

โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะประจำปี 2551

อุปกรณ์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง กระแสสลับ
และอิมพัลส์

เสนอ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

โดย

รศ.ประภาช ไพโรสุวรรณ	หัวหน้าโครงการ
นายนรเศรษฐ พัฒนเดช	นักวิจัย
นายพีรวุฒิ ยุทธโกวิท	นักวิจัย
นายอภิชาติ นิมเทียบ	ผู้ช่วยนักวิจัย
นายเกริก แซ่เลื่อง	ผู้ช่วยนักวิจัย
นายกীরดีวุฒิ วิสิทธิ์ศิลป์	ผู้ช่วยนักวิจัย
นายปยุตวิริ์ ทองเขียว	ผู้ช่วยนักวิจัย
นายพรศักดิ์ สงวน	ผู้ช่วยนักวิจัย
นายศุภวัฒน์ กลั่นเรืองแสง	ผู้ช่วยนักวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

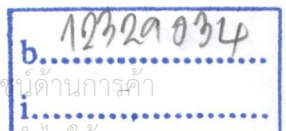
สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	I
สารบัญรูปภาพ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลท์เตจดีไวเซอร์	4
2.1 บทนำ	4
2.2 แบบต่างๆ ของโวลท์เตจดีไวเซอร์	5
2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เตจดีไวเซอร์	6
2.3.1 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด	6
2.3.1.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น	6
2.3.1.2 สเกลแฟกเตอร์	11
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างโวลท์เตจดีไวเซอร์	13
3.1 คุณลักษณะของโวลท์เตจดีไวเซอร์	13
3.2 การออกแบบโวลท์เตจดีไวเซอร์แบบผสม	13
3.2.1 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง	14
3.2.1.1 ไฟวบบตามผิวฉนวน	14
3.2.1.2 ความจุสเตรลงดิน	14
3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	15
3.2.1.4 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด	15
3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูง	17
3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย	17
3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูง	17
3.2.1.8 การต่ออุปกรณ์ภายในโวลท์เตจดีไวเซอร์	18
3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ	19
3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก	20

เลขหมู่..... ป345ด

เลขทะเบียน..... 116870

วันที่เดือนปี..... 16 ส.ค. 2554



สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	20
3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	20
3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์	21
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล	26
4.1 บทนำ	26
4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ	26
4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	26
4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	27
4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ	27
4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง	27
4.3.1.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง DC	27
4.3.1.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง Impulse	28
4.3.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ	28
4.3.2.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ DC	28
4.3.2.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ Impulse	28
4.4 การหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	29
4.5 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์	33
4.5.1 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	33
4.5.2 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	35
4.5.3 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	37
4.6 การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)	40
4.7 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test)	43
4.7.1 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	43
4.7.2 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	44
4.7.3 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบวัดแรงดันสูงอิมพัลส์	44
4.8 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (AC Withstand Test)	46
4.9 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสตรง (DC Withstand Test)	47
4.10 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Test)	48
4.11 การวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ (Comparative)	50

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	53
5.1 สรุป	53
5.2 กิตติกรรมประกาศ	53
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 71-1	1
1.2 วิธีการดำเนินงานโครงการวิจัย	2
3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง	13
3.2 ตารางเปรียบเทียบแรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1	16
4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	26
4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ	27
4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูง DC	28
4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูง Impulse	28
4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ DC	28
4.6 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ Impulse	28
4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วงภายนอก	30
4.8 อัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ	33
4.9 อัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันกระแสตรง ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ	36
4.10 ค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกที่ระดับแรงดันต่าง ๆ	39
4.11 ค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบที่ระดับแรงดันต่าง ๆ	40
4.12 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	41
4.13 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	41
4.14 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (ชั่ววอก)	42
4.15 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (ชั่วลบ)	42
4.16 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ(Stability) ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ ระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ	43
4.17 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ(Stability) ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ ระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง	44
4.18 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ(Stability) ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ ที่ระดับแรงดันทดสอบต่าง ๆ โดยใช้รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s	45
4.19 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.20 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดตรง	48
4.21 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (ชั้วบวก)	49
4.22 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (ชั้วลบ)	49
4.23 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า มาตรฐานรูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μ s ชั้วบวก	50
4.24 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า มาตรฐานรูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μ s ชั้วลบ	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรสมมูลโวลต์เตจดีไวเตอร์	4
2.2	วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	5
2.3	โครงข่ายวงจร 4 ชั้นที่เขียนแทนระบบวัด	6
2.4	วงจรวัดผลตอบสนองของรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน	8
2.5	นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	10
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x	10
2.7	ผลตอบสนองของรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T	11
3.1	ตัวเก็บประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอก	14
3.2	วงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง	16
3.3	วงจรสมมูลย์	19
3.4	การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยแต่ละชั้น	19
3.5	ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ	21
3.6	แผ่นอะคลิลิกใสสำหรับเป็นตัวจับยึดตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน	21
3.7	ท่ออะคลิลิกใส	22
3.8	การต่ออุปกรณ์ภาคแรงสูง	22
3.9	โวลต์เตจดีไวเตอร์ที่สมบูรณ์	23
3.10	โครงสร้างการวิเคราะห์อิลีกโทรด	24
3.11	ลักษณะของอิลีกโทรดพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมและสนามไฟฟ้า	24
3.12	ลักษณะของอิลีกโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมและสนามไฟฟ้า	24
3.13	ผลการจำลองอิลีกโทรดที่ระยะรัศมี $X = 13$ cm โค้งขอบด้านบน (R_1) = 1 cm โค้งขอบด้านล่าง (R_2) = 2 cm	25
4.1	วงจรหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	29
4.2	วงจรทดสอบหาผลตอบสนองของรูปขึ้น	29
4.3	ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเตอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_p) เท่ากับ 100 Ω	30
4.4	ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเตอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_p) เท่ากับ 150 Ω	30
4.5	ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเตอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_p) เท่ากับ 200 Ω	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 300 Ω	31
4.7 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 400 Ω	31
4.8 ออสซิลโลกราฟแสดงผลตอบสนองของรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์	32
4.9 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของรูปคลื่นโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	32
4.10 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	33
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	35
4.12 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	35
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	37
4.14 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	38
4.15 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	38
4.16 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ	41
4.17 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง	42
4.18 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่าง ๆ ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์	43
4.19 ออสซิลโลกราฟผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่นเต็มแบบ 1.2/50 μs ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110 kV (ชั่วคราว)	46
4.20 ออสซิลโลกราฟผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ ต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่นเต็มแบบ 1.2/50 μs ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110 kV (ชั่วลบ)	46
4.21 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ	47
4.22 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสตรง	48
4.23 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์	49
4.24 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μs ชั่วบวก	51
4.25 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μs ชั่วลบ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานการศึกษาหรือการทดสอบทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้นในบางกรณีจำเป็นต้องนำเอาสัญญาณไฟฟ้ามาร่วมใช้ในการวิเคราะห์ โดยวิธีการในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะต้องทำการลดทอนขนาดของแรงดันให้มีค่าลดลงจนสามารถใช้กับเครื่องมือวัดและผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัย โดยในโครงการวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงซึ่งจะทำการลดทอนแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุต่อกับตัวต้านทานเพื่อใช้สำหรับการวัด

ประโยชน์ที่ได้เพื่อเป็นการพัฒนาบุคลากรและทักษะในการสร้างเครื่องมือใช้เอง ทำให้ประหยัดงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ ซึ่งสามารถใช้งานทดแทนอุปกรณ์ที่มีขายสำเร็จรูปในท้องตลาดซึ่งมีราคาประมาณ 500,000 บาท อีกทั้งยังสามารถพัฒนาศักยภาพต่อไปในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC 71-1 [1]

Insulation voltage U_m (kV)	3.6	7.2	12	17.5	24	36	52	72.5
Rated alternating Withstand Voltage (kV)	10	20	28	38	50	70	95	140
Rated lighting withstand voltage (kV)	40	60	75	95	125	170	250	325

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสำหรับวัดด้วยตัวเก็บประจุต่อกับตัวต้านทาน
2. เพื่อส่งเสริมให้เกิดงานวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อรองรับงานการทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการออกแบบและสร้างโวลท์เทจดีไวเดอร์แบบผสม ที่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดสูงสุด 100 kV แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัด 100 kV และสามารถวัดแรงดันอิมพัลส์ที่พิกัดสูงสุด 100 kV

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
4. ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง
5. วิเคราะห์และปรับปรุงอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้มาตรฐานและข้อกำหนด
6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.2 วิธีการดำเนินงานโครงการวิจัย

วิธีการดำเนินงาน	พ.ศ. 2551						
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง	↔						
2. ศึกษามาตรฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง	↔						
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง	↔						
4. ทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง			↔				
5. วิเคราะห์และปรับปรุงอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้มาตรฐานและข้อกำหนด					↔		
6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์						↔	

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ตามมาตรฐานและข้อกำหนด
2. สามารถนำอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่สร้างขึ้นไปใช้ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างกว้างขวาง
3. สามารถรองรับการทดสอบและวิจัยทางไฟฟ้าแรงสูงเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์ในประเทศไทย มีหลายงานวิจัยแต่ส่วนมากจะเป็นงานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยที่จะเป็นงานวิจัยโวลต์เตจดีไวเดอร์แบบผสม ที่สามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์

1. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณ วรา จูห้อง ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
2. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงสูงแบบตัวต้านทานขนาด 100 kV วิทยานิพนธ์ของคุณอาทร ภาษี และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2547.
3. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้าวงขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณอรณพ ลิ้มสีมารัตน์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
4. การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 kV วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
5. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 400 kV แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตของคุณไพศาล จิรานันต์รัตน์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
6. โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 300 kV ของคุณปริญญา ชมลิ้ม, คุณพีรวิทย์ ยุทธโกวิท, คุณนเรศเรษฐ พัฒนเดช และการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.
7. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสมขนาด 300 kV วิทยานิพนธ์ของคุณสุชาติ มณฑปใหญ่ และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
8. โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมราคาประหยัดสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ขนาด 100 kV ของคุณรัชกร ปานทองทอง, คุณศรารุณี กลีสุวรรณ และคุณธีรธรรม บุญยะกุล การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29.
9. โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูงแรงดันกระแสสลับ, แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ของคุณไชยพร หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

บทที่ 2

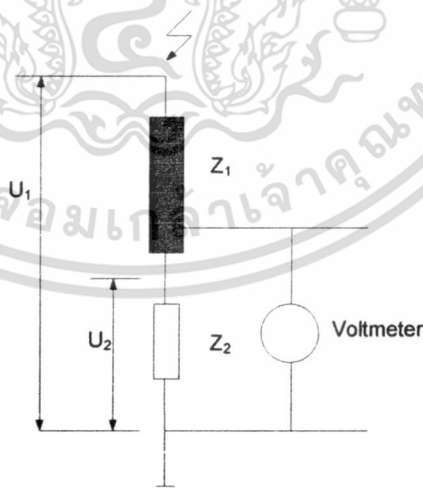
ทฤษฎีการวัดแรงดันสูงด้วยโวลต์เตจติไวเดอร์

2.1 บทนำ

การวัดแรงดันสูงนอกจากกระยะระหว่างผู้วัดและอุปกรณ์วัดที่ปลอดภัยโดยอาศัยหลักการ ฉนวนที่ถูกต้องแล้ว การวัดแรงดันสูงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ โดยอาศัยอุปกรณ์และ เครื่องวัดช่วย ลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญได้แก่ ความถูกต้อง ความเที่ยงตรง ความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด ความเชื่อถือได้ ชัดความสามารถของเครื่องวัด ความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัด แรงดันอิมพัลส์

เทคนิคการวัดแรงดันสูง [3] ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันอิมพัลส์นี้มักจะหมายถึง แรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลอง ส่วนแรงดันกระแสสลับและแรงดันกระแสตรง นั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และในระบบส่งจ่ายจำหน่าย

โวลต์เตจติไวเดอร์ที่ใช้ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์สอง ชุดต่ออนุกรมกันอยู่คือ ภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) ของโวลต์เตจติไวเดอร์นั้นจะรับแรงดันแทบทั้งหมดตกคร่อมตัวมัน อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) จะเป็นส่วนแรงดันตกคร่อมเข้าเครื่องวัด ปกติปลายด้านบนของโวลต์เตจติไวเดอร์เป็นขั้วต่อแรงดันสูง ส่วนปลายด้านล่างของโวลต์เตจติไวเดอร์เป็นศักย์ดิน ตัวประกอบวงจรทั้งสองภาคของโวลต์เตจติไวเดอร์นั้นอาจเป็นตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ หรือใช้ร่วมกันทั้งสองอย่าง โวลต์เตจติไวเดอร์ จะได้ชื่อตามตัวประกอบวงจรและลักษณะการจัดวางตัวประกอบ วงจรเหล่านั้น คือ โวลต์เตจติไวเดอร์แบบความต้านทาน แบบตัวเก็บประจุ และแบบผสมตามลำดับ [4]



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลโวลต์เตจติไวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

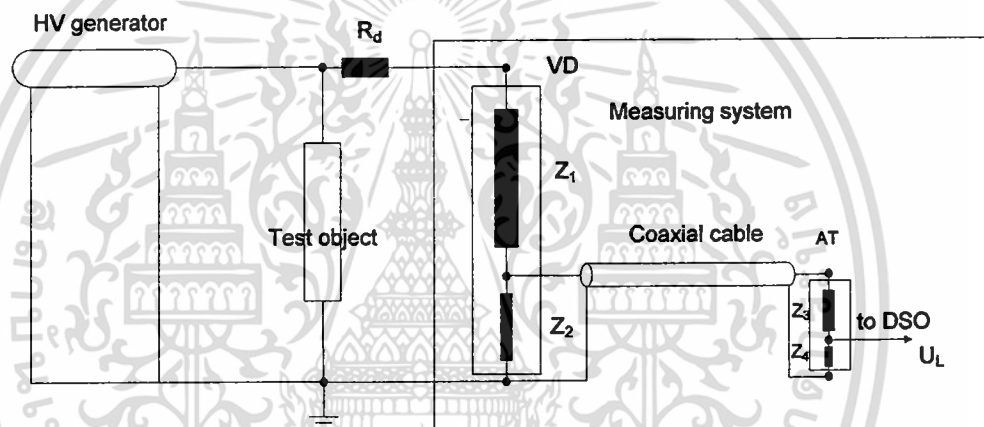
2.2 แบบต่าง ๆ ของโวลต์เตจติไวเตอร์ [4-5]

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แรงดันกระแสสลับ
2. แรงดันกระแสตรง
3. แรงดันอิมพัลส์

ซึ่งการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลต์เตจติไวเตอร์ [3] เป็นการวัดที่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นอุปกรณ์วัดด้านแรงดันต่ำ

โดยทั่วไปการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบโวลต์เตจติไวเตอร์ จะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ สายนำแรงสูง ตัววัดไวเตอร์ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) สูงประมาณ 2.5 เมตร/เมกกะโวลต์ เคเบิลวัดแบบแกนร่วม (Coaxial cable) และออสซิลโลสโคป ดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

- R_d คือ ความต้านทานหน่วงสายนำไฟฟ้าแรงดันสูง
 VD คือ โวลต์เตจติไวเตอร์
 AT คือ ตัวลดทอนแรงดัน (Attenuator)

โวลต์เตจติไวเตอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิดสามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้ดังนี้

- (ก) แบบความต้านทาน (Resistor voltage divider)
- (ข) แบบความต้านทานมีชีลด์ (Shielded resistor voltage divider)
- (ค) แบบตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor voltage divider)
- (ง) แบบผสม (Universal voltage divider)
- (จ) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitor voltage divider)

2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของโวลท์เตจดีไวเซอร์

โวลท์เตจดีไวเซอร์จะประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน ซึ่งเราจะเรียกชื่อของโวลท์เตจดีไวเซอร์แต่ละชนิด ตามลักษณะการต่ออุปกรณ์ภายในโวลท์เตจดีไวเซอร์ ภายในอิมพีแดนซ์ ซึ่งการสร้างโวลท์เตจดีไวเซอร์จำเป็นต้องทราบรายละเอียดและคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างโวลท์เตจดีไวเซอร์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ การฉนวน เป็นต้น

2.3.1 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

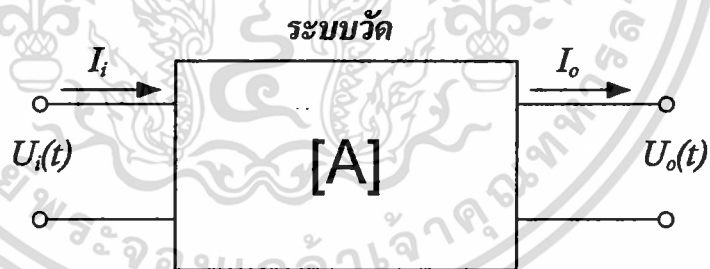
เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ

- 1) ผลตอบสนองรูปขึ้น
- 2) สเกลแฟกเตอร์

2.3.1.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (Transfer characteristic) ของโวลท์เตจดีไวเซอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดียิ่งขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงค่าจำกัดความหรือ ความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลท์เตจดีไวเซอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยระบบโครงข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)

ในกรณีที่ $I_0 = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (2.2)$$

ค่า $H(s)$ จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ที่ความถี่ต่ำๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่า ความถี่จำกัด (limit frequency) [6] ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (Normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (2.3)$$

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

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} H(s) \right] \quad (2.4)$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกเมื่อ ทราบแรงดันขาเข้า $V_i(t)$ ได้ๆ ได้จาก [6]

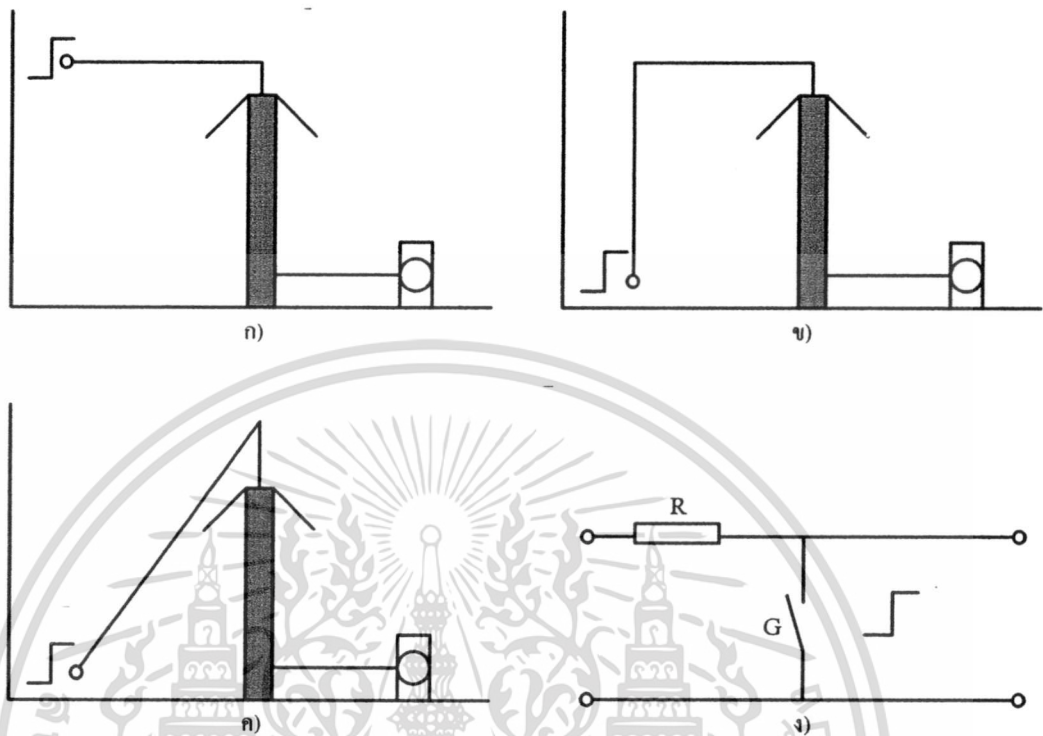
$$V_o(t) = \int_0^t V_i'(t-\tau) G(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

เมื่อ $V_i'(t-\tau)$ คือ อนุพันธ์ของ $V_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการ

$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1-h(s)}{s} \right] \quad (2.6)$$

โดยวงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60-2(1994)
[2] แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน โดย G คือแอมป์สร้างแรงดันรูปขั้น

วงจรที่มาตรฐานแนะนำไว้คือ วงจรในรูปที่ 2.4 ก) และพารามิเตอร์ตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น มาตรฐานได้กำหนดนิยามไว้ดังนี้

1. พารามิเตอร์ผลตอบสนอง (response parameter) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีที่กำหนด
2. จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น (virtual origin of step response, O_1) หมายถึงจุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านเส้นที่เกิดการแกว่ง และใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น
3. ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (normalized step response, $g(t)$) หมายถึงผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.5 ก)
4. อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (step response integral) หมายถึง อินทิกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น $g(t)$ (ดูรูปที่ 2.5 ข)

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เวลาตอบสนองจากการทดลอง (experimental response time, T_N) หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{\max}

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

6. เวลาตอบสนองบางส่วน (partial response time, T_α) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7. เวลาตอบสนองเศษเหลือ (residual response time, $T_R(t)$) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{\max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

8. ส่วนพุ่งเกิน (overshoot, β) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่งหน่วย

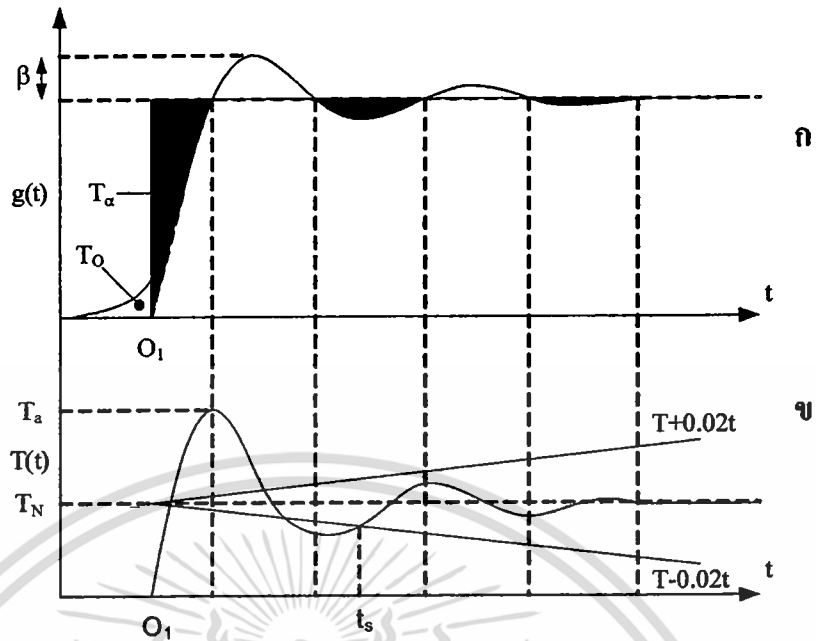
9. เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (initial distortion time, T_0) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

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

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

เนื่องจากในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับพารามิเตอร์เหล่านี้ไว้ [2]

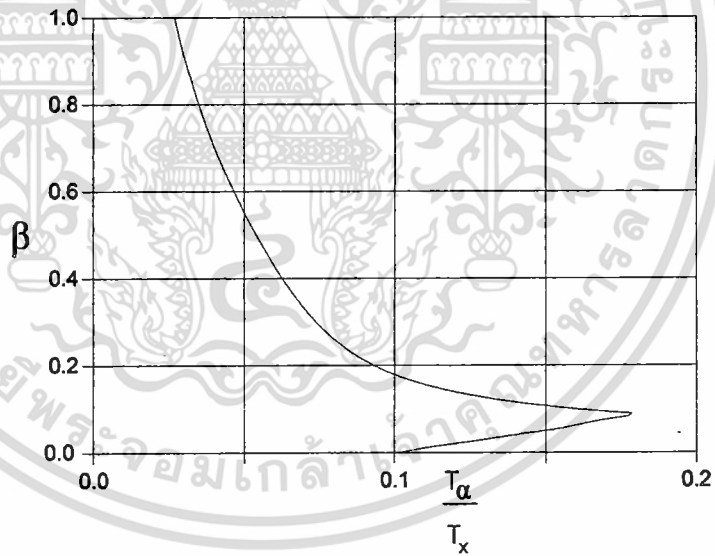
ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ที่ค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า T_α/T_1 จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรงเงาของรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [2]

ก) เมื่อเทียบกับ $g(t)$

ข) เมื่อเทียบกับ $T(t)$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x [2]

โดยที่ T_x คือ เวลาค้นคืนของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์คลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาค้นคืน T_c พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

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

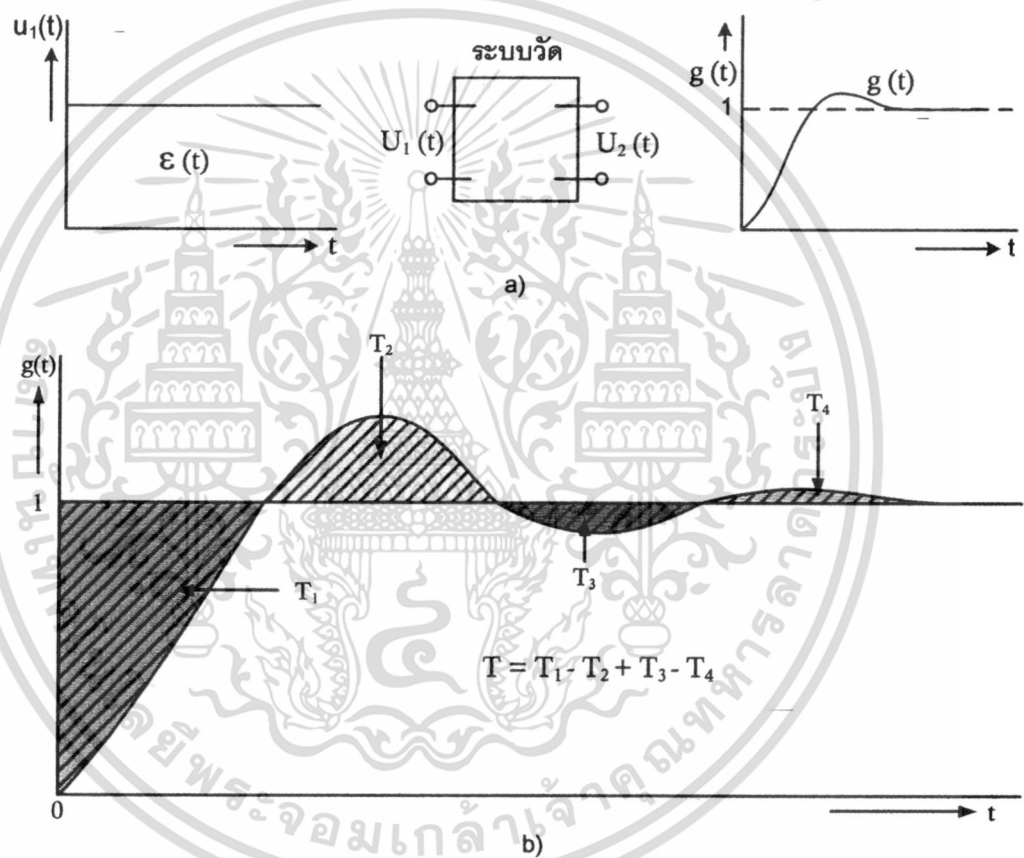
- เวลาเข้าสู่ สภาวะคงตัวควรมีค่า

$$T_s \leq T_c$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_o \leq 0.005 T_c$$

คำจำกัดความของผลตอบสนองรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลตอบสนองรูปขึ้น $g(t)$ และเวลาตอบสนอง T

2.3.1.2 สเกลแฟกเตอร์ (Scale factor)

ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [2]

ได้นิยามไว้ ดังนี้

“สเกลแฟกเตอร์” หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นจะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 3\%$

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

2) ความมีเสถียรภาพ (Stability)

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 3\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งาน สเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจติไวเดอร์เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงที่ขั้วออกของสายนำแรงสูงต่อแรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด นั่นคือ

$$a = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.7)$$

เมื่อ a คือ สเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจติไวเดอร์

V_1 คือ แรงดันที่ปลายขาออกของสายนำแรงสูง

V_2 คือ แรงดันที่ปลายเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัด

สเกลแฟกเตอร์ของโวลท์เตจติไวเดอร์แบบใด ๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

ก) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด

ข) เทียบกับโวลท์เตจติไวเดอร์ที่ทราบอัตราส่วนแรงดันที่แน่นอนแล้ว

ค) เทียบกับแกปทรงกลม

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

การหาอัตราส่วนแรงดันของโวลท์เตจติไวเดอร์จากการทดลองนั้นถ้าทำการทดลอง ในสถานที่ต่าง ๆ กันค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันที่ได้อาจมีค่าต่างกันไปเพราะค่าอัตราส่วนแรงดันขึ้นอยู่กับค่าความจุสเตรลงดินของโวลท์เตจติไวเดอร์ ดังนั้นการหาอัตราส่วนแรงดันของโวลท์เตจติไวเดอร์ ควรทำการทดลอง ณ ตำแหน่งซึ่งจะติดตั้งโวลท์เตจติไวเดอร์ในการใช้งานจริง

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลท์เตจดีไวเซอร์

3.1 คุณสมบัติของโวลท์เตจดีไวเซอร์

คุณสมบัติที่กำหนดของโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างเป็นโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เป็นแบบผสมระหว่างตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน สามารถใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ, แรงดันสูงกระตกร และแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานในตัวเดียวกัน โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC 60-2(1994) [2] กำหนด ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลท์เตจ ดีไวเซอร์กำหนดด้วยค่าแรงดันทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเหตุที่ใช้เป็นแบบผสม เพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในภาวะเริ่มแรกของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองดีขึ้น และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากันซึ่งเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ 3.1 พิกัดแรงดันสูงสุดของโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่ต้องการออกแบบสร้าง

ชนิดของแรงดันที่ต้องการวัด	พิกัดสูงสุดที่ต้องการออกแบบสร้าง
แรงดันสูงกระแสสลับ	100 kV _{rms}
แรงดันสูงกระแสตรง	100 kV
แรงดันสูงอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน	100 kV _p

โดยโวลท์เตจดีไวเซอร์ที่สร้างขึ้นลักษณะโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ องค์ประกอบภาคแรงสูง และองค์ประกอบภาคแรงต่ำ โดยผ่านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ต้องการวัดหาค่าแรงดันผ่านภาคแรงสูง ซึ่งในส่วนนี้จะมีการลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าลดน้อยลงเพื่อส่งผ่านแรงดันที่ได้ไปยังภาคแรงต่ำของโวลท์เตจดีไวเซอร์ในส่วนของภาคแรงต่ำนี้จะมีการลดระดับแรงดันที่ส่งผ่านมาจากภาคแรงสูงให้มีขนาดพิกัดแรงดันที่ใช้ได้กับเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าที่จะนำไปต่อร่วมกับโวลท์เตจดีไวเซอร์เพื่อวัดค่าแรงดันด้านออกของโวลท์เตจดีไวเซอร์ เช่น ออสซิลโลสโคป หรือโวลท์มิเตอร์ เป็นต้น

3.2 การออกแบบโวลท์เตจดีไวเซอร์แบบผสม

โวลท์เตจดีไวเซอร์ลักษณะดังกล่าวนี้ เป็นการนำตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าเก็บประจุตามต้องการโดยมีตัวต้านทานต่อขนานในแต่ละชั้นและระหว่างชั้น อัดก๊าซฉนวน (SF₆) ที่ความดัน 3 bar โดยไม่เกิดโคโรนาระหว่างอิเล็กโทรด

3.2.1 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

3.2.1.1 การวางไฟตามผิวฉนวน [3-7]

ความยาวท่ออะคลิลิกกำหนดด้วยระยะวางไฟตามผิวฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของท่ออะคลิลิก ในกรณีแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะใช้ระยะวางไฟตามผิว มีค่าอย่างน้อย

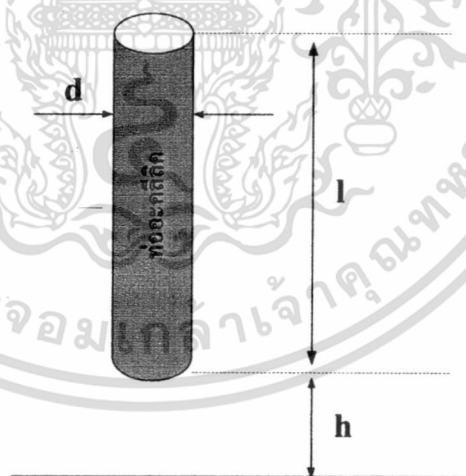
$$2.5 \text{ m} / 1 \text{ MV}$$

โวลท์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันอิมพัลส์พิกัดเท่ากับ 100 kV ดังนั้นระยะวางไฟตามผิว ควรมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 0.25 เมตร ซึ่งในกรณีนี้ออกแบบท่อที่มีความยาว 1 เมตร เนื่องจากในที่นี่ระยะความยาวท่อ (l) จะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ทำการออกแบบ

3.2.1.2 ความจุสเตรลงดิน

ความจุสเตรลงดินเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือ ค่าความจุสเตรลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลท์เตจดีไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงสูงเป็นตัวเก็บประจูง่าย เมื่อบรรจุอยู่ในท่ออะคลิลิกก็สามารถถือได้ว่าเป็นตัวเก็บประจูง่ายรูปทรงกระบอกตั้งรูปที่ 3.2 ค่าความจุสเตรหาได้จากสมการ

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



รูปที่ 3.1 ตัวเก็บประจูง่ายรูปทรงกระบอก

ท่ออะคลิลิกที่เลือกใช้มีความยาว (l) ของท่อที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 1 เมตร ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 20 เซนติเมตร มีความสูงวัดจากพื้นดิน (h) เท่ากับ 20 เซนติเมตร นำมาแทนในสมการจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_e = \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times 1}{\ln \left[\left(\frac{2(1)}{0.2} \right) \left(\sqrt{\frac{(4 \times 0.2) + 1}{(4 \times 0.2) + (3 \times 1)}} \right) \right]}$$

$$= \frac{5.560312 \times 10^{-11}}{1.928977892}$$

$$= 28.825 \text{ pF}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุสเตรลงดินประมาณเท่ากับ 28.825 pF

3.2.1.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ

ตัวเก็บประจุที่เลือกใช้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีนฟิล์ม (Polypropylene Film) มีขนาดความจุ 0.022 μF พิกัด 1600 $V_{DC}/650 V_{AC}$ โดยที่ AC พิกัด 100 kV_{rms} จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งสิ้นจำนวน 154 ตัว

เนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่จะวัด

ที่ 1.0 หรือ 100 % ของแรงดันทดสอบ ใช้ C จำนวน $\frac{100k}{650} = 154$ ตัว

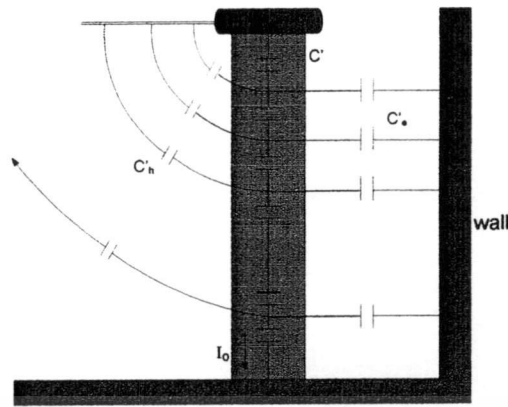
คิดเผื่อความปลอดภัย

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

จึงเลือกใช้จำนวน 200 ตัว ชั้นละ 8 ตัว จำนวน 25 ชั้น ที่ความปลอดภัย 1.3 หรือ 130 % และในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุควรให้มีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรลงดินประมาณ 3 เท่า หรือมากกว่า ในที่นี้ค่าความจุสเตรลงดินมีค่าเท่ากับ 28.825 pF เมื่อนำตัวเก็บประจุจำนวน 200 ตัวมาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 110 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความจุสเตรลงดิน โดยที่มีกระแสที่พิกัดแรงดัน 3.45 mA

3.2.1.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจื่อย่อยตัวบนสุด

เนื่องจากแรงดันกระจายของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจื่อย่อยตัวบนว่าสามารถทนแรงดัน เมื่อโวลต์เดจดีไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 โดยต้องคำนึงถึงแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ Withstand test ที่ 110% หรือ 1.1



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

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

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C_e' + C_h')}{C_r}} \tag{3.3}$$

- เมื่อ U = แรงดันพิกัด = 100 kV
- C = ค่าของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว = 2.20E-08
- Ce = ค่าความจุสเตร = 2.88E-11
- n = จำนวนตัวเก็บประจุ = 200
- k = ชั้นที่ 1
- C'e = Ce/n = 1.44E-13
- C'1 = C1/n = 1.1E-10
- C'h = 0
- $\alpha = \sqrt{\frac{(C_e' + C_h')}{C_r}} = 0.036193922$

ตารางที่ 3.2 ตารางเปรียบเทียบแรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1

ระดับ Withstand test		1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
C ตัวที่ 1 พิกัด $U_c = 650 V_{AC}$	154 ตัว	649.208					
	200 ตัว	499.809	549.88	599.869	649.858		

ใช้งานได้ พิกัด เกินพิกัด

ดังนั้นจึงเลือกออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเซอร์โดยใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 200 ตัว ซึ่งสามารถใช้ทดสอบความคงทนของอุปกรณ์ได้ตามมาตรฐาน [2] ที่ 1.3 หรือ 130 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น-ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.5 ตัวต้านทานภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ตัวความต้านทานภาคแรงสูงของโวลต์เดจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่กับตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูง ตามมาตรฐานกำหนดให้ $R \leq 10 \text{ M}\Omega/\text{kV}$, $1-2 \text{ mA} \leq I \leq 0.1 \text{ mA}$ โดยเราใช้ตัวต้านทาน ชนิดคาร์บอนฟิล์ม ขนาด $10 \text{ M}\Omega$ มาต่อขนานกับตัวเก็บประจุแต่ละชั้น โดยจะใช้ตัวต้านทาน จำนวน 25 ตัว จะได้ R รวมทั้งหมด $250 \text{ M}\Omega$ ซึ่งจะได้

$$R = 250 \text{ M}\Omega / 100 \text{ kV}_{\text{dc}} = 2.5 \text{ k}\Omega / \text{kV}_{\text{dc}}$$

$$I = 100 \text{ kV} / 250 \text{ M}\Omega = 0.4 \text{ mA}$$

จากที่คำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานและกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

3.2.1.6 ค่าความสูญเสีย

จากการต่อตัวต้านทานจะเกิดค่าสูญเสีย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$Loss = \frac{V^2}{R} = \frac{(100 \text{ kV})^2}{250 \text{ M}\Omega} = 40 \text{ W} \quad (3.4)$$

ค่าสูญเสียจากความต้านทานที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 40 W เป็นค่าการสูญเสียรวมทั้งหมด เมื่อหาที่แต่ละชั้นจะได้เท่ากับ $40/25 = 1.6 \text{ W}$ กำหนดให้ใช้ตัวต้านทานที่มีพิกัด 3 W ต่อชั้น

3.2.1.7 ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์

ตัวต้านทานหน่วงภาคแรงสูงจะต้องกระจายตลอดภาคแรงสูงทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งการแกว่งของแรงดันนี้เกิดจากรีโซแนนซ์ระหว่างความเหนี่ยวนำในสายตัวนำแรงสูงและตัวเก็บประจุภาคแรงสูง การต่อตัวต้านทานกระจายนี้ยังสามารถช่วยหน่วงการแกว่งซึ่งเกิดขึ้นภายในโวลต์เดจดีไวเดอร์เองได้ดีกว่าการต่อความต้านทานหน่วงภายนอกโวลต์เดจดีไวเดอร์ อย่างไรก็ตามก็ยังมีกรแกว่งของระบบวัดเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสายตัวนำซึ่งจะต้องมีความต้านทานภายนอกซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำต่อเพื่อหน่วงการแกว่งดังกล่าว ความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงหาได้จากสมการ 3.5

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

ปกติค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 500 ถึง 1000 โอห์ม [3,7] และไม่ควรรอกแบบให้มีค่าความต้านทานสูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ค่าเวลาตอบสนองมีค่ามากเกินไป ขณะเดียวกันจะต้องมีความต้านทานไม่ต่ำมากนัก เพราะจะไม่สามารถหน่วงการแกว่งของรูปคลื่นได้เพียงพอ การหาค่าตัวต้านทานจากสมการ (3.5) จะต้องรู้ค่าความเหนี่ยวนำของโวลต์เดจดีไวเดอร์ก่อนจึงต้องทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำ โดยทำการ

เชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงสูงทั้งหมดให้เป็นตัวเก็บประจุล้วน ($R=0$) และหาผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลต์เตจดีไวเดอร์ หรือได้จากการคำนวณโดยประมาณว่าคลื่นเดินทางในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์ด้วยความเร็วแสงซึ่งมีค่าประมาณ 3.33 ns/m [6] จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Z_i C_e = \tau, \quad (\text{nS/m}) \quad (3.6)$$

โดยที่ $Z_i = \sqrt{L/C_e}$ คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของโวลต์เตจดีไวเดอร์
 C_e คือ ค่าเก็บประจุสเตรของโวลต์เตจดีไวเดอร์
 $\tau_i = \sqrt{L \cdot C_e}$ คือ เวลาที่คลื่นเดินทางในตัวโวลต์เตจดีไวเดอร์

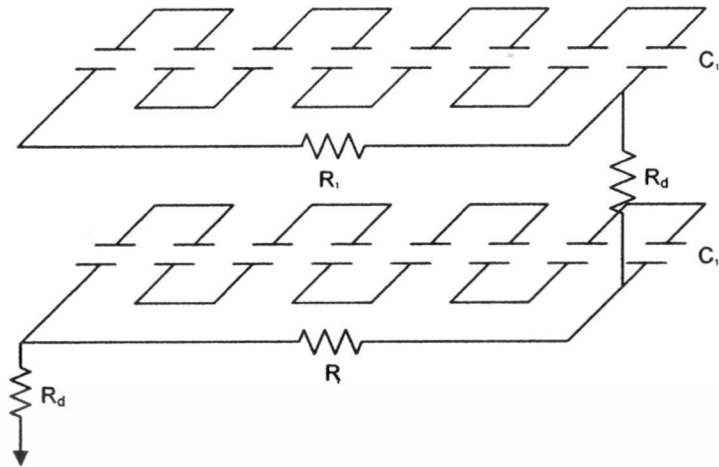
- แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} Z_t &= \frac{\tau_i}{C_e} = \frac{3.33 \text{ ns/m}}{28.8 \text{ pF}} \\ &= 115.625 \\ R_d &= 4 \cdot Z_t \\ &= 4 \cdot 115.625 \\ &= 462.5 \Omega \end{aligned}$$

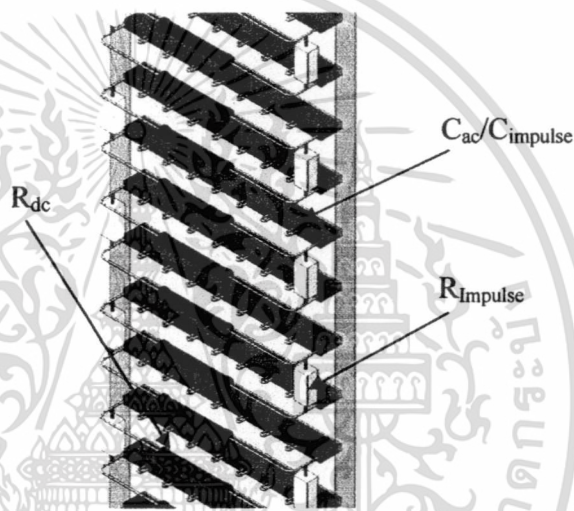
ค่าความต้านทานหน่วงที่คิดได้เป็นค่าความต้านทานหน่วงภายในโวลต์เตจดีไวเดอร์ภาคแรงสูงทั้งหมด เมื่อนำมาต่อจะต่ออยู่ระหว่างชั้นของแต่ละชั้น จำนวน 24 ชั้น จะได้ค่าความต้านทานหน่วงแต่ละชั้นเท่ากับ $462.5/24 = 19.27 \Omega$ ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ค่าความต้านทานหน่วงที่พิกัด 20Ω 5 W เป็นตัวต้านทานแบบเซรามิค

3.2.1.8 การต่ออุปกรณ์ภายในโวลต์เตจดีไวเดอร์

การต่อตัวเก็บประจุย่อยและตัวต้านทานในภาคแรงสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 200 ตัว ตัวต้านทานย่อยทั้งหมดจำนวน 25 ตัว และตัวต้านทานหน่วงจำนวน 24 ตัว การประกอบทำโดยใช้แผ่นอะคลิลิกใสหนา 1.5 cm. ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 10 ตัว ซึ่งจะนำตัวเก็บประจุย่อยต่อเข้าไป ต่อจากนั้นจึงนำตัวต้านทานย่อยต่อขนานกับตัวเก็บประจุย่อยแต่ละชั้นและระหว่างชั้น ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุจะเป็นการต่อแบบอนุกรมและตัวต้านทานจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุในแต่ละท่อน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 ถึง รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานย่อยแต่ละชั้น

3.2.2 การออกแบบภาคแรงต่ำ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของ โวลต์เตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

ก) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในชีลด์ของเคเบิลสายวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

ข) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมชซิ่งของเคเบิลวัดต้องระวัง ไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่าน องค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกับความต้านทานแมชซิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลท์เดจติไวเตอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบค่าสเกลแพกเตอร์ของโวลท์เดจติไวเตอร์โดยอาศัยสมการ (3.7)

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

เมื่อ a คือ อัตราส่วนแรงดันของโวลท์เดจติไวเตอร์

C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออก 100 V ซึ่งจะได้อัตราส่วนแรงดันโวลท์เดจติไวเตอร์มีค่า 1000 : 1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุและค่าความต้านทานภาคแรงดันต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

3.2.2.2 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

จากอัตราส่วนของโวลท์เดจติไวเตอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 100 V จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลท์เดจติไวเตอร์เท่ากับ 1000 : 1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงสูงทั้งหมดเท่ากับ 110 pF ซึ่งเลือกเป็นแบบ Polypropylene ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำคำนวณได้จาก

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

จากการคำนวณได้ค่าความเก็บประจุภาคแรงต่ำ 0.11 μF โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.022 μF ต่อขนานกัน 5 ตัว

3.2.2.3 ตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

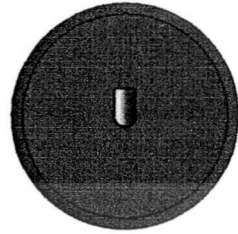
ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนลดทอนของโวลท์เดจติไวเตอร์เท่ากับ 1000: 1 ค่าความต้านทานภาคแรงสูงรวมทั้งหมด 250 $\text{M}\Omega$ โดยค่าความต้านทานคำนวณได้จาก

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

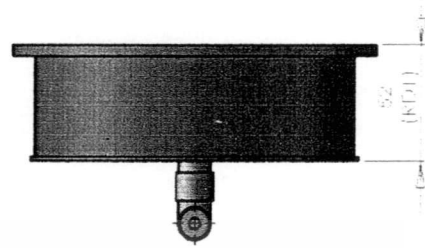
จากการคำนวณได้ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ 250 $\text{k}\Omega$ โดยใช้ตัวต้านทานชนิดเม็ทคอลลฟิล์มขนาด 1.25 $\text{M}\Omega$ 3 W ต่อขนานกัน 5 ตัว

เพื่อป้องกันการแกว่งและการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานแมชซิ่ง (R_m) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด โดยความต้านทานแมชซิ่งนี้เลือกใช้แบบฟิล์ม

โลหะขนาด 2 W 50 Ω จำนวน 1 ตัว ได้ค่าความต้านทาน $R_m = 50 \Omega$ ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานภาคแรงต่ำจะประกอบอยู่ในกระบอกทองเหลือง ดังรูปที่ 3.5



(ก)



(ข)

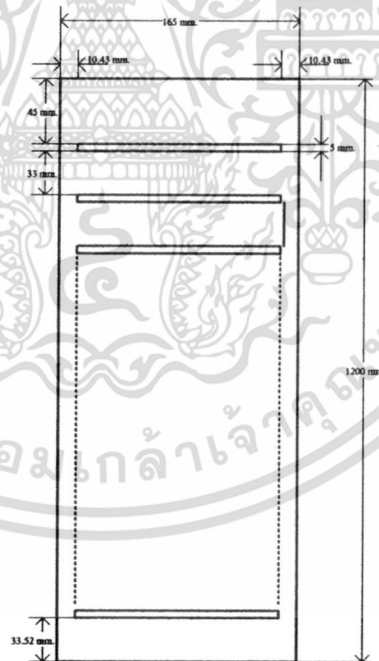
รูปที่ 3.5 ชุดตัวเก็บประจุและความต้านทานภาคแรงต่ำ

ก) ด้านล่าง

ข) ด้านข้าง

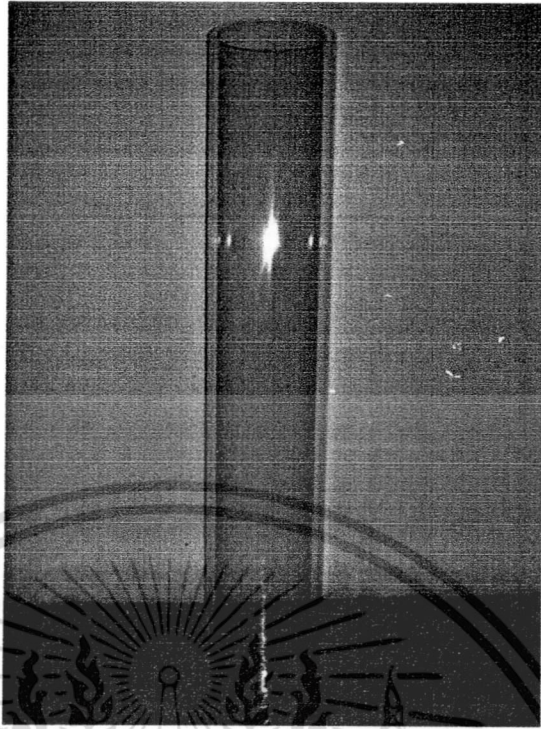
3.3 รายละเอียดการออกแบบโครงสร้างของโวลต์เตจดีไวเดอร์

จากการออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ ได้มีการออกแบบโครงสร้าง และมีมิติการจัดวางอุปกรณ์ภาคแรงสูงไว้ดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.9

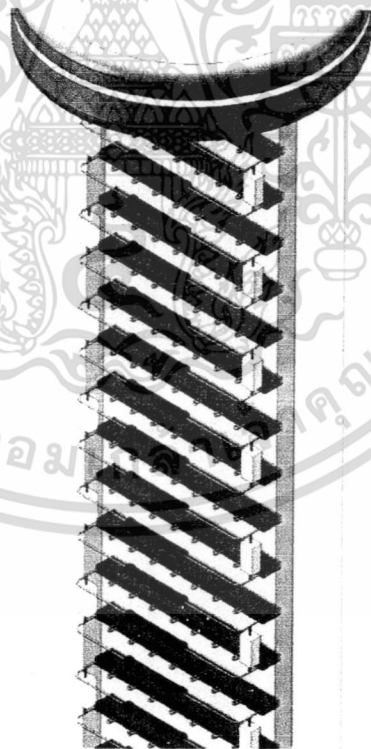


รูปที่ 3.6 แผ่นอะคริลิกใสสำหรับเป็นตัวจับยึดตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

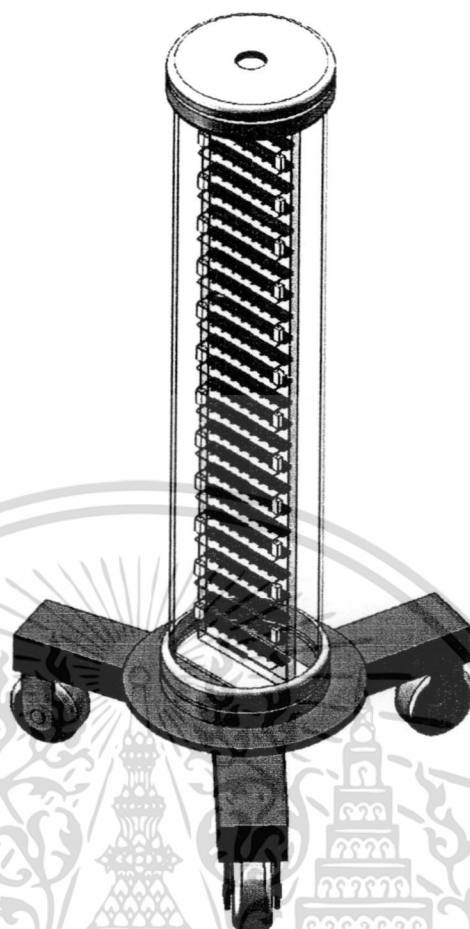


รูปที่ 3.7 ท่ออะคลิลิคใส



รูปที่ 3.8 การต่ออุปกรณ์ภาคแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

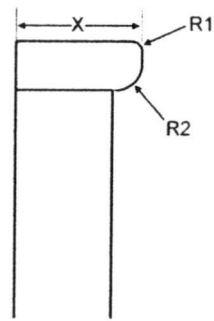


รูปที่ 3.9 โวลต์เดจดีไวเดอร์ที่สมบูรณ์

อิเล็กทรอนิกส์

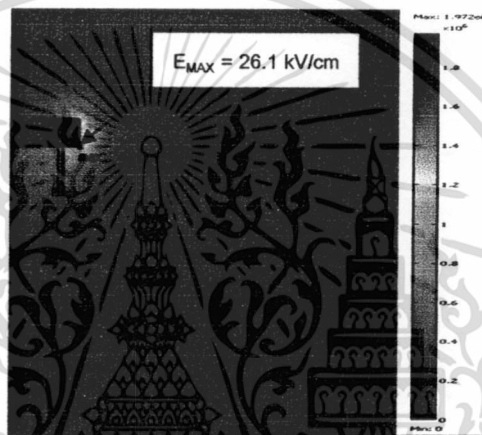
ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น ควรจะออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้สะดวก การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรจะต้องไม่มีขอบคม เพราะจะทำให้จุดๆ นั้นเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่งผลต่อการเกิดโคโรนาขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งควรมีความแข็งแรงทางกลด้วย เมื่อประกอบเข้ากับท่ออะคลิลิกใส สะดวกในการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง หรืออุปกรณ์แรงสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ทำควรป้องกันการรั่วซึม เนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลวหรือก๊าซบรรจุอยู่เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนระหว่างตัวอุปกรณ์กับผิวท่อ ดังนั้นเราจึงใช้โปรแกรมช่วยคำนวณสนามไฟฟ้า (FEM) ช่วยในการวิเคราะห์อิเล็กทรอนิกส์ รูปทรงต่างๆ ทั้งแบบพื้นฐาน ครึ่งวงกลม และได้ทำการทดลองเปลี่ยนระยะ x รัศมีขอบบน และรัศมีของล่าง โดยการจำลองความเครียดของสนามไฟฟ้าจากรูปทรงพื้นฐาน โดยกำหนดให้อิเล็กโทรดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งแทนด้วยอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเปอร์มิตติวิตี (ϵ)=1 และค่าคอนดักติวิตี (ρ)= 3.8×10^7 Siemens / meter ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



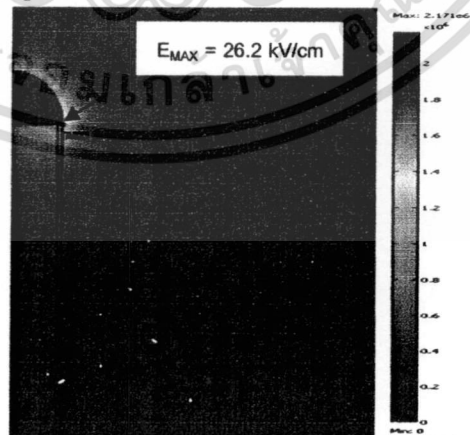
รูปที่ 3.10 โครงสร้างการวิเคราะห์หือเล็กโทรด

เมื่อ X คือ รัศมีของอิลเล็กโทรด, R1 คือ รัศมีขอบบนของอิลเล็กโทรด,
R2 คือ รัศมีขอบล่างของอิลเล็กโทรด



รูปที่ 3.11 ลักษณะของอิลเล็กโทรดพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมและสนามไฟฟ้า

จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าจุดที่เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอยู่ 2 จุด คือ ขอบด้านบน และขอบด้านล่าง แต่จะเกิดมากที่ขอบด้านล่างโดยมีค่าสูงสุด = 26.1 kV/cm ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการเพราะจะเกิดโคโรนา เราจึงต้องลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง โดยการออกแบบอิลเล็กโทรดใหม่ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะของอิลเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมและสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าอิเล็กโทรดพื้นฐานรูปครึ่งวงกลมในรูปที่ 3.12 จะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่จุดขอบด้านล่างและมีค่าน้อยลงกว่าในรูปที่ 3.11 โดยมีค่าสูงสุด = 26.2 kV/cm แต่ใช้อิเล็กโทรดรูปทรงนี้จะใช้ค่าจ่ายในการสร้างสูง เพราะใช้เนื้อโลหะจำนวนมาก อีกทั้งขั้นตอนการทำส่วนโค้งให้มีผิวเรียบสม่ำเสมอสามารถทำได้ยาก ดังนั้นอิเล็กโทรดจึงควรมีลักษณะรูปทรงคล้ายครึ่งวงกลมแต่ด้านบนเรียบ โดยจะหาค่าขนาดของรัศมี (X) ของอิเล็กโทรดได้จากการคำนวณดังนี้

$$r = \frac{V}{E_{max}} = \frac{130kV \times \sqrt{2}}{20kV / cm} = 9.2cm$$

คูณเผื่อ 130% = $9.2 \times 1.3 = 11.96 \approx 12 \text{ cm}$

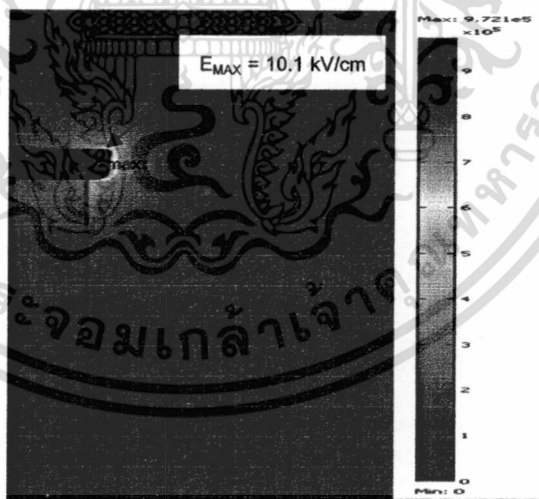
$\therefore r \geq 12 \text{ cm}$

r คือ รัศมีของอิเล็กโทรด

V คือ ค่ายอดแรงดันใช้งาน

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศที่ 20 kV/cm

สาเหตุที่เราต้องคูณเผื่อ 130% เนื่องจากขนาดรัศมีของอิเล็กโทรดจากการคำนวณมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออะคลิลิคใส่ที่ใช้งาน จึงไม่สามารถเจาะรูเพื่อใช้สกรูยึดอิเล็กโทรดได้ จึงต้องคูณเผื่อเพื่อเพิ่มขนาด



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองที่ระยะรัศมี x = 13 cm โค้งขอบด้านบน (R1) = 1 cm

โค้งขอบด้านล่าง (R2) = 2 cm

อิเล็กโทรดที่เราใช้ในโวลท์เจจดีไวเซอร์แบบผสมนี้คือ ดังรูปที่ 3.13 โดยใช้โปรแกรม FEM ช่วยในการออกแบบ โดยมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด = 10.1 kV/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 บทนำ

การทดสอบหลักคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงดันสูงกระแสตรง, กระแสสลับ และอิมพัลส์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบค่าโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นมีลักษณะสมบัติเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 60-2(1994)[2] ซึ่งการทดสอบและการประมวลผลได้แบ่งหัวข้อตามลำดับดังต่อไปนี้

- ก) การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- ข) การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ
- ค) การหาผลตอบสนองรูปขั้น (Unit Step Response)
- ง) การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor Test)
- จ) การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)
- ฉ) การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test)
- ช) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (AC Withstand Test)
- ซ) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสตรง (DC Withstand Test)
- ฌ) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Test)
- ญ) การทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน

4.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ

4.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงใช้เครื่องวัด RLC Meter ของบริษัท HEWLETT PACKARD IMPEDANCE/GAIN-PHASE ANALYZER รุ่น 4194A การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงผลการทดลองได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (Hz)	C ₁ จากการคำนวณ (pF)	C ₁ จากการวัด (pF)	Error (%)
100	110	109.02	0.89
500	110	109.54	0.42
1000	110	108.86	1.04
10000	110	109.60	0.30

จากตารางที่ 4.1 ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากคำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยอยที่นำมาต่ออันดับกัน และค่าความจุสเตรตรงดินในขณะที่ทำการทดสอบของตัวโวลเตจดีไวเดอร์ด้วย

4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำจะใช้วงจรและเครื่องมือวัดชนิดเดียวกับที่วัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (Hz)	C ₂ จากการคำนวณ (nF)	C ₂ จากการวัด (nF)	Error (%)
100	110	109.87	0.18
500	110	109.69	0.28
1000	110	108.53	1.36
10000	110	109.75	0.27

จากการทดลองจะเห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าน้อยกว่าค่าการคำนวณที่ได้จากทางทฤษฎี เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ การหาค่า % ผิดพลาดโดย

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

4.3 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ

4.3.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง

4.3.1.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง DC

โดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูงใช้เครื่องวัด Mega Ohm Meter ของบริษัท YOKOGAWA รุ่น 2406 Digital Insulation Tester การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูงที่ใช้ในการวัดแรงดันสูงกระแสตรง แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูง DC

R _{DC} จากการคำนวณ (MΩ)	R _{DC} จากการวัด (MΩ)	Error (%)
250	249	0.4

4.3.1.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง Impulse

ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงสูง Impulse จะใช้เครื่องมือวัด Multimeter ของบริษัท FLUKE รุ่น 189 TRUE RMS ซึ่งผลจากการวัดได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงสูง Impulse

R _{Impulse} จากการคำนวณ (Ω)	R _{Impulse} จากการวัด (Ω)	Error (%)
160	158	1.25

4.3.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ

4.3.2.1 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ DC

ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ DC จะใช้เครื่องมือวัด Multimeter ของบริษัท FLUKE รุ่น 189 TRUE RMS ซึ่งผลจากการวัดได้แสดงไว้ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ DC

R _{DC} จากการคำนวณ (Ω)	R _{DC} จากการวัด (Ω)	Error (%)
250	249	0.4

4.3.2.2 การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ Impulse

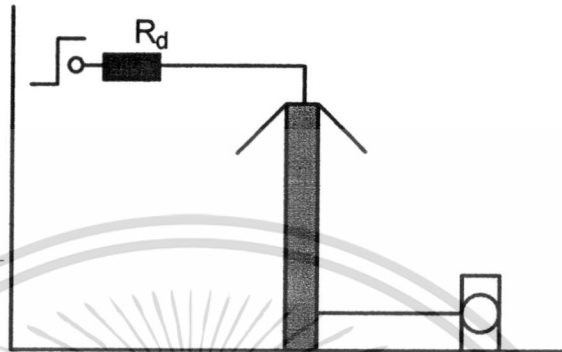
ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ Impulse จะใช้เครื่องมือวัด เช่นเดียวกับการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ DC ซึ่งผลจากการวัดได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานภาคแรงต่ำ Impulse

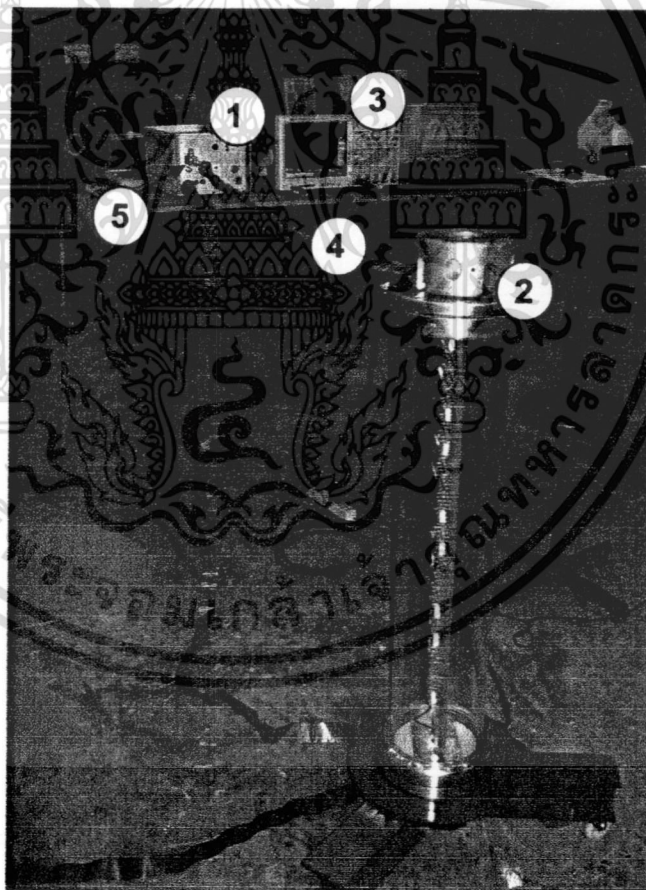
R _{Impulse} จากการคำนวณ (Ω)	R _{Impulse} จากการวัด (Ω)	Error (%)
0.2	0.19	5

4.4 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

วงจรถ้าผลตอบสนองรูปขั้นในที่นี้ใช้วงจรในรูปที่ 2.5ก) ตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยต่อเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (unit step generator) ของบริษัท DR.STRAUSS รุ่น RIG 1000-H ตามวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วงจรถ้าผลตอบสนองรูปขั้น



รูปที่ 4.2 วงจรถ้าผลตอบสนองรูปขั้น

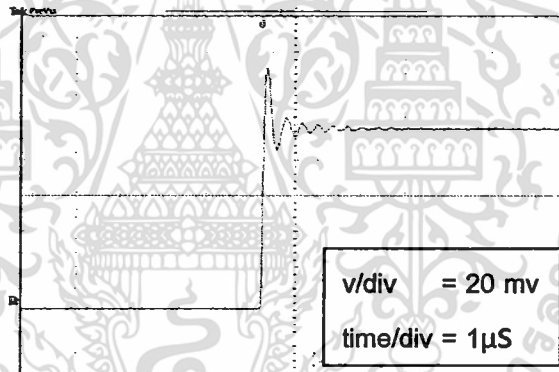
1. เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น
2. โวลท์เตจดีไวเซอร์ที่ทำการสอบเทียบ
3. ออสซิลโลสโคป
4. สายตัวนำ
5. หัววัดด้านทานแมทซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

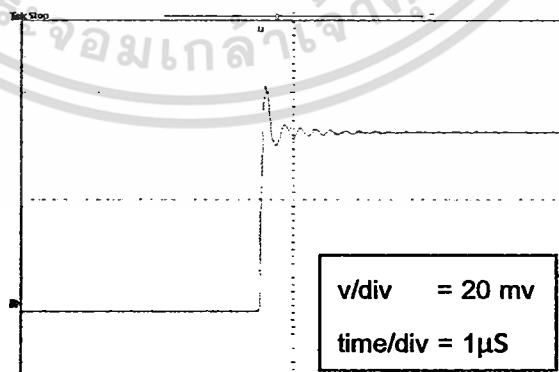
การหาผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมโดยจะทำการหาผลตอบสนองที่ค่าความต้านทานหน้าวงภายนอกต่าง ๆ กัน ในที่นี้สายนำที่ใช้เป็นสายเคเบิล RG-8 ซึ่งจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ 50 โอห์ม จึงได้มีการต่อตัวต้านทานแมทซ์ขึ้น เพื่อหน่วงการแกว่งของสัญญาณที่ทำการวัด ซึ่งพารามิเตอร์ผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 4.7 และออสซิลโลกราฟแสดงในรูปที่ 4.3-4.7

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน้าวงภายนอก

$R_d (\Omega)$	β (%)	T_α (ns)	T_N (ns)
100	33.51	33.59	8.94
150	26.02	52.78	34.26
200	18.20	37.23	22.71
300	7.90	48.33	44.05
400	1.36	65.90	65.45

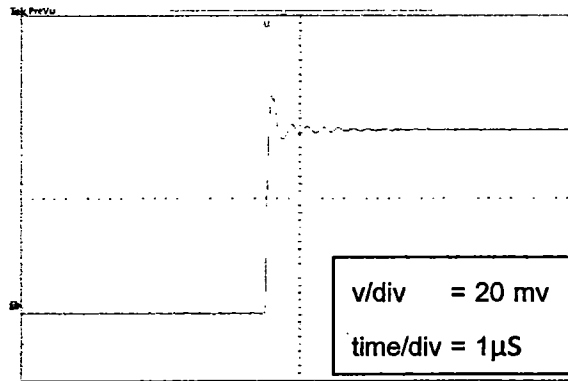


รูปที่ 4.3 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน้าวง (R_d) เท่ากับ 100 Ω

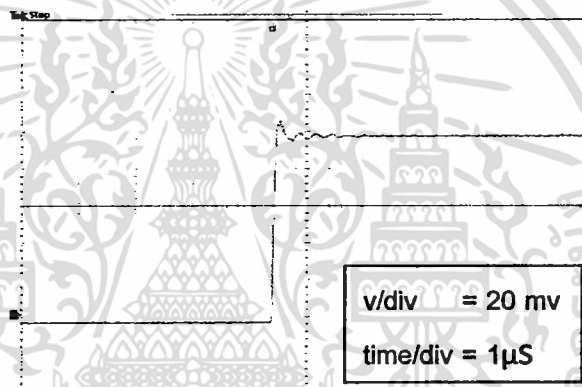


รูปที่ 4.4 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมที่ค่าความต้านทานหน้าวง (R_d) เท่ากับ 150 Ω

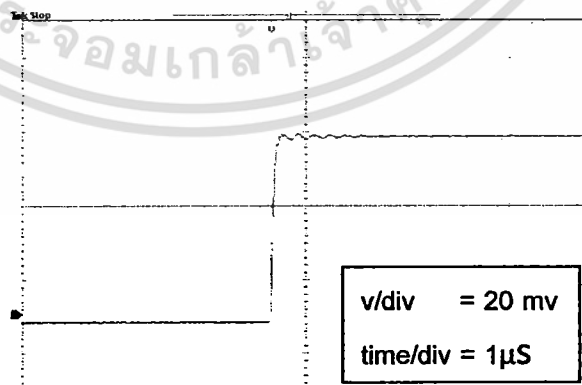
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 200 Ω



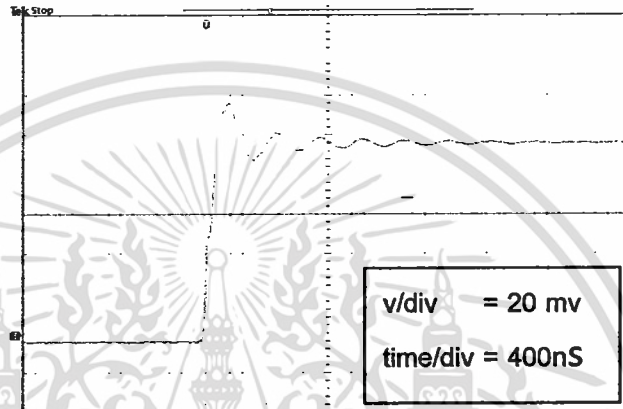
รูปที่ 4.6 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 300 Ω



รูปที่ 4.7 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองของรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสม
ที่ค่าความต้านทานหน่วง(R_d) เท่ากับ 400 Ω

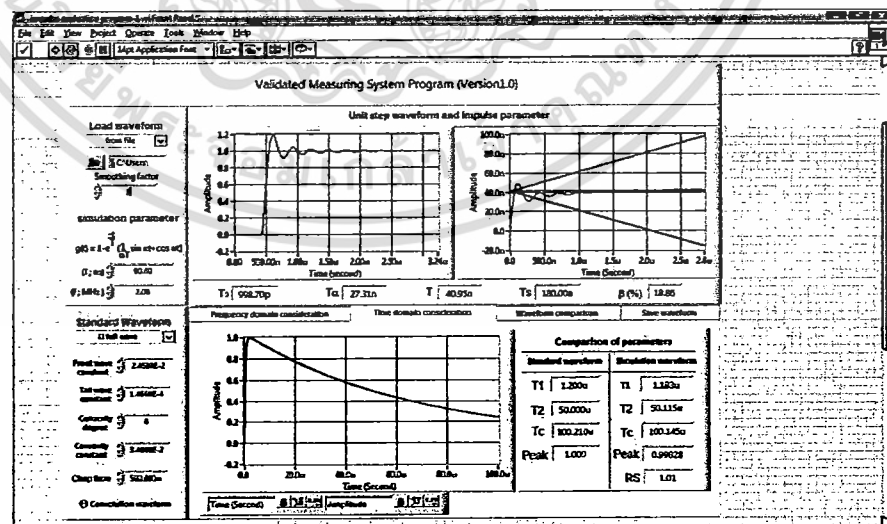
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้สรุปได้ว่า พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ ออกแบบแบบมีค่าเกินที่มาตรฐานแนะนำไว้ทั้งในกรณีการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและ รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ทางผู้จัดทำจึงได้ทดลองทำการต่อตัวเหนี่ยวนำเพิ่มในวงจร ซึ่งผลปรากฏ ว่าหน้าคลื่นมีความชันขึ้น แต่เกิดการกระเพื่อม(Oscillate) ที่หน้าคลื่นมาก ทำให้ค่า β ไม่ได้ ตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงโดยนำตัวต้านทานขนาด 10 Ω 16 ตัวต่อ อนุกรมระหว่างชั้นของตัวเก็บประจุแต่ละชั้นที่ภาคแรงสูง และต่อตัวต้านทานขนาด 1 Ω ขนาด 5 ตัวที่ภาคแรงต่ำ ทำให้ได้ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ได้แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ออสซิลโลกราฟแสดงผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์

จากออสซิลโลกราฟสรุปได้ว่า โวลเตจดีไวเดอร์ตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ สร้างขึ้นมีค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองตามที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) แนะนำไว้สำหรับการ วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและจากรูปที่ 2.7 จะได้ว่า β ต้องไม่เกิน 100 % และในที่นี้ได้ค่า β เท่ากับ 18.86 %



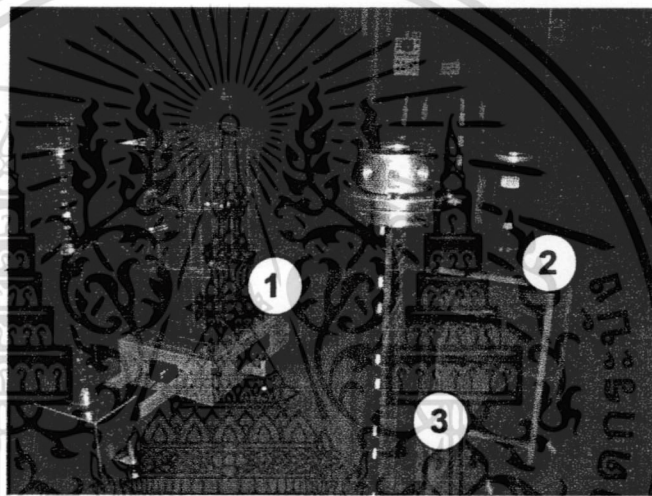
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ผลตอบสนองรูปขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์

4.5.1 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

ในกรณีของระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับจะทำการต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูงกระแสสลับพิกัด 100 kV ที่จะทำการสอบเทียบโดยต่อร่วมกับตัวลดทอนแรงดัน Attenuator ที่มีพิกัดลดทอน 20 เท่า และโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 100 kV ที่ผลิตโดยบริษัท Hipo-tonic ขนานกันเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับตามรูปที่ 4.10 โดยอ่านผลจากมัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 189 True RMS Multimeter อัตราส่วนการแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดันต่างๆ (ทดสอบ 3 ครั้งที่ทุกระดับแรงดัน) ก็คืออัตราส่วนเฉลี่ยระหว่างแรงดันที่ได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 100 kV กับแรงดันที่ได้จากโวลต์เตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ที่ทำการสอบเทียบ



รูปที่ 4.10 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับ 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

ตารางที่ 4.8 อัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ ที่ระดับแรงดันต่างๆ

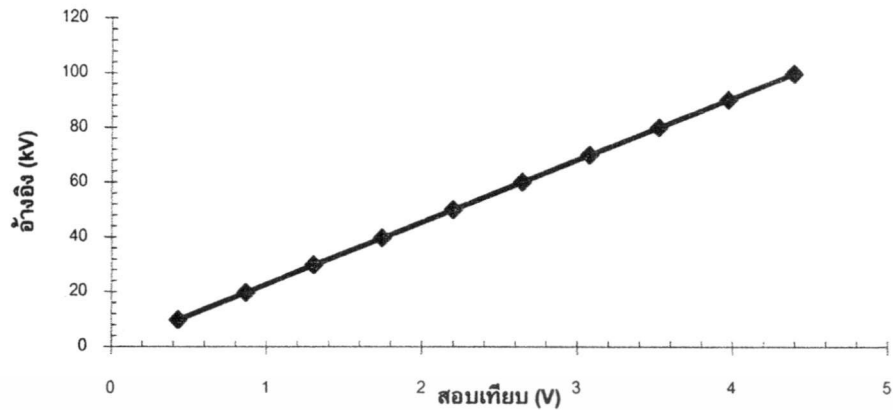
ระดับแรงดัน ทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดอ้างอิง (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน
10	1	9.9	0.434	22761
	2	9.9	0.434	22761
	3	9.9	0.434	22761
	Average	9.9	0.434	22761
20	1	19.8	0.878	22761
	2	19.8	0.878	22761
	3	19.8	0.879	22760
	Average	19.8	0.878	22760

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 อัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ ที่ระดับแรงดันต่างๆ (ต่อ)

ระดับแรงดันทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดอ้างอิง (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน
30	1	29.9	1.316	22759
	2	29.9	1.315	22760
	3	29.9	1.316	22759
	Average	29.9	1.316	22759
40	1	39.7	1.744	22760
	2	39.7	1.744	22760
	3	39.7	1.743	22761
	Average	39.7	1.743	22760
50	1	50	2.196	22760
	2	50	2.196	22760
	3	50	2.196	22760
	Average	50	2.196	22760
60	1	60.1	2.640	22763
	2	60.1	2.640	22763
	3	60.1	2.636	22761
	Average	60.1	2.640	22759
70	1	70	3.075	22760
	2	70	3.075	22760
	3	70	3.075	22760
	Average	70	3.075	22760
80	1	80.1	3.518	22763
	2	80.1	3.518	22763
	3	80.1	3.516	22764
	Average	80.1	3.517	22763
90	1	90.2	3.963	22760
	2	90.2	3.963	22760
	3	90.2	3.963	22760
	Average	90.25	3.963	22762
100	1	99.8	4.384	22761
	2	99.8	4.384	22761
	3	99.8	4.384	22761
	Average	99.8	4.384	22761
อัตราส่วนการแบ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ				22761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

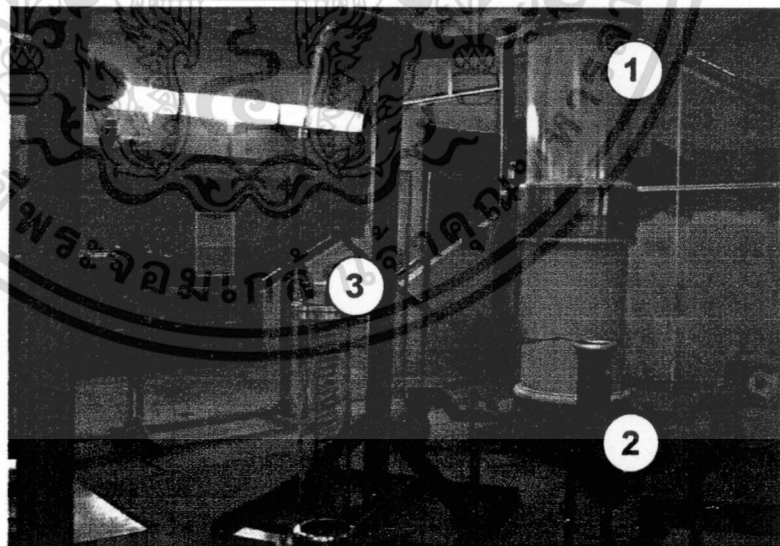


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ
ของระบบวัดแรงดันกระแสลับ

4.5.2 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ในกรณีของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรงจะทำการต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์วัดแรงดันสูง
กระแสตรงพิกัด 100 kV ที่จะทำการสอบเทียบ และต่อโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 100 kV ที่
ผลิตโดยบริษัท Hipo-tonic ขนาดกันเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง พิกัด 600 kV
ตามรูปที่ 4.12 โดยอ่านผลจากมัลติมิเตอร์ของบริษัท Fluke รุ่น 189 True RMS

อัตราส่วนการแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดันต่างๆ (ทดสอบ 3 ครั้งที่ทุกระดับแรงดัน) ก็คือ
อัตราส่วนเฉลี่ยระหว่างแรงดันที่ได้จากโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 100 kV กับแรงดันที่ได้จาก
โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV ที่ทำการสอบเทียบ



รูปที่ 4.12 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสตรง 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

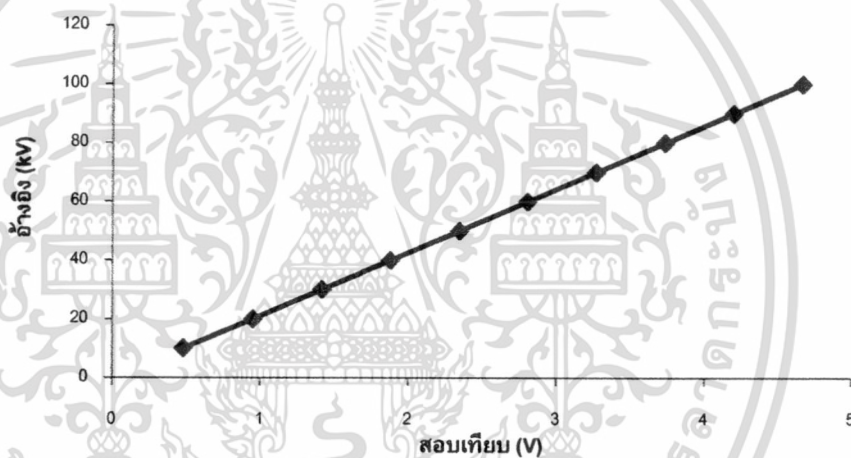
ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันกระแสตรง ที่ระดับแรงดันต่างๆ

ระดับแรงดันทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดอ้างอิง (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน
10	1	10.1	0.471	21434
	2	10.1	0.471	21434
	3	10.1	0.470	21435
	Average	10.1	0.471	21434
20	1	20	0.933	21435
	2	20	0.933	21435
	3	20	0.933	21435
	Average	20	0.933	21435
30	1	30	1.399	21433
	2	30	1.401	21432
	3	30	1.401	21432
	Average	30	1.399	21432
40	1	40	1.866	21434
	2	40	1.865	21435
	3	40	1.866	21434
	Average	40	1.866	21434
50	1	50	2.335	21433
	2	50	2.336	21434
	3	50	2.335	21433
	Average	50	2.335	21433
60	1	60	2.800	21429
	2	60	2.798	21444
	3	60	2.799	21436
	Average	60	2.799	21436
70	1	70	3.264	21446
	2	70	3.265	21440
	3	70	3.270	21410
	Average	70	3.266	21432
80	1	80	3.731	21440
	2	80	3.733	21430
	3	80	3.725	21477
	Average	80	3.730	21449

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันกระแสตรง ที่ระดับแรงดันต่างๆ (ต่อ)

ระดับแรงดันทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดอ้างอิง (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน
90	1	90	4.200	21429
	2	90	4.195	21454
	3	90	4.198	21439
	Average	90	4.198	21440
100	1	100	4.666	21432
	2	100	4.670	21413
	3	100	4.671	21409
	Average	100	4.669	21418
อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง				21433



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

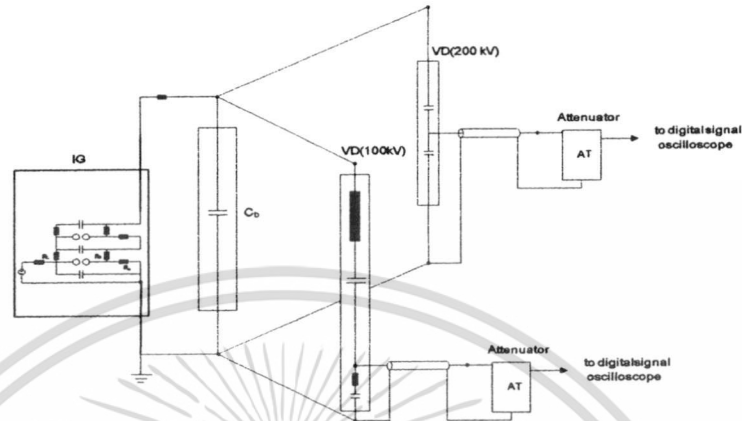
4.5.3 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

ในกรณีของระบบวัดแรงดันสูงอิมพัลส์จะทำการต่อระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 $kV_{Impulse}$ ต่อร่วมกับตัวลดทอนแรงดัน Attenuator) ที่ต้องการจะสอบเทียบและอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 200 $kV_{Impulse}$ ชนกันเข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ตามรูปที่ 4.14 และอ่านค่าแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2/50 μs จากด้านแรงต่ำของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 $kV_{Impulse}$ และของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 200 $kV_{Impulse}$ ทั้งชั่วบวกและชั่วลบ

แรงดันค่ายอดที่วัดจากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 200 $kV_{Impulse}$ และแรงดันค่ายอดที่วัดจากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 $kV_{Impulse}$ จะอ่านได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคป ของบริษัท Tektronic รุ่น DPO 4054

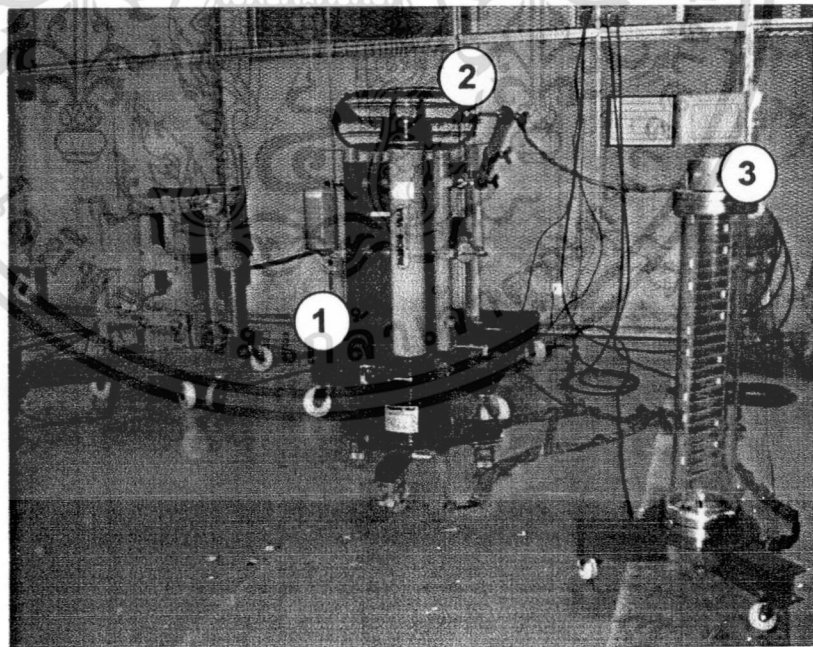
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนการแบ่งแรงดันที่ระดับแรงดันต่างๆ (ทดสอบ 5 ครั้งที่ทุกระดับแรงดัน) ก็คือ อัตราส่วนเฉลี่ยระหว่างแรงดันค่ายอดที่ได้จากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 200 kV_{Impulse} กับแรงดันค่ายอดที่ได้จากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์พิกัด 100 kV_{Impulse}



รูปที่ 4.14 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

โดย IG คือ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 Cb คือ ตัวเก็บประจุไหลดสำหรับปรับรูปคลื่น
 AT คือ ตัวลดทอนแรงดัน
 VD(200kV) คือ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงพิกัด 200 kV
 VD(100kV) คือ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ทำการเปรียบเทียบพิกัด 100 kV



รูปที่ 4.15 วงจรการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2. โวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลท์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV_{Impulse} ต่อร่วมกับตัวลดทอนแรงดัน Attenuator) สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราวที่ระดับแรงดันต่างๆ

ระดับแรงดันทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดอ้างอิง (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน
25	1	25.50	1.19	21430
	2	25.50	1.19	21430
	3	25.50	1.19	21430
	Average	25.50	1.19	21430
50	1	50.10	2.34	21431
	2	50.10	2.34	21431
	3	50.10	2.34	21431
	Average	50.10	2.34	21431
100	1	114.08	5.31	21431
	2	114.08	5.32	21430
	3	114.08	5.32	21430
	Average	114.08	5.32	21430
อัตราส่วนการแบ่งแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว				21430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าอัตราส่วนการแบ่งแรงดันของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV_{Impulse} ต่อร่วมกับตัวลดทอนแรงดัน Attenuator) สำหรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบที่ระดับแรงดันต่างๆ

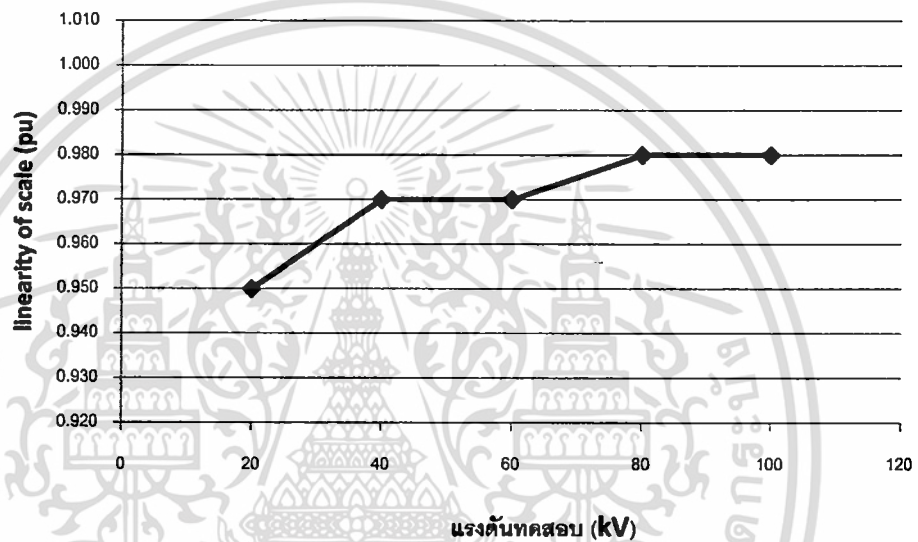
ระดับแรงดันทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดอ้างอิง (kV)	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน
25	1	25.15	1.17	21483
	2	25.00	1.16	21483
	3	25.00	1.16	21482
	Average	25.05	1.16	21483
50	1	50.00	2.33	21482
	2	50.00	2.33	21482
	3	50.00	2.33	21482
	Average	50.00	2.33	21482
100	1	107.70	5.01	21483
	2	107.70	5.01	21483
	3	107.70	5.01	21483
	Average	107.70	5.01	21483
อัตราส่วนการแบ่งแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลบ				21483

4.6 การทดสอบหาค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นนี้ จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่า ตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งานโดยจะทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงเพื่อดูผลของระบบวัด ที่ต้องการทดสอบว่ามีสัญญาณผิดเพี้ยนจากระบบวัดอ้างอิงหรือไม่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับแรงดันที่ทำการทดสอบที่อ่านได้ จากระบบวัดจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ยระบบวัดที่ทำการทดสอบจึงจะถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น [2] ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 – 4.15

ตารางที่ 4.12 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

ระดับแรงดันทดสอบ	อ้างอิง (kV)	สอบเทียบ (kV)	Uref/Uc (kV)
20	19.8	19.80	0.95
40	39.7	39.78	0.97
60	60.1	60.22	0.97
80	80.1	80.21	0.98
100	99.8	99.94	0.98
ค่าเฉลี่ย		0.99	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.00066	

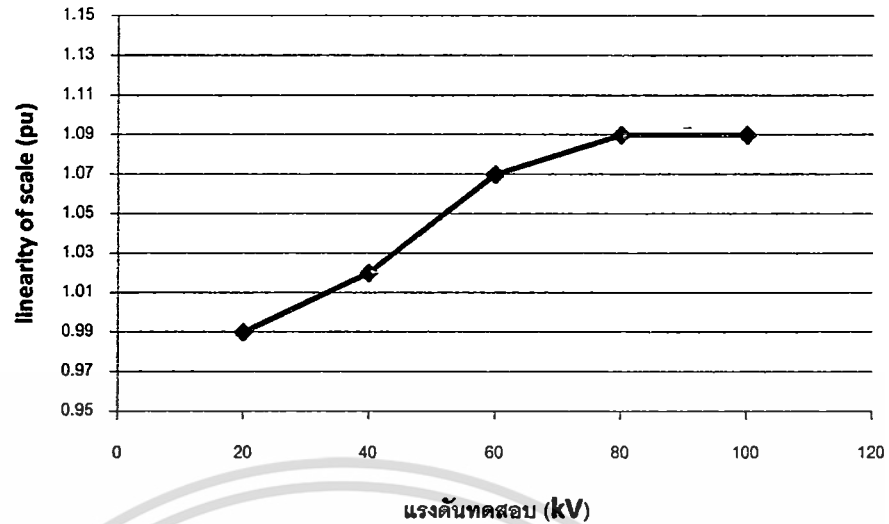


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

ตารางที่ 4.13 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

ระดับแรงดันทดสอบ	อ้างอิง (kV)	สอบเทียบ (kV)	Uref/Uc (kV)
20	20	20.14	0.99
40	40	39.92	1.02
60	60	59.56	1.07
80	80	79.23	1.09
100	100	99.03	1.09
ค่าเฉลี่ย		1.004	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.007	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันกระแสตรง

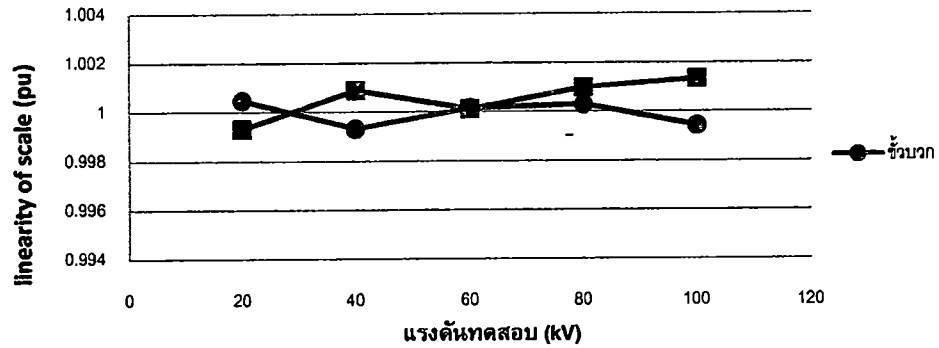
ตารางที่ 4.14 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (ข้าววก)

ระดับแรงดันทดสอบ	อ้างอิง (kV)	สอบเทียบ (kV)	Uref/Uc (kV)
20	20.22	20.21	1.0004
40	40.44	40.47	0.9993
60	60.30	60.29	1.0001
80	80.40	80.38	1.0002
100	113.86	113.93	0.9994
ค่าเฉลี่ย			0.99993
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.00052

ตารางที่ 4.15 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ (ข้าวลบ)

ระดับแรงดันทดสอบ	อ้างอิง (kV)	สอบเทียบ (kV)	Uref/Uc (kV)
20	20.34	20.35	0.9993
40	41.68	41.65	1.0008
60	60.34	60.34	1.0001
80	80.13	80.05	1.0009
100	101.19	101.06	1.0013
ค่าเฉลี่ย			1.0005
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.00081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

4.7 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability Test) ของแรงดันกระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์

4.7.1 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ จะทำการทดสอบทุกระดับแรงดันจนถึงพิกัด จากนั้นปล่อยค่านิวท์ที่พิกัด 10 นาที จากนั้นลดลงแล้ววัดบันทึกทุกระดับแรงดันอีกครั้ง โดยสเกลแพกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ (Stability) ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ระบบวัดแรงดันสูงกระแสสลับ

แรงดันทดสอบ (kV)	ช่วงเริ่มต้น		ป้อนแรงดันทิ้งไว้ 10 นาที		Error (%)
	แรงดัน (V)	Scale factor	แรงดัน (V)	Scale factor	
10	0.4393	22763	0.4394	22760	0.014
20	0.8787	22761	0.8786	22763	0.011
30	1.3180	22762	1.3181	22761	0.005
40	1.7574	22761	1.7573	22762	0.005
50	2.1968	22760	2.1969	22759	0.005
60	2.6358	22763	2.6357	22764	0.004
70	3.0755	22761	3.0756	22760	0.003
80	3.5149	22760	3.5147	22762	0.006
90	3.9539	22762	3.9532	22766	0.018
100	4.3931	22763	4.3935	22761	0.009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสตรง จะทำการทดสอบทุกระดับแรงดันจนถึงพิกัด จากนั้นปล่อยค้ำไว้ที่พิกัด 10 นาที จากนั้นลดลงแล้วจับบันทึกทุกระดับแรงดันอีกครั้ง โดยสเกลแพกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ(Stability) ของโวลต์เตจดีไวเดอร์ระบบวัดแรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันทดสอบ (kV)	ช่วงเริ่มต้น		บ่อนแรงดันทิ้งไว้ 10 นาที		Error (%)
	แรงดัน (V)	Scale factor	แรงดัน (V)	Scale factor	
10	0.4665	21436	0.4666	21432	0.021
20	0.9330	21436	0.9331	21434	0.011
30	1.3995	21436	1.3996	21435	0.007
40	1.8660	21436	1.8663	21433	0.016
50	2.3328	21433	2.3325	21436	0.013
60	2.7995	21432	2.7994	21433	0.004
70	3.2660	21433	3.2665	21430	0.015
80	3.7320	21436	3.7326	21433	0.016
90	4.1990	21434	4.1996	21431	0.014
100	4.6660	21432	4.6666	21429	0.013

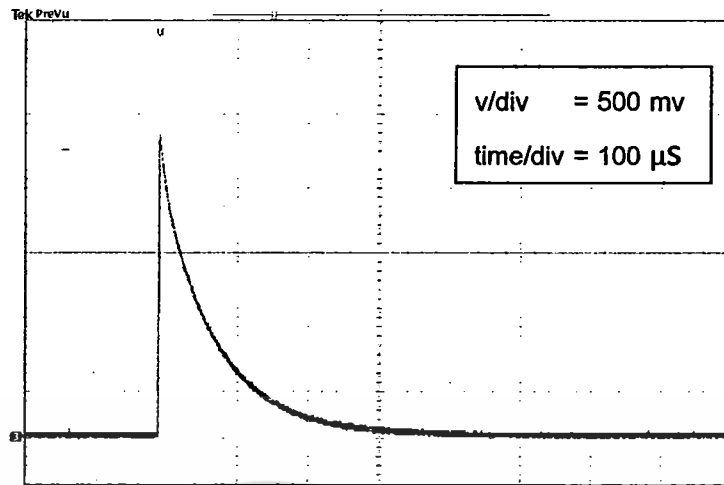
4.7.3 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพของระบบวัดแรงดันสูงอิมพัลส์

ในกรณีวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นค่าสเกลแพกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน $\pm 1\%$ ตลอดช่วงแรงดันใช้งานในกรณีวัดค่ายอดของ ในการทดสอบในหัวข้อนี้ได้มีการทดสอบความมีเสถียรภาพโดยทำการทดสอบทั้งในชั่วลบและชั่วบวกจำนวน 15 ครั้ง วงจรที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อนี้ใช้วงจรเดียวกับวงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (linearity test) และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.18

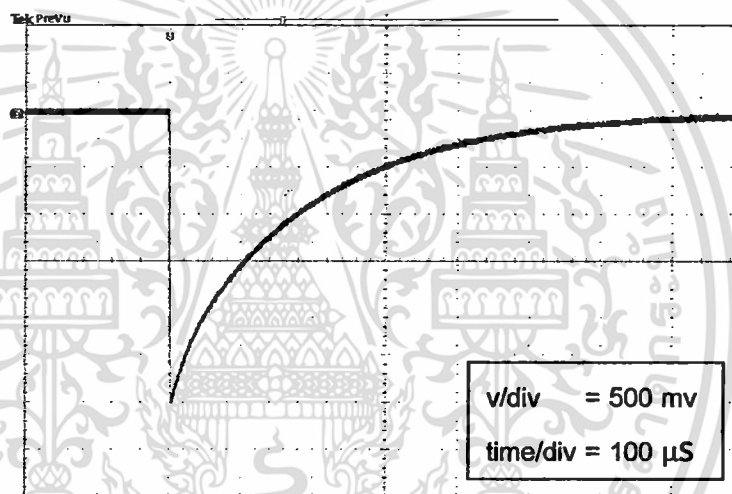
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ(Stability) ของโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ โดยใช้รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ S

	แรงดันทดสอบ (kV)	ครั้งที่	ระบบวัดสอบเทียบ (V)	อัตราส่วนการแบ่งแรงดัน	Error (%)
ขั้ว +	25	1	1.19	21431	0.0047
		2	1.19	21431	0.0047
		3	1.19	21431	0.0047
	50	1	2.34	21431	0.0047
		2	2.34	21431	0.0047
		3	2.34	21431	0.0047
	100	1	5.32	21432	0.0093
		2	5.32	21432	0.0093
		3	5.32	21432	0.0093
ขั้ว -	25	1	1.17	21482	0.0047
		2	1.16	21480	0.0140
		3	1.16	21480	0.0140
	50	1	2.33	21482	0.0047
		2	2.33	21482	0.0047
		3	2.33	21482	0.0047
	100	1	5.01	21485	0.0093
		2	5.01	21485	0.0093
		3	5.00	21484	0.0047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



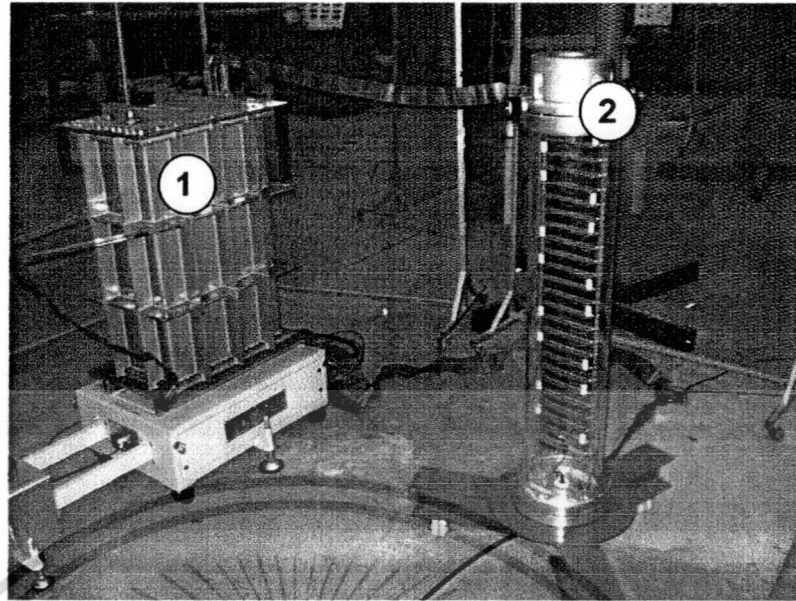
รูปที่ 4.19 ออสซิลโลกราฟผลการทดสอบความมีเสถียรภาพต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน รูปคลื่นเต็มแบบ 1.2/50 μ s ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110 kV (ชั่วคราว)



รูปที่ 4.20 ออสซิลโลกราฟผลการทดสอบความมีเสถียรภาพต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน รูปคลื่นเต็มแบบ 1.2/50 μ s ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110 kV (ชั่วลบ)

4.8 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (AC Withstand Test)

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวนในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัด เป็นเวลา 1 นาที [2] ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และผลการทดลองดังตารางที่ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดับ

1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสดับ 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

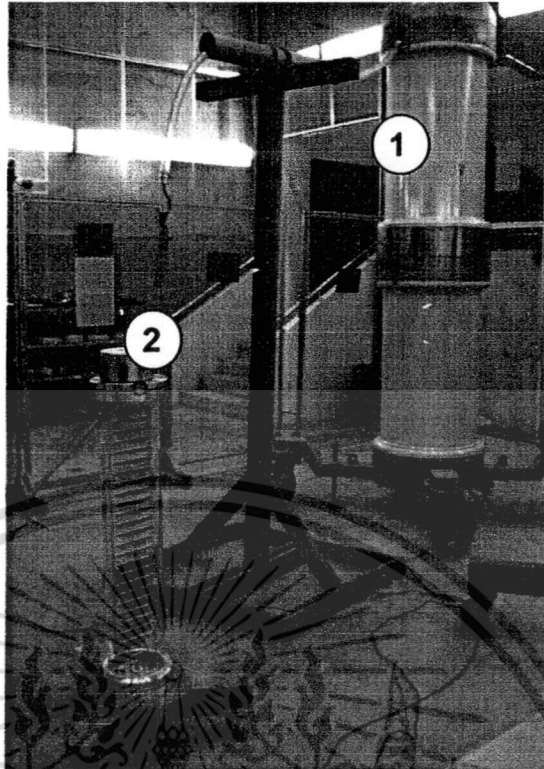
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดับ

ครั้งที่	ผลการทดสอบ
1	ผ่าน
2	ผ่าน
3	ผ่าน

4.9 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดตรง (DC Withstand Test)

เป็นการทดสอบว่าวัสดุฉนวนหรือการฉนวนของอุปกรณ์สามารถคงทนต่อแรงดันเกินกระแสดตรงได้หรือไม่ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวน์ในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันกระแสดตรง ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดตรงด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัด เป็นเวลา 1 นาที [2]

การทดสอบจะทดสอบด้วยแรงดันกระแสดตรงสลับ โดยป้อนที่ 110% ของพิกัด หรือ 110 kV ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และผลการทดลองดังตารางที่ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดตรง
1. เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสดตรง 2. โวลต์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสดตรง

ครั้งที่	ผลการทดสอบ
1	ผ่าน
2	ผ่าน
3	ผ่าน

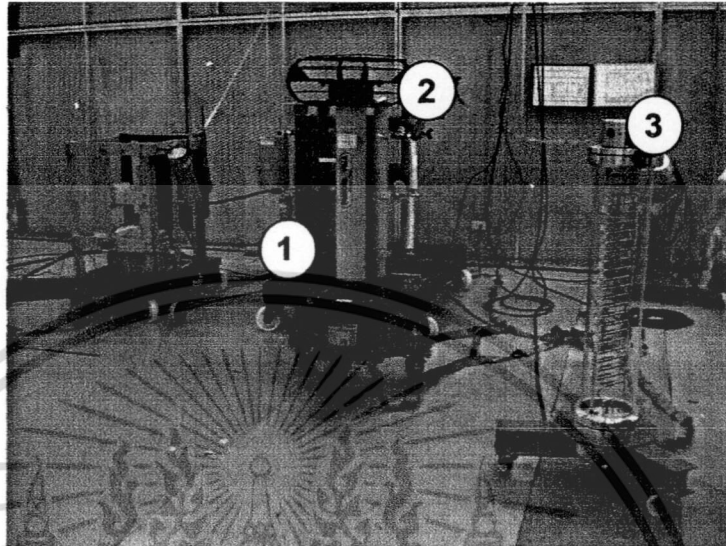
4.10 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Test)

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรกดาวนในขณะที่ใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นจึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ด้วยค่าแรงดัน 110% ของแรงดันพิกัด [2]

การทดสอบฉนวนที่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังเกิดเบรกดาวน จะทดสอบด้วย แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นที่กำหนดทั้งชั่วคราวและชั่วคราว จำนวน 15 ครั้ง ที่ระดับแรงดันที่กำหนด ถ้ามีการเบรกดาวนหรือวาบไฟตามผิวเกิดขึ้นไม่เกิน 2 ครั้ง จะถือว่าฉนวนนั้นผ่านการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีค่าแรงดันพิกัด 100 kV จึงทดสอบตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานขนาด 110 kV ทั้งชั่วคราวและชั่วคราวจำนวน 15 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

1. เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 2. โวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง 3. โวลท์เตจดีไวเดอร์สอบเทียบ

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (ชั่วคราว)

ครั้งที่	ผลการทดสอบ
1	ผ่าน
2	ผ่าน
3	ผ่าน

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (ชั่วคราว)

ครั้งที่	ผลการทดสอบ
1	ผ่าน
2	ผ่าน
3	ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 การวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์

การวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [2] ได้กำหนดวิธีการทดสอบอ้างอิงคือ ใช้วิธีการวัดเปรียบเทียบกับระบบอ้างอิงโดยถ้าเป็นไปได้ให้ทดสอบที่แรงดันวัดพิกัดแต่โดยทั่วไประบบวัดอ้างอิงจะมีค่าแรงดันพิกัดที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการวัดเปรียบเทียบอาจจะทำที่ระดับแรงดันอย่างน้อย 20 % ของแรงดันพิกัดได้

พารามิเตอร์เวลาจะต้องอยู่ในเงื่อนไข ดังนี้

- 1) ค่าพารามิเตอร์เวลาจะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 10\%$ ของค่าที่วัดได้จากระบบอ้างอิง
- 2) อัตราส่วนของค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบกับระบบอ้างอิง จะต้องมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 5 % ของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μ s ชั่วบวก

ลำดับ	Up(kV)			T ₁			T ₂		
	S	M	S/M	S	M	S/M	S	M	S/M
1	51.99880	48.14047	1.080147	1.329	1.128	1.178191	55.6	43.6	1.275229
2	52.84776	48.40232	1.091844	1.265	1.128	1.121454	54.4	42.1	1.292162
3	52.60899	48.72460	1.079721	1.252	1.152	1.086806	55.4	41.7	1.328537
4	52.84776	48.72460	1.084622	1.225	1.162	1.054217	53.6	43.1	1.243619
5	52.84776	48.48289	1.090029	1.285	1.185	1.084388	56.2	42.7	1.316159
6	52.84776	48.56346	1.088221	1.255	1.169	1.073567	56.4	42.1	1.339667
7	53.06000	48.56346	1.092591	1.212	1.172	1.034413	52.4	42.9	1.221445
8	53.06000	48.56346	1.092591	1.221	1.178	1.036503	53.5	42.7	1.252927
9	52.84776	48.72460	1.084622	1.275	1.131	1.127321	56.3	42.6	1.321596
10	52.84776	48.74000	1.084279	1.257	1.145	1.097817	55.2	42.5	1.298824
ค่าเฉลี่ย	1.086543			1.089439			1.289017		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.004889			0.044464			0.039653		

เมื่อ S คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง

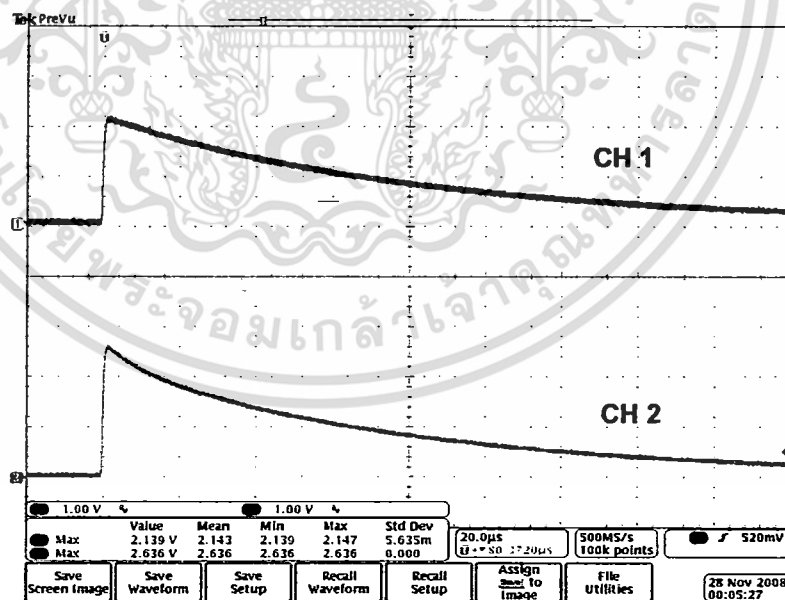
M คือ โวลต์เตจดีไวเดอร์ปรับเทียบ

S/M คือ อัตราส่วนระหว่างโวลต์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงและโวลต์เตจดีไวเดอร์ปรับเทียบ

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานรูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μ s ขั้วลบ

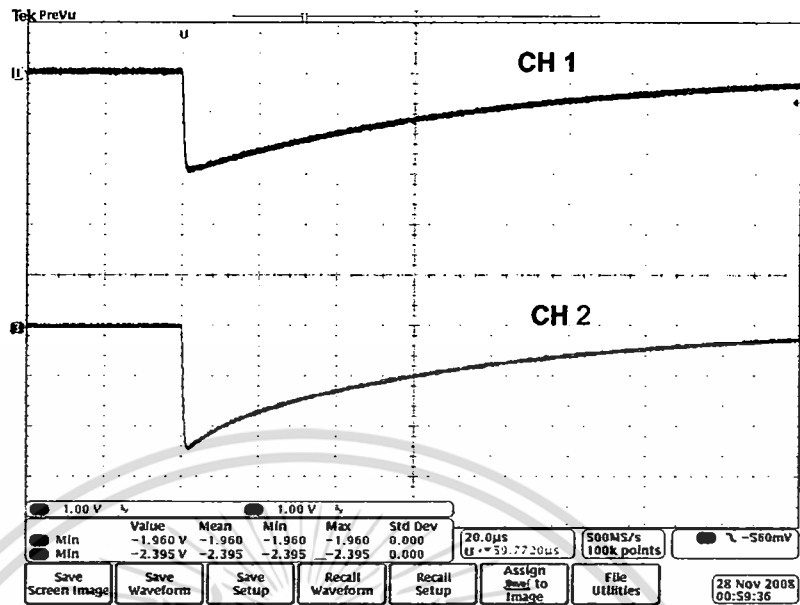
ลำดับ	Up(kV)			T_1			T_2		
	S	M	S/M	S	M	S/M	S	M	S/M
1	57.17215	51.20353	1.116567	1.262	1.189	1.061396	57.3	45.4	1.262115
2	57.17215	51.57816	1.108457	1.302	1.175	1.108085	56.6	45.2	1.252212
3	56.82726	51.92159	1.094482	1.275	1.185	1.075949	57.2	47.4	1.206751
4	56.53543	51.92159	1.088862	1.24	1.120	1.107143	54.6	44.3	1.232506
5	57.17215	51.66402	1.106614	1.174	1.133	1.036187	57.2	45.8	1.248908
6	56.74767	51.74987	1.096576	1.153	1.189	0.969722	54.6	45.9	1.189542
7	56.74767	51.74987	1.096576	1.336	1.192	1.120805	57.2	45.5	1.257143
8	56.95991	51.74987	1.100677	1.210	1.180	1.025424	62.1	46.9	1.324094
9	57.17215	51.92159	1.101125	1.275	1.189	1.07233	60.9	46.7	1.304069
10	57.17215	52.09330	1.097495	1.175	1.155	1.017316	58.5	45.5	1.285714
ค่าเฉลี่ย	1.100743			1.059436			1.256035		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.007959			0.047576			0.041267		

เมื่อ S คือ โวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง
M คือ โวลท์เตจดีไวเดอร์ปรับเทียบ
S/M คือ อัตราส่วนระหว่างโวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิงและโวลท์เตจดีไวเดอร์ปรับเทียบ



รูปที่ 4.24 ผลการวัดปรับเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μ s ขั้วบวก โดย CH1 วัดจากโวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง CH2 วัดจากโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการปรับเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลการวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม 1.2/50 μ s ขั้วลบ โดย CH1 วัดจากโวลท์เตจดีไวเดอร์อ้างอิง CH2 วัดจากโวลท์เตจดีไวเดอร์ที่ทำการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุป

จากการทดสอบความสามารถของระบบวัดแรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย ซึ่งเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด[2] โดยระบบวัดที่ออกแบบสร้างมีสเกลแพกเตอร์ในการวัดแรงดันกระแสสลับ 22761 สเกลแพกเตอร์ในการวัดแรงดันกระแสตรง 21433 สเกลแพกเตอร์ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว 21430 สเกลแพกเตอร์ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ชั่วพล 21483 ซึ่งในกรณีในการวัดแรงดันอิมพัลส์ทั้งสองชั่วคราวพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเวลามีค่าน้อยกว่า 5 % และความคลาดเคลื่อนของค่ายอดแรงดันน้อยกว่า 1% ซึ่งสามารถวัดรูปคลื่นไฟฟ้าผ่านมาตรฐาน 1.2/50 μ s

5.2 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณนายโกสินทร์ คล่องเชิงสาร, นายเพทาย นิมสนอง, นายภูษิต ถึงสุข, นายสุชาติ มณฑปใหญ่, นายนิจรนกร สุระพร ซึ่งได้ช่วยเหลือในการทดสอบอุปกรณ์วัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ สำหรับวัดแรงดันกระแสสลับ, แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ และสุดท้ายขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย รวมทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้จัดสรรงบประมาณสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC Publication No.71, "Insulation Co-ordination", 1976.
- [2] IEC 60 – 2, "High Voltage test technique" Part 2: Measuring System, 1994.
- [3] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2547.
- [4] วรา จุห์อง, "การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์" วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2524.
- [5] วิชัย เตยวงศ์ศักดิ์ "การออกแบบและสร้างโวลต์เตจดีไวเดอร์ขนาด 400 กิโลโวลต์ แบบตัวเก็บประจุ" วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2530.
- [6] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, "การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์ ขนาด 1000 กิโลโวลต์" วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี 2539.
- [7] E.Kuffel and Zaengl, W.S. "High Voltage Engineering Fundamental", Pergamon Press Ltd., Oxford, 1st ed., 1984.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ขนาดแรงดันทดสอบมาตรฐาน BIL

การเลือกขนาดแรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับระดับการฉนวน (Insulation level) นั่นคือ ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จะนำเอาอุปกรณ์หรือวัสดุนั้นๆ ไปใช้งาน

ตาราง ก-1 มาตรฐานการทดสอบฉนวน BIL

Highest voltage for equipment (kV _{r.m.s})	Rated lightning impulse withstand voltage (kV _{peak})
3.6	40
7.2	60
12	75
17.5	95
24	125
36	170
52	250
72.5	325
100	380
123	450
145	550
170	650
245	1050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การวัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

1. ข้อกำหนดสำหรับการรับรองระบบการวัด

- 1.1 การวัดค่าสูงสุดของอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม จะต้องมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1\%$
- 1.2 การวัดค่าสูงสุดของอิมพัลส์รูปคลื่นหน้าตัด มีข้อกำหนดในส่วนข้อผิดพลาด ดังนี้

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นมีค่าผิดพลาด $\leq \pm 5\%$

$$0.5\mu S \leq T_c < 2\mu S$$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หลังคลื่นมีค่าผิดพลาด $\leq \pm 3\%$

$$T_c \geq 2\mu S$$

- 1.3 ค่าพารามิเตอร์ของเวลาจะต้องไม่เกินค่าผิดพลาด $\pm 10\%$ ของค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง

2. ความมีเสถียรภาพของค่าสเกลแฟกเตอร์

สเกลแฟกเตอร์ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 1\%$ สำหรับช่วงการวัดในอุณหภูมิล้อมรอบ

3. คุณสมบัติทางพลศาสตร์

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของระบบวัด จะต้องสามารถวัดค่าแรงดันสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ของเวลาเกินช่วงเวลาของรูปคลื่นโดย

- 3.1 ค่าสเกลแฟกเตอร์จะต้องมีค่า ตามข้อกำหนดดังนี้

ภายใน $\pm 1\%$ สำหรับอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดหลังคลื่น

ภายใน $\pm 3\%$ สำหรับอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

- 3.2 ค่าผิดพลาดของพารามิเตอร์ทางเวลา จะต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 10\%$

4. การหาค่าของสเกลแฟกเตอร์ สามารถทดสอบโดยวิธีดังต่อไปนี้

- 4.1 ทำการวัดแรงดันอินพุทและเอาท์พุทในเวลาเดียวกัน
- 4.2 ใช้วงจรมีปริมาตร
- 4.3 คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์

5. การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดจะวัดที่ค่าแรงดันต่ำสุดและค่าแรงดันสูงสุดของช่วงการทำงาน มีการทดสอบทั้งชั่วคราวและซ้ำลบบ มีการวัดแรงดันทดสอบค่าละ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบแต่ละค่า ซึ่งการทดสอบทำได้ 4 วิธีคือ

- 5.1 ทดสอบเปรียบเทียบกับแกปทรงกลม

5.2 ทดสอบปรับเทียบกับโวลท์เตจดีไวเดอร์มาตรฐาน

5.3 ทดสอบปรับเทียบกับแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

5.4 ทดสอบปรับเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

6. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

ทำการทดสอบที่ 110 % ของค่าแรงดันพิกัด โดยการเบรกดาวหรือวาบไฟตามผิว
เกิดขึ้นได้ไม่เกิน 2 ครั้ง จึงถือว่าผ่านการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้