การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์

นาย ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-634-433-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF 1000 kV IMPULSE VOLTAGE DIVIDER

Mr. Prasert Rungsrisopoan-Aporn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-634-433-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ ขนาด 1000 กิโลโวลต์
โดย	นาย ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ : การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์ (DESIGN AND CONSTRUCTION OF 1000 kV IMPULSE VOLTAGE DIVIDER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด, 96 หน้า. ISBN 974-634-433-1

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการวิจัยออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์ แบบความต้านทาน และแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงชนิดต่ออยู่ภายนอกและต่ออนุกรมกระจายอยู่ภายในตลอดภาคแรงสูง โดยแบบความต้านทาน ภาคแรงสูงทำด้วยเส้นลวด Ni-Cr พันแบบไร้ความหนี่ยวนำ มีค่าความต้านทาน 9.77 kΩ สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์มีค่า 884.94 และของระบบวัดมีค่า 38217.5 ส่วนแบบตัวเก็บประจุ ภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อย ชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มต่อขนานและอนุกรมกัน มีค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 385.81 pF สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์มีค่า 1030.65 และของระบบวัดมีค่า 38883.4 ทำการทดสอบหาคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ทั้ง 2 แบบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) ได้แก่ ผลตอบสนองรูปขั้น ซึ่งในกรณีของแบบความต้านทานได้ศึกษาถึงผลของชีลด์ที่มีต่อผลตอบสนองรูปขั้นด้วย สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด พฤติกรรมพลศาสตร์ ความเป็นเชิงเส้น และความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดัน 110 % ของแรงดันพิกัด ทำการวัดเปรียบเทียบระหว่างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ทั้ง 2 แบบที่สร้างขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

ภาพถ่ายต้นฉบับวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C515635 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: IMPULSE VOLTAGE DIVIDER/ BIL
PRASERT RUNGSRISOPOAN-APORN : DESIGN AND CONSTRUCTION OF 1000 kV IMPULSE VOLTAGE DIVIDER. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Dr.Sc.Techn. 96 pp.
ISBN 974-634-433-1

ABSTRACT

This thesis reports the design and construction of 1000 kV resistor and capacitor type impulse voltage dividers. The capacitor voltage divider is damped with either external resistor or external and internal distributed resistors along the high voltage part. For resistor type, the high voltage part is made of Ni-Cr resistance wire wound non-inductively which gives the resistance of 9.77 kΩ. The scale factor of the voltage divider is 884.94 and 38217.5 for the whole resistive measuring system. In case of capacitor type, the high voltage part consists of a large number of small polyester film capacitors connected in parallel and in series which gives the effective capacitance of 385.81 pF. The scale factor of the voltage divider is 1030.65 and 38883.4 for the whole capacitive measuring system. The tests of both impulse voltage divider characteristics were performed in accordance with IEC 60-2 (1994), including: step response measurement with the effect of shielding to resistor type, scale factor, dynamic behaviour, linearity and withstand voltage tests at 110 % of rated voltage. The comparative measurement between both constructed impulse voltage dividers was carried out. The test results show that both impulse voltage divider characteristics meet the requirements of standard specifications.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2536 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์บุญชัย เตชะอำนาจ และคุณถาวร เอื้อดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ตึกวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและเพื่อนๆ อีกหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณสมชาย ยิ้มวุฒิกุล ที่ได้ให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยเป็นอย่างมาก อีกทั้งขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเพื่อนร่วมงานที่แผนกห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฒ

บทที่

1. บทนำ 1

    1.1 บทนำทั่วไป 1

    1.2 ที่มาของปัญหา 1

    1.3 ผลงานการศึกษาในอดีต 2

    1.4 ขอบข่ายงานวิจัย 3

2. หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ 4

    2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 4

    2.2 วงจรพื้นฐานวัดแรงดันอิมพัลส์ 6

    2.3 คุณสมบัติที่ต้องการของระบบวัด 8

        2.3.1 ผลตอบสนองรูปขั้น 8

        2.3.2 สเกลแฟกเตอร์ 13

            2.3.2.1 ความหมายของสเกลแฟกเตอร์ 13

            2.3.2.2 การหาสเกลแฟกเตอร์ 14

    2.4 โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ 16

        2.4.1 วงจรสมมูลทั่วไป 17

        2.4.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 18

        2.4.3 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 19

    2.5 การต่อแมทชิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด 22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ 25
3.1 คุณลักษณะที่กำหนด 25
3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง 25
3.2.1 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 25
3.2.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 29
3.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ 33
3.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ 33
3.3.2 การเลือกแรงดันขาออก 33
3.3.3 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำ 34
3.3.4 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ 34
3.4 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน 36
3.4.1 การเลือกแรงดันขาออก 36
3.4.2 ตัวลดทอนแบบความต้านทาน 36
3.4.3 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ 38
4. การทดสอบและประเมินผล 40
4.1 การหาผลตอบสนองรูปขั้น 40
4.1.1 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 41
4.1.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 54
4.1.3 ตัวลดทอน 58
4.2 การหาสเกลแฟกเตอร์ 60
4.2.1 ระบบวัดแบบความต้านทาน 60
4.2.2 ระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ 61
4.3 การหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด (Determination of the assigned scale factor) และการทดสอบพฤติกรรมพลศาสตร์ (Dynamic behaviour test) 63
4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity test) 81
4.5 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (Withstand test) 87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ 89
5.1 สรุปผลงาน 89
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 91
รายการอ้างอิง 92
ภาคผนวก ก. 94
ประวัติผู้เขียน 96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

4.1 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน ที่ค่าความต้านทานหน่วงต่างๆ 42
4.2 พารามิเตอร์แรงดันรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวง 100 cm ที่ระดับความสูงต่างๆ 45
4.3 พารามิเตอร์แรงดันรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวง 150 cm ที่ระดับความสูงต่างๆ 47
4.4 พารามิเตอร์แรงดันรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวง 200 cm ที่ระดับความสูงต่างๆ 49
4.5 พารามิเตอร์ผลตอบสนองในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มและ รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น โดยคิดเวลาหน้าคลื่น $T_1 = 0.84$ μs 54
4.6 พารามิเตอร์ผลตอบสนองในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น โดยคิดเวลาหน้าคลื่น $T_C = 0.5$ μs 54
4.7 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ที่ค่าความต้านทานหน่วงต่างๆ 55
4.8 พารามิเตอร์ผลตอบสนองในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น 58
4.9 ค่าความต้านทานกระแสตรงขององค์ประกอบในระบบวัดแบบความต้านทาน 60
4.10 ค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ 62
4.11 ผลการทดสอบความไม่แน่นอนของดิจิตอลออสซิลโลสโคป 65
4.12 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบระหว่างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ HAEFELY กับอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น 66
4.13 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{min} 69
4.14 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{min} 69
4.15 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{max} 72
4.16 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{max} 72

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่

4.17 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{min} 75
4.18 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{min} 75
4.19 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{max} 78
4.20 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{max} 78
4.21 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับแกปทรงกลม ขั้วบวก 81
4.22 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับแกปทรงกลม ขั้วลบ 82
4.23 พารามิเตอร์ผลตอบสนองในกรณีวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น 83
4.24 ค่าความต้านทานกระแสตรงขององค์ประกอบในระบบวัดแบบความต้านทาน 85
4.25 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับแกปทรงกลม ขั้วบวก 86
4.26 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นเทียบกับแกปทรงกลม ขั้วลบ 86
5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง 89
5.2 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง 90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4

2.2 แรงดันอิมพัลส์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา 6

2.3 วงจรพื้นฐานของระบบวัดแรงดันทั่วไป 6

2.4 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด 8

2.5 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน 10

2.6 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง 12

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ T_α/T_X 12

2.8 ผลของความต้านทานของเคเบิลวัดที่มีต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 14

2.9 ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 15

2.10 ภาพสเกตช์ของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ 16

2.11 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์ 17

2.12 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 18

2.13 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 19

2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณ 20

2.15 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ 21

2.16 วงจรสมมูลของการต่อแมทชิงสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ 23

2.17 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ 24

3.1 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางการพันลวดความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำ 26

3.2 ตัวความต้านทานภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว 28

3.3 ภาพสเกตช์การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุย่อยและตัวความต้านทานย่อยแต่ละชั้น 30

3.4 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเมื่อ $R_1 = 0$ 31

3.5 ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว 32

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.6 ตัวความต้านทานภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว 34
3.7 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว 35
3.8 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบความต้านทาน 37
3.9 ตัวลดทอนแบบความต้านทานที่ประกอบเสร็จแล้ว 37
3.10 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ 38
3.11 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้ว 39
4.1 วงจรหาผลตอบสนองรูปขั้น 40
4.2 วงจรหาค่าเวลาขึ้นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น 40
4.3 ออสซิลโลกราฟของแรงดันจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น 41
4.4 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 41
4.5 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน ที่ค่าความต้านทานหน่วง (R_d) ต่างๆ 42
4.6 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของชีลด์ 44
4.7 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวง 100 cm ที่ระดับความสูง (h) ต่างๆ 45
4.8 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวง 150 cm ที่ระดับความสูง (h) ต่างๆ 47
4.9 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวง 200 cm ที่ระดับความสูง (h) ต่างๆ 49
4.10 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ที่ประกอบเสร็จแล้ว 51
4.11 ออสซิลโลกราฟแสดง g(t), T(t) และพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ที่ค่าความต้านทานหน่วง 150 Ω 52
4.12 ออสซิลโลกราฟแสดง g(t), T(t) และพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ที่ค่าความต้านทานหน่วง 270 Ω 53
4.13 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ที่ค่าความต้านทานหน่วง (R_d) ต่างๆ 55

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.14 ออสซิลโลกราฟแสดง g(t), T(t) และพารามิเตอร์ผลตอบสนองของ
โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความด้านทานหน่วง 57
4.15 วงจรหาผลตอบสนองรูปขั้นของตัวลดทอน 58
4.16 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของตัวลดทอน 59
4.17 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบความด้านทาน 61
4.18 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ 62
4.19 การติดตั้งระบบวัดแบบ Y ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ 64
4.20 วงจรทดสอบหาค่าความไม่แน่นอนของดิจิตอลออสซิโลสโคป 64
4.21 ออสซิลโลกราฟการวัดเปรียบเทียบระหว่างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ HAEFELY
กับอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น 67
4.22 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{min} 70
4.23 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{min} 71
4.24 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นเต็ม ขั้วบวก ที่ t_{max} 73
4.25 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นเต็ม ขั้วลบ ที่ t_{max} 74
4.26 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{min} 76
4.27 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{min} 77
4.28 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วบวก ที่ t_{max} 79

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.29 ออสซิลโลกราฟรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบวัดเปรียบเทียบ
รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น ขั้วลบ ที่ t_{max} 80
4.30 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ที่แรงดัน 600 kV ขั้วบวก 82
4.31 ออสซิลโลกราฟแสดง g(t), T(t) และพารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์
แบบความต้านทานมีชีลด์ หลังจากเปลี่ยนตัวความต้านทานภาคแรงต่ำใหม่ 84
4.32 ออสซิลโลกราฟผลตอบสนองรูปขั้นของตัวลดทอนแบบความต้านทานที่สร้างขึ้นใหม่ .. 85
4.33 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของตัวความต้านทานภาคแรงสูง 87

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย