

การทดสอบเสถียรภาพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์
ตามมาตรฐาน IEC60060-2



นาย ปกรณ์ ชุมมงคล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

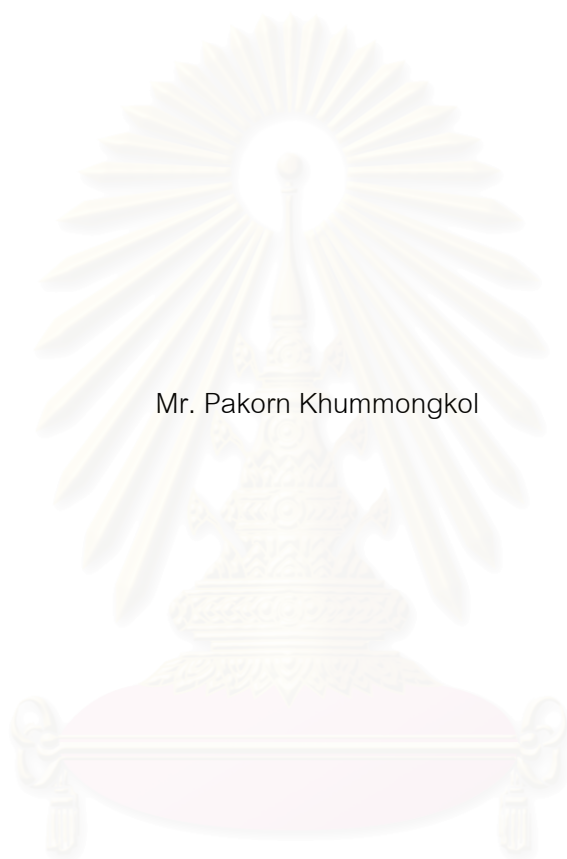
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1221-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE LONG TERM STABILITY TEST ON A 300 KV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER
UNDER IEC60060-2 STANDARD



Mr. Pakorn Khummongkol

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1221-9

ปกรณัม ชุมมมงคล : การทดสอบเสถียรภาพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐาน IEC60060-2. (THE LONG TERM STABILITY TEST ON A 300kV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER UNDER IEC60060-2 STANDARD)

อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวิทย์, 81 หน้า. ISBN 974-17-1221-9.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว การทดสอบความเป็นเชิงเส้น และการทดสอบสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ แบบความต้านทาน ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) ความต้านทานภาคแรงสูงทำด้วยเส้นลวด NiCr พันแบบไร้ความเหนียวนำ มีความต้านทาน 6.9 กิโลโอห์ม และความต้านทานภาคแรงต่ำทำด้วยลวด NiCr เช่นกันแต่พันในแนวรัศมีของแผ่นปรินซ์เซออร์กิตบอร์ดซึ่งตัดเป็นรูปทรงกลม มีความต้านทาน 7.3 โอห์ม โดยระบบวัดมีตัวคูณจากการคำนวณคือ 13778.7 จากการทดสอบพบว่าอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์สามารถผ่านการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว ดังนั้นจึงสามารถนำอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์นี้ไปใช้ในการสอบเทียบได้ ส่วนผลที่ได้ในการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดจำนวน 4 ครั้ง ในกรณีผลของระยะของระนาบดินพบว่า ค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และเวลาตอบสนองจะลดลงตามระยะของระนาบดินที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าส่วนพุ่งเกินมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะของระนาบดินเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยสามารถกำหนดระยะห่างระหว่างระนาบดิน กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4270401821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : LONG TERM STABILITY TEST / PROXIMITY EFFECT / LINEARITY TEST

PAKORN KHUMMONGKOL : THE LONG TERM STABILITY TEST ON A
300 kV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER UNDER IEC60060-2
STANDARD.

THESIS ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, 81 pp.

ISBN 974-17-1221-9

This thesis reports the result of the long term stability test and proximity effect on a 300 kV reference impulse voltage divider in accordance with IEC 60060-2 (1994). The high voltage part is made of NiCr resistance wire, wound non-inductively, which has a resistance of $6.9 \text{ k}\Omega$ and the low voltage part is also made of NiCr wire but wound radially on a printed-circuit board, which has a resistance of 7.3Ω . The scale factor of the whole measuring system is 13778.7.

The result of long term stability test after 52 weeks showed that the 300 kV impulse voltage divider meet the requirement of IEC 60060-2 (1994). The result of proximity effect test for 4 times showed that partial response time and response time decrease as the distance from ground plane is increased. In contrast, overshoot increases as the distance from ground plane is increased. Thus, we can use this result to specify an appropriate distance between ground plane and this impulse voltage divider during an impulse voltage measurement.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2002

Student's signature

Advisor's signature

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย รองศาสตราจารย์ ดรบัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ที่กรุณาให้คำแนะนำงานวิจัย ช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.วีรพันธ์ รังสีจิตรประภา คุณถาวร เอื้อดี คุณอรรณพ ลีมีสีมาร์ตัน และคุณเกรียงไกร โอบสุธัญญ์ เจ้าหน้าที่ตึกวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อนๆ พี่ๆ และรุ่นน้องที่ช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ คุณภาษิณี จุลละศรีที่คอยให้กำลังใจ และคอยตักเตือนผู้วิจัยเสมอมา

ทำยนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้สิ่งที่มีคุณค่า และมีความหมายต่อผู้วิจัย นั่นคือการศึกษเล่าเรียน อีกทั้งยังสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆด้านด้วยความยากลำบากเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	ผิดพลาด! ที่คั่นหนังสือไม่ได้กำหนด
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ผิดพลาด! ที่คั่นหนังสือไม่ได้กำหนด
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่.....	1
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ผลงานการศึกษาในอดีต.....	1
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
2. ทฤษฎีของโวลเตจดีไวเดอร์.....	4
2.1 วงจรพื้นฐานในการวัดแรงดันอิมพัลส์.....	4
2.2 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด.....	6
2.2.1 ผลตอบสนองของรูปขึ้น.....	6
2.2.1.1 ความสำคัญของเวลาตอบสนอง.....	7
2.2.1.2 คำนิยามของพารามิเตอร์ของผลตอบสนองรูปขึ้น.....	9
2.2.2 ตัวคูณ.....	13
2.2.2.1 ความไม่แน่นอน.....	14
2.2.2.1.1 การแจกแจงที่เป็นระบบ (Systematic contributions).....	14
2.2.2.1.2 การแจกแจงแบบสุ่ม (Random contributions).....	15
2.2.2.1.3 ความไม่แน่นอนทั้งหมด (Overall uncertainty).....	16
2.2.2.2 ความมีเสถียรภาพ.....	17
2.3 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์.....	17
2.3.1 วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน.....	19
2.3.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีขั้ว.....	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 คุณลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์	24
2.4.1 คุณลักษณะของภาคแรงสูง	24
2.4.2 คุณลักษณะของภาคแรงต่ำ	25
2.4.3 คุณลักษณะของตัวลดทอนแรงดัน	25
2.4.4 คุณลักษณะของสายเคเบิลวัด และหัวต่อ	25
2.5 การต่อแมทซิ่งในภาคแรงต่ำของระบบวัด	26
3. อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.1 อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐานแบบความต้านทานขนาด 300 กิโลโวลต์	27
3.1.1 ภาคแรงสูง	27
3.1.2 ภาคแรงต่ำ	28
3.1.3 ตัวลดทอน	29
3.1.4 สายเคเบิล และหัวต่อ	30
3.1.5 ความต้านทานหนอง	30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	31
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว	31
3.2.1.1 HP 4284A PRECISION LCR METER	31
3.2.1.2 MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER	35
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด	36
3.2.2.1 HAFELY USG 40 UNIT STEP GENERATOR	37
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้น	37
3.2.3.1 UNIVERSAL HIGH VOLTAGE REFERENCE DIVIDER	38
4. การทดสอบ และประเมินผล	39
4.1 การทดลองหาค่าผลตอบสนองรูปขึ้น	39
4.2 การทดสอบหาค่าตัวคูณ	40
4.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น	41
4.4 การทดสอบเสถียรภาพระยะยาว (Long term stability test)	45
4.5 การทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด	49
4.5.1 การทดสอบผลกระทบเนื่องจากผลของระนาบดินที่ระยะต่างๆ	49
4.5.2 การทดสอบผลกระทบเนื่องจากผลของมุมจากแหล่งจ่ายต่างๆ	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุป และข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุป	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก. แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมประเมินค่าพารามิเตอร์ ผลตอบสนอง	64
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานต่างๆ	65
ภาคผนวก ค. ตารางผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น.....	74
ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดสอบผลกระทบจากระดับดินที่ระยะแตกต่างกัน	77
ภาคผนวก จ. ตารางผลการทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่ายที่แตกต่างกัน	79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	81

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตินี้

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า Student 't' distribution ที่ Confidence level 'P'% เป็นฟังก์ชันของจำนวนครั้งในการวัด, 'n'.....	16
3.1 ค่าความแม่นยำของ MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER.....	35
4.1 ค่าความต้านทานขององค์ประกอบต่างๆของระบบวัด	40
4.2 ค่าความต้านทาน และผลตอบสนองของรูปขึ้นก่อน และหลังซ่อมความต้านทานหนึ่ง.....	41
4.3 เวลาที่ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นทั้ง 3 ครั้ง.....	43
4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวคูณ, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวคูณ และช่วงของค่าตัวคูณเทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวคูณ.....	45
4.5 เวลาในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์	46
4.6 เวลาในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดเซย์	48
4.7 เวลาที่ทำการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด.....	50
4.8 เวลาที่ทำการทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่ายแรงดัน	56
5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบวัด	59
ข1 ตัวอย่างค่าความต้านทานภาคแรงสูงที่วัดได้จำนวน 20 ครั้ง	65
ข2 ตัวอย่างค่าความต้านทานภาคแรงต่ำที่วัดได้จำนวน 20 ครั้ง.....	67
ข3 สัปดาห์ที่ทำการวัด อุณหภูมิขณะทำการวัด ค่าความต้านทาน และค่าความไม่แน่นอนขององค์ประกอบต่างๆของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์	70
ข4 สัปดาห์ที่ทำการวัด อุณหภูมิขณะทำการวัด ค่าความต้านทาน และค่าความไม่แน่นอนขององค์ประกอบต่างๆของตัวลดทอน และสายเคเบิล และค่าตัวคูณที่คำนวณได้	72
ค.1 ผลการทดสอบของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 1 (วันที่ 21 มิถุนายน 2544) ของ อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV กับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์อ้างอิงแรงดันสูง	74
ค.2 ผลการทดสอบของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 2 (วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2545) ของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV กับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์อ้างอิงแรงดันสูง	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.3 ผลการทดสอบของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 3 (วันที่ 11 กันยายน 2545) ของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV กับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์อ้างอิง แรงดันสูง	76
ง.1 ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด ทั้ง 4 ครั้ง	77
ง.2 ค่าส่วนพุ่งเกินที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดทั้ง 4 ครั้ง	77
ง.3 ค่าเวลาตอบสนองที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดทั้ง 4 ครั้ง .	77
ง.4 ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด ทั้ง 3 ครั้ง	78
ง.5 ค่าส่วนพุ่งเกินที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดทั้ง 3 ครั้ง	78
ง.6 ค่าเวลาตอบสนองที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดทั้ง 3 ครั้ง .	78
จ.1 ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากมุมที่แตกต่างกัน ทั้ง 4 ครั้ง	79
จ.2 ค่าส่วนพุ่งเกินที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากมุมที่แตกต่างกันทั้ง 4 ครั้ง	79
จ.3 ค่าเวลาตอบสนองที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากมุมที่แตกต่างกันทั้ง 4 ครั้ง	80

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันทั่วไป.....	4
2.2	ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากผลของเวลาตอบสนอง	8
2.3	วงจรวัดผลตอบสนองรูปคลื่นสำหรับระบบวัดแรงดัน มาตรฐาน IEC 60-2(1994).....	9
2.4	นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง	9
2.5	ผลตอบสนองรูปคลื่นแบบต่างๆในทางปฏิบัติ	11
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง β และ T_α/T_1	12
2.7	วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์	18
2.8	วงจรสมมูลทั่วไปของตัวประกอบวงจรของโวลเตจดีไวเดอร์แต่ละส่วนย่อย	18
2.9	วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน.....	19
2.10	ผลของการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่มีผลต่อผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วย	20
2.11	ผลของการเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ที่มีผลต่อผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วย..	21
2.12	ผลของการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าขนานที่มีผลต่อผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วย	21
2.13	วงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานอย่างง่าย	22
2.14	ผลตอบสนองรูปคลื่นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน.....	23
3.1	การพันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ	27
3.2	ความต้านทานภาคแรงต่ำโดยใช้ลวดความต้านทานพันในแนวรัศมี	28
3.3	วงจรสมมูลของตัวลวดทอนแบบความต้านทาน.....	29
3.4	ตัวลวดทอนแบบความต้านทานที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.5	ความต้านทานทรงที่พันเสร็จและประกอบเข้าทอพีวีซี	30
3.6	โวลเตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จแล้ว	31
3.7	คัลลิบหนีบของHP 4284A PRECISION LCR METERสำหรับวัดความต้านทาน	31
3.8	TWO-TERMINAL METHOD	32
3.9	กราฟที่ใช้ในการหาค่า BASIC ACCURACY.....	33
3.10	กราฟที่ใช้ในการหาค่าความแม่นยำในการปรับเทียบ.....	34
3.11	HP 4284A PRECISION LCR METER	34
3.12	วงจรที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของ ELECTROMETER.....	35
3.13	LECROY DIGITAL OSCILLOSCOPES 9384 SERIES.....	36
3.14	GROUND PLANE ขนาด 2m x 2m.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15	37
3.16	37
3.17	38
4.1	39
4.2	39
4.3	41
4.4	42
4.5	43
4.6	43
4.7	44
4.8	48
4.9	49
4.10	51
4.11	51
4.12	52
4.13	53
4.14	53
4.15	54
4.16	55
4.17	55
4.18	56
4.19	57
4.20	57



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้านทาน และสามารถเข้ากับระบบแรงดันสูงมากๆได้โดยที่โครงสร้างของโวลเตจดีไวเดอร์มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ในงานวิจัยโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดนี้จะทำการเปรียบเทียบกับโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

4) แบบความต้านทานขนาด 1000 กิโลโวลต์ [5] โดยมีค่าเวลาตอบสนอง 14ns เมื่อใส่ซีลด์ โวลเตจดีไวเดอร์แบบนี้ทำการหักล้างสนามแม่เหล็กไม่ดีพอเนื่องจากลดความต้านทานภาคแรงสูงไม่เคลือบฉนวนพันแบบไร้ความเหนียวนำ โดยใช้ฉนวนไม่ลากันระหว่างชั้น ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดชั้นแรกไม่เท่ากับชั้นที่สอง อีกทั้งมีค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์มีค่าสูงเนื่องจากความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์

5) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงขนาด 1000 กิโลโวลต์ [5] โดยมีค่าเวลาตอบสนอง 16ns โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดนี้มีความต้านทานกระจายในภาคแรงสูงเพื่อช่วยหน่วงการแกว่งเนื่องจากการสะท้อนภายในโวลเตจดีไวเดอร์เท่านั้น ยังต้องใช้ความต้านทานหน่วงภายนอกเพื่อหน่วงการแกว่งเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ของระบบวัด

6) แบบความต้านทานขนาด 300 กิโลโวลต์ [6] โดยมีค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ 5.0 ns และตัวคูณ (Scale factor) จากการคำนวณ 1121.62 ค่าเวลาตอบสนองของตัวลวดทอง 1.7 ns และตัวคูณจากการคำนวณ 12.3098 ตัวคูณจากการคำนวณที่ได้เมื่อต่อโวลเตจดีไวเดอร์กับตัวลวดทองคือ 13806.93 ขดลวดภาคแรงสูงใช้ขดลวด NiCr ที่เคลือบฉนวนพันแบบไร้ความเหนียวบนท่ออะคริลิกทำให้ลดค่าความเหนียวนำได้มากกว่ากรณีใช้ฉนวนกั้นระหว่างรอบของขดลวด และขดลวดแรงต่ำพันในแนวรัศมี ประกอบภาคแรงสูง และภาคแรงต่ำในแนวแกนร่วม

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบเสถียรภาพระยะยาว และทดสอบผลกระทบเนื่องจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีดของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐาน แบบความต้านทาน ขนาดแรงดัน 300 กิโลโวลต์ ที่กล่าวไว้ใน 6) หัวข้อที่ 1.2

1) การทดสอบเสถียรภาพระยะยาว

จะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มทุกๆสัปดาห์ จำนวน 100 ครั้งต่อสัปดาห์ โดยจะทำการป้อนที่แรงดัน 5 ระดับคือ 100, 150, 200, 250 และ 330 กิโลโวลต์ ระดับละ 20 ครั้ง หลังจากป้อนแรงดันเสร็จแล้ว นำองค์ประกอบต่างๆของระบบวัดมาวัดค่าความต้านทาน และทำการคำนวณหาตัวคูณของระบบวัด ทำเช่นนี้เป็นระยะเวลา 52 สัปดาห์ จากนั้นนำตัวคูณของระบบวัดที่คำนวณได้มาวิเคราะห์ผล และเปรียบเทียบผลที่ได้กับเกณฑ์ของมาตรฐาน IEC60060-2 ว่าผ่านมาตรฐานหรือไม่

2) การทดสอบผลกระทบเนื่องจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิด

ทำการป้อนแรงดันแรงดันรูปขั้นหนึ่งหน่วย ให้กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐาน แล้วศึกษาผลของระยะห่างของระนาบดินขนาด 2×2 เมตร โดยระยะห่างที่ทำการศึกษาคือ 75, 150, 225 และ 300 เซนติเมตร ทำการบันทึกค่าเวลาตอบสนองบางส่วน ค่าส่วนพุ่งเกิน และค่าเวลาตอบสนองของสัญญาณที่วัดได้ โดยทำการทดสอบ 4 ครั้ง ทำการวิเคราะห์ผลแล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ในการทดสอบแต่ละครั้ง

ทำการป้อนแรงดันรูปขั้นหนึ่งหน่วยให้กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐาน แล้วศึกษาผลของมุมจากแหล่งจ่ายแรงดันที่แตกต่างกันคือ มุมก้ม 15, 30, 45 และ 60 องศา มุมเงย 15, 30, 45 องศา ทำการบันทึกค่าเวลาตอบสนองบางส่วน ค่าส่วนพุ่งเกิน และค่าเวลาตอบสนองของสัญญาณที่วัดได้ ทำการวิเคราะห์ผลแล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ในการทดสอบแต่ละครั้ง



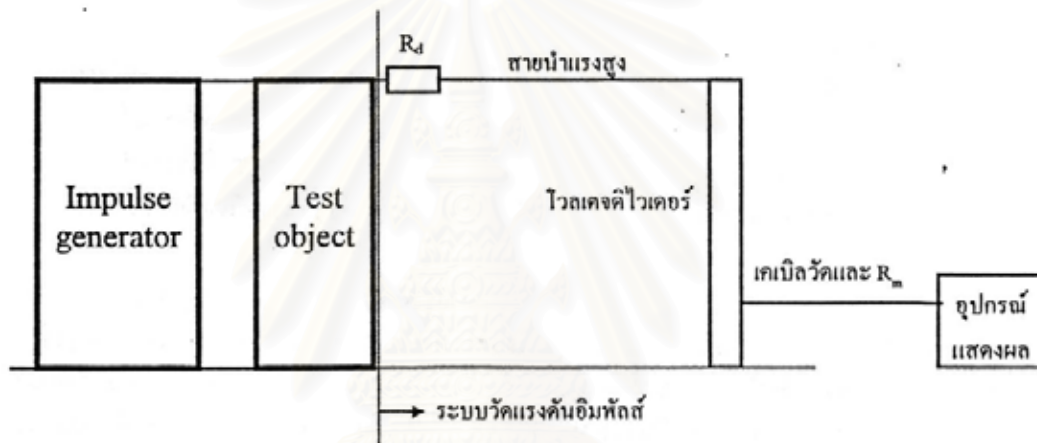
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีของโวลเตจดีไวเดอร์

2.1 วงจรพื้นฐานในการวัดแรงดันอิมพัลส์

รูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงวงจรพื้นฐานที่ใช้ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งประกอบไปด้วย สายนำ ต่อจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse generator) ไปยังวัสดุทดสอบ (Test object) และมี สายนำแรงสูงต่อจากวัสดุทดสอบไปยังโวลเตจดีไวเดอร์ซึ่งอาจมีความต้านทานหน่วง (R_0) อยู่ที่ต้นสายนำ หรือที่อิเล็กทรอนิกส์แรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ นอกจากนี้ยังมีสายเคเบิลซึ่งมีเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Z_c) นำสัญญาณที่ต้องการวัดไปยังอุปกรณ์แสดงผล



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันทั่วไป

องค์ประกอบของระบบวัดแรงดันที่กล่าวถึงมีหน้าที่ต่าง ๆ กันดังนี้ [7]

1) ความต้านทานหน่วง (R_0) ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในสภาวะทรานเซียนต์ ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์ ความต้านทานหน่วงที่ใช้ควรเป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ นอกจากนี้การต่อความต้านทานหน่วงที่ต้นสายนำโดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำจะลดผลของคลื่นสะท้อนที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายนำ และโวลเตจดีไวเดอร์

2) สายนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดีไวเดอร์มักอยู่ห่างจากวัสดุทดสอบ และสายนำมักมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์เพื่อลดผลของตัวเก็บประจุลงดิน (Stray capacitance) สายนำควรมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งเป็นผลรบกวนต่อระบบวัดแรงดัน เราสามารถหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำ (Z_L) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานหน่วง(R_0)ได้จาก[7]

$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$ และเนื่องจากในวงจรทดสอบทั่ว

ไปสายนำมักอยู่ในแนวระดับเราจึงสามารถคำนวณค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายนำในแนวระดับได้จากเวลาเดินทาง [7]

$$\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = \frac{l}{c}$$

เมื่อ τ_L คือ เวลาเดินทาง หน่วยเป็น s

L_L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของสายนำ หน่วยเป็น H

C_L คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายนำ หน่วยเป็น F

l คือ ความยาวของสายนำ หน่วยเป็น m

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

ดังนั้นค่า $Z_L = \frac{l}{c \times C_L}$ เมื่อสายนำเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d และอยู่สูง

เหนือระนาบดิน H เราจะสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของสายนำได้จาก

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

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

$$C = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าเพอร์มิบิลิตีของสุญญากาศ หน่วยเป็น H/m

ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ หน่วยเป็น F/m

ดังนั้นจะได้ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายนำเป็น

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

3) โวลเตจดีไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้มีขนาดที่อยู่ที่อุปกรณ์วัดในย่านแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะเป็นเคเบิลชนิดทรงกระบอกแกนร่วม (Coaxial Cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

5) อุปกรณ์วัด และบันทึกรูปคลื่น อาจใช้โวลมิเตอร์วัดค่ายอด หรือออสซิลโลสโคป โดยทั่วไปอุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีการชิลด์เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆในระบบทดสอบให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน โดยปกติจะใช้สายดินชนิดค่าเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้แรงดันตกที่สายดินมีค่าน้อยที่สุด เช่น ทองแดงแผ่นบาง

2.2 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันที่มีความถูกต้องจำเป็นต้องใช้ระบบวัดที่ดี คุณสมบัติของระบบวัดแรงดันทั่วไปจะพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ ผลตอบสนองของรูปขึ้น และ ตัวคูณ

2.2.1 ผลตอบสนองของรูปขึ้น

ผลตอบสนองของรูปขึ้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของโวลเตจดีไวเดอร์ที่จะบอกให้ทราบว่า จะนำไปใช้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

แรงดันรูปขึ้นที่ใช้ในการทดสอบผลตอบสนองอาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_1(t) = V_0 u_1(t)$$

เมื่อ V_0 คือ แอมพลิจูดของแรงดันรูปขึ้น

$u_1(t)$ คือ ฟังก์ชันรูปขึ้นหนึ่งหน่วยโดย $u_1(t)$ จะมีค่าเป็น 0 เมื่อ $t < 0$
จะมีค่าเป็น 1 เมื่อ $t > 0$

กำหนดให้ $v_2(t)$ เป็นแรงดันตอบสนองรูปขึ้น ซึ่งทำการ Normalization ได้ดังนี้

$$G(t) = \frac{v_2(t)}{V_0}$$

เมื่อ $G(t)$ คือ ผลตอบสนองรูปขึ้นเป็นฟังก์ชันไม่มีหน่วย และไม่ขึ้นกับแรงดันขาเข้า แรงดันตอบสนอง $v_2(t)$ เขียนในเทอมของผลตอบสนองรูปขึ้นได้ดังนี้

$$v_2(t) = V_0 G(t)$$

แรงดันตอบสนองทำเป็นผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ ได้ดังนี้

$$g(t) = \frac{v_2(t)}{V_2}$$

เมื่อ V_2 คือ ระดับที่ผลตอบสนองคงที่

ผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย $g(t)$ มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{v_2(t)}{V_0} \cdot \frac{V_0}{V_2} \\ &= G(t) \cdot a_0 \end{aligned}$$

เมื่อ a_0 คือ อัตราส่วนแรงดันไฟตรง กำหนดโดย

$$a_0 = \frac{V_0}{V_2} \quad (2.1)$$

ผลตอบสนองรูปขึ้น $G(t)$ จะมีความสัมพันธ์กับทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน $H(s)$ ดังนี้

$$H(s) = sG(s)$$

เมื่อ $G(s)$ คือ ผลของการแปลงลาปลาซ (Laplace transformation) ของ $G(t)$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซของแรงดันขาเข้า $v_1(t)$ เป็น $V_1(s)$ จะสามารถคำนวณหาแรงดันขาออกได้ในโดเมนความถี่ดังนี้

$$V_2(s) = V_1(s) \cdot sG(s)$$

เมื่อต้องการแรงดันขาออกในโดเมนเวลา $v_2(t)$ หาได้จากการอินเวอร์สลาปลาซ (Inverse-Laplace transformation) ดังนี้

$$v_2(t) = L^{-1}\{V_2(s)\}$$

โดยทั่วไปผลตอบสนองของรูปขั้น $G(t)$ ที่ได้มาจากการทดลองโดยถ่ายรูปลิ้นตอบสนองจากออสซิลโลสโคปมักไม่สามารถวิเคราะห์เป็นรูปแบบง่ายๆได้ แรงดันตอบสนองขาออกต่อแรงดันขาเข้าใดๆจึงต้องคำนวณโดยใช้ทฤษฎี Superposition ดังนี้

$$v_2(t) = G(0+) \cdot v_1(t) + \int_0^t v_1(\tau) \cdot G'(t - \tau) d\tau$$

ในทางปฏิบัติการหาเวลาตอบสนองมักจะหาในรูปของผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย ซึ่งมีความสัมพันธ์กับทรานสเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$H(s) = sL\left\{\frac{g(t)}{a_0}\right\}$$

$$a_0 H(s) = sL\{g(t)\}$$

เทอม $a_0 H(s)$ คือ Normalized transfer function สามารถเขียนแทนด้วย $h(s)$ ดังนั้น

$$g(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{s}h(s)\right\} \quad (2.2)$$

2.2.1.1 ความสำคัญของเวลาตอบสนอง

เวลาตอบสนองจะมีผลต่อการวัดเวลาของช่วงคลื่น และแอมพลิจูดของแรงดันอิมพัลส์มาก โดยเฉพาะแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าที่ตัดหน้าคลื่น ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาของคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

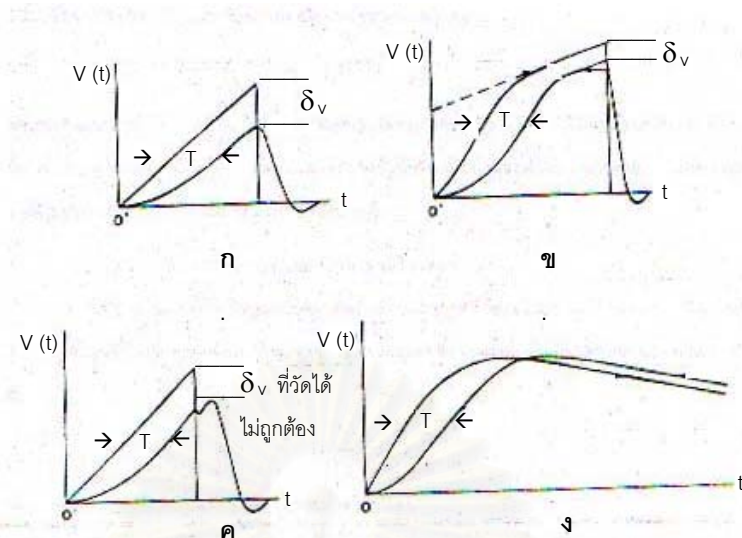
ก) ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอด δ_v คือ ความแตกต่างระหว่างค่ายอดของแรงดันที่ป้อนกับค่าที่วัดได้จากระบบการวัด คำนวณได้ดังนี้ [7]

$$\delta_v = S_L \cdot T \quad (2.3)$$

เมื่อ S_L คือความชันของแรงดันที่ป้อนเข้าไปก่อนที่จะเกิดการตัดของคลื่น หน่วยเป็น V/s

T คือเวลาตอบสนองของระบบการวัด

หน่วยเป็น s



รูปที่ 2.2 ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากผลของเวลาตอบสนอง

รูปที่ 2.2 ก เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ คือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น รูปที่ 2.2 ข เมื่อเป็นแรงดันรูปคลื่นตัดหน้าคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น รูปที่ 2.2 ค แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดการเพี้ยนก่อนถึงค่ายอดของแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้นในผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย และยังแสดงให้เห็นด้วยว่าขณะที่วัดค่ายอดจะไม่ใช้เวลาเดียวกับขณะคลื่นตัด แต่จะล่าหลังอยู่เล็กน้อยซึ่งจะทำให้ใช้สมการ (2.3) คำนวณค่า δ_v ที่ผิดพลาดได้ ในการวัดค่ายอดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มดังในรูปที่ 2.2 ง จะหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดจากสมการ (2.3) ไม่ได้เพราะเมื่อแรงดันอิมพัลส์เต็มรูปคลื่น ค่าเวลาตอบสนองเร็วพอที่สัญญาณจะเพิ่มถึงค่ายอดได้

ข) ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา δ_t คือความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาของแรงดันที่วัดได้กับช่วงเวลาของแรงดันที่ต้องการวัด จากรูป ก. เป็นกรณีที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น ความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาคือ

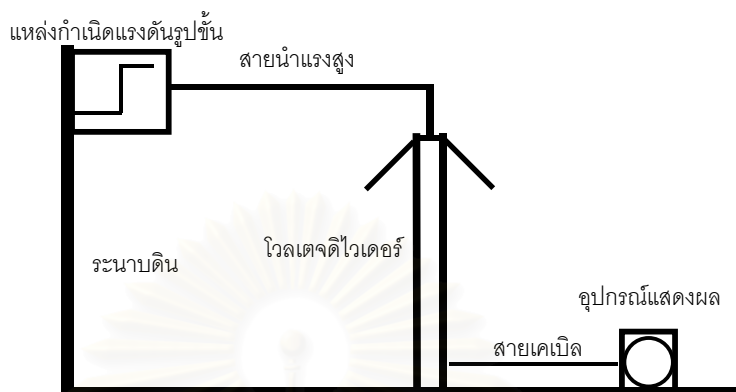
$$\delta_t = T$$

แต่แรงดันในรูป ข., ค. และ ง. ไม่มีความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์ดังรูป ก. ในกรณีรูปคลื่นเต็มดังรูป ง. ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาจะเกิดทั้งหน้า และหลังคลื่น แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบมากที่บริเวณหน้าคลื่น

จากความคลาดเคลื่อนทั้งสองแบบถ้ามีผลกระทบต่อกรวัดมากจนไม่สามารถยอมรับได้ จำเป็นต้องเปลี่ยนระบบวัดใหม่ที่มีเวลาตอบสนองที่เร็วกว่า

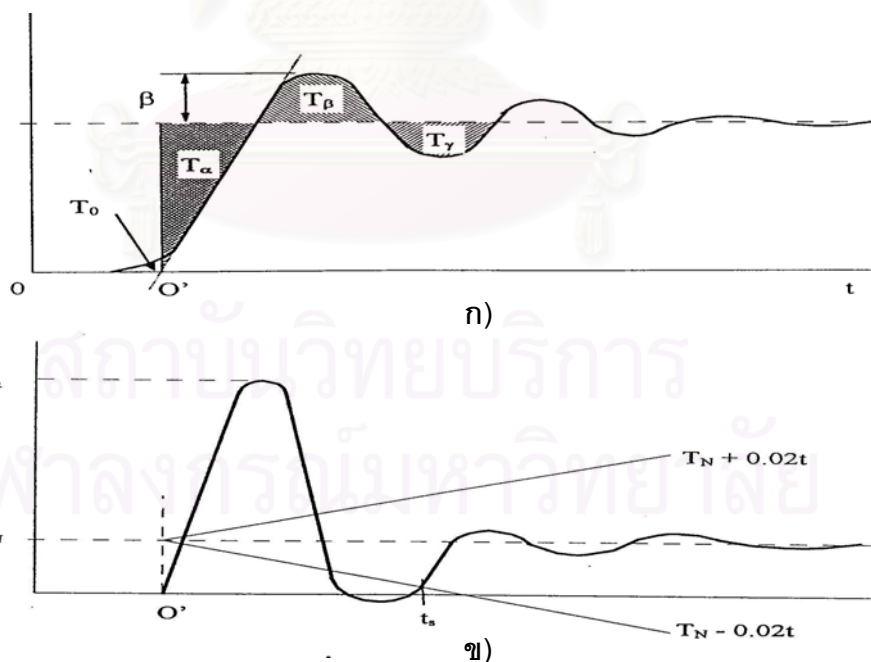
2.2.1.2 คำนิยามของพารามิเตอร์ของผลตอบสนองรูปขึ้น

วงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นตามข้อกำหนดของ มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขึ้นสำหรับระบบวัดแรงดัน มาตรฐาน IEC 60-2(1994)

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (Transfer Characteristic) ของโวลเตจดีไวเดอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงค่าจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน โดยมาตรฐาน IEC 60060-2 ได้กำหนดนิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขึ้นที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ก และ 2.4 ข ไว้ดังนี้



รูปที่ 2.4 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง

ก) เมื่อเทียบกับ $g(t)$

ข) เมื่อเทียบกับ $T(t)$

1) พารามิเตอร์ผลตอบสนองของรูปขั้น (Response Parameter) หมายถึงค่าพารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองของรูปขั้นโดยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองของรูปขั้น (Virtual Origin of a Step Response, O') หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองของรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งบนหน้าคลื่นจะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรงข้างต้น

3) ผลตอบสนองของรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ (Normalized Step Response, $g(t)$) หมายถึง ผลตอบสนองของรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ก)

4) อินทิกรัลผลตอบสนอง (Step response integral, $T(t)$) สามารถนิยามได้ดังสมการ

$$T(t) = \int_0^t (1 - g(\tau)) d\tau \quad (\text{แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ข})$$

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง (Experimental Response Time, T_N) หมายถึง ค่าของอินทิกรัลผลตอบสนองของรูปขั้นที่ t_{\max} หรือ ณ.เวลาที่การแกว่งของสัญญาณมีขนาดไม่เกินค่าที่กำหนดค่าหนึ่ง

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

6) เวลาตอบสนองบางส่วน (Partial Response Time, T_α) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทิกรัลผลตอบสนองของรูปขั้น

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

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

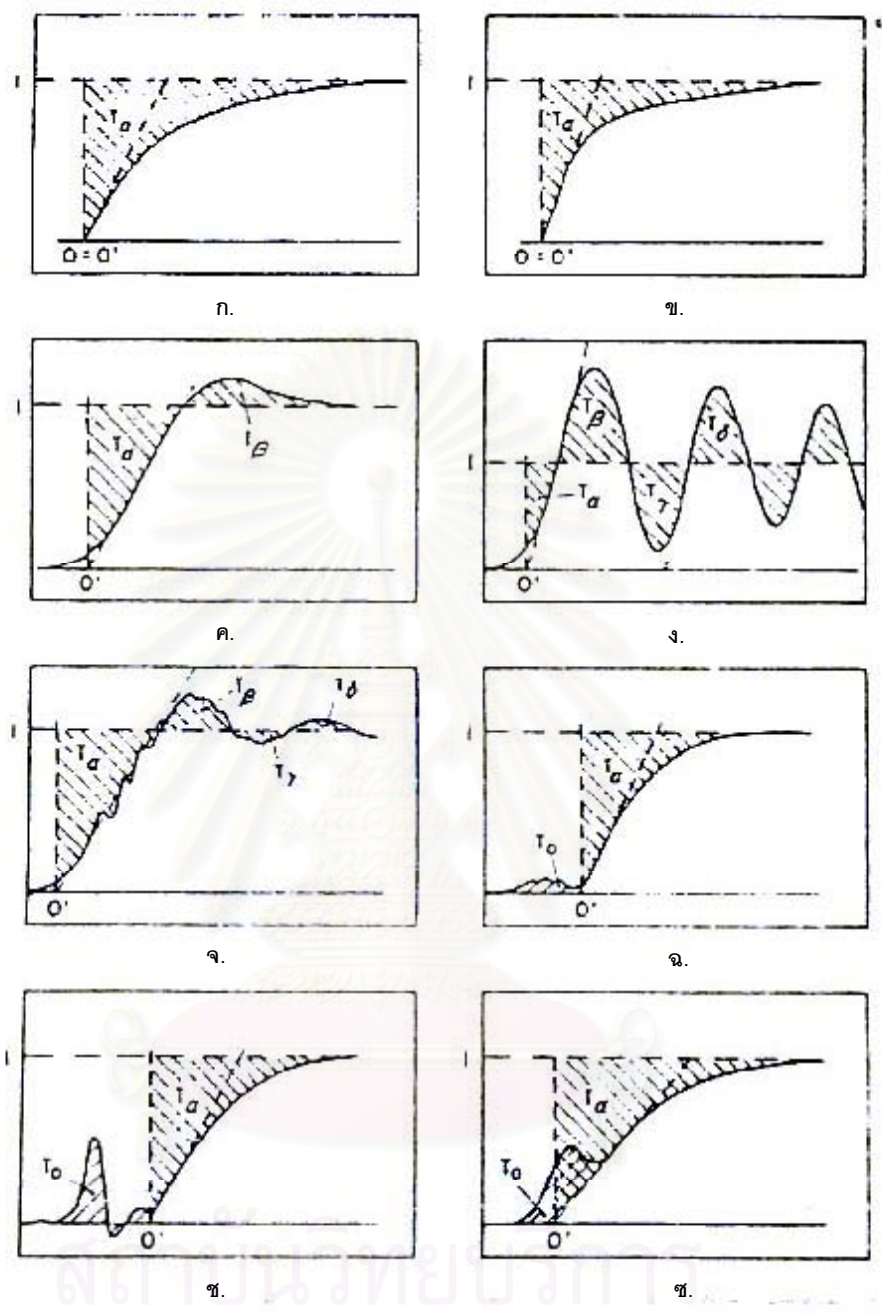
8) ส่วนพุ่งเกิน (Overshoot, β) หมายถึงค่าสูงสุดของผลตอบสนองของรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น (Initial Distortion Time, T_0) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์ อินทิกรัลผลตอบสนองของรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ $g(t)$ และเส้นตรงที่ใช้หา O' ดังรูปที่ 2.4 ก)

10) เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time, t_s) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองเศษเหลือ $T_R(t_i)$, มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

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

สำหรับทุกๆค่าของ t ในช่วงจาก t_s ถึง t_{\max}

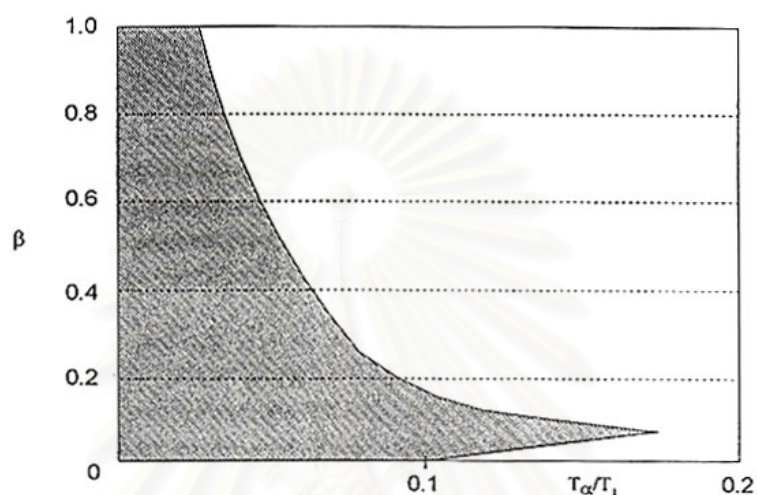


รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองของรูปขึ้นแบบต่างๆในทางปฏิบัติ [2]

ผลตอบสนองของรูปขึ้นอาจมีแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 ลักษณะของผลตอบสนองเหล่านี้จะบอกคุณลักษณะทางความถี่ของระบบวัดไว้อย่างครบถ้วน คือ ความชันส่วนหน้าคลื่นบอกถึงขีดความสามารถความถี่พิกัด ถ้ามีการแกว่งดังรูปที่ 2.5 ง. และ จ. จะแสดงถึงเรโซแนนซ์ของระบบวัด แอมพลิจูดของผลตอบสนองแสดงถึงอัตราส่วนของโวลเตจดีไวเดอร์ วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของผลตอบสนองรูปขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.5 ก ถึง รูปที่ 2.5 ซ กรณีที่สัญญาณที่วัดได้มีการออสซิลเลตที่หน้าคลื่น วิธีการหาค่าจุดเริ่มต้นเสมือน O' แสดงไว้ดังรูป ฉ., ช. และ ซ.

มาตรฐานไม่ได้ระบุค่าที่แน่นอนของพารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าแต่ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆไว้ ดังนี้

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หางคลื่น เวลาหน้าคลื่น T_1 ส่วนพุ่งเกิน β และเวลาตอบสนองบางส่วน T_α ควรอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า β และ T_α/T_1 จะต้องอยู่ในบริเวณส่วนที่แรเงาในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง β และ T_α/T_1

T_1 คือ เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการวัด

ในกรณีที่วัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในช่วงเวลาคลื่นตัด T_C พารามิเตอร์ผลตอบสนองควรอยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- เวลาตอบสนองและเวลาตอบสนองบางส่วนควรมีค่า

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

- เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวควรมีค่า

$$t_s \leq T_C$$

- เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้นควรมีค่า

$$T_0 \leq 0.005T_C$$

ผลตอบสนองรูปขึ้นอาจทดลองหาได้ที่ระดับแรงดันสูง หรือต่ำก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักนิยมทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ หากสมมติว่าองค์ประกอบของโวลเตจดีไวเดอร์ และวงจรมีสมบัติเชิงเส้นเมื่อใช้กับแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดก็ยังมีคุณสมบัติความถี่สูงอย่างเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อเลือกตัวประกอบวงจร และออกแบบสร้างดีแล้วก็ถือได้ว่าโวลเตจดีไวเดอร์มีลักษณะเชิงเส้น

ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของโวลเตจดีไวเดอร์อาจมีสาเหตุมาจาก

1. โครนา (Corona) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันสูงมาก และทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน ดังนั้นการออกแบบภาคแรงสูงที่ถูกต้อง ควรหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่แหลมคม ใสชีลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า เช่นในน้ำมันฉนวน หรือใช้แก๊สอัดความดัน

2. ผลกระทบจากความร้อนภายในตัวประกอบวงจร เช่น ตัวต้านทานที่ใช้บางชนิดจะเปลี่ยนค่าอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิ หรือแรงดันเปลี่ยนไป

การหาผลตอบสนองที่ระดับแรงดันสูงนั้นเหมาะที่จะใช้กับโวลเตจดีไวเดอร์ที่มีค่าแรงดันที่กำหนดสูงๆ (สูงกว่า 2MV) ทั้งนี้เพราะโวลเตจดีไวเดอร์เหล่านี้จะมีตัวคูณสูง ถ้าทดสอบด้วยระดับแรงดันต่ำจะทำให้ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ออกมา มีค่าน้อยไปทำให้เกิดความยุ่งยากในการวัดที่ถูกต้อง อีกประการหนึ่งการทดสอบผลตอบสนองที่แรงดันสูงจะได้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง

2.2.2 ตัวคูณ

ความหมายของตัวคูณของระบบวัดตาม มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) [1] ได้นิยามไว้ดังนี้

“ตัวคูณ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อหาค่าปริมาณขาเข้า”

โวลเตจดีไวเดอร์ที่ดีต้องมีตัวคูณคงที่ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และไม่ขึ้นกับระดับแรงดัน ตัวคูณของโวลเตจดีไวเดอร์สามารถหาได้ด้วยวิธีการต่างๆดังนี้

- ก) คำนวณจากอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบของวงจรที่ทราบค่าได้จากการวัด
- ข) วัดแรงดันพร้อมกันทั้งทางขาเข้า และขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์พร้อมกัน
- ค) ใช้วงจรบริดจ์เปรียบเทียบค่าแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์ กับแรงดันขาออกของโวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐานที่ปรับตัวคูณได้
- ง) เปรียบเทียบกับระบบการวัดที่ทราบตัวคูณแล้ว

จากวิธีทั้ง 4 ที่ใช้กันอยู่ วิธี ก) เหมาะสำหรับการหาตัวคูณในทางทฤษฎี ซึ่งอาจแตกต่างไปจากการใช้งานจริง ผู้วิจัยได้ใช้วิธีนี้ในการหาตัวคูณในหัวข้อการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว วิธี ข) และ ค) โดยมากจะทำที่ระดับแรงดันต่ำๆ (ไม่เกิน 500 โวลต์) โดยถ้าเป็นโวลเตจดีไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์จะทำการใช้แรงดันกระแสสลับป้อนเข้าไป และทำการทดลองที่ความถี่ต่างๆกัน 2 ค่า เช่นที่ความถี่ 50Hz หรือ 1kHz ส่วนวิธี ง) ใช้ได้กับโวลเตจดีไวเดอร์ทุกแบบ แต่มีข้อเสียคือถ้าทำการป้อนแรงดันสูงๆจะส่งผลให้ระบบวัดที่ทราบตัวคูณแล้วได้รับแรงดันสูงไปด้วย ผู้วิจัยใช้วิธีนี้ในการหาค่าตัวคูณจากการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

มาตรฐานได้กำหนดคุณสมบัติของตัวคุณไว้ 2 ประการ คือ

- 1) ความไม่แน่นอน (Uncertainty)
- 2) ความมีเสถียรภาพ (Stability)

2.2.2.1 ความไม่แน่นอน

-คำนิยามของความไม่แน่นอน

- ค่าจำกัด ($\pm U$) ของช่วงของค่าจริงที่วัดได้จากอุปกรณ์วัด จะขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างผลของค่าที่บันทึกได้ (Recorded result) และ
 - ความน่าจะเป็นของค่าจริงที่จะอยู่ในช่วงค่าจำกัดนี้เราจะเรียกว่า Confidence level
- ตัวอย่างของอุปกรณ์วัดซึ่งประกอบด้วยค่าความไม่แน่นอนคือ

$1040\text{kV} \pm 20\text{kV}$ (ประมาณว่า Confidence level ไม่ต่ำกว่า 95%)

อุปกรณ์วัดทุกประเภทจะให้ผลที่วัดได้ไม่สมบูรณ์แบบ ระบบจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น อุณหภูมิ ระยะห่างจากดินหรือแหล่งจ่าย การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อทำการวัดซ้ำหลายๆครั้งค่าที่วัดได้จึงกระจายออกไป เมื่อทำการวัดซ้ำเป็นจำนวนมาก ค่าที่วัดได้ส่วนใหญ่จะลู่เข้าสู่ค่ากลางค่าหนึ่ง ซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่เมื่อจำนวนการวัดเพิ่มขึ้น

การทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะยอมรับการวัดเพียงครั้งเดียวเท่านั้น โดยการวัดครั้งหนึ่งอาจให้ค่าที่วัดได้หลายค่าซึ่งกระจายออกไป ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ค่าหนึ่งกับค่าเฉลี่ยของค่าที่กระจายต่างๆที่เป็นไปได้จะให้ค่าการแจกแจงแบบสุ่มของความไม่แน่นอน (A random contribution of uncertainty)

ในระบบวัดส่วนใหญ่ ค่าความไม่แน่นอนทั้งหมด จะมีผลมาจากการรวมกันของหลายๆการแจกแจง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทขึ้นกับกรรมวิธีในการหาค่าดังนี้

2.2.2.1.1 การแจกแจงที่เป็นระบบ (Systematic contributions)

1) แบบ B

- การแจกแจงที่เป็นระบบไม่สามารถหาค่าได้จากทางสถิติ แต่จะประมาณค่าได้โดยวิธีอื่นๆดังนี้
- ค่าความไม่แน่นอนจากการปรับเทียบของระบบวัด (หรือองค์ประกอบ)
 - ความเบี่ยงเบนของค่าตัวคุณของระบบวัด
 - การใช้ระบบวัดในสภาวะแวดล้อมที่คงที่ซึ่งแตกต่างจากตอนทำการปรับเทียบ
 - ค่าความไม่แน่นอนของอุปกรณ์แต่ละชนิด
- ระบบวัดหนึ่งๆ (หรือส่วนประกอบของมัน) จะต้องผ่านการปรับเทียบ แล้วจึงสามารถนำไปใช้ในการทดสอบได้

2) แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular)

สมมติว่าการแจกแจงแบบเป็นระบบมีการกระจายแบบมุมฉาก ซึ่งเป็นค่าต่างๆที่วัดได้ระหว่างค่าจำกัดของการประมาณ (The estimated limit; $\pm a$ โดย a คือ Semi-range value) ถูกสมมติว่ามีโอกาสเกิดเท่าๆกัน ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจง (Standard deviation) แบบมุมฉากคือ

$$S = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

เมื่อพิจารณาการแจกแจงที่เป็นระบบที่ไม่มีความสัมพันธ์กันจำนวนมากมารวมกัน พบว่า

a) ความเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมคือ

$$S_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}}$$

เมื่อ a_1 ถึง a_n คือ Semi-range values ของการแจกแจงแต่ละระบบ

b) กรณีที่มีจำนวนการจำแนกที่เพียงพอ เราสามารถคิดการกระจายได้โดยประมาณเป็นแบบเกาส์เซียน

3) แบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution)

สมมติว่าการแจกแจงที่เป็นระบบเป็นแบบเกาส์เซียน เมื่อจำนวนของการแจกแจงที่ไม่มีความสัมพันธ์กันนำมาพิจารณารวมกัน ค่ารากที่สองของผลบวกของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกำลังสองจะสามารถหาค่า S_{sg}

ทำการรวมกันของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงที่เป็นระบบทั้งหมดจะได้

$$S_s = \sqrt{S_{sa}^2 + S_{sg}^2}$$

2.2.2.1.2 การแจกแจงแบบสุ่ม (Random contributions)

การแจกแจงแบบสุ่มสามารถหาได้โดยวิธีทางสถิติจากการวัดซ้ำกันหลายๆครั้ง และเป็น การวัดแบบสุ่มๆ จะหาได้โดยการวัดแนวโน้มของการกระจายแบบเกาส์เซียน แต่ละการจำแนกแบบสุ่มจะถูกกำหนดคุณลักษณะโดย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานการทดลอง (Experimental standard deviation; S_r) ของตัวอย่างค่าที่วัดได้

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}$$

เมื่อ n : จำนวนครั้งในการวัด

x_i : ค่าที่วัดจาก $i = 1$ จนถึง n

x_m : ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้

2.2.2.1.3 ความไม่แน่นอนทั้งหมด (Overall uncertainty)

2.2.2.1.3.1 การรวมกันของการแจกแจงของค่าความไม่แน่นอนต่างๆกัน

ค่าความไม่แน่นอนสำหรับการกระจายแบบเกาส์เขียนแสดงไว้ดังนี้

$$U = kS \text{ (โดยประมาณที่ Confidence level ที่ } P\%)$$

เมื่อ k : ค่าแฟคเตอร์การกระจายปกติ (The normal distribution factor)

P : Confidence level (แสดงไว้ในตารางที่ 2.1)

โดยทั่วไปจะหาค่าความไม่แน่นอนที่ Confidence level มีค่า 95% หรือที่มีค่า $k = 2$

ตารางที่ 2.1 ค่า Student 't' distribution ที่ Confidence level 'P' เป็นฟังก์ชันของจำนวนครั้งในการวัด, 'n'

P \ N	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
∞	1.00	1.65	1.96	3.00

- เมื่อ $n \rightarrow \infty$, $t \rightarrow k$
- สำหรับ $P = 95\%$ k มีค่าประมาณ 2

สมการที่ใช้หาค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ U_s : ค่าความไม่แน่นอนกรณีของการแจกแจงเป็นระบบ

U_r : ค่าความไม่แน่นอนกรณีของการแจกแจงแบบสุ่ม

โดย U_s และ U_r ทำการคำนวณที่ Confidence level เดียวกัน

2.2.2.1.3.2 การประมาณค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบ (U_s)

สมการพื้นฐานสำหรับความไม่แน่นอนที่เป็นระบบคือ

$$U_s = kS_s = k\sqrt{S_{sa}^2 + S_{sg}^2}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการทั่วไปของความไม่แน่นอนที่เป็นระบบได้ดังนี้

$$U_s = k\sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{k_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2}$$

เมื่อ U_1 ถึง U_m คือการจำแนกของการปรับเทียบที่แต่ละ Confidence level

k_1 ถึง k_m คือค่า Corresponding normal distribution factor

2.2.2.1.3.3 การประมาณค่าความไม่แน่นอนที่เป็นแบบสุ่ม (U_r)

ในกรณีที่จำนวนครั้งในการวัดน้อยๆสามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เป็นแบบสุ่มได้ดังนี้

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

เมื่อ t : Student distribution (สามารถหาได้จากตารางที่ 2.1)

สำหรับจำนวนครั้งในการวัดที่หลายๆ ($n \gg 10$) ที่ระดับconfidence level 95%สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เป็นแบบสุ่มได้จากสมการ

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

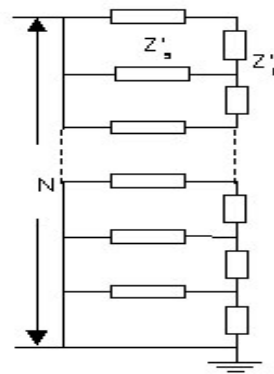
2.2.2.2 ความมีเสถียรภาพ

อุปกรณ์ที่มีเสถียรภาพ คืออุปกรณ์ที่สามารถทำงานในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน หรือแรงดันที่แตกต่างกันแล้วยังสามารถทำงานได้ถูกต้องแม่นยำ ถึงแม้ว่าจะใช้งานมาเป็นเวลานานในสภาวะดังกล่าวก็ตาม เช่น โวลเตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทานที่มีเสถียรภาพที่ดีเมื่อผ่านการใช้งานในสภาวะต่างๆ ค่าความต้านทาน และตัวคูณต้องมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

2.3 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีไวเดอร์

การศึกษาลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ความถี่สูงต้องอาศัยวงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบวงจรค่าคงที่แบบกระจาย (Distributes constant circuit elements) ดังรูปที่ 2.7 [7]

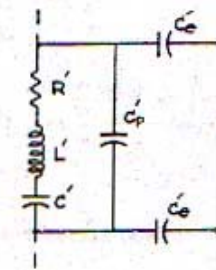
- เมื่อ N คือ จำนวนส่วนย่อยทั้งหมด
- Z_L' คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหนึ่งส่วนย่อย
- Z_g' คือ อิมพีแดนซ์ขนานลงดินต่อหนึ่งส่วนย่อย
- Z_L คือ อิมพีแดนซ์อนุกรมรวม โดยที่ $Z_L = NZ_L'$
- Z_g คือ อิมพีแดนซ์ขนานลงดินรวม โดยที่ $Z_g = \frac{1}{N} Z_g'$



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดีโวลเดอร์

อิมพีแดนซ์แต่ละส่วนย่อย (Z_L' และ Z_g') ประกอบด้วยองค์ประกอบวงจรต่างๆดังรูปที่ 2.8 R' คือ ความต้านทานย่อย (ซึ่งรวมทั้งค่าความต้านทานสมมูลของตัวเก็บประจุ)

- เมื่อ C' คือ ค่าความจุไฟฟ้าย่อย
- L' คือ ค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ย่อย
- C_p' คือ ค่าความจุไฟฟ้าขนานย่อย
- C_s' คือ ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ย่อย



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลทั่วไปของตัวประกอบวงจรของโวลเตจดีโวลเดอร์แต่ละส่วนย่อย

ข้อดีของการใช้วงจรสมมูลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของโวลเตจดีโวลเดอร์คือ จะทำให้เกิดความสะดวก และง่ายต่อการศึกษาโวลเตจดีโวลเดอร์แบบต่างๆเมื่อแทนค่าตัวประกอบวงจรในวงจรสมมูลให้เหมาะสมเท่านั้น

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลดังกล่าว จะเห็นได้ว่ามีลักษณะทำนองเดียวกันกับวงจรสมมูลของสายส่งพลังงานไฟฟ้าที่ปลายข้างหนึ่งต่อลงดิน จึงอาจวิเคราะห์ลักษณะเดียวกับระบบสายส่ง ดังนั้นวงจรสมมูลในรูป 2.7 สามารถหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของโวลเตจดีโวลเดอร์ได้ดังสมการ [7]

$$H(s) = \frac{\sinh \frac{1}{N} \sqrt{\frac{Z_L(s)}{Z_g(s)}}}{\sinh \sqrt{\frac{Z_L(s)}{Z_g(s)}}}$$

เมื่อทำเป็น Normalized transfer function โดยที่ $a_0 = N$ ได้เป็น

$$h(s) = \frac{N \sinh \frac{1}{N} \sqrt{\frac{Z_L(s)}{Z_g(s)}}}{\sinh \sqrt{\frac{Z_L(s)}{Z_g(s)}}} \quad (2.4)$$

จากสมการ 2.2 ทำให้สามารถหาผลตอบสนองของรูปชั้นหนึ่งหน่วยทางทฤษฎีได้

2.3.1 วงจรสมมูลของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทาน

โวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทานคือ โวลเตจดีโวลเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์ทั้งภาคแรงสูง และแรงต่ำเป็นความต้านทานล้วน แต่ในทางปฏิบัติตามความจริงย่อมมีค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ และค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์รวมอยู่ด้วย ดังวงจรสมมูลรูปที่ 2.9 [7]

- เมื่อ $R = NR'$
- $L = NL'$
- $C_e = NC_e'$
- $C_p = \frac{1}{N} C_p'$
- $R_2 = R'$
- $L_2 = L'$
- $R_1 = (N-1) R'$



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทาน

จากสมการ 2.4 สามารถคำนวณหา Normalized transfer function ได้ดังนี้ [7]

$$h(s) = \frac{N \sinh \frac{1}{N} \sqrt{\frac{(R + sL)sC_e}{1 + (R + sL)sC_p}}}{\sinh \sqrt{\frac{(R + sL)sC_e}{1 + (R + sL)sC_p}}}$$

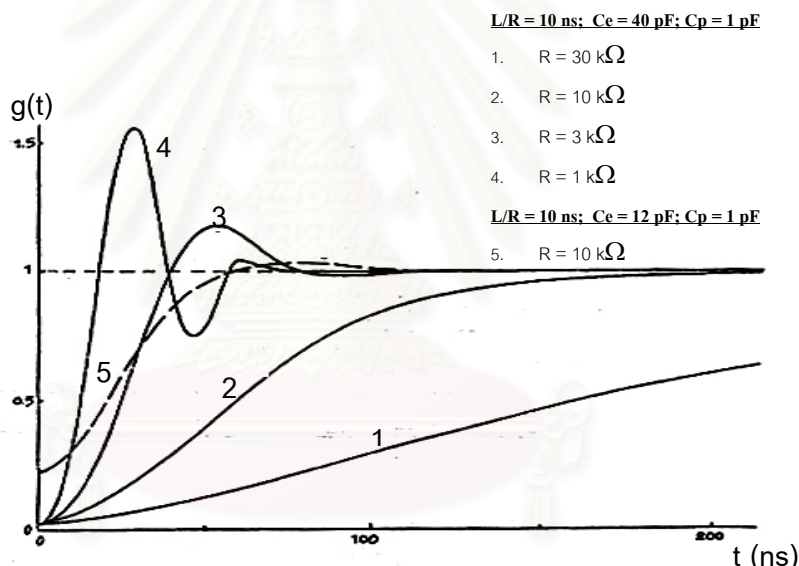
จากสมการ 2.2 สามารถคำนวณหาผลตอบสนองของรูปขั้นหนึ่งหน่วยจาก $h(S)$ ได้ดังนี้

$$g(t) = 1 + 2 \cdot e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ $a = \frac{R}{2L}$

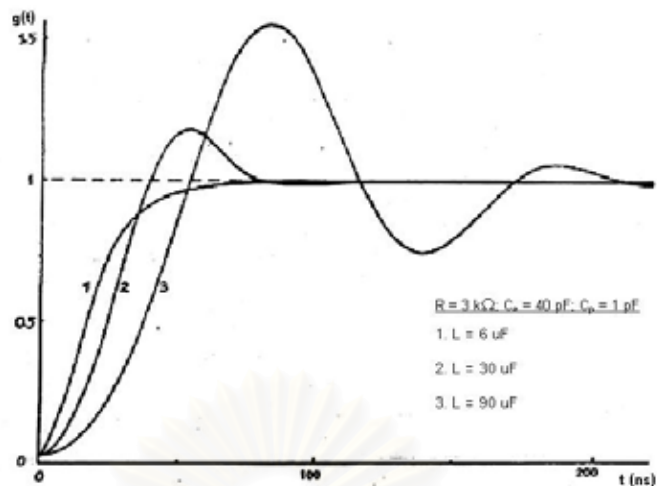
$$b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2 \pi^2}{LC_e (1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2)}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

จากสมการ (2.5) จะศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ R, L และ C_p ตัวใดตัวหนึ่งโดยให้พารามิเตอร์ตัวอื่นๆคงที่ จะได้ผลตอบสนองของรูปขั้นหนึ่งหน่วยในลักษณะต่างๆกันดังรูปที่ 2.10 - 2.12 [7]



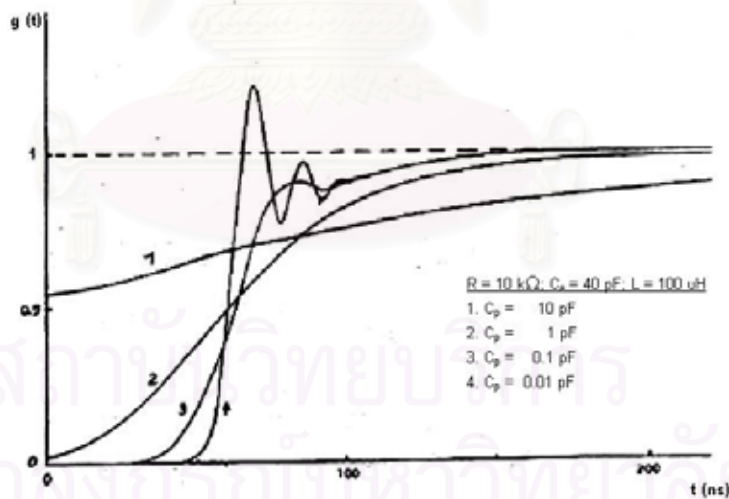
รูปที่ 2.10 ผลของการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่มีผลต่อผลตอบสนองของรูปขั้นหนึ่งหน่วย

รูปที่ 2.10 เป็นการเปลี่ยนค่าความต้านทานตั้งแต่ $1\text{k}\Omega$ ถึง $30\text{k}\Omega$ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความต้านทานลดลง เวลาตอบสนองของรูปขั้นจะดีขึ้น แต่ถ้าลดความต้านทานน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการแกว่งขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ ทั้งยังเป็นผลกระทบในแง่เป็นโหลดต่อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มากเกินไป ในทางปฏิบัตินิยมใช้ความต้านทานในช่วง $5\text{k}\Omega$ ถึง $20\text{k}\Omega$ ฉะนั้นถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทาน $10\text{k}\Omega$ ดังกราฟเส้นที่ 2 จะแก้ไขผลตอบสนองให้ดีขึ้นได้โดยการลดค่า C_e ให้น้อยลง ดังกราฟเส้นที่ 5 ซึ่งใกล้เคียงกับผลตอบสนองของรูปขั้นในอุดมคติ



รูปที่ 2.11 ผลของการเปลี่ยนค่าค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ที่มีผลต่อผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย

รูปที่ 2.11 เป็นการเปลี่ยนค่าค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ (L) 3 ค่าคือ 6, 30 และ 90 μH พบว่าถ้าเพิ่มค่า L มากขึ้น ผลตอบสนองรูปขึ้นจะเกิดการแกว่งมากขึ้น ทั้งยังมีส่วนพุ่งเกินเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นควรใช้วงจรประกอบที่มีค่า L น้อยๆ หรือลดค่า L ด้วยการพันขดลวดแบบสวนทางกรณีใช้ขดลวดความต้านทาน เพื่อให้ได้ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ดี

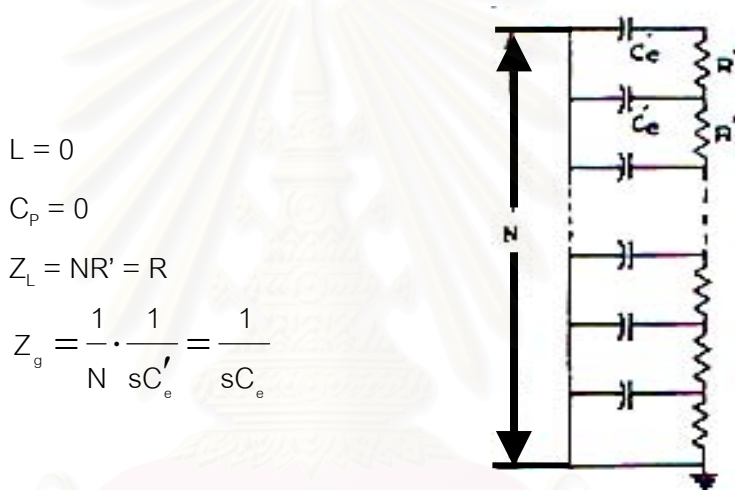


รูปที่ 2.12 ผลของการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าขนานที่มีผลต่อผลตอบสนองรูปขึ้นหนึ่งหน่วย

รูปที่ 2.12 เป็นการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าขนาน (C_p) 4 ค่าคือ 0.01, 0.1, 1 และ 10 pF พบว่าถ้าค่า C_p ลดลง ผลตอบสนองรูปขึ้นจะเกิดการแกว่งมากขึ้น และมีเวลาล่าช้า (time delay) มากขึ้น

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองรูป
 ชั้นของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทาน สรุปได้ว่าการที่จะได้ผลตอบสนองรูปชั้นที่ดีนั้นควรจะ
 ออกแบบให้ค่าความต้านทานต่ำ โดยไม่มีผลกระทบในแง่เป็นโหลดต่อเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 และค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ควรมีค่าน้อยที่สุด ถ้าต้องการให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น ควรให้ค่า
 ความจุไฟฟ้าขานานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่มากเกินไป ด้วยเหตุนี้จึงมีการสร้างโวลเตจดีโวลเตอร์
 แบบผสมขึ้นเพื่อได้ผลตอบสนองที่ดี

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในการออกแบบควรจะให้ค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ L มีค่าน้อยที่สุด
 และโดยปกติโวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทานที่สร้างขึ้นจะมีค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ขานาน C_p
 ต่ำ ดังนั้นจากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 เมื่อละเลยค่า L และ C_p จะได้วงจรสมมูลรูปง่ายๆ คือ เหลือ
 เพียงพารามิเตอร์ R และ C_e เท่านั้น ดังรูปที่ 2.13 [7]



$$L = 0$$

$$C_p = 0$$

$$Z_L = NR' = R$$

$$Z_g = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{sC_e'} = \frac{1}{sC_e}$$

รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดีโวลเตอร์แบบความต้านทานอย่างง่าย

จากสมการ (2.4) สามารถหา Normalized transfer function ได้ดังนี้

$$h(s) = \frac{N \sinh \frac{1}{N} \sqrt{sRC_e}}{\sinh \sqrt{sRC_e}}$$

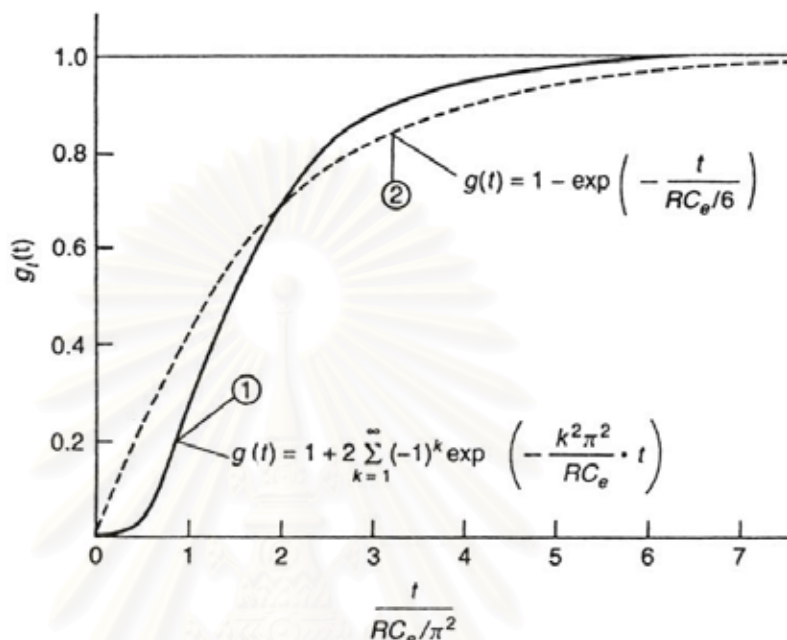
จากสมการ (2.2) สามารถหาผลตอบสนองรูปชั้นหนึ่งหน่วยได้คือ

$$g(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp\left(-\frac{k^2 \pi^2}{RC_e} \cdot t\right) \quad (2.6)$$

เวลาตอบสนองในทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้คือ

$$T \approx \frac{RC_e}{6} \quad (2.7)$$

ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานอย่างง่ายที่คำนวณได้จากสมการ (2.6) แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โดยแสดงเปรียบเทียบกับกราฟของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลที่มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ $\frac{RC_e}{6}$



รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วยของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน

ผลกระทบของค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ลงดิน C_e ที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานอย่างง่ายดังรูป 2.13 เมื่อแรงดันรูปขั้นเดินทางมาถึงตอนบนของโวลเตจดีไวเดอร์จะเริ่มอัดประจุให้กับ C_e กระแสที่ผ่านจะลดลงเรื่อยๆ จากตอนบนถึงตอนล่าง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้การกระจายแรงดันในสภาวะเริ่มแรกไม่เป็นเชิงเส้น และจะยังไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นเมื่ออัตราส่วน $\frac{C_p}{C_e}$ มีค่าน้อยลง ช่วงระยะหนึ่ง C_e จะถูกอัดประจุจนเต็มหลังจากนั้นแล้วการกระจายแรงดันจะเนื่องมาจากความต้านทานซึ่งจะเป็นเชิงเส้นตลอดความสูง ช่วงเวลานั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระจายแรงดัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในเรื่องนี้จึงต้องออกแบบให้การกระจายแรงดันแบบกะเปาะ (Capacitive voltage distribution) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายแรงดันในสภาวะเริ่มแรกสอดคล้อง หรือเหมือนกับการกระจายแรงดันเนื่องจากความต้านทาน (Resistive voltage distribution) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายแรงดันเมื่อสภาวะทรานเซียนผ่านพ้นไปแล้ว ทำให้เกิดการพัฒนาร่างโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานแบบชิลด์ และโวลเตจดีไวเดอร์แบบผสมขึ้น

2.3.2 โวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานมีซิลด์

ผลกระทบของสเตรแปซิแตนซ์ลงดินที่มีต่อโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานสามารถลดลงได้ โดยการจัดวางโวลเตจดีไวเดอร์ให้อยู่ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform electric field) ในทางปฏิบัติการทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอตลอดความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ไม่สูงนักทำได้โดยใช้โอเลคโตรดพิเศษที่ติดตั้งที่ตอนบนของโวลเตจดีไวเดอร์ ขนาด และรูปร่างของซิลด์โอเลคโตรดไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัว การปรับปรุงลักษณะสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทานโดยวิธีนี้เป็นที่ยอมรับมาก แต่อย่างไรก็ดีจะเกิดปัญหาเกิดขึ้นเมื่อโวลเตจดีไวเดอร์มีขนาดแรงดันสูงมาก เพราะจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอรอบโวลเตจดีไวเดอร์ ต้องใช้ซิลด์ที่มีขนาดทางกายภาพใหญ่มากซึ่งเป็นปัญหาในทางปฏิบัติ โวลเตจดีไวเดอร์ความต้านทานแบบซิลด์จึงมีขีดจำกัดในการใช้งาน ที่ผลิตในปัจจุบันส่วนใหญ่มีขนาดแรงดันไม่เกิน 2 เมกะโวลต์ เมื่อความสูงของโวลเตจดีไวเดอร์มากขึ้นอาจใช้ซิลด์โอเลคโตรดหลายอันติดตั้งกระจายตามความสูงแต่ต้องไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดต่อกับความต้านทานภาคแรงสูง โดยทั่วไปโวลเตจดีไวเดอร์ขนาดต่ำกว่า 500 กิโลโวลต์ จะใช้ซิลด์โอเลคโตรดอันเดียวติดตั้งตอนบนก็พอ

2.4 คุณลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์

บทนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดในการออกแบบโวลเตจดีไวเดอร์ตามมาตรฐาน IEC. 60060-2 (1994) และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของโวลเตจดีไวเดอร์ [6] ที่ทำการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว และผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียง ค่าแรงดันที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) กำหนดให้สามารถใช้โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงสอบเทียบระบบวัดอื่นๆที่ระดับแรงดันอย่างต่ำ 20% ของระดับแรงดันที่ใช้งานของระบบวัดนั้นๆ และเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีระดับแรงดันที่กำหนด 1400 กิโลโวลต์ ดังนั้นโวลเตจดีไวเดอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยผู้วิจัยคนก่อนจึงออกแบบสร้างที่ 300 กิโลโวลต์ ดังนั้นโวลเตจดีไวเดอร์นี้จึงสามารถสอบเทียบระบบวัดอื่นๆได้ที่ระดับแรงดันถึง 1500 กิโลโวลต์ นอกจากนั้นระบบ 69 กิโลโวลต์ ซึ่งต้องมีการทดสอบ BIL [8] ที่ระดับแรงดัน 325 กิโลโวลต์ ดังนั้นถ้ามีโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้งานในระดับแรงดันนี้ เราก็สามารถทำการสอบเทียบที่ระดับแรงดันประมาณ 90% ของค่าBILได้

2.4.1 คุณลักษณะของภาคแรงสูง

กรณีโวลเตจดีไวเดอร์แบบความต้านทาน พลังงานสูญเสียจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ใช้ คือเมื่อความต้านต่ำพลังงานสูญเสียจะมากซึ่งจะไปโหลดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ในทางกลับกันเมื่อค่าความต้านทานมากก็จะส่งผลต่อค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์เช่นกัน

หากเวลาตอบสนองมีค่ามากจะส่งผลให้โวลเตจดีไวเดอร์ไม่ไวพอที่จะวัดแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ ในทางปฏิบัติ ค่าความต้านทานจะอยู่ในช่วง 5-20 กิโลโอห์ม [7]

เนื่องจากทางภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ต้องรับแรงดันเกือบทั้งหมดของแรงดันที่ป้อนให้กับโวลเตจดีไวเดอร์ ดังนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า คือต้องไม่เกิดการวาบไฟตามผิว นอกจากนี้ภาคแรงสูงต้องสามารถรับความร้อนที่เกิดจากแรงดันอิมพัลส์โดยไม่ชำรุดเสียหาย และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังต้องไม่ทำให้ค่าตัวคูณของโวลเตจดีไวเดอร์เปลี่ยนแปลงเกินข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60060-2 อีกด้วย

2.4.2 คุณลักษณะของภาคแรงต่ำ

การออกแบบภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆดังนี้

1) ใช้ความต้านทานชนิดเดียวกับภาคแรงสูง เพื่อลดผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ไม่เท่ากันของความต้านทานภาคแรงสูง และแรงต่ำ เนื่องจากผลของอุณหภูมิ

2) การจัดวางองค์ประกอบของภาคแรงต่ำ และความต้านทานแมชซิงของเคเบิลวัด ต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำที่มีต่ออุปขาเข้าของเคเบิลวัด และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่สภาวะทรานเซียนมีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำกลับไปภาคแรงสูงมีค่าลดลง ดังนั้นจึงควรจัดองค์ประกอบภาคแรงต่ำให้อยู่ในแกนร่วม

3) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำจนเกินไป เพื่อป้องกันผลกระทบจากการรบกวนภายนอก เช่น สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดตามส่วนต่างๆของระบบ ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณรบกวนเด่นชัด และกระทบต่อสัญญาณที่ต้องการวัด

2.4.3 คุณลักษณะของตัวลดทอนแรงดัน

ตัวลดทอนถูกสร้างขึ้นเพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ลงมาอยู่ในย่านที่ออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้ นอกจากนั้นค่าความต้านทานขาเข้าของตัวลดทอนต้องเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัดเพื่อเป็นความต้านทานแมชซิงด้วย

2.4.4 คุณลักษณะของสายเคเบิลวัด และหัวต่อ

สายเคเบิล และหัวต่อที่ใช้ต้องมีการลดทอนสัญญาณน้อย และสามารถทนแรงดันสูงได้ มีช่วงความถี่ใช้งานที่กว้าง ตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ในการวัด เช่น สายเคเบิลชนิด BNC และ UHF ทนแรงดันได้ประมาณ $2.0 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ช่วงความถี่ใช้งานประมาณ 4 GHz [9]

2.5 การต่อแมทซิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด

ในการวัดแรงดันทรานเซียนท์ที่ส่งผ่านจากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด ภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์อาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันได้ ในที่นี้จะพิจารณาการต่อแมทซิงอิมพีแดนซ์เพื่อส่งผ่านแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดีไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด

เมื่อพิจารณาเคเบิลวัดเป็นแบบสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสีย ดังนั้นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์จึง มีค่าแน่นอนไม่ขึ้นกับความถี่ และมีเวลาเดินทาง

สำหรับดีไวเดอร์แบบความต้านทาน การต่อแมทซิงสามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทานแมทซิง $R_m = Z_c$ ที่ปลายทางของเคเบิลวัดซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน R_2 และส่งผ่านเคเบิลวัดจะไม่เกิดการผิดเพี้ยน เนื่องจากอิมพีแดนซ์ขาเข้าของเคเบิลวัดคือ $R_m = Z_c$ ค่าความต้านทานนี้จะต่อขนานเข้ากับ R_2 จึงต้องพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

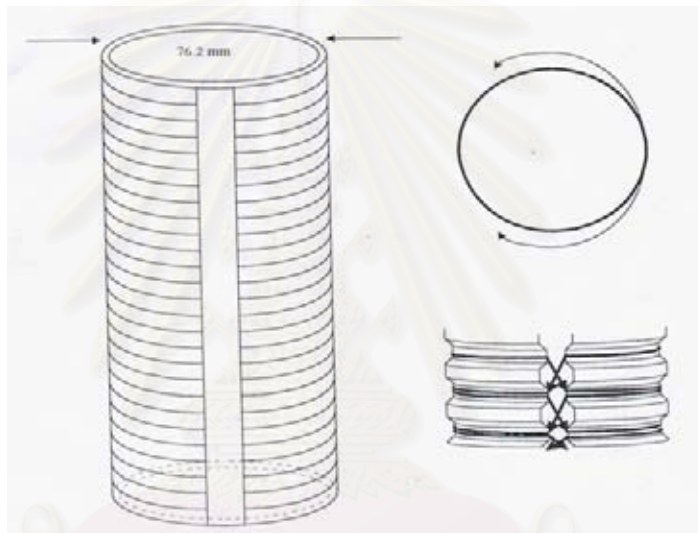
บทที่ 3

อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐานแบบความต้านทานขนาด 300 กิโลโวลต์ [6]

3.1.1 ภาคแรงสูง

ภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์มีค่าความต้านทานประมาณ 6.9 กิโลโอห์ม โดยตัวความต้านทานทำด้วยลวดเคลือบฉนวนพันแบบไร้ความเหนียวนำ ดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 การพันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนียวนำ

ลวดความต้านทานเบอร์ 38 NiCr 60/16 ชนิดไม่มีฉนวนหุ้ม มีคุณลักษณะดังนี้

ความต้านทานต่อหน่วยความยาว	63.11 Ω /m
ค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ)	1.152 Ω mm ² /m
เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (d)	0.15 mm
ความหนาแน่น (ρ)	7.15 g/cm ³
ความร้อนจำเพาะ (σ)	0.46 J/gK
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (k)	110 ppm/K

ในการพันลวดความต้านทานภาคแรงสูง จะต้องใช้ลวดความต้านทานเคลือบฉนวนพันบนท่ออะครีลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มิลลิเมตร ที่ทำการเจาะร่องโดยมีลักษณะการพัน

ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งทำการพันลวด 2 เส้นสวนกันใน 1 ร่อง โดยไม่ต้องใช้ฉนวนกัน ซึ่งจะทำการหักล้างสนามแม่เหล็กได้ดี ลดค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น และการระบายความร้อนได้ดีกว่ากรณีใช้แผ่นฉนวนชั้นกลางระหว่างเส้นแต่ละเส้น ความต้านทานที่พื้นเสร็จแล้วบรรจุในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และปิดด้วยหน้าแปลนอลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

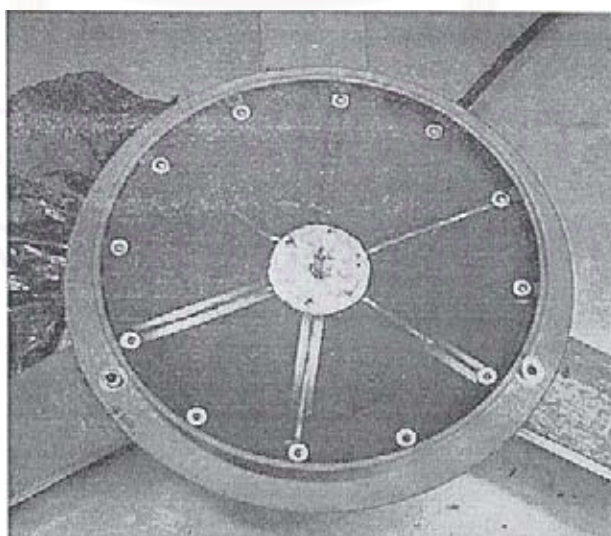
3.1.2 ภาคแรงต่ำ

เนื่องจากแรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเดอร์กำหนดจากแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องมือวัดแรงดันต่ำ ซึ่งอาจจะเป็นออกสซิลโลสโคป หรือโวลต์มิเตอร์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 200-1600 โวลต์ เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนดของโวลเตจดีไวเดอร์ก็จะทำให้ทราบตัวคูณของได้ดังสมการที่ 3.1

$$F = \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad (3.1)$$

เมื่อ	F	คือ	ตัวคูณของโวลเตจดีไวเดอร์
	R_1	คือ	ค่าความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ มีหน่วยเป็น Ω
	R_2	คือ	ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ มีหน่วยเป็น Ω

จากสมการที่ 3.1 เมื่อค่าความต้านทานภาคแรงสูงประมาณ 6.9 กิโลโอห์ม และแรงดันขาออกที่ต้องการมีค่าประมาณ 200-300 โวลต์ ได้ทำการประดิษฐ์ภาคแรงต่ำมีค่าความต้านทาน 7.3 โอห์ม โดยใช้ลวดความต้านทานพันในแนวรัศมีของแผ่นปรีนซ์เซอริกิตบอร์ด ซึ่งตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 254 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความต้านทานภาคแรงต่ำโดยใช้ลวดความต้านทานพันในแนวรัศมี

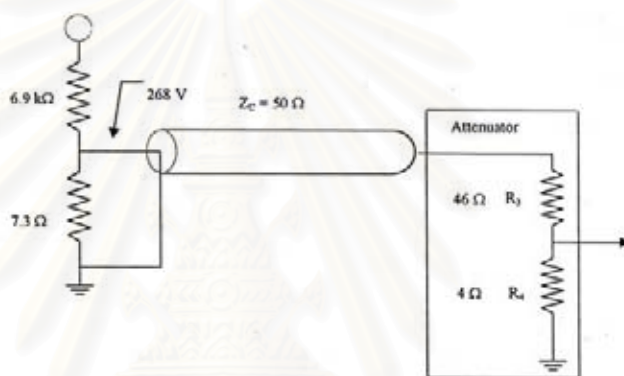
3.1.3 ตัวลดทอน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ดิเจิตอลลออสซิลโลสโคปที่มีแรงดันขาเข้าต่ำ ก็สามารถแสดงผลได้สูงสุด 80 โวลต์ ดังนั้นต้องทำการสร้างตัวลดทอนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำให้สามารถแสดงผลได้ โดยหลักการเหมือนกับการสร้างภาคแรงต่ำ สมการค่าตัวคูณของตัวลดทอนคือ

$$F_{\text{Atten}} = \frac{R_3}{R_4} + 1 \quad (3.2)$$

เมื่อ F_{atten} คือ ตัวคูณของตัวลดทอน

R_3, R_4 คือ ค่าความต้านทานของตัวลดทอน มีหน่วยเป็น Ω



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบความต้านทาน

จากสมการที่ (3.2) เมื่อค่าแรงดันสูงสุดที่ออกจากภาคแรงต่ำมีค่าสูงสุดประมาณ 300 โวลต์ และต้องการแรงดันขาออกจากตัวลดทอนมีค่าประมาณ 25 โวลต์ จะได้ค่าตัวคูณประมาณ 12 ดังนั้นค่า $\frac{T_3}{T_4}$ มีค่าประมาณ 11

นอกจากการคำนวณค่าตัวคูณของตัวลดทอนแล้ว ต้องคำนึงถึงการแมชชิงกับสายเคเบิลวัดอีกด้วย เนื่องจากในการวิจัยได้ใช้เคเบิลซึ่งมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ (Z_c) 50 โอห์ม ดังนั้นเลือกใช้ความต้านทาน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน

ดังนั้นเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นมาคือ

$$Z_c = R_3 + R_4 \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ค่าความต้านทาน R_3 และ R_4 จะมีค่า 46 โอห์ม และ 4 โอห์ม ตามลำดับ เลือกใช้ความต้านทานสำเร็จรูปชนิดฟิล์มโลหะขนาด 0.5 วัตต์มาประกอบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวลดทอนแบบความต้านทานที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.4 สายเคเบิล และหัวต่อ

ในงานวิจัยใช้สายเคเบิลที่มีค่าเสถียรจิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และใช้หัวต่อชนิด N ซึ่งทนแรงดันได้ประมาณ 2.5 kV rms ช่วงความถี่ค่าประมาณ 11-18 GHz สายเคเบิลเป็นแบบสายโฟม แกนร่วมความถี่สูง 8D-FB (FB Type High Frequency Coaxial Cable) ความยาวประมาณ 20 เมตร มีอัตราลดทอนสัญญาณ 9 dB/ 100 m ที่ความถี่ 400 MHz [9]

3.1.5 ความต้านทานหนอง

ในงานวิจัยนี้ใช้ความต้านทานหนองขนาดประมาณ 276 โอห์ม สร้างขึ้นจากลวดความต้านทานพันแบบไร้ความเหนี่ยวนำบนท่อโลหะ แต่หลังจากทำการวิจัยมีการเสียหายเกิดขึ้นเนื่องจากแรงทางกล จึงเปลี่ยนเป็นพันบนท่ออะคริลิคซึ่งทนทานกว่า โดยลักษณะการพันเหมือนกับการพันภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ พันประมาณ 92 รอบ โดยมีแรงดันตกคร่อมความต้านทานหนองประมาณ 12 กิโลโวลต์ เมื่อป้อนแรงดันพิกัด โดยมีระยะห่างระหว่างรอบประมาณ 1 mm ค่าระยะวาบไฟตามผิวของแรงดันอิมพัลส์มีค่า 2 - 2.5 m/MV หรือ 500 V/mm ความต้านทานหนองที่พันเสร็จแล้ว และบรรจุในท่อพีวีซีเรียบร้อยแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความต้านทานหนองที่พันเสร็จและประกอบเข้าท่อพีวีซี

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว

ประกอบด้วย

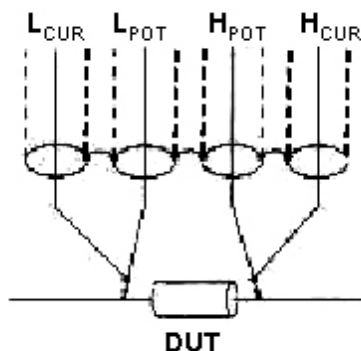
- 1) HP 4284A PRECISION LCR METER
- 2) MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER
- 3) LECROY DIGITAL OSCILLOSCOPES 9384 SERIES (รูปที่ 3.13)

3.2.1.1 HP 4284A PRECISION LCR METER

วิธีการวัดโดย LCR METER จะใช้วิธี TWO-TERMINAL METHOD ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 คลิปหนีบของHP 4284A PRECISION LCR METER สำหรับวัดความต้านทาน



รูปที่ 3.8 TWO-TERMINAL METHOD

ค่าความแม่นยำของการวัดโดยสัมบูรณ์ (A ; Absolute measurement accuracy) หาได้จากผลรวมของค่าความแม่นยำของการวัดสัมพัทธ์ (A_e ; Relative measurement accuracy) กับความแม่นยำในการปรับเทียบ (A_{cal} ; Calibration accuracy)

-ค่าความแม่นยำของการวัดสัมพัทธ์

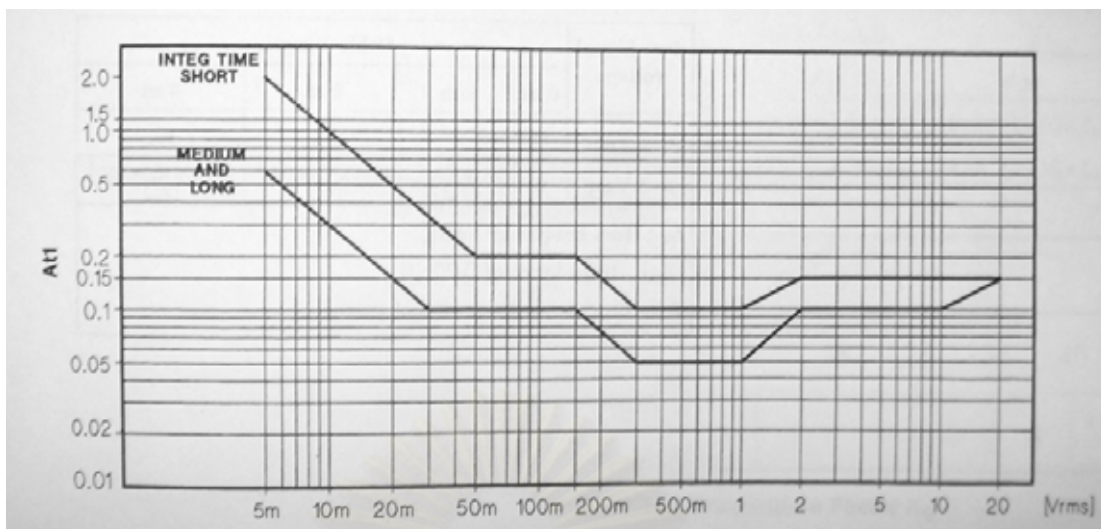
สามารถหาได้จากสมการ [10]

$$A_e = \pm [BA + (K_a + K_b \times K_{bb}) \times 100 + K_d] \times K_e \quad [\%] \quad (3.4)$$

- เมื่อ
- BA: Basic Accuracy
 - K_a : Impedance Proportional Factor
 - K_b : Impedance Proportional Factor
 - K_{bb} : Cable Length Factor
 - K_d : Cable Length Factor
 - K_e : Temperature Factor

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถหาได้ดังนี้

BA หาได้จากรูปที่ 3.9 โดยงานวิจัยนี้ใช้ Medium Integral time จึงเลือกดูกราฟเส้นล่าง และใช้ $V_s = 1 V_{rms}$ จะสามารถหาค่า A จากกราฟได้มีค่า 0.05



รูปที่ 3.9 กราฟที่ใช้ในการหาค่า BASIC ACCURACY

K_a , K_b , K_{bb} , และ K_d หาได้จากสมการต่อไปนี้ [10]

$$K_a = \frac{10^{-3}}{Z_m} \left(1 + \frac{200}{V_s} \right) \quad (3.5)$$

$$K_b = 10^{-9} Z_m \left(1 + \frac{70}{V_s} \right) \quad (3.6)$$

$$K_{bb} = 1 + (5xf_m) \quad (3.7)$$

$$K_d = 2.5 \times 10^{-4} \cdot (1 + 50xf_m) \quad (3.8)$$

โดย Z_m คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ต้องการวัด มีหน่วยเป็น Ω

V_s คือ แรงดันของสัญญาณทดสอบ มีหน่วยเป็น mV_{rms}

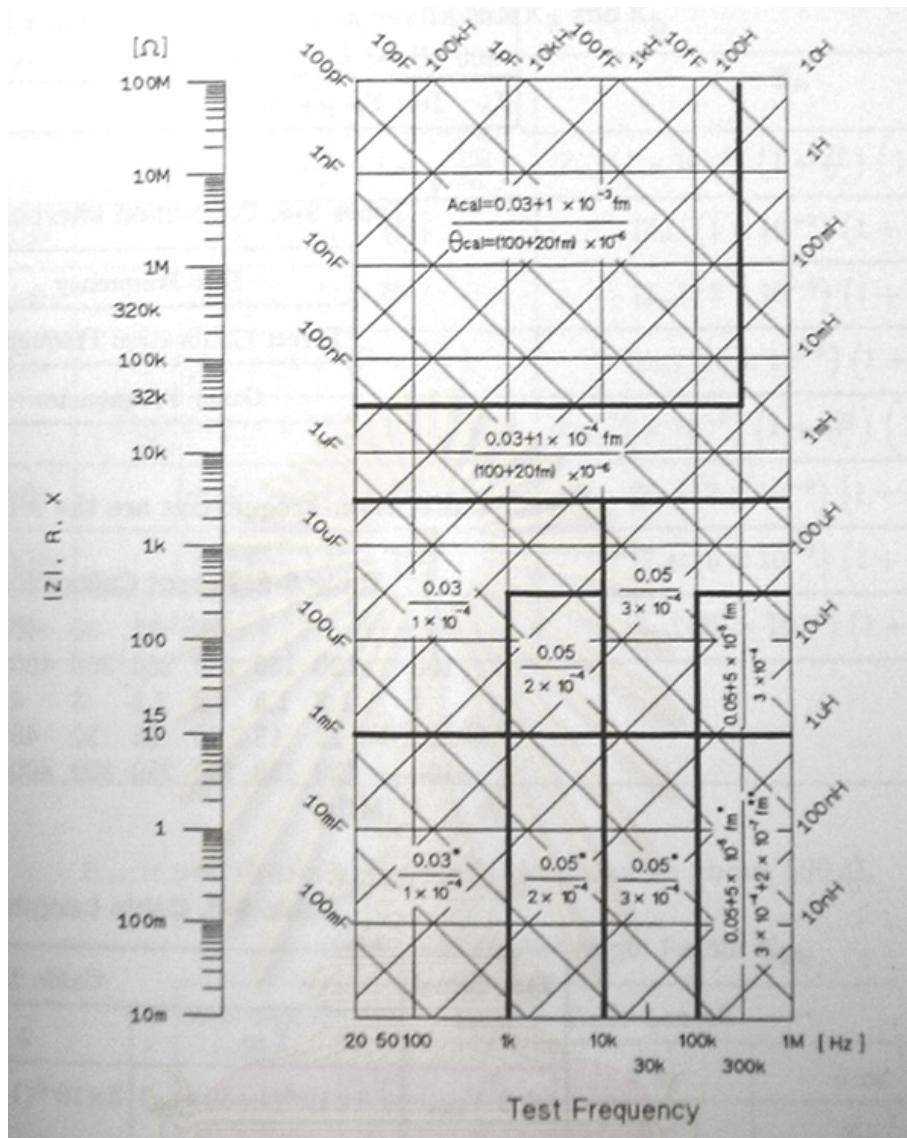
f_m คือ ความถี่ทดสอบ มีหน่วยเป็น mHz

K_e จะมีค่าเป็น 1 เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง $18^\circ - 28^\circ C$

2 เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง $28^\circ - 38^\circ C$

-ค่าความแม่นยำในการเปรียบเทียบ

สามารถหาได้จากรูปที่ 3.10 โดยขึ้นกับค่าความถี่ทดสอบ และค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ต้องการวัดใดๆ



รูปที่ 3.10 กราฟที่ใช้ในการหาค่าความแม่นยำในการปรับเทียบ



รูปที่ 3.11 HP 4284A PRECISION LCR METER

3.2.1.2 MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER

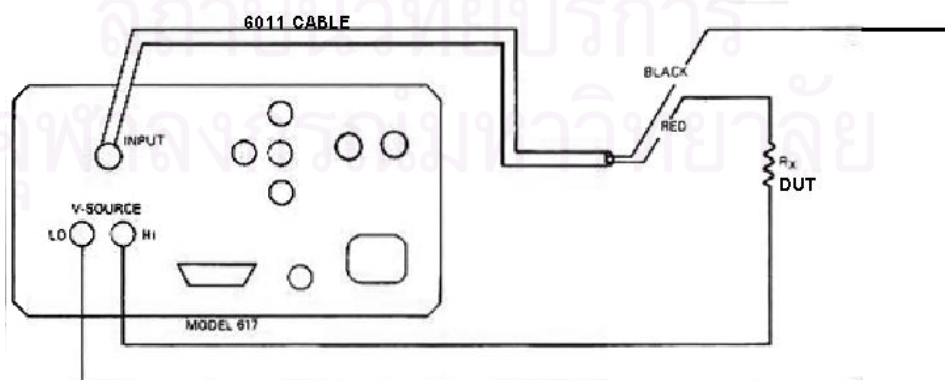
การหาค่าความแม่นยำของ ELECTROMETER สามารถหาได้จากตารางที่ 3.1 [11]

ตารางที่ 3.1 ค่าความแม่นยำของ MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER

RANGE	RESOLUTION	ACCURACY (1Yr.) 18° - 28°C ±(%rdg+counts)	TEMPERATURE COEFFICIENT 0°-18°C & 28°-50°C ±(%rdg+counts)	TEST CURRENT ±1.5%
2 kΩ	100 mΩ	0.20+4	0.01+3	100μA
20 kΩ	1 Ω	0.15+1	0.01+0.3	100μA
200 kΩ	10 Ω	0.25+1	0.01+0.3	10μA
2 MΩ	100 Ω	0.25+1	0.02+0.3	1μA
20 MΩ	1 kΩ	0.25+1	0.02+0.3	100nA
200 MΩ	10 kΩ	0.30+1	0.02+0.3	10nA
2 GΩ	100 kΩ	1.5+1	0.04+0.3	1nA
20 GΩ	1 MΩ	1.5+1	0.04+0.1	1nA
200 GΩ	10 MΩ	1.5+1	0.04+0.1	1nA

การวัดความต้านทานแบบ V/I

วิธีการวัดความต้านทานแบบนี้ใช้หลักการป้อนแรงดันเข้าไป แล้วทำการวัดกระแส นำค่าแรงดันหารด้วยกระแสเป็นความต้านทาน โดยวงจรที่ใช้ในการวัดเป็นดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของ ELECTROMETER

ประโยชน์ที่ได้จากการวัดความต้านทานโดยวิธีป้อนแรงดันคงที่แล้ววัดกระแส [11] คือ สามารถลดผลกระทบของความต้านทานรั่ว (Leakage resistance) และค่าความจุไฟฟ้ากระจาย (Distributed capacitance) ได้ ด้วยเหตุนี้เครื่องมือวัดจึงสามารถวัดได้ถึง $10^{16} \Omega$



รูปที่ 3.13 LECROY DIGITAL OSCILLOSCOPES 9384 SERIES

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด

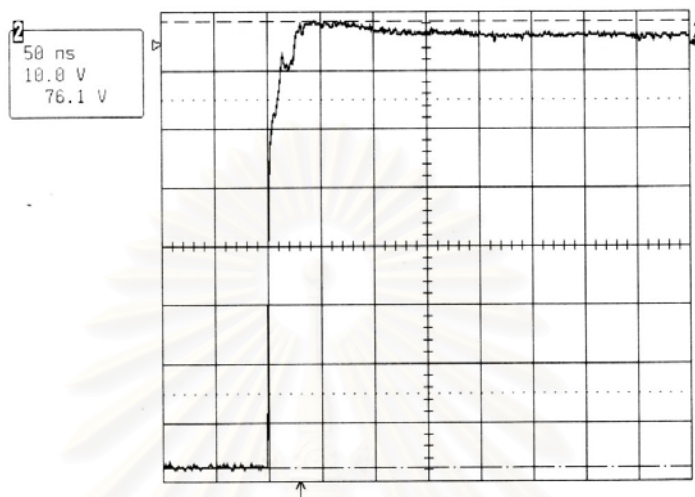
- 1) GROUND PLANE ขนาด 2m x 2m
- 2) LECROY DIGITAL OSCILLOSCOPES 9384 SERIES (รูปที่ 3.13)
- 3) HAFELY USG 40 UNIT STEP GENERATOR
- 4) RESPONSE TIME EVALUATION SOFTWARE (RTES)



รูปที่ 3.14 GROUND PLANE ขนาด 2m x 2m

3.2.2.1 HAFELY USG 40 UNIT STEP GENERATOR

มีแรงดันขาออก [12] $90 \pm 10V$ ใช้สวิตช์ประเภทปรอทเปียก (Mercury-wetted Relay) เป็นตัวตัดแรงดันลงดินด้วยความถี่ 50 Hz มีเวลาขาขึ้นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น 3.5 ns



รูปที่ 3.15 สัญญาณแรงดันหนึ่งหน่วยจาก HAFELY USG 40 UNIT STEP GENERATOR



รูปที่ 3.16 HAFELY USG 40 UNIT STEP GENERATOR

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

- 1) UNIVERSAL HIGH VOLTAGE REFERENCE DIVIDER
- 2) LECROY DIGITAL OSCILLOSCOPES 9384 SERIES (รูปที่ 3.13)

3.2.3.1 UNIVERSAL HIGH VOLTAGE REFERENCE DIVIDER

ดิไวเดอร์ข้างอิงนี้ใช้ในการสอบเทียบค่าตัวคูณกับดิไวเดอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างและค่าตัวคูณ ดังรูปที่ 3.17 [13]



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของ UNIVERSAL HIGH VOLTAGE REFERENCE DIVIDER

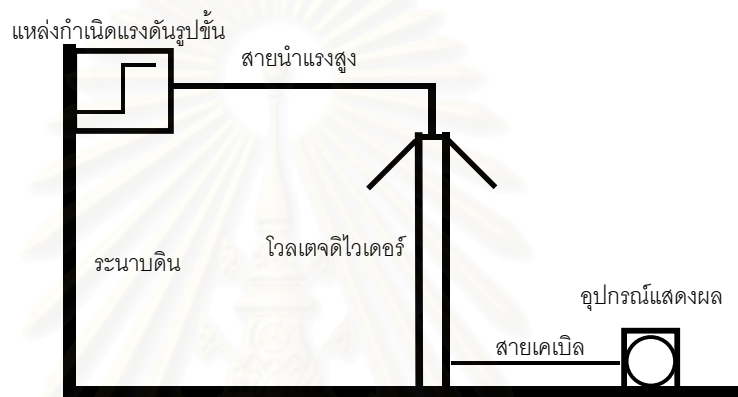
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบ และประเมินผล

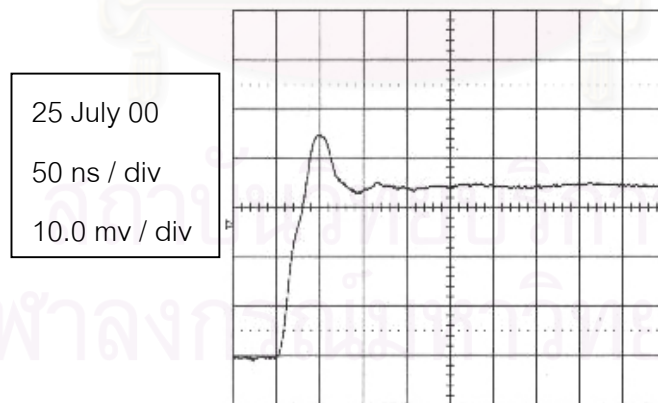
4.1 การทดลองหาค่าผลตอบสนองรูปขึ้น

วงจรที่ใช้ในการหาผลตอบสนองรูปขึ้นเป็นดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994)



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขึ้น

โดยสัญญาณรูปขึ้นกำเนิดมาจาก HAFELY USG 40 UNIT STEP GENERATOR ผลตอบสนองรูปขึ้นที่วัดได้โดยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัญญาณรูปขึ้นที่วัดได้จากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

$$T_{\alpha} = 14.03 \text{ ns} \quad \beta = 30.08 \% \quad T_N = 7.76 \text{ ns}$$

สัญญาณรูปขึ้นนี้เป็นสัญญาณที่วัดครั้งแรกก่อนเริ่มทำการทดลอง โดยสัญญาณรูปขึ้นที่วัดได้ไม่ได้ทำการควบคุมสภาวะแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง

4.2 การทดสอบหาค่าตัวคุณ

การหาค่าตัวคุณที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าตัวคุณทางทฤษฎี คือทำการวัดความต้านทานแต่ละองค์ประกอบของระบบวัด แล้วทำการคำนวณหาตัวคุณ (F_R) จากสมการที่ 4.1

$$F_R = \left(\frac{R_d + R_1}{R_2} + 1 \right) \times \left(\frac{R_3 + R_c}{R_4} + 1 \right) \quad (4.1)$$

โดย

$$R_2^* = \frac{R_2 \times (R_c + R_3 + R_4^*)}{R_2 + R_c + R_3 + R_4^*}$$

$$R_4^* = \frac{R_4 \times R_{osc}}{R_4 + R_{osc}}$$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.1 ในการวัดใช้เครื่อง HP 4284A PRECISION LCR METER วัดค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ ตัวลวดทอง ความต้านทานหน่วง และสายเคเบิลที่ความถี่ 10 kHz เป็นจำนวน 20 ครั้ง และใช้เครื่อง MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER วัดค่าความต้านทานภาคแรงสูง โดยทำการป้อนแรงดันเข้า 10 V แล้วทำการวัดค่ากระแส นำมาหาค่าความต้านทาน เป็นจำนวน 20 ครั้ง สาเหตุที่ใช้ค่าแรงดันขาเข้า 10 V เนื่องจากพิกัดกระแสของเครื่องวัด โดยค่ากระแสที่วัดได้ที่แรงดันขาเข้า 10 V มีค่าประมาณ 1.44 mA ซึ่งยังไม่เกินค่าพิกัดกระแสของเครื่องวัด แต่หากใช้ค่าแรงดันต่ำเกินไปเป็นแรงดันขาเข้า จะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอกได้ง่าย ซึ่งมีผลให้การวัดยากลำบากขึ้น ในการวัดที่แรงดันต่างกันต้องใช้ค่าตัวคุณ VOLTAGE COEFFICIENT เทียบในระดับแรงดันเดียวกันอีกด้วย

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานขององค์ประกอบต่างๆของระบบวัด

ความต้านทาน	ค่าความต้านทาน (Ω)	ค่าความไม่แน่นอน (%)
ความต้านทานหน่วง (R_d)	276.115 *	0.997
ความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์ (R_1)	6.912×10^3	0.211
ความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ (R_2)	7.336	0.147
ความต้านทานภาคแรงสูงของตัวลวดทอง (R_3)	46.08	0.397
ความต้านทานภาคแรงต่ำของตัวลวดทอง (R_4)	4.101	0.492
ความต้านทานสายเคเบิล (R_c)	0.107	0.197
ความต้านทานออกซิลโลสโคป (R_{osc})	1 M Ω COUPLING MODE	

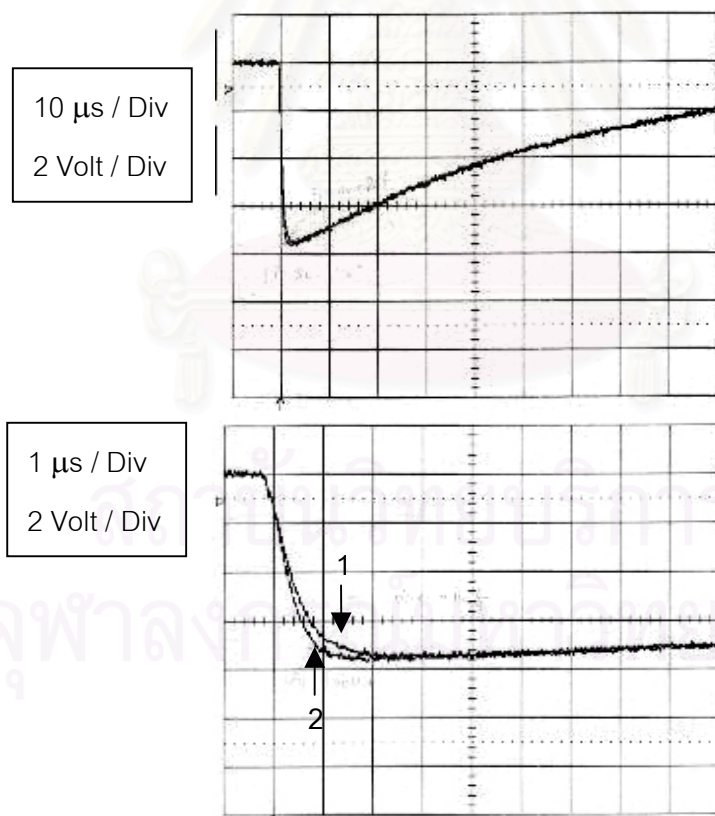
หมายเหตุ * ค่าที่วัดได้เป็นความต้านทานเมื่อทำการช่อมความต้านทานหน่วงเรียบร้อยแล้ว (เนื่องจากแรงทางกลทำให้ท่อพลาสติกใส่ที่พันลวดความต้านทานหัก จึงใช้ท่ออะคริลิคซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่ามากในการพันลวดความต้านทานแทน) หรือคือค่าความต้านทานที่อาทิติยที่ 21 นั่นเอง

จากค่าความต้านทานที่วัดได้นำมาหาตัวคูณตามสมการ 4.1) มีค่า 13778.7
 ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทาน และผลตอบสนองรูปขึ้นก่อน และหลังซ่อมความต้านทานหน่วย

ความต้านทานหน่วย	ค่าความต้านทาน (Ω)	T_α (ns)	$\beta\%$	T_N (ns)
ก่อนซ่อม	276.115	6.85	31.22	3.17
หลังซ่อม	276.110	6.63	33.95	2.98

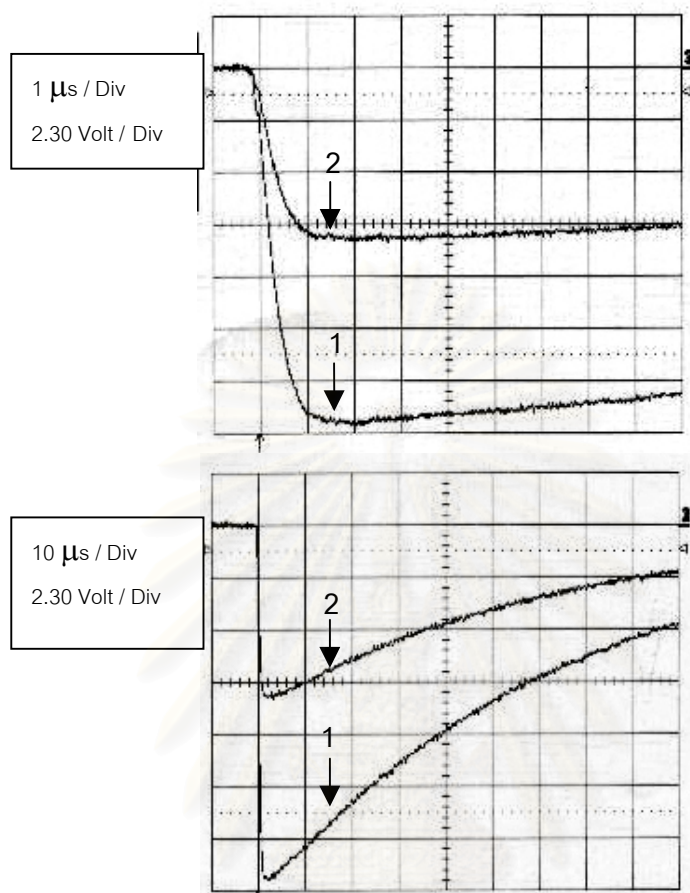
4.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ทำการเปรียบเทียบกับ ยูนิเวอร์ซอล ดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐาน ซึ่งมีค่าตัวคูณ 6629.53 ผู้วิจัยได้ทำการวัดสัญญาณของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขณะที่ยังไม่ได้อัด และขณะต่อกับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐาน รูปสัญญาณที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่าเวลาหน้าคลื่นของสัญญาณขณะที่ต่อกับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐานจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ต่อ เนื่องจากมียูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐานต่อขนานเข้าไปด้วย เวลาหน้าคลื่นจึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.3 สัญญาณที่วัดได้กรณีที่ไม่ต่อ และต่อยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐาน สัญญาณเบอร์ 1 แสดงสัญญาณที่วัดได้กรณีสต่อยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐาน สัญญาณเบอร์ 2 แสดงสัญญาณที่วัดได้กรณีที่ไม่ต่อยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐาน

ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ได้จากการวัดด้วยยูนิเวอร์ซอลดิโวลเตอร์แรงดันสูงมาตรฐาน และอิมพัลส์โวลเตจดิโวลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่ได้จากการวัดด้วยยูนิเวอร์ซอลดิโวลเตอร์แรงดันสูงมาตรฐาน และอิมพัลส์โวลเตจดิโวลเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

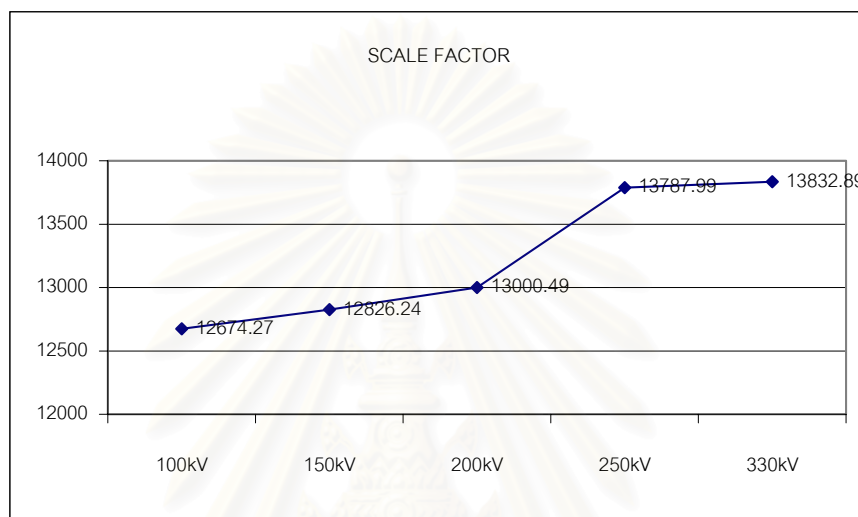
สัญญาณเบอร์ 1 เป็นสัญญาณที่วัดได้จาก UNIVERSAL HIGH VOLTAGE REFERENCE DIVIDER

สัญญาณเบอร์ 2 เป็นสัญญาณที่วัดได้จาก 300 kV REFERENCE IMPULSE VOLTAGE DIVIDER ที่ใช้ในงานวิจัย

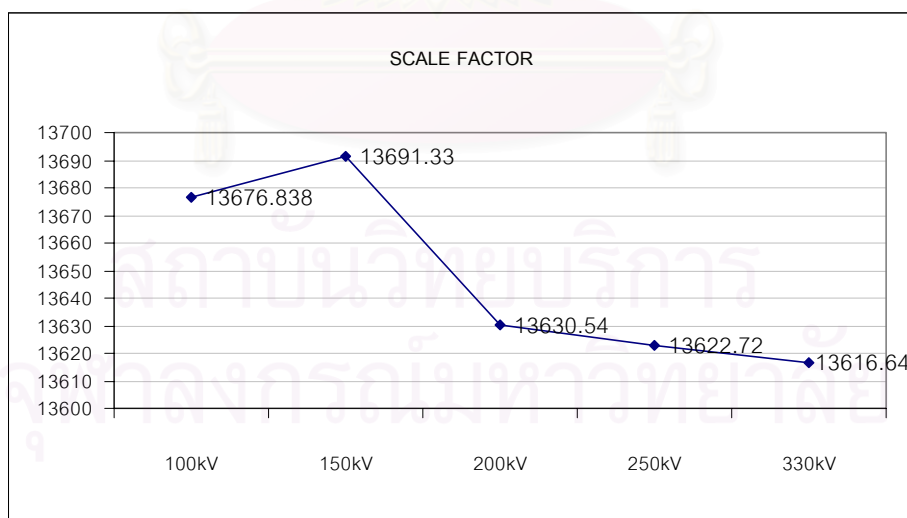
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้น 3 ครั้ง โดยวันที่ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยแต่ละครั้งจะป้อนแรงดัน 5 ระดับคือ 100, 150, 200, 250 และ 330 กิโลโวลต์ ระดับละ 20 ครั้ง ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นทั้ง 3 ครั้ง

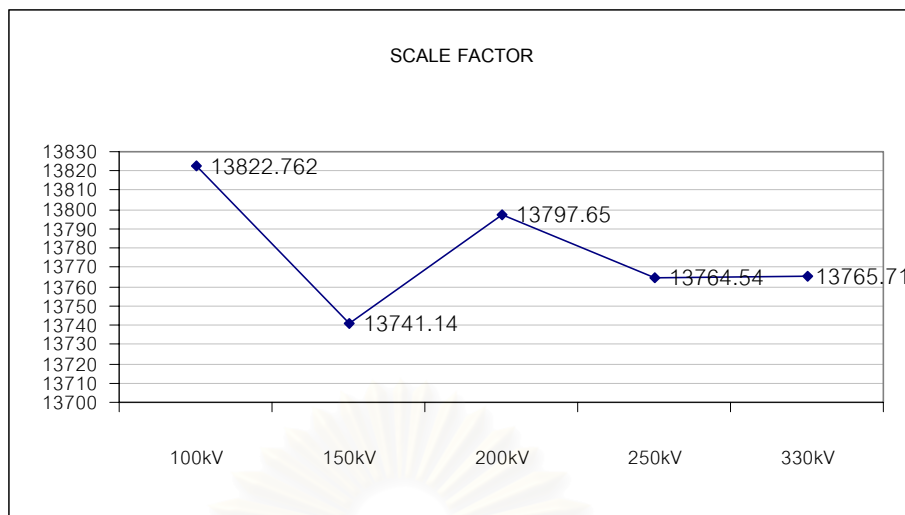
การทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่	วันที่ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้น
1	21 มิถุนายน 2544
2	25 กุมภาพันธ์ 2545
3	11 กันยายน 2545



รูปที่ 4.5 ตัวคูณของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์
ที่หาได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 1



รูปที่ 4.6 ตัวคูณของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์
ที่หาได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 2



รูปที่ 4.7 ตัวคูณของอิมพัลส์โวลต์จดีโวลต์เรออ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์
ที่หาได้จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 3

จากผลการทดสอบทั้งสามครั้งจะเห็นได้ว่า ครั้งแรกนั้นตัวคูณจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก ในการวัดสัญญาณจาก UNIVERSAL HIGH VOLTAGE REFERENCE DIVIDER กับ โวลต์จดีโวลต์เรอที่ใช้ในงานวิจัย มีอัตราการขยายของสัญญาณ (Volt/Div) แต่ช่องสัญญาณไม่เท่ากันเวลานำมาหาตัวคูณจึงมีความผิดพลาดเนื่องจากความแม่นยำของอัตราขยายที่แตกต่างกัน จะไม่เท่ากัน ส่วนครั้งที่สอง และสามนั้น วัดโดยใช้อัตราขยายของสัญญาณจากโวลต์จดีโวลต์เรอทั้งสองที่เท่ากัน ตัวคูณที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละระดับแรงดันเปรียบเทียบได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำการคำนวณ พบว่าการทดสอบครั้งแรกมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถึง 547.54 แต่ครั้งที่สองมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 34.04 และครั้งที่สามซึ่งเป็นการทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังจากการทดสอบเสถียรภาพระยะยาวเป็นเวลา 52 สัปดาห์เรียบร้อยแล้วมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 31.94 เท่านั้น จากการทดสอบครั้งที่สองพบว่าตัวคูณจะมีค่าอยู่ในช่วง -0.23% ถึง $+0.32\%$ ของค่าเฉลี่ยของตัวคูณทั้ง 5 ค่า และจากการทดสอบครั้งที่สามพบว่าตัวคูณจะมีค่าอยู่ในช่วง -0.27% ถึง $+0.32\%$ ของค่าเฉลี่ยของตัวคูณทั้ง 5 ค่า จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าตัวคูณในแต่ละระดับแรงดันยังอยู่ในช่วง -1% ถึง $+1\%$ ของค่าเฉลี่ยของตัวคูณทั้ง 5 ค่า สามารถสรุปได้ว่าโวลต์จดีโวลต์เรอในงานวิจัยมีความเป็นเชิงเส้นตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994)

ค่าเฉลี่ยของตัวคูณ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวคูณ และช่วงของตัวคูณเทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวคูณแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวคุณ, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวคุณ และช่วงของค่าตัวคุณเทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวคุณ

การทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่	ค่าเฉลี่ยของตัวคุณ	S.D.ของตัวคุณ	ช่วงของตัวคุณ
1	13224.38	547.54	-4.16% ถึง 4.60%
2	13647.61	34.04	-0.23% ถึง 0.32%
3	13778.36	31.94	-0.27% ถึง 0.32%

4.4 การทดสอบเสถียรภาพระยะยาว (Long term stability test)

ในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว ทำการทดสอบโดยทำการป้อนอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม 5 ระดับแรงดันด้วยกัน คือ 100, 150, 200, 250 และ 330 กิโลโวลต์ (แรงดัน 330 กิโลโวลต์คิดเป็น 110% ของแรงดันพิกัดของอิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย) จำนวนระดับละ 20 ครั้ง หลังจากทำการยิงอิมพัลส์เสร็จแล้ว ทำการวัดค่าความต้านทานของแต่ละองค์ประกอบของอิมพัลส์โวลเตจดีโวลเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย จำนวน 20 ครั้งในแต่ละองค์ประกอบ โดยใช้เครื่องวัด HP 4284A PRECISION LCR METER ใช้วัดค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ ตัวลวดทอง ความต้านทานหน่วง และสายเคเบิล โดยใช้ความถี่ 10 kHz และ ใช้เครื่อง MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER ใช้วัดค่าความต้านทานภาคแรงสูง โดยทำการป้อนแรงดันเข้า 10 โวลต์ แล้วทำการวัดค่ากระแส นำมาหาค่าความต้านทาน จากนั้นนำค่าความต้านทานขององค์ประกอบต่างๆมาหาตัวคุณ ส่วนค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดนั้นต้องหา 2 ค่าด้วยคือ ความไม่แน่นอนที่เป็นระบบ ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้วิธีคำนวณในบทที่ 3 ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้วัด และค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม โดยค่า t จะหาได้จากตารางที่ 2.1 ที่ Confidence level (P) 95% และจำนวนครั้งในการวัด (N) 20 ครั้ง ซึ่งจะหาค่า t ได้ 2.09 แล้วนำค่า t ไปใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เป็นแบบสุ่มได้ ทำการบันทึกค่าความต้านทาน ตัวคุณ และค่าความไม่แน่นอน ทำเช่นนี้เป็นเวลา 52 สัปดาห์ โดยตารางเวลาที่ทำการวิจัยจะประกอบด้วย วันที่ทำการยิงแรงดันอิมพัลส์ และวันที่ทำการวัดค่าความต้านทานซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เวลาในการทดสอบเสถียรภาพพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเซอร์

NO.	อาทิตย์ที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์	วันที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์	วันที่ทำการวัดค่าความต้านทานแต่ละองค์ประกอบ
1	11-17 มิ.ย. 44	21 มิถุนายน 2544	-
2	18-24 มิ.ย. 44	X	X
3	25 มิ.ย. - 1 ก.ค. 44	29 มิถุนายน 2544	30 มิถุนายน 2544
4	2-8 ก.ค. 44	4 กรกฎาคม 2544	10 กรกฎาคม 2544
5	9-15 ก.ค. 44	11 กรกฎาคม 2544	17 กรกฎาคม 2544
6	16-22 ก.ค. 44	X	X
7	23-29 ก.ค. 44	23 กรกฎาคม 2544	24 กรกฎาคม 2544
8	30 ก.ค. - 5 ส.ค. 44	30 กรกฎาคม 2544	31 กรกฎาคม 2544
9	6-12 ส.ค. 44	7 สิงหาคม 2544	10 สิงหาคม 2544
10	13-19 ส.ค. 44	14 สิงหาคม 2544	15 สิงหาคม 2544
11	20-26 ส.ค. 44	24 สิงหาคม 2544	29 สิงหาคม 2544
12	27 ส.ค. - 2 ก.ย. 44	31 สิงหาคม 2544	3 กันยายน 2544
13	3-9 ก.ย. 44	X	X
14	10-16 ก.ย. 44	11 กันยายน 2544	11 กันยายน 2544
15	17-23 ก.ย. 44	17 กันยายน 2544	20 กันยายน 2544
16	24-30 ก.ย. 44	27 กันยายน 2544	28 กันยายน 2544
17	1-7 ต.ค. 44	2 ตุลาคม 2544	3 ตุลาคม 2544
18	8-14 ต.ค. 44	11 ตุลาคม 2544	15 ตุลาคม 2544
19	15-21 ต.ค. 44	X	X
20	22-28 ต.ค. 44	22 ตุลาคม 2544	25 ตุลาคม 2544
21	29 ต.ค. - 4 พ.ย. 44	30 ตุลาคม 2544	2 พฤศจิกายน 2544
22	5-11 พ.ย. 44	6 พฤศจิกายน 2544	9 พฤศจิกายน 2544
23	12-18 พ.ย. 44	12 พฤศจิกายน 2544	14 พฤศจิกายน 2544
24	19-25 พ.ย. 44	23 พฤศจิกายน 2544	26 พฤศจิกายน 2544
25	26 พ.ย. - 2 ธ.ค. 44	27 พฤศจิกายน 2544	28 พฤศจิกายน 2544
26	3-9 ธ.ค. 44	3 ธันวาคม 2544	4 ธันวาคม 2544

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) เวลาในการทดสอบเสถียรภาพพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีวีเดอร์

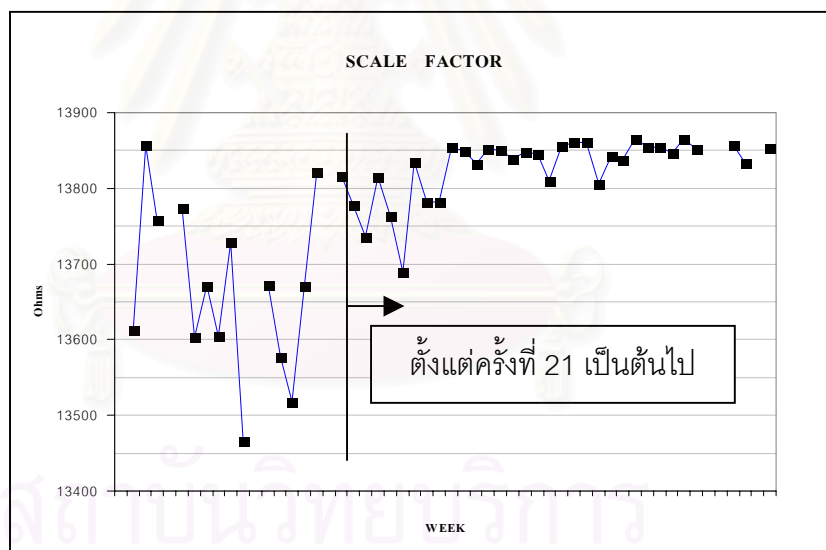
NO.	อาทิตย์ที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์	วันที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์	วันที่ทำการวัดค่าความต้านทานแต่ละองค์ประกอบ
27	10-16 ธ.ค. 44	12 ธันวาคม 2544	17 ธันวาคม 2544
28	17-23 ธ.ค. 44	16 ธันวาคม 2544	19 ธันวาคม 2544
29	24-30 ธ.ค. 44	24 ธันวาคม 2544	26 ธันวาคม 2544
30	31 ธ.ค. 44 - 6 ม.ค. 45	2 มกราคม 2545	3 มกราคม 2545
31	7-13 ม.ค. 45	8 มกราคม 2545	9 มกราคม 2545
32	14-20 ม.ค. 45	15 มกราคม 2545	16 มกราคม 2545
33	21-27 ม.ค. 45	22 มกราคม 2545	24 มกราคม 2545
34	28 ม.ค. - 3 ก.พ. 45	30 มกราคม 2545	7 กุมภาพันธ์ 2545
35	4-10 ก.พ. 45	5 กุมภาพันธ์ 2545	7 กุมภาพันธ์ 2545
36	11-17 ก.พ. 45	11 กุมภาพันธ์ 2545	12 กุมภาพันธ์ 2545
37	18-24 ก.พ. 45	21 กุมภาพันธ์ 2545	22 กุมภาพันธ์ 2545
38	25 ก.พ. - 3 มี.ค. 45	25 กุมภาพันธ์ 2545	27 กุมภาพันธ์ 2545
39	4-10 มี.ค. 45	6 มีนาคม 2545	8 มีนาคม 2545
40	11-17 มี.ค. 45	12 มีนาคม 2545	14 มีนาคม 2545
41	18-24 มี.ค. 45	18 มีนาคม 2545	21 มีนาคม 2545
42	25-31 มี.ค. 45	25 มีนาคม 2545	28 มีนาคม 2545
43	1-7 เม.ย. 45	1 เมษายน 2545	3 เมษายน 2545
44	8-14 เม.ย. 45	9 เมษายน 2545	12 เมษายน 2545
45	15-21 เม.ย. 45	18 เมษายน 2545	22 เมษายน 2545
46	22-28 เม.ย. 45	24 เมษายน 2545	25 เมษายน 2545
47	29 เม.ย. - 5 พ.ค. 45	X	X
48	6-12 พ.ค. 45	X	X
49	13-19 พ.ค. 45	13 พฤษภาคม 2545	16 พฤษภาคม 2545
50	20-26 พ.ค. 45	22 พฤษภาคม 2545	23 พฤษภาคม 2545
51	27 พ.ค. - 2 มิ.ย. 45	X	X
52	3-9 มิ.ย. 45	5 มิถุนายน 2545	12 มิถุนายน 2545

หมายเหตุ เครื่องหมายxในตารางหมายถึง ในอาทิตย์นั้นๆมีการทดสอบของศูนย์เชี่ยวชาญ หรือมีฝนตกตลอดอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเสถียรภาพพระยะยาวชุดเซยดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เวลาในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาวของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ชุดเซช

NO.	ชุดเซชอาทิตย์ที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์	วันที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์	วันที่ทำการวัดค่าความต้านทานแต่ละองค์ประกอบ
1	18-24 มิ.ย. 44	7 ธันวาคม 2544	11 ธันวาคม 2544
2	16-22 ก.ค. 44	11 มกราคม 2545	15 มกราคม 2545
3	3-9 ก.ย. 44	15 กุมภาพันธ์ 2545	19 กุมภาพันธ์ 2545

เนื่องจากการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว ความต้านทานหม้อแปลงได้เสียหายเนื่องจากแรงทางกล โดยท่อพลาสติกใสที่ใช้พันขดลวดความต้านทานเกิดหักขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนชนิดของท่อเป็นอะคริลิก และเริ่มทดสอบต่อในครั้งที่ 21 จึงใช้ตัวคูณของครั้งที่ 21 ซึ่งมีค่า 13778.7 ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเสถียรภาพระยะยาว ผลการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าตัวคูณที่คำนวณได้แต่ละสัปดาห์ในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว

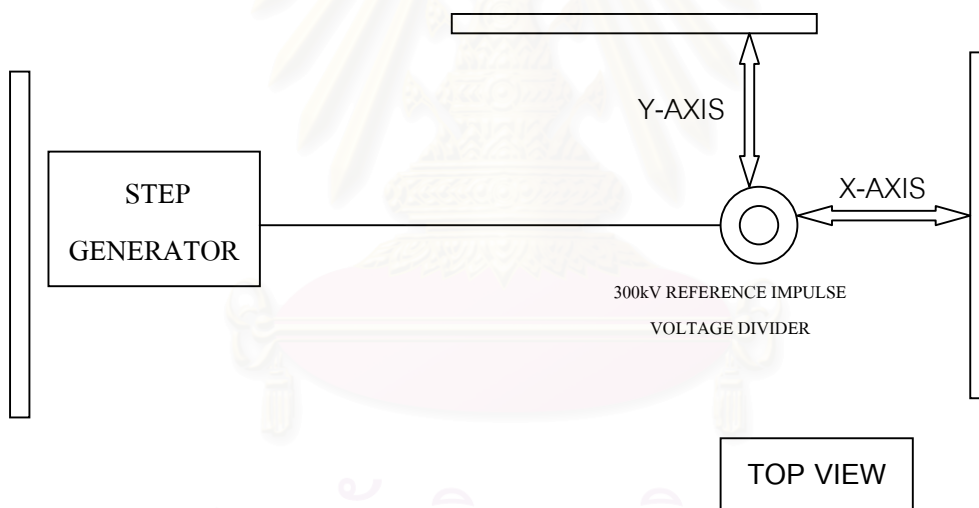
จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าตัวคูณที่ได้แต่ละอาทิตย์มีความแตกต่างจากครั้งที่ 21 อยู่ -0.65% ถึง +0.63% จากผลการทดสอบพบว่าตัวคูณยังอยู่ในช่วงที่มาตราฐาน IEC 60060-2 (1994) กำหนด คือ ค่าตัวคูณต้องเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 1% ดังนั้นอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ ผ่านการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว ตัวคูณที่คำนวณแล้วมีการเปลี่ยนแปลงมีผลมาจาก หน้าสัมผัสของอุปกรณ์วัดกับความต้านทานที่วัดไม่แนบสนิทเพียงพอ ส่วนเรื่องของอุณหภูมิในการวัดที่เปลี่ยนไปในแต่ละครั้ง ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขโดยยึดถืออุณหภูมิมาตรฐาน

IEC คือ 20 องศาเซลเซียส และทำการแก้ไขค่าความต้านทานด้วยสัมประสิทธิ์แก้ไขอุณหภูมิ (Temperature Coefficient) ก่อนจะนำค่าความต้านทานมาคำนวณเป็นตัวคูณ ส่วนเรื่องของแรงดันที่ป้อนเข้าไปในความต้านทานเพื่อวัดกระแส แล้วนำมาหาค่าความต้านทานนั้น ผู้วิจัยได้ควบคุมโดยป้อนแรงดันคงที่ในการทดสอบแต่ละครั้ง เพื่อไม่ให้ผลกระทบจากระดับแรงดันที่ต่างกัน ไม่เช่นนั้นต้องใช้สัมประสิทธิ์แก้แรงดัน (Voltage Coefficient) ในการหาค่าความต้านทานที่ระดับแรงดันมาตรฐานเดียวกันด้วย

4.5 การทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิด

4.5.1 การทดสอบผลกระทบเนื่องจากผลของระนาบดินที่ระยะต่างๆ

ในการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิด ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของระยะของระนาบดินที่ส่งผลต่อสัญญาณที่วัดได้ โดยแบ่งเป็น 2 แกน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของระนาบดินที่ทำการวิจัย

ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ทำการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิด

การทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิดครั้งที่	วันที่ทำการทดสอบ
1	19 เมษายน 2544
2	24 ตุลาคม 2544
3	18 มกราคม 2545
4	17 เมษายน 2545

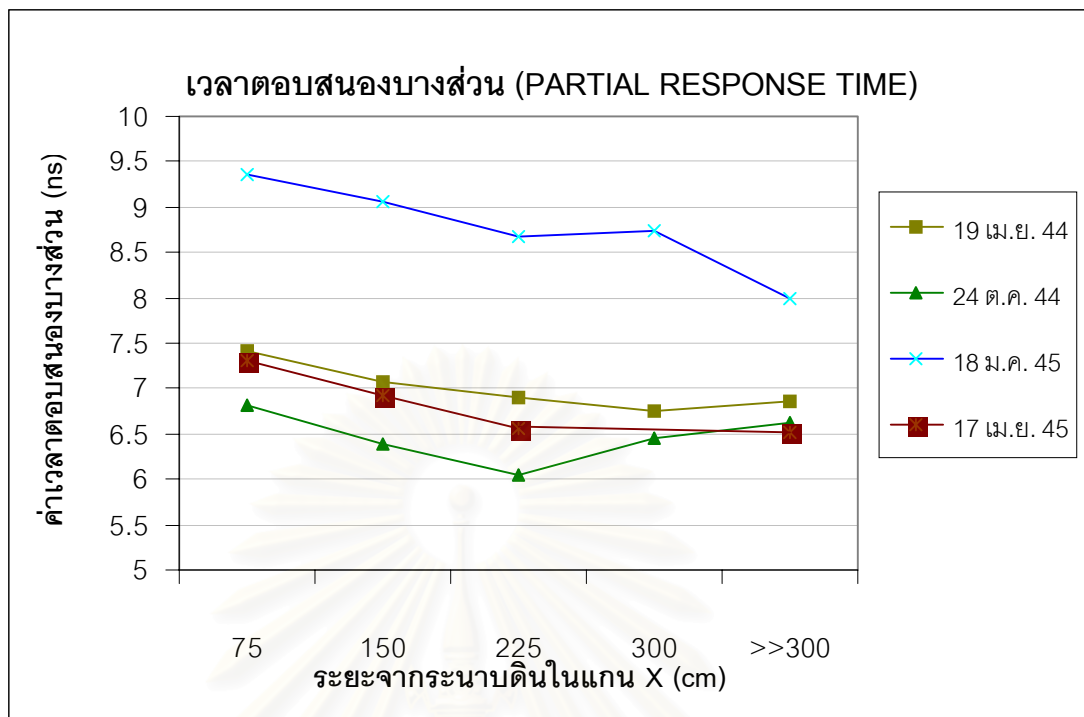
หมายเหตุ เวลาที่ทำการทดสอบขึ้นอยู่กับสถานที่ว่างที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากห้องปฏิบัติการมีงานทดสอบอย่างสม่ำเสมอ ผู้วิจัยจึงสามารถทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิดได้ดังวันที่ได้แสดงไว้ในตารางนี้ ซึ่งเป็นวันที่มีพื้นที่ในการทดสอบเพียงพอ

การทดสอบกระทำโดยนำระนาบดินที่ใช้ในงานวิจัย นำมาตั้งไว้ที่ระยะห่างจากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ 4 ระยะด้วยกันคือ ที่ระยะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความสูงของดีไวเดอร์มีค่า 75 เซนติเมตร ที่ระยะเท่ากับความสูงของดีไวเดอร์มีค่า 150 เซนติเมตร ที่ระยะ 1.5 เท่าของความสูงของดีไวเดอร์มีค่า 225 เซนติเมตร และที่ระยะ 2 เท่าของความสูงดีไวเดอร์มีค่า 300 เซนติเมตร โดยในการทดสอบครั้งสุดท้าย พื้นที่ในการทดสอบไม่เพียงพอจึงทดสอบได้เพียงแค่ระยะ 1.5 เท่าของความสูงของดีไวเดอร์เท่านั้น

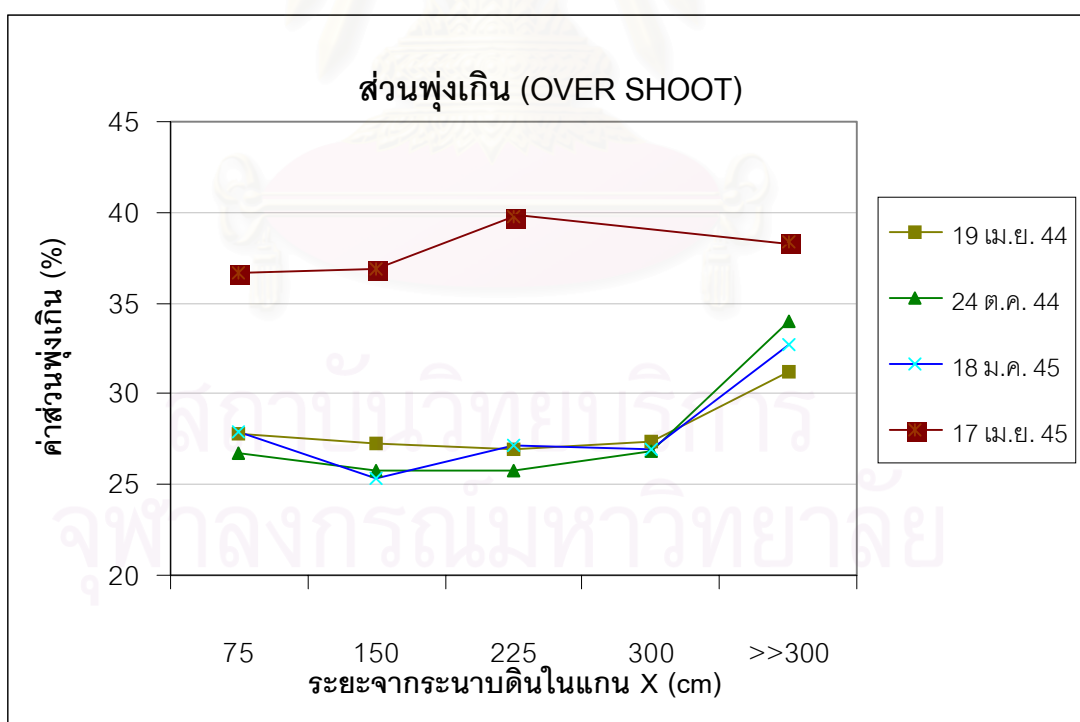
การศึกษาผลของระนาบดินเนื่องจาก เป็นการจำลองกรณีที่เกิดการวัดสัญญาณแล้วมีวัตถุอยู่ใกล้กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เกิดตัวเก็บประจุสเตรกชันขึ้นระหว่างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์กับวัตถุนั้นๆ ซึ่งส่งผลต่อค่าเวลาตอบสนองของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์

ผู้วิจัยจะทำการศึกษาผลของระนาบดินในแกน X ก่อน ผลของระยะของระนาบดินที่มีต่อค่าเวลาตอบสนองบางส่วน ค่าส่วนพุ่งเกิน และค่าเวลาตอบสนองแสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12

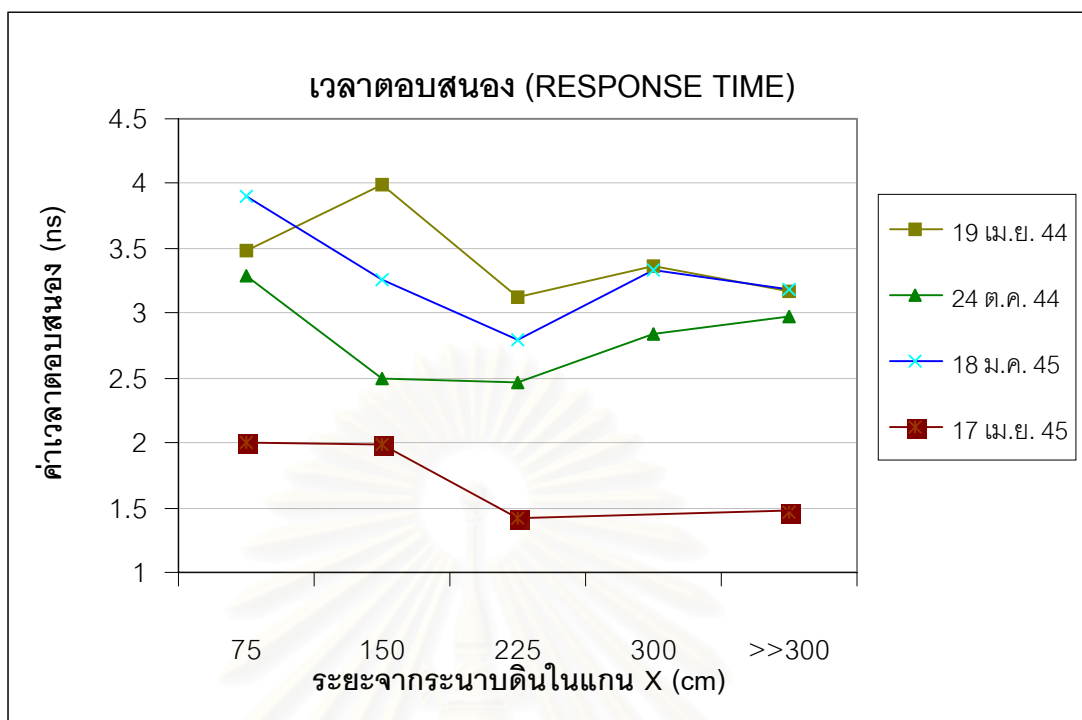
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนองบางส่วน
กับระยะห่างของระนาบดินในแกน X



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนพุ่งเกิน กับระยะห่างของระนาบดินในแกน X

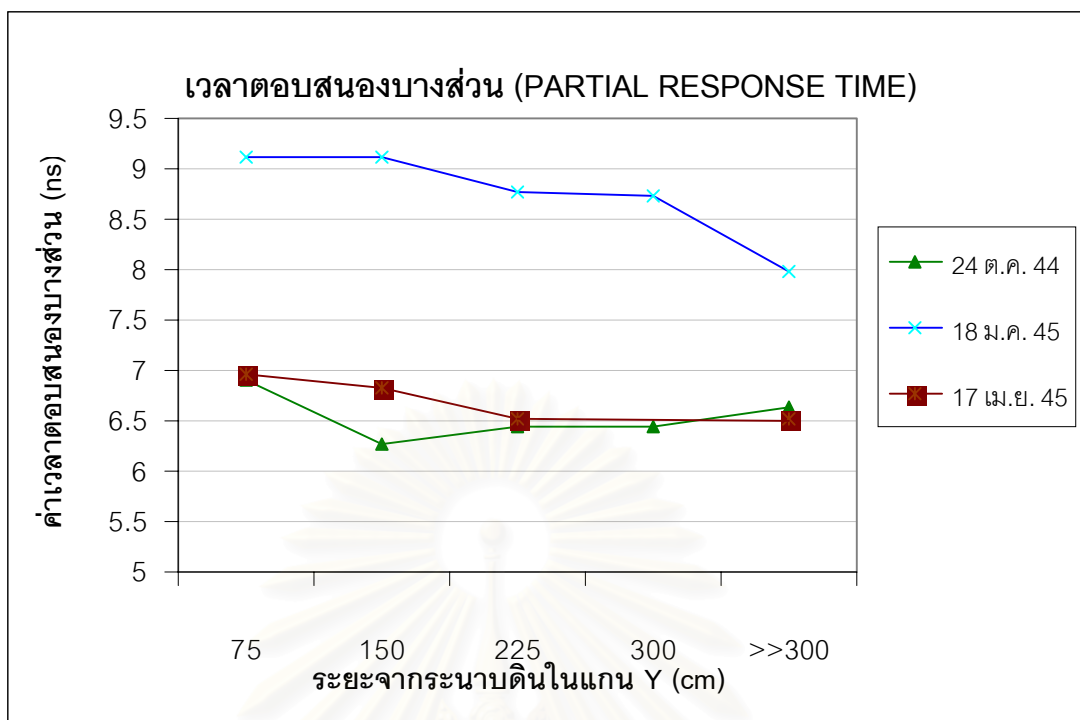


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาตอบสนอง กับระยะห่างของระนาบดินในแกน X

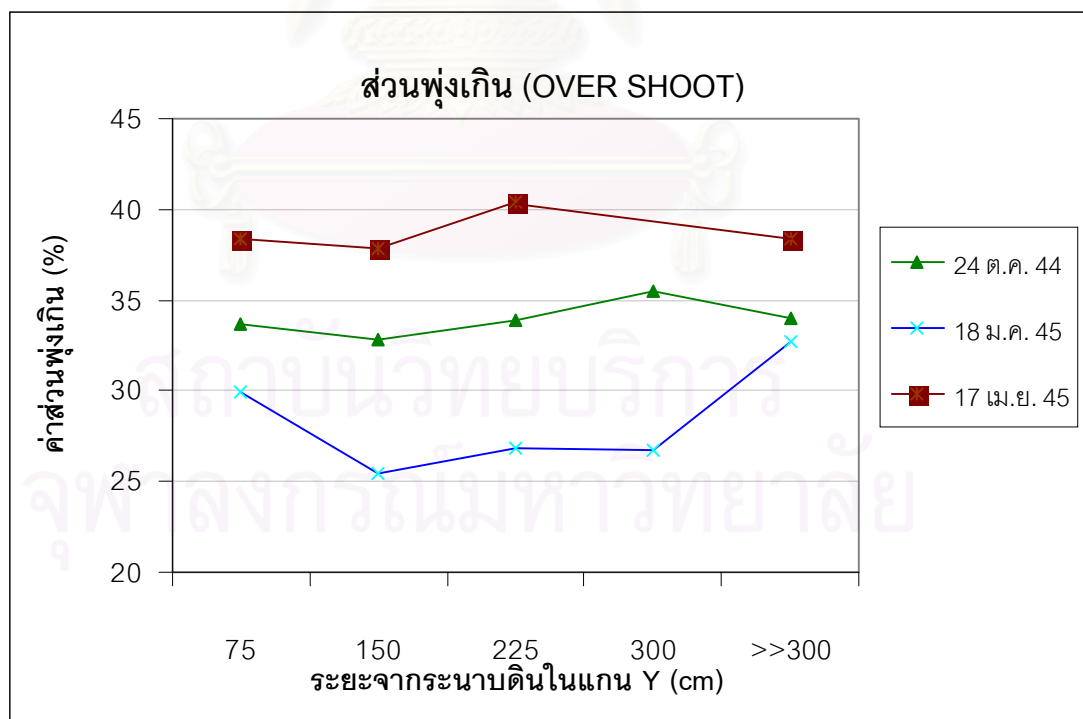
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของเวลาตอบสนองบางส่วน และ เวลาตอบสนองมีค่ามากอย่างเห็นได้ชัดในช่วงระยะห่างครึ่งหนึ่งของความสูงของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ เนื่องจากบริเวณอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์จะมีความเครียดสนามไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้มีผลค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์มากขึ้น จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์มากขึ้นค่าเวลาตอบสนองก็จะเพิ่มขึ้นด้วย หลังจากเพิ่มระยะระนาบดิน ค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และ เวลาตอบสนองจะค่อยๆลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงไป ส่วนค่าส่วนพุ่งเกินมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะระนาบดินที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระยะห่างระนาบดิน และอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ห่างกันมากๆ (>>300 cm)

จากข้อมูลที่ได้จะสังเกตเห็นว่าถ้าระนาบดินเข้าใกล้อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มากๆจะส่งผลให้ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนมีค่ามาก และค่าส่วนพุ่งเกินมีค่าลดลง เป็นช่วงที่ต้องพึงระวังเพราะว่าอาจทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง % Beta และ T_{α}/T_1 หลุดช่วงที่มาตรฐานแนะนำในรูปที่ 2.6 ได้ ดังนั้นในการวัดใดๆ ไม่ควรมีวัตถุใกล้กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มากเกินไป

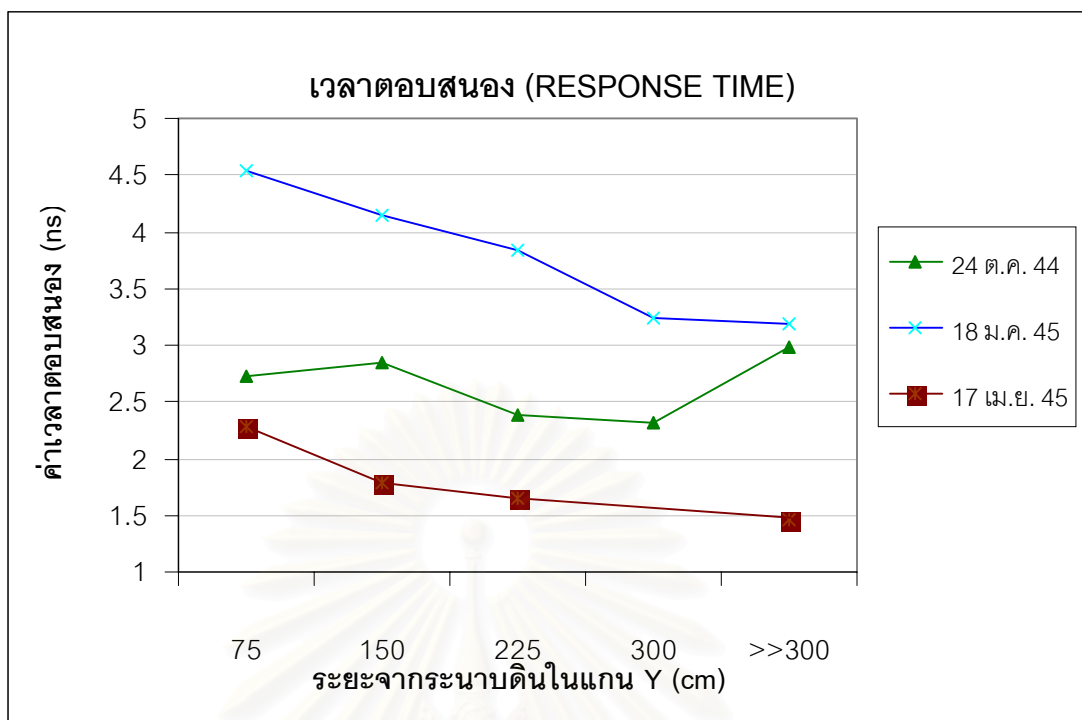
ผลของระนาบดินในแกน Y ที่มีต่อเวลาตอบสนองบางส่วน ค่าส่วนพุ่งเกิน และค่าเวลาตอบสนองแสดงดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนองบางส่วน
กับระยะห่างของระนาบดินในแกน Y



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนพุ่งเกิน กับระยะห่างของระนาบดินในแกน Y



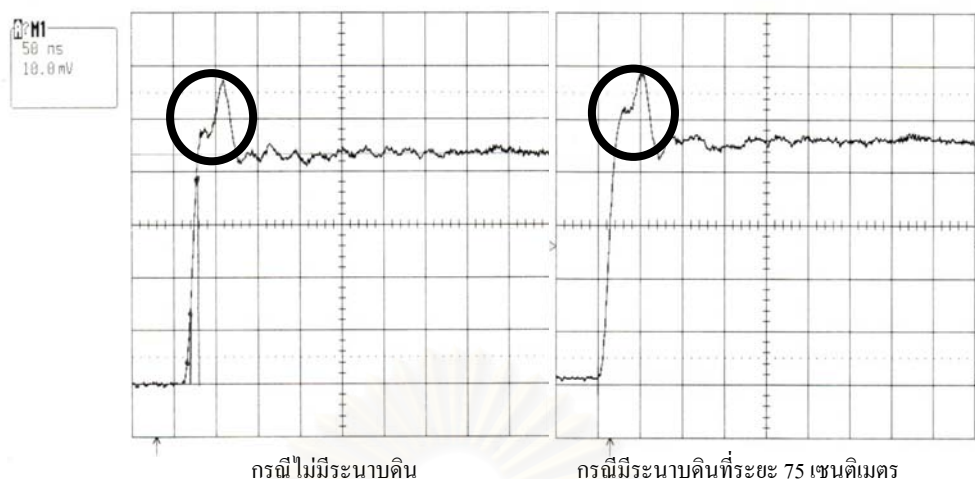
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาตอบสนอง กับระยะห่างของระนาบดินในแกน Y

จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และ เวลาตอบสนองเมื่อระนาบดินอยู่ในแกน Y จะมีแนวโน้มเหมือนกับแกน X คือ มีค่ามากที่ระยะ 75 เซนติเมตร และค่อยๆลดลงตามระยะห่างระหว่างระนาบดินกับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์เพิ่มขึ้น

ส่วนค่าส่วนพุ่งเกิน มีแนวโน้มที่ลดลงตามระยะระนาบดินที่เพิ่มขึ้นจนถึงระยะ 150 เซนติเมตรจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

จากผลการทดสอบทั้งแกน X และแกน Y จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเวลาตอบสนองในครั้งที่ 1 ถึง 3 จะมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 2.5-4 ns แต่ครั้งที่ 4 ค่าเวลาตอบสนองจะน้อยกว่าครั้งอื่น เนื่องจากการจัดระบบสายกราวนีย์ให้อยู่ใกล้กับอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และพยายามกำจัดวงรอบกราวนีย์ให้เหลือน้อยที่สุด ค่าเวลาตอบสนองจะเหลือเพียง 1.5-2.5 ns เท่านั้น

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้ ที่ระยะห่างของระนาบดิน 225 เซนติเมตร จากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์จะเป็นระยะที่ค่าเวลาผลตอบสนองบางส่วน และค่าเวลาตอบสนองมีค่าน้อย และเริ่มมีค่าคงที่ ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อเพิ่มระยะของระนาบดินขึ้นอีก ค่าส่วนพุ่งเกินมีค่าน้อยที่ระยะนี้ และจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะของระนาบดินเพิ่มขึ้นอีก ผู้วิจัยจึงกำหนดระยะ 225 เซนติเมตร เป็นระยะที่ไม่ควรมีวัตถุเข้าไปใกล้อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขณะทำการวัด

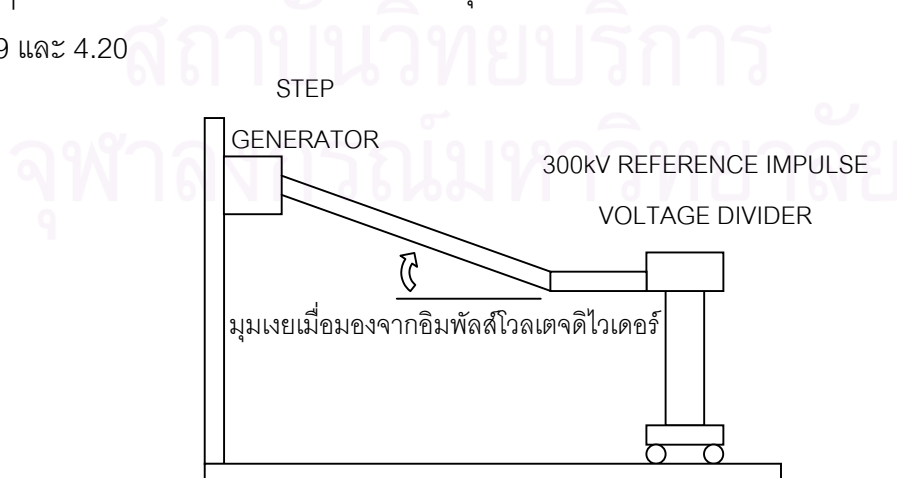


รูปที่ 4.16 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่มีระนาบดิน กับมีระนาบดินที่ระยะ 75 cm

จากสัญญาณที่วัดได้จะเห็นว่า บริเวณหน้าคลื่นกรณีไม่มีระนาบดิน จะมียอดอยู่หนึ่งยอด และกรณีมีระนาบดินนั้น จะทำให้ยอดที่ได้นั้นถูกดึงให้สูงขึ้นไปอีก อีกทั้งค่าเวลาหน้าคลื่น (T_1) จะยาวขึ้นด้วย ดังนั้นกราฟที่ได้จากการทดสอบหลายๆกราฟที่มียอดโผล่ขึ้นมาอีกยอด เกิดมาจากการจัดสถานที่ทดสอบนั้น อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อยู่ใกล้กับวัตถุมากเกินไป

4.5.2 การทดสอบผลกระทบเนื่องจากผลของมุมจากแหล่งจ่ายต่างๆ

ในการทดสอบผลของสภาวะแวดล้อมใกล้ชิดที่มุมต่างๆ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของมุมก้มเมื่อมองจากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ 15, 30, 45 และ 60 องศา (จะแสดงสัญลักษณ์ในกราฟด้วยค่าลบ) มุมเงยเมื่อมองจากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ 15, 30 และ 45 องศา (จะแสดงสัญลักษณ์ในกราฟด้วยค่าบวก) รูปวงจรถ่ายใช้ในการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งผลของมุมต่างๆที่มีต่อค่าเวลาตอบสนองบางส่วน ส่วนพุ่งเกิน และค่าเวลาตอบสนอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20



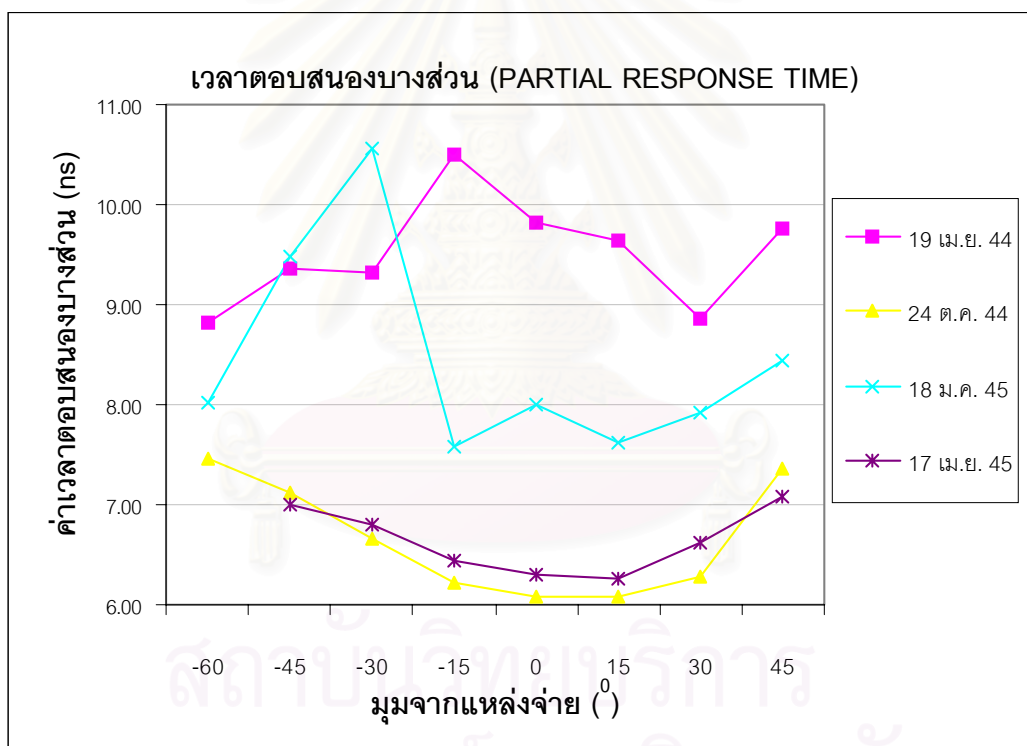
รูปที่ 4.17 วงจรถ่ายใช้ในการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ชิดเนื่องจากผลของมุมต่างๆ

ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8

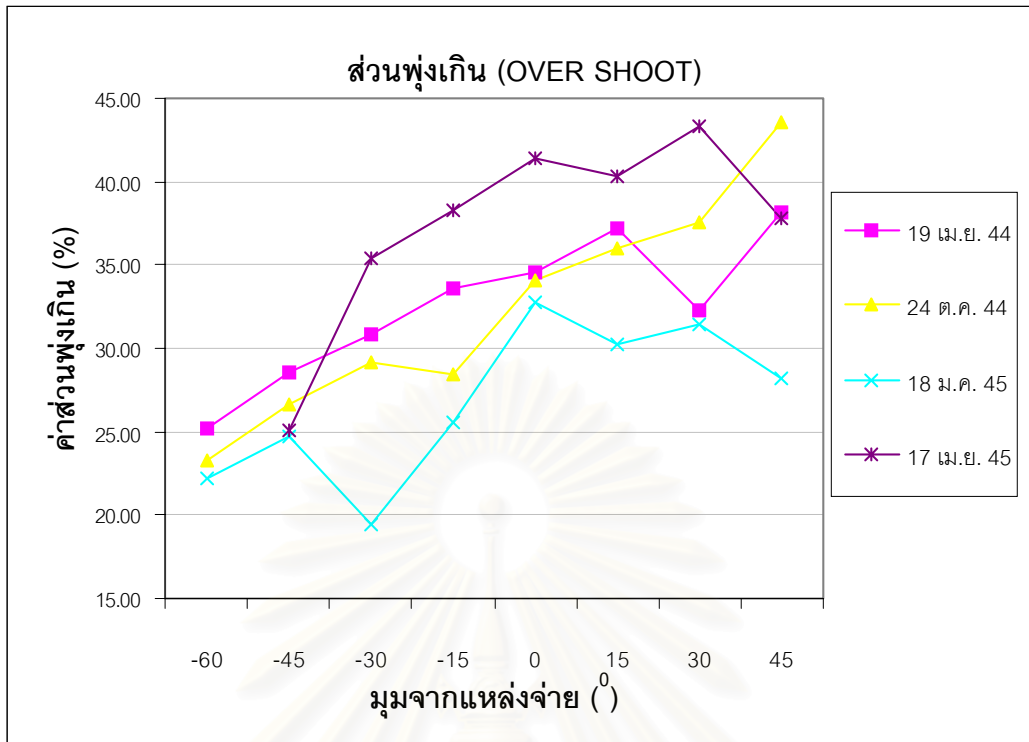
ตารางที่ 4.8 เวลาที่ทำการทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่ายแรงดัน

การทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่ายแรงดันครั้งที่	วันที่ทำการทดสอบ
1	19 เมษายน 2544
2	24 ตุลาคม 2544
3	18 มกราคม 2545
4	17 เมษายน 2545

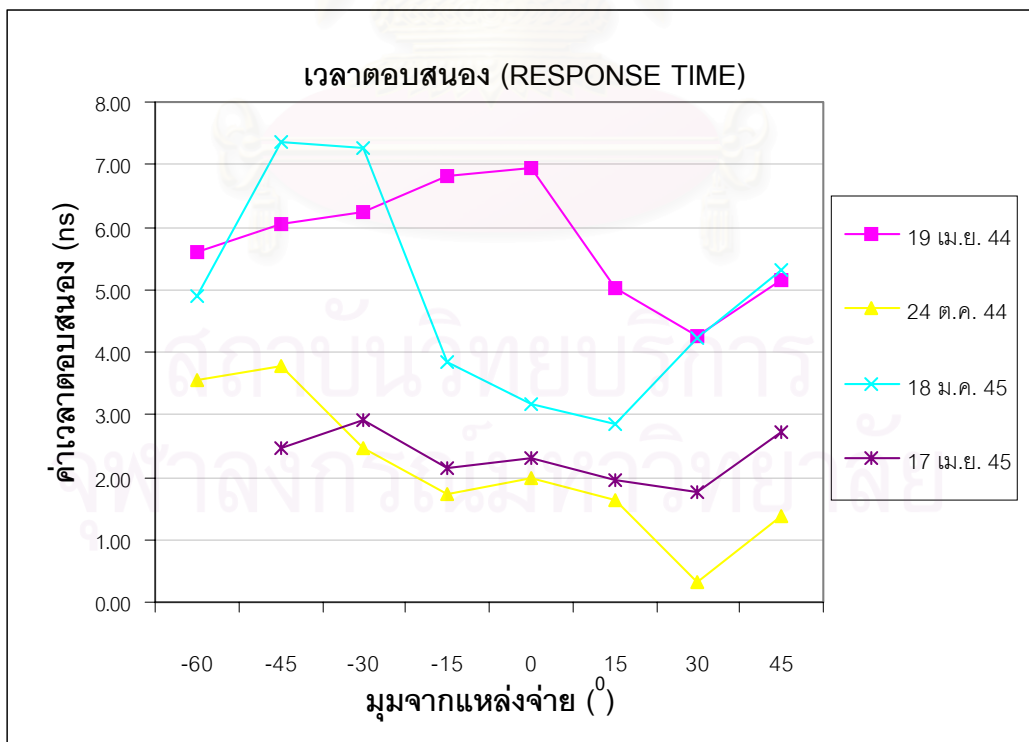
หมายเหตุ การทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่ายแรงดันครั้งสุดท้ายไม่ได้ทำการทดสอบที่มุม 60 องศาเนื่องจากข้อจำกัดของสถานที่



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาตอบสนองบางส่วนกับมุมของแหล่งจ่าย



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนพุ่งเกิน กับมุมของแหล่งจ่าย



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนอง กับ มุมของแหล่งจ่าย

จากกราฟความสัมพันธ์ทั้งสามพบว่าค่าส่วนฟุงเกินซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมของแหล่งจ่ายที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และค่าเวลาตอบสนอง กับมุมของแหล่งจ่าย จะเห็นแนวโน้มได้ไม่เด่นชัดเนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งใช้สถานที่ทดสอบที่ต่างกันทั้งหมด ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน เช่นในครั้งที่สองทำการทดสอบในห้องเพดานห้องจะต่ำ เมื่อทำการทดสอบที่มุมเงยมากขึ้นทำให้ผลของสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงเนื่องจากเพดานห้องเข้ามามีผลกระทบต่อค่าเวลาตอบสนอง ครั้งที่ 3 สถานที่ทดสอบมีอุปกรณ์รอบข้างอยู่เยอะทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าไม่แน่นอน

จากผลการทดสอบสภาวะแวดล้อมใกล้เคียง และผลของมุมจากแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลง มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดโดยโปรแกรม RTES อยู่บ้าง ผู้วิจัยได้ทำการป้อนแรงดันจากแหล่งกำเนิดแรงดันรูปขึ้นแล้วทำการวัดสัญญาณโดยอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ พบว่าในการป้อนสัญญาณเดียวกันในแต่ละครั้ง ได้ใช้โปรแกรม RTES วัดค่าเวลาตอบสนองบางส่วน ส่วนฟุงเกิน และเวลาตอบสนอง พบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสามมีความแตกต่างกัน 20-30% ในการวัดแต่ละครั้ง ซึ่งส่งผลต่อแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ทั้งสามด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) ในหัวข้อการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว และผลของสภาวะแวดล้อมใกล้เคียง เพื่อให้อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐานขนาด 300 กิโลโวลต์ สามารถใช้เป็นอุปกรณ์สอบเทียบประจำห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงได้ ข้อมูลทางเทคนิคของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ เมื่อทำการวัด ณ สัปดาห์ที่ 21 (เมื่อทำการทดสอบถึงครั้งที่ 21 ความต้านทานหน่วงเกิดความเสียหายขึ้น จึงทำการสร้างความต้านทานหน่วงใหม่ โดยเปลี่ยนจากท่อพลาสติกอ่อน เป็นท่ออะคริลิก แล้วจึงทำการทดสอบต่อไป) แสดงไว้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบวัด

ค่าความต้านทาน	
1. ค่าความต้านทานหน่วง	$R_d = 276.115 \Omega$
2. ค่าความต้านทานภาคแรงสูงของโวลเตจดีไวเดอร์	$R_{HV} = 6.912 \text{ k}\Omega$
3. ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์	$R_{LV} = 7.336 \Omega$
4. ค่าความต้านทานปฐมภูมิของตัวลดทอน	$R_{atten1} = 46.080 \Omega$
5. ค่าความต้านทานทุติยภูมิของตัวลดทอน	$R_{atten2} = 4.101 \Omega$
6. ค่าความต้านทานสายเคเบิล	$R_{cable} = 0.107 \Omega$
ตัวคูณ	
1. โวลเตจดีไวเดอร์ ($R_{HV} + R_{LV}/R_{LV}$)	943.203
2. ตัวลดทอน ($R_{atten1} + R_{atten2}/R_{atten2}$)	12.234
3. ทั้งระบบวัด (โวลเตจดีไวเดอร์+ตัวลดทอน+สายเคเบิล)	13778.7

ผลของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ ปรากฏว่าเมื่อทำการทดสอบครั้งแรก ตัวคูณที่ได้เพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผู้วิจัยใช้ Volt/Div ของแต่ละช่องสัญญาณแตกต่างกันในการวัดสัญญาณจากอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์มาตรฐานขนาด 300 กิโลโวลต์ และ ยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์แรงดันสูงมาตรฐาน ส่วนครั้งที่สอง และครั้งที่สาม ผู้วิจัยใช้ Volt/Div ของทั้งสองช่องสัญญาณที่เท่ากัน ผลการทดสอบครั้งที่สองพบว่าตัวคูณอยู่

ในช่วง -0.23% ถึง $+0.32\%$ ของค่าเฉลี่ยของตัวคูณทั้ง 5 ค่า ผลการทดสอบครั้งที่สามซึ่งทำการทดสอบหลังจากทำการทดสอบเสถียรภาพระยะยาวเป็นเวลา 52 สัปดาห์ พบว่าตัวคูณอยู่ในช่วง -0.27% ถึง $+0.32\%$ ของค่าเฉลี่ยของตัวคูณทั้ง 5 ค่า จากผลการทดสอบที่ได้ สามารถสรุปได้ว่า โวลเตจดีไวเดอร์ในงานวิจัยมีความเป็นเชิงเส้น

ในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว ทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 5 ระดับแรงดัน คือ 100, 150, 200, 250 และ 330 กิโลโวลต์ (ซึ่งมีค่า 110% ของพิกัดแรงดันของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์) ระดับแรงดันละ 20 ครั้ง หลังจากป้อนแรงดันอิมพัลส์เรียบร้อยแล้ว ก็ทำการวัดความต้านทาน และนำมาคำนวณตัวคูณทุกสัปดาห์ เป็นเวลานาน 52 สัปดาห์ เมื่อใช้ตัวคูณซึ่งคำนวณได้ในครั้งที่ 21 ซึ่งมีค่า 13778.7 เป็นค่าอ้างอิง พบว่าตัวคูณที่คำนวณได้ในแต่ละสัปดาห์อยู่ในช่วง -0.65% ถึง $+0.63\%$ ดังนั้นอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์ ผ่าน มาตรฐาน IEC 60060-2 (1994) ซึ่งกำหนดให้ค่าตัวคูณต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1%

ในการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้ขีด เมื่อพิจารณาผลของระยะของระนาบดินพบว่า เมื่อมีระนาบดินที่ระยะประมาณครึ่งหนึ่งของความสูง ค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และค่าเวลาตอบสนองมีค่ามากอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ที่มากขึ้น ทำให้ค่าเวลาตอบสนองเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะของระนาบดินค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และเวลาตอบสนองจะค่อยๆลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงไป ส่วนค่าส่วนพุงเกินจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะของระนาบดินที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระยะของระนาบดินมีค่ามาก

ในการทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่าย พบว่าค่าส่วนพุงเกินมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมของแหล่งจ่ายที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาตอบสนองบางส่วน และค่าเวลาตอบสนองกับมุมของแหล่งจ่ายจะมีแนวโน้มที่ไม่แน่ชัด เนื่องจากในการทดสอบแต่ละครั้งใช้สถานที่ทดสอบที่ต่างกันทั้งหมดทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์วัดที่ใช้ในงานวิจัย ไม่มีการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ
2. ไม่มีสถานที่แน่นอนในการทดสอบเสถียรภาพระยะยาว ทำให้ความแม่นยำของข้อมูลที่ได้ลดลงไป เนื่องจากผลของหน้าสัมผัสที่เปลี่ยนไป และระบบสายกราวด์ที่เปลี่ยนไป
3. บางสัปดาห์ ผู้วิจัยไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงมีการทดสอบควรมีการจัดเวลา และสถานที่ ที่แน่นอนสำหรับงานวิจัยของนิสิต เพื่อจะได้ทดสอบได้อย่างต่อเนื่อง

4. ในช่วงแรกเป็นช่วงที่ผู้วิจัยต้องศึกษาการใช้อุปกรณ์วัด และเครื่องมือต่างๆ ควรให้มีการถ่ายทอดวิธีการใช้อุปกรณ์ โดยรุ่นพี่ที่ทำงานวิจัยมาก่อนหน้า และทำสื่อบทคัดกันไปรุ่นต่อรุ่น เพื่อความสนิทสนมของหมู่ผู้วิจัย อีกทั้งยังได้ศึกษาปัญหาพร้อมกันอีกด้วย เพื่อสร้างทีมของผู้วิจัยให้เข้มแข็ง เพราะงานวิจัยเป็นงานที่ทำกันเป็นกลุ่มจึงจะมีประสิทธิภาพ
5. ในการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียง ควรมีห้องทดสอบเฉพาะที่กันผลรบกวนจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีอุปกรณ์วางในตำแหน่งที่แน่นอน ทำให้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แม่นยำขึ้น
6. ห้องปฏิบัติการ ควรมีการสอนนักวิจัยที่เข้ามาใหม่ร่วมกัน ถึงสถานที่เก็บอุปกรณ์วิจัย การเก็บของคืนให้เป็นระบบ เป็นระเบียบ ควรกำหนดบุคคล และเวลาที่ตายตัวในการช่วยกันทำความสะอาด จัดสิ่งของให้เป็นระเบียบ ปลุกฝังให้ผู้วิจัยรู้สึกเหมือนห้องปฏิบัติการเป็นบ้านอีกหลังหนึ่งของผู้วิจัยที่จะต้องช่วยกันรักษา
7. ควรมีสถานที่จัดเก็บดีไวเดอร์ที่แน่นอน เพื่อป้องกันผลกระทบจากทางกลที่จะมีต่อดีไวเดอร์ อาจทำให้เสียหายได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. IEC Publication No. 60060-2, 1994, High Voltage Techniques-Part 2 :Measuring System
2. วรา จุฬอง, การออกแบบ และสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
3. วิชัย เตยวงศ์ศักดิ์, การพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 400 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
4. ไพศาล จิรฉัตรรัตน์, อิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง, รายงานผลการประดิษฐ์, ทูลอดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
5. ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
6. อรรถนพ ลีสมิมาตรณ์, การออกแบบ และสร้างอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
7. Kuffel, E.; Zaengl, W.S.; and Kuffel, J High Voltage Engineering Fundamentals, 2000.
8. IEC Publication no. 71, Insulation Co-ordination, 1976.
9. HUBER; SUHNER, A.G. Coaxial Connectors Cables and Assemblies General Catalogue, HUBER+SUHNER AG CH-9100 Herisau, Switzerland
10. Yokogawa-Hewlett-Packard, LTD., HP 4284A Precision LCR Meter Operation Manual, Kobe Instrument Division Japan, 1988.
11. Model 617 Programmable Electrometer Instruction Manual
12. HAFELEY Operating Instruction, Unit Step Generator Type 40
13. Test Certificate No. C_98002 of Universal High Voltage Reference Divider

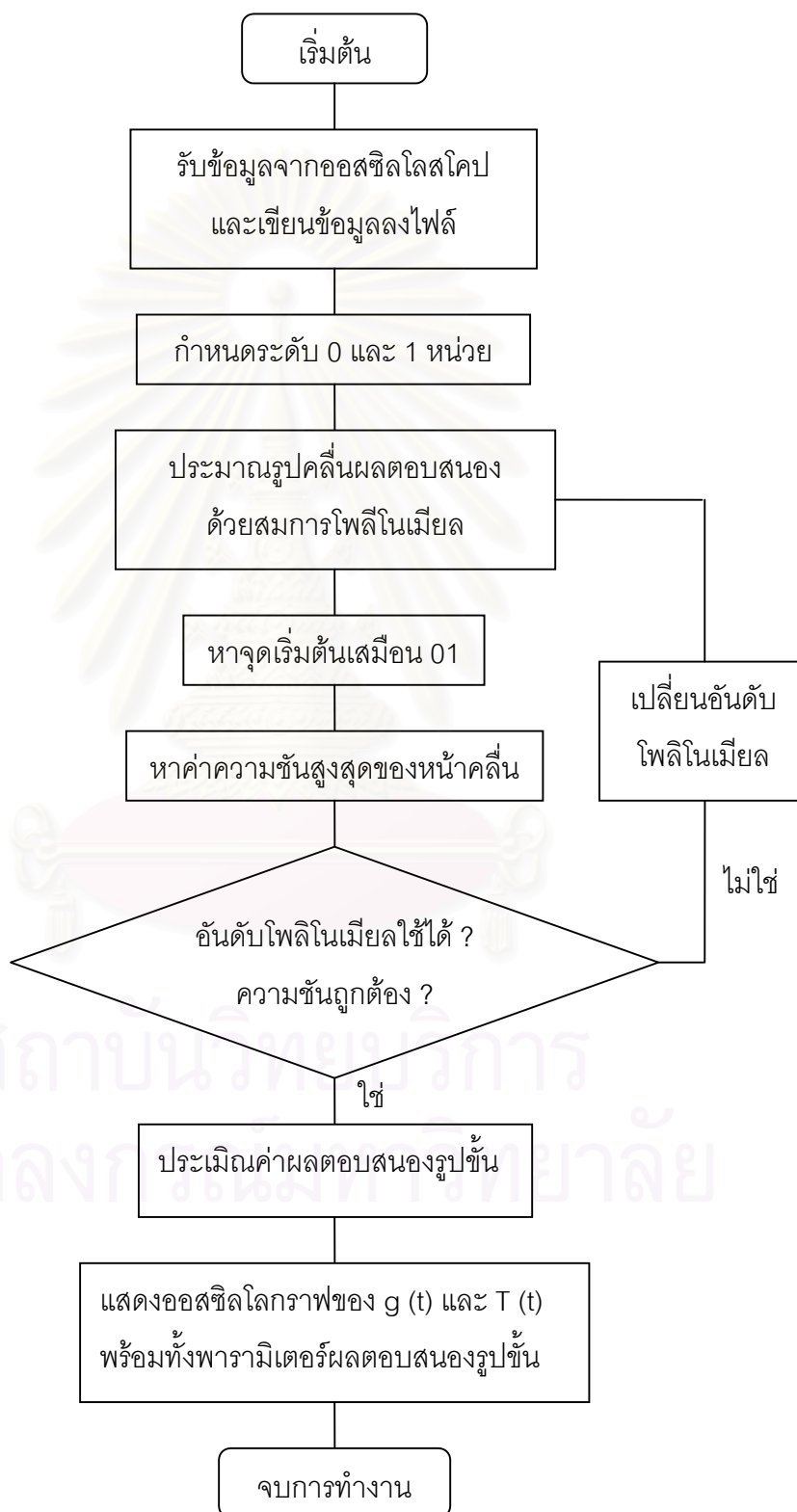


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมประเมินค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง



ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานต่างๆ

ข.1 ความต้านทานภาคแรงสูง

-การคำนวณค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม (Random Uncertainty; U_r)

ตาราง ข1 ตัวอย่างค่าความต้านทานภาคแรงสูงที่วัดได้จำนวน 20 ครั้ง

ลำดับที่	ค่าความต้านทานภาคแรงสูง ($k\Omega$)
1	6.912
2	6.912
3	6.912
4	6.911
5	6.911
6	6.912
7	6.912
8	6.911
9	6.911
10	6.912
11	6.912
12	6.912
13	6.912
14	6.911
15	6.911
16	6.911
17	6.911
18	6.912
19	6.912
20	6.911
Average	6.912
S_r (%)	0.051%

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $S_r = 0.051\%$ และจำนวนข้อมูล 20 ข้อมูล จากตารางที่ 2.1 จะสามารถหาค่า k ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ค่า 2.09 ดังนั้นสามารถคำนวณค่า U_r ได้ดังนี้

$$U_r = \frac{2.09 \times 0.051\%}{\sqrt{20}}$$

-การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบ (Systematic Uncertainty)

สำหรับ MODEL 617 PROGRAMMABLE ELECTROMETER สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบจากตารางที่ 3.1 ซึ่งความต้านทานภาคแรงสูงมีค่าประมาณ $6.9 \text{ k}\Omega$ จะสามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบมีค่า 0.21%

-การคำนวณค่าความไม่แน่นอนทั้งหมด (Overall Uncertainty)

จากค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม และค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบจะสามารถหาค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดได้ดังนี้

$$U = \sqrt{U_s^2 + U_r^2} = \sqrt{(0.024)^2 + (0.21)^2} = 0.211\%$$

ข.2 ความต้านทานภาคแรงต่ำ

-การคำนวณค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม (Random Uncertainty; U_r)

ตาราง ข2 ตัวอย่างค่าความต้านทานภาคแรงต่ำที่วัดได้จำนวน 20 ครั้ง

ลำดับที่	ค่าความต้านทานภาคแรงต่ำ (Ω)
1	7.334
2	7.335
3	7.337
4	7.338
5	7.337
6	7.333
7	7.335
8	7.340
9	7.335
10	7.340
11	7.337
12	7.334
13	7.336
14	7.334
15	7.336
16	7.335
17	7.335
18	7.337
19	7.335
20	7.337
Average	7.336
S_r (%)	0.189%

ค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มคิดได้จาก $S_r = 0.189\%$ และจำนวนข้อมูล 20 ข้อมูล จากตารางที่ 2.1 จะสามารถหาค่า k ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ค่า 2.09 ดังนั้นสามารถคำนวณค่า U_r ได้ดังนี้

$$U_r = \frac{2.09 \times 0.189\%}{\sqrt{20}}$$

-การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบ (Systematic Uncertainty)

สำหรับ HP 4284A PRECISION LCR METER สามารถหาค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบได้จากสมการที่ 3.4 คือ

$$A = A_e + A_{cal}$$

โดย $A_e = \pm\{BA + [(K_a + K_b \times K_{bb}) \times 100] + K_d\} \times K_e$ [%]

และ A_{cal} หาได้จากกราฟในรูปที่ 3.10

การคำนวณค่า A_e (Relative measurement accuracy)

ในการวัดค่าความต้านทานได้ใช้ Medium Integral time ใช้สายเคเบิลยาว 1 เมตร ค่า $V_s = 1$ V ค่า $f_m = 10$ kHz อุณหภูมิขณะทำการวัด 26°C และค่า $Z_m = 7.336 \Omega$ (พิจารณาว่าองค์ประกอบมีค่าความเหนี่ยวนำน้อยมาก จึงใช้ค่าความต้านทานเฉลี่ยเป็นค่า Z_m) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบ

ค่า BA หาได้จากรูปที่ 3.9 โดยงานวิจัยนี้ใช้ Medium Integral time จึงเลือกดูกราฟเส้นล่าง และใช้ $V_s = 1$ V_{rms} จะสามารถหาค่า A จากกราฟได้มีค่า 0.05

$$\text{ค่า } K_a = \frac{10^{-3}}{Z_m} \left(1 + \frac{200}{V_s} \right) = \frac{10^{-3}}{7.336} \left(1 + \frac{200}{1000} \right) = 1.64 \times 10^{-4}$$

$$\text{ค่า } K_b = 10^{-9} Z_m \left(1 + \frac{70}{V_s} \right) = 10^{-9} \cdot 7.336 \cdot \left(1 + \frac{70}{1000} \right) = 7.85 \times 10^{-9}$$

$$\text{ค่า } K_{bb} = 1 + (5 \times f_m) = 1 + (5 \times 0.01) = 1.05$$

$$\text{ค่า } K_d = 2.5 \times 10^{-4} \cdot (1 + 50 \times f_m) = 2.5 \times 10^{-4} \cdot (1 + 50 \times 0.01) = 3.75 \times 10^{-4}$$

$$\text{ค่า } K_e \text{ มีค่า } 1$$

นำค่าทั้งหมดไปแทนในสมการ สามารถหาค่า

$$A_e = \pm\{0.05 + [(1.64 \times 10^{-4} + 7.85 \times 10^{-9} \times 1.05) \times 100] + 3.75 \times 10^{-4}\} \times 1 = 0.067\%$$

การหาค่า A_{cal} (Calibration accuracy)

จากรูปที่ 3.10 เมื่อค่าความถี่ที่ใช้ในการวัด 10 kHz และค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้คือ 7.336Ω จะสามารถหาค่า $A_{cal} = 0.05$ %

การหาค่า A (Absolute measurement accuracy)

$$\text{ค่า } A = A_e + A_{cal} = 0.067 + 0.05 = 0.117\%$$

-การคำนวณค่าความไม่แน่นอนทั้งหมด (Overall Uncertainty)

จากค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม และค่าความไม่แน่นอนที่เป็นระบบจะสามารถหาค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดได้ดังนี้

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} = \sqrt{(0.088)^2 + (0.117)^2} = 0.146\%$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข3 สัปดาห์ที่ทำการวัด อุณหภูมิขณะที่ทำการวัด ค่าความต้านทาน และค่าความไม่แน่นอน ขององค์ประกอบต่างๆของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์

สัปดาห์ที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	โวลเตจดีไวเดอร์					
		$R_0 (\Omega)$	U (%)	$R_1 (\text{k}\Omega)$	U (%)	$R_2 (\Omega)$	U (%)
2							
3	31	276.046	-	6.913	-	7.336	-
4	30.5	276.072	-	6.91	-	7.325	-
5	31.5	276.101	-	6.913	-	7.337	-
6							
7	32	276.116	-	6.917	-	7.336	-
8	31	276.216	-	6.917	-	7.336	-
9	30	276.076	-	6.911	-	7.337	-
10	32	276.145	-	6.917	-	7.33	-
11	31	276.106	-	6.914	-	7.336	-
12	34	274.929	0.813	6.915	0.210	7.337	0.227
13							
14	32	274.963	0.901	6.913	0.210	7.335	0.228
15	32	274.956	0.743	6.913	0.210	7.334	0.212
16	27	271.712	0.763	6.911	0.210	7.338	0.164
17	27	271.742	0.655	6.913	0.210	7.335	0.160
18	31	271.750	0.435	6.918	0.215	7.338	0.239
19							
20	28	271.710	0.574	6.915	0.210	7.341	0.193
21	26	276.115	0.997	6.912	0.211	7.336	0.147
22	31	276.147	2.105	6.915	0.211	7.336	0.251
23	26	276.158	2.706	6.917	0.218	7.337	0.208
24	26	276.253	3.934	6.917	0.214	7.346	0.301
25	27	276.175	3.243	6.914	0.211	7.343	0.202
26	26	276.199	1.047	6.912	0.210	7.346	0.201
ชดเชยสัปดาห์ที่ 2	28	276.139	1.046	6.915	0.210	7.342	0.173
27	28	276.139	1.046	6.915	0.210	7.342	0.173
28	31	276.078	0.243	6.915	0.210	7.333	0.185
29	27	276.296	4.854	6.913	0.210	7.338	0.280
30	26	276.127	0.921	6.911	0.210	7.343	0.188
31	27	276.169	1.623	6.911	0.210	7.333	0.119
ชดเชยสัปดาห์ที่ 6	28	276.144	0.689	6.914	0.210	7.342	0.132
32	29	276.106	0.183	6.914	0.210	7.342	0.285

สัปดาห์ที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	โวลเตจดีไวเดอร์					
		$R_d(\Omega)$	U (%)	$R_1(k\Omega)$	U (%)	$R_2(\Omega)$	U (%)
33	31	276.094	0.704	6.911	0.210	7.335	0.197
34	29	276.142	0.283	6.913	0.210	7.339	0.198
35	29	276.178	0.584	6.914	0.210	7.338	0.196
36	30	276.131	0.321	6.913	0.210	7.334	0.185
ชดเชยสัปดาห์ที่ 13	27	276.264	0.362	6.917	0.210	7.337	0.119
37	30	276.197	0.385	6.916	0.210	7.335	0.185
38	30	276.188	0.287	6.915	0.212	7.336	0.233
39	24.3	276.074	0.260	6.912	0.210	7.338	0.130
40	30.4	276.124	0.490	6.912	0.210	7.343	0.250
41	31.2	276.263	0.266	6.914	0.210	7.331	0.203
42	31.7	276.230	0.733	6.915	0.210	7.338	0.194
43	31.7	276.253	1.368	6.918	0.210	7.341	0.201
44	28	276.420	1.219	6.918	0.210	7.345	0.198
45	32.9	276.251	0.430	6.918	0.210	7.339	0.194
46	28.7	276.379	0.715	6.913	0.210	7.339	0.189
47							
48							
49	24	276.174	1.477	6.909	0.210	7.335	0.157
50	26	276.123	0.981	6.910	0.210	7.335	0.177
51							
52	26	276.146	0.393	6.910	0.210	7.334	0.129

หมายเหตุ

- สัปดาห์ที่มีสี หมายถึง ในสัปดาห์นั้นมีการทดสอบของศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง หรือค่าความชื้นมากไม่สามารถทดสอบได้
- สัปดาห์แรกไม่มีข้อมูลค่าความต้านทานเนื่องจากได้ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเท่านั้น
- ในช่วงสัปดาห์ที่ 2 ถึงสัปดาห์ที่ 11 ไม่ได้ทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากทำการวัดองค์ประกอบต่างๆเพียงครั้งเดียว จึงหาค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่มไม่ได้

ตาราง ข4 สัปดาห์ที่ทำการวัด อุณหภูมิขณะที่ทำการวัด ค่าความต้านทาน และค่าความไม่แน่นอน ขององค์ประกอบต่างๆของตัวลวดทอง และสายเคเบิล และ ค่าตัวคูณที่คำนวณได้

สัปดาห์ที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ตัวลวดทอง				เคเบิลวัด		ค่าตัวคูณ
		$R_3(\Omega)$	U (%)	$R_4(\Omega)$	U (%)	$R_5(\Omega)$	U (%)	
2								
3	31	47.894	-	4.298	-	0.123	-	13613.00
4	30.5	46.056	-	4.078	-	0.105	-	13856.80
5	31.5	46.193	-	4.118	-	0.12	-	13757.84
6								
7	32	46.222	-	4.118	-	0.119	-	13774.05
8	31	46.155	-	4.167	-	0.111	-	13602.53
9	30	46.127	-	4.138	-	0.1	-	13670.97
10	32	46.102	-	4.167	-	0.129	-	13604.57
11	31	46.075	-	4.118	-	0.102	-	13728.55
12	34	46.202	0.823	4.215	0.613	0.124	0.251	13466.02
13								
14	32	46.095	0.790	4.138	0.591	0.119	0.226	13672.92
15	32	46.161	0.901	4.175	1.100	0.115	0.300	13577.52
16	27	46.123	1.158	4.186	1.200	0.112	0.247	13517.74
17	27	46.125	1.387	4.139	1.381	0.116	0.306	13670.66
18	31	46.063	0.410	4.087	0.419	0.114	0.425	13820.96
19								
20	28	46.077	0.624	4.086	0.348	0.111	0.324	13815.88
21	26	46.080	0.397	4.101	0.492	0.107	0.197	13778.70
22	31	46.092	0.760	4.118	0.610	0.118	0.244	13736.72
23	26	46.077	0.411	4.093	0.527	0.119	0.253	13815.25
24	26	46.176	3.579	4.110	1.509	0.120	0.235	13762.60
25	27	46.123	0.501	4.133	0.696	0.123	0.274	13689.58
26	26	46.115	0.497	4.091	0.348	0.231	0.315	13834.77
ชดเชยสัปดาห์ที่ 2	28	46.104	0.427	4.102	0.478	0.110	0.557	13781.84
27	28	46.086	0.427	4.100	0.478	0.110	0.557	13782.56
28	31	46.059	0.285	4.078	0.200	0.099	0.223	13854.61
29	27	46.064	0.103	4.079	0.125	0.123	0.125	13849.70
30	26	46.066	0.103	4.079	0.125	0.103	0.165	13833.06
31	27	46.064	0.103	4.079	0.125	0.119	0.158	13852.07
ชดเชยสัปดาห์ที่ 6	28	46.120	0.535	4.081	0.163	0.118	0.204	13850.05
32	29	46.059	0.156	4.078	0.200	0.101	0.201	13838.80

สัปดาห์ที่	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ตัวลดทอน			เคเบิลวัด			ค่าตัวคูณ
		$R_3 (\Omega)$	U (%)	$R_4 (\Omega)$	U (%)	$R_5 (\Omega)$	U (%)	
33	31	46.066	0.232	4.078	0.200	0.105	0.270	13847.84
34	29	46.059	0.156	4.078	0.200	0.115	0.298	13845.42
35	29	46.081	0.391	4.092	0.372	0.109	0.193	13810.20
36	30	46.058	0.212	4.078	0.200	0.125	0.186	13855.72
ชดเชยสัปดาห์ที่ 13	27	46.064	0.103	4.078	0.125	0.123	0.124	13860.16
37	30	46.057	0.156	4.078	0.200	0.126	0.207	13860.18
38	30	46.079	0.495	4.095	0.517	0.120	0.213	13806.56
39	24.3	46.070	0.130	4.079	0.125	0.107	0.131	13842.90
40	30.4	46.055	0.187	4.078	0.200	0.116	0.201	13837.77
41	31.2	46.054	0.156	4.078	0.200	0.127	0.299	13865.57
42	31.7	46.053	0.156	4.078	0.200	0.122	0.226	13854.11
43	31.7	46.053	0.156	4.078	0.200	0.127	0.205	13854.69
44	28	46.062	0.103	4.078	0.125	0.117	0.372	13846.49
45	32.9	46.050	0.188	4.075	0.201	0.123	0.193	13866.19
46	28.7	46.069	0.224	4.076	0.202	0.110	0.219	13852.24
47								
48								
49	24	46.094	0.298	4.078	0.598	0.128	0.152	13857.44
50	26	46.110	0.727	4.087	0.423	0.128	0.152	13833.81
51								
52	26	46.078	0.405	4.080	0.229	0.128	0.152	13852.94

หมายเหตุ

- สัปดาห์ที่มีสี หมายถึง ในสัปดาห์นั้นมีการทดสอบของศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง หรือค่าความชื้นมากไม่สามารถทดสอบได้

ภาคผนวก ค.

ตารางผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 1 (วันที่ 21 มิถุนายน 2544)

ของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV กับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์อ้างอิงแรงดันสูง

100kV			150kV			200kV			250kV			330kV		
300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio
7.84	14.84	12548.75	11.94	23.28	12925.92	15.66	30.31	12831.48	19.22	40.00	13797.15	23.88	50.30	13964.21
7.84	14.69	12421.91	11.94	22.81	12664.96	15.66	30.31	12831.48	19.22	40.00	13797.15	24.00	50.00	13811.52
7.84	15.00	12684.05	12.25	23.91	12939.76	15.94	30.78	12801.56	19.12	39.70	13765.29	24.25	50.30	13751.15
7.81	15.00	12732.77	12.19	23.59	12829.42	15.94	30.78	12801.56	19.38	40.00	13683.24	24.00	50.00	13811.52
7.81	14.84	12596.96	12.06	23.12	12709.35	15.94	30.47	12672.63	19.25	40.00	13775.65	23.88	50.00	13880.93
7.62	14.53	12641.35	11.75	22.66	12785.12	16.03	30.94	12795.86	19.12	40.00	13869.31	24.00	50.00	13811.52
7.75	14.84	12694.48	11.94	23.12	12837.08	15.84	30.62	12815.42	19.22	40.00	13797.15	24.00	50.00	13811.52
7.94	15.16	12657.89	11.75	22.81	12869.75	15.84	30.47	12752.64	19.12	39.70	13765.29	24.25	50.60	13833.16
7.81	15.00	12732.77	12.00	23.12	12772.89	15.84	30.47	12752.64	19.38	40.00	13683.24	24.25	50.60	13833.16
7.81	15.00	12732.77	11.88	22.97	12818.21	15.75	30.62	12888.65	19.12	40.00	13869.31	24.13	50.30	13819.53
7.75	15.06	12882.67	12.12	23.59	12903.52	15.56	30.62	13046.03	19.12	39.70	13765.29	24.13	50.00	13737.11
7.75	14.84	12694.48	11.75	22.81	12869.75	15.38	30.31	13065.09	19.12	40.00	13869.31	24.25	50.30	13751.15
7.75	14.84	12694.48	11.88	22.81	12728.92	15.38	30.78	13267.68	19.22	40.00	13797.15	24.00	50.00	13811.52
7.75	14.77	12634.60	11.88	23.12	12901.91	15.28	30.78	13354.51	19.25	40.00	13775.65	23.88	50.00	13880.93
7.75	15.00	12831.35	11.75	22.81	12869.75	15.38	30.78	13267.68	19.38	40.00	13683.24	24.00	50.00	13811.52
7.75	14.84	12694.48	11.88	23.12	12901.91	15.28	30.47	13220.01	19.12	40.00	13869.31	24.00	50.30	13894.39
7.81	14.84	12596.96	11.75	22.97	12960.03	15.28	30.47	13220.01	19.12	39.70	13765.29	24.13	50.30	13819.53
7.75	14.77	12634.60	11.88	22.81	12728.92	15.66	30.94	13098.19	19.12	40.00	13869.31	24.13	50.60	13901.96
7.69	14.69	12664.21	12.12	23.12	12646.43	15.38	30.78	13267.68	19.22	40.00	13797.15	24.13	50.30	13819.53
7.66	14.69	12713.81	12.00	23.28	12861.29	15.47	30.94	13259.06	19.12	39.70	13765.29	24.13	50.60	13901.96
Mean		12674.27	Mean		12826.24	Mean		13000.49	Mean		13787.99	Mean		13832.89
S.D.		96.70	S.D.		91.98	S.D.		226.39	S.D.		60.39	S.D.		56.66

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 2 (วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2545)

ของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV กับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์อ้างอิงแรงดันสูง

100kV			150kV			200kV			250kV			330kV		
300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio
7.55	15.63	13724.44	11.21	23.08	13649.38	15.21	31.15	13577.24	18.75	38.44	13591.42	24.60	50.30	1355.50
7.55	15.60	13698.10	11.21	23.08	13649.38	15.05	31.15	13721.59	18.75	38.62	13655.06	24.60	50.10	13501.60
7.58	15.56	13608.90	11.27	23.08	13576.71	14.98	30.87	13661.79	18.94	38.62	13518.08	24.30	50.40	13750.14
7.58	15.60	13643.89	11.32	23.35	13674.87	15.12	30.94	13565.98	18.66	38.62	13720.92	24.40	50.30	13666.61
7.55	15.56	13662.98	11.16	23.13	13740.24	15.12	31.01	13596.67	18.75	38.53	13623.24	24.50	50.10	13556.71
7.58	15.63	13670.13	11.21	23.13	13678.95	15.19	30.94	13503.47	18.75	38.62	13655.06	24.50	50.50	13664.95
7.58	15.60	13643.89	11.21	23.19	13714.43	15.12	31.08	13627.37	18.75	38.53	13623.24	24.50	50.30	13610.83
7.58	15.63	13670.13	11.27	23.19	13641.42	15.19	31.08	13564.57	18.84	38.53	13558.16	24.50	50.30	13610.83
7.55	15.60	13698.10	11.16	23.24	13805.58	15.19	31.15	13595.12	18.84	38.81	13656.69	24.50	50.30	13610.83
7.55	15.56	13662.98	11.21	23.08	13649.38	15.19	31.22	13625.67	18.75	38.44	13591.42	24.50	50.30	13610.83
7.51	15.52	13700.44	11.16	23.02	13674.89	15.05	31.15	13721.59	18.75	38.62	13655.06	24.50	50.40	13637.89
7.55	15.56	13662.98	11.16	22.97	13645.19	15.12	31.29	13719.44	18.75	38.53	13623.24	24.50	50.30	13610.83
7.51	15.52	13700.44	11.16	23.19	13775.88	15.26	31.22	13563.17	18.75	38.44	13591.42	24.50	50.30	13610.83
7.65	15.67	13579.70	11.27	23.13	13606.13	15.19	31.08	13564.57	18.66	38.44	13656.97	24.50	50.30	13610.83
7.51	15.67	13832.85	11.16	23.13	13740.24	15.19	31.29	13656.22	18.75	38.53	13623.24	24.50	50.30	13610.83
7.58	15.81	13827.56	11.27	23.24	13670.83	15.12	31.22	13688.75	18.75	38.62	13655.06	24.50	50.30	13610.83
7.58	15.63	13670.13	11.16	23.19	13775.88	15.19	31.22	13625.67	18.75	38.62	13655.06	24.50	50.30	13610.83
7.55	15.56	13662.98	11.16	23.19	13775.88	15.19	31.29	13656.22	18.75	38.62	13655.06	24.40	50.30	13666.61
7.62	15.60	13572.27	11.16	23.08	13710.53	15.12	31.29	13719.44	18.75	38.34	16556.06	24.40	50.10	13612.27
7.58	15.60	13643.89	11.27	23.24	13670.83	15.19	31.29	13656.22	18.84	38.62	13589.83	24.40	50.10	13612.27
Mean		13676.84	Mean		13691.33	Mean		13630.54	Mean		13622.72	Mean		13616.64
S.D.		65.09	S.D.		61.57	S.D.		63.90	S.D.		46.92	S.D.		49.49

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบของการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 3 (วันที่ 11 กันยายน 2545)

ของอิมพัลส์โวลเตจดีไวเดอร์อ้างอิงขนาด 300 kV กับยูนิเวอร์ซอลดีไวเดอร์อ้างอิงแรงดันสูง

100kV			150kV			200kV			250kV			330kV		
300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio	300kV Divider	Ref Divider	Ratio
7.17	15.05	13915.54	10.55	21.95	13793.19	14.22	29.69	13841.82	17.50	36.30	13751.54	23.10	48.10	13804.35
7.17	15.05	13915.54	10.62	21.95	13702.28	14.06	29.53	13923.90	17.50	36.40	13789.42	23.10	47.80	13718.25
7.17	15.05	13915.54	10.62	21.95	13702.28	14.22	29.69	13841.82	17.60	36.60	13786.41	23.10	48.10	13804.35
7.17	15.00	13869.31	10.62	22.11	13802.16	14.14	29.61	13882.63	17.60	36.60	13786.41	23.10	47.70	13689.55
7.17	15.05	13915.54	10.55	22.11	13893.74	14.22	29.61	13804.53	17.60	36.60	13786.41	22.90	47.80	13838.06
7.31	15.19	13776.00	10.70	22.03	13649.40	14.30	29.53	13690.21	17.50	36.60	13865.19	23.10	48.00	13775.65
7.31	15.14	13730.65	10.70	22.27	13798.10	14.22	29.45	13729.93	17.50	36.40	13789.42	23.10	48.10	13804.35
7.27	15.09	13760.61	10.70	22.11	13698.96	14.22	29.53	13767.23	17.60	36.60	13786.41	23.10	48.10	13804.35
7.22	15.09	13855.90	10.70	22.19	13748.53	14.22	29.61	13804.53	17.60	36.70	13824.08	22.90	47.70	13809.11
7.22	14.95	13727.35	10.70	22.11	13698.96	14.22	29.69	13841.82	17.80	36.60	13631.51	23.20	48.10	13744.84
7.27	15.19	13851.80	10.78	22.19	13646.50	14.22	29.45	13729.93	17.70	36.70	13745.97	23.10	48.10	13804.35
7.17	15.05	13915.54	10.62	22.27	13902.04	14.14	29.53	13845.12	17.90	36.70	13592.39	23.30	48.00	13657.40
7.27	15.00	13678.54	10.70	22.27	13798.10	14.30	29.45	13653.12	17.80	36.90	13743.24	23.10	48.10	13804.35
7.17	14.95	13823.08	10.70	22.19	13748.53	14.14	29.53	13845.12	17.70	36.90	13820.88	23.20	48.00	13716.27
7.22	15.19	13947.72	10.70	22.03	13649.40	14.14	29.61	13882.63	17.70	36.70	13745.97	23.10	48.00	13775.65
7.17	14.91	13786.09	10.70	22.19	13748.53	14.30	29.53	13690.21	17.60	36.60	13786.41	23.10	48.00	13775.65
7.17	14.86	13739.86	10.78	22.27	13695.70	14.22	29.61	13804.53	17.60	36.70	13824.08	23.10	47.80	13718.25
7.17	15.00	13869.31	10.70	22.11	13698.96	14.22	29.69	13841.82	17.70	36.60	13708.52	23.10	47.80	13718.25
7.31	15.14	13730.65	10.70	22.19	13748.53	14.22	29.69	13841.82	17.70	36.70	13745.97	23.10	47.80	13718.25
7.31	15.14	13730.65	10.70	22.11	13698.96	14.30	29.53	13690.21	17.80	37.00	13780.48	23.10	48.20	13833.05
Mean		13822.76	Mean		13741.14	Mean		13797.65	Mean		13764.54	Mean		13765.71
S.D.		84.15	S.D.		72.66	S.D.		76.23	S.D.		63.41	S.D.		51.47

ภาคผนวก ง.

ตารางผลการทดสอบผลกระทบบนดินที่ระยะแตกต่างกัน

ง.1 ตารางผลการทดสอบผลกระทบบนดินในแกน x

ตาราง ง.1 ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้จากการทดสอบผลกระทบบนดินจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่ 4 ครั้ง

ระยะจากระดับดิน (cm)	19 เม.ย. 44	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
75	7.42	6.81	9.36	7.31
150	7.08	6.39	9.06	6.93
225	6.9	6.04	8.68	6.55
300	6.75	6.46	8.73	-
>>300	6.85	6.63	7.99	6.51

ตาราง ง.2 ค่าส่วนพุ่งเกินที่ได้จากการทดสอบผลกระทบบนดินจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่ 4 ครั้ง

ระยะจากระดับดิน (cm)	19 เม.ย. 44	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
75	27.85	26.78	27.88	36.62
150	27.31	25.79	25.39	36.86
225	26.95	25.81	27.18	39.74
300	27.32	26.81	26.92	-
>>300	31.22	33.95	32.73	38.35

ตาราง ง.3 ค่าเวลาตอบสนองที่ได้จากการทดสอบผลกระทบบนดินจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่ 4 ครั้ง

ระยะจากระดับดิน (cm)	19 เม.ย. 44	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
75	3.48	3.29	3.9	2.00
150	3.99	2.5	3.26	1.99
225	3.13	2.46	2.8	1.42
300	3.37	2.84	3.34	
>>300	3.17	2.98	3.18	1.47

ง.2 ตารางผลการทดสอบผลกระทบจากระนาบดินในแกน y

ตาราง ง.4 ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่ 3 ครั้ง

ระยะจากระนาบดิน (cm)	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
75	6.91	9.12	6.96
150	6.26	9.12	6.82
225	6.45	8.76	6.52
300	6.45	8.74	-
>>300	6.63	7.99	6.51

ตาราง ง.5 ค่าส่วนพุ่งเกินที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่ 3 ครั้ง

ระยะจากระนาบดิน (cm)	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
75	33.63	29.91	38.42
150	32.79	25.44	37.80
225	33.86	26.86	40.37
300	35.51	26.78	-
>>300	33.95	32.73	38.35

ตาราง ง.6 ค่าเวลาตอบสนองที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่ 3 ครั้ง

ระยะจากระนาบดิน (cm)	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
75	2.73	4.54	2.28
150	2.85	4.15	1.78
225	2.39	3.84	1.65
300	2.32	3.24	-
>>300	2.98	3.18	1.47

ภาคผนวก จ.

ตารางผลการทดสอบผลกระทบจากมุมของแหล่งจ่ายที่แตกต่างกัน

ตาราง จ.1 ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากมุมที่แตกต่างกันทั้ง 4 ครั้ง

มุมจากแหล่งจ่าย	19 เม.ย. 44	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
-60	8.81	7.45	8.02	-
-45	9.37	7.12	9.49	6.99
-30	9.32	6.67	10.57	6.81
-15	10.50	6.22	7.59	6.44
0	9.82	6.09	7.99	6.31
15	9.63	6.08	7.63	6.27
30	8.86	6.28	7.92	6.62
45	9.76	7.36	8.44	7.07

ตาราง จ.2 ค่าส่วนพุ่งเกินที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากมุมที่แตกต่างกันทั้ง 4 ครั้ง

มุมจากแหล่งจ่าย	19 เม.ย. 44	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
-60	25.17	23.32	22.25	-
-45	28.58	26.59	24.71	25.11
-30	30.83	29.16	19.39	35.41
-15	33.65	28.42	25.60	38.33
0	34.60	34.05	32.73	41.35
15	37.14	36.03	30.20	40.28
30	32.25	37.54	31.47	43.28
45	38.22	43.50	28.17	37.81

ตาราง จ.3 ค่าเวลาตอบสนองที่ได้จากการทดสอบผลกระทบจากมุมที่แตกต่างกันทั้ง 4 ครั้ง

มุมจากแหล่งจ่าย	19 เม.ย. 44	24 ต.ค. 44	18 ม.ค. 45	17 เม.ย. 45
-60	5.59	3.55	4.91	-
-45	6.04	3.79	7.37	2.48
-30	6.23	2.48	7.26	2.90
-15	6.83	1.73	3.83	2.15
0	6.96	2.00	3.18	2.29
15	5.02	1.62	2.85	1.94
30	4.27	0.33	4.22	1.75
45	5.14	1.38	5.31	2.71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปกรณ์ ชุมมงคล เกิดเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย