

การออกแบบ และ สร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนาด 300 กิโลโวลต์



นาย อรรณพ ลิ้มสีมารัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

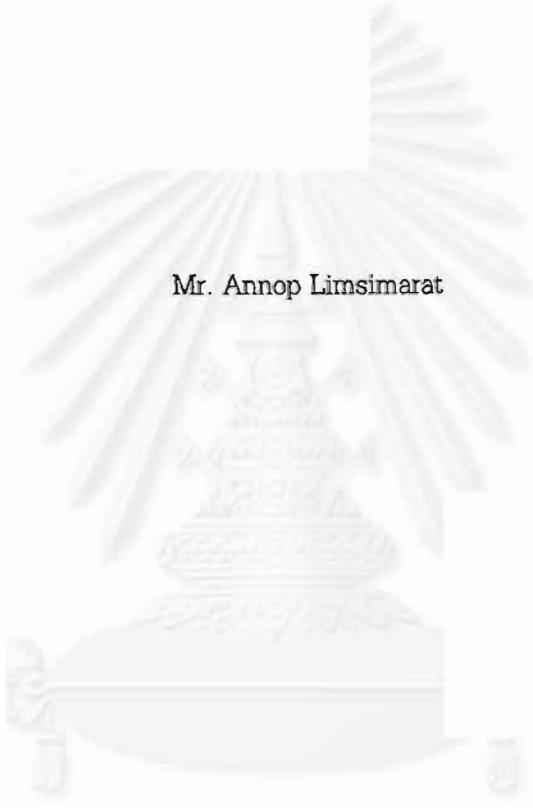
ISBN 974-332-720-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

118831552

20 พ.ย. 2545

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER



Mr. Annop Limsimarat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-332-720-7

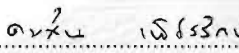
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบ และ สร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง
ขนาด 300 กิโลโวลต์
โดย นายอรรถนพ ลิ่มสีมารัตน์
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

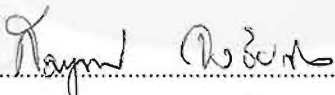
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

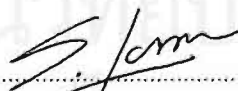

..... รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย คงจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

อรรถพงษ์ ลิ้มสีมารัตน์ : การออกแบบ และสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง ขนาด 300 กิโลโวลต์
(DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER)
อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ ,76 หน้า. ISBN 974-332-720-7

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอผลการออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV แบบความต้านทาน ภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ประกอบด้วยความต้านทานขนาดประมาณ 7 k Ω ทำจากลวด Ni-Cr เคลือบฉนวน 2 เส้นพันอยู่บนท่ออะคริลิกใสแล้วนำไปใส่ในท่อพีวีซีอีกชั้นหนึ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายนอก ส่วนภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ประกอบด้วยความต้านทานขนาดประมาณ 7 โอห์ม ทำจากลวด Ni-Cr เช่นเดียวกัน โดยทำเป็นแถบรูปดาวบนแผ่นปรีนเซอร์กิตบอร์ด และใส่อยู่ในกระบอกทองเหลืองเพื่อลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สายนำแรงสูงทำจากท่ออลูมิเนียมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm. ยาวประมาณ 1.5 m และความต้านทานหน่วยมีค่าประมาณ 280 Ω ทำจากลวด Ni-Cr เคลือบฉนวนพันในลักษณะเดียวกันกับความต้านทานภาคแรงสูง และตัวลวดทองทำจากความต้านทานแบบฟิล์มโลหะมีค่าสเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 12.3 จากการคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ร่วมกับตัวลวดทองมีค่าประมาณ 13807 คุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ทำได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60-2 :1994 ได้แก่ ผลตอบสนองรูปคลื่น, การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด, พฤติกรรมพลศาสตร์, ความเป็นเชิงเส้น และความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดัน 110% ของแรงดันพิกัด โดยทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง ผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่า อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนด

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา ๒๕๔๒

ลายมือชื่อนิสิต อรรถพงษ์ ลิ้มสีมารัตน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.วิ. เสงี่ยม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

3972406721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: IMPULSE VOLTAGE DIVIDER /BIL

ANNOP LIMSIMARAT: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 300 kV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER. THESIS ADVISOR: Dr. KOMSON PETCHARAKS. 76 pp. ISBN 974-332-720-7

This thesis reports the design and construction of a 300 kV reference impulse voltage divider, a resistive type. The high voltage part, which has a resistance (R_H) of about 7 k Ω , is constructed by using 2 insulated Ni-Cr wires wound on an acrylic tube in a special manner. This high voltage part is installed in a 200 mm. PVC tube housing to avoid environmental effects. The low voltage part, which has a resistance (R_L) of about 7 Ω , is also constructed by using Ni-Cr wires. The construction is however differ from the high voltage part as Ni-Cr wires were arranged in a star configuration on a printed circuit board. The low voltage part is installed in a brass housing the reduce to electromagnetic interference effect. The high voltage lead of the voltage divider is built by using a 50 mm. diameter aluminum tube. The damping resistor, which has a resistance (R_D) of about 280 Ω , is built in the same manner as the high voltage part. Attenuator, made of metal film resistor has a scale factor about 12.3. By calculation, the scale factor of a voltage divider is about 13807, included attenuator. The impulse voltage divider was characterized in accordance with IEC 60-2:1994, which are step response measurement, scale factor, dynamic behavior, linearity and withstand voltage tests at 110 % of rated voltage. The comparative measurement between reference universal voltage divider and the voltage divider was carried out. The test results show that the impulse voltage divider characteristics meet the requirements of IEC 60-2:1994.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา..... ๒๕๕๒

ลายมือชื่อนิสิต..... อรรถพร สันติสุขวัฒนา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อ.ดร. วิมล วัฒนศิริ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้วิจัย ขอขอบคุณ อาจารย์คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี , ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ได้ให้การช่วยเหลือด้านทุนวิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณ ท.ก.จ. เบญจมงคลอิเล็กทรอนิกส์ และ บริษัท ทองรัชมีอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เคลือบฉนวนลดความต้านทานอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้อย่างมาก รวมทั้งขอขอบคุณ คุณถาวร เอื้อดี คุณวิหวัศ งามประดิษฐ์ คุณเกรียงไกร โอธูธนู ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ศึกษากรรมไฟฟ้าแรงสูงรวมทั้งเพื่อนๆ และน้องๆ อีกหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และ ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

อรอนพ ลิ้มสีมารัตน์
กรกฎาคม 2542



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 ผลงานการศึกษาในอดีต	2
1.3 ขอบข่ายงานวิจัย	3
1.4 เนื้อหาของงานวิจัย	3
2. หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์	4
2.1 วงจรพื้นฐานในการวัดแรงดันอิมพัลส์	4
2.2 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด	5
2.2.1 ผลตอบสนองรูปขึ้น	6
2.2.2 ตัวคูณ	10
2.2.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์อ้างอิง	10
2.2.2.2 การหาค่าตัวคูณ	11
2.3 โวลเตจดีไวเดอร์	12
2.3.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน	12
2.4 การต่อแม่ทึงในภาคแรงต่ำของระบบวัด	13
3. การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์	14
3.1 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง	14
3.1.1 การคำนวณความยาวของลวดความต้านทาน	16
3.1.2 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่ม	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำ	17
3.2.1 คุณลักษณะที่ต้องการ	17
3.2.2 การเลือกแรงดันขาออก	18
3.2.3 ความต้านทานภาคแรงต่ำ	19
3.3 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน (Attenuator)	20
3.3.1 การเลือกแรงดันขาออก	21
3.3.2 ตัวลดทอนแบบความต้านทาน	21
3.4 การเลือกสายเคเบิล และ หัวต่อ	22
3.5 การออกแบบและสร้างความต้านทานหน่วง	23
4. การทดสอบและประเมินผล	24
4.1 การหาผลตอบสนองรูปขึ้น	24
4.1.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบต่างๆ	25
4.1.2 ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ	27
4.1.3 การหาผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อใส่ซีลด์กับไวลเตจดีไวเดอร์	29
4.1.4 การหาผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลดทอน	32
4.2 การหาค่าตัวคูณ	34
4.3 การหาค่าตัวคูณที่กำหนด (Assigned Scale Factor) และ การทดสอบพฤติกรรมพลศาสตร์ (Dynamic behavior test)	35
4.3.1 ผลการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม	37
4.3.2 ผลการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด	40
4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)	49
4.5 การทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น (Short term Stability)	50
4.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Withstand Test)	50
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุป	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง	55
ภาคผนวก ก.	57
ภาคผนวก ข.	58
ภาคผนวก ค.	67
ภาคผนวก ง.	74
ประวัติผู้เขียน	76



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์เวลาตอบสนองรูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง	10
4.1 พารามิเตอร์เวลาตอบสนองรูปคลื่นเมื่อเปลี่ยนความต้านทานภาคแรงต่ำ R_2 ที่ความต้านทานหน่วง 283.8 โอห์ม	25
4.2 พารามิเตอร์เวลาตอบสนองรูปคลื่นเมื่อเปลี่ยนความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ (ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2)	27
4.3 พารามิเตอร์เวลาตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อใส่ซีลด์แบบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ที่ค่าความต้านทานหน่วง 283.8 โอห์ม	32
4.4 ค่าความต้านทานขององค์ประกอบต่างๆในระบบวัดแรงดัน (อุณหภูมิ 26 C)	34
4.5 ผลตอบสนองรูปคลื่นเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วง.....	35
4.6 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นเต็ม ที่ t_{min} และ t_{max}	37
4.7 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ที่ t_{min} และ t_{max}	40
4.8 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ที่ t_{min} และ t_{max}	40
4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง ขั้วบวก	49
4.10 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง ขั้วลบ	49
4.11 ผลการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น	50
5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 300 kV	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรรพื้นฐานในการวัดแรงดันอิมพัลส์ 4
2.2	วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) 6
2.3	ขายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด 6
2.4	นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง 8
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_a/T_x 9
2.6	ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่มีต่อตัวคูณของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน 11
2.7	วงจรมุมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน 12
3.1	ภาพการผันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ 15
3.2	ความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ 18
3.3	ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 1 19
3.4	ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2 19
3.5	ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 3 19
3.6	ความต้านทานภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จ 20
3.7	วงจรมุมูลของตัวลวดทอนแบบความต้านทาน 21
3.8	ตัวลวดทอนแบบความต้านทานที่ประกอบสร้างขึ้น 22
3.9	ความต้านทานหน่วงที่พ้นเสร็จแล้ว 23
3.10	โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานที่ประกอบเสร็จแล้ว 23
4.1	วงจรหาผลตอบสนองรูปขึ้น 24
4.2	ออสซิลโลกราฟของรูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น 24
4.3	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างขึ้น 25
4.4	ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อใช้ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 1,2 และ 3..... 26
4.5	รูปผลตอบสนองรูปขึ้นหลังจากทำการแก้ไขแล้ว และใช้ความต้านทานหน่วง 283.8 โอห์ม 27
4.6	ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ 28
4.7	การกระจายของแรงดันจากการจำลองแบบซัลต์ทัง 3 แบบ ด้วยโปรแกรม Maxwell ที่ความถี่ 10 MHz 30
4.8	การหาผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์โดยใส่ซัลต์แบบที่ 3 ที่ทดลองสร้างขึ้นจริง 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีไวเซอร์เมื่อใส่ซิลด์แบบที่ 1, 2 และ 3	31
4.10 วงจรหาผลตอบสนองรูปชั้นของตัวลวดทอง	32
4.11 ผลตอบสนองรูปชั้นของตัวลวดทองแบบความต้านทาน	33
4.12 วงจรสมมูลในการหาตัวคูณของระบบวัดแบบความต้านทาน	35
4.13 การติดตั้งระบบวัดแบบ Y ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ	36
4.14 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{min} ..	38
4.15 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{min}	38
4.16 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{max} ..	39
4.17 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{max}	39
4.18 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{min}	41
4.19 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{min}	42
4.20 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{max}	43
4.21 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{max}	44
4.22 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{min}	45
4.23 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{min}	46
4.24 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{max}	47
4.25 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{max}	48
4.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่	
4.27 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วบวของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน	51
4.28 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วลบของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน	52





บทที่ 1.

บทนำ

อุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต้องมีความเชื่อถือได้ การพิจารณาความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์เหล่านั้น อาจประกอบไปด้วย การออกแบบที่ดี หรือ จากบริษัทผู้ผลิตที่มีชื่อเสียง ฯลฯ แต่ท้ายที่สุดการพิจารณาความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ก่อนที่จะนำไปติดตั้งในระบบก็คือ การทดสอบ ซึ่งการทดสอบนั้นมีหลายประเภททั้ง ทางกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อน ฯลฯ

การทดสอบและการวัดนั้นจำเป็นต้องมีห้องทดสอบที่ได้มาตรฐาน โดยใช้เครื่องมือทดสอบที่มีความแม่นยำซึ่งขึ้นกับระดับความแม่นยำที่ต้องการ นั่นก็หมายความว่าเครื่องมือทดสอบเหล่านั้นต้องได้รับการสอบเทียบเป็นประจำ ซึ่งสามารถทำได้เองหรือส่งไปสอบเทียบที่สถาบันอื่น แต่ห้องสอบเทียบที่ได้รับการยอมรับก็ต้องผ่านมาตรฐาน IEC/ISO GUIDE 25 ซึ่งเกี่ยวข้องกับมาตรฐานห้องสอบเทียบโดยตรง ห้องสอบเทียบดังกล่าวนอกจากจะได้มาตรฐานแล้ว จำเป็นต้องมีเครื่องมือสอบเทียบที่ได้มาตรฐานอีกด้วย

ในบรรดาหัวข้อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเป็นหัวข้อทดสอบที่สำคัญรายการหนึ่ง (อุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบสูงสุดไม่เกิน 300 kV มาตรฐานกำหนดการทดสอบการฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ซึ่งเรียกว่า Basic Impulse Insulation Level (BIL) [1]) เนื่องจากค่ายอดแรงดันดังกล่าวมีขนาดสูงเราจำเป็นที่จะต้องลดทอนขนาดแรงดันลงมาถึงระดับพิกัดของเครื่องวัดทางด้านแรงต่ำ (โวลมิเตอร์วัดค่ายอด หรือ ออสซิลโลสโคป) และเราสามารถทราบค่าแรงดันสูงได้จากการคำนวณโดยนำค่าแรงดันทางด้านแรงต่ำที่วัดได้คูณกับสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

1.1 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีโรงงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศหลายแห่งที่มีห้องทดสอบซึ่งสามารถทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์เป็นของตัวเองและระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ก็ต้องมีการสอบเทียบเป็นประจำ ในปัจจุบันยังไม่มีสถาบันใดภายในประเทศที่สามารถสอบเทียบอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่มีความแม่นยำสูงได้ (ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงของจุฬาฯสามารถสอบเทียบความถูกต้องได้เพียง $\pm 3\%$ เท่านั้น) ดังนั้นห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงของจุฬาฯจึงมีโครงการที่จะพัฒนาสร้างระบบวัดแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงขึ้นเพื่อใช้เป็นระบบอ้างอิงในการสอบเทียบระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ และ เป็นที่ทราบกันดีว่าองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์

พัลส์ก็คือโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจึงเริ่มพัฒนาระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยการ ออกแบบ และ สร้างโวลเตจดีไวเดอร์ดังกล่าวขึ้น

1.2 ผลงานการศึกษาในอดีต

ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงได้เคยออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบต่างๆ ดังนี้

1.) แบบความต้านทานขนาด 300 kV โดยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานที่สร้างขึ้นได้ค่า เวลาตอบสนอง 17 ns และ เมื่อใส่ซิลด์จะได้เวลาตอบสนอง 10 ns ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์รูป คลื่นฟ้าผ่าทั้งรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น [2]

2.) แบบตัวเก็บประจุที่ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นตัวเก็บประจุเดี่ยวขนาด 400 kV ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า แต่มีข้อเสียคือใช้ตัวรูปคลื่นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ไม่ดีนัก เช่น แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น [3]

3.) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน้าขนาด 400 kV โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความ ต้านทานกระจายในภาคแรงสูงมีข้อดีคือ ใช้บันทึกรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดีเนื่องจากใน สภาวะทรานเซียนต์โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้มีคุณสมบัติการถ่ายโอนเหมือนกับโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้าน ทาน และการใส่ค่าความต้านทานหน้าภายนอกอย่างเดียวจะให้เวลาตอบสนองที่ช้ามาก [4]

4.) แบบความต้านทานขนาด 1000 kV โดยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ แบบความต้านทานที่สร้างขึ้นได้ ค่าเวลาตอบสนองเมื่อใส่ซิลด์ 14 ns ความต้านทานภาคแรงสูงใช้ลดความต้านทานไม่เคลือบฉนวนพื้นแบบไร้ ความเหนียวนาโดยกันระหว่างชั้นด้วยฉนวนไมลา ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดชั้นแรกจะไม่เท่ากับขด ลวดชั้นที่ 2 ทำให้การหักล้างของสนามแม่เหล็กทำได้ไม่ดีพอ นอกจากนั้นระดับแรงดันที่ใช้มีค่าสูงเกินไปทำให้ ไม่สามารถใช้เป็นโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [5] ได้ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าส เทรย์มีค่ามากขึ้นตามความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ [6]

5.) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน้าขนาด 1000 kV โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความ ต้านทานกระจายในภาคแรงสูง โดยความต้านทานหน้าต่ออนุกรมอยู่นี้จะหน่วงการแกว่งเนื่องจากการสะท้อน ภายในโวลเตจดีไวเดอร์เท่านั้น และยังคงต้องใช้ความต้านทานหน้าภายนอกเพื่อหน่วงการแกว่งที่เกิดจากการเร โซแนนซ์ของระบบวัด โดยได้ค่าเวลาตอบสนอง 16 ns [6]

จากผลงานการศึกษาที่ผ่านมาข้างต้นนั้นยังไม่ได้มีการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดของโวลเตจดีไว เดอร์, การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของโวลเตจดีไวเดอร์ และ การหาค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) โดย การเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60-2,1994 และ เวลาผลตอบสนองรูปขึ้นยังช้าเกินไป

1.3 ขอบข่ายงานวิจัย

ทำการออกแบบและประกอบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้าอิงขนาด 300 kV ประเภทความต้านทาน โดยใช้ลวด Ni-Cr พันแบบไร้ความเหนียวนำเป็นตัวต้านทานภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำ และ ทำการทดสอบอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

1.4 เนื้อหาของงานวิจัย

บทที่ 2 จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ วงจรพื้นฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์ คุณสมบัติที่ต้องการ ค่านิยม และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ส่วนบทที่ 3 จะกล่าวถึงข้อกำหนดในการออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-2(1994) และใช้ความรู้ทางทฤษฎีจากบทที่ 2. ในการออกแบบอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้าอิงแบบความต้านทาน ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์อ้าอิงตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนดให้สามารถใช้โวลเตจดีไวเดอร์อ้าอิงสอบเทียบระบบวัดอื่นๆที่ระดับแรงดันอย่างต่ำ 20 % ของระดับแรงดันใช้งานของระบบวัดนั้นๆ และเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีระดับแรงดันที่กำหนด 1400 kV ดังนั้นจึงเลือกระดับแรงดันโวลเตจดีไวเดอร์อ้าอิงที่ออกแบบสร้างที่ 300 kV สามารถใช้สอบเทียบระบบวัดอื่นๆได้ที่ระดับแรงดันถึง 1500 kV ต่อมาในบทที่ 4 จะเป็นการทดสอบ และประเมินผลของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน IEC 60-2,(1994) และส่วนในบทที่ 5 จะเป็นการสรุป และข้อเสนอแนะต่างๆ ของงานวิจัยนี้



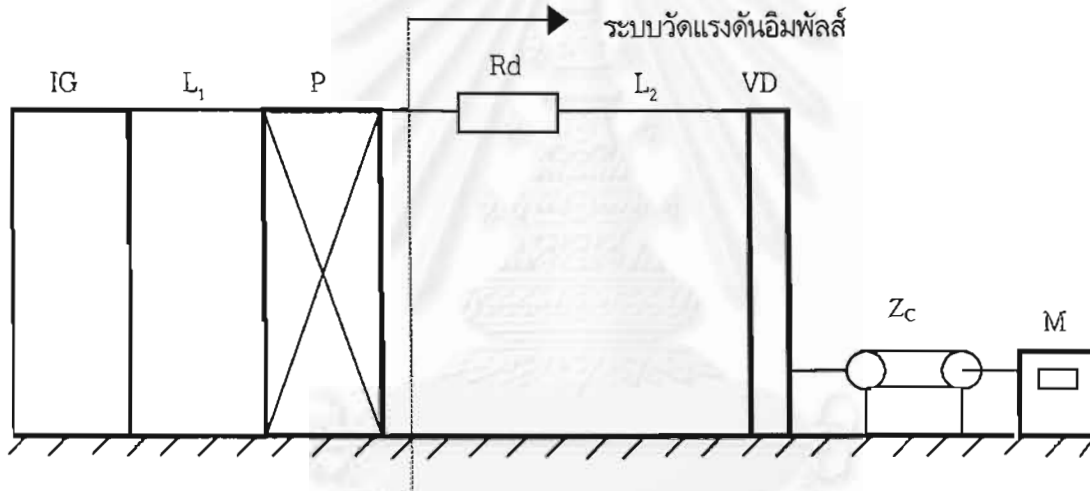
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์

2.1 วงจรพื้นฐานในการวัดแรงดันอิมพัลส์

รูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงวงจรพื้นฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งประกอบไปด้วย สายนำ (L_1) ต่อจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (IG) ไปยัง วัสดุทดสอบ (P) และมีสายนำแรงสูง (L_2) จากวัสดุทดสอบไปยังโวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งอาจมีความต้านทานหน่วง (R_d) อยู่ที่ต้นสายนำหรือที่อิเล็กทรอนิกส์แรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ (VD) นอกจากนี้ยังมีสายเคเบิลซึ่งมีเสริจิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_c นำสัญญาณที่ต้องการวัดไปยังอุปกรณ์วัดหรืออุปกรณ์บันทึกรูปคลื่น (M) ระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวจะต้องมีระบบกราวด์ที่ดี



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานในการวัดแรงดันอิมพัลส์

องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1.) ความต้านทานหน่วง (R_d) ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในสภาวะทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงที่ใช้ควรเป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ นอกจากนี้การต่อความต้านทานหน่วงที่ต้นสายนำโดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสริจิมพีแดนซ์ของสายนำ จะลดผลของคลื่นสะท้อนที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายนำและโวลเตจดีไวเดอร์

2.) สายนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ (L_2) โดยทั่วไปโวลเตจดีไวเดอร์มักอยู่ห่างจากวัสดุทดสอบ และ สายนำมักมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของของโวลเตจดีไวเดอร์เพื่อลดผลกระทบเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์ สายนำควรมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนาซึ่งเป็นผลรบกวนต่อ

ระบบวัดแรงดัน เราสามารถหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำ (Z_L) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานหน้า
ภายนอกได้จาก $Z_L = \sqrt{L_L / C_L}$ และ เนื่องจากในวงจรทดสอบทั่วไปสายนำมักอยู่ในแนวระดับเราจึง
สามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำในแนวระดับได้จากเวลาเดินทาง $\tau_L = \sqrt{L_L \times C_L} = 1 / c$
เมื่อ c คือความเร็วแสง , L_L คือค่าความเหนี่ยวนำ , C_L คือค่าเก็บประจุและ 1 คือความยาวของสายนำตาม
ลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า $Z_L = 1 / (c \times C_L)$ ค่าเก็บประจุของสายนำ(C_L)สามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่าสายนำเป็น
ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน ค่าเก็บประจุของสายนำคือ

$$C_L = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{A} \tag{2.1}$$

เมื่อ $A = \ln\left(\frac{4H}{d}\right) - \ln\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{H}{l}\right)^2}\right)$

เนื่องจาก $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ โดยที่ μ_0 และ ϵ_0 คือค่าเพอร์มิบิลิตี และ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศตามลำดับ
ดังนั้นจะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำเป็น

$$Z_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} A \approx 60 A \tag{2.2}$$

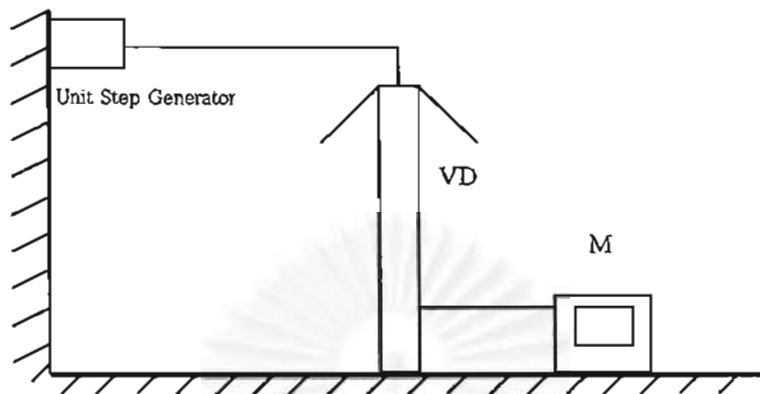
- 3.) โวลเตจดีไวเดอร์ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำ
สามารถวัดได้
- 4.) เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัดเพื่อให้เกิด
ความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปเป็นแบบแกนร่วม
(Coaxial Cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ
- 5.) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น อาจเป็นโวลมิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป ซึ่งโดยทั่วไป
อุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีการชิลด์เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก
- 6.) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน
ปกติสายดินที่ใช้จะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปใช้แถบ
โลหะบาง เช่นทองแดงแผ่นบาง

2.2 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันที่มีความถูกต้องจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งคุณสมบัติ
ของระบบวัดแรงดันทั่วไปจะพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ ผลตอบสนองรูปขึ้น และ สเกลแฟก
เตอร์(Scale Factor)

2.2.1 ผลตอบสนองรูปขั้น

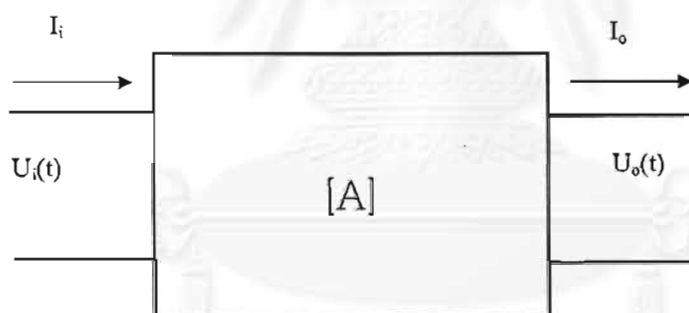
วงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดของ มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (Transfer Characteristic) ของโวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงค่าจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลเตจดีไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ s คือตัวแปรลาปลาซ

ในกรณีที่ $I_o = 0$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ได้เป็น

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \quad (2.4)$$

ค่า $H(s)$ จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูด และ เฟสของระบบในเชิงความถี่ ที่ความถี่ต่ำๆแอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ และเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่าความถี่จำกัด (limit frequency) ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (Normalized transfer function) จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \quad (2.5)$$

เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์มักมีค่าอัตราส่วนแรงดันที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่ (Amplitude/Frequency Response) จึงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีที่นิยมในทางปฏิบัติคือ การหาผลตอบสนองรูปขึ้น (Step Response) $G(t)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s} H(s) \right] \quad (2.6)$$

จากผลตอบสนองรูปขึ้นที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกเมื่อทราบแรงดันขาเข้า $V_i(t)$ ได้ได้จาก

$$V_o(t) = \int_0^t V_i(t-\tau) \cdot G(\tau) \cdot d\tau \quad (2.7)$$

เมื่อ $V_i(t-\tau)$ คืออนุพันธ์ ของ $V_i(t-\tau)$ เมื่อเทียบกับ τ

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังสมการ

$$T_N = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1-h(s)}{s} \right] \quad (2.8)$$

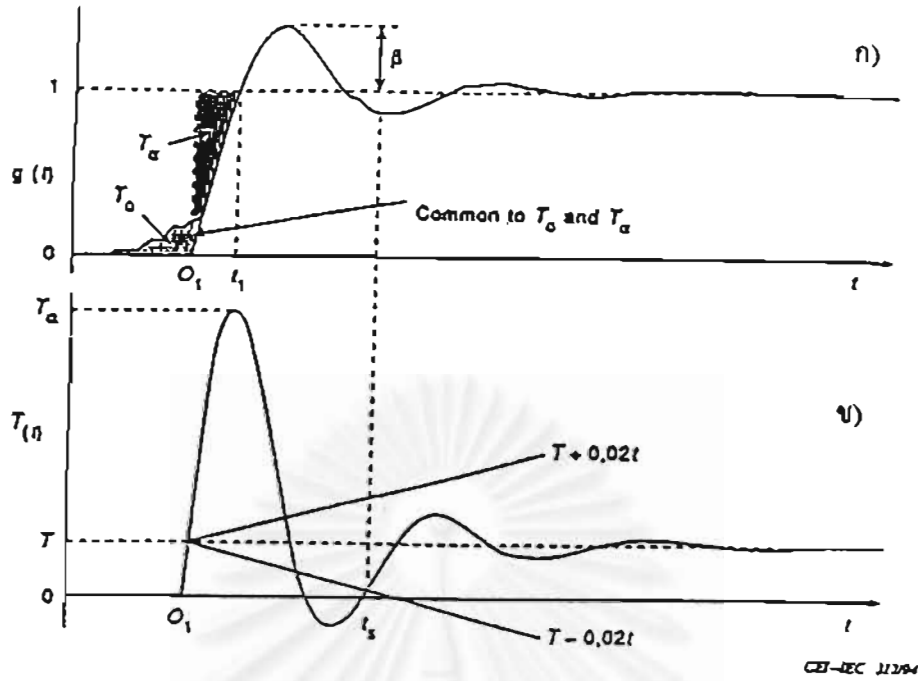
วงจรถ่ายโอนที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 โดยพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 มีนิยามดังนี้

1) พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขึ้น(Response Parameter) หมายถึงพารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นด้วยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขึ้น (Virtual Origin of a Step Response, O_v)

หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขึ้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาจุดเริ่มต้นข้างต้น

3) ผลตอบสนองรูปขึ้นนอร์มัลไลซ์(Normalized Step Response, $g(t)$) หมายถึง ผลตอบสนองรูปขึ้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย(รูปที่ 2.4 ก))



รูปที่ 2.4 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [6]

ก) เมื่อเทียบกับ $g(t)$

ข) เมื่อเทียบกับ $T(t)$

4) อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น (Step Response Integral) หมายถึง

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau \quad (2.9)$$

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง (Experimental Response Time, T_N) หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{max} ซึ่งเป็นเวลาที่ค่าผลตอบสนองรูปขั้นเข้าสู่สภาวะคงตัว

$$T_N = T(t_{max}) \quad (2.10)$$

6) เวลาตอบสนองบางส่วน (Partial Response Time, T_α) หมายถึงค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7) เวลาตอบสนองเศษเหลือ (Residual Response Time, $T_R(t_i)$) หมายถึงเวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{max}$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \quad (2.11)$$

8) ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot, β) หมายถึงค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (Initial Distortion Time, T_0) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์อินทิกรัลผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

10) ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time, t_s) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ $T_r(t)$,มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

$$|T_N - T(t)| < 0.02 t_s \quad (2.12)$$

สำหรับทุกค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง t_{max}

ในมาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าแต่ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆไว้ ดังนี้

ก) ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น ค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า β และ T_α/T_1 จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาในรูปที่ 2.5

ข) ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาคลื่นตัด T_c พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

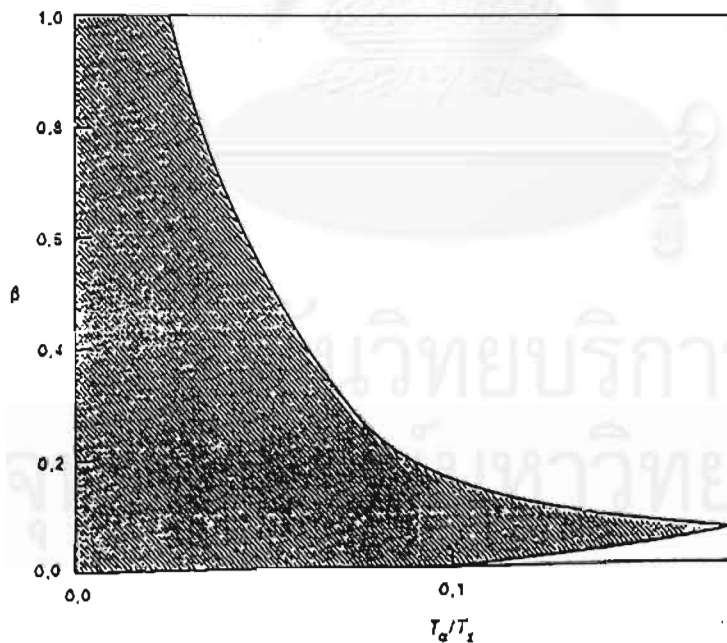
$$T_\alpha - 0.03T_c \leq T_N \leq 0.03T_c$$

- เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวควรมีค่า

$$t_s \leq T_c$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \leq 0.005T_c$$



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_x

T_x คือ เวลาหน้าคลื่น (T_1) ของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

2.2.2 สเกลแฟกเตอร์

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

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของสเกลแฟกเตอร์ไว้ 2 ประการ คือ ความไม่แน่นอน (Uncertainty) และ ความมีเสถียรภาพ (Stability)

2.2.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์อ้างอิงตาม มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนด คือ

- 1) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่ทางคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 1\%$ และ ความไม่แน่นอนในการวัดเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$
- 2) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น จะต้องมีความไม่แน่นอนในการวัดค่ายอดไม่เกิน $\pm 3\%$ และ ความไม่แน่นอนในการวัดเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$
- 3) ความไม่แน่นอนของสเกลแฟกเตอร์ไม่เกิน $\pm 0.5\%$
- 4) ค่าเวลาตอบสนองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของเวลาตอบสนองรูปขึ้นของระบบวัดอ้างอิงตามมาตรฐานกำหนด

พารามิเตอร์	ค่าที่ต้องการสำหรับ		
	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น ฟ้าผ่าเต็ม และแรงดันอิม พัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ตัด หลังคลื่น	แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น ฟ้าผ่าตัดหน้าคลื่น	แรงดันอิมพัลส์ รูปคลื่นสวิตชิง
เวลาตอบสนองจากการ ทดลอง (T_N)	≤ 15 ns	≤ 10 ns	-
ช่วงเวลาเข้าที่ (t_s)	≤ 200 ns	≤ 150 ns	≤ 10 μ s
เวลาตอบสนองบางส่วน (T_α)	≤ 30 ns	≤ 20 ns	-
เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (T_o)	-	≤ 2.5 ns	-

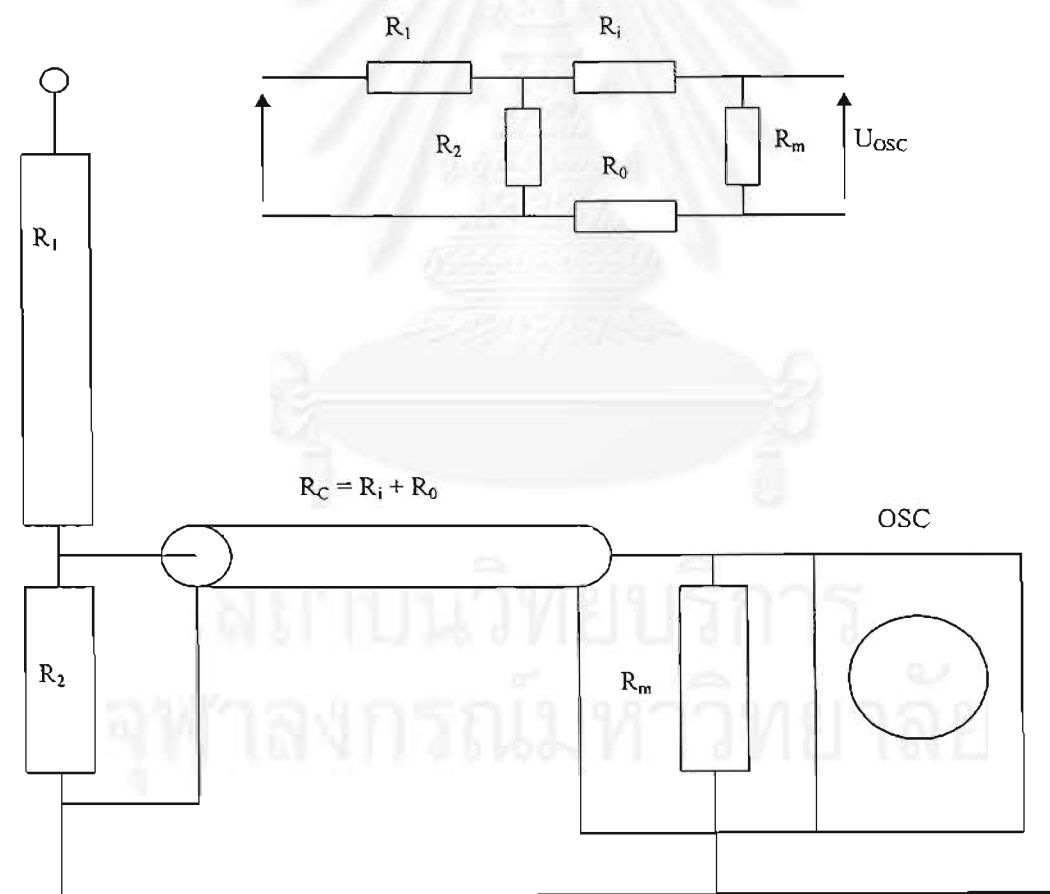
2.2.2.2 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์จดีไวเดอร์ สามารถหาได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

- 1.) การวัดค่าแรงดันขาเข้า และ ขาออกพร้อมกัน
- 2.) ใช้วงจรรีดิจ
- 3.) คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์จดีไวเดอร์โดยการคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้ให้ข้อแนะนำไว้ดังนี้

กรณีของโวลต์จดีไวเดอร์แบบความต้านทาน ค่าความต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำสามารถวัดได้โดยใช้แรงดันต่ำกระแสตรง ซึ่งอาจจะเป็น Wheatstone Bridge หรือโอห์มมิเตอร์ที่มีค่าความแม่นยำสูง สำหรับเคเบิลวัดที่มีความยาวค่อนข้างมากค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ (ตัวนำในและซีลด์) จะทำให้เกิดการแบ่งแรงดันระหว่าง ความต้านทานภาคแรงต่ำ(R_2) และ ความต้านทานแมทซิง (R_m) ซึ่งอาจจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม (R_m) ลดลง ดังนั้นควรวัดค่าความต้านทานของเคเบิลวัดมาพิจารณาด้วย

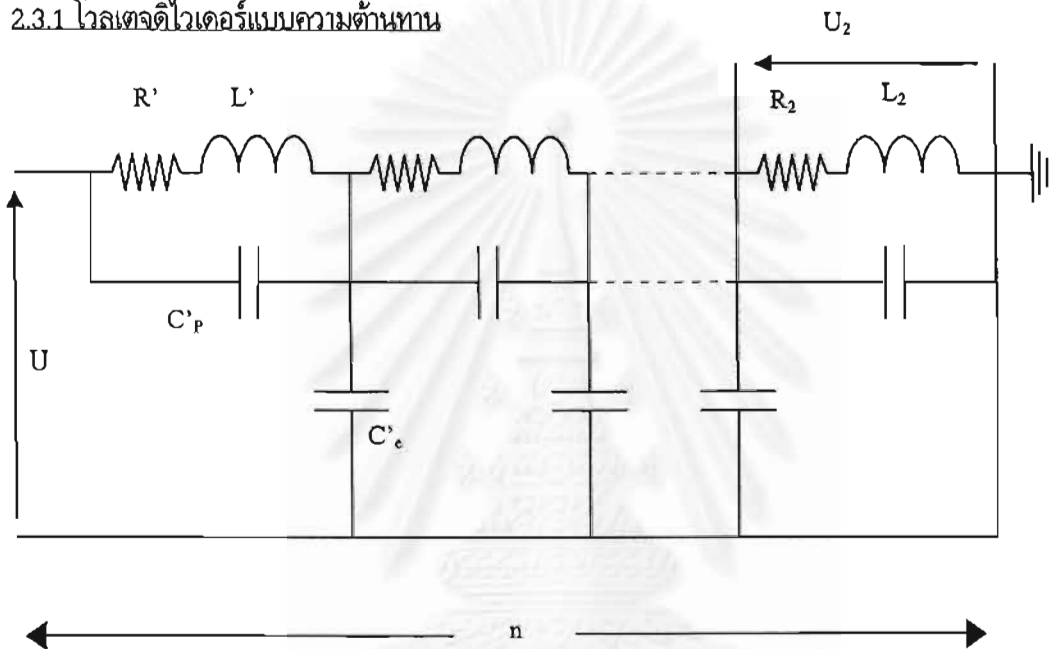


รูปที่ 2.6 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่มีต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลต์จดีไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยที่ R_1 = ความต้านทานของตัวนำของสายเคเบิล R_0 = ความต้านทานของซีลด์ของสายเคเบิล

2.3 โวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งของระบบวัด การออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์จะต้องคำนึงถึงระดับแรงดันใช้งาน ชนิดของแรงดัน และ ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า [7] โวลเตจดีไวเดอร์ทั่วไปจะประกอบสร้างจากตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุหรือแบบผสม องค์ประกอบเหล่านี้จะติดตั้งอยู่ในกรอบอกฉนวน ซึ่งความสูงจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันวาบไฟตามผิวที่แรงดันใช้งาน ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะใช้ระยะวาบไฟตามผิว(Surface flashover distance)หรือระยะฉนวน โดยเลือกระยะวาบไฟตามผิว เฉพาะ 2-2.5 m /MV [7]

2.3.1 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

จากวงจรสมมูลสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ได้เป็น

$$h(s) = n \cdot \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(R + sL) \cdot sC_e}{1 + (R + sL) \cdot sC_p}}}{\sinh \sqrt{\frac{(R + sL) \cdot sC_e}{1 + (R + sL) \cdot C_p}}} \tag{2.13}$$

เมื่อ $C_e = nC'_e$, $C_p = C'_p/n$, $L = nL'$, $R = nR'$, $R_2 = R'$, $L_2 = L'$

และจากสมการจะสามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ได้เป็น

$$g(t) = 1 + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2} \tag{2.14}$$

โดยที่ $a = R/2L$ และ $b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2 \pi^2}{LC_e [1 + (C_p / C_e) k^2 \pi^2]}}$

ในกรณีที่ค่าความต้านทานมีค่าสูงพอที่จะทำให้ค่า L/R มีค่าน้อยมากๆ และ $C_p \ll C_e$ เราสามารถที่จะละผลของ L และ C_p ได้ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ $h(s)$ [7] ได้เป็น

$$h(s) = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{sRC_e}}{\sinh \sqrt{sRC_e}} \quad (2.15)$$

และจากสมการ (2.15) จะสามารถหาผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ได้เป็น [4]

$$g(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp\left(-\frac{k^2 \pi^2}{RC_e} \cdot t\right) \quad (2.16)$$

เวลาตอบสนองสามารถคำนวณได้โดยแทนค่าสมการที่ (2.16) ลงในสมการ (2.9) ซึ่งจะได้ผลเป็น

$$T_N = \frac{RC_e}{6} \quad (2.17)$$

2.4 การต่อแมทซิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด

ในการวัดแรงดันทรานเซียนท์ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์อาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันได้ ในที่นี้จะพิจารณาการต่อแมทซิงอิมพีแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด

โดยที่เคเบิลวัดจะพิจารณาเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสีย ดังนั้นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ $Z_c = \sqrt{L_c / C_c}$ มีค่าแน่นอนจึงไม่ขึ้นกับความถี่ และมีเวลาเดินทาง $\tau_c = \sqrt{L_c C_c}$

สำหรับโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน การต่อแมทซิงสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการต่อตัวต้านทานแมทซิง $R_m = Z_c$ ที่ปลายทางของเคเบิลวัดซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_2 และส่งผ่านเคเบิลวัดจะไม่เกิดการผิดเพี้ยน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของเคเบิลวัดคือ $Z_c = R_m$ ค่าความต้านทานนี้จะต่อขนานเข้ากับ R_2 จึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์

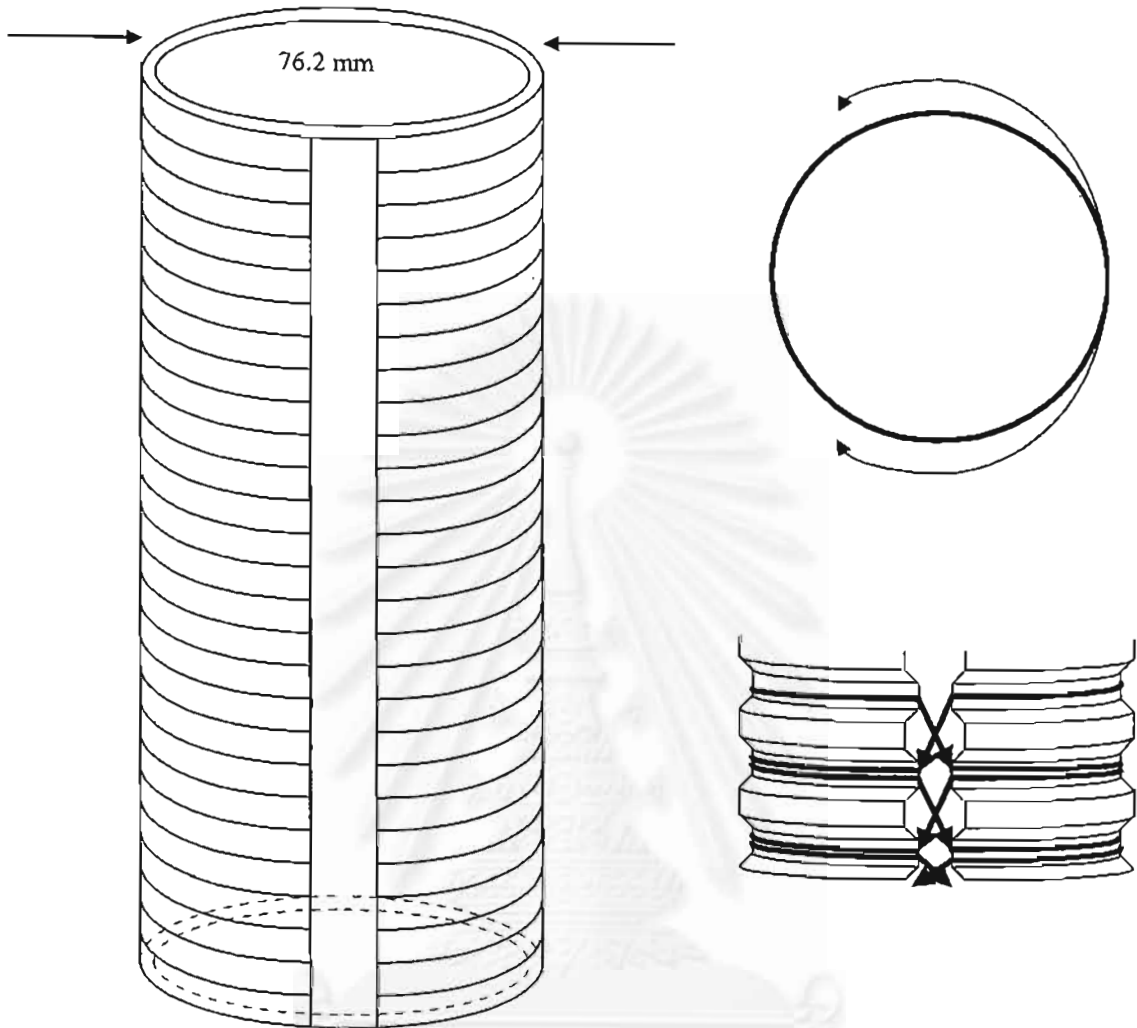
บทนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดในการออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) และใช้ความรู้ทางทฤษฎีจากบทที่ 2. ในการออกแบบอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงแบบความต้านทาน ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนดให้สามารถใช้โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงสอบเทียบระบบวัดอื่นๆที่ระดับแรงดันอย่างต่ำ 20 % ของระดับแรงดันใช้งานของระบบวัดนั้นๆ และเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีระดับแรงดันที่กำหนด 1400 kV ดังนั้นจึงเลือกระดับแรงดันโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงที่ออกแบบสร้างที่ 300 kV สามารถใช้สอบเทียบระบบวัดอื่นๆได้ที่ระดับแรงดันถึง 1500 kV นอกจากนั้นระบบ 69 kV จะทำการทดสอบ BIL ที่ระดับแรงดัน 325 kV [1] ดังนั้นถ้ามีโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้งานที่ระดับแรงดันนี้ เราก็สามารถทำการสอบเทียบที่ระดับแรงดันประมาณ 90 % ของค่า BIL ได้

3.1 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

ในกรณีของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน พลังงานสูญเสียในตัวความต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ คือ ถ้าค่าความต้านทานต่ำพลังงานสูญเสียจะมากซึ่งจะไปโหลดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ดังนั้นการเลือกค่าความต้านทานเพื่อออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์จึงควรเลือกให้มีค่าสูง แต่ควรระวังไม่ให้ค่าความต้านทานสูงเกินไปเพราะจะทำให้เวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ช้า ทั้งนี้เนื่องจากเวลาตอบสนองแปรผันตรงกับความต้านทานดังสมการ (2.17) ทำให้โวลเตจดีไวเดอร์ไม่ไวพอที่จะวัดแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ ค่าความต้านทานที่พอเหมาะจึงมีทั้งขีดจำกัดล่างและขีดจำกัดบน ในทางปฏิบัติค่าความต้านทานที่ใช้จะมีค่าอยู่ในช่วง 5-20 กิโลโอห์ม [7]

เนื่องจากภาคแรงสูงต้องรับแรงดันเกือบทั้งหมดของแรงดันที่ป้อนให้กับโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นในการออกแบบต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ก็จะต้องไม่เกิดวาบไฟตามผิว นอกจากนี้ตัวความต้านทานภาคแรงสูงต้องมีลักษณะสมบัติทางความร้อนดีเพียงพอ คือสามารถรับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์โดยไม่ชำรุดเสียหาย และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งานของตัวความต้านทานต้องอยู่ในขอบเขตที่ไม่ทำให้ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปเพื่อรักษาค่าสเกลแฟกเตอร์ให้คงที่และเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994)

ในงานวิจัยนี้เลือกค่าความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ประมาณ 7 กิโลโอห์ม โดยตัวความต้านทานทำด้วยลวดเคลือบฉนวนพันแบบไร้ความเหนียว [8] ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การพันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนียว

ลวดความต้านทานขนาดเบอร์ 38 NiCr 60/16 ชนิดไม่มีฉนวนหุ้ม มีข้อกำหนดทางเทคนิคดังนี้

ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว		63.11	Ω/m
ค่าความต้านทานจำเพาะ	$\rho =$	1.152	$\Omega mm^2/m$
เส้นผ่าศูนย์กลาง	$d =$	0.15	mm
ความหนาแน่น	$\rho =$	7.15	g/cm^3
ความร้อนจำเพาะ	$\sigma =$	0.46	J/gK
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ	$k =$	110	ppm/K

3.1.1 การคำนวณความยาวของลวดความต้านทาน(NiCr 60/16)

ลวดความต้านทานขนาดเบอร์ 38 มีค่าความต้านทานต่อความยาว 1 เมตร = 63.11 Ω

พื้นลวดความต้านทานรอบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว (76.2 mm.)

พื้นลวด 1 รอบ ต้องใช้ลวดยาว $\ell_g = 2\pi(d/2) = 239.39$ mm.

ความต้านทานของภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ = 6.9 k Ω

แต่เราต้องใช้ลวดความต้านทาน 2 เส้นพันสวนทางกันดังนั้นลวด 1 เส้น มีความต้านทาน 13.8 k Ω

ต้องใช้ลวดความต้านทานยาว $\ell = \frac{13.8 \times 10^3}{63.11} = 218.665$ เมตร

ดังนั้นจำนวนรอบที่ใช้พื้นลวดความต้านเท่ากับ $\frac{218.665}{0.23939} = 913.5$ รอบ

3.1.2 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่ม

พลังงาน (W) ที่ลวดต้องรับเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน [9] ขนาด 350 kV (ประมาณ 120 % ของค่าแรงดันพิกัด) สามารถหาได้จากสมการ

$$W = \frac{A^2 \times \int_0^{100 \mu s} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})^2 dt}{R} \quad (\text{joules}) \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$A = \frac{V}{k(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

ค่าคงที่สำหรับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่น 1.2 / 50 μsec คือ

$$\alpha_1 = 14.6627566 \times 10^3$$

$$\alpha_2 = 2.46913580247 \times 10^6$$

$$k = 52.5 \times 10^{-9}$$

$$V = 350 \text{ kV}$$

ค่าความต้านทานของโวลเตจดีไวเดอร์ R เท่ากับ = 6.9 k Ω

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่โวลเตจดีไวเดอร์ต้องรับจึงมีค่าเท่ากับ = 338.731 J

$$m \text{ (g)} \text{ คำนวณจากสมการ} \quad m = \frac{1}{4} \pi d^2 \ell \rho \quad (3.2)$$

$$= 27.63 \text{ g ต่อลวดความต้านทาน 1 เส้น}$$

$$= 55.26 \text{ g ต่อลวดความต้านทาน 2 เส้น}$$

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นขณะใช้งานมีค่าเท่ากับ $\Delta T = \frac{W}{m\sigma}$ (3.3)

เมื่อ	ΔT	คือ	อุณหภูมิเพิ่ม หน่วยเป็น K
	W	คือ	พลังงานที่ป้อนให้กับตัวต้านทาน หน่วยเป็น J
	m	คือ	มวลของลวดความต้านทาน หน่วยเป็น g
	σ	คือ	ความร้อนจำเพาะของลวดความต้านทาน หน่วยเป็น J/gK

มาตรฐาน IEC 60-2(1994) กำหนดไว้ว่าไม่ควรมีค่าเกิน 200 K

ดังนั้นจากพลังงานที่ลวดต้องได้รับเราจึงสามารถคำนวณอุณหภูมิเพิ่มได้ตามสมการ(3.3)เท่ากับ

$$\Delta T = 13.3K \text{ เปอร์เซนต์ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปคำนวณจากสมการ } \frac{\Delta R}{R} = k \times \Delta T \times 100$$

ดังนั้นที่อุณหภูมินี้จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปเพียง 0.15 %

ในการพันลวดความต้านทานภาคแรงสูงจะใช้ลวดความต้านทานเคลือบฉนวนพันบนท่ออะครีลิกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 mm. ที่ทำการเซาะร่องโดยมีลักษณะการพันดังรูปที่ 3.1 โดย 1 ร่องสามารถพันลวดความต้านทานได้ 2 เส้นพันสวนทางกันโดยไม่ต้องใช้แผ่นฉนวนกั้นระหว่างชั้นเหมือนแบบเก่าซึ่งทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของการพันลวดความต้านทานทั้ง 2 เส้นแบบสวนทางกันไม่เท่ากัน ดังนั้นการหักล้างของสนามแม่เหล็กของการพันลวดทั้ง 2 เส้นบนร่องเดียวกันจึงดีกว่า และลดค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ดี นอกจากนี้ยังมีการระบายความร้อนได้ดีกว่าการพันลวดแบบเดิมด้วย จากนั้นนำตัวความต้านทานที่พันเสร็จแล้วบรรจุในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว และ ปิดด้วยหน้าแปลนอะลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ด้วยความต้านทานภาคแรงสูงที่พันเสร็จแล้วแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2

3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

3.2.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ การออกแบบสร้างความต้านทานภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆ ดังนี้

- 1.) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในซิลด์ของสายเคเบิลวัด หรือสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำเกิดตามส่วนต่างๆของระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการของระบบวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด
- 2.) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแม่เหล็กของเคเบิลวัด ต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่สภาวะทรานเซียนมีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกลับไปภาคแรงสูงมีค่าลดลงดังนั้นจึงควรจัดองค์ประกอบภาคแรงต่ำให้อยู่ในลักษณะแกนร่วม
- 3.) ใช้ความต้านทานชนิดเดียวกันกับความต้านทานภาคแรงสูง เพื่อลดผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ไม่เท่ากันของความต้านทานภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำจากอุณหภูมิที่เพิ่ม

3.2.2 การเลือกแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเดอร์กำหนดจากแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือโวลมิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์จะทำให้ทราบสเกลแพกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์ได้โดยอาศัยสมการ

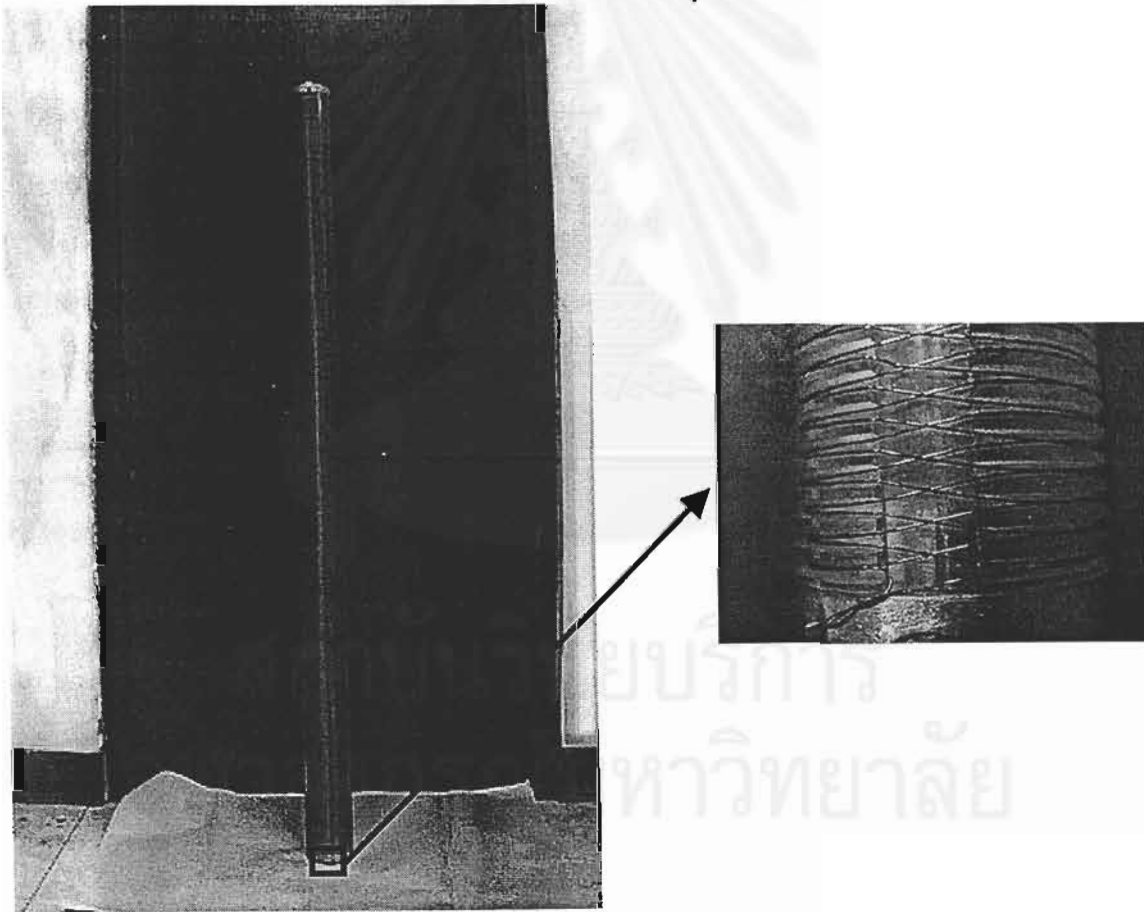
$$F = \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad (3.4)$$

เมื่อ F คือ สเกลแพกเตอร์ของโวลเตจดีไวเดอร์

R_1 คือ ค่าความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์(Ω)

R_2 คือ ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์(Ω)

แรงดันขาเข้าที่กำหนดของอิมพัลส์ออสซิลโลสโคป และโวลมิเตอร์วัดค่ายอดที่มีอยู่ในช่วง 200 ถึง 1600 V ในที่นี้เลือกแรงดันขาออกประมาณ 300 ถึง 400 V



รูปที่ 3.2 ความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์

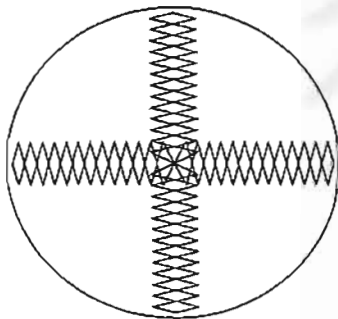
3.2.3 ความต้านทานภาคแรงต่ำ

จากค่าสเกลเฟกเตอร์ในสมการ (3.4) และค่าความต้านทานภาคแรงสูง 6.9 กิโลโอห์ม ได้ทำการออกแบบความต้านทานภาคแรงต่ำทั้งสิ้น 3 แบบ โดยสุดท้ายจะเลือกแบบที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดมาใช้งาน ความต้านทานภาคแรงต่ำทั้ง 3 แบบ คือ

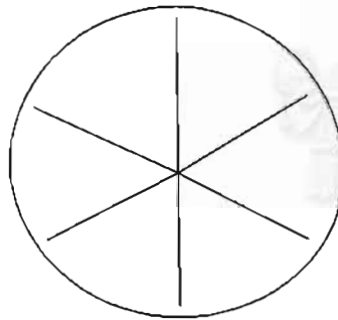
แบบที่ 1 ค่าความต้านทาน 9.3 Ω ในที่นี้ใช้ลวดความต้านทานเคลือบฉนวนพันบนแผ่นปริ้นซ์เซอร์กิตบอร์ดซึ่งตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 254 mm. ดังรูปที่ 3.3 โดยค่าความต้านทานแต่ละแฉกมีค่าประมาณ 37.2 โอห์ม

แบบที่ 2 ค่าความต้านทาน 7.3 Ω ใช้ลวดความต้านทานพันในแนวรัศมีของแผ่นปริ้นซ์เซอร์กิตบอร์ดซึ่งตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 254 mm. ดังรูปที่ 3.4

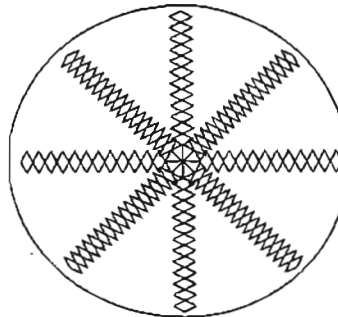
แบบที่ 3 ค่าความต้านทาน 7.3 Ω ในที่นี้ใช้ลวดความต้านทานเคลือบฉนวนพันบนแผ่นปริ้นซ์เซอร์กิตบอร์ดซึ่งตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 254 mm. ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 1.

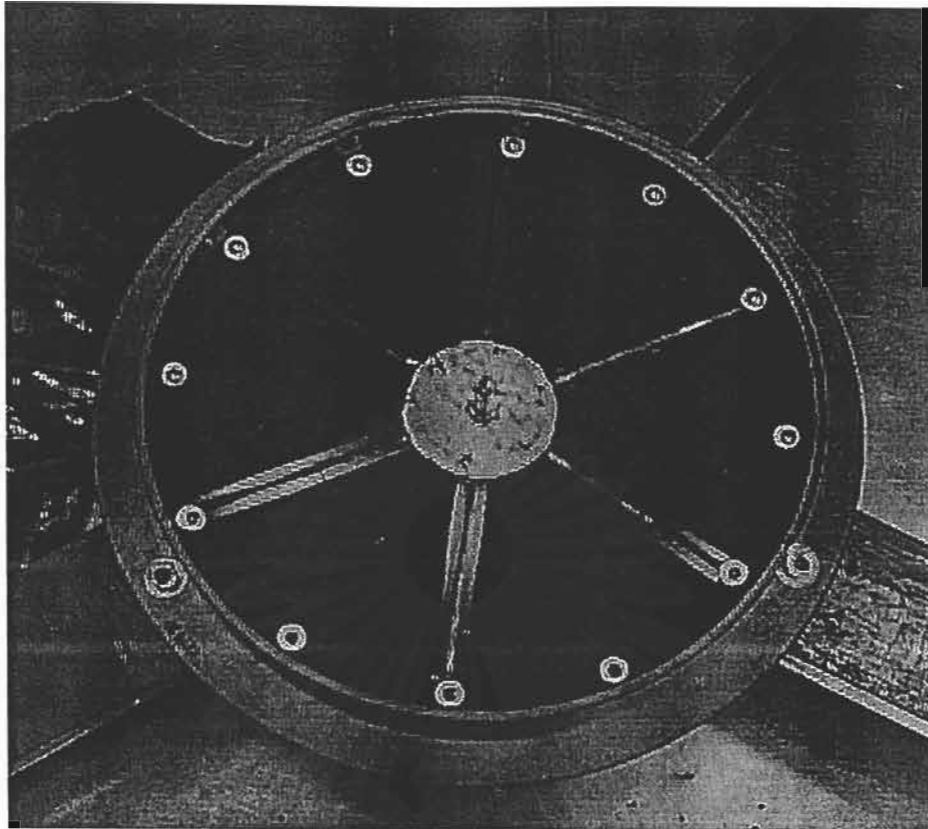


รูปที่ 3.4 ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2.



รูปที่ 3.5 ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 3.

ความต้านทานภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความต้านทานภาคแรงต่ำ(แบบที่ 2)ที่ประกอบเสร็จ

3.3 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน (Attenuator)

เนื่องจากการวิจัยนี้ใช้ดีจิตอลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและประเมินค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์ และดีจิตอลออสซิลโลสโคปเองมีค่าแรงดันขาเข้าค่อนข้างต่ำโดยที่ใช้ในงานนี้สามารถแสดงผลได้สูงสุด 80 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบสร้างตัวลดทอนขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่ดีจิตอลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 การเลือกแรงดันขาออก

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนอาศัยหลักการเดียวกับโวลเตจดีไวเดอร์กล่าวคือแรงดันขาออกสูงสุดของตัวลดทอน กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของดิจิตอลออสซิลโลสโคปเมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะทำให้ทราบสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนได้จากสมการ

$$(3.6)$$

เมื่อ F_{Atten} คือ สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอน(Ω)

R_3, R_4 คือ ค่าความต้านทานของตัวลดทอน(Ω)

ในที่นี้เลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนให้มีค่าประมาณ 25 V ซึ่งจะได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนมีค่าประมาณ 12 เนื่องจากแรงดันขาออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์สูงสุดมีค่าประมาณ 300 V

3.3.2 ตัวลดทอนแบบความต้านทาน

เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบตัวลดทอนแบบความต้านทาน คือต้องกำหนดให้ค่าความต้านทานขาเข้าของตัวลดทอนเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด กล่าวคือ ตัวลดทอนจะทำหน้าที่เป็นตัวความต้านทานแมทชิงด้วย ในที่นี้เลือกใช้วิธีการต่อความต้านทาน 2 ชุดแบบอนุกรมกัน ดังวงจรมุมูลในรูปที่ 3.7 ดังนั้นจะได้เงื่อนไขการออกแบบเป็น

$$Z_c = R_3 + R_4$$

โดยค่าความต้านทาน R_3 และ R_4 ใช้ความต้านทานสำเร็จรูปมีค่า 46 Ω และ 4 k Ω ตามลำดับ (ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัดที่ใช้มีค่า 50 Ω)

6.9 k Ω

268 V

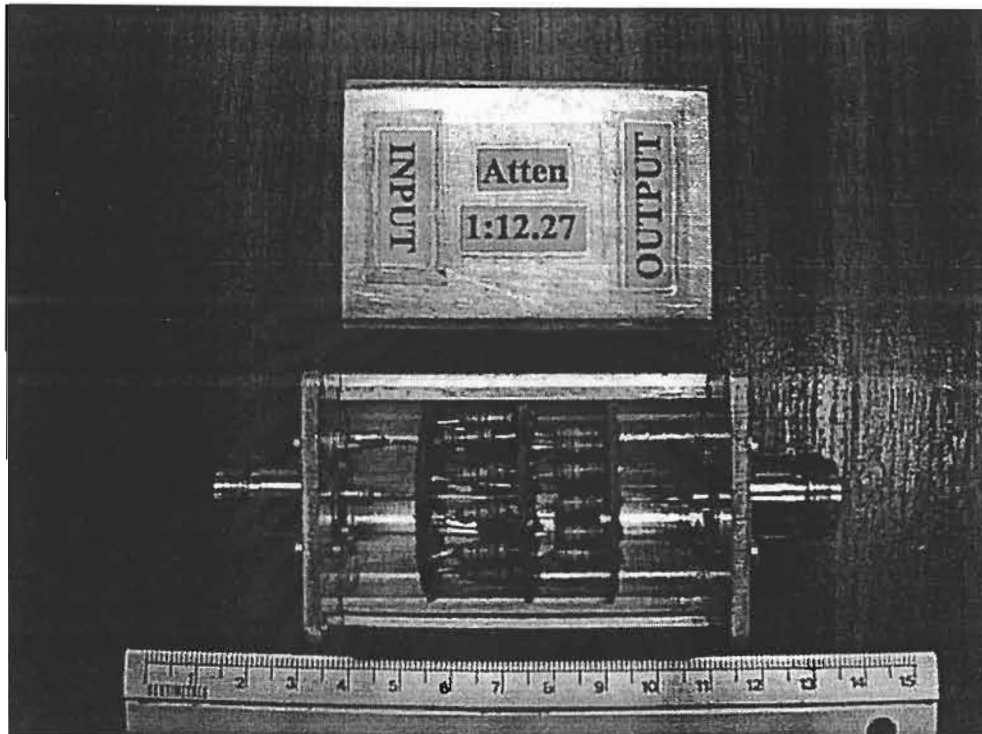
46 Ω
 R_4

4 Ω

7.3 Ω

รูปที่ 3.7 วงจรมุมูลของตัวลดทอนแบบความต้านทาน

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวลวดทอนที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับ 50Ω เท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล โดยใช้ความต้านทานแบบฟิล์มโลหะขนาด $1/2$ วัตต์มาต่อขนานกัน ดังรูปที่ 3.8



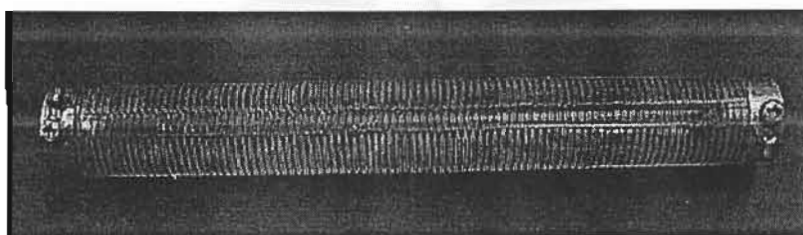
รูปที่ 3.8 ตัวลวดทอนแบบความต้านทานที่ประกอบสร้างขึ้น

3.4 การเลือกสายเคเบิล และ หัวต่อ

ชนิดของสายเคเบิลและหัวต่อที่ใช้ต้องเลือกสายที่มีการลดทอนของสัญญาณน้อย และสามารถทนแรงดันได้สูง มีช่วงความถี่ใช้งานที่กว้าง โดยในงานวิจัยนี้เลือกสายเคเบิลที่มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 50Ω และใช้หัวต่อชนิด N ซึ่งทนแรงดันได้ประมาณ 2.5 kV rms ช่วงความถี่ใช้งานประมาณ $11\text{-}18 \text{ GHz}$ [10] (ชนิด BNC และ UHF ทนแรงดันได้ประมาณ 2.0 kV rms มีช่วงความถี่ใช้งานประมาณ 4 GHz [10]) โดยสายเคเบิลที่ใช้เป็นแบบสายโฟมแกนร่วมความถี่สูง 8D-FB (FB Type High Frequency Coaxial Cable) ความยาวประมาณ 20 เมตร มีอัตราการลดทอนของสัญญาณน้อยเพียง $9 \text{ dB}/100 \text{ m}$ ที่ความถี่ 400 MHz ซึ่งถ้าเป็นสายเคเบิลแกนร่วม RG 11/U และ RG 59/U ที่ใช้อยู่ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จะมีอัตราการลดทอนของสัญญาณประมาณ 16 ถึง $24 \text{ dB}/100 \text{ m}$ ที่ความถี่ 400 MHz [10]

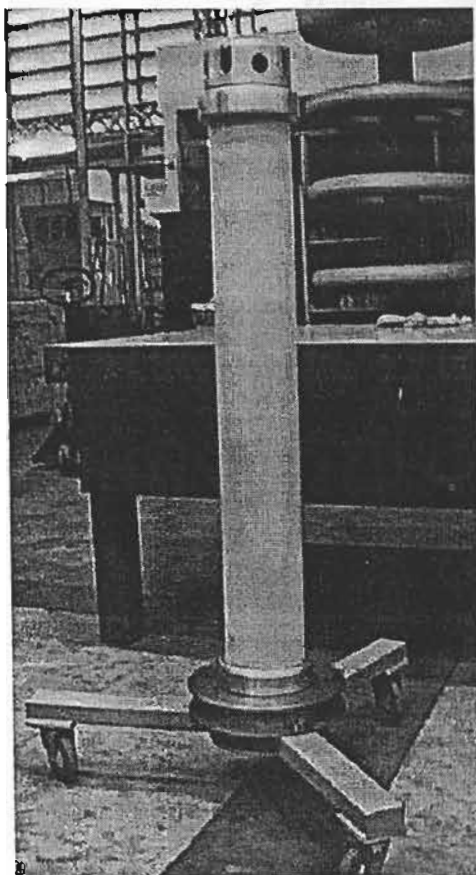
3.5 การออกแบบและสร้างความต้านทานแห้ง

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เราสามารถหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณได้ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 220Ω เลือกค่าความต้านทานที่ออกแบบไว้เท่ากับ 300Ω และสร้างขึ้นจากลวดความต้านทานพันแบบไร้ความเหนียวหนาที่พันบนท่อใส่ในลักษณะการพันเหมือนความต้านทานภาคแรงสูงของไวลเตจดีไวเดอร์ จำนวนรอบที่พันประมาณ 95 รอบ โดยมีแรงดันตกคร่อมความต้านทานแห้งจะมีค่าประมาณ 12 kV เมื่อป้อนแรงดันพิกัด ดังนั้นมีแรงดันต่อรอบประมาณ 130 V โดยมีระยะห่างระหว่างรอบประมาณ 1 mm ซึ่งระยะวาวไฟตามผิวของแรงดันอิมพัลส์มีค่าเท่ากับ 2-2.5 m/MV [7] หรือ 500V/mm ความต้านทานแห้งจึงสามารถทนแรงดันที่ตกคร่อมได้ ค่าความต้านทานที่วัดได้เมื่อสร้างเสร็จมีค่าประมาณ 283.6Ω ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความต้านทานแห้งที่พันเสร็จแล้ว

ไวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานที่ประกอบสร้างเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ไวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานที่ประกอบเสร็จ

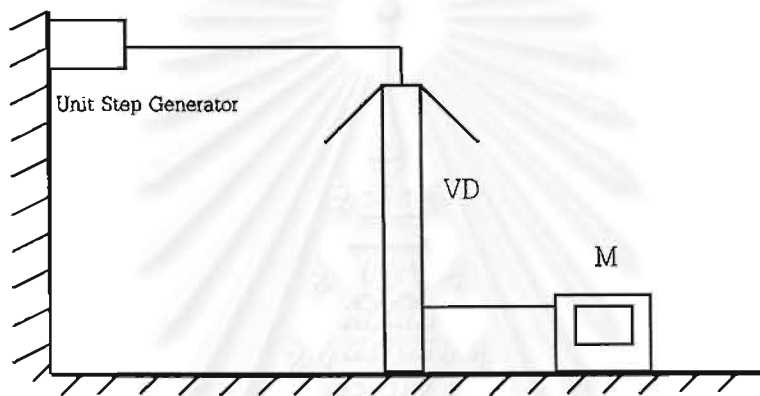
บทที่ 4



การทดสอบและประเมินผล

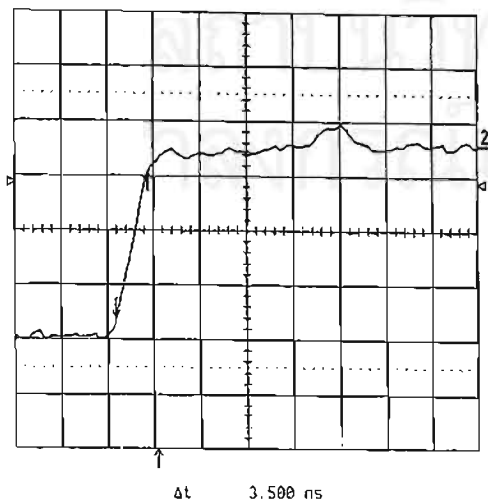
4.1 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

วงจรถาผลตอบสนองรูปขั้นในที่นี้ใช้วงจรดังในรูปที่ 4.1 ตามที่ได้กำหนดในมาตรฐาน IEC 60-2, (1994)



รูปที่ 4.1 วงจรถาผลตอบสนองรูปขั้น

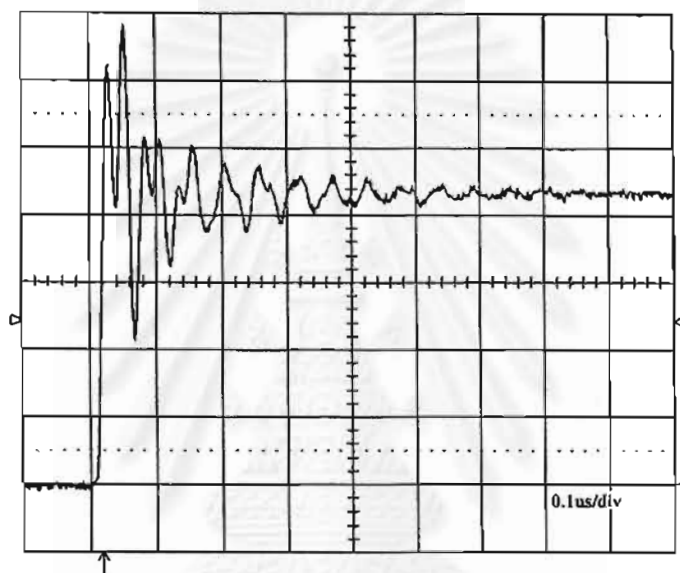
โดยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (Unit Step Generator) ผลิตโดยบริษัท HAEFELY รุ่น USG 40 ซึ่งมีค่าแรงดันขาออก 90 ± 10 V ใช้สวิตช์ประเภทปรอทเปียก (Mercury -Wetted Relay) เป็นตัวตัดแรงดันลงดินด้วยความถี่ 50 Hz [11] เวลาขาขึ้นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นเท่ากับ 3.5 ns ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ออสซิลโลกราฟของรูปคลื่นแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

4.1.1 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อใช้ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบต่างๆ

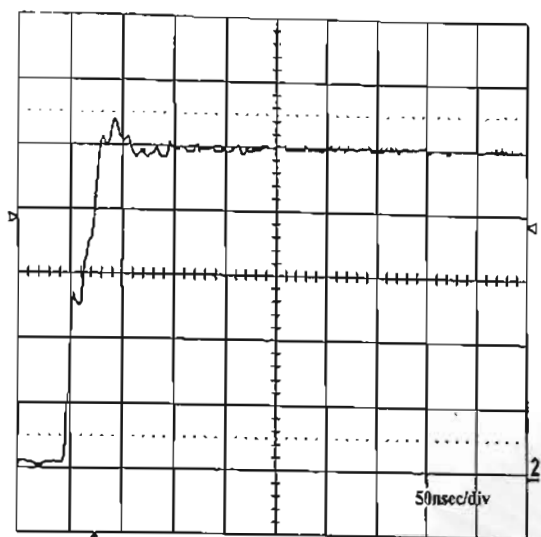
ผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 4.3 โดยในที่นี้ใช้สายนำเป็นท่อลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.40 เซนติเมตร ยาวประมาณ 150 เซนติเมตร เมื่อคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์จากสมการ (2.2) แล้วจะได้ค่า 270 โอห์ม ซึ่งผลตอบสนองที่ได้ดังรูปที่ 4.3 ยังมีการแกว่งอยู่ ผลตอบสนองที่ได้จาก ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบต่างๆโดยทดลองใช้ค่าความต้านทานหน่วย 283.8 โอห์มเท่ากันทั้ง 3 แบบได้พารามิเตอร์ผลตอบสนองดังตารางที่ 4.1 (ใช้โปรแกรม Response Time Evaluation Software, RTES ในการหาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขึ้นที่พัฒนาขึ้นเองโดยแผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม แสดงไว้ในภาคผนวก ก) และ รูปผลตอบสนองรูปขึ้นที่ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบต่างๆดังในรูปที่ 4.4



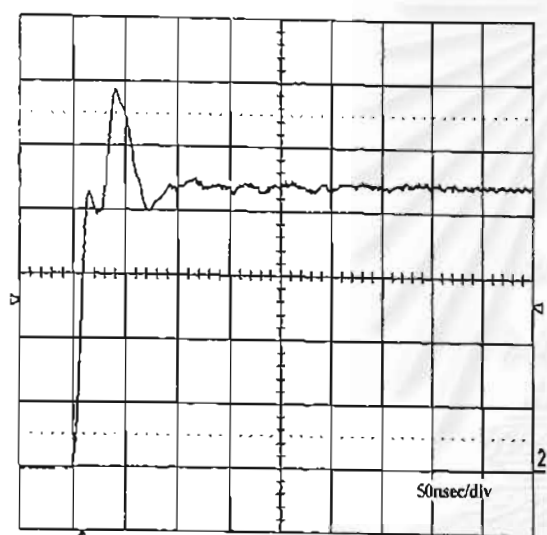
รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างขึ้น

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อเปลี่ยนความต้านภาคแรงต่ำ R_2 ที่ความต้านทานหน่วย 283.8 โอห์ม

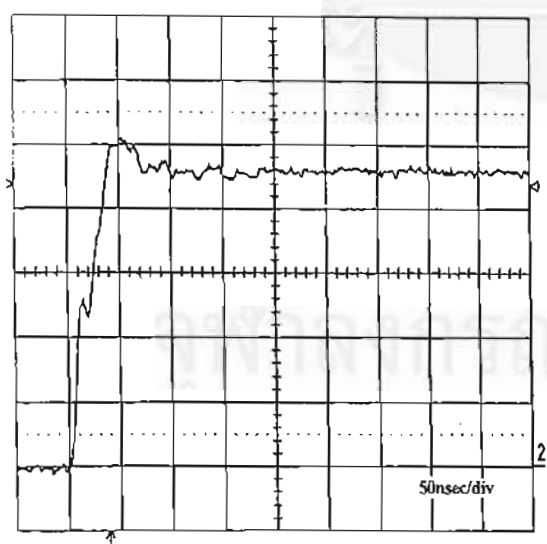
R_2 แบบที่	β (%)	T_α (nsec)	T_N (nsec)
1 (9.3 Ω)	8.18	18.46	17.85
2 (7.3 Ω)	32.64	9.95	5.86
3 (7.3 Ω)	11.41	18.49	16.11



รูปที่ 4.4 ก) ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อใช้ความต้านทาน
ภาคแรงต่ำแบบที่ 1



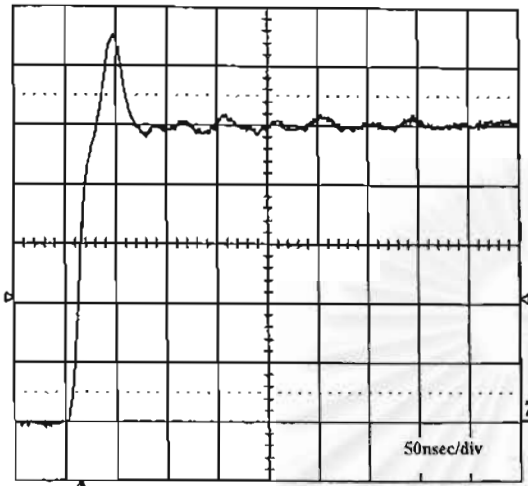
รูปที่ 4.4 ข) ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อใช้ความต้านทาน
ภาคแรงต่ำแบบที่ 2



รูปที่ 4.4 ค) ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อใช้ความต้านทาน
ภาคแรงต่ำแบบที่ 3

รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อใช้ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 1, 2 และ 3

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าความต้านทานแบบที่ 2 ให้ผลตอบสนองรูปขั้นที่เร็วที่สุดและผ่านตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนดไว้สำหรับโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิง และ จะสังเกตได้จากรูปผลตอบสนองรูปขั้นทั้ง 3 รูปว่า มีหยักที่หน้าคลื่นโดยอาจจะเกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไข ผลตอบสนองรูปขั้นหลังจากที่ทำการปรับปรุงแก้ไขแล้วดังในรูปที่ 4.5



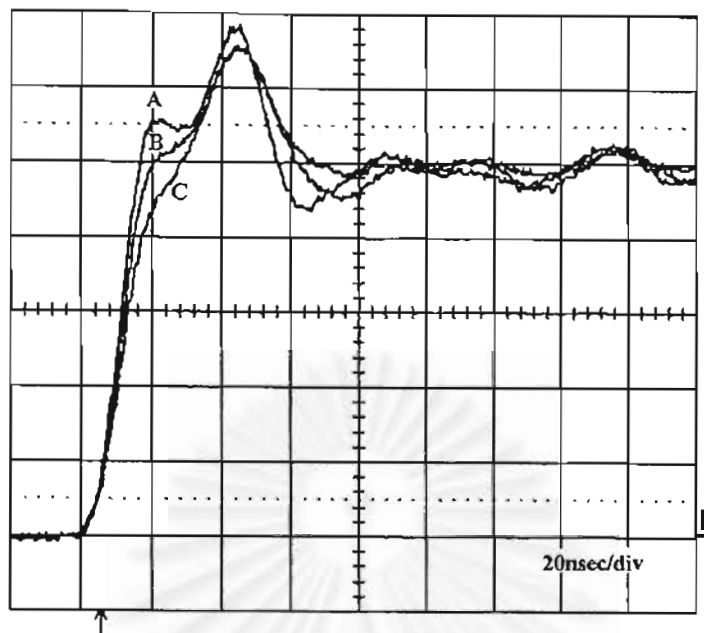
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองรูปขั้นหลังจากทำการแก้ไขแล้ว และ ใช้ความต้านทานหน่วง 283.8 โอห์ม และความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2

จากรูปที่ 4.5 ความถี่ที่รูปคลื่นมีค่าประมาณ 20 MHz เป็นการแกว่งจากผลของความเหนี่ยวนำในสายนำซึ่งมีค่าประมาณ 1.33 μH (คิดจากค่าเก็บประจุของสายนำตามสมการที่ 2.1 ได้เท่ากับ 18.9 pF และ จากค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำประมาณ 270 Ω) และ ค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นคิดค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ได้ประมาณ 48 pF

4.1.2 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ

ผลตอบสนองรูปขั้นเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และพารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขั้นเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆดังในตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปขั้นเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ(ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2)

$R_d(\Omega)$	$\beta(\%)$	$T_\alpha(\text{nsec})$	$T_N(\text{nsec})$
137.1	36.63	5.96	2.03
211.5	31.75	7.50	3.60
283.8	30.13	9.25	6.04



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วงค่าต่างๆ
(ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2)

รูปผลตอบสนอง A ความต้านทานหน่วง 137.1 โอห์ม

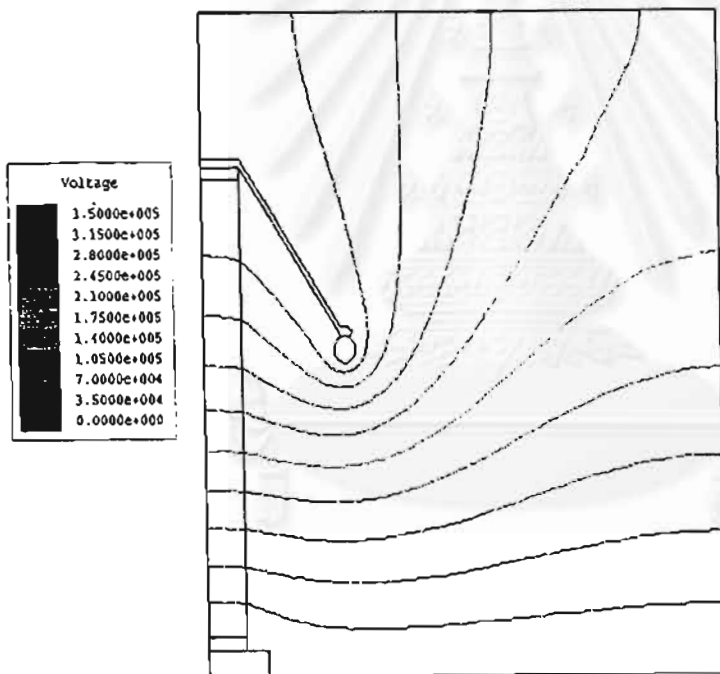
รูปผลตอบสนอง B ความต้านทานหน่วง 211.5 โอห์ม

รูปผลตอบสนอง C ความต้านทานหน่วง 283.8 โอห์ม

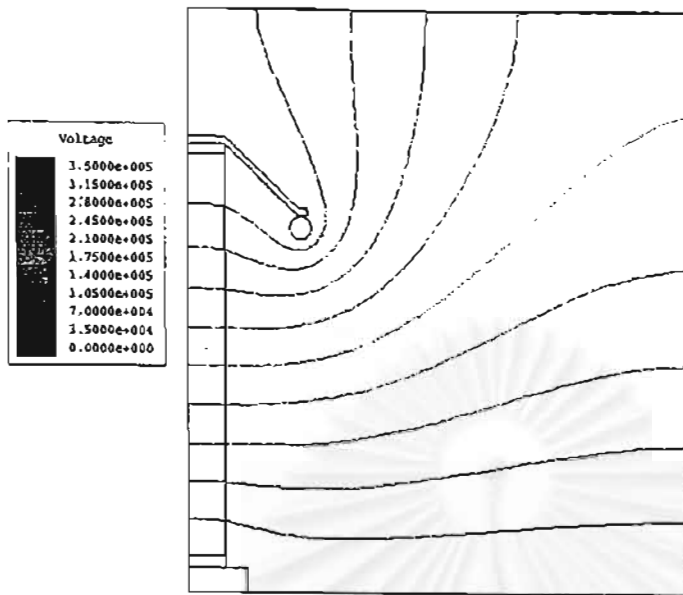
จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าค่าความต้านทานหน่วง 283.8 Ω มีค่าส่วนพุ่งเกินน้อยที่สุด และมีการแกว่งน้อยกว่าค่าความต้านทานหน่วงค่าอื่น จึงเลือกใช้ค่าความต้านทานค่านี้นี้พร้อมทั้งใช้ความต้านทานภาคแรงต่ำแบบที่ 2 กับโวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างขึ้น

4.1.3 การหาผลตอบสนองรูปชั้นเมื่อใส่ซิลด์กับโวลเตจดีโวลเตจดี

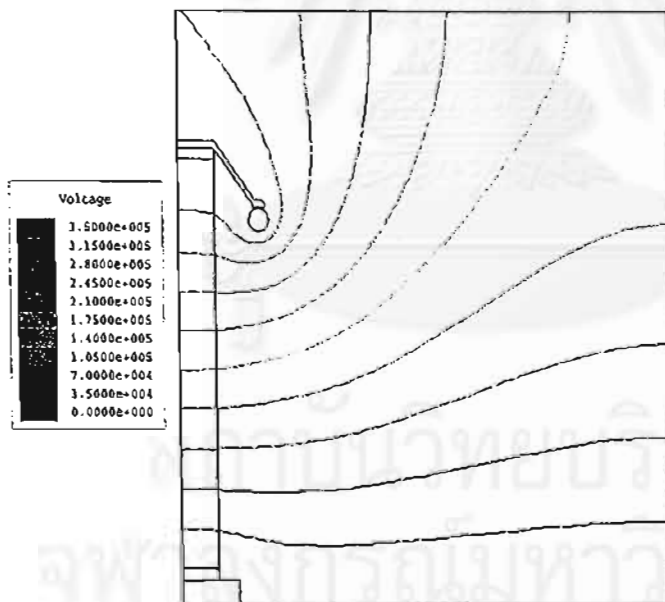
เพื่อเป็นการปรับปรุงผลตอบสนองให้ดีขึ้นจึงได้ทำการทดลองใส่ซิลด์เพื่อให้สนามไฟฟ้าของโวลเตจดีโวลเตจดีกระจายตัวสม่ำเสมอขึ้น ซึ่งจะเป็นการลดค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ของโวลเตจดีโวลเตจดีลงแต่มีข้อควรระวังเกี่ยวกับการใส่ซิลด์คือซิลด์จะทำให้เกิดค่าเก็บประจุค่าหนึ่งขนานอยู่ภายนอกกับโวลเตจดีโวลเตจดีซึ่งจะทำให้เกิดการแกว่งของผลตอบสนองรูปชั้นซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใส่ตัวต้านทานหน่วง ดังนั้นเพื่อหาขนาดของซิลด์ที่เหมาะสมจึงทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม Maxwell (12) โดยจากการเปลี่ยนรูปแบบของซิลด์แบบต่างๆให้ผลที่แตกต่างกันออกไปในที่นี้จะยกตัวอย่างมาแสดงเพียง 3 แบบดังในรูปที่ 4.7 (ซิลด์แบบที่ 1, 2 และ 3 มีค่าความสูงต่อรัศมีของซิลด์เท่ากับ 0.96, 0.62 และ 0.48 ตามลำดับ) และหาผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีโวลเตจดีโดยใส่ซิลด์ที่ทดลองสร้างขึ้นจริงดังในรูปที่ 4.8 และผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีโวลเตจดีดัง ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ก.) ซิลด์แบบที่ 1

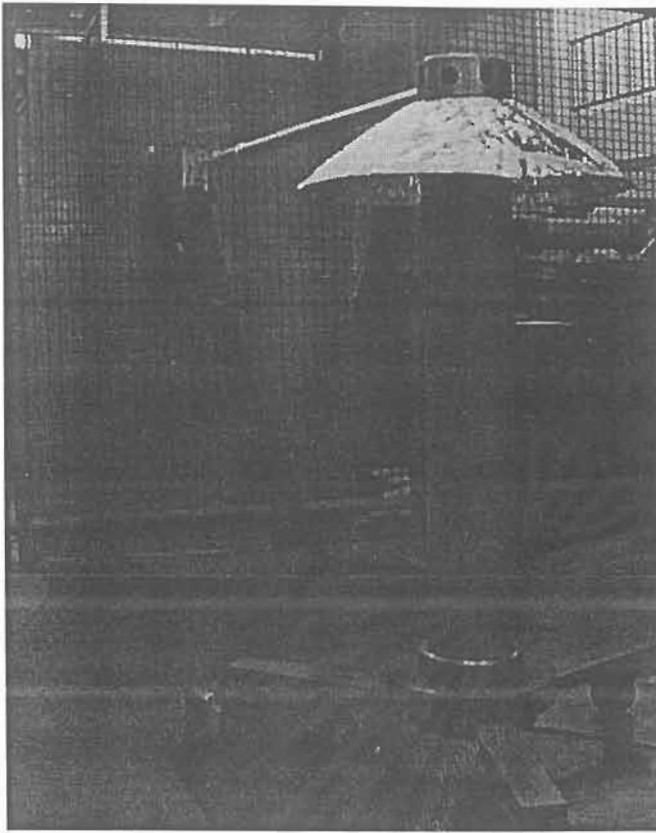


รูปที่ 4.7 ข.) ซีลด์แบบที่ 2

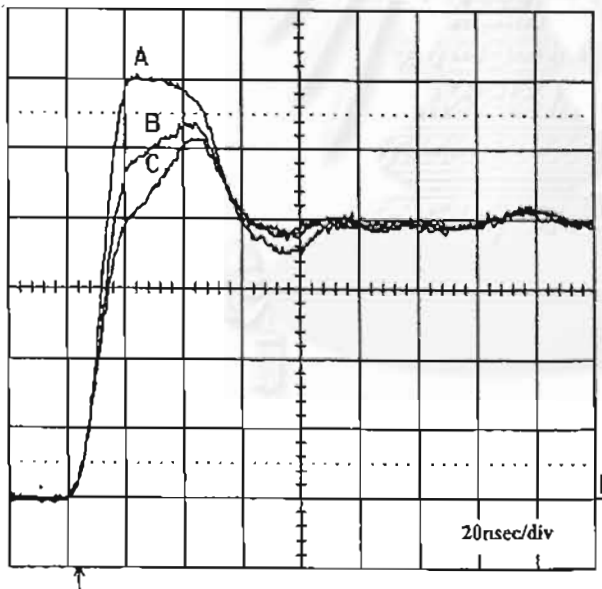


รูปที่ 4.7 ค.) ซีลด์แบบที่ 3

รูปที่ 4.7 การกระจายของแรงดันจากการจำลองแบบของซีลด์ทั้ง 3 แบบ ด้วยโปรแกรม Maxwell [12] ที่ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 4.8 การหาผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีไวเดอร์โดยใส่ ซิลด์แบบที่ 3 ที่ทดลองสร้างขึ้นจริง



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองรูปชั้นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อใส่ซิลด์แบบที่ 1, 2 และ 3

รูปผลตอบสนองรูปชั้น A ใส่ซิลด์แบบที่ 1
รูปผลตอบสนองรูปชั้น B ใส่ซิลด์แบบที่ 2
รูปผลตอบสนองรูปชั้น C ใส่ซิลด์แบบที่ 3

จากรูปที่ 4.9 ความถี่ของการแกว่งเมื่อใส่ซิลด์แบบที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 12.2 MHz, 15.4 MHz และ 20.4 MHz ตามลำดับ และ ค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์ที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 127 pF, 81 pF และ 46 pF ตามลำดับ

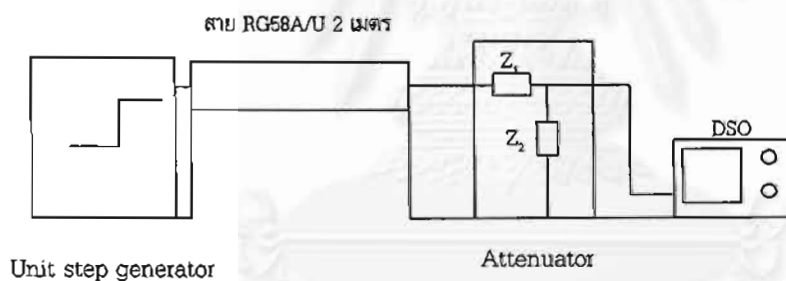
ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อใส่ซีลด์แบบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับที่ค่าความต้านทานหน้าวง 283.8 โอห์ม

ซีลด์แบบที่	$\beta(\%)$	$T_{\alpha}(\text{nsec})$	$T_{\beta}(\text{nsec})$
1	51.10	5.10	-6.50
2	32.25	6.13	0.23
3	28.74	7.51	3.81

จากผลการทดลองโดยการใส่ซีลด์จริงแบบที่ 1, 2 และ 3 สรุปว่า ซีลด์แบบที่ 1 ให้ผลตอบสนองที่เร็วที่สุด และ ช้าลงตามลำดับจนถึงซีลด์แบบที่ 3 ซึ่งให้ผลตอบสนองช้าที่สุดแต่ยังคงผ่านตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ส่วนพุงเกินของซีลด์แบบที่ 1 มากเกินไป ส่วนซีลด์แบบที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองรูปคลื่นแตกต่างจากตารางที่ 4.2 (เมื่อไม่ใส่ซีลด์) ไม่มากนัก เพื่อเป็นการประหยัดจึงไม่จำเป็นต้องใส่ซีลด์แต่อย่างใด

4.1.4 ผลตอบสนองรูปคลื่นของตัวลวดทอง

วงจรที่ใช้หาผลตอบสนองรูปคลื่นของตัวลวดทองแสดงในรูปที่ 4.10



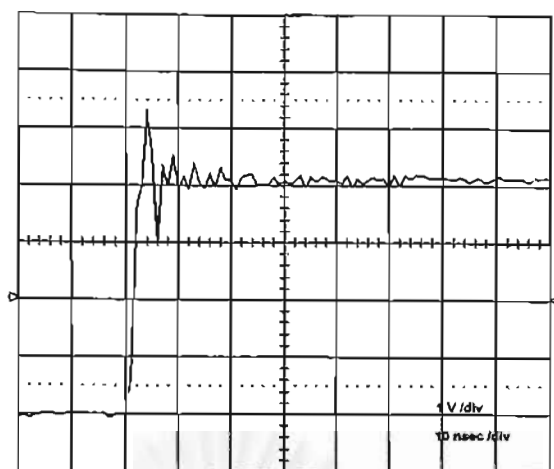
รูปที่ 4.10 วงจรหาผลตอบสนองรูปคลื่นของตัวลวดทอง

สาย RG58A/U มีค่า $Z_c = 50$ โอห์ม

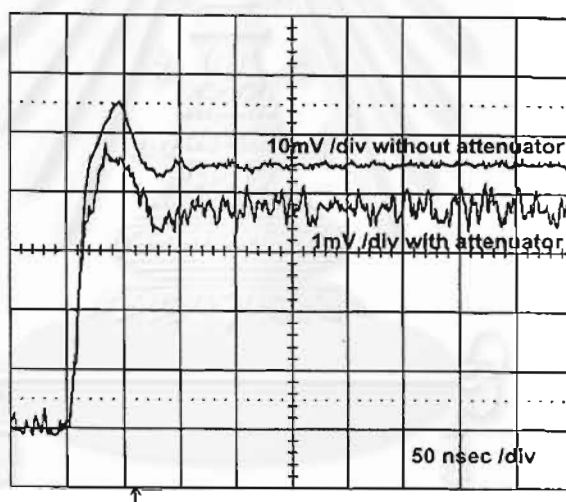
Z_1 = ความต้านทานภาคปฐมภูมิของตัวลวดทอง

Z_2 = ความต้านทานภาคทุติยภูมิของตัวลวดทอง

ผลตอบสนองรูปคลื่นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ก และ ข โดยจากผลที่ได้เมื่อใส่ตัวลวดทองเข้ากับโวลเตจดีไวเดอร์จะแตกต่างจากผลเมื่อไม่ใส่ตัวลวดทองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (หมายเหตุ : รูปที่ 4.11 ข. เนื่องจากสัญญาณมีขนาดเล็กทำให้มีสัญญาณรบกวนเข้ามาค่อนข้างมาก)



รูปที่ 4.11 ก.



รูปที่ 4.11 ข.

รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอนแบบความต้านทาน

ก.) ผลตอบสนองรูปขึ้นของตัวลวดทอนอย่างเดียว

ข.) ผลตอบสนองรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์เมื่อ มี และ ไม่มี
ตัวลวดทอนแสดงบนสเกลแนวตั้งต่างกัน

จากรูปออสซิลโลกราฟ ผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้มีค่าเวลาขาขึ้น 1.3 ns และ เวลาตอบสนอง 1.8 ns ซึ่งสามารถคำนวณค่าแบนด์วิดท์ (-3dB) ได้ประมาณ 270 MHz เพียงพอที่จะถ่ายโอนสัญญาณจากภาคแรงต่ำของ โวลเตจดีไวเดอร์ไปยังดิจิตอลออสซิลโลสโคปได้

4.2 การหาค่าสเกลแพกเตอร์

การหาค่าสเกลแพกเตอร์ใช้วิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ และนำค่าอิมพีแดนซ์มาคำนวณหาค่าสเกลแพกเตอร์ เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทาน คือ Precision LCR Meter HP 4284A ความถี่ 20Hz-1MHz [13,14] ใช้วัดค่าความต้านทานของภาคแรงต่ำ, ความต้านทานหน่วง, และความต้านทานของตัวลวดทอง รวมทั้ง ความต้านทานของสายเคเบิล โดยทุกค่าวัดค่าความต้านทานอย่างละ 20 ครั้งที่ความถี่ 1 kHz แล้วนำมาเฉลี่ย และ KEITHLEY 617 Programable Electrometer [15] วัดค่าความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งวัดด้วยวิธีป้อนค่าแรงดันเข้าแล้วอ่านค่ากระแสด้านขาออก แล้วคิดค่าความต้านทานจากผลหารของแรงดันที่ป้อน และ กระแสที่วัดได้โดยคิดจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด 20 ครั้ง ดังตารางที่ 4.4 (ส่วนค่าความไม่แน่นอนของ เครื่องมือวัด ในการวัดค่าความต้านทานแต่ละตัวแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานขององค์ประกอบต่างๆในระบบวัดแรงดัน(อุณหภูมิ 26 C)

องค์ประกอบ	ความต้านทาน	ค่าความต้านทาน (Ω)	ค่าความไม่แน่นอน แบบสุ่ม(U, (%)
โวลเตจดีไวเดอร์	R_d	277.045**	0.000154
	R_s	6.900 k	0.000070
	R_2	7.338	0.000096
ตัวลวดทอง	R_3	46.077	0.000067
	R_4	4.090	0.000298
เคเบิลวัด	R_1	0.179	0.000099
	R_0	*	-

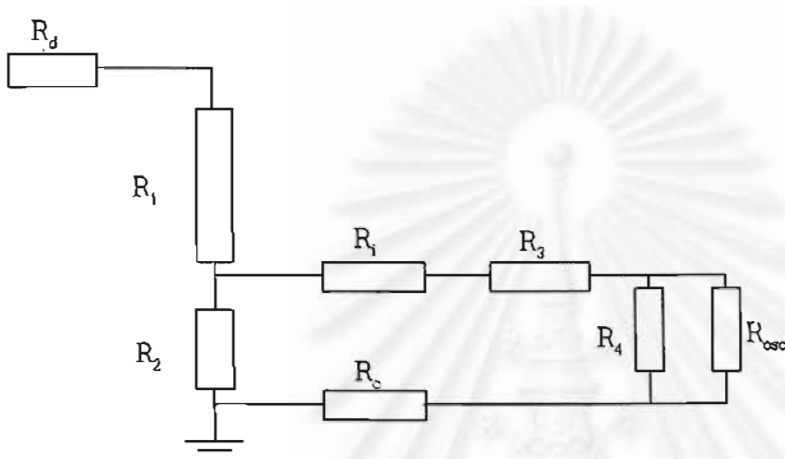
*หมายเหตุ ค่าความต้านทาน R_0 ไม่ได้ทำการวัดเนื่องจากขณะใช้งานจริงด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูงต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน จึงไม่ต้องนำมาคิดค่าสเกลแพกเตอร์ด้วย

**หมายเหตุ ค่าความต้านทานหน่วงใช้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นใหม่จากเดิม 283.8 โอห์ม เนื่องจากความต้านทานหน่วงหน่วงเดิมเกิดความเสียหายระหว่างการติดตั้ง โดยที่ผลตอบสนองรูปขั้นมีค่าดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลตอบสนองรูปขึ้นเมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานหน่วย

ค่าความต้านทานหน่วย (Ω)	β (%)	T_α (nsec)	T_N (nsec)
283.8	30.13	9.25	6.04
277.045	33.25	7.76	5.04

ผลที่ได้ใกล้เคียงค่าเดิมตั้งนั้นในการคิดค่าสเกลแฟกเตอร์ และการทดสอบต่างๆจะใช้ค่าความต้านทานหน่วย 277 Ω



รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลในการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบความต้านทาน จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.12 สามารถคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ได้ดังสมการ

$$F_R = \left(\frac{R_d + R_1}{R_2} + 1 \right) \times \left(\frac{R_3 + R_1 + R_0}{R_4} + 1 \right)$$

$$R_2 = \frac{R_2 \times (R_1 + R_0 + R_3 + R_4)}{R_2 + R_1 + R_0 + R_3 + R_4} \quad R_4 = \frac{R_4 \times R_{osc}}{R_4 + R_{osc}}$$

โดยที่

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.4 จะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดเป็น

$$F_R = 13806.931$$

4.3 การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned Scale Factor) และการทดสอบพฤติกรรมพลศาสตร์ของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น (Dynamic behavior test)

วิธีการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดและการทดสอบพฤติกรรมพลศาสตร์ตามมาตรฐาน IEC 60-2, (1994) ได้กำหนดวิธีทดสอบกับระบบวัดอ้างอิงไว้ คือ ใช้วิธีการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง โดย ถ้าเป็นไป

ได้ให้ทดสอบที่แรงดันพิกัด แต่โดยทั่วไประบบวัดอ้างอิงมักมีแรงดันพิกัดที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการวัดเปรียบเทียบ อาจทำที่ระดับแรงดัน 20 % ของแรงดันพิกัดก็ได้

ในการทดลองต้องอ่านค่าแรงดันจากระบบวัดทั้ง 2 ระบบพร้อมกันแล้วนำค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบ วัดอ้างอิงหารด้วยแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จะกำหนดให้เป็น สเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ F_i การทดสอบจะทำจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งหมด n ค่า โดยจำนวนข้อมูลต้อง มากกว่า 10 ข้อมูลขึ้นไป ($n \geq 10$) และ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้อ่าน F_m จะถือเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดของ ระบบวัดที่ต้องการทดสอบ โดยที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน s ที่คำนวณจาก

$$s = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n - 1}}$$

จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 % ของค่า F_m

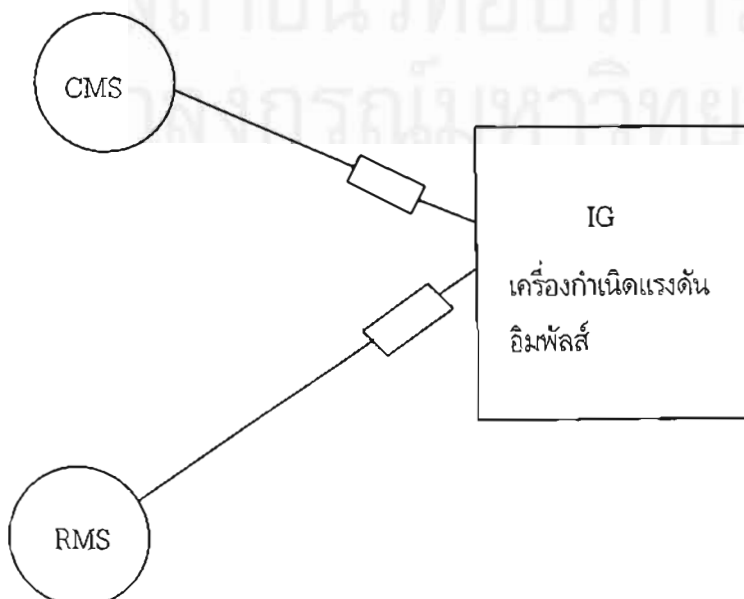
ส่วนค่าพารามิเตอร์ของเวลาจะต้องอยู่ในเงื่อนไขดังนี้

- 1) ค่าพารามิเตอร์เวลาแต่ละค่าต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 10\%$ ของค่าที่วัดได้จากระบบอ้างอิง
- 2) ค่าอัตราส่วนของค่าที่วัดได้จากระบบวัดที่ต้องการทดสอบกับระบบอ้างอิงจะต้องมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน น้อยกว่า 5 % ของค่าเฉลี่ย

รูปคลื่นที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีรูปคลื่นแตกต่างกัน 2 รูปคลื่น คือ

- 1) กรณีรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น
 - เวลาหน้าคลื่นสั้นกว่าที่กำหนดให้เป็น t_{min}
 - เวลาหน้าคลื่นยาวกว่าที่กำหนดให้เป็น t_{max}
 - ทั้ง 2 รูปคลื่นต้องมีเวลาหางคลื่นยาวที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- 2) กรณีของรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น
 - เวลาหน้าคลื่นสั้นกว่าที่กำหนดให้เป็น t_{min}
 - เวลาหน้าคลื่นยาวกว่าที่กำหนดให้เป็น t_{max}

ได้ทำการทดสอบวัดเปรียบเทียบระหว่างระบบวัดทั้ง 2 ระบบโดยการติดตั้งแบบ Y ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การติดตั้งระบบ วัดแบบ Y ในการทดสอบ วัดเปรียบเทียบ
RMS = ระบบวัดอ้างอิง
CMS = ระบบวัดที่ ต้องการทดสอบ

เพื่อความสะดวกของการวัดค่าพารามิเตอร์ของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจากทั้ง 2 ระบบ จึงได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อใช้วัด ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ (U_p) และ ค่าพารามิเตอร์ทางเวลาทั้ง เวลาคู่หน้าคลื่น (T_1) และ เวลาคู่หลังคลื่น (T_2) ส่วนดิจิทัลออสซิลโลสโคปใช้ของ LeCroy รุ่น 9384M 1 GHz Oscilloscope [16] โดย ใช้ช่องสัญญาณ 2 ช่องทำการวัดเปรียบเทียบ ช่องสัญญาณที่ 2 ต่อกับระบบวัดอ้างอิง และช่องสัญญาณที่ 3 ต่อกับระบบวัดที่ต้องการทดสอบตลอดการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีปัจจัยต่างๆเหมือนกัน แต่ค่าความแตกต่างระหว่างช่องสัญญาณทั้ง 2 อาจมีค่ามากพอสมควร เนื่องจากอัตราขยายของแต่ละช่องสัญญาณไม่เท่ากัน และทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงยังไม่มีเครื่องปรับเทียบอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (Impulse Calibrator)

4.3.1 ผลการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

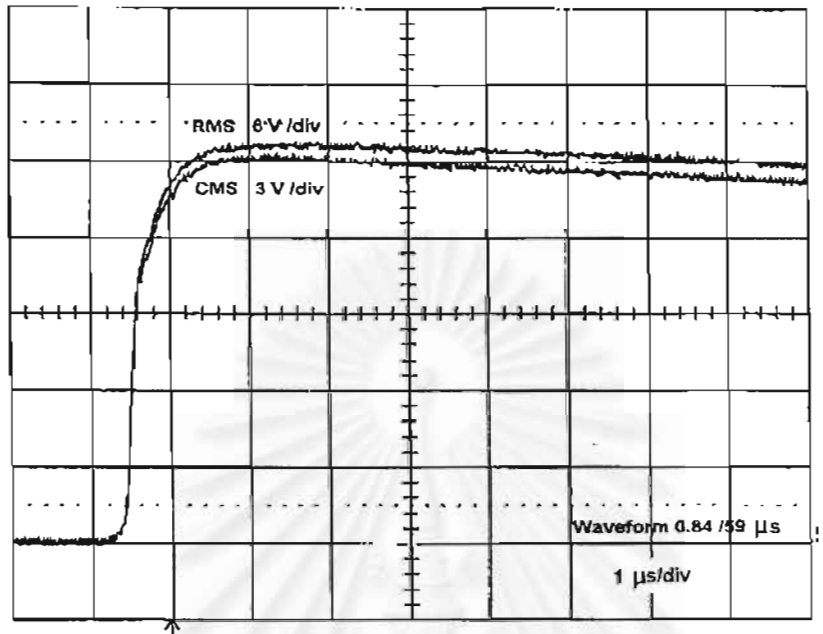
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นเต็ม ที่ t_{min} และ t_{max}

รูปคลื่น และ ระดับ แรงดัน	ชั่ว แรงดัน	ค่ายอดแรงดัน U_p		เวลาคู่หน้าคลื่น T_1		เวลาคู่หลังคลื่น T_2	
		$U_A(kV)/U_B(V)$		T_{1B}/T_{1A}		T_{2B}/T_{2A}	
		ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
0.8/59 μ sec (t_{min}) 300 kV	บวก	13699.3	0.173305	0.994042	1.5172	1.00665	0.7308
	ลบ	13702.41	0.272376	1.040096	3.2014	0.998133	1.1070
1.5/59 μ sec (t_{max}) 300 kV	บวก	13780.5	0.174763	1.011303	0.6365	0.960733	1.8411
	ลบ	13757.17	0.160388	0.975726	1.4076	1.010051	0.7056
ค่าเฉลี่ยรวม		13734.85	0.195208	1.005292	1.690675	0.99389	1.096125

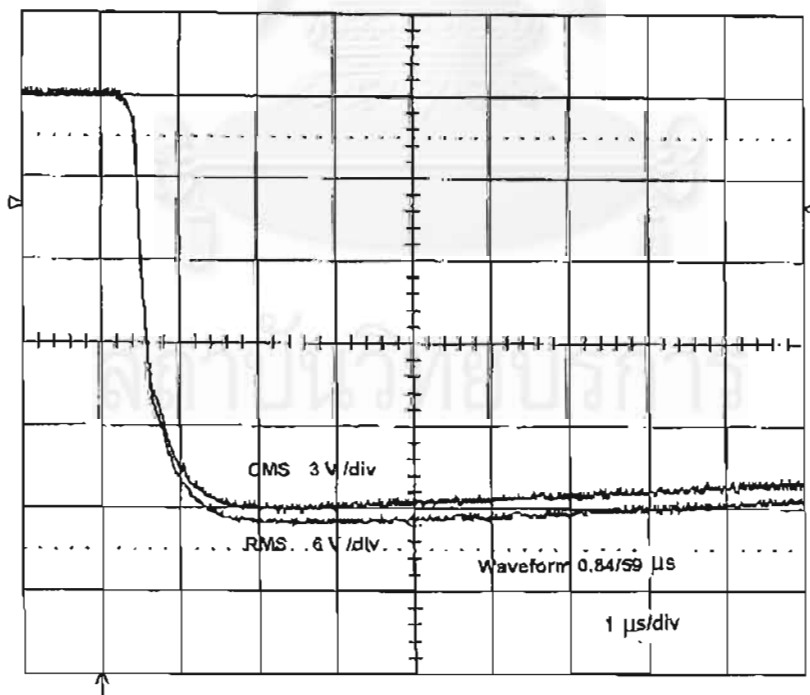
A = ระบบวัดแรงดันอ้างอิง (RMS) (มีสเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 6629.53 [17])
B = ระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ (CMS)

จากตารางที่ 4.6 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ายอดแรงดันหารด้วยค่าเฉลี่ย มีค่าน้อยกว่า 1 % , ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาคู่หน้าคลื่น และ เวลาคู่หลังคลื่น หารด้วยค่าเฉลี่ย มีค่าน้อยกว่า 5 % และ ผลต่างของเวลาคู่หน้าคลื่น และ เวลาคู่หลังคลื่นของระบบวัดอ้างอิงกับระบบวัดที่ต้องการทดสอบในแต่ละครั้ง มีค่าน้อยกว่า

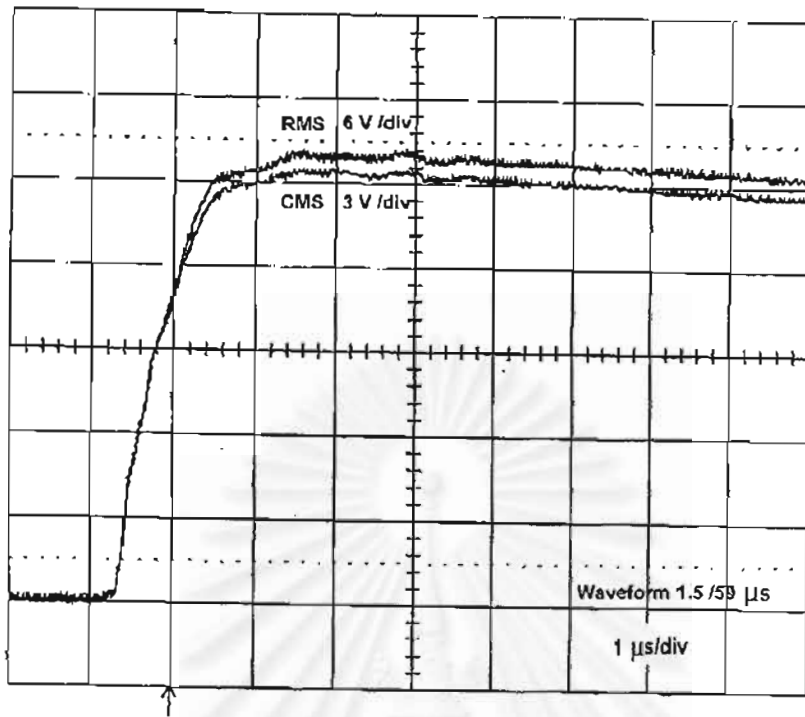
10 % ตามมาตรฐานกำหนด โดยค่ายอดแรงดัน ,เวลาหน้าคลื่น และ เวลาหลังคลื่นในการวัดเปรียบเทียบแต่ละ ครั้งแสดงไว้ในภาคผนวก ค. ส่วนรูปออสซิลโลกราฟแสดงดังรูปที่ 4.14 ถึง รูปที่ 4.17



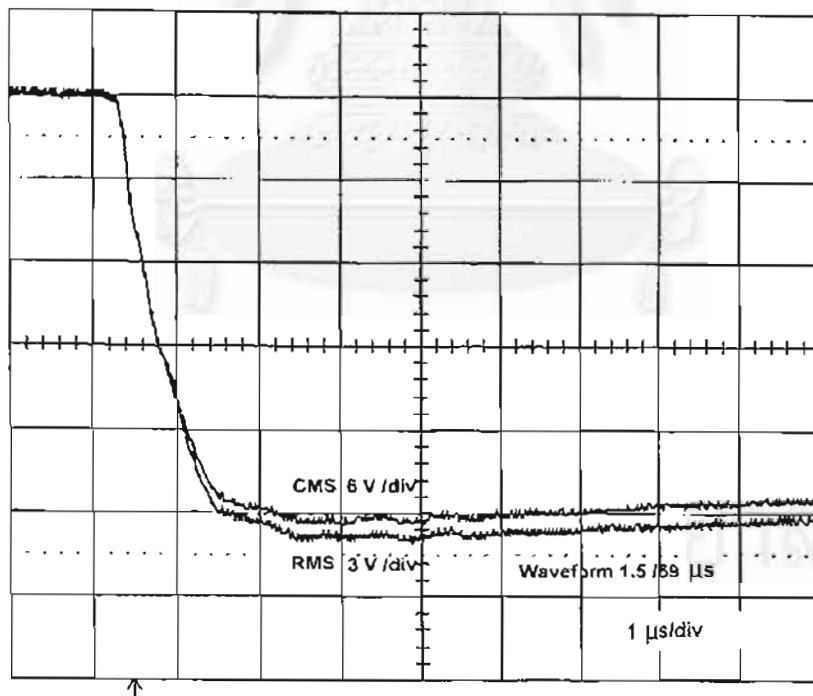
รูปที่ 4.14 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{min}



รูปที่ 4.15 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{min}



รูปที่ 4.16 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{max}



รูปที่ 4.17 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{max}

4.3.2 ผลการทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดทำได้โดยการต่อแกปที่เป็นแบบแบ่งปลายแหลมขนานกับ โวลเตจดีไวเดอร์ และ ตั้งระยะห่างของแกปให้ห่างพอที่จะทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตัดที่หน้าคลื่น หรือ หลังคลื่น ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหลังคลื่น

รูปคลื่นและ ระดับแรงดัน	ชั่วแรงดัน	ค่ายอดแรงดัน U_p		เวลาตัดที่หลังคลื่น T_c	
		$U_A(kV)/U_B(V)$		T_{CB}/T_{CA}	
		ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
0.84/59 μ sec 200 kV	บวก	13763.79	0.4045063	1.001925	1.74430
	ลบ	13700.87	0.3465136	1.00732	1.56420
1.5/59 μ sec	บวก	13744.90	0.4964801	1.00026	1.65494
	ลบ	13792.10	0.2529622	0.99398	0.84773
ค่าเฉลี่ยรวม		13750.415	0.37761555	1.00087125	1.4527925

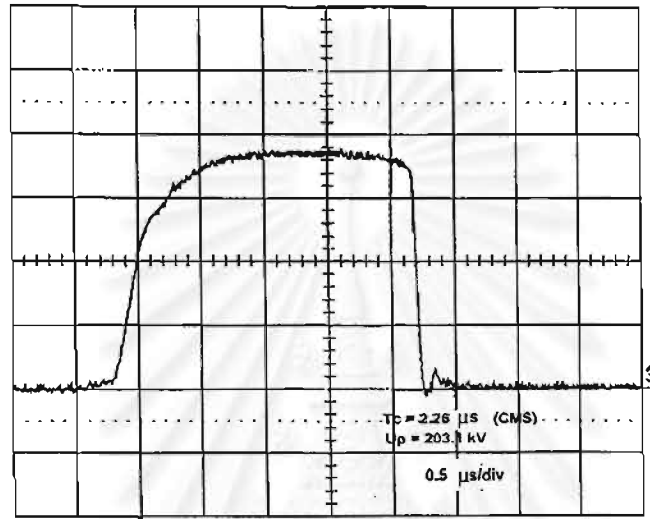
A = ระบบวัดแรงดันอ้างอิง (RMS) (สเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 6629.53 [17])
B = ระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ (CMS)

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

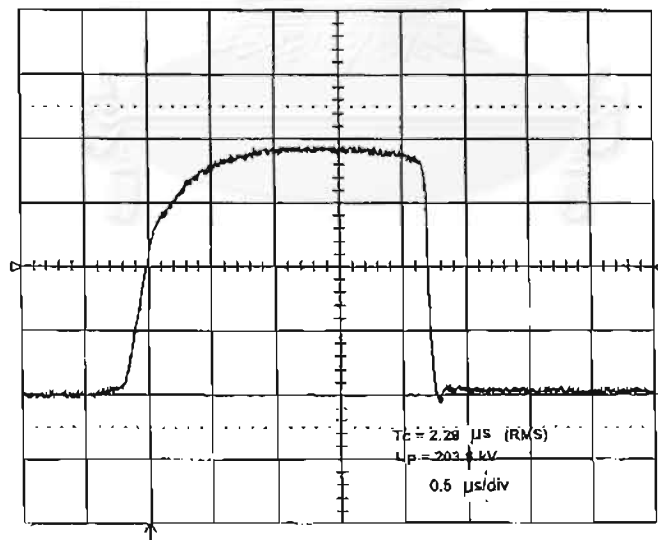
รูปคลื่นและ ระดับแรงดัน	ชั่วแรงดัน	ค่ายอดแรงดัน U_p		เวลาตัดที่หน้าคลื่น T_c	
		$U_A(kV)/U_B(V)$		T_{CB}/T_{CA}	
		ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)	ค่าเฉลี่ย F_m	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
0.84/59 μ sec 200 kV	บวก	13705.46	0.6448175	1.01444	3.4825
	ลบ	13738.52	0.9818714	1.01393	3.8739
1.5/59 μ sec	บวก	13666.79	0.7347101	1.00359	2.6985
	ลบ	13578.72	0.6974613	1.02873	2.0882
ค่าเฉลี่ยรวม		13672.37	0.7647150	1.0151725	3.035775

A = ระบบวัดแรงดันอ้างอิง (RMS) (สเกลแฟกเตอร์เท่ากับ 6629.53 [17])
B = ระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ (CMS)

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ายอดแรงดันรูปคลื่นตัดหารด้วยค่าเฉลี่ย มีค่าน้อยกว่า 1 % , ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาที่ตัดที่หลังคลื่น และ หน้าคลื่น ทหารด้วยค่าเฉลี่ย มีค่าน้อยกว่า 5 % และ ผลต่างของเวลาที่ตัดหน้าคลื่น และ หลังคลื่นของระบบวัดอ้างอิงกับระบบวัดที่ต้องการทดสอบในแต่ละครั้ง มีค่าน้อยกว่า 10 % ตามมาตรฐานกำหนด โดยค่ายอดแรงดัน, เวลาตัดหน้าคลื่น และ เวลาตัดหลังคลื่น ในการวัดเปรียบเทียบแต่ละครั้งแสดงไว้ในภาคผนวก ค. ส่วนรูปออสซิลโลกราฟแสดงดังรูปที่ 4.18 ถึง รูปที่ 4.25



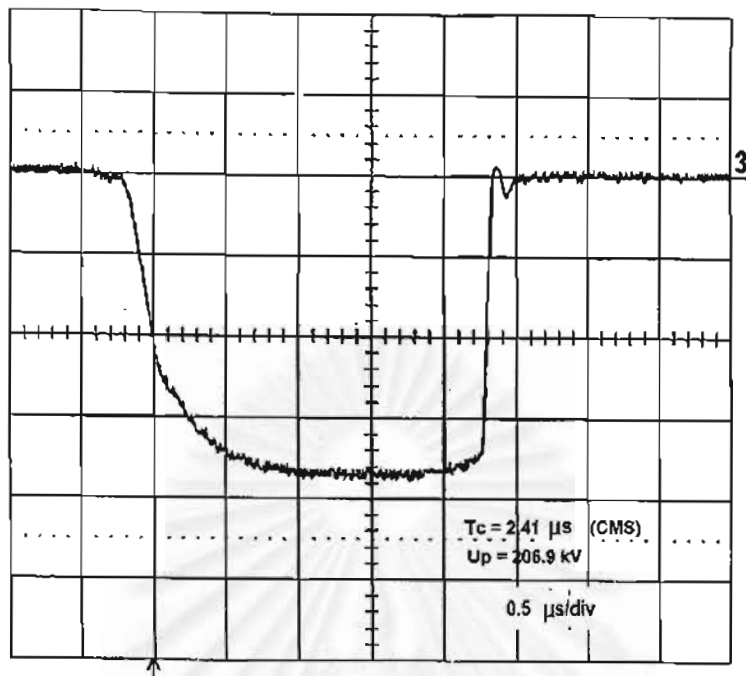
รูปที่ 4.18 ก.) รูปคลื่นของระบบที่ต้องการทดสอบ



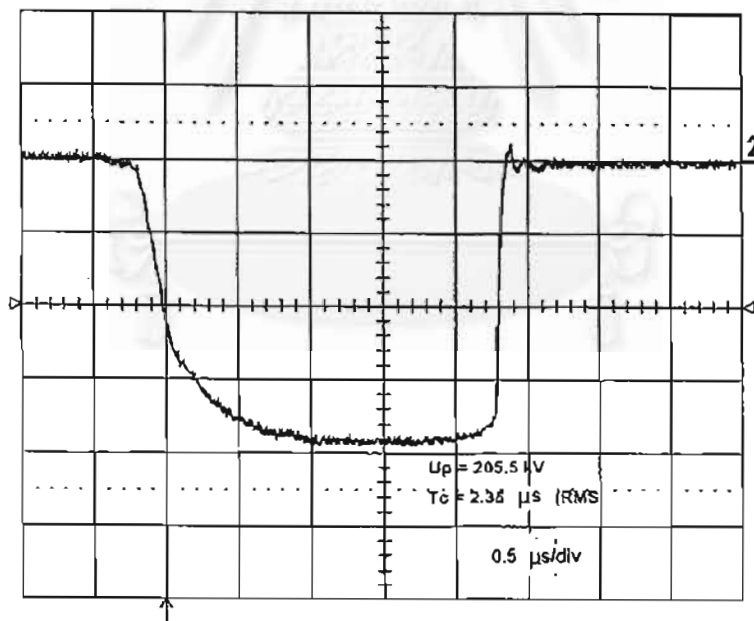
รูปที่ 4.18 ข.) รูปคลื่นของระบบอ้างอิง

รูปที่ 4.18 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วบวก ที่

t_{min}



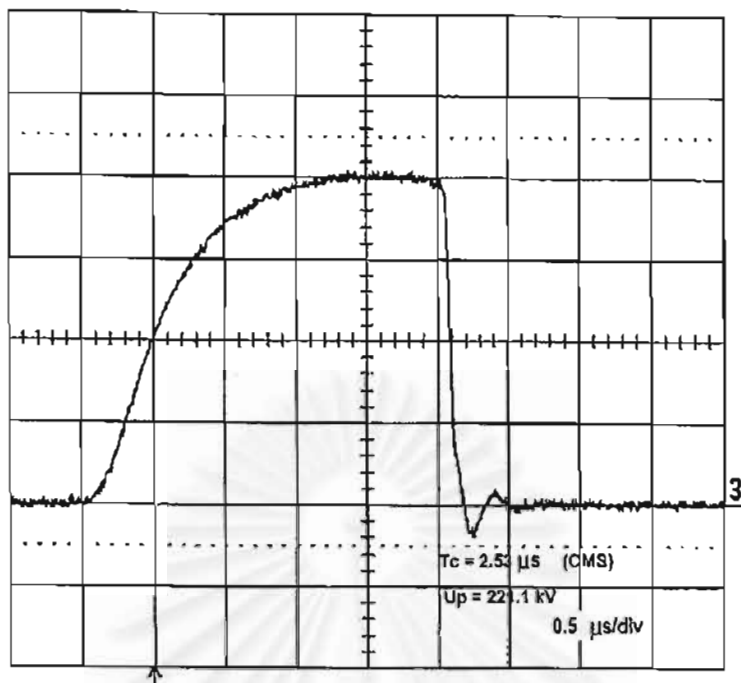
รูปที่ 4.19 ก.) รูปคลื่นของระบบที่ต้องการทดสอบ



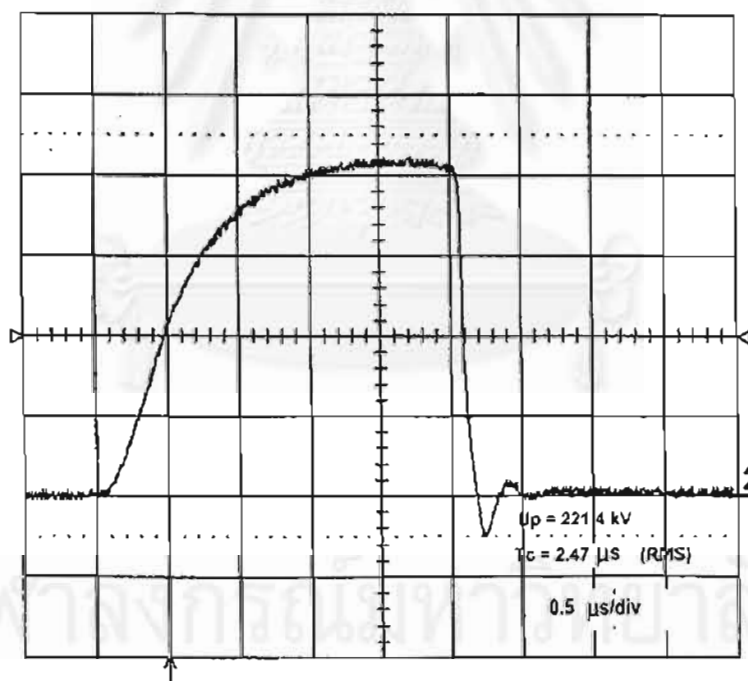
รูปที่ 4.19 ข.) รูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง

รูปที่ 4.19 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วลบ ที่

t_{min}

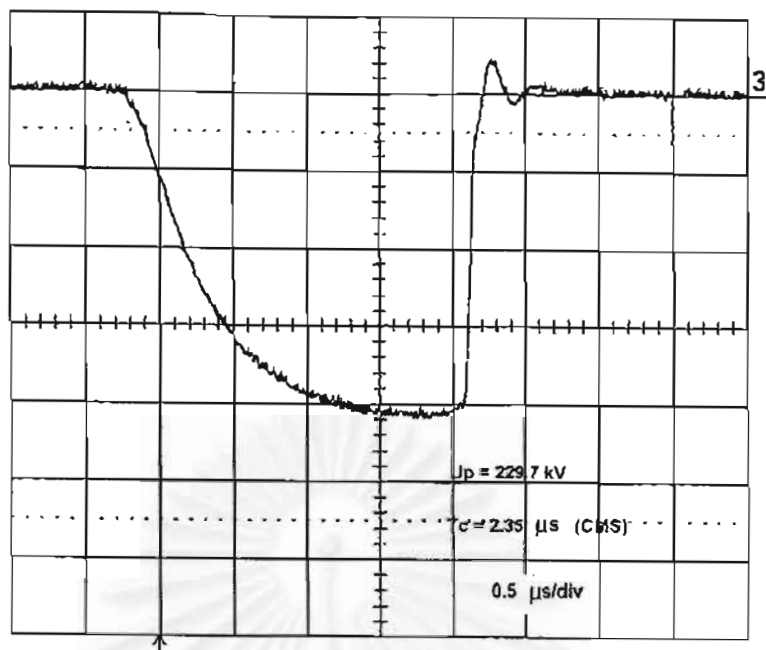


รูปที่ 4.20 ก.) รูปคลื่นของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

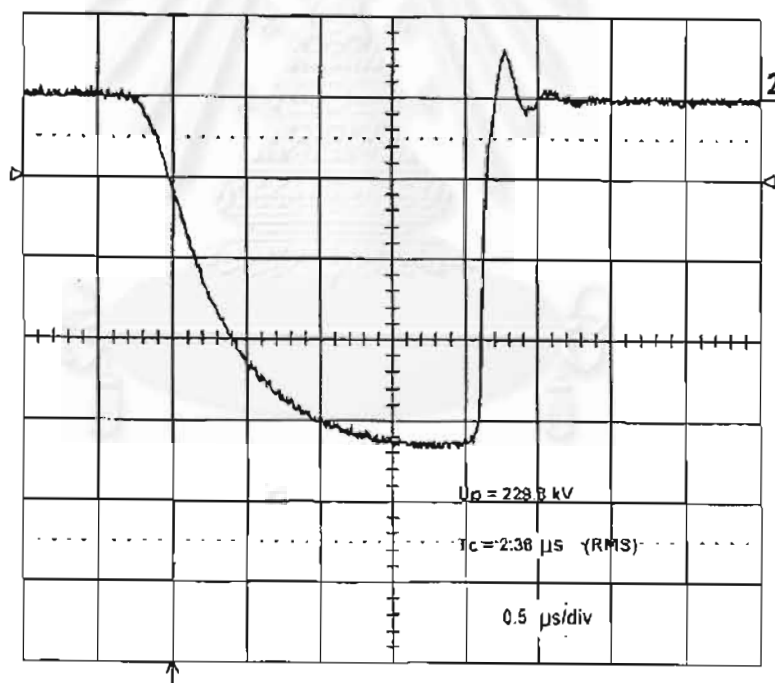


รูปที่ 4.20 ข.) รูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง

รูปที่ 4.20 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ชั่วบวก ที่ t_{\max}



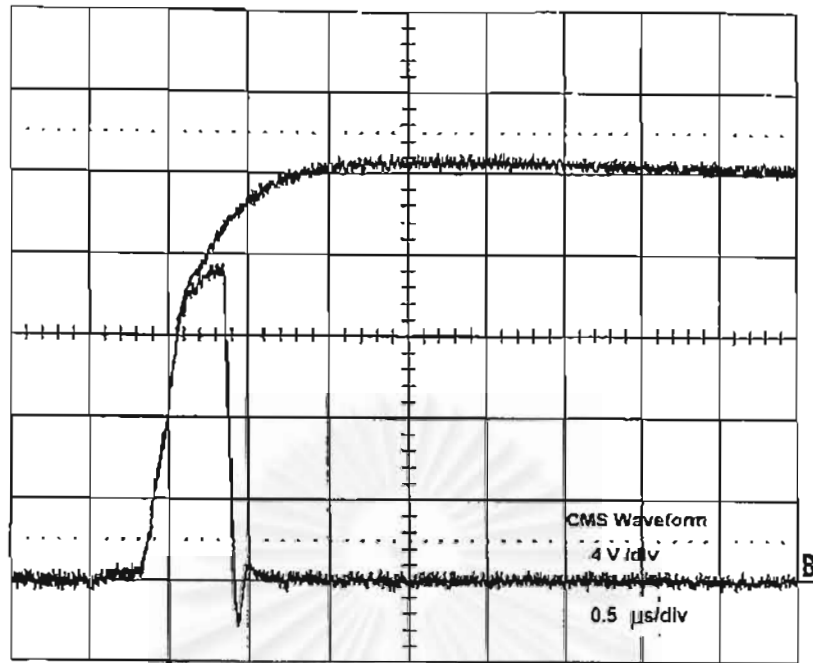
รูปที่ 4.21 ก.) รูปคลื่นของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ



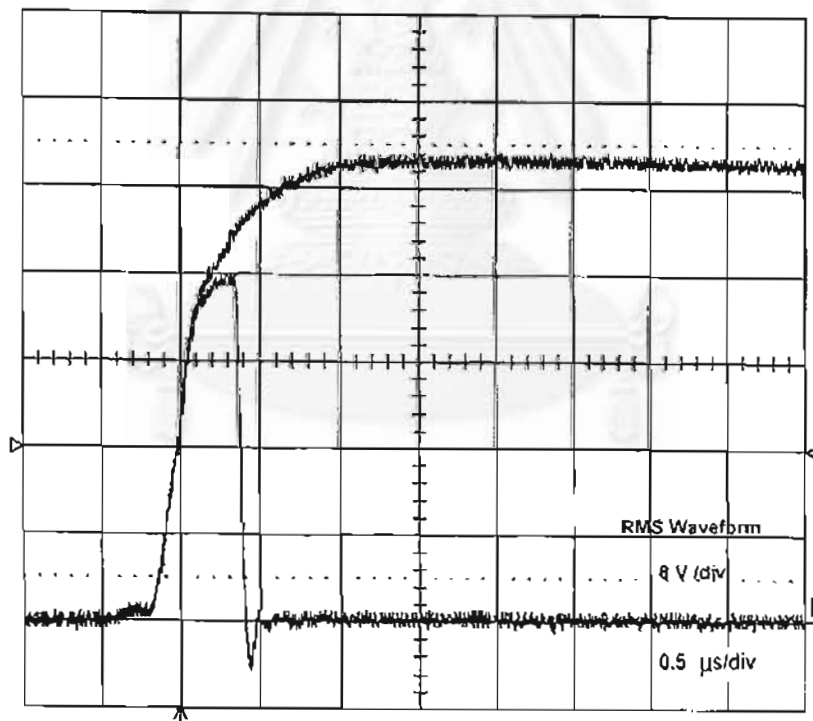
รูปที่ 4.21 ข.) รูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง

รูปที่ 4.21 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ชั่วลบ ที่

t_{\max}

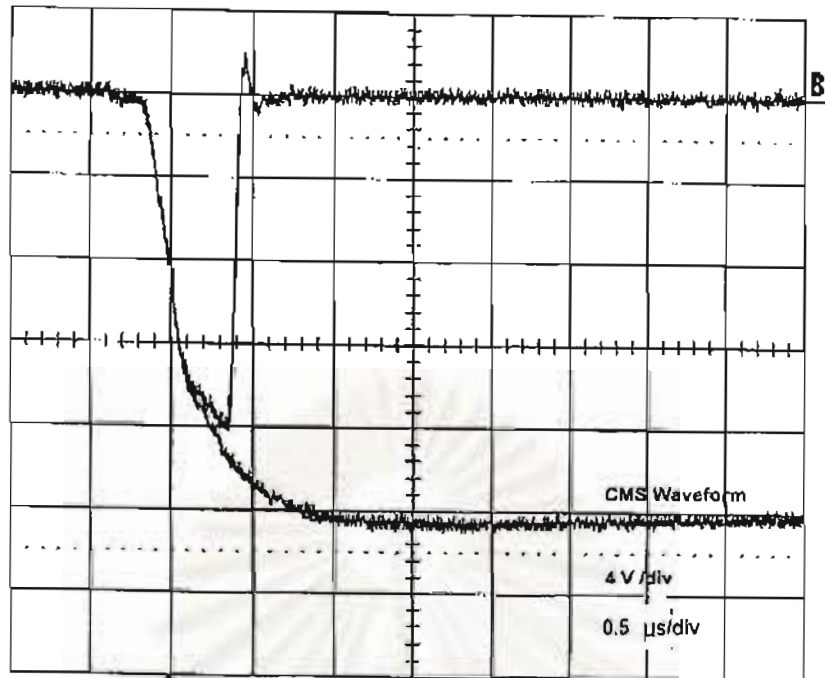


รูปที่ 4.22 ก.) รูปคลื่นของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ

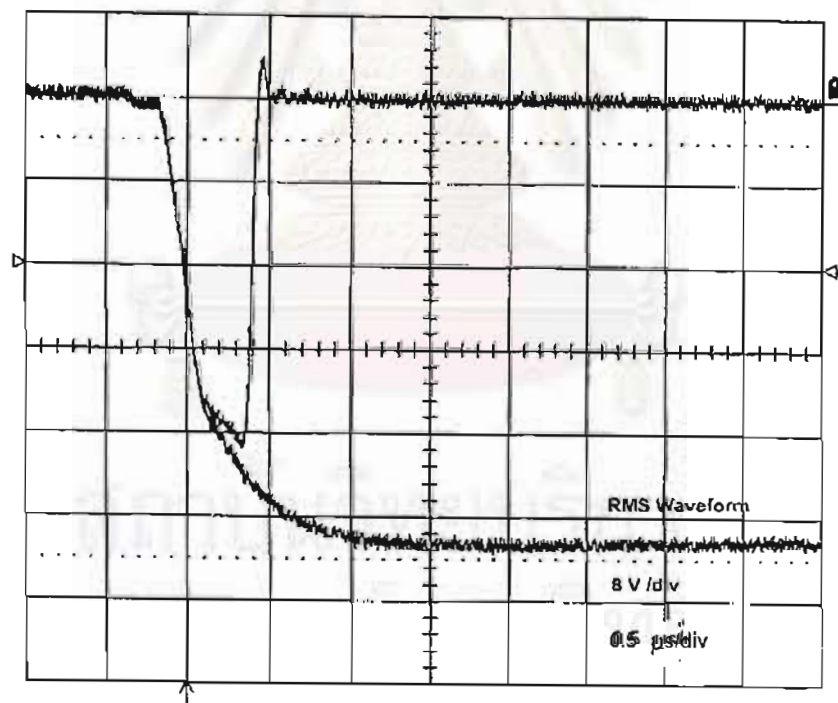


รูปที่ 4.22 ข.) รูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง

รูปที่ 4.22 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วบวก ที่

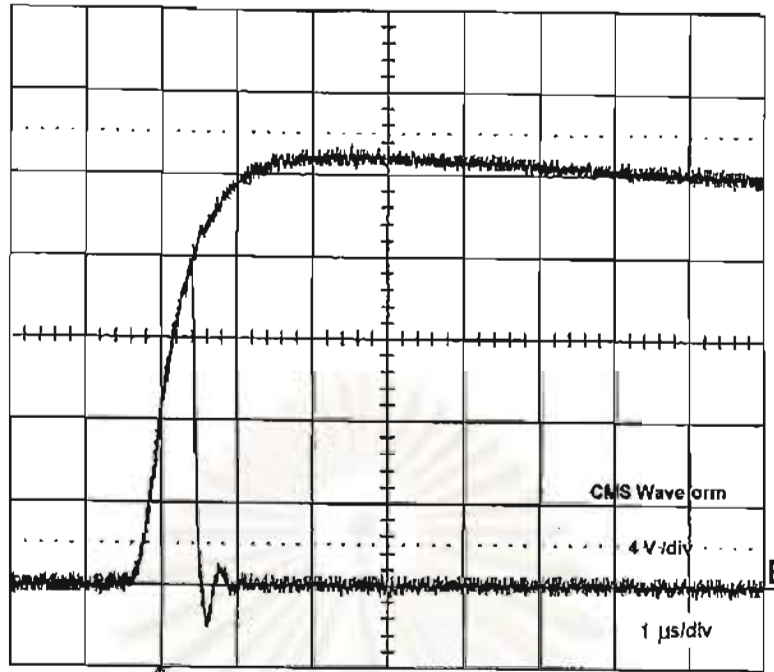


รูปที่ 4.23 ก.) รูปคลื่นของระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ

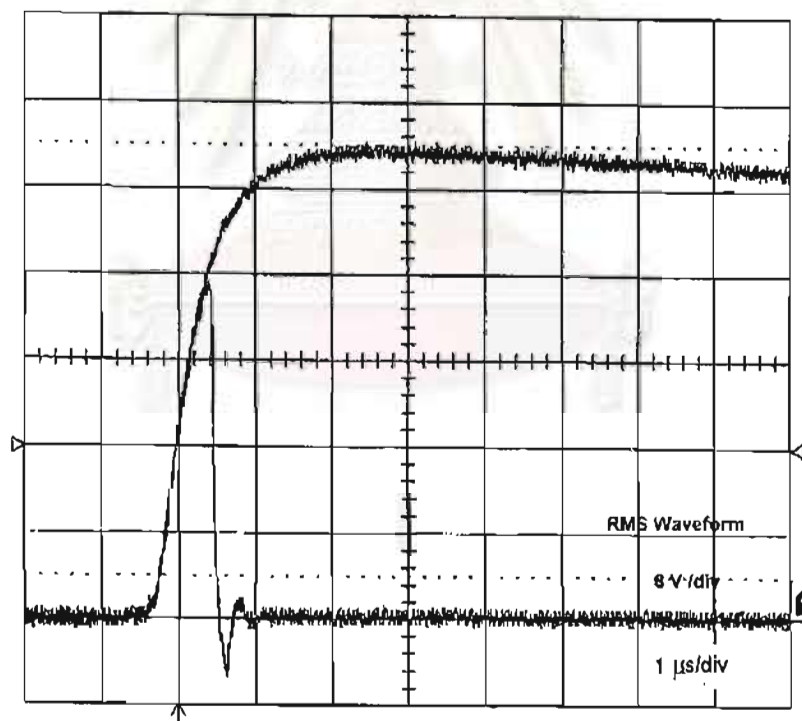


รูปที่ 4.23 ข.) รูปคลื่นของรับวัดแรงดันอ้างอิง

รูปที่ 4.23 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วลบ ที่



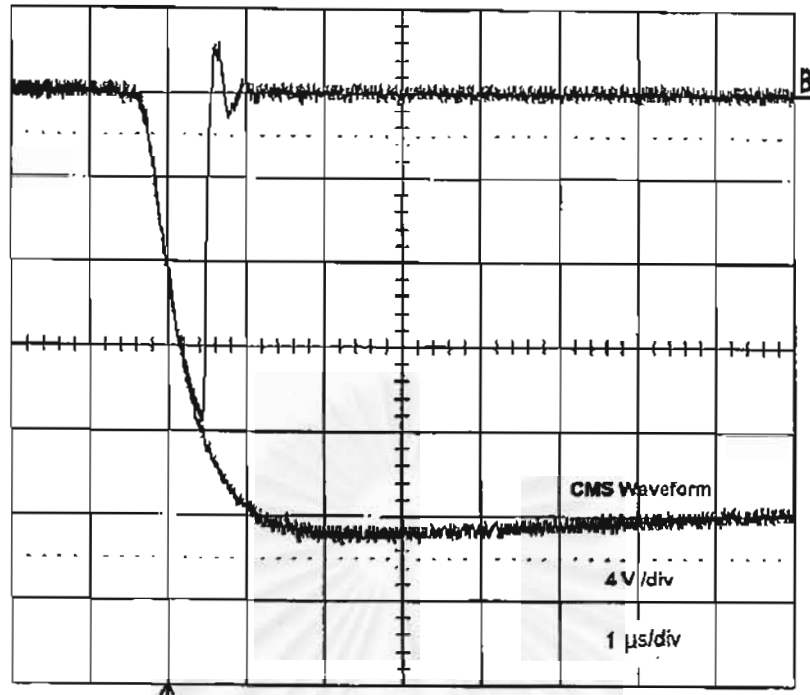
รูปที่ 4.24 ก.) รูปคลื่นของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ



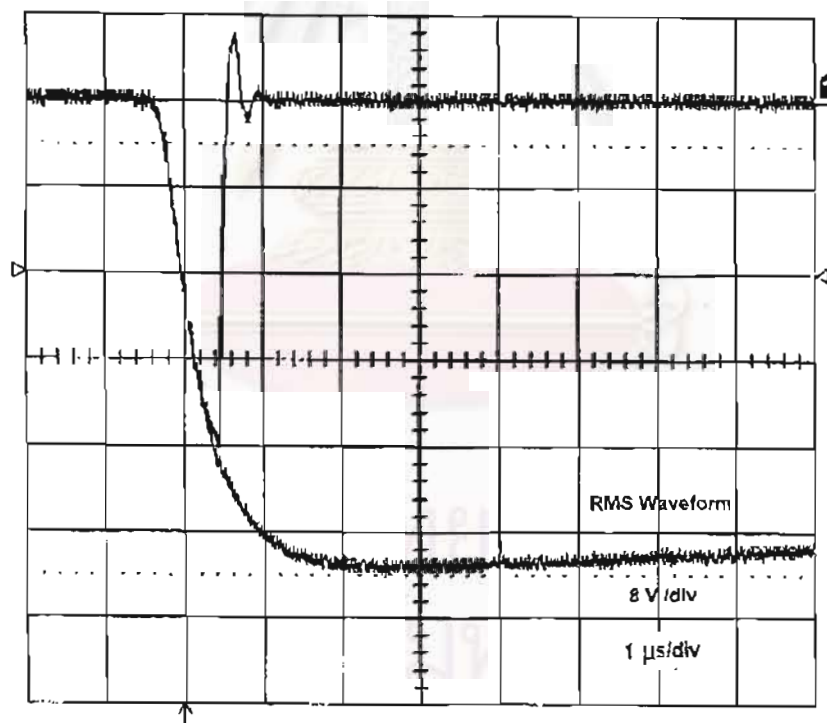
รูปที่ 4.24 ข.) รูปคลื่นของระบบวัดแรงดันอ้างอิง

รูปที่ 4.24 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วบวก ที่

t_{max}



รูปที่ 4.25 ก.) รูปคลื่นของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ



รูปที่ 4.25 ข.) รูปคลื่นของระบบวัดอ้างอิง

รูปที่ 4.25 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากการทดสอบวัดเปรียบเทียบรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วลบ ที่

t_{max}

จากผลการทดสอบข้างต้นสรุปได้ว่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ ให้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิง กล่าวคือ ค่ายอดแรงดันที่อ่านได้สำหรับรูปคลื่นเต็ม และ รูปคลื่นตัดหลังคลื่น มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1 % และ ค่ายอดแรงดันที่อ่านได้สำหรับรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3 % และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสเกลแฟกเตอร์อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด คือ ± 1 % ของค่าเฉลี่ย ส่วนการวัดค่าพารามิเตอร์ของเวลาแต่ละค่ามีความแตกต่างจากค่าที่วัดได้จากระบบวัดอ้างอิงไม่เกิน 10 % และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง ± 5 % ของค่าเฉลี่ย

4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

การทดสอบในหัวข้อนี้จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงแรงดันที่ใช้งาน โดยทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิง และถ้าค่าความแตกต่างของค่าอัตราส่วนแรงดันของระบบวัดอ้างอิงกับระบบวัดที่ต้องการทดสอบมีค่าไม่เกิน ± 1 % ของค่าเฉลี่ย ระบบวัดที่ทำการทดสอบถือได้ว่าเป็นเชิงเส้น และ อย่างไรก็ตามระบบวัดที่ไม่ผ่านข้อกำหนดข้างต้นแสดงว่าระบบวัดนั้นๆไม่เป็นเชิงเส้น

วงจรที่ใช้ทำการทดสอบยังเป็นวงจรแบบ Y ที่ใช้ในการวัดเปรียบเทียบค่าสเกลแฟกเตอร์ โดยทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 100 ถึง 300 kV ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 (ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น แสดงในภาคผนวก ง.)

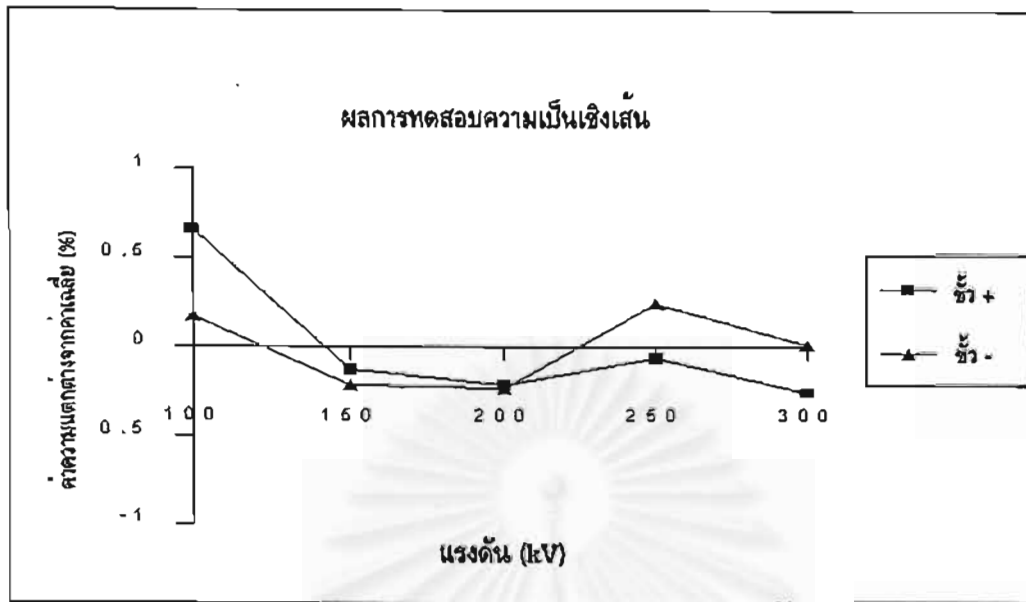
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง ขั้วบวก

ลำดับ	ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ระดับแรงดัน				
	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
ค่าเฉลี่ย	13753.7	13701.6	13698.7	13764	13732.1
ค่าเฉลี่ยรวม	13730.02559				
ค่าผลต่างจากค่าเฉลี่ยรวม (%)	0.17213	-0.2072	-0.2279	0.24759	0.0153

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง ขั้วลบ

ลำดับ	ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ระดับแรงดัน				
	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
ค่าเฉลี่ย	13738.6	13631.8	13620.6	13639.9	13613.5
ค่าเฉลี่ยรวม	13648.866				
ค่าผลต่างจากค่าเฉลี่ยรวม (%)	0.65761	-0.125	-0.2073	-0.0661	-0.2593

จากผลการทดสอบข้างต้น ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ระดับแรงดันแต่ละค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าสเกลแฟกเตอร์ไม่เกิน 1 % แสดงว่าระบบวัดที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

4.5 การทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น (Short Term Stability)

ทำโดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ค่าที่กักด้วยจำนวนครั้งที่ใช้งานจริงโดยมาตรฐานกำหนดว่าค่าสเกลแฟกเตอร์ก่อนและหลังการป้อนแรงดันจะต้องแตกต่างกันไม่เกิน 1 % ในที่นี้ป้อนแรงดันขนาด 300 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วละ 15 ครั้ง ภายในเวลา 40 นาที และวัดค่าสเกลแฟกเตอร์จากแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน ผลการทดสอบที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น

ก่อนการทดสอบ	สเกลแฟกเตอร์	
	หลังการทดสอบ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง (%)
13807	13735.5	0.51785

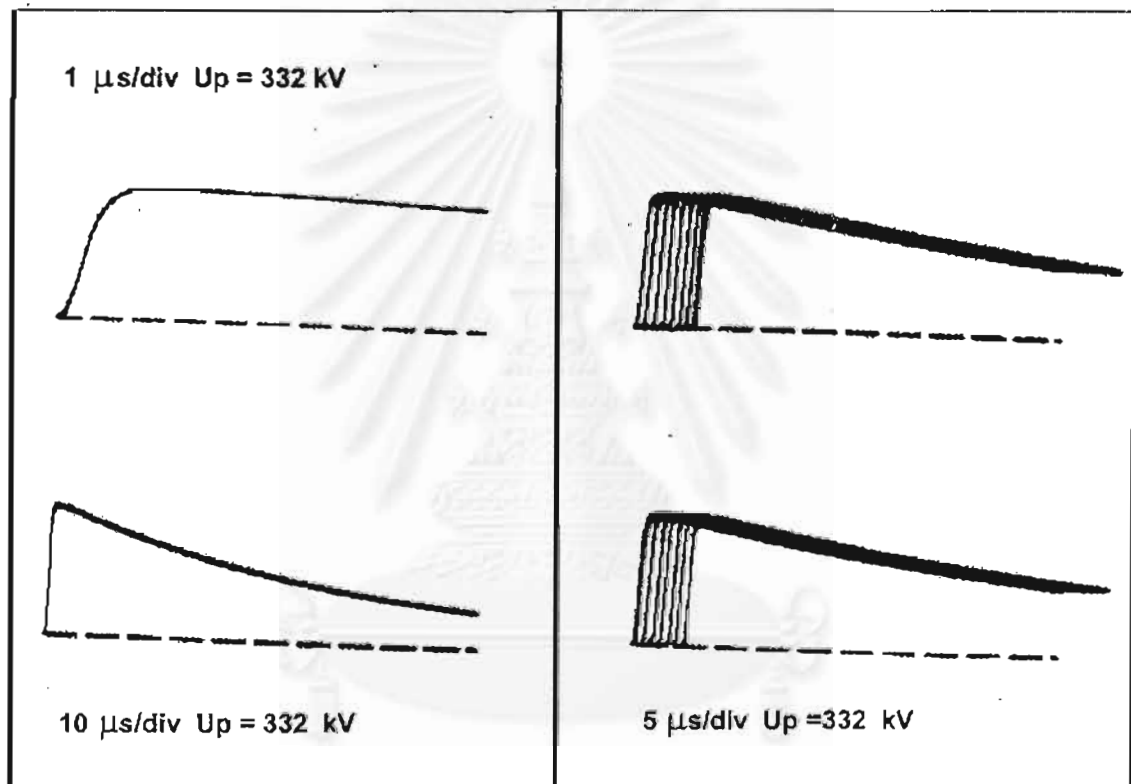
จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นผ่านการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้นตามมาตรฐาน IEC 60-2,(1994)

4.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Withstand Test)

เพื่อให้มั่นใจว่าฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์จะไม่เกิดการเบรคดาวนขณะใช้งานอันจะทำให้เกิดความเสียหายและอันตรายขึ้น มาตรฐานจึงกำหนดให้ต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน เนื่อง

จากโวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างขึ้นจะนำไปใช้งานกับแรงดันอิมพัลส์ จึงต้องทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ด้วยค่าแรงดัน 110 % ของค่าแรงดันพิกัด

การทดสอบฉนวนที่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังการเกิดเบรกดาวน์ จะทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นที่กำหนดทั้งชั่ววอกและชั่วลบ ชั่วละ 15 ครั้ง ที่ระดับแรงดันที่กำหนด [9] ถ้ามีการเบรกดาวน์หรือวาบไฟตามผิวเกิดขึ้นไม่เกิน 2 ครั้ง จะถือว่าฉนวนนั้นผ่านการทดสอบ เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบสร้างขึ้นมีค่าแรงดันพิกัด 300 kV จึงต้องทดสอบที่ระดับแรงดัน 330 kV ทั้งชั่ววอก และชั่วลบ ชั่วละ 15 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.27



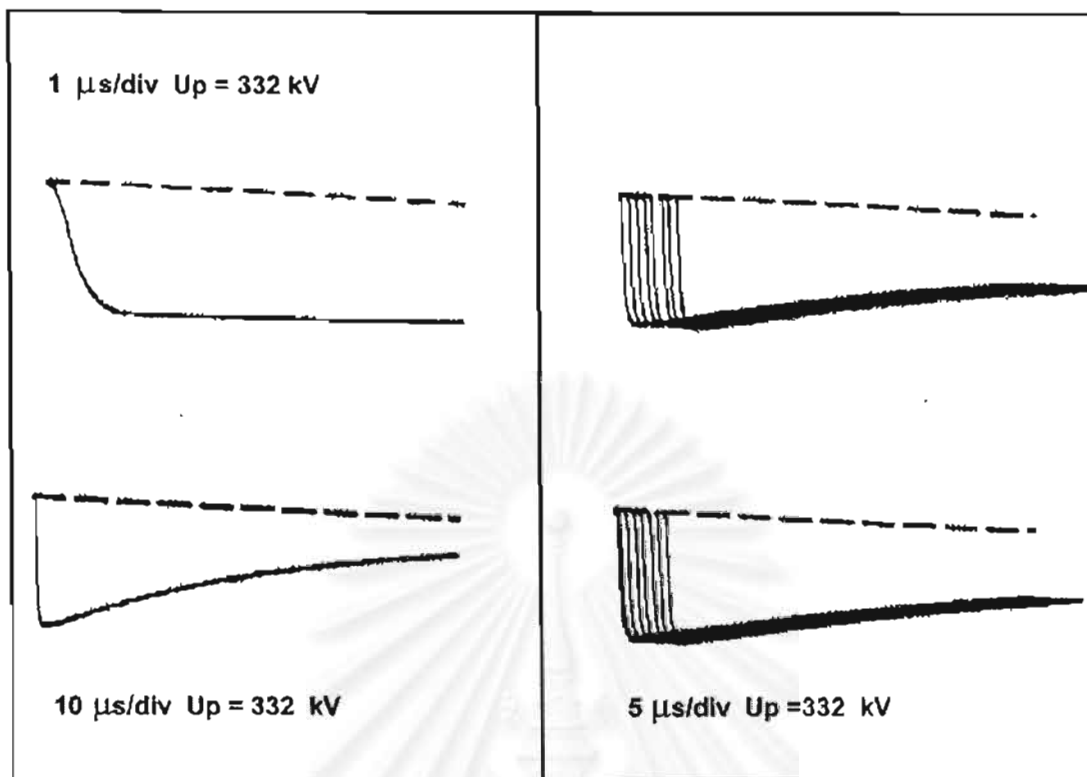
ก.)

ข.)

รูปที่ 4.27 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ก.) รูปคลื่นแรงดัน 1.26 / 52 usec

ข.) รูปคลื่นแรงดันทดสอบ ขนาด 330 kV



ก.)

ข.)

รูปที่ 4.28 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ชั่วพลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ค.) รูปคลื่นแรงดัน 1.26 / 52 usec

ง.) รูปคลื่นแรงดันทดสอบ ขนาด 330 kV

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานที่ประกอบสร้างขึ้นสามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ทั้งชั่วพลและชั่วพลขนาด 330 kV ได้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานขนาดแรงดัน 300 kV ซึ่งมีข้อมูลทางเทคนิคดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 300 kV

ค่าความต้านทาน	
1) ความต้านทานหน่วย	$R_d = 277.045 \Omega$
2) ความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์	$R_H = 6.900 \text{ k}\Omega$
3) ความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์	$R_L = 7.338 \text{ k}\Omega$
4) ความต้านทานภาคปฐมภูมิของตัวลวดทอง	$R_{\text{atten1}} = 46.077 \Omega$
5) ความต้านทานภาคทุติยภูมิของตัวลวดทอง	$R_{\text{atten2}} = 4.090 \Omega$
สเกลแฟกเตอร์จากการคำนวณ	
1) โวลเตจดีไวเดอร์	1121.62
2) ตัวลวดทอง	12.3098
3) โวลเตจดีไวเดอร์ + ตัวต้านทาน	13806.93
ผลตอบสนองรูปขึ้น	
1) โวลเตจดีไวเดอร์	
$\beta(\%)$	23.25
T_α (nsec)	7.76
T_N (nsec)	5.04
T_O (nsec)	0.0072
T_S (nsec)	87.89
2) ตัวลวดทอง	
$\beta(\%)$	32.90
T_α (nsec)	1.75
T_N (nsec)	1.70
T_O (nsec)	0.251
T_S (nsec)	6.94

จากการทดสอบในบทที่ 4. จะได้สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Assigned Scale factor) มีค่าเท่ากับ 13719.211 ค่าความไม่แน่นอนของระบบวัดที่สร้างขึ้น (โวลเตจดีไวเดอร์ ,ดิจิตอลอสซิลโลสโคป ,โปรแกรม ,ฯ) มีค่าเท่ากับ ± 0.90 โดยรายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ใน ภาคผนวก ข

จากข้อมูลทางเทคนิคข้างต้น และ การทดสอบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 แสดงว่าโวลเตจดีไวเดอร์ แบบความต้านทานขนาด 300 kV ผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) แต่เนื่องจากทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ยังไม่ได้เป็นห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐานตาม ISO/IEC Guide 25, 1993 ดังนั้นจึงยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงในการสอบเทียบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 การออกแบบส่วนที่เป็นภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ ไม่ควรเลือกค่าความต้านทานต่ำเกินไป (ค่าสเกลแฟกเตอร์มีค่ามาก) เพราะจะมีผลทำให้ผลตอบสนองรูปคลื่นช้าลง แรงดันขาออกมีค่าน้อยทำให้มีสัญญาณรบกวนเข้ามาได้ง่าย และควรออกแบบให้มีระบบกราวด์ที่ดี ความเหนียวน่าต่ำ และมีหน้าสัมผัสที่ดีด้วย และส่วนที่เป็นตัวหุ้มหรือครอบความต้านทานควรเป็นกราวด์เพื่อกันสนามไฟฟ้าที่เข้ามารบกวนทางภาคแรงต่ำ
- 5.2.2 การออกแบบตัวลวดทองครุให้มีความต้านทานเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย มีค่าความเหนียวน่าต่ำ และส่วนที่เป็นรอยต่อควรออกแบบให้มีหน้าสัมผัสที่ดีเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เข้ามา
- 5.2.3 ตามมาตรฐาน IEC 60-2 ,1994 แนะนำให้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นที่มีค่าเวลาขาขึ้นเท่ากับ $1/10$ ของเวลาตอบสนองรูปคลื่น ดังนั้นถ้าเป็นไปได้ควรใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นที่มีค่าเวลาขาขึ้นที่เร็วกว่านี้
- 5.2.4 การวิจัยครั้งนี้ไม่ได้รวมการทดสอบ Proximity Effect เข้าไว้ด้วย จึงควรมีการทำการทดสอบด้วยเพื่อศึกษาผลของระยะห่างของอุปกรณ์ หรือ ส่วนที่ต่อลงดินที่มีผลกระทบต่อระบบวัดที่สร้างขึ้นด้วย
- 5.2.5 ต้องทำการทดสอบดิจิตอลอสซิลโลสโคปด้วย เครื่องปรับเทียบแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator Calibrator) เพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำของดิจิตอลอสซิลโลสโคปที่ใช้

รายการอ้างอิง



1. IEC Publication No. 71. Insulation Co-ordination. 1976.
2. วรา จุทอง. การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
3. วิชัย เตยวงค์ศักดิ์. การศึกษาพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุ 400 กิโล
โวลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2530.
4. ไพศาล จิรนนตรัตน์. อิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง. รายงานผลการ
ประดิษฐ์ ทูลอดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
5. IEC Publication No. 60-2. High Voltage Test Techniques-Part 2: Measuring System. 1994.
6. ประเสริฐ รังสีโสภณอารมณ์. การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2539.
7. Kuffel, E. and Zaengl, W.S. High Voltage Engineering Fundamental. 1st ed. Oxford:
Pergamon Press, 1984.
8. Chagas F. A., Oliveira O. B., Cerqueira W.R., Alvarenga E. Dynamic Behavior of Non-
Inductive Resistor for HV Impulse Applications. 9th ISH, High Voltage Testing and
Measurement Techniques, Calibration and Quality Management Vol.4, p 4463,
Australia, 1995.
9. IEC Publication No. 60-1, High Voltage Test Techniques-Part 1: General Definition and
test Requirement, 1994.
10. HUBER+SUHNER AG. Coaxial Connectors, Cables and Assemblies General Catalogue.
Herisau: HUBER+SUHNER AG CH-9100, 1996.
11. HAEFELY. HAEFELY Operating Instruction: Unit Step Generator Type 40, 1980.
12. ANSOFT Corporation. Maxwell 2D Field Simulator User 's Reference. Pittsburgh, May,
1995.
13. Yokogawa-Hewlett-Packard, Ltd. HP 4284A Precision LCR Meter Operation Manual.
Kobe: Kobe Instrument Division (Japan), 1988.

14. Yokogawa-Hewlett-Packard, Ltd. HP 16089A, B, C Kelvin Clip Leads, HP 16089D Alligator Clip Leads Operation and Service Manual. Kobe: Kobe Instrument Division (Japan), 1991.
14. KEITHLEY Instruments, Inc. KEITHLEY Model 167 Programmable Electrometer Instruction Manual. Ohio: Test Instrumentation Group, 1984.
15. LeCROY. LeCROY Digital Oscilloscopes 9384 Series Operator 's Manual, August 8, 1996.
16. Presco AG, Universal High Voltage Reference Test Certificate No. C_98002. Weiningen Presco AG: Zurcherstrasse, October, 1998.



ภาคผนวก ก

แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ก.1 โปรแกรมประเมินค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง



รูปที่ ก.1 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม RTES

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าความไม่แน่นอน(Uncertainty)

ความไม่แน่นอนสามารถแบ่งออกได้เป็น

- ความไม่แน่นอนแบบสุ่ม (Random Uncertainty), U_r
- ความไม่แน่นอนของระบบ (Systematic Uncertainty), U_s

โดยค่าความไม่แน่นอนรวมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U = \sqrt{(U_r^2 + U_s^2)}$$

ดังนั้นได้แสดงวิธีการคิดค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังนี้

ตารางที่ ข.1 ค่าสเกลแฟกเตอร์ตามจำนวนข้อมูลและเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบ "t "

n \ P%	68.3	90.0	95.0	99.7
2	1.84	6.31	12.7	-
3	1.32	2.92	4.30	-
4	1.20	2.35	3.18	9.22
5	1.14	2.13	2.78	6.62
6	1.11	2.02	2.57	5.51
7	1.09	1.94	2.45	4.90
8	1.08	1.89	2.36	4.53
9	1.07	1.86	2.31	4.28
10	1.06	1.83	2.26	4.09
20	1.03	1.73	2.09	3.45
$\infty^{1)}$	1.00	1.65	1.96 ²⁾	3.00

1) เมื่อ $n \rightarrow \infty$, $t \rightarrow k$

2) สำหรับเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % ให้ $k = 2$

เมื่อ n = จำนวนข้อมูล (number of measurements)

%P = เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น (confidential level)

k =สเกลแฟกเตอร์ของการกระจายแบบปกติ (normal distribution factor)

การคิดค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเมื่อจำนวนข้อมูลมีค่ามาก (จำนวนข้อมูลมีค่ามากกว่า 10 ข้อมูลมาก) คิดได้จากสมการ

$$U_r = \frac{ks_r}{\sqrt{n}}$$

ข.1) การคิดค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มของสเกลแฟกเตอร์ , เวลาหน้าคลื่น , เวลาหลังคลื่น และ เวลาตัดของ รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่แรงดันอิมพัลส์เต็มรูปคลื่น และตัดหลังคลื่น

ลำดับที่	แรงดันของระบบวัด อ้างอิง VA (kV)	แรงดันของระบบที่ ต้องการทดสอบ VB (V)	VA/VB
1	301.8438	22.1112	13651.17
2	301.8756	22.0339	13700.51
3	301.2492	22.0197	13680.89
4	302.0063	21.9674	13747.93
5	302.2873	22.0775	13692.1
6	299.3697	21.9191	13657.94
7	302.589	22.0539	13720.43
8	301.0662	22.014	13676.12
9	302.528	21.9992	13751.77
10	301.8611	21.9611	13745.26
Mean	301.6676	22.0157	13702.41
Sr (%)	0.312863	0.260782	0.272376

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $Sr = 0.272376\%$ และ จำนวนข้อมูล = 10 ดังนั้นจากตารางที่ ข.1จะได้ ค่า k ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % = 2.26 ดังนั้นค่าค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเท่ากับ

$$U_r = \frac{2.26 \times 0.272376\%}{\sqrt{10}} = \pm 0.19466\%$$

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองค่าเวลาน้ำคลีน

ลำดับที่	เวลาน้ำคลีนของระบบ วัตถุอ้างอิง T_{1A} μsec	เวลาน้ำคลีนของระบบ วัตถุที่ต้องการทดสอบ T_{1B} μsec	$(T_{1B}-T_{1A})/T_{1A} * 100$
1	0.8899	0.8687	-2.382290145
2	0.8933	0.8896	-0.414194559
3	0.8752	0.8609	-1.633912249
4	0.8472	0.8737	3.127950897
5	0.8883	0.8739	-1.621073961
6	0.8759	0.8741	-0.205502911
7	0.8724	0.8746	0.2521779
8	0.8842	0.8739	-1.16489482
9	0.88	0.8728	-0.818181818
10	0.8739	0.8643	-1.098523859
Mean	0.87803	0.87265	-0.595844553
Sr (%)	1.486552	0.871752	1.517203723

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $Sr = 1.5172\%$ และ จำนวนข้อมูล = 10 ดังนั้นจากตารางที่ ข.1 จะได้ค่า k ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % = 2.26 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเท่ากับ

$$U_r = \frac{2.26 \times 1.5172\%}{\sqrt{10}} = \pm 1.0843\%$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองค่าเวลาหลังคลื่น

ลำดับที่	เวลาหลังคลื่นของระบบ วัตถุอ้างอิง T_{2A} μsec	เวลาหลังคลื่นของระบบ วัตถุที่ต้องการทดสอบ T_{2B} μsec	$(T_{2B}-T_{2A})/T_{2A} * 100$
1	59.138	59.355	0.366938348
2	59.076	59.228	0.257295687
3	59.064	59.238	0.294595693
4	58.854	60.276	2.416148435
5	58.99	59.501	0.866248517
6	58.868	59.128	0.4416661
7	58.903	59.269	0.621360542
8	59.028	58.855	-0.29308125
9	58.901	59.176	0.466885112
10	58.68	59.391	1.211656442
Mean	58.9502	59.3417	0.664971363
Sr (%)	0.229929	0.625470	0.730834348

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $Sr = 0.730834\%$ และ จำนวนข้อมูล = 10 ดังนั้นจากตารางที่ ข.1จะได้
ค่า k ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % = 2.26 ดังนั้นค่าค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเท่ากับ

$$U_r = \frac{2.26 \times 0.730834\%}{\sqrt{10}} = \pm 0.5223086\%$$

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น

ลำดับที่	แรงดันของระบบวัด อ้างอิง VA (kV)	แรงดันของระบบที่ ต้องการทดสอบ VB (V)	VA/VB
1	221.4528	16.2737	13608.02
2	222.255	16.135	13774.71
3	218.1878	16.0225	13617.59
4	222.1688	16.115	13786.46
5	215.3205	15.557	13840.75
6	223.8295	16.3398	13698.42
7	219.4573	15.9247	13780.94
8	219.3049	16.2527	13493.44
9	224.688	16.2435	13832.49
10	217.1834	15.566	13952.42
Mean	220.3848	16.04299	13738.52
Sr (%)	1.3608706	1.75969068	0.9818714

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $Sr = 0.98187\%$ และ จำนวนข้อมูล = 10 ดังนั้นจากตารางที่ ข.1 จะได้ค่า k ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % = 2.26 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเท่ากับ

$$U_r = \frac{2.26 \times 0.98187\%}{\sqrt{10}} = \pm 0.70171769\%$$

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองการหาค่าเวลาดัดหน้าคลื่น

ลำดับที่	เวลาดัดหน้าคลื่นของ ระบบวัดอ้างอิง T_{CA} μsec	เวลาดัดหน้าคลื่นของ ระบบวัดที่ต้องการ ทดสอบ T_{CB} μsec	$(T_{CB}-T_{CA})/T_{CA} * 100$
1	0.492	0.504	2.43902439
2	0.556	0.525	-5.575539568
3	0.483	0.511	5.797101449
4	0.505	0.509	0.792079208
5	0.493	0.506	2.636916836
6	0.52	0.557	7.115384615
7	0.52	0.514	-1.153846154
8	0.509	0.506	-0.589390963
9	0.551	0.54	-1.996370236
10	0.47	0.491	4.468085106
Mean	0.5099	0.5163	1.393344468
Sr (%)	5.455708	3.755763	3.873918745

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $Sr = 3.8739\%$ และ จำนวนข้อมูล = 10 ดังนั้นจากตารางที่ ข.1 จะได้ว่า k ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % = 2.26 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเท่ากับ

$$U_r = \frac{2.26 \times 3.8739\%}{\sqrt{10}} = \pm 2.76857\%$$

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองการหาค่าเวลาดัดหลังคลื่น

ลำดับที่	เวลาดัดหน้าคลื่นของ ระบบวัดอ้างอิง T_{CA} μsec	เวลาดัดหน้าคลื่นของ ระบบวัดที่ต้องการ ทดสอบ T_{CB} μsec	$(T_{CB}-T_{CA})/T_{CA} * 100$
1	2.7059	2.6765	-1.086514653
2	2.7353	2.7059	-1.074836398
3	2.7059	2.7059	0
4	2.6471	2.6765	1.11064939
5	2.6177	2.7059	3.369370058
6	2.4412	2.4706	1.204325741
7	2.2647	2.2941	1.29818519
8	2.3824	2.3529	-1.238247146
9	2.3824	2.4118	1.234049698
10	2.3529	2.4118	2.503293808
Mean	2.52355	2.54119	0.732027569
Sr (%)	6.967279	6.597565	1.564240683

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $Sr = 1.56424\%$ และ จำนวนข้อมูล = 10 ดังนั้นจากตารางที่ ข.1 จะได้
ค่า k ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % = 2.26 ดังนั้นค่าค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มเท่ากับ

$$U_r = \frac{2.26 \times 1.56424\%}{\sqrt{10}} = \pm 1.11792\%$$

ข.2) ค่าความไม่แน่นอนของระบบ

ข.2.1 ความแม่นยำของเครื่องมือวัดในระบบวัดที่ต้องการทดสอบ

\pm ครึ่งหนึ่งของเลขหลักสุดท้ายที่ไม่ได้เริ่มต้นที่ 0 = $1/(2 \cdot 255)$

(ค่าเต็มสเกลของดิจิตอลออสซิลโลสโคป 8 บิต)

= 0.245 %

(คิดที่ 80 % ของค่าเต็มสเกลของออสซิลโลสโคป)

$$\begin{aligned} \pm \text{ ครั้งหนึ่งของการอ่านค่าเลขหลักสุดท้าย} &= 1/(2*255) \\ & \text{(ค่าเต็มสเกลของดิจิตอลออสซิลโลสโคป 8 บิต)} \\ &= 0.245 \% \\ & \text{(คิดที่ 80 \% ของค่าเต็มสเกลของออสซิลโลสโคป)} \\ \text{ผลรวม} &= 0.49 \% \end{aligned}$$

ข.2.2 ความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบของระบบวัดอ้างอิง $U_1 = \pm 0.7 \%$ ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % ($k = 2$) จะได้ $U_1/k_1 = 0.35 \%$

ดังนั้นความไม่แน่นอนของระบบรวมที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 % จะได้ค่า $k = 2$ คือ

$$U_s = 2 \times \sqrt{\left(\frac{0.49^2}{3} + 0.35^2\right)} = \pm 0.90007\%$$

ข.3) ความไม่แน่นอนรวม (Total Uncertainty)

ตารางที่ ข.8 ค่าความไม่แน่นอนรวมของสเกลแพกเตอร์ ,เวลาหน้าคลื่น ,เวลาหลังคลื่น และ เวลาคลื่นตัด

ความไม่แน่นอนของ	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
สเกลแพกเตอร์รูปคลื่น เต็ม และตัดหลังคลื่น	0.19466	0.90	0.93 (< 1)
สเกลแพกเตอร์ รูปคลื่นตัดหน้าคลื่น	0.7017	0.90	1.15 (< 3)
เวลาหน้าคลื่น	1.0843	0.90	1.41 (< 5)
เวลาหลังคลื่น	0.5223	0.90	1.05 (< 5)
เวลาดัดหน้าคลื่น	2.76857	0.90	2.92 (< 5)
เวลาดัดหลังคลื่น	1.11792	0.90	1.44 (< 5)

จากตารางที่ ข.8 ค่าความไม่แน่นอนรวมของสเกลแพกเตอร์ ,เวลาหน้าคลื่น ,เวลาหลังคลื่น และเวลา
คลื่นตัดผ่านตามมาตรฐาน IEC 60-2,1994 กำหนด

ข.4) ค่าความไม่แน่นอนของระบบในการวัดค่าความต้านทาน

ตารางที่ ข.9 ความไม่แน่นอนของระบบวัดค่าความต้านทานที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95 %

อุปกรณ์วัด	องค์ประกอบ	ค่าความไม่แน่นอนระบบ (%)
KEITHLEY Model 167 Programmable Electrometer	ความต้านทานภาคแรงสูง (R_1)	± 0.21000
HP 4284A Precision LCR Meter	ความต้านทานหน่วย (R_2)	± 0.05026
	ความต้านทานภาคแรงต่ำ (R_2)	± 0.06662
	ความต้านทานปฐมภูมิของ ตัวลวดทอง (R_3)	± 0.05286
	ความต้านทานทุติยภูมิของ ตัวลวดทอง R_4	± 0.07519
	ความต้านทานของตัวนำในสาย เคเบิล (R_1)	± 0.09393

จากตารางที่ 4.4 เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มของการวัดค่าความต้านทาน ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนรวมของการวัดค่าความต้านทานหาได้ดังตารางที่ ข.10

ตารางที่ ข.10 ค่าความไม่แน่นอนรวมของการวัดค่าความต้านทาน

ความไม่แน่นอนของ	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
ความต้านทานภาคแรงสูง (R_1)	0.000070	0.2100	0.22
ความต้านทานภาคแรงต่ำ (R_2)	0.000096	0.06662	0.07
ความต้านทานหน่วย (R_3)	0.000154	0.05026	0.051
ความต้านทานปฐมภูมิของ ตัวลวดทอง (R_3)	0.000067	0.05286	0.053
ความต้านทานทุติยภูมิของ ตัวลวดทอง R_4	0.000298	0.07519	0.076
ความต้านทานของตัวนำใน สายเคเบิล (R_1)	0.000099	0.09393	0.094

จากตารางที่ ข.10 ค่าความไม่แน่นอนรวมของการวัดค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 0.28 % ผ่านตามมาตรฐาน IEC 60-2, (1994) คือ ความไม่แน่นอนรวมของการวัดค่าความต้านทานมีค่าไม่เกิน ± 0.5 %

ภาคผนวก ค

ตารางผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบ

ค.1 ผลการทดสอบการวัดเปรียบเทียบ

โดยที่ A = ระบบวัดแรงดันอ้างอิง B = ระบบวัดแรงดันที่ต้องการทดสอบ
 F_m = ค่าเฉลี่ย SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตาราง ค.1 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นเต็มขั้วบวก ที่ t_{min}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	T1A (μ sec)	T1B (μ sec)	T1B/T1A	T2A (μ sec)	T2B (μ sec)	T2B/T2A
1	301.8352	22.0112	13712.80114	0.8899	0.8687	0.976177	59.138	59.355	1.003669
2	301.9539	22.0048	13722.1823	0.8933	0.8896	0.995858	59.076	59.228	1.002573
3	300.7765	21.96799	13691.57909	0.8752	0.8609	0.983661	59.064	59.238	1.002946
4	301.1623	22.0011	13688.51153	0.8472	0.8737	1.03128	58.854	60.276	1.024161
5	300.4662	21.9924	13662.27472	0.8883	0.8739	0.983789	58.99	59.501	1.008662
6	301.2611	21.9521	13723.56591	0.8759	0.8741	0.997945	58.868	59.128	1.004417
7	300.6021	21.9029	13724.30664	0.8724	0.8746	1.002522	58.903	59.269	1.006214
8	300.8428	21.9333	13716.25646	0.8842	0.8739	0.988351	59.028	58.855	0.997069
9	300.5908	21.9963	13665.51855	0.88	0.8728	0.991818	58.901	59.176	1.004669
10	300.8288	21.9808	13685.98257	0.8739	0.8643	0.989015	58.68	59.391	1.012117
F_m	301.032	21.97429	13699.29789	0.87803	0.87265	0.994042	58.9502	59.3417	1.00665
SD	0.5170831	0.035238	23.74162587	0.013052	0.007607	0.015172	0.135544	0.371165	0.007308

ตาราง ค.2 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นเต็มซับลบ ที่ t_{min}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	T1A (μ sec)	T1B (μ sec)	T1B/T1A	T2A (μ sec)	T2B (μ sec)	T2B/T2A
1	301.8438	22.1112	13651.17	0.88167	0.88361	1.0022	58.5789	59.7345	1.019727
2	301.8756	22.0339	13700.51	0.84229	0.89733	1.065346	58.9556	58.6347	0.994557
3	301.2492	22.0197	13680.89	0.84552	0.90347	1.068538	57.8585	58.3132	1.007859
4	302.0063	21.9674	13747.93	0.85558	0.90195	1.054197	58.5885	58.249	0.994205
5	302.2873	22.0775	13692.1	0.87501	0.88518	1.011623	58.0991	58.4699	1.006382
6	299.3697	21.9191	13657.94	0.86606	0.88854	1.025957	57.9296	57.9173	0.999788
7	302.589	22.0539	13720.43	0.89311	0.88685	0.992991	58.0582	58.0181	0.999309
8	301.0662	22.014	13676.12	0.89475	0.91822	1.026231	58.9873	58.3373	0.988981
9	302.528	21.9992	13751.77	0.83774	0.90368	1.078712	58.8025	57.722	0.981625
10	301.8611	21.9611	13745.26	0.86305	0.92792	1.075164	58.5026	57.853	0.988896
F_m	301.6676	22.0157	13702.41	0.865478	0.899675	1.040096	58.43608	58.3249	0.998133
SD	0.9438083	0.057413	37.32215	0.020502	0.01468	0.032014	0.42197	0.573146	0.01107

ตาราง ค.3 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นเต็มซับลบ ที่ t_{max}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	T1A (μ sec)	T1B (μ sec)	T1B/T1A	T2A (μ sec)	T2B (μ sec)	T2B/T2A
1	297.9795	21.5889	13802.44	59.4612	60.3266	1.014554	1.5115	1.4296	0.945815
2	296.8173	21.5814	13753.39	59.6616	60.3556	1.011632	1.516	1.4623	0.964578
3	296.8717	21.5613	13768.73	59.2998	60.2674	1.016317	1.493	1.4368	0.962358
4	298.5934	21.6318	13803.45	60.044	60.8621	1.013625	1.5027	1.42	0.944966
5	298.7989	21.6965	13771.76	59.0244	59.7102	1.011619	1.506	1.4569	0.967397
6	298.2679	21.6523	13775.34	60.0816	60.5175	1.007255	1.5281	1.4197	0.929062
7	298.5562	21.7301	13739.29	60.1892	59.8835	0.994921	1.4554	1.4346	0.985708
8	299.1615	21.709	13780.53	59.2643	60.07	1.013595	1.4703	1.4256	0.969598
9	299.8006	21.7371	13792.12	59.3078	60.3117	1.016927	1.4687	1.4501	0.987336
10	299.2954	21.6599	13817.95	59.131	59.8754	1.012589	1.4972	1.4231	0.950508
F_m	298.4142	21.65483	13780.5	59.54649	60.218	1.011303	1.49489	1.43587	0.960733
SD	0.977369	0.06338	24.08327	0.42297	0.342465	0.006365	0.023257	0.015517	0.018411

ตาราง ค.4 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นเต็มหัวลบ ที่ t_{max}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	T1A (μ sec)	T1B (μ sec)	T1B/T1A	T2A (μ sec)	T2B (μ sec)	T2B/T2A
1	300.8527	21.9243	13722.34	1.4658	1.4337	0.978101	59.2455	58.8305	0.992995
2	300.3462	21.8521	13744.5	1.4954	1.4878	0.994918	58.8017	59.1969	1.006721
3	300.736	21.8367	13772.05	1.4789	1.4149	0.956725	58.6871	59.6881	1.017057
4	300.6856	21.8449	13764.57	1.4915	1.4767	0.990077	58.824	59.2404	1.007079
5	300.6061	21.824	13774.11	1.4999	1.4368	0.957931	58.5575	59.4686	1.015559
6	300.9793	21.834	13784.89	1.4975	1.4369	0.959533	58.9052	59.6652	1.012902
7	300.4576	21.8503	13750.73	1.4929	1.4478	0.96979	59.0395	59.4998	1.007796
8	300.4225	21.8313	13761.09	1.4577	1.4256	0.977979	58.6577	59.3001	1.010952
9	299.5779	21.8327	13721.52	1.4718	1.4542	0.988042	58.4389	59.3159	1.015007
10	300.6346	21.8233	13775.85	1.4651	1.4419	0.984165	58.7399	59.5884	1.014445
F _m	300.5299	21.84536	13757.17	1.48165	1.44563	0.975726	58.7897	59.37939	1.010051
SD	0.386813	0.029451	22.06493	0.015636	0.022305	0.014076	0.233862	0.259776	0.007056

ตาราง ค.5 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{min}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA *100
1	203.8779	14.724	13846.64	2.3529	2.3529	1	0
2	202.8437	14.7275	13773.13	2.0588	2.0882	1.01428	1.42801632
3	203.2216	14.8272	13706	2.2941	2.3529	1.025631	2.563096639
4	204.0702	14.7512	13834.14	2.4706	2.4118	0.9762	-2.379988667
5	203.6227	14.755	13800.25	2.1765	2.2059	1.013508	1.350792557
6	202.668	14.7622	13728.85	2.3529	2.2941	0.97501	-2.499043733
7	203.1686	14.7213	13800.99	2.2353	2.2647	1.013153	1.315259697
8	203.278	14.8165	13719.7	2.0588	2.0882	1.01428	1.42801632
9	203.2216	14.8513	13683.76	2.2941	2.2647	0.987185	-1.28154832
10	204.3221	14.8658	13744.44	2.3529	2.3529	1	0
F _m	203.4294	14.7802	13763.79	2.26469	2.26763	1.001925	0.192460081
SD	0.531882	0.054888	55.67536	0.133706	0.111314	0.017443	1.744324037

ตาราง ค.6 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ชั่วลบ ที่ t_{min}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	206.4336	14.996	13765.91	2.7059	2.6765	0.989135	-1.086514653
2	206.006	15.102	13640.98	2.7353	2.7059	0.989252	-1.074836398
3	205.4823	15.0267	13674.48	2.7059	2.7059	1	0
4	206.4701	15.0278	13739.21	2.6471	2.6765	1.011106	1.11064939
5	205.8734	14.9832	13740.28	2.6177	2.7059	1.033694	3.369370058
6	205.7674	15.061	13662.26	2.4412	2.4706	1.012043	1.204325741
7	204.8724	14.916	13735.07	2.2647	2.2941	1.012982	1.29818519
8	205.7574	15.0863	13638.69	2.3824	2.3529	0.987618	-1.238247146
9	205.8602	14.9838	13738.85	2.3824	2.4118	1.01234	1.234049698
10	205.532	15.032	13672.96	2.3529	2.4118	1.025033	2.503293808
F_m	205.8055	15.02148	13700.87	2.52355	2.54119	1.00732	0.732027569
SD	0.464015	0.054859	47.47538	0.175823	0.167657	0.015642	1.564240683

ตาราง ค.7 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ชั่วบวก ที่ t_{max}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	220.8926	16.018	13790.27	2.4706	2.4418	0.988343	-1.165708735
2	223.2328	16.2707	13719.93	2.4118	2.3824	0.98781	-1.219006551
3	221.2572	16.0758	13763.37	2.2353	2.2941	1.026305	2.630519393
4	222.56	16.0755	13844.67	2.4118	2.4118	1	0
5	219.6496	16.0347	13698.39	2.2353	2.2647	1.013153	1.315259697
6	221.3666	16.0625	13781.58	2.4706	2.5294	1.0238	2.379988667
7	220.1998	15.9248	13827.48	2.4118	2.3529	0.975578	-2.442159383
8	222.3942	16.2203	13710.86	2.2647	2.2647	1	0
9	220.6506	16.192	13627.14	2.3824	2.3529	0.987618	-1.238247146
10	221.9103	16.2155	13685.07	2.3529	2.3529	1	0
F_m	221.4114	16.10898	13744.88	2.36472	2.36476	1.000261	0.026064594
SD	1.120373	0.109992	68.24069	0.090078	0.08233	0.016549	1.654936892

ตาราง ค.8 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหลังคลื่น ชั่วลบ ที่ t_{max}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	231.2413	16.7097	13838.75	2.4118	2.3824	0.98781	-1.219006551
2	232.8921	16.7978	13864.44	2.7353	2.7353	1	0
3	232.5937	16.8628	13793.31	2.5294	2.5294	1	0
4	230.8833	16.7638	13772.73	2.4118	2.3824	0.98781	-1.219006551
5	229.0702	16.6415	13764.99	2.5588	2.5294	0.98851	-1.148976083
6	229.8392	16.708	13756.24	2.5588	2.5294	0.98851	-1.148976083
7	228.437	16.5892	13770.23	2.4706	2.5	1.0119	1.189994333
8	229.7298	16.6418	13804.38	2.4418	2.4418	1	0
9	229.7165	16.663	13786.02	2.3824	2.3529	0.987618	-1.238247146
10	229.7961	16.688	13770.14	2.3824	2.3529	0.987618	-1.238247146
F _๒	230.4199	16.70656	13792.12	2.48831	2.47359	0.993978	-0.602246523
SD	1.459746	0.081966	34.88882	0.110176	0.117996	0.008477	0.847731337

ตาราง ค.9 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ชั่วบวก ที่ t_{min}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	218.6452	15.995	13669.6	0.579	0.575	0.993092	-0.690846287
2	224.4759	16.3255	13750.02	0.576	0.6	1.041667	4.166666667
3	224.3532	16.3257	13742.34	0.578	0.57	0.986159	-1.384083045
4	218.98	16.1322	13574.09	0.514	0.549	1.068093	6.809338521
5	218.7049	15.953	13709.33	0.544	0.538	0.988971	-1.102941176
6	213.2355	15.726	13559.43	0.466	0.443	0.950644	-4.935622318
7	216.0199	15.624	13826.16	0.507	0.528	1.04142	4.142011834
8	210.7064	15.3748	13704.66	0.487	0.504	1.034908	3.490759754
9	220.8694	16.1197	13701.83	0.547	0.562	1.027422	2.742230347
10	218.0419	15.7805	13817.17	0.496	0.502	1.012097	1.209677419
F _๒	218.4032	15.93564	13705.46	0.5294	0.5371	1.014447	1.444719172
SD	4.353823	0.309148	88.37524	0.04108	0.045342	0.034825	3.482506778

ตาราง ค.10 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{mb}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	221.4528	16.2737	13608.02	0.492	0.504	1.02439	2.43902439
2	222.255	16.135	13774.71	0.556	0.525	0.944245	-5.575539568
3	218.1878	16.0225	13617.59	0.483	0.511	1.057971	5.797101449
4	222.1688	16.115	13786.46	0.505	0.509	1.007921	0.792079208
5	215.3205	15.557	13840.75	0.493	0.506	1.026369	2.636916836
6	223.8295	16.3398	13698.42	0.52	0.557	1.071154	7.115384615
7	219.4573	15.9247	13780.94	0.52	0.514	0.988462	-1.153846154
8	219.3049	16.2527	13493.44	0.509	0.506	0.994106	-0.589390963
9	224.688	16.2435	13832.49	0.551	0.54	0.980036	-1.996370236
10	217.1834	15.566	13952.42	0.47	0.491	1.044681	4.468085106
F _m	220.3848	16.04299	13738.52	0.5099	0.5163	1.013933	1.393344468
SD	2.999152	0.282307	134.8946	0.027819	0.019391	0.038739	3.873918745

ตาราง ค.11 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{max}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	211.9878	15.5319	13648.55	0.805	0.795	0.987578	-1.242236025
2	211.2798	15.3601	13755.11	0.783	0.759	0.969349	-3.0651341
3	200.119	14.7899	13530.79	0.707	0.711	1.005658	0.565770863
4	203.815	14.7252	13841.24	0.726	0.721	0.993113	-0.688705234
5	211.4336	15.6056	13548.57	0.778	0.787	1.011568	1.156812339
6	211.7571	15.5185	13645.46	0.756	0.791	1.046296	4.62962963
7	214.7272	15.7725	13614.02	0.804	0.825	1.026119	2.611940299
8	213.514	15.5435	13736.54	0.81	0.796	0.982716	-1.728395062
9	217.2928	15.8035	13749.66	0.843	0.821	0.973903	-2.609727165
10	208.6611	15.345	13597.99	0.757	0.787	1.03963	3.963011889
F _m	210.4587	15.39957	13666.79	0.7769	0.7793	1.003593	0.359296743
SD	5.101069	0.369394	100.4113	0.041281	0.038129	0.026985	2.698540212

ตาราง ค.12 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{max}

ลำดับที่	VA(kV)	VB(V)	VA/VB	TcA (μ sec)	TcB (μ sec)	TcB/TcA	(TcB-TcA)/TcA*100
1	217.8795	15.9984	13618.83	0.809	0.831	1.027194	2.719406675
2	213.1646	15.8174	13476.59	0.768	0.813	1.058594	5.859375
3	222.4307	16.465	13509.3	0.872	0.91	1.043578	4.357798165
4	218.6187	16.189	13504.15	0.834	0.855	1.02518	2.517985612
5	213.4874	15.6677	13625.96	0.78	0.809	1.037179	3.717948718
6	218.0817	15.9778	13649.04	0.821	0.844	1.028015	2.801461632
7	214.3194	15.566	13768.43	0.778	0.768	0.987147	-1.285347044
8	216.8784	15.9708	13579.69	0.826	0.86	1.041162	4.11622276
9	215.5923	15.8547	13598.01	0.796	0.797	1.001256	0.125628141
10	217.2331	16.1425	13457.22	0.815	0.846	1.038037	3.803680982
F _m	216.7686	15.96493	13578.72	0.8099	0.8333	1.028734	2.873416064
SD	2.784982	0.261308	94.70631	0.031104	0.039345	0.020882	2.088152131

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ตาราง ง.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ขั้วบวก

ลำดับที่	ค่าตัวคูณที่ระดับแรงดัน				
	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
1	13726.6	13755	13641.7	13745.8	13753.3
2	13716.5	13702	13708.7	13808.1	13740.5
3	13733.8	13770.3	13627.3	13730.2	13719.4
4	13711.4	13717.5	13727.2	13794.2	13706.4
5	13790.8	13766.7	13636.1	13814.5	13760.3
6	13854.3	13668.8	13798	13718.9	13793
7	13756.9	13779	13689.5	13748.8	13696.8
8	13777.9	13693.4	13736	13767.2	13742.5
9	13785.5	13728.5	13631.7	13699.3	13706.6
10	13739.2	13683.5	13672.7	13771.4	13788.4
11	13730.5	13622	13718.7	13706	13690
12	13749.2	13623.8	13755.3	13727	13720.1
13	13743.4	13684.5	13710.1	13804.8	13685.6
14	13758.5	13604.9	13695.8	13820.5	13750.7
15	13730.4	13723.7	13732.1	13803.7	13728.3
ค่าเฉลี่ย	13753.7	13701.6	13698.7	13764	13732.1
ค่าเฉลี่ยรวม	13730.02559				
ค่าผลต่างจาก ค่าเฉลี่ยรวม (%)	0.17213	-0.2072	-0.2279	0.24759	0.0153

ตาราง ง.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ขั้วลบ

ลำดับที่	ค่าตัวคูณที่ระดับแรงดัน				
	100kV	150kV	200kV	250kV	300kV
1	13798.1	13599.9	13604.6	13653.1	13584.7
2	13763.2	13627.7	13699.9	13644	13633.6
3	13794.1	13653.4	13656.4	13627.4	13619.9
4	13798.8	13624.2	13658.4	13602.7	13620.7
5	13702.7	13593.9	13596.7	13603.5	13621.3
6	13738.4	13680.3	13515.4	13665.6	13598.2
7	13685.2	13702.8	13565.2	13586.8	13620.4
8	13748.2	13682.8	13602.5	13607.1	13666.9
9	13715.4	13624.8	13603.6	13652.1	13601.8
10	13724.2	13590	13629.4	13646.9	13631.3
11	13674.7	13593.1	13646.2	13643.1	13652.9
12	13781.3	13661.1	13611.1	13637.4	13585.6
13	13741.5	13589.7	13626.1	13694.5	13582.5
14	13697.5	13684.6	13664.2	13621.5	13604.8
15	13716.1	13568.8	13629.1	13712.4	13577.7
ค่าเฉลี่ย	13738.6	13631.8	13620.6	13639.9	13613.5
ค่าเฉลี่ยรวม	13648.8660				
ค่าผลต่างจาก ค่าเฉลี่ยรวม (%)	0.65761	-0.125	-0.2073	-0.0661	-0.2593

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นายอรรณพ ลี้มสีมารัตน์ เกิดวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2517 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538 และ เข้าศึกษาต่อปริญญาโทในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาไฟฟ้ากำลัง ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2359

