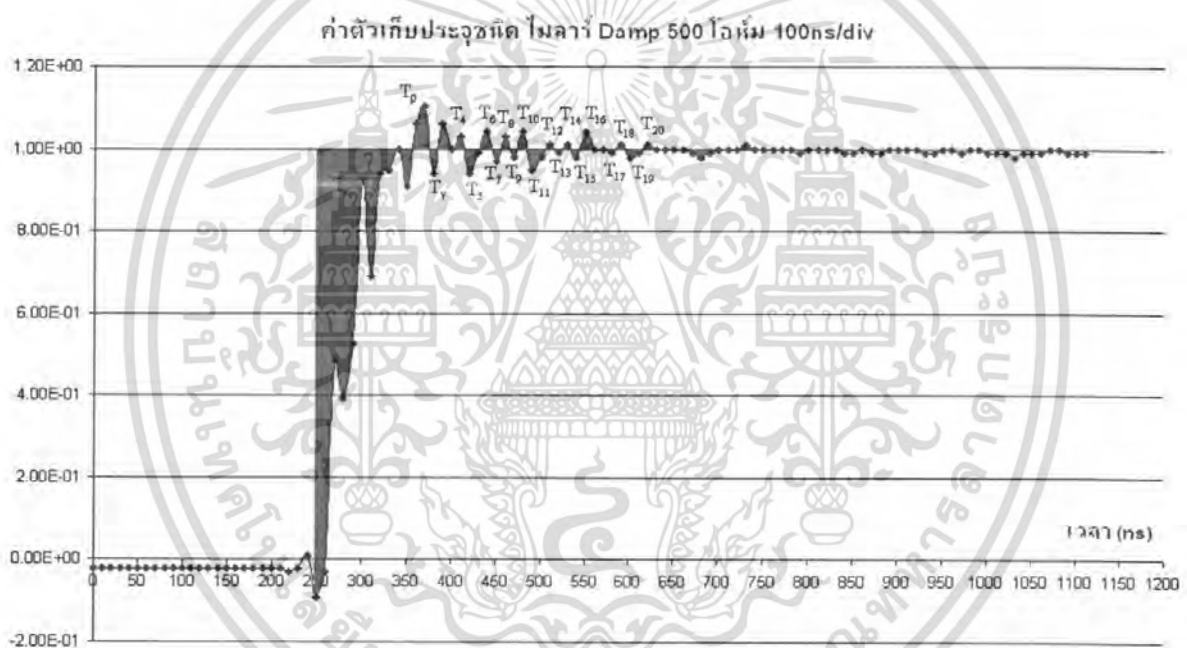
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{36\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.03, \beta = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด ไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-18 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-19 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 40\text{ns}, T_\beta = 1\text{ns}, T_\gamma = 0.31\text{ns}, T_4 = 0.64\text{ns}, T_5 = 0.525\text{ns}, T_6 = 0.3\text{ns}, T_7 = 0.16\text{ns}$$

$$T_8 = 0.15\text{ns}, T_9 = 0.11\text{ns}, T_{10} = 0.2\text{ns}, T_{11} = 0.65\text{ns}, T_{12} = 0.038\text{ns}, T_{13} = 0.1\text{ns}$$

$$T_{14} = 0.05\text{ns}, T_{15} = 0.01\text{ns}, T_{16} = 0.38\text{ns}, T_{17} = 0.13\text{ns}, T_{18} = 0.5\text{ns}, T_{19} = 0.21\text{ns}$$

$$T_{20} = 0.075\text{ns}$$

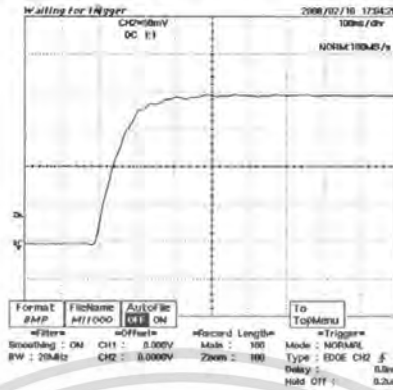
$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15}$$

$$- T_{16} + T_{17} - T_{18} + T_{19} - T_{20} = 39.41\text{ns}$$

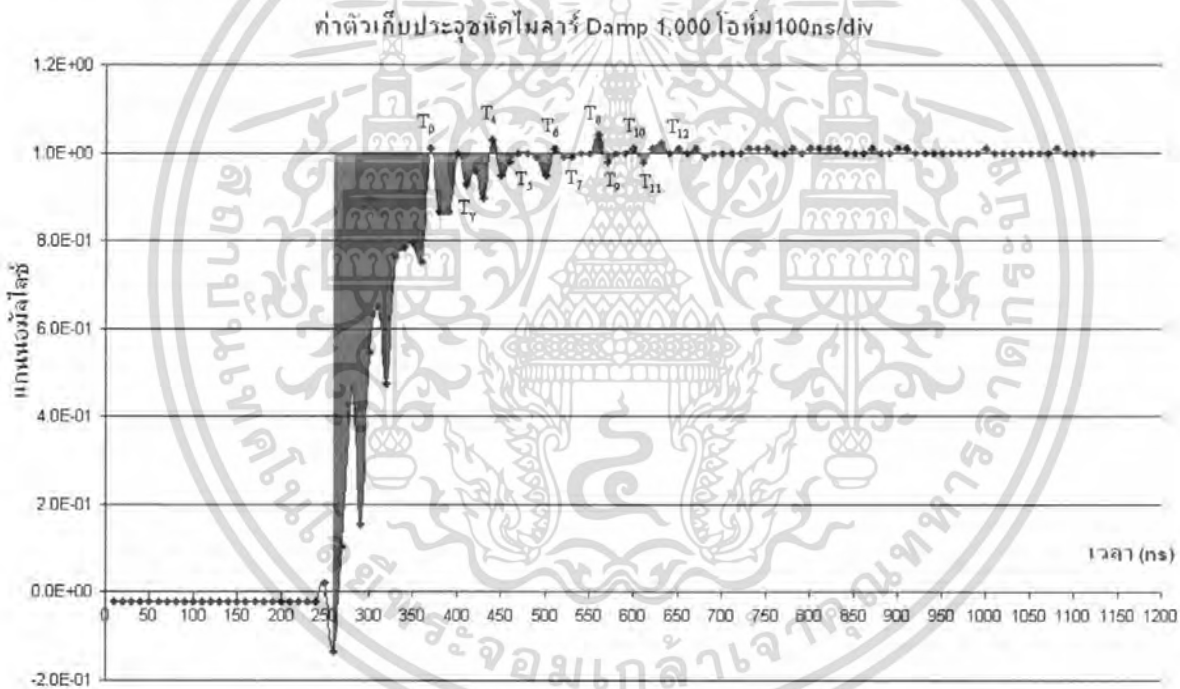
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{40\text{ns}}{1.2 \times 10^{-6}} = 0.033, \beta = 0.1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด ไมลาร์ ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 1,000 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-20 ผลตอบสนองรูปขั้วนอนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 1,000 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-21 ผลตอบสนองรูปขั้วนอนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดไมลาร์ ต่อตัวต้านทาน หนึ่ง 1,000 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 42\text{ns}, T_\beta = 0.005\text{ns}, T_\gamma = 2.76\text{ns}, T_4 = 0.075\text{ns}, T_5 = 1.56\text{ns}, T_6 = 0.025\text{ns}$$

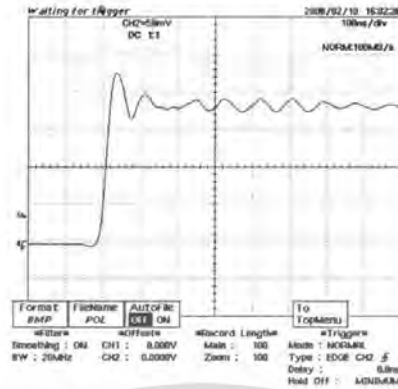
$$T_7 = 0.13\text{ns}, T_8 = 0.5\text{ns}, T_9 = 0.16\text{ns}, T_{10} = 0.13\text{ns}, T_{11} = 0.21\text{ns}, T_{12} = 0.75\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} = 45.33\text{ns}$$

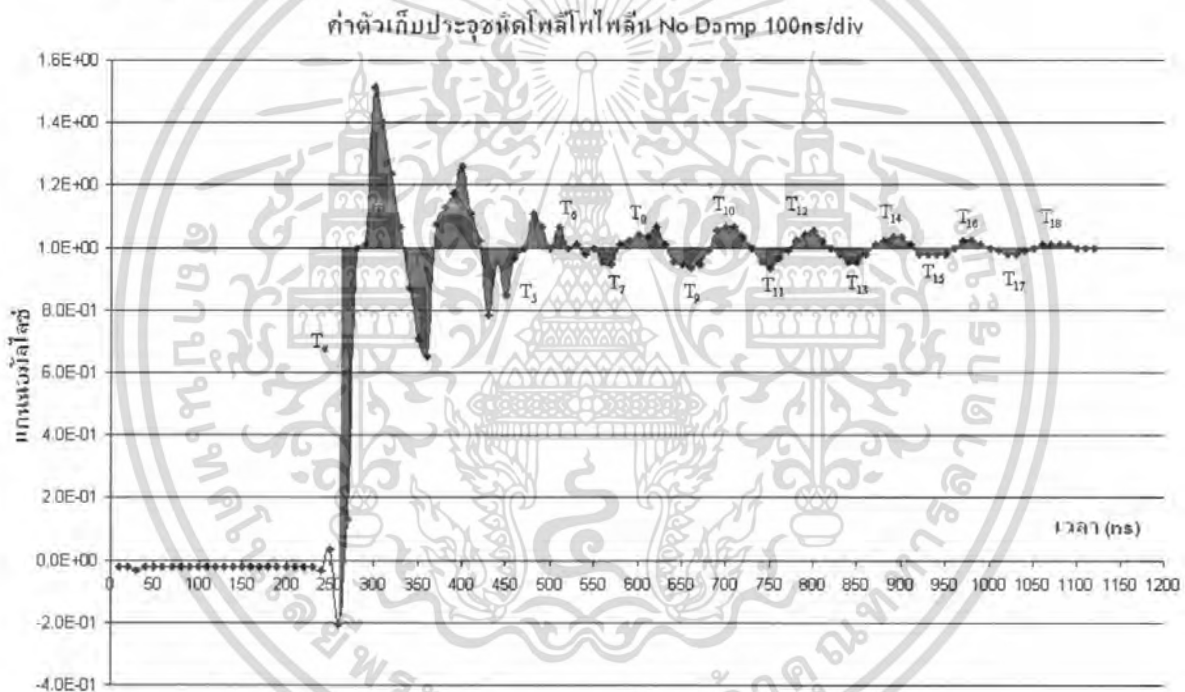
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{45.33\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.035, \beta = 0.04$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพลีเอสเตอร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง 100ns/div



รูปที่ ก-22 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-23 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ไม่ต่อตัวต้านทานหน่วง จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 18\text{ns}, T_\beta = 11.88\text{ns}, T_\gamma = 5.22\text{ns}, T_4 = 6.83\text{ns}, T_5 = 4.45\text{ns}, T_6 = 2.41\text{ns}$$

$$T_7 = 1.03\text{ns}, T_8 = 2\text{ns}, T_9 = 1.63\text{ns}, T_{10} = 1.75\text{ns}, T_{11} = 1.3\text{ns}, T_{12} = 1.25\text{ns}, T_{13} = 0.86\text{ns}$$

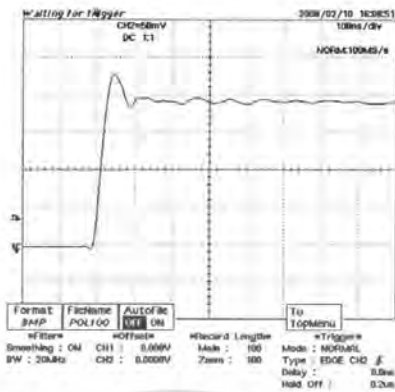
$$T_{14} = 0.75\text{ns}, T_{15} = 1.1\text{ns}, T_{16} = 0.4\text{ns}, T_{17} = 0.55\text{ns}, T_{18} = 0.5\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} - T_{16} + T_{17} - T_{18} = 6.37\text{ns}$$

$$\frac{T_\alpha}{T} = \frac{18\text{ns}}{6.37\text{ns}} = 0.015, \beta = 0.51$$

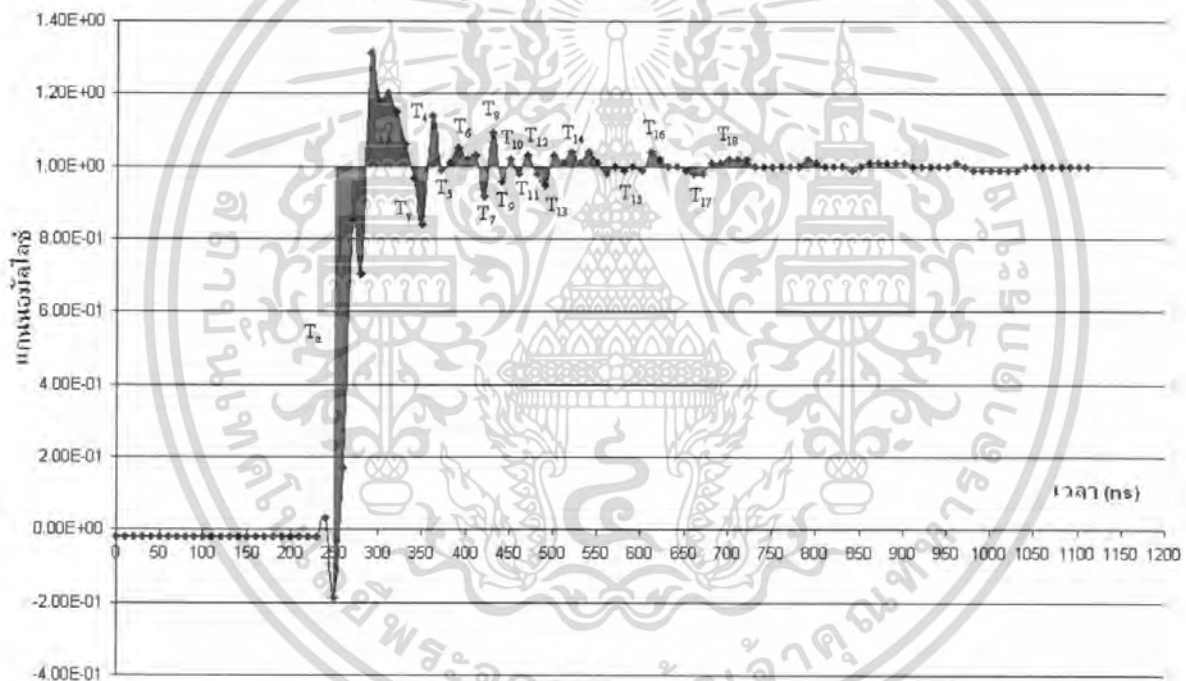
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพลีลีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-24 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีลีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป

ค่าตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีลีน Damp 100 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-25 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีลีน ต่อตัวต้านทานหน่วง 100 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 21.1 \text{ ns}, T_\beta = 7.75 \text{ ns}, T_\gamma = 1.58 \text{ ns}, T_4 = 1.05 \text{ ns}, T_5 = 0.055 \text{ ns}, T_6 = 0.81 \text{ ns}$$

$$T_7 = 0.53 \text{ ns}, T_8 = 0.45 \text{ ns}, T_9 = 0.263 \text{ ns}, T_{10} = 0.1 \text{ ns}, T_{11} = 0.1 \text{ ns}, T_{12} = 0.19 \text{ ns}$$

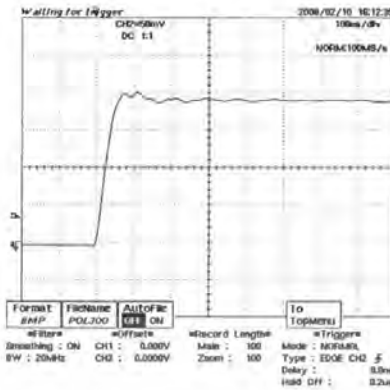
$$T_{13} = 0.464 \text{ ns}, T_{14} = 1.03 \text{ ns}, T_{15} = 0.38 \text{ ns}, T_{16} = 0.6 \text{ ns}, T_{17} = 0.525 \text{ ns}, T_{18} = 1 \text{ ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} - T_{16} + T_{17} - T_{18} = 12.03 \text{ ns}$$

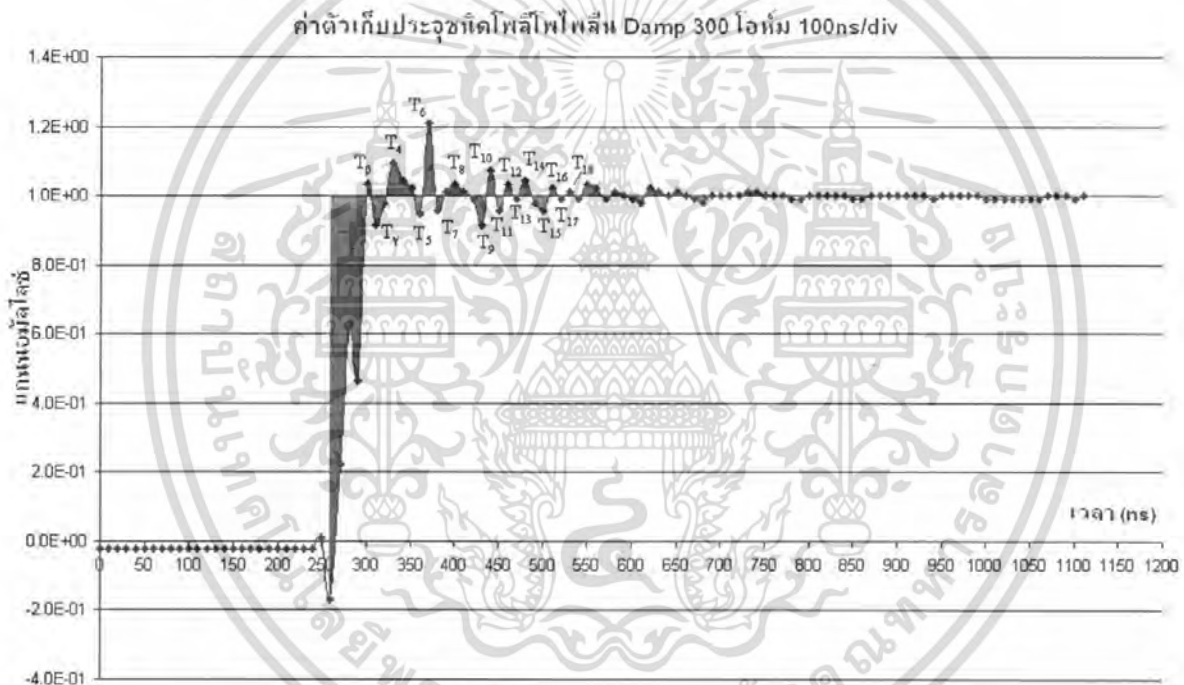
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{21.1 \text{ ns}}{1.2 \cdot 10^{-6}} = 0.0176, \beta = 0.31$$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-26 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-27 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 300 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 23.36\text{ns}, T_\beta = 0.9\text{ns}, T_\gamma = 0.63\text{ns}, T_4 = 1.35\text{ns}, T_5 = 0.4\text{ns}, T_6 = 1.58\text{ns}$$

$$T_7 = 0.26\text{ns}, T_8 = 0.45\text{ns}, T_9 = 0.63\text{ns}, T_{10} = 0.35\text{ns}, T_{11} = 0.21\text{ns}, T_{12} = 0.23\text{ns}$$

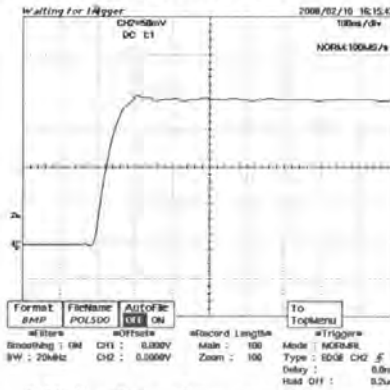
$$T_{13} = 0.03\text{ns}, T_{14} = 0.4\text{ns}, T_{15} = 0.53\text{ns}, T_{16} = 0.15\text{ns}, T_{17} = 0.03\text{ns}, T_{18} = 0.05\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} - T_{16} + T_{17} - T_{18} = 20.62\text{ns}$$

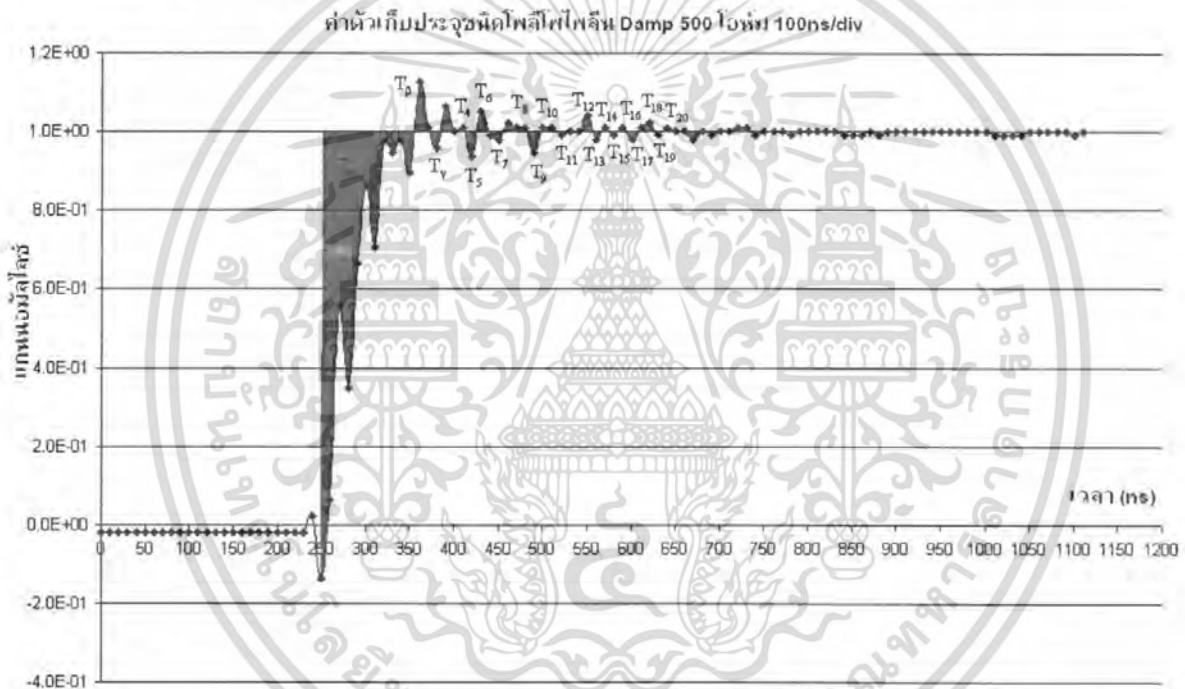
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{23.36\text{ns}}{1.2 * 10^{-6}} = 0.0195, \beta = 0.21$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-28 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์มจากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-29 ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหน่วง 500 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 36.75\text{ns}, T_\beta = 0.98\text{ns}, T_\gamma = 0.32\text{ns}, T_4 = 0.51\text{ns}, T_5 = 0.47\text{ns}, T_6 = 0.38\text{ns}$$

$$T_7 = 0.26\text{ns}, T_8 = 0.38\text{ns}, T_9 = 0.53\text{ns}, T_{10} = 0.25\text{ns}, T_{11} = 0.08\text{ns}, T_{12} = 0.4\text{ns}$$

$$T_{13} = 0.11\text{ns}, T_{14} = 0.05\text{ns}, T_{15} = 0.055\text{ns}, T_{16} = 0.05\text{ns}, T_{17} = 0.11\text{ns}, T_{18} = 0.3\text{ns}$$

$$T_{19} = 0.055\text{ns}, T_{20} = 0.1\text{ns}$$

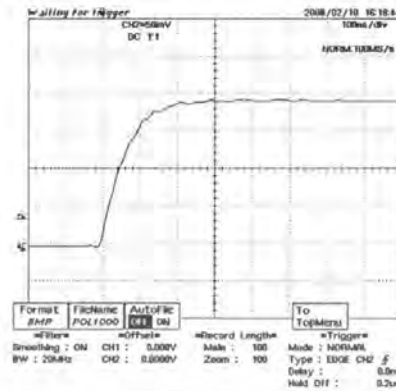
$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15}$$

$$- T_{16} + T_{17} - T_{18} + T_{19} - T_{20} = 35.35\text{ns}$$

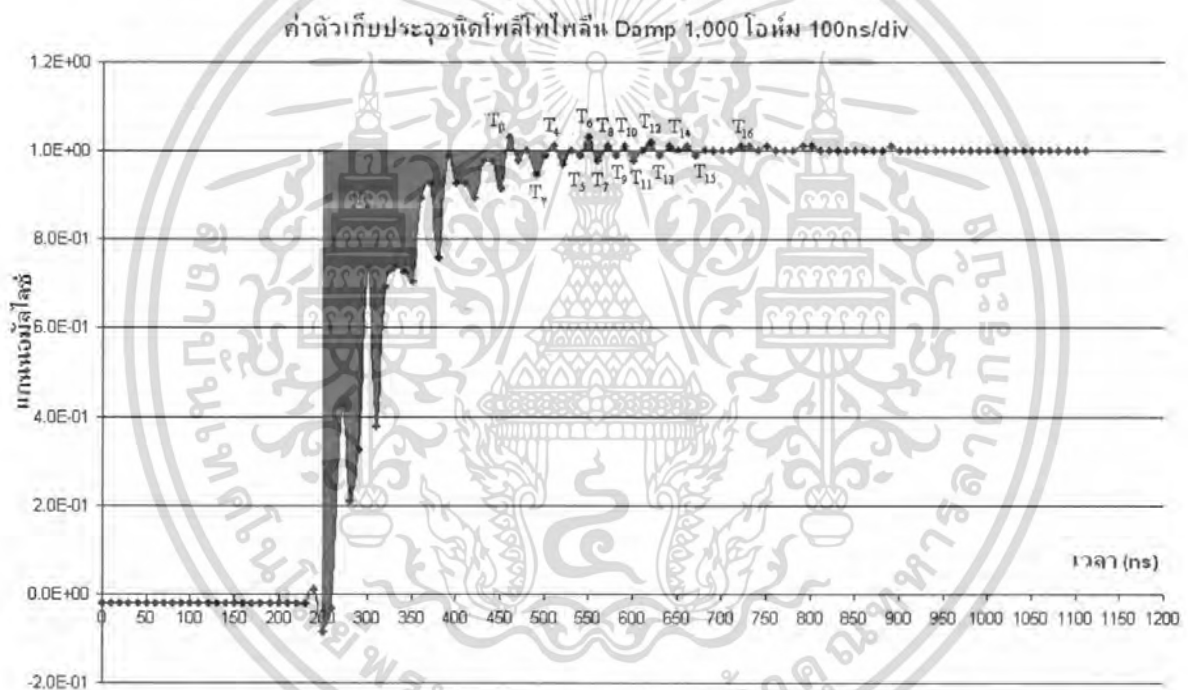
$$\frac{T_\alpha}{T_x} = \frac{36.75\text{ns}}{1.2 \times 10^{-6}} = 0.0306, \beta = 0.13$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 1,000 โอห์ม 100ns/div



รูปที่ ก-30 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 1,000 โอห์ม จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ ก-31 ผลตอบสนองรูปคลื่นนอร์มัลไลซ์ของโวลเตจดีไวเดอร์ ชนิดโพลีโพลีเอสเตอร์ ต่อตัวต้านทานหนึ่ง 1,000 โอห์ม จากโปรแกรม Excel

จากฟังก์ชันนอร์มัลไลซ์สามารถนำมาหาค่าต่อไปนี้ได้

$$T_\alpha = 65.04\text{ns}, T_\beta = 1.5\text{ns}, T_\gamma = 0.69\text{ns}, T_4 = 0.063\text{ns}, T_5 = 3.49\text{ns}, T_6 = 0.26\text{ns}$$

$$T_7 = 0.11\text{ns}, T_8 = 0.05\text{ns}, T_9 = 0.055\text{ns}, T_{10} = 0.05\text{ns}, T_{11} = 0.16\text{ns}, T_{12} = 0.2\text{ns}$$

$$T_{13} = 0.055\text{ns}, T_{14} = 0.15\text{ns}, T_{15} = 0.083\text{ns}, T_{16} = 0.3\text{ns}$$

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_4 + T_5 - T_6 + T_7 - T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} - T_{12} + T_{13} - T_{14} + T_{15} - T_{16} = 67.1\text{ns}$$

$$\frac{T_\alpha}{T} = \frac{65.04\text{ns}}{1.2 \times 10^{-6}} = 0.0542, \beta = 0.03$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือในการวัดภาคแรงดันต่ำ

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติพื้นฐานของมัลติมิเตอร์ FLUK 87 & 89 series IV

Function	Ranges / Dedcription
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 uA to 10 A (20 A for 30 seconds)
Resistance	0 to 30 เมกกะโอห์ม
Conductance	0 to 50 nS
Capacitance	0.01 mF to 50 mF
Temperature	-200 องศา to 1,350 องศา (-325 F to 2,462 F)
Frequency	0.5 HZ to 1000 kHz

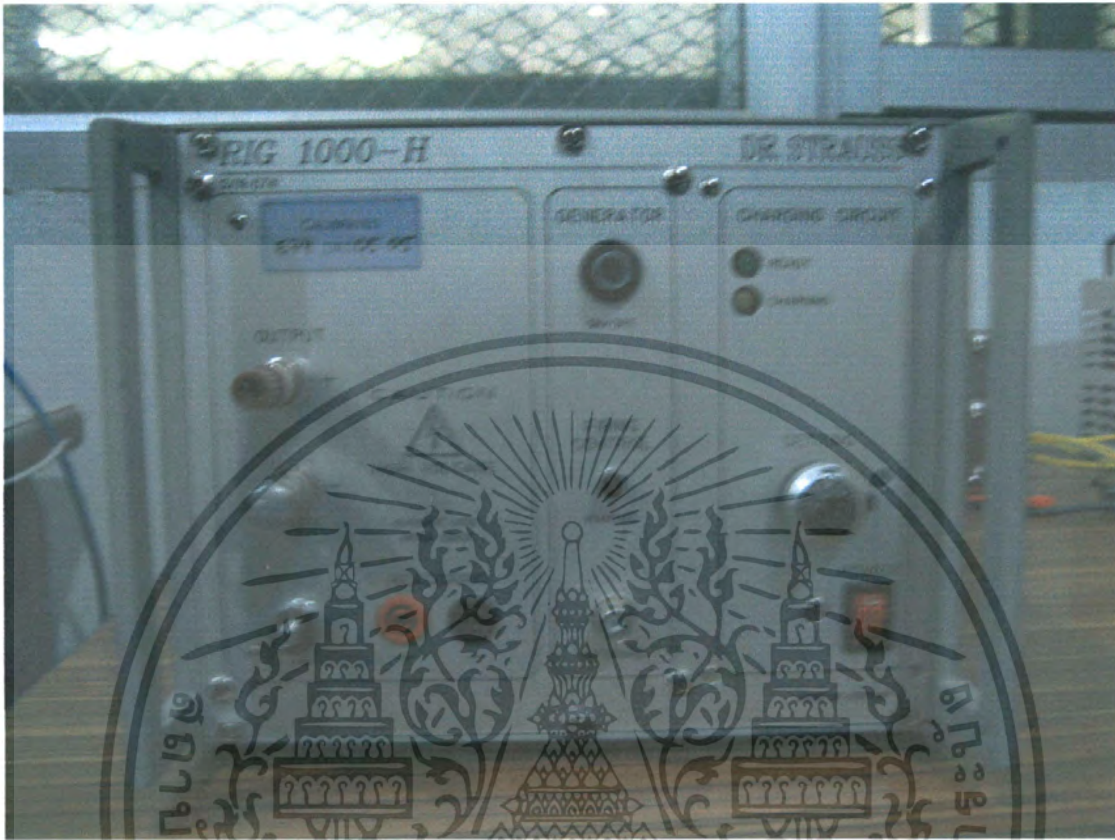
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ตารางแสดงคุณสมบัติของ Oscilloscope DL 1520

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ในป้อนแรงดัน Unit step response

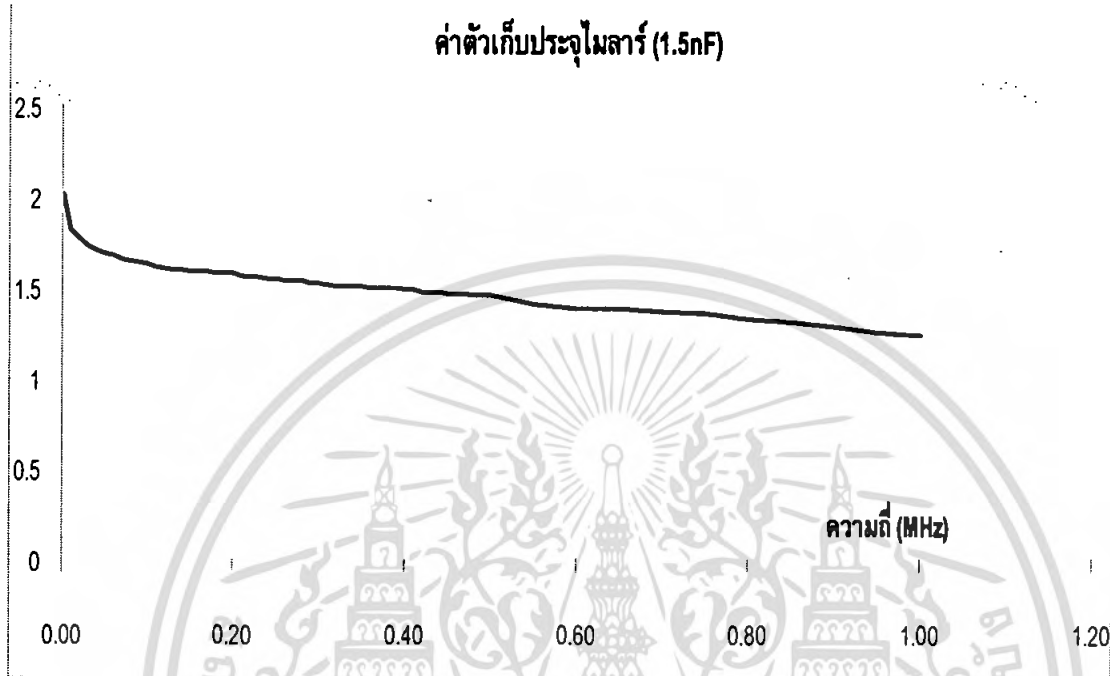


รูปที่ ก-32 เครื่องมือในการป้อนแรงดัน RIG 1000-H

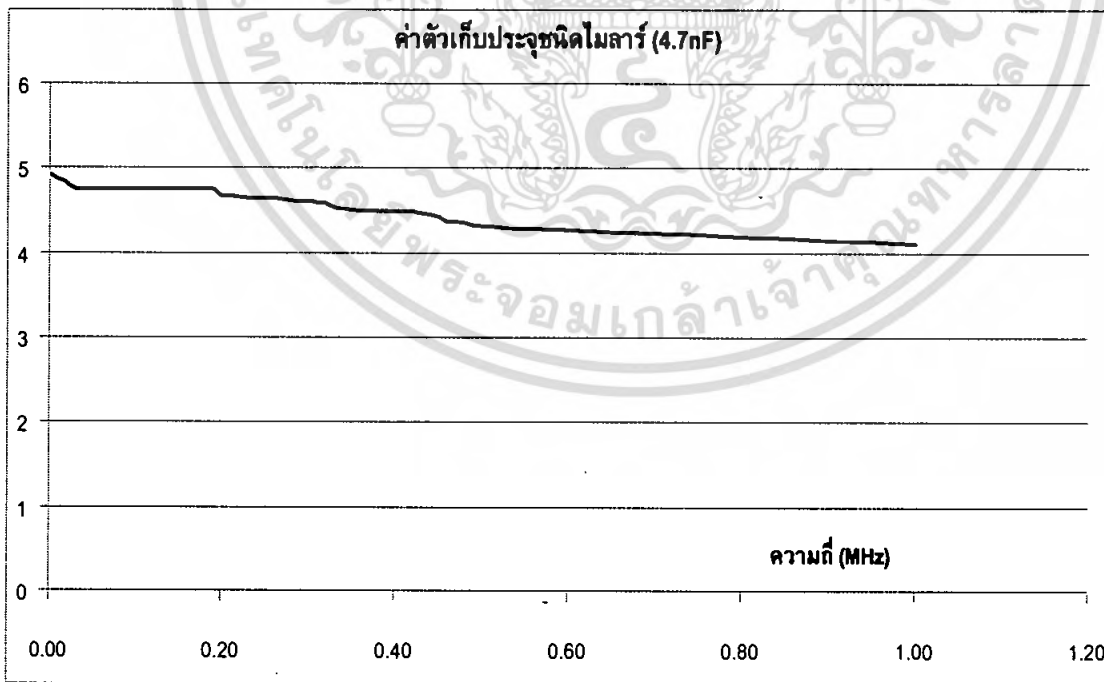
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบด้วย Impedance analyzer

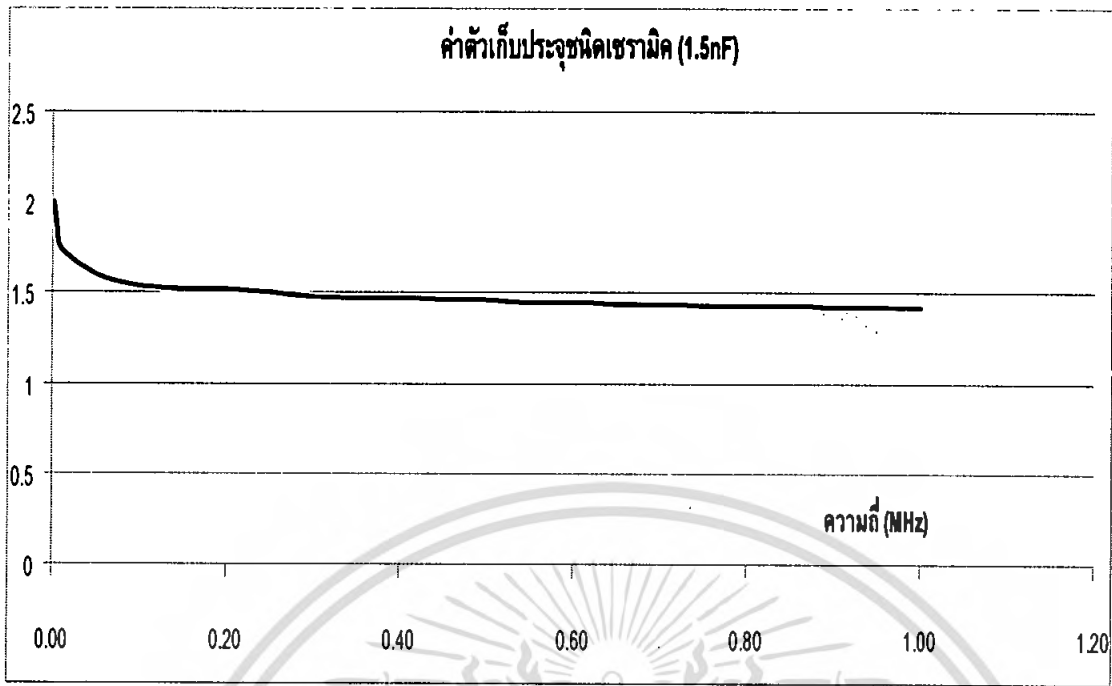


รูปที่ ข-1 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ ขนาด 1.5 nF

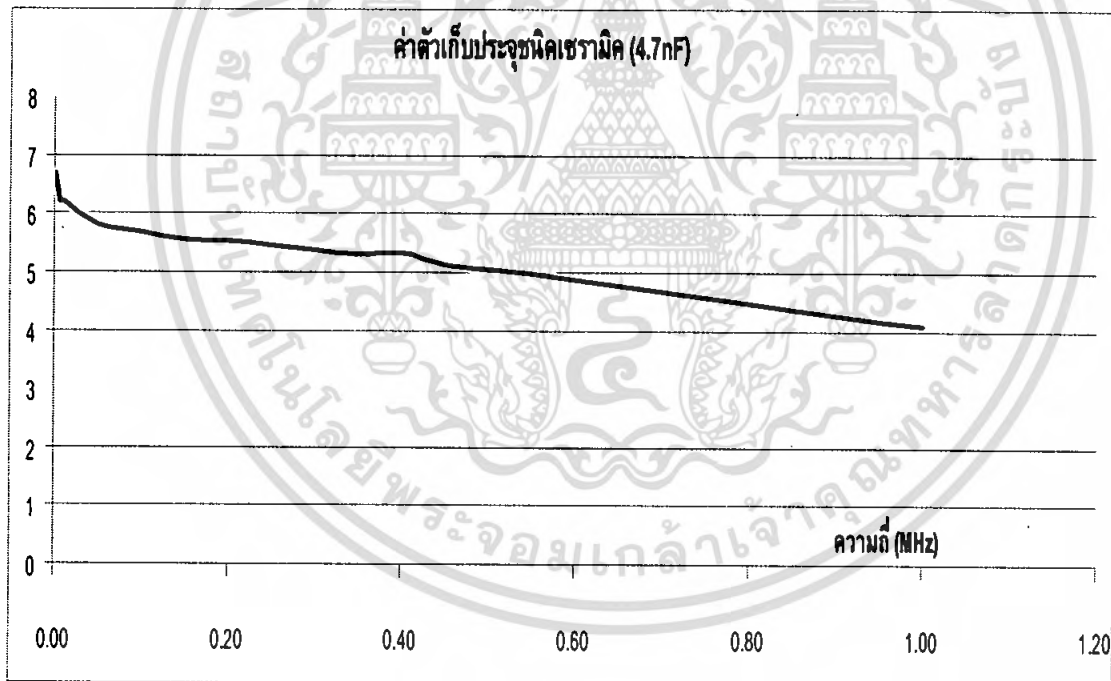


รูปที่ ข-2 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ ขนาด 4.7 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ขนาด 1.5 nF



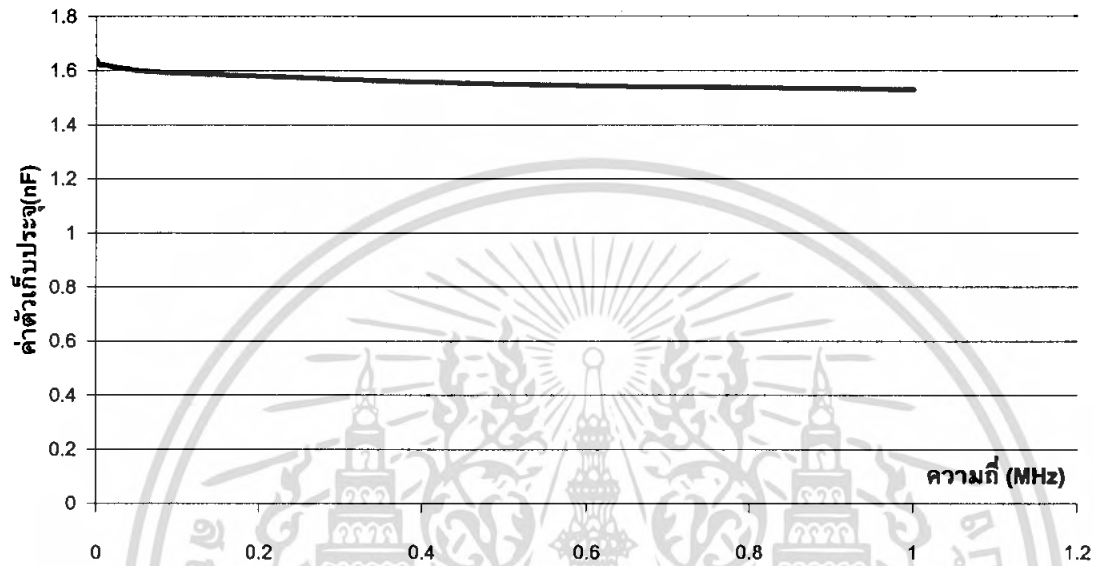
รูปที่ ข-4 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ขนาด 4.7 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

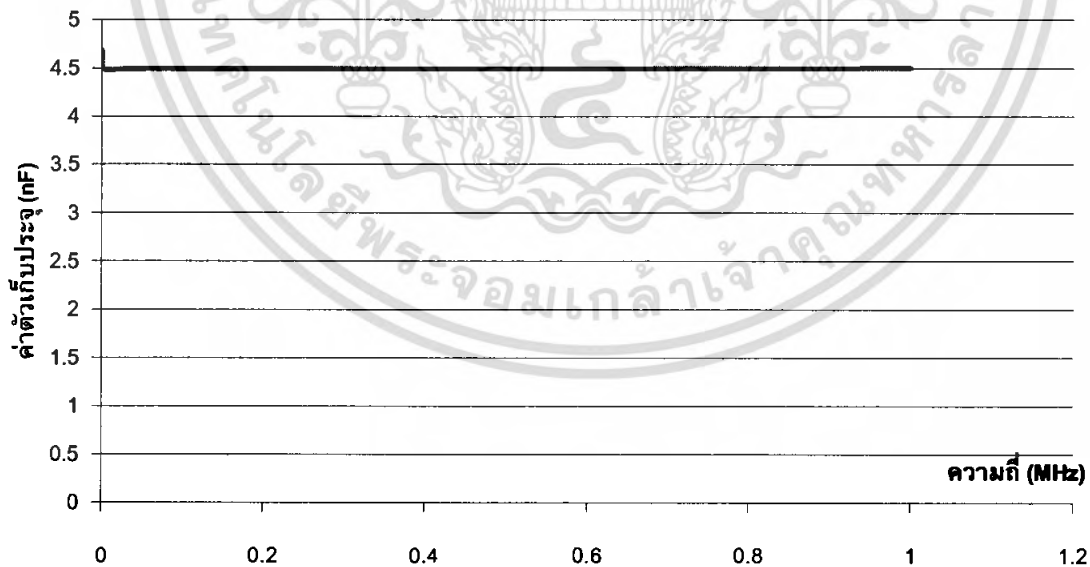
ผลการทดสอบด้วย เครื่อง Discharge Before Connecting

ค่าตัวเก็บประจุโพลีโพลีลีน 1.5 nF



รูปที่ ค-1 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีลีน ขนาด 1.5 nF

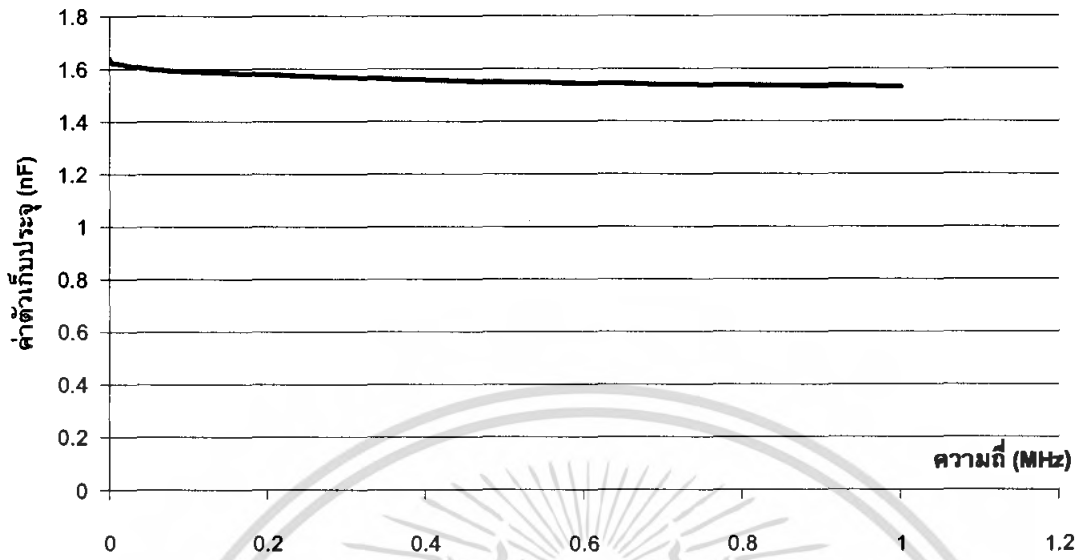
ค่าตัวเก็บประจุชนิด โพลีโพลีลีน 4.7 nF



รูปที่ ค-2 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพลีลีน ขนาด 4.7 nF

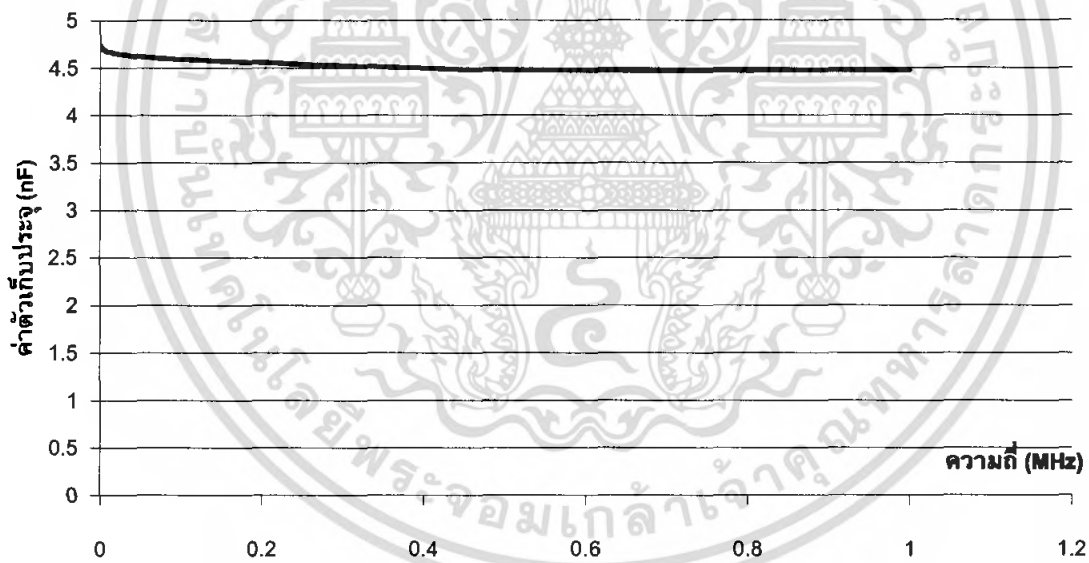
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุ ชนิดไมลาร์ 1.5 nF



รูปที่ ค-3 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ ขนาด 1.5 nF

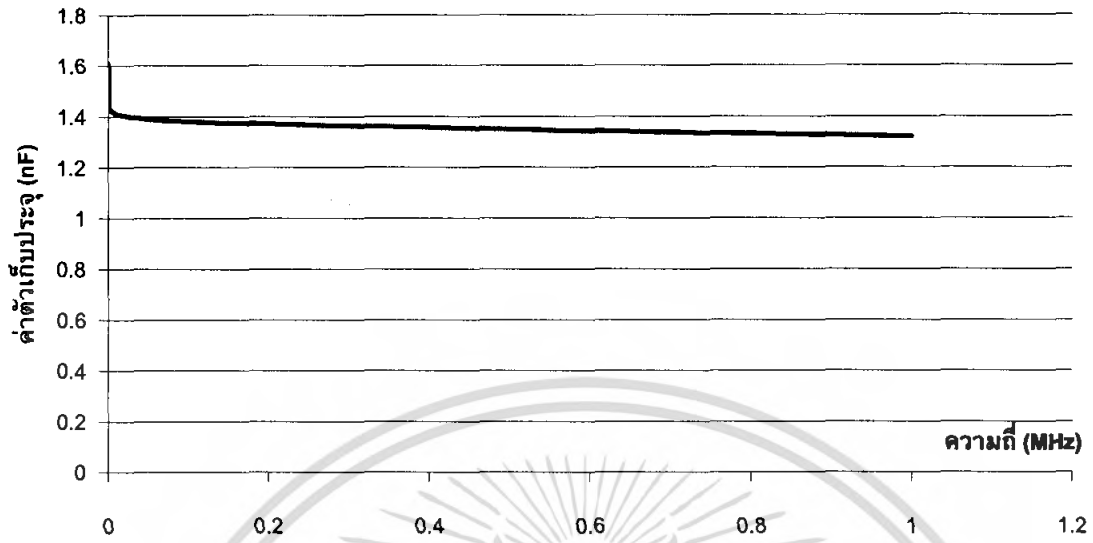
ตัวเก็บประจุ ชนิดไมลาร์ 4.7 nF



รูปที่ ค-4 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ ขนาด 4.7 nF

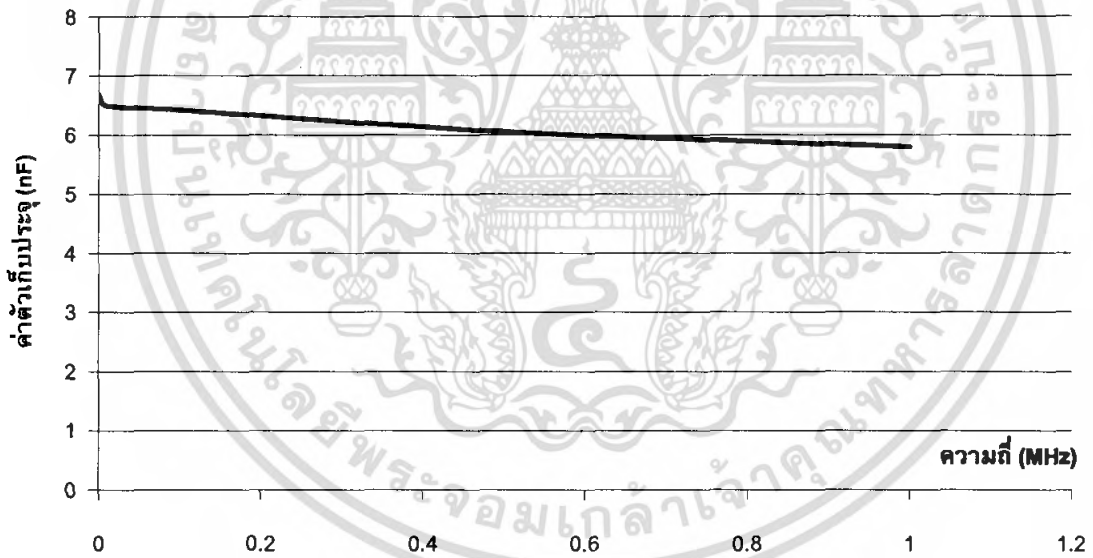
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุ ชนิดเซรามิก 1.5 nF



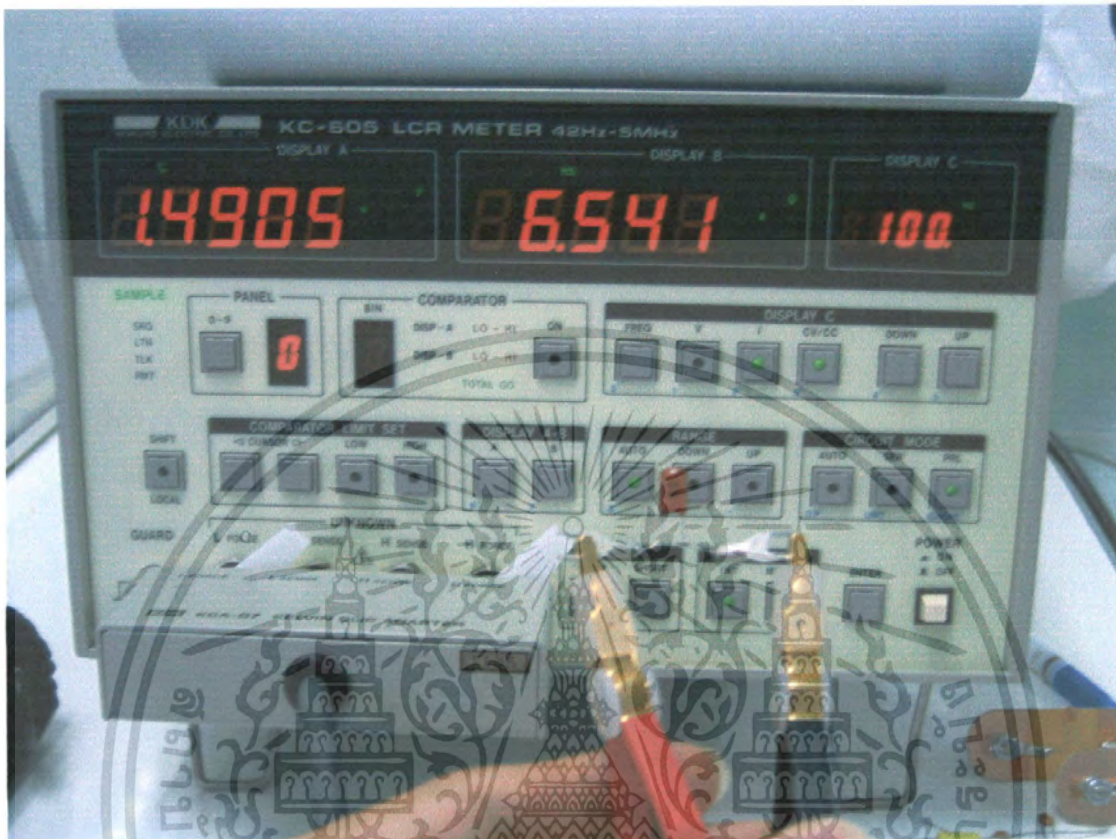
รูปที่ ค-5 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ขนาด 1.5 nF

ตัวเก็บประจุ ชนิดเซรามิก 4.7 nF



รูปที่ ค-6 ผลการทดลองของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก ขนาด 4.7 nF

อุปกรณ์ในการวัด



รูปที่ ค-7 เครื่องมือวัดค่าตัวเก็บประจุ KC-605 LCR METER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ประวัติโดยย่อของผู้แต่ง



1. นายชัยรัตน์ จีระชัยมงคล เกิดวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2527 ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนเปรมฤดีศึกษา กรุงเทพมหานคร
 จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนวัดสุทธิวราราม กรุงเทพมหานคร
 จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดสุทธิวราราม กรุงเทพมหานคร



2. นายชาญณรงค์ วินยางค์กุล เกิดวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2529 ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลอุตรดิตถ์ จ.อุตรดิตถ์
 จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนอุตรดิตถ์ จ.อุตรดิตถ์
 จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอุตรดิตถ์ จ.อุตรดิตถ์



3. นายจิติพันธ์ นันทะแสน เกิดวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2528 ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนหนองโก จ.ขอนแก่น
 จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนศรีกระนวนวิทยาคม จ.ขอนแก่น
 จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนศรีกระนวนวิทยาคม จ.ขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้