รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด และคณะวิจัย

25 กุมภาพันธ์ 2545

โวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ขนาด 500 kV แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

สัญญาเลขที่ RTA/09/2539

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ
การพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

คณะผู้วิจัย	**สังกัด**
1. รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. นายประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการเมธีวิจัยอาวุโส รศ. ดร. สำรวย สังข์สะอาด

คำนำ

โครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน” นี้ เป็นโครงการวิจัยที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงการวิจัยเรื่อง “ผลของแรงดันเกินอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน” ซึ่งเป็นโครงการวิจัยในโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ที่ทำการศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันหน้าคลื่นสูง อันเกิดจากฟ้าผ่าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และทำให้ลูกถ้วยฉนวนประเภท B ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟเกิดเจาะทะลุ (puncture) ทำให้เกิดผิดพร่อง (fault) ขึ้นในระบบ มีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบ มาตรฐานสากล (IEC) มาตรฐานออสเตรเลีย และมาตรฐานแคนาดา จึงกำหนดให้มีการทดสอบการเจาะทะลุลูกถ้วยฉนวนประเภท B ด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่สร้างด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน และมาตรฐานได้แนะนำให้วัดแรงดันทดสอบอิมพัลส์หน้าคลื่นชันดังกล่าวด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ที่มีเวลาตอบสนองเร็ว แต่โครงการวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ยังไม่มีโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันตามที่มาตรฐานแนะนำ ฉะนั้นเพื่อให้ผลของการศึกษาวิจัยดังกล่าวถูกต้องตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด จึงสมควรอย่างยิ่งที่จะได้ทำการศึกษาพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน เพื่อการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน และการทดสอบเพื่อบริการวิชาการแก่ภาคอุตสาหกรรม รัฐวิสาหกิจ และหน่วยงานอื่นๆ ต่อไปในอนาคต

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ วัดแรงดันสูงอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เริ่มต้นมาตั้งแต่ปี 2524 โดยเริ่มต้นที่แรงดัน 300 kV และได้มีการพัฒนาออกแบบที่ระดับแรงดันสูงขึ้นเป็นลำดับ ควบคู่กับการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และมีรูปแบบต่างๆ อีกหลายโครงการ ซึ่งล่าสุดได้พัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1000 kV แบบความต้านทาน เมื่อปี 2539 และแบบตัวเก็บประจุเมื่อปี 2541 ประสบผลสำเร็จอย่างดียิ่ง โดยมีคุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ เป็นผู้วิจัยหลักและวิจัยร่วม จากการศึกษาวิจัยออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ดังกล่าวได้ก่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจทั้งภาคทฤษฎีและปฏิบัติอย่างชัดเจน และทันต่อเหตุการณ์ ทั้งนี้เพราะมาตรฐานสากลเกี่ยวกับโวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์ ได้มีการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดและคุณสมบัติให้มีความเข้มงวดมากขึ้นหลายประการ เช่น กำหนดเวลาตอบสนองสั้นลง เงื่อนไขสเกลแฟกเตอร์หรืออัตราส่วนแรงดันมีมากขึ้น กำหนดความเป็นเชิงเส้นและเสถียรภาพต้องมั่นคงมากขึ้น ถึงแม้มาตรฐานจะมีข้อกำหนดเข้มงวดเพียงใด การออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูงก็ประสบความสำเร็จตามเป้ามาย มีคุณสมบัติได้ตามเกณฑ์ที่มาตรฐานใหม่กำหนดทุกประการ และผลงานได้ติดตั้งใช้งานคู่กับ

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้อย่างมีประสิทธิภาพจนถึงปัจจุบัน (2545)

โดยเหตุที่โวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน มาตรฐานได้กำหนดลักษณะสมบัติเข้มงวดและพิเศษมากยิ่งกว่าอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ธรรมดา เพราะโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องวัดแรงดันที่มีเวลาหน้าคลื่นเพียง 100-200 ns มีความผิดพลาดการวัดไม่เกิน 5% มีเวลาตอบสนองบางส่วน $T_\alpha \leq 3$ ns ค่าอัตราส่วนแรงดันผิดพลาดไม่เกิน 2% ควรมีความสูง < 1 m. เพื่อลดผลของความจุไฟฟ้าสเตรย์ ฉะนั้นการพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ต้องอาศัยประสบการณ์และความรู้จริงเกี่ยวกับโวลเตจดิไวเดอร์ เมื่อพิจารณาถึงผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ดังกล่าว จะพบว่าคุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ จบการศึกษาปริญญาโทจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2539 เป็นวิศวกรรมประจำการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์สูงในด้านนี้คนหนึ่งของประเทศในปัจจุบัน (2545) พอดีกับการได้รับทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีความสามารถสูง หัวหน้าโครงการจึงได้เชิญคุณประเสริฐมาเป็นผู้ดำเนินการวิจัยโครงการนี้ ในฐานะนักวิจัยรุ่นใหม่

การพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ประสบผลสำเร็จตามเป้าหมาย มีลักษณะสมบัติได้ตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดทุกประการ สามารถใช้วัดแรงดันทดสอบอิมพัลส์หน้าคลื่นชันในโครงการพัฒนาออกแบบสร้างลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลนคอตันชั้นเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลของการศึกษาวิจัยก่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีในด้านนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถภาพของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในด้านบริการวิชาการทดสอบ และเป็นต้นแบบให้สถาบันการศึกษาอื่นๆ ได้นำไปศึกษาและพัฒนาให้มีคุณสมบัติดียิ่งขึ้นต่อไปได้

รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
เมธีวิจัยอาวุโส สกว.
หัวหน้าโครงการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จได้โดยได้รับการสนับสนุนในด้านเงินทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) หัวหน้าโครงการจึงขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อนุญาติให้นายประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ มาร่วมโครงการวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ให้การสนับสนุนและช่วยประสานการติดต่อกับสำนักงาน สกว. และขอขอบคุณอย่างมากแด่คุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ ที่ได้กรุณาทำการศึกษาวิจัยโครงการนี้ได้สำเร็จ และช่วยเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์เป็นที่เรียบร้อย และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้โครงการศึกษาวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ

หัวหน้าโครงการ

รายงานวิจัย

รหัสโครงการ	**:**	HVE 41-01
โครงการ	**:**	การพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน
คณะผู้วิจัย	**:**	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) นายประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย)
ระยะเวลาที่ทำการวิจัย	**:**	ตุลาคม 2541 – ธันวาคม 2545
วัตถุประสงค์	**:**	เพื่อออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขนาด 500 kV แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง โดยมีลักษณะสมบัติตามมาตรฐาน IEC กำหนด

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยฉบับนี้เสนอการออกแบบและประกอบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 500 kV สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง โดยภาคแรงสูงประกอบด้วยตัวเก็บประจุย่อยชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์มต่อนุกรมกัน บรรจุอยู่ในท่อพีวีซีสูง 1 m. มีค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 387.0 pF เวลาตอบสนองบางส่วนของระบบวัดมีค่า 2.2 ns และได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ 14,412 ทำการทดสอบหาคุณสมบัติที่เหลือของโวลเตจดิไวเดอร์ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC60-2 (1994) ได้แก่ ผลกระทบของอุณหภูมิ ผลกระทบของวัตถุรอบข้าง ความเป็นเชิงเส้น เสถียรภาพระยะสั้นและความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 110 % ของแรงดันพิกัด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนด

คำสำคัญ : อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์, แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

Research Report

Project code : HVE 41-01

Project title : Development of Voltage Divider for Steep Front Impulse Voltage Measurement.

Investigators : Assoc. Prof. Dr. Samruay SANGKASAAD, (Chulalongkorn University).
Mr. Prasert Rungsrisopon-Arporn, (Electricity Generating Authority of Thailand).

Project Period : October 1998 – December 2001

Objective : To develop voltage divider 500 kV damped capacitor type for steep front impulse voltage measurement in accordance with IEC standard specifications.

Abstract

This report presents the design and construction of 500 kV damped capacitor voltage divider for steep front impulse voltage measurement. The high voltage arm, installed in a PVC tube with 1 m. high, consists of a large number of small polyester film capacitors connected in series which gives the effective capacitance of 387.0 pF. The partial response time of the measuring system is 2.2 ns and its scale factor is 14,412. The other characteristics of the voltage divider were carried out in accordance with IEC 60-2 (1994), including temperature effect, proximity effect, linearity, short-term stability and withstand voltage test at 110 % of rated voltage. The test results show that the constructed impulse voltage divider characteristics meet the requirements of standard specifications.

Keywords : Impulse voltage divider, Steep impulse voltage .

สารบัญ

หน้า

คำนำ I

กิตติกรรมประกาศ III

บทคัดย่อภาษาไทย IV

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ V

สารบัญ VI

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูป IX

บทที่ 1 บทนำ .....

1.1 บทนำทั่วไป 1

1.2 ที่มาของปัญหา 1

1.3 ผลงานในอดีต 1

1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายงานวิจัย 2

บทที่ 2 หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์ 4

2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นแรงดัน 4

2.2 วงจรพื้นฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์ 6

2.3 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของระบบวัด 8

2.3.1 ผลตอบสนองรูปขั้น 8

2.3.2 สเกลแฟกเตอร์ 11

2.4 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์ 15

2.4.1 วงจรสมมูลทั่วไป 15

2.4.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 16

2.5 การต่อแมทชิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด 21

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ 24

3.1 ลักษณะที่กำหนด 24

3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง 24

3.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ 27

3.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ 27

3.3.2 การเลือกค่าแรงดันขาออก 28

3.4 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน 28

3.5 การออกแบบและสร้างตัวความต้านทานหน่วงในสายนำ 31

บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล 32

4.1 การหาผลตอบสนองรูปขั้น 32

4.1.1 โวลเตจดิไวเดอร์ 32

4.1.2 ระบบวัด 33

4.2 การหาสเกลแฟกเตอร์ 35

4.3 การหาผลกระทบของอุณหภูมิ 37

4.4 การหาผลกระทบของวัตถุรอบข้าง 38

4.5 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น 38

4.6 การทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น 39

4.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 39

4.8 การทดลองใช้งานจริง 40

บทที่ 5 สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ 43

5.1 สรุปผลงาน 43

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 44

การสร้างทีมวิจัย 45

เอกสารอ้างอิง 46

ผลงานที่ตีพิมพ์ 48

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัด 34
4.2 ค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัด 35
4.3 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบด้วยแรงดันกระแสสลับที่ระดับแรงดัน 50 kV 37
5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง 43
5.2 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง 43

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4
2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 5
2.3 แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 6
2.4 วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันอิมพัลส์ 6
2.5 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด 8
2.6 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน 10
2.7 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง 12
2.8 ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล Ceq ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 13
2.9 ภาพสเกตช์ของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ 14
2.10 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์ 15
2.11 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 16
2.12 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วนที่ได้จากการคำนวณ 17
2.13 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วนที่ได้จากการทดลอง 18
2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ที่ได้จากการคำนวณ 19
2.15 ผลของตัวความต้านทานหน่วงในสายนำที่มีผลต่อผลตอบสนองรูปขั้นของ โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง 20
2.16 ผลของการปรับค่าคงตัวเวลาที่มีผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบ ตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง 21
2.17 วงจรสมมูลของการต่อแมทชิงสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ 22
2.18 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ 23
3.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสเกลแฟกเตอร์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างจากผนังที่มี ศักดิ์เป็นดินไปที่ระยะต่างๆ 25
3.2 ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ประกอบสร้าง 26
3.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว 29
3.4 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ 30
3.5 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้ว 31

รูปที่ **หน้า**

3.6 ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำที่ประกอบเสร็จแล้ว 31

4.1 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์ 32

4.2 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ค่าความเหนี่ยวนำต่างๆ 33

4.3 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขั้นของระบบวัด 34

4.4 ผลการจำลองหาค่าความผิดพลาดในการวัดค่ายอดเนื่องจากผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีคอนโวลูชัน 35

4.5 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ 36

4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ 37

4.7 ผลกระทบของวัตถุรอบข้าง 38

4.8 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด 39

4.9 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ 40

4.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่บันทึกได้ 41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบแรงดันสูงส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมด เป็นแบบสายขึงในอากาศ ซึ่งใช้ลูกถ้วยฉนวนเป็นตัวยึดหรือรองรับสายไฟ ฉะนั้น ลูกถ้วยฉนวนเหล่านี้จึงมีโอกาสได้รับแรงดันเกินอิมพัลส์จากฟ้าผ่า หากเนื้อลูกถ้วยฉนวนมีคุณสมบัติทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าไม่ได้ จะทำให้ลูกถ้วยเสียหายเกิดการเจาะทะลุ (Puncture) เนื้อพอร์ซเลน ลูกถ้วยจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร และเป็นต้นเหตุให้เกิดการผิดพร่อง (Fault) ขึ้นในระบบส่งจ่าย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานต้องหยุดชะงัก มีผลกระทบต่อเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย นับเป็นผลเสียต่อเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้น มาตรฐานในปัจจุบัน [1,2] จึงได้เพิ่มข้อกำหนดคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน (Steep-front impulse voltage) ได้ การทดสอบดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันและระบบวัดแรงดันเฉพาะ ซึ่งต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศด้วยราคานำเข้าที่แพงมาก

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันลูกถ้วยฉนวนหลายชนิดสามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ แต่เนื่องจากไม่มีสถาบันใดในประเทศที่สามารถทำการการทดสอบดังกล่าวได้ เพราะไม่มีอุปกรณ์ชุดทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจึงได้เริ่มพัฒนาออกแบบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขึ้นในปี 2538 และประสบผลสำเร็จตามเป้าหมายของการพัฒนาเมื่อปี 2541 [3] และได้ใช้ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่สร้างขึ้นทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่องในหัวข้อเรื่องผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อลูกถ้วยฉนวน มาตรฐานได้แนะนำให้ใช้โวลเตจดิไวเดอร์ที่มีเวลาตอบสนองเร็วในการวัดค่าแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน แต่โครงการวิจัยนี้ยังไม่มีโวลเตจ-ดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันตามที่มาตรฐานแนะนำ ฉะนั้น เพื่อให้ผลของการศึกษาวิจัยดังกล่าวถูกต้องตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด จึงสมควรที่จะได้ทำการศึกษาออกแบบ สร้างโวลเตจดิไวเดอร์ดังกล่าว

1.3 ผลงานในอดีต

ที่หน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้เคยออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ มาแล้วมีดังนี้

1) โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์ขนาด 1000 kV [4] โดยโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นได้ค่าเวลาตอบสนอง 14 ns โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นการศึกษาสืบเนื่องจากแบบความต้านทานขนาด 300 kV [5] ที่ได้ค่าเวลาตอบสนอง 17 ns และเมื่อใส่ชีลด์ได้ค่าเวลาตอบสนอง 10 ns ซึ่งโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นทั้ง 2 ตัวเหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าทั้งรูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น อย่างไรก็ตาม โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้มีข้อเสียคือ เวลาตอบสนองจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานภาคแรงสูงและค่าเก็บประจุสเตรย์ โดยค่าความต้านทานภาคแรงสูงต้องมีค่าสูงมากพอ เพราะถ้ามีค่าน้อยเกินไปจะมีผลทางด้านความร้อนและเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จนบางครั้งอาจทำให้ไม่สามารถปรับรูปคลื่นให้มีค่าตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ในขณะที่ค่าเก็บประจุสเตรย์จะเพิ่มขึ้นตามความสูง ซึ่งหมายถึงเวลาตอบสนองก็จะช้าลง

2) โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ชนิดที่ภาคแรงสูงเป็นตัวเก็บประจุเดี่ยวขนาด 400 kV [6] กรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุเดี่ยวเหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ แต่มีข้อเสียคือ ใช้บันทึกรูปคลื่นแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นได้ไม่ดีนัก และเมื่อใช้โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้กับระบบแรงดันที่สูงมากๆ โครงสร้างของโวลเตจดิไวเดอร์จะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงและเป็นปัญหาในการออกแบบสร้าง

3) โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงขนาด 1000 kV [7] โดยโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นได้ค่าเวลาตอบสนอง 12 ns โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นการศึกษาสืบเนื่องจากแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงขนาด 400 kV [8] โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงกระจายในภาคแรงสูงมีข้อดีคือ ใช้บันทึกรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดี เนื่องจากในภาวะทรานเซียนต์ โวลเตจดิไวเดอร์จะมีคุณสมบัติการถ่ายโอนเหมือนกับโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน และสามารถใช้กับระบบแรงดันสูงมากๆ ได้โดยที่โครงสร้างของโวลเตจดิไวเดอร์มีขนาดไม่ใหญ่นัก

1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ให้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันได้ถึง 500 kV โดยมีลักษณะสมบัติตามที่ IEC 1211 (1994) [9] กำหนดคือ

1) ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนของระบบวัดไม่รวมออสซิลโลสโคป มีค่าไม่เกิน 3 ns

2) ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ระบุมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 2 %

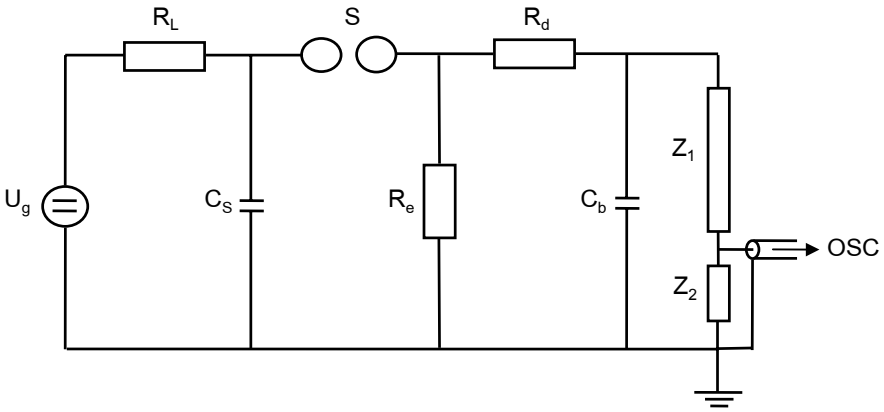
ในที่นี้ เลือกค่าสเกลแฟกเตอร์ประมาณ 625 โดยทำการออกแบบสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกัน มีตัวความต้านทานหน่วงต่ออนุกรมกระจายภายในภาคแรงสูง และเพื่อให้สามารถใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปวัดและบันทึกรูปคลื่นได้ จะทำการออกแบบสร้างตัวลดทอนในภาคแรงต่ำขึ้น โดยมีค่าสเกลแฟกเตอร์ประมาณ 20 เมื่อประกอบสร้างเสร็จแล้ว จะทำการศึกษาผลตอบสนองรูป

ขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์พร้อมกับหาค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนอง หาค่าสเกลแฟกเตอร์โดยใช้วิธีวัดค่าอิมพีแดนซ์ และลักษณะสมบัติอื่นตามที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [10] กำหนด

บทที่ 2
หลักการวัดแรงดันอิมพัลส์

2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์และรูปคลื่นแรงดัน

แรงดันอิมพัลส์ในที่นี้จะหมายถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ [11] ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ในรูปวงจร

U_g = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย

R_L = ตัวความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

C_S = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

S = สปาร์กแกป

R_e = ตัวความต้านทานคายประจุ

R_d = ตัวความต้านทานหน่วง

C_b = ตัวเก็บประจุโหลด

Z_1 = อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_2 = อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่สร้างจากวงจรทรานเซียนต์ RC สมการของแรงดันที่ได้จากวงจรสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันทางเวลาได้ว่า [11]

$$U(t) = \frac{U_0}{K} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot \left(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}\right) \qquad (2.1)$$

โดย U_0 = แรงดันอัดประจุ

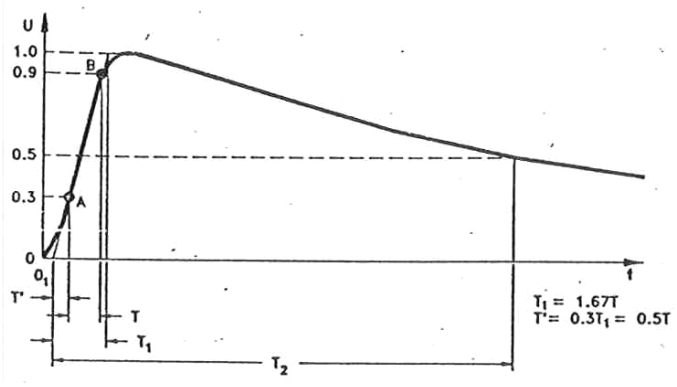
$K = R_d C_b$

แรงดันอิมพัลส์จะแปรตามเวลาและมีค่าคงตัวเวลาอยู่ 2 ค่าคือ ค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_2$ จะมีผลต่อช่วงเวลาหน้าคลื่น (T_1) และค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ จะมีผลต่อช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานอาจมีรูปคลื่นเต็มหรือรูปคลื่นตัด ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มจะเรียกอย่างสั้นๆ ว่าแรงดันรูปคลื่น T_1/T_2 โดย $T_1 = 1.2\ \mu s \pm 30\ \%$ และ $T_2 = 50\ \mu s \pm 20\ \%$ ซึ่งจะได้ค่าคงตัวเวลาเป็น

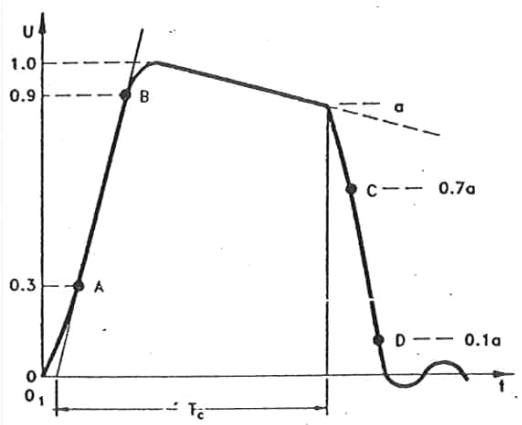
$$1/\alpha_1 = 68.2\ \mu s$$

$$1/\alpha_2 = 0.4\ \mu s$$

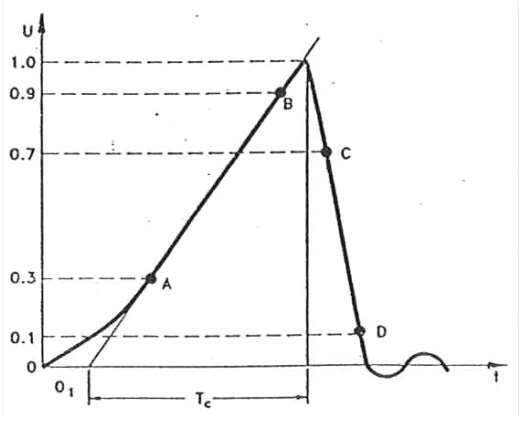
ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดจะกำหนดด้วยเวลาคลื่นตัด T_C โดยรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นจะมีเวลาคลื่นตัด $T_C \geq 2\ \mu s$ ส่วนรูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นจะมีเวลาคลื่นตัดอยู่ในช่วง $0.5\ \mu s \leq T_C < 2\ \mu s$ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มและรูปคลื่นตัดตามมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



ก)



ข)



ค)

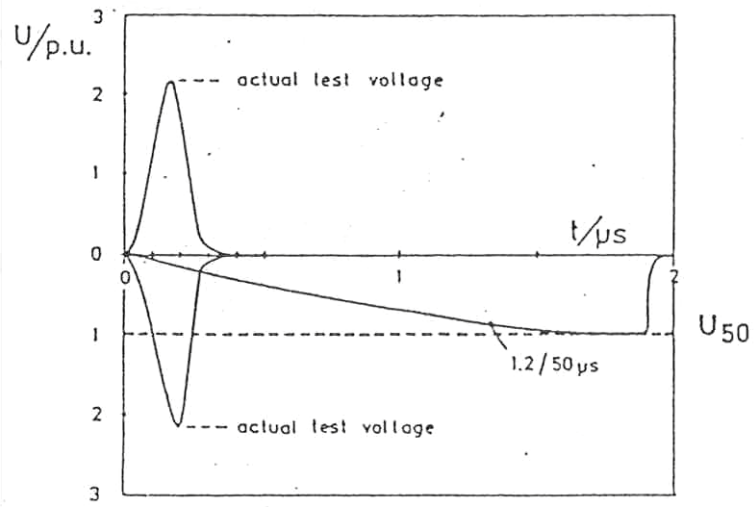
รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า [12]

ก) รูปคลื่นเต็ม

ข) รูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

ค) รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

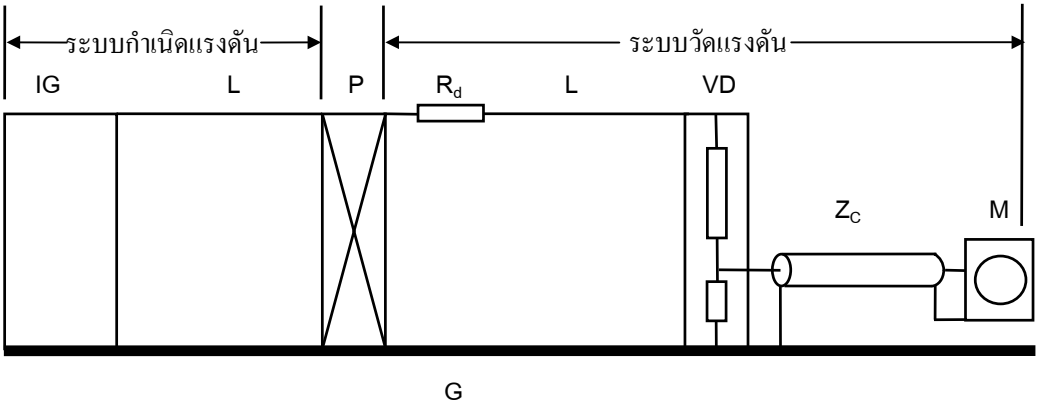
ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 [13]



รูปที่ 2.3 แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันเมื่อเปรียบเทียบกับ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า [13]

2.2 วงจรพื้นฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานการวัดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วยสายนำ (L) ต่อจากจุดที่ต้องการวัดแรงดันสูง เช่น วัสดุทดสอบ P ซึ่งอาจมีตัวความต้านทานหน่วง R_d ต่ออยู่ที่ต้นสายนำหรือที่อิเล็กโทรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ VD เคเบิลวัด Z_C อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น M และระบบวัดจะต้องมีระบบสายดิน G ที่ดี ดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของระบบทดสอบแรงดันอิมพัลส์

จากวงจรในรูปที่ 2.4 องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

1) ตัวความต้านทานหน่วง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในภาวะทรานเซียนต์ที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดิไวเดอร์ ตัวความต้านทานหน่วงที่ใช้เป็นแบบไร้ความเหนี่ยวนำ โดยอาจต่อที่ต้นสายนำหรือที่อิเล็กโทรดแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ในกรณีที่สายนำมีความยาวมาก การต่อตัวความต้านทานหน่วงที่ต้นสายนำ โดยให้มีค่าประมาณเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำ จะช่วยหน่วงการแกว่งที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากันของสายนำกับวงจรกำเนิดแรงดันและโวลเตจดิไวเดอร์ [11]

2) สายนำระหว่างวัสดุทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์ โดยทั่วไปโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องอยู่ห่างจากวัสดุทดสอบ โดยสายนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อโวลเตจดิไวเดอร์ลง ขนาดของสายนำควรมีขนาดโตพอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งจะเป็นคลื่นรบกวนต่อระบบวัดแรงดันได้ ในวงจรทดสอบทั่วไป สายนำมักอยู่ในแนวระดับ เวลาคลื่นจร τ_L มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วแสง c เนื่องจาก $Z_L = \sqrt{L_L/C_L}$ และ $\tau_L = \sqrt{L_L C_L} = l/c$ โดย L_L คือค่าความเหนี่ยวนำ C_L คือค่าเก็บประจุและ l คือความยาวของสายนำ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ว่า $Z_L = l/cC_L$ ค่าเก็บประจุของสายนำสามารถคำนวณได้ โดยสมมติว่าสายนำเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง d วางอยู่สูง H เหนือระนาบดิน สมการหาค่าเก็บประจุของสายนำคือ [11]

$$C_L = \frac{2\pi\varepsilon_O l}{A} \qquad (2.2)$$

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

เนื่องจาก $c = 1/\sqrt{\mu_o\varepsilon_o}$ เมื่อ μ_O และ ε_O คือค่าเพอร์มีบิลิตีและค่าเพอร์มิตติวิตีของอวกาศ ตามลำดับ ดังนั้น จะได้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายนำเป็น

$$Z_L = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_O}{\varepsilon_O}}A \approx 60A \qquad (2.3)$$

3) โวลเตจดิไวเดอร์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมา ให้มีขนาดอยู่ในย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์มายังอุปกรณ์วัด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไป เป็นแบบแกนร่วม (Coaxial cable) ที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ

5) อุปกรณ์วัดและบันทึกรูปคลื่น อาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดหรือออสซิลโลสโคป โดยทั่วไปอุปกรณ์เหล่านี้จะอยู่ในห้องที่มีชีลด์ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

6) ระบบสายดิน ทำหน้าที่เชื่อมจุดต่อลงดินของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ปกติสายดินจะเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้แรงดันตกในสายดินมีค่าน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้แผ่นโลหะบาง เช่น แผ่นทองแดง

2.3 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของระบบวัด

เพื่อให้ผลการวัดขนาดและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันมีความถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีระบบวัดที่ดี ซึ่งลักษณะสมบัติของระบบวัดแรงดันทั่วไป จะพิจารณาจากลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ

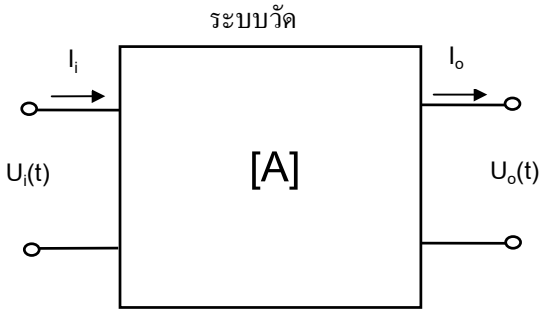
1) ผลตอบสนองรูปขั้น

2) สเกลแฟกเตอร์

2.3.1 ผลตอบสนองรูปขั้น

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติการถ่ายโอน (Transfer characteristic) ของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ขึ้นกับความถี่ได้ดีขึ้น จึงควรที่จะได้ทราบถึงคำจำกัดความหรือความหมายที่เกี่ยวข้องบางประการเสียก่อน

โวลเตจดิไวเดอร์ถือเป็นองค์ประกอบเชิงเส้นแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยข่ายวงจร 4 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ข่ายวงจร 4 ขั้วที่เขียนแทนระบบวัด

ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาเข้าและขาออกในเชิงความถี่ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} U_i(s) \\ I_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(s) & A_{12}(s) \\ A_{21}(s) & A_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \qquad (2.4)$$

เมื่อ s คือ ตัวแปลงลาปลาซ

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

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{A_{11}(s)} \qquad (2.5)$$

โดยค่า H(s) จะแทนผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของระบบในเชิงความถี่ ที่ย่านความถี่ต่ำๆ แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่ที่แอมพลิจูดมีค่า

เปลี่ยนแปลงไป ± 3 dB เรียกว่าความถี่จำกัด (Limit frequency) [10] ดังนั้น จึงสามารถเขียนแทนฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ (Normalized transfer function) ได้ด้วย

$$h(s) = \frac{A_{11}(0)}{A_{11}(s)} \tag{2.6}$$

เนื่องจากโวลเตจดิไวเดอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์ค่อนข้างสูง ดังนั้น การหาผลตอบสนองแอมพลิจูด/ความถี่ (Amplitude/frequency response) จึงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติคือ การหาผลตอบสนองรูปขั้น (Unit step response) G(t) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s}H(s)\right] \tag{2.7}$$

จากผลตอบสนองรูปขั้นที่ได้สามารถคำนวณหาค่าแรงดันขาออกจากแรงดันขาเข้า $U_i(t)$ ใดๆ ได้จาก [14]

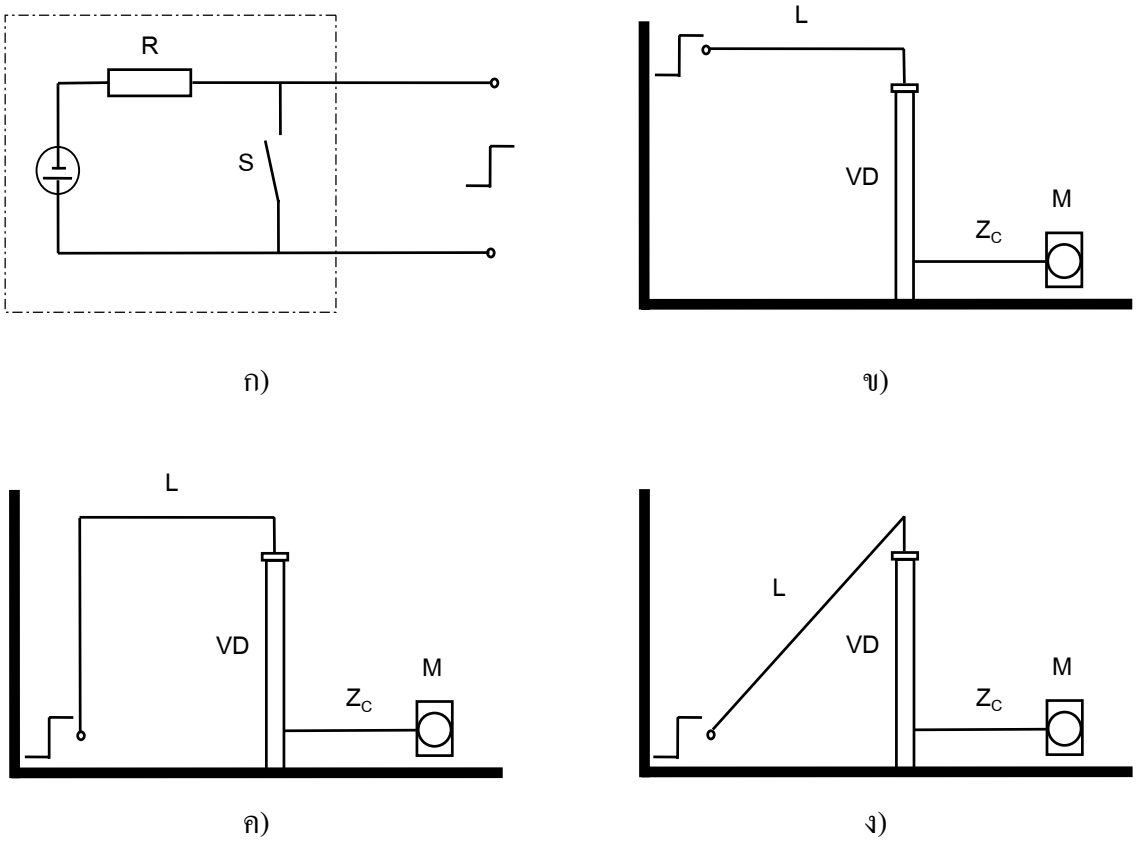
$$U_o(t) = \int_0^t U_i'(t-\tau)\cdot G(\tau)\cdot d\tau \tag{2.8}$$

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

เวลาตอบสนองของระบบวัดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์ ดังสมการ (2.9)

$$T_N = \lim_{s\to 0}\left[\frac{1-h(s)}{s}\right] \tag{2.9}$$

วงจรที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองรูปขั้นตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [10] แสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรวัดผลตอบสนองรูปขั้นสำหรับระบบวัดแรงดัน

ก) วงจรสร้างแรงดันรูปขั้น

ข) – ง) วงจรแบบต่างๆ

มาตรฐานกำหนดนิยามพารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นไว้ ดังนี้

1) พารามิเตอร์ผลตอบสนอง (Response parameters) หมายถึง พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการวัดผลตอบสนองรูปขั้นโดยวิธีที่กำหนด

2) จุดเริ่มต้นเสมือนของผลตอบสนองรูปขั้น O_1 (Virtual origin of a step response) หมายถึง จุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากทาบกับส่วนที่ชันที่สุดของหน้าคลื่นของผลตอบสนองรูปขั้น ในกรณีที่มีการแกว่งช่วงหน้าคลื่น จะใช้เส้นเฉลี่ยลากผ่านส่วนที่เกิดการแกว่งและใช้เส้นนี้ในการหาเส้นตรง

3) ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ g(t) (Normalized step response) หมายถึง ผลตอบสนองรูปขั้นที่นอร์มัลไลซ์ให้ระดับอ้างอิงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย (ดูรูปที่ 2.7ก)

4) อินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้น T(t) (Step response integral) หมายถึง อินทีกรัลจาก O_1 ถึง t ของ 1 ลบด้วยผลตอบสนองรูปขั้น g(t) (ดูรูปที่ 2.7ข)

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

5) เวลาตอบสนองจากการทดลอง T_N (Experimental response time) หมายถึง ค่าอินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่ t_{max}

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

6) เวลาตอบสนองบางส่วน T_α (Partial response time) หมายถึง ค่าสูงสุดของอินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้น

7) เวลาตอบสนองคงเหลือ $T_R(t_i)$ (Residual response time) หมายถึง เวลาตอบสนองลบด้วยค่าของอินทีกรัลผลตอบสนองรูปขั้นที่เวลาที่กำหนด t_i โดย $t_i < t_{max}$

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

8) ส่วนพุ่งเกิน β (Overshoot) หมายถึง ค่าสูงสุดของผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ g(t) ที่เกินหนึ่งหน่วย

9) เวลาผิดเพี้ยนเริ่มต้น T_O (Initial distortion time) หมายถึง พื้นที่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์, ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์ g(t) และเส้นตรงที่ใช้หา O_1

10) เวลาเข้าสู่ภาวะคงตัว t_s (Settling time) หมายถึง เวลาที่สั้นที่สุดที่เวลาตอบสนองคงเหลือ $T_R(t_i)$ มีค่าน้อยกว่า 2 % ของ t

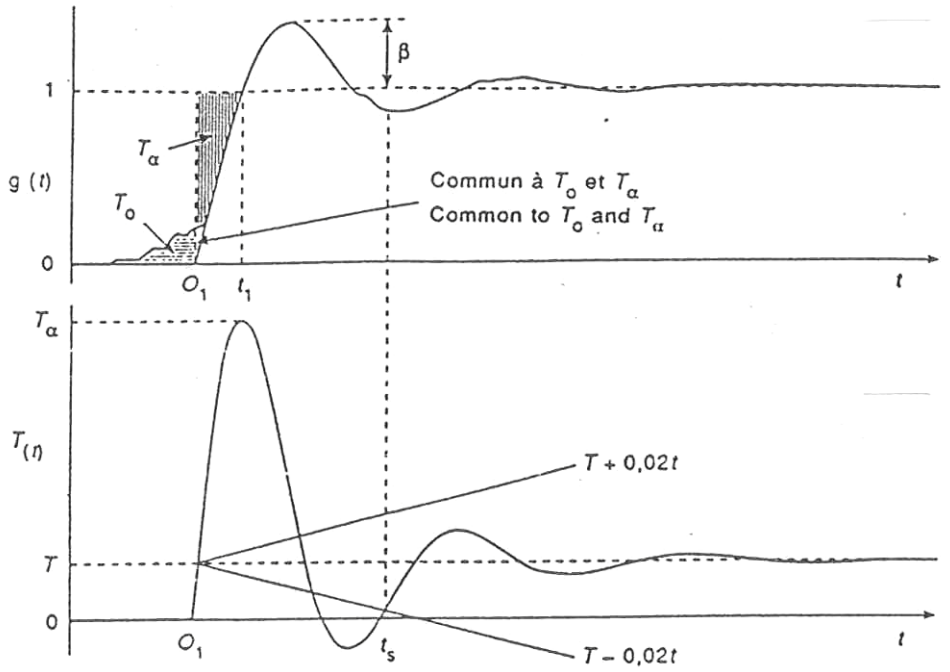
$$\left(T_N - T(t)\right) \quad < \quad 0.02 t_S$$

สำหรับทุกๆ ค่าของ t ในช่วงจาก t_S ถึง t_{max}

2.3.2 สเกลแฟกเตอร์

มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [10] นิยามความหมายของสเกลแฟกเตอร์หรืออัตราส่วนแรงดันของระบบวัดไว้ ดังนี้

“สเกลแฟกเตอร์ หมายถึง ตัวประกอบที่นำไปคูณกับค่าแรงดันที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัด เพื่อหาค่าแรงดันป้อนเข้า”



รูปที่ 2.7 นิยามของพารามิเตอร์ผลตอบสนอง [10]

ก) เมื่อเทียบกับ g(t)

ข) เมื่อเทียบกับ T(t)

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ สามารถหาได้จากวิธีใดวิธีหนึ่งต่อไปนี้

1) การวัดค่าแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกัน

2) ใช้วงจรบริดจ์

3) คำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

การหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์โดยการใช้วิธีคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ มีข้อควรระมัดระวัง ดังนี้

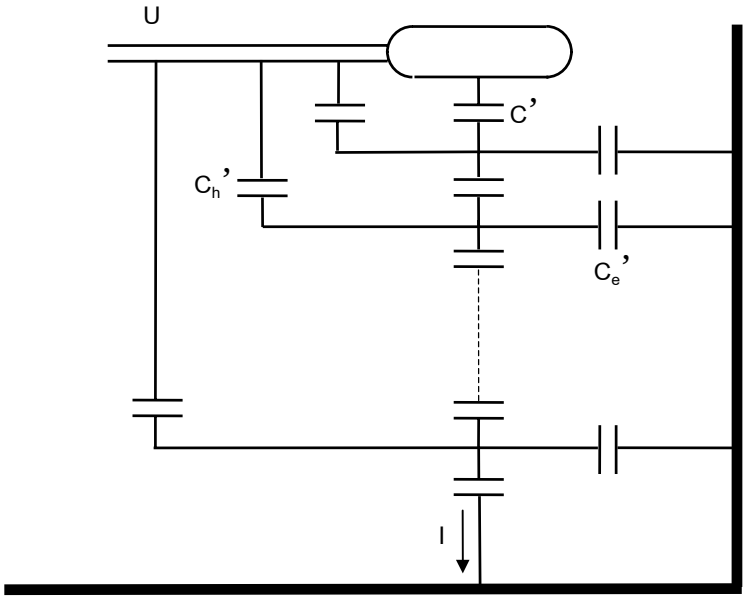
ในกรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ค่าเก็บประจุสเตรย์จะมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งตัวที่กำหนดสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์คือ กระแสที่ไหลไปยังภาคแรงต่ำ รูปที่ 2.8 แสดงภาพสเกตช์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง ซึ่งประกอบด้วยค่าเก็บประจุย่อย C' ต่ออนุกรมกันและมีค่าเก็บประจุสเตรย์ C_h' และ C_e' ต่ออยู่ในจำนวนที่เท่ากัน

ในภาวะคงตัว สามารถหาค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จาก [11]

$$C_{eq} = \frac{I}{\omega U} \qquad (2.10)$$

$$C_{eq} = C\frac{1+\frac{C_h}{4C}}{1+\frac{C_e}{6C}+\frac{C_h}{12C}} \qquad (2.11)$$

โดย $C = C'/n;\ C_e = nC_e';\ C_h = nC_h';\ n >> 1$



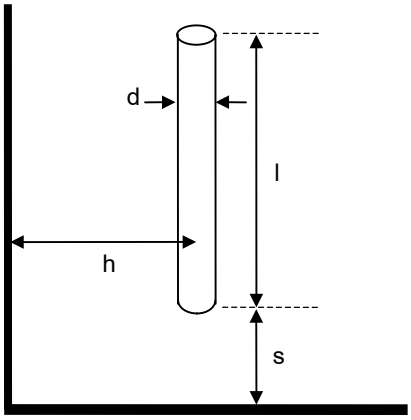
รูปที่ 2.8 ภาพสเกตช์ของค่าเก็บประจุสมมูล C_{eq} ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

เนื่องจาก C_h มีค่าน้อยกว่า C_e มาก ดังนั้น C_{eq} จึงมีค่าน้อยกว่า C เสมอ และถ้าให้ $C_h = 0$ จะสามารถประมาณ C_{eq} ได้เป็น

$$C_{eq} = C\frac{1}{1+\frac{C_e}{6C}}$$

$$C_{eq} \approx C\left(1-\frac{C_e}{6C}\right) \qquad (2.12)$$

ค่า C_e สามารถหาได้จากการคำนวณ โดยสมมุติให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงเป็นท่อโลหะทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ ดังภาพสเกตช์ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพสเกตช์ของท่อทรงกระบอกวางอยู่เหนือพื้นระนาบ

ค่าเก็บประจุสเตรย์จะหาได้จากความสัมพันธ์ [14]

$$C_e = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{d}\sqrt{\frac{\sqrt{l^2+(4h)^2}-l}{\sqrt{l^2+(4h)^2}+l}}\sqrt{\frac{1+\sqrt{1+(4h/[4s+3l])^2}}{1+\sqrt{1+(4h/[4s+l])^2}}}\right)}$$

หรือ

$$C_e = \frac{2\pi\varepsilon l}{k_1 - k_2 - k_3} \tag{2.13}$$

โดย $k_1 = \ln\frac{4h}{d}$

$$k_2 = \ln\frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{4h}{l}\right)^2}\right)$$

$$k_3 = \frac{1}{2}\ln\frac{1+\sqrt{1+([4h/l]/[1+4s/l])^2}}{1+\sqrt{1+([4h/l]/[3+4s/l])^2}}$$

ในกรณีที่ $h >> l$ และ $h >> s$ จะสามารถประมาณค่าเก็บประจุสเตรย์ได้เป็น

$$C_e = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{d}\sqrt{\frac{4s+l}{4s+3l}}\right)} \tag{2.14}$$

เนื่องจากไม่สามารถวัดค่า C_h และ C_e ได้โดยตรง ดังนั้น การวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูงควรจะวัดในตำแหน่งที่โวลเตจดิไวเดอร์ใช้งานจริง สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุหรือแบบตัวเก็บประจุมี

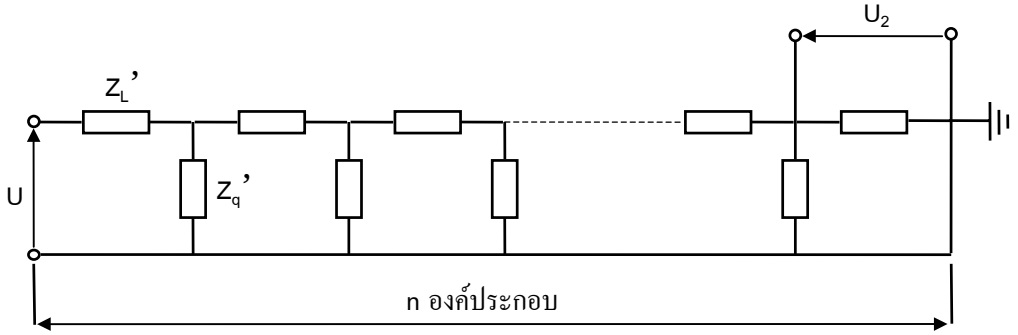
ความต้านทานหน่วง ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงอาจวัดโดยใช้ Schering bridge หรือ Transformer ratio-arm bridge โดยไม่แนะนำให้ใช้ RLC bridge แรงต่ำ เพราะสายวัดและค่าเก็บประจุสเตรย์จะรวมเข้าไปในการวัด ซึ่งทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ได้ผิดพลาด นอกจากนี้ ค่าเก็บประจุของเคเบิลวัดยังมีผลต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งต้องนำเข้ามาคิดด้วย

2.4 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์

โวลเตจดิไวเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่งของระบบวัดแรงดัน การออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์จะต้องพิจารณาถึงระดับแรงดันใช้งาน ชนิดของแรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า [15] โดยทั่วไป โวลเตจดิไวเดอร์จะประกอบสร้างจากตัวความต้านทานหรือตัวเก็บประจุหรือแบบผสม องค์ประกอบเหล่านี้จะติดตั้งอยู่ในกระบอกฉนวน ซึ่งความสูงจะขึ้นอยู่กับแรงดันวาบไฟตามผิวของแรงดันที่ใช้งาน ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะใช้ระยะวาบไฟตามผิวหรือระยะฉนวน โดยเลือกใช้ระยะอาร์กตามผิวฉนวนจำเพาะ 2 ถึง 2.5 m/MV [11]

2.4.1 วงจรสมมูลทั่วไป

วงจรสมมูลทั่วไปของโวลตจดิไวเดอร์จะประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยต่อกันในลักษณะเป็นลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 [11]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์

โดยองค์ประกอบย่อย Z_L' จะแทนองค์ประกอบที่ต้องการสร้าง ซึ่งอาจเป็นตัวความต้านทาน R' หรือตัวเก็บประจุ C' หรือทั้ง 2 อย่าง ส่วนองค์ประกอบย่อย Z_q' จะแทนค่าเก็บประจุสเตรย์ลงดิน C_e' ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของโวลเตจดิไวเดอร์ ค่าอิมพีแดนซ์รวมสามารถหาได้จาก

$$Z_L = \sum Z_L' = nZ_L'$$
$$Z_q = \sum \left(\frac{1}{Z_q'}\right)^{-1} = \frac{Z_q'}{n} \qquad (2.15)$$

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น

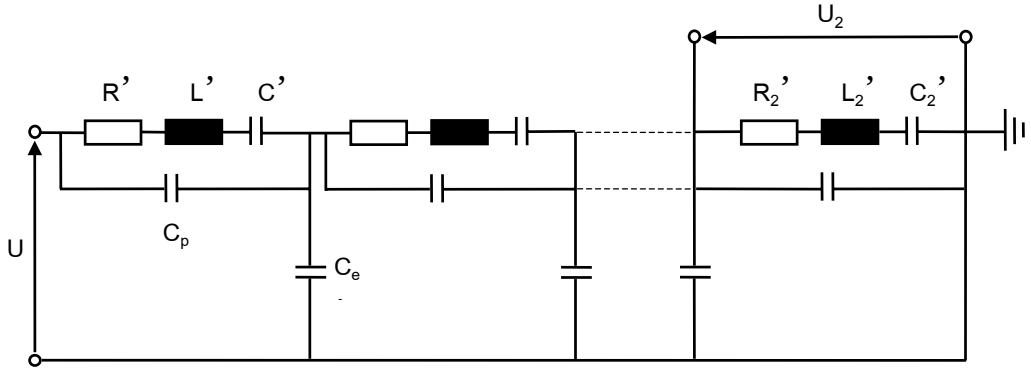
$$h(s) = \frac{n \cdot U_2}{U} = n \frac{\sinh \frac{1}{n} \sqrt{Z_l(s)/Z_q(s)}}{\sinh \sqrt{Z_l(s)/Z_q(s)}} \tag{2.16}$$

และผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์หาได้จาก

$$g(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{s} h(s)\right] \tag{2.17}$$

2.4.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์หาผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุสามารถหาได้โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.12 ซึ่งแทนตัวเก็บประจุด้วยค่าเก็บประจุ C' และค่าความเหนี่ยวนำ L' ส่วนค่าความต้านทาน R' เป็นการแทนตัวประกอบความสูญเสียหรืออาจเป็นตัวความต้านทานที่ต่ออนุกรมเข้าไปจริง



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

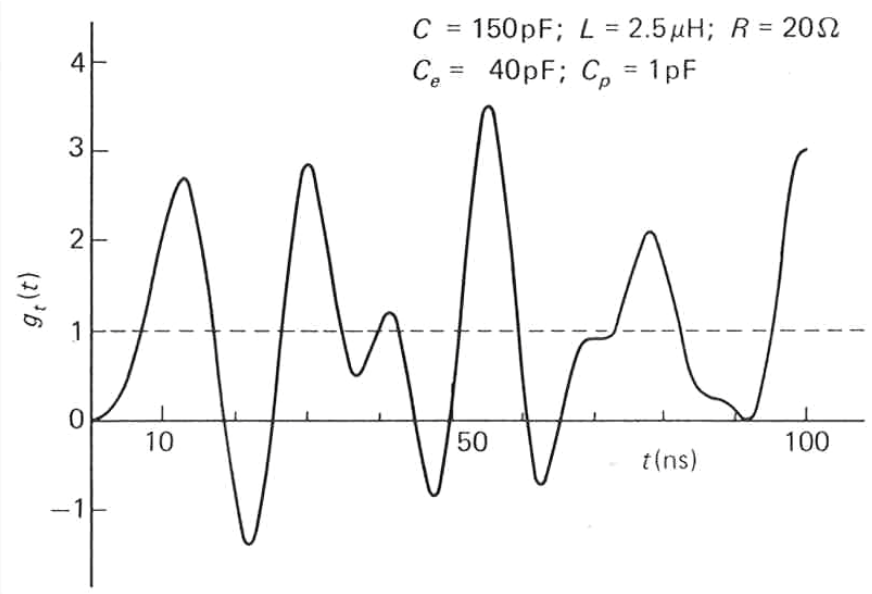
ดังนั้น ผลตอบสนองรูปขั้นนอร์มัลไลซ์สามารถเขียนได้เป็น [11]

$$g(t) = 1 - \frac{C_e}{6(C + C_p)} + 2e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cosh(b_k t) + \frac{a}{b_k} \sinh(b_k t)}{AB} \tag{2.18}$$

โดย $A = \left(1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{Ck^2\pi^2}\right)$, $a = R/2L$

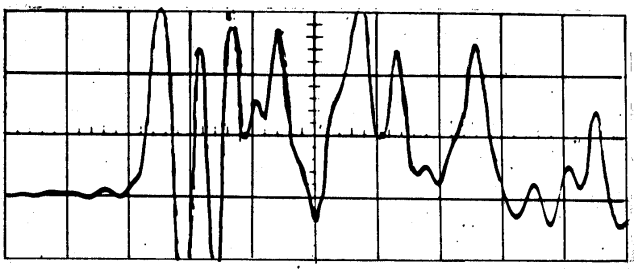
$B = \left(1 + \frac{C_p k^2 \pi^2}{C_e}\right)$, $b_k = \sqrt{a^2 - \frac{k^2\pi^2}{LC_e[1 + (C_p/C_e)k^2\pi^2]}}$

ตัวประกอบความสูญเสีย $\tan\delta = \omega R' C' = \omega RC$ สามารถหาได้จากการวัด ซึ่งเมื่อแทนลงไปในสมการ (2.17) จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 2.12 [11]

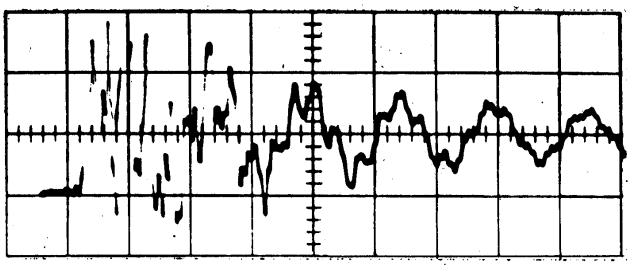


รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน ที่ได้จากการคำนวณ [11]

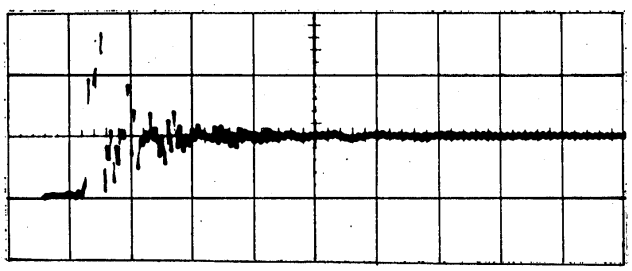
ตัวอย่างผลการทดลองหาผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน ขนาด 850 kV C = 150 pF แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



ก) Rd = 0 Ω (20 ns/div)



ข) Rd = 0 Ω (100 ns/div)



ค) Rd = 200 Ω (100 ns/div)

รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วน ที่ได้จากการทดลอง [17]

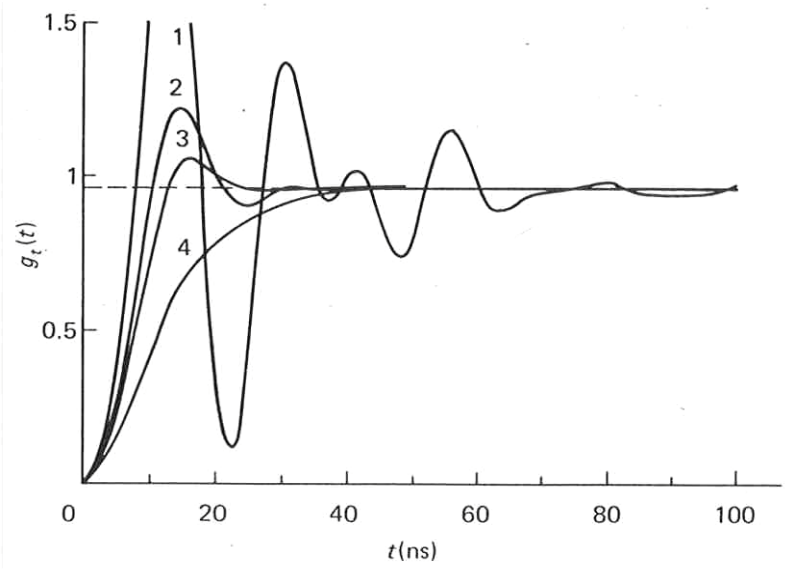
การแกว่งที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองรูปขั้นจะมีอยู่ 2 ความถี่ โดยความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นช่วงหลังเกิดจากการเรโซแนนซ์ของระบบวัด ส่วนความถี่สูงที่เกิดขึ้นช่วงแรกเกิดจากการสะท้อนของคลื่นภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ โดยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาคลื่นจร $\tau = \sqrt{LC_e}$ ภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยประมาณจากความเร็วแสง [15] ความถี่ของการแกว่งสามารถหาได้จาก [16]

$$f = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2\sqrt{LC_e}} \qquad (2.19)$$

จะเห็นได้ว่า โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วนมีความไวต่อแรงดันขาเข้าที่มีเวลาขึ้นเร็วๆ และแรงดันขาออกจะแกว่งอย่างมาก เมื่อต่อเข้าไปในระบบวัดจะเกิดการเรโซแนนซ์กับสายนำ ทำให้ระบบวัดเกิดการแกว่ง ดังนั้น โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วนจึงเหมาะสำหรับวัดค่ายอดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้สามารถปรับปรุงผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ได้ด้วยการใส่ตัวความต้าน

ทานหน่วงภายนอก (R_d) ค่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวเวลา R_dC ซึ่งไม่ควรมีค่าเกิน 150 ns [15]

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาการแกว่งของระบบวัดด้วยการใส่ตัวความต้านทานหน่วงภายนอกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถขจัดการสะท้อนของคลื่นภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ได้ การปรับปรุงผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุล้วนที่ให้ผลดี สามารถทำได้โดยการต่อตัวความต้านทานจริงอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ถ้าความต้านทานมีค่าไม่สูงจนเกินไปแต่เพียงพอที่จะหน่วงการแกว่ง จะได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดีดังแสดงในรูปที่ 2.14 [11]



C = 150 pF; L = 2.5 μH; C_e = 40 pF; C_p = 1 pF

(1) R = 250 Ω

(2) R = 750 Ω

(3) R = 1000 Ω

(4) R = 2000 Ω

$$\sqrt{\frac{L}{C_e}} = 250\Omega$$

รูปที่ 2.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ได้จากการคำนวณ [11]

จากรูปจะได้ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสมมีค่าเป็น

$$R \approx (2\ldots4)\sqrt{\frac{L}{C_e}} \qquad (2.20)$$

โดยค่าความต้านทานที่ใช้ในทางปฏิบัติมีค่าอยู่ระหว่าง 500 – 1000 Ω [17] และเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์สามารถคำนวณได้เป็น

$$T_N \approx \frac{RC_e}{6} \qquad (2.21)$$

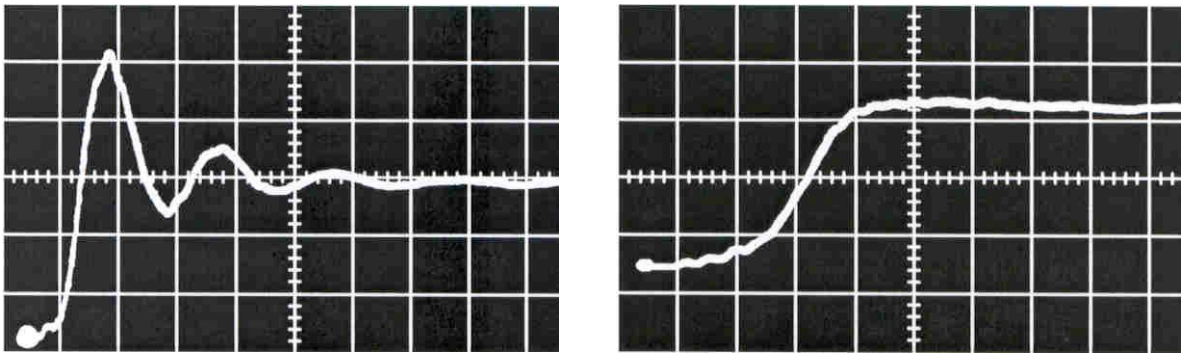
จากสมการ (2.21) จะเห็นได้ว่าเวลาตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้จะเร็วมาก เนื่องจากค่าความต้านทานหน่วงที่มีค่าต่ำ และตัวความต้านทานหน่วงก็จะไม่โหลดมาก เพราะกระแสที่ไหลผ่านโวลเตจดิไวเดอร์เกิดจากแรงดันทรานเซียนต์ขาเข้าเท่านั้น การทำให้โวลเตจดิไวเดอร์มีเวลาตอบสนองที่เร็ว นอกจากการเลือกค่าความต้านทานหน่วงแล้ว ยังขึ้นอยู่กับการใช้ภาคแรงต่ำที่มีหลักการเดียวกันคือ ใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับตัวความต้านทาน โดยจะต้องทำให้ค่าคงตัวเวลาของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำมีค่าเท่ากัน เพื่อทำให้โวลเตจดิไวเดอร์มีคุณสมบัติการถ่ายโอนที่สมบูรณ์ นั่นคือ

$$R_1C_1 \approx R_2C_2 \qquad (2.22)$$

เนื่องจากตัวความต้านทานหน่วงที่ต่ออนุกรมกระจายตลอดภาคแรงสูง จะทำหน้าที่หน่วงการแกว่งของคลื่นสะท้อนภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์เท่านั้น ส่วนความถี่ที่เกิดจากการเรโซแนนซ์ของระบบวัด ยังคงต้องใช้ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำเป็นตัวหน่วงความถี่นี้ ซึ่งในกรณีนี้สมการที่ (2.22) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$(R_d + R_1)C_1 \approx R_2C_2 \qquad (2.23)$$

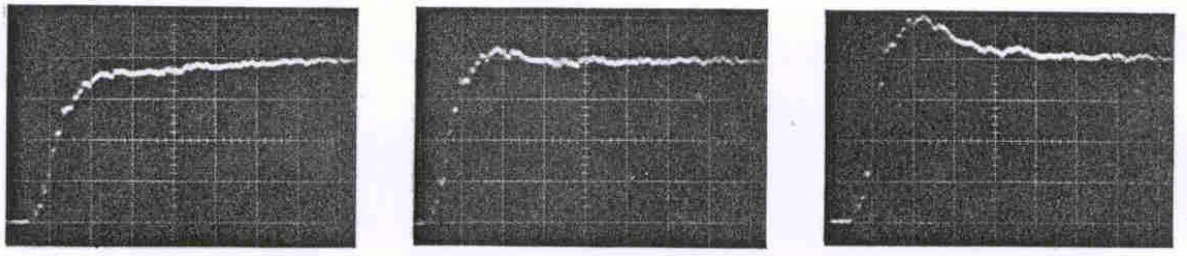
ตัวอย่างผลการทดลองหาผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ขนาด 4000 kV $C_1 = 360$ pF $R_1 = 960\ \Omega$ แสดงไว้ในรูปที่ 2.15



ก) $R_d = 0\ \Omega$, $R_1C_1 \approx R_2C_2$ (200 ns/div) ข) $R_d = 500\ \Omega$, $(R_d+R_1)C_1 \approx R_2C_2$ (50 ns/div)

รูปที่ 2.15 ผลของตัวความต้านทานหน่วงในสายนำที่มีต่อผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง [18]

ผลของการปรับค่าคงตัวเวลาของภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.16



ก) $(R_d+R_1)C_1 > R_2C_2$ ข) $(R_d+R_1)C_1 \approx R_2C_2$ ค) $(R_d+R_1)C_1 < R_2C_2$

รูปที่ 2.16 ผลของการปรับค่าคงตัวเวลาที่มีต่อผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (100 ns/div) [15]

2.5 การต่อแมทชิงในภาคแรงต่ำของระบบวัด

ในการวัดแรงดันทรานเซียนต์ที่ถ่ายโอนจากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์อาจทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาการต่อแมทชิงอิมพีแดนซ์เพื่อถ่ายโอนแรงดันอิมพัลส์จากโวลเตจดิไวเดอร์ไปยังเครื่องมือวัด

โดยที่เคเบิลวัดจะพิจารณาเป็นสายส่งแบบไม่มีพลังงานสูญเสีย ดังนั้น ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ $Z_C = \sqrt{L_C / C_C}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเวลาคลื่นจร $\tau_C = \sqrt{L_C C_C}$ จะมีค่าที่แน่นอน ในกรณีของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เคเบิลวัดไม่สามารถที่จะต่อแมทชิงที่ปลายทางได้ เนื่องจากความต้านทานที่มีค่าต่ำเมื่อต่อขนานเข้ากับ C_2 จะไปโหลดภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์และแรงดันขาออกจะมีขนาดลดลงตามเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการแกว่งของคลื่นจร เคเบิลวัดจึงควรต่อแมทชิงที่ต้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ก) แรงดันที่ตกคร่อม C_2 จะแบ่งครึ่งโดย $R_m = Z_C$ ที่ต้นทางของเคเบิลวัด เมื่อแรงดันที่แบ่งครึ่งนี้เดินทางไปถึงปลายเคเบิลวัดซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรเปิด จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเท่าตัว ดังนั้น แรงดันที่ปรากฏที่เครื่องมือวัดจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อม C_2 เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาถึงต้นทางที่มี $R_m = Z_C$ ต่ออนุกรมอยู่และ C_2 เสมือนกับลัดวงจร จึงไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับอีก

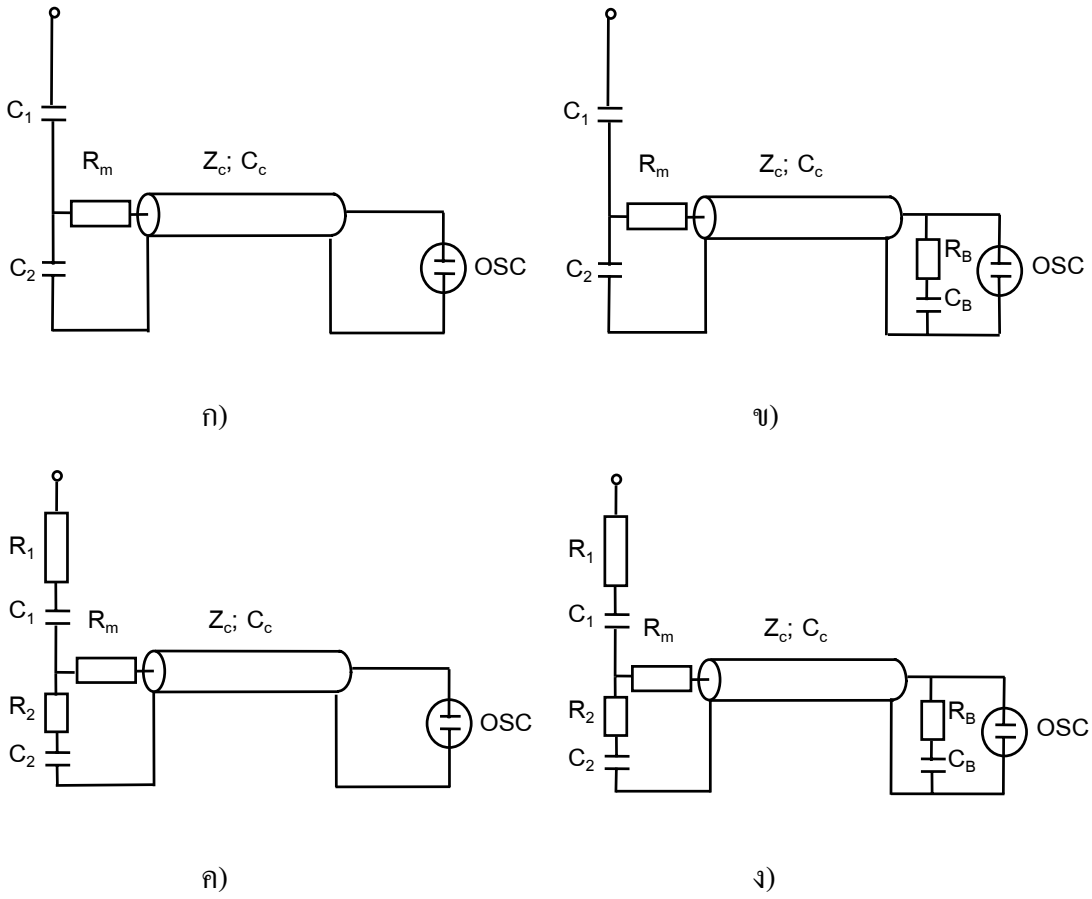
ในทางปฏิบัติ C_2 มีค่าที่แน่นอนและจะคายประจุในภาวะทรานเซียนต์ จากการคำนวณพบว่า ช่วงเวลาการคายประจุมีค่าประมาณ 2 เท่าของเวลาคลื่นจร หลังจากช่วงเวลานี้ เคเบิลวัดจะอัดประจุจนเต็ม จึงทำให้โวลเตจดิไวเดอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์ 2 ค่า คือ

$$n_o = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \qquad \text{ที่ } t = 0$$

$$n_e = \frac{C_1 + C_2 + C_C}{C_1} \qquad \text{ที่ } t \geq 2\tau_C$$

ดังนั้น เคเบิลวัดจึงทำให้เกิดส่วนพุ่งเกิน $\Delta V = (n_e / n_o) - 1 = C_C /(C_1 + C_2)$ ซึ่งอาจละผลกระทบนี้ได้ในกรณีที่เคเบิลวัดมีขนาดสั้นหรือ C_2 มีค่าสูงมากๆ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงผลตอบสนองรูปขั้นสามารถทำได้โดยการถ่ายโอนตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ C_2 บางส่วนไปยังปลายทางของเคเบิลวัดและต่อ

ตัวเก็บประจุนี้อนุกรมกับตัวความต้านทาน ดังในรูปที่ 2.17 ข) เทคนิคนี้นำเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Burch โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบจากส่วนพุ่งเกินนี้ ด้วยการใช้ค่าความต้านทานแมทชิงทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ นั่นคือ $R_m = R_B = Z_C$ และปรับให้ $C_1 + C_2 = C_B + C_C$ [11] ซึ่งจะทำให้แรงดันที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาอนันต์มีค่าเดียวกัน และส่วนพุ่งเกินลดลงเหลือประมาณ 1/6 ในกรณีที่ $R_m \neq R_B$ เงื่อนไขจะเปลี่ยนไปเป็น $Z_C(C_1 + C_2) = R_B(C_B + C_C)$ [19] สำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ดังในรูปที่ 2.17 ค) ค่าความต้านทานแมทชิงจะมีค่าลดลงเล็กน้อย นั่นคือ $R_m = Z_C - R_2$ และวิธีการต่อแมทชิงชดเชยสามารถนำมาใช้ได้ด้วย ดังในรูปที่ 2.17 ง)



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของการต่อแมทชิงสำหรับโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ

ก) แบบตัวเก็บประจุล้วน แมทชิงธรรมดา

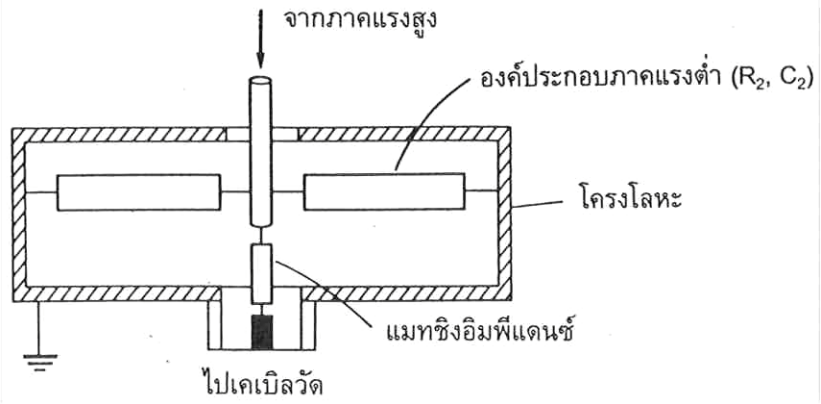
ข) แบบตัวเก็บประจุล้วน แมทชิงชดเชย

ค) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แมทชิงธรรมดา

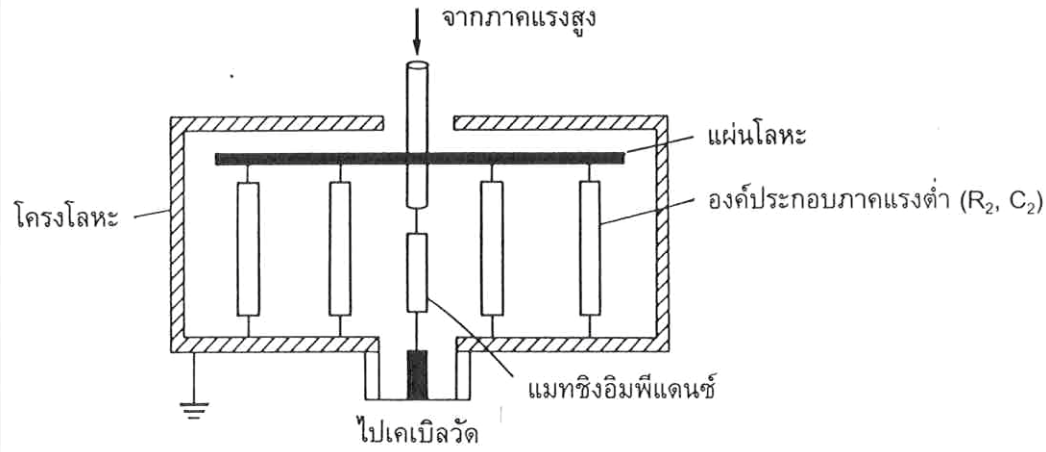
ง) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง แมทชิงชดเชย

เนื่องจากตัวความต้านทานแมทชิงเป็นส่วนหนึ่งของภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุ ดังนั้น จึงควรระวังไม่ให้ทางลงสู่ดินของคลื่นสะท้อนมีค่าความเหนี่ยวนำสูงเกินไป การต่อองค์

ประกอบภาคแรงต่ำในลักษณะสมมาตรแบบรัศมีหรือแบบแกนร่วมเป็นวิธีที่ดี ในการพิจารณาประกอบสร้าง รูปที่ 2.18 แสดงภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ



ก) แบบรัศมี



ข) แบบแกนร่วม

รูปที่ 2.18 ภาพสเกตช์ภาคตัดขวางของการต่อองค์ประกอบภาคแรงต่ำ

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอร์

3.1 ลักษณะที่กำหนด

โวลเตจดิไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบสร้างเป็นแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง สามารถใช้วัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยมีลักษณะสมบัติตามที่ IEC 1211 (1994) [9] กำหนด

ค่าแรงดันพิกัดของโวลเตจดิไวเดอร์ กำหนดด้วยค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบลูกถ้วยแขวนและลูกถ้วยก้านตรง โดยลูกถ้วยแขวนขนาดใหญ่ที่สุดที่ใช้ในระบบส่งคือ ANSI Class 52.8 ต้องทดสอบที่แรงดัน 2.3 p.u. ส่วนลูกถ้วยก้านตรงขนาดใหญ่ที่สุดที่ใช้ในระบบจำหน่าย คือ ANSI Class 56.3 แบบฟ็อก ต้องทดสอบที่แรงดัน 2 p.u. โดย 1 p.u. คือ ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ 50 % (U_{50}) ขั้วลบ ที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐาน [13] ซึ่งค่าแรงดันทดสอบของลูกถ้วยทั้ง 2 แบบมีค่าไม่เกิน 500 kV ดังนั้น จึงเลือกแรงดันพิกัดเท่ากับ 500 kV

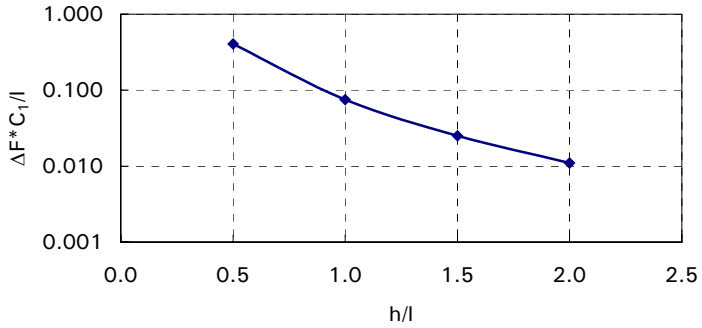
3.2 การออกแบบและสร้างภาคแรงสูง

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออนุกรมกัน ให้ได้ค่าเก็บประจุและแรงดันที่ต้องการ โดยค่าเก็บประจุของภาคแรงสูงต้องมีค่ามากพอที่ทำให้ค่าเก็บประจุสเตรย์มีผลต่อการกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ไม่มากนัก การกระจายแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ควรเป็นเชิงเส้น เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูงมีค่าเท่าๆ กัน มิฉะนั้น อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือวาบไฟตามผิวที่ตัวเก็บประจุย่อยได้ ขณะเดียวกัน ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงต้องไม่มากจนทำให้โวลเตจดิไวเดอร์กลายเป็นโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบวัด จะเห็นได้ว่า ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงมีทั้งขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างค่าเก็บประจุภาคแรงสูงที่ใช้ในทางปฏิบัติควรมีค่ามากกว่า 50 pF ต่อความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ 1 m [20] แต่ไม่ควรมีค่าเกิน 1000 pF [21]

โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) 210 mm สูง (l) 1 m และวางสูงจากพื้น (s) 150 mm เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.14) สามารถคำนวณค่าเก็บประจุสเตรย์ได้ประมาณ 32 pF ค่าเก็บประจุภาคแรงสูงไม่ควรได้รับผลกระทบจากค่าเก็บประจุสเตรย์มากนัก ถ้ากำหนดให้ค่าเก็บประจุสเตรย์ที่คำนวณได้จากสมการ (2.13) เป็น C_e และที่ได้จากสมการ (2.14) เป็น $C_{e\infty}$ จะสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของสเกลแฟกเตอร์ (ΔF) ได้เป็น

$$\frac{\Delta F \cdot C_1}{l} = \frac{C_e - C_{e\infty}}{6l} \qquad (3.1)$$

ในที่นี้ l/d ≈ 5 และถ้าประมาณให้ s << l จะสามารถหาสมการ (3.1) ในรูปฟังก์ชันของ h/l ได้ดังรูปที่ 3.1



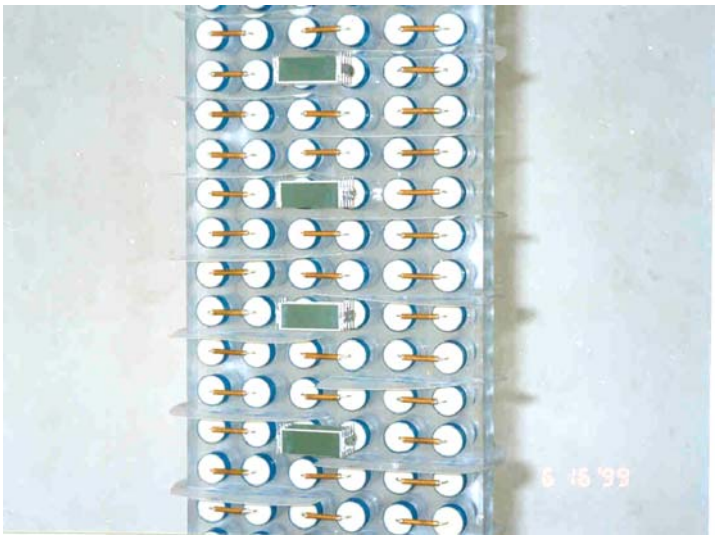
รูปที่ 3.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสเกลแฟกเตอร์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างจากผนังที่มีศักย์เป็นดินไปที่ระยะต่างๆ

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าที่ h/l = 0.5 ซึ่งหมายความว่าโวลเตจดิไวเดอร์วางห่างจากผนังที่มีศักย์เป็นดินเท่ากับครึ่งหนึ่งของความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ จะได้ค่า $\Delta F \cdot C_1/l \approx 0.4$ pF/m ซึ่งถ้าหากยอมให้สเกลแฟกเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ 1 % ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) กำหนดไว้ จะได้ว่า $C_1/l \approx 40$ pF/m ในที่นี้ เลือกค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 400 pF จะได้ว่าสเกลแฟกเตอร์เปลี่ยนแปลงไปเพียง 0.1 % ซึ่งถือได้ว่าน้อยมาก

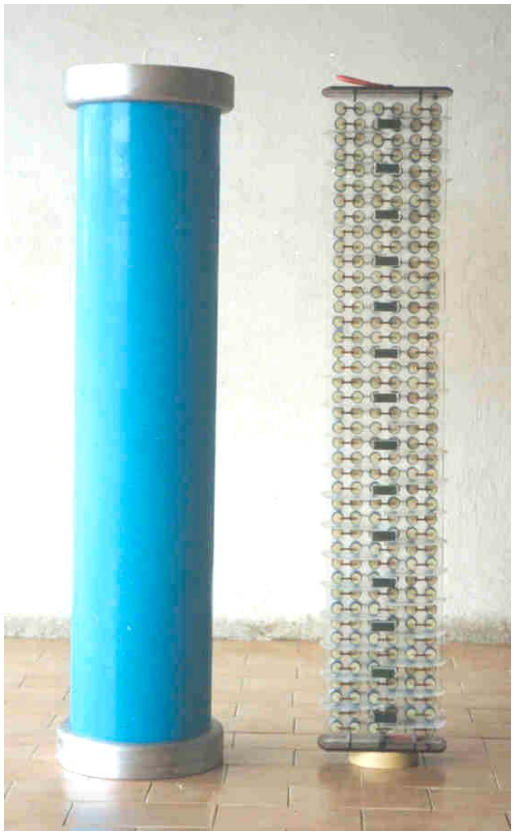
การประกอบตัวเก็บประจุภาคแรงสูงได้จากการนำตัวเก็บประจุย่อยแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 0.1 μF 2 kVdc มาต่ออนุกรมกันจำนวน 252 ตัว สามารถทนแรงดันได้ 504 kVdc และได้ค่าเก็บประจุประมาณ 397 pF การต่อตัวเก็บประจุย่อยทำโดยใช้แผ่นพลาสติกใสขนาด 180 x 1000 mm^2 ความหนา 25 mm มาเจาะรูให้มีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุย่อยเล็กน้อย จำนวน 42 แถวๆ ละ 6 รู จากนั้นจึงนำตัวเก็บประจุย่อยสอดเข้าไป การเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ยาว 20 mm เป็นตัวเชื่อมต่อ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุแต่ละชั้น เมื่อเชื่อมต่อตัวเก็บประจุครบทุก 9 ตัวจะทำการใส่ตัวความต้านทานหน่วงแบบฟิล์มหนาพิเศษ (Special thick film resistor) ขนาด 20 W 22 Ω ที่ทำการปรับสภาพแล้วต่อนุกรมสลับกันไป รวมใช้ตัวความต้านทานทั้งหมด 27 ตัวและวัดค่าความต้านทานหน่วงภาคแรงสูงได้ 581.55 Ω

การปรับสภาพตัวความต้านทานหน่วงจะอาศัยหลักการจำลองสภาพการใช้งานจริง โดยการป้อนแรงดันกระแสตรง 18 kV ให้กับตัวเก็บประจุชนิดเดียวกับที่ใช้ในภาคแรงสูง กล่าวคือ ใช้ตัวเก็บประจุ 0.1 μF 2 kVdc ต่ออนุกรมกัน 9 ตัว แล้วให้ตัวเก็บประจุดิสชาร์จผ่านตัวความต้านทานลงดิน เมื่อทำการดิสชาร์จครบทุก 5 ครั้งจะทำการวัดค่าความต้านทานเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า ซึ่งเมื่อทำครบ 30 ครั้งพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานน้อยกว่า 0.1 % ของค่าเริ่มต้น จึงถือได้ว่าตัวความต้านทานเข้าสู่ภาวะเสถียร

หลังจากเชื่อมต่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงใส่แผ่นไมลาร์ฟิล์มยาว 90 mm คั่นตัวเก็บประจุจำนวน 3 ตัวที่อยู่ปลายสุดของแต่ละชั้นในลักษณะซิกแซกเพื่อป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวระหว่างชั้น จากนั้นทำการยึดหัวท้ายของแผ่นพลาสติกใสด้วยแผ่นเบกาไลท์หนา 5 mm ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้วสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.2



ก) แสดงการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ



ข) ภาคแรงสูงที่เชื่อมต่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.2 ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ประกอบสร้าง

เมื่อเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ เรียบร้อยแล้ว จึงนำตัวเก็บประจุภาคแรงสูงไปบรรจุในท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 210 mm ซึ่งมีหน้าแปลนอะลูมิเนียมปิดหัวท้าย ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุด้วย ภายในท่อใช้ก๊าซ SF_6 อัดความดัน 1 bar เป็นฉนวน

เนื่องจากการกระจายแรงดันของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เพราะผลของค่าเก็บประจุสเตรย์ โดยตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดจะมีแรงดันตกคร่อมมากที่สุด ดังนั้น จึงต้องคำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยนี้ ว่าสามารถทนต่อแรงดันเมื่อโวลเตจดิไวเดอร์นี้ใช้งานที่แรงดันพิกัดได้หรือไม่ โดยจะพิจารณากรณีที่เกิดแรงดันตกคร่อมมากที่สุด ($R_l = 0$) ซึ่งจากวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงในรูปที่ 2.8 เมื่อ U_k คือแรงดันที่ตัวเก็บประจุย่อย k เมื่อเทียบกับดิน [22]

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

โดย $\alpha = \sqrt{\left(C_e' + C_h'\right)/C'}$

เมื่อ U = 500 kV, C' = 0.1 μF, C_e' = 0.127 pF, C_h' = 0, n = 252 จะได้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดเท่ากับ 1.98 kV ซึ่งต่ำกว่าค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุย่อย 2 kVdc และตัวเก็บประจุย่อยนี้สามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้มากกว่า 2 kV เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ดังนั้น ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบนี้สามารถใช้งานที่แรงดันอิมพัลส์พิกัด 500 kV ได้ตามต้องการ

3.3 การออกแบบและสร้างภาคแรงต่ำ

3.3.1 คุณลักษณะที่ต้องการ

ภาคแรงต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่ง ในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงต่ำต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆ ดังนี้

1) แรงดันขาออกต้องไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่น จากกระแสที่ไหลในชีลด์ของเคเบิลวัด หรือจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ในระบบ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดมีค่าต่ำเกินไป จะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด ค่าแรงดันขาออกที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 800 – 1500 V [19]

2) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำและความต้านทานแมทชิงของเคเบิลวัด ต้องระวังไม่ให้เกิดการรบกวนต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัด อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงต่ำ และต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำ ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงต่ำเข้าไปในภาคแรงสูงมีค่าลดลง ดังนั้น จึงควรจัดวางองค์ประกอบภาคแรงต่ำกับตัวความต้านทานแมทชิงให้อยู่ในลักษณะแกนร่วม

3.3.2 การเลือกค่าแรงดันขาออก

แรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดิไวเดอร์ กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องมือวัดแรงต่ำ ซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคปหรือโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะสามารถหาสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ได้โดยอาศัยสมการ

$$F_D = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \qquad (3.3)$$

เมื่อ F_D คือ ค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์

แรงดันขาเข้าที่กำหนดของอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปและโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่มีอยู่ มีค่าอยู่ในช่วง 200 – 1600 V ในที่นี้ เลือกแรงดันขาออก 800 V ซึ่งจะได้สเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์มีค่า 625 และจากค่าเก็บประจุภาคแรงสูง 397 pF จะได้ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ต้องการเป็น 248 nF ดังนั้น จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 0.01 μF 2 kVdc มาต่อขนานกันจำนวน 24 ตัว

เพื่อให้คุณสมบัติการถ่ายโอนของโวลเตจดิไวเดอร์สมบูรณ์และได้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ดี จึงต้องต่อตัวความต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ ในที่นี้เลือกใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะมาประกอบสร้าง โดยแบ่งเป็น 2 ชุดต่ออนุกรมกัน ดังนี้

ชุดที่ 1 – ใช้ตัวความต้านทานขนาด 3 W 20 Ω ต่อขนานกันจำนวน 24 ตัว

ชุดที่ 2 – ใช้เป็นชุดสำหรับปรับค่าละเอียด โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใส่ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำ (R_d) ดังนี้

1) ไม่ใส่ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำ ใช้ตัวความต้านทานขนาด 2 W 2 Ω และ 18 Ω ต่อขนานกันค่าละ 4 ตัว

2) ใส่ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำ ใช้ตัวความต้านทานขนาด 2 W 3 Ω จำนวน 8 ตัวและ 18 Ω จำนวน 2 ตัวต่อขนานกัน

เพื่อป้องกันการสะท้อนของสัญญาณที่ต้องการวัด จำเป็นต้องใช้ตัวความต้านทานแมทชิง (R_m) ต่ออนุกรมกับเคเบิลวัด ตัวความต้านทานแมทชิงนี้เลือกใช้แบบคาร์บอนอัด ขนาด 2 W 50 Ω ซึ่งมีค่าเท่ากับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัดที่ใช้ (ETHERNET 50 Ω ความยาว 20 m) องค์ประกอบที่ใช้ทั้งหมดบรรจุอยู่ในกระบอกทองเหลือง ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูที่ 3.3

3.4 การออกแบบและสร้างตัวลดทอน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ ต้องการใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปในการบันทึกและประเมินค่าพารามิเตอร์ของแรงดัน ซึ่งดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่ใช้สามารถแสดงผลได้สูงสุด 80 V ดังนั้น จึงจำเป็นต้องออกแบบสร้าง

ตัวลดทอนขึ้น เพื่อลดระดับแรงดันที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ลงมาให้อยู่ในย่านที่ดิจิตอลออสซิลโลสโคปสามารถแสดงผลได้

รูปที่ 3.3 ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว

การเลือกแรงดันขาออกของตัวลดทอนอาศัยหลักการเดียวกับโวลเตจดิไวเดอร์ กล่าวคือ แรงดันขาออกสูงสุดของตัวลดทอน กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของดิจิตอลออสซิลโลสโคป เมื่อทราบแรงดันขาเข้าและขาออกที่กำหนด จะสามารถหาสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนได้โดยอาศัยสมการ

$$F_A = \frac{Z_3 + Z_4}{Z_4} \qquad (3.6)$$

เมื่อ F_A คือ ค่าสเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอน

Z_3 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคปฐมภูมิของตัวลดทอน

Z_4 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภาคทุติยภูมิของตัวลดทอน

ในที่นี้ เลือกค่าแรงดันขาออกของตัวลดทอน 40 V ซึ่งจะทำให้ได้สเกลแฟกเตอร์ของตัวลดทอนประมาณ 20

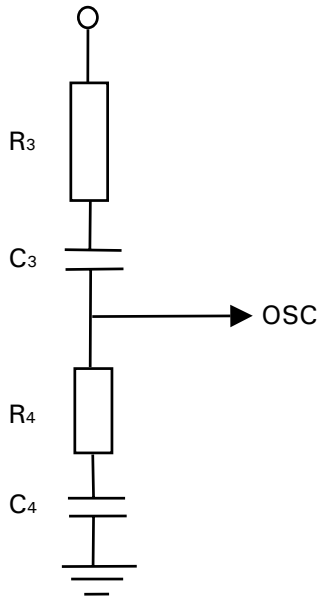
จากเงื่อนไขการต่อแมทชิงชดเชยของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่นำเสนอโดย Burch สามารถนำมาปรับให้เป็นตัวลดทอนได้ดังวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 3.4 โดยเงื่อนไขการต่อแมทชิงคือ

$$Z_C(C_1 + C_2) = R_B(C_B + C_C) \qquad (3.7)$$

โดย $R_B = R_3 + R_4$ และ $C_B = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4}$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการคือ R_B และ C_B แล้ว จึงนำมาคำนวณหาค่าองค์ประกอบของตัวลดทอนโดยอาศัยสมการ

$$F_A \approx \frac{C_4}{C_3} = \frac{R_3}{R_4} \qquad (3.8)$$



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุ

การประกอบสร้างตัวลดทอนมีรายละเอียดดังนี้

- ภาคปฐมภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 0.01 μF 1 kVdc ต่ออนุกรมกับตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะขนาด 2 W 3.3 kΩ จำนวน 3 ตัวและ 27 kΩ จำนวน 1 ตัวต่อขนานกัน

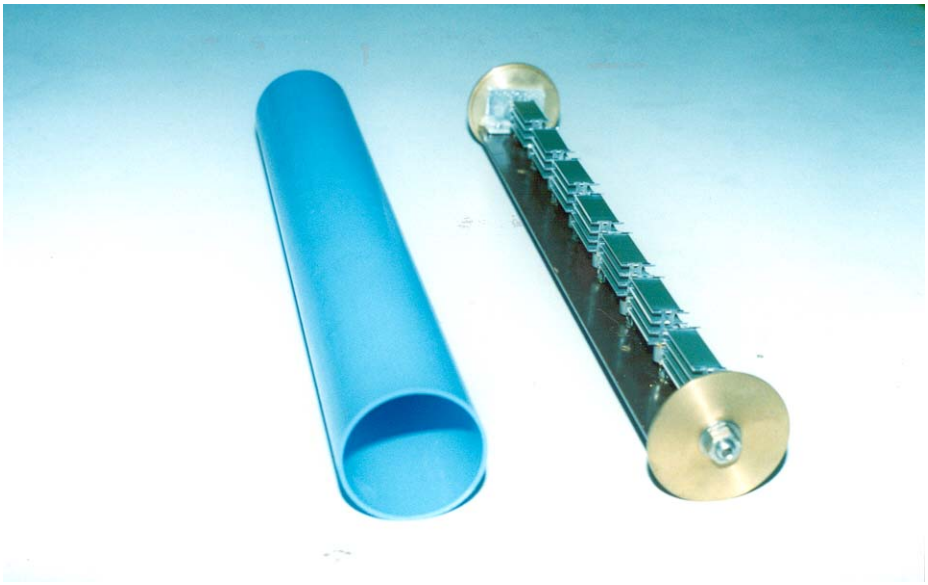
- ภาคทุติยภูมิ การประกอบใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีเอสเตอร์ฟิล์ม ขนาด 0.033 μF 63 Vdc ต่ออนุกรมกับตัวความต้านทานแบบฟิล์มโลหะขนาด ½ W 300 Ω ทั้งหมดต่อขนานกันจำนวน 6 ชุด

โดยองค์ประกอบทั้งหมดบรรจุอยู่ในกระบอกทองเหลืองเช่นเดียวกับภาคแรงต่ำ ตัวลดทอนที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.5

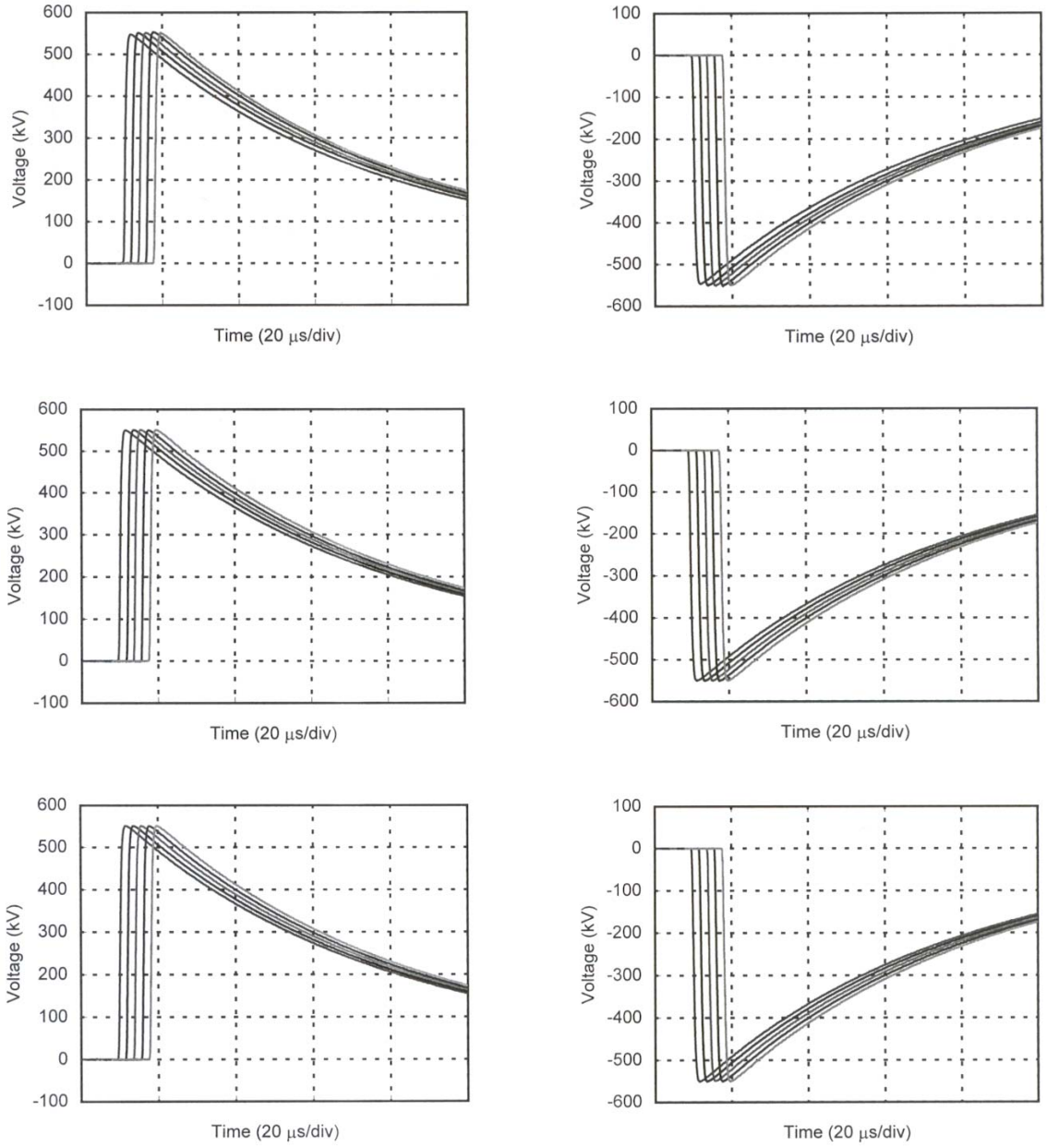
รูปที่ 3.5 ตัวลดทอนแบบตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.5 การออกแบบและสร้างตัวความต้านทานหน่วงในสายนำ

ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของระบบวัด โดยการประกอบสร้างจะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันที่ต้องการวัดและต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ในที่นี้เลือกใช้ตัวความต้านทานแบบฟิล์มหนาพิเศษ ขนาด 20 W 22 Ω ชนิดเดียวกับที่ใช้ในภาคแรงสูง ต่ออนุกรมกันจำนวน 7 ตัว ได้ค่าความต้านทาน 151.53 Ω จากนั้นจึงนำไปบรรจุในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ยาว 600 mm ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำที่ประกอบเสร็จแล้วแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำที่ประกอบเสร็จแล้ว

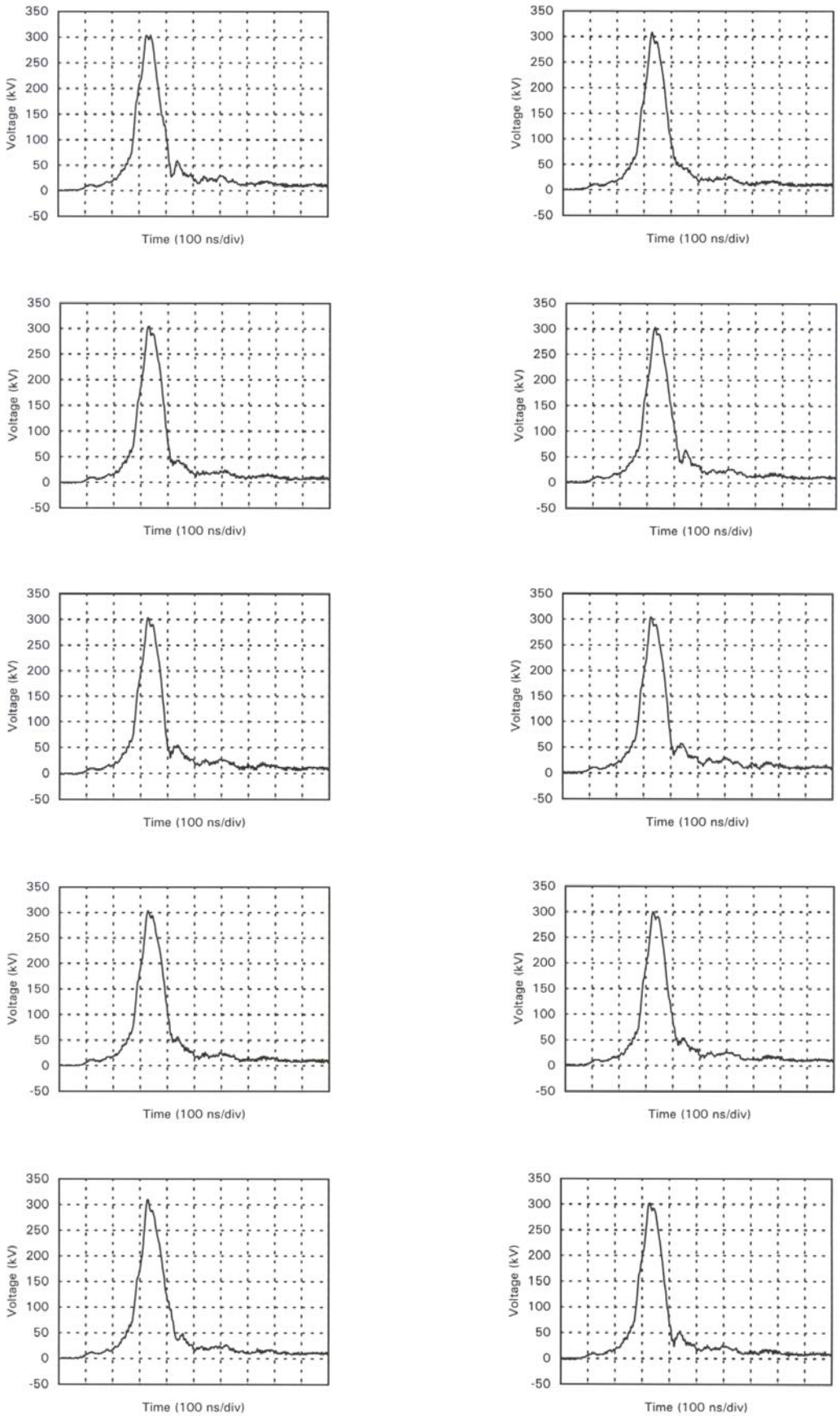


ก) ขั้วบวก ข) ขั้วลบ

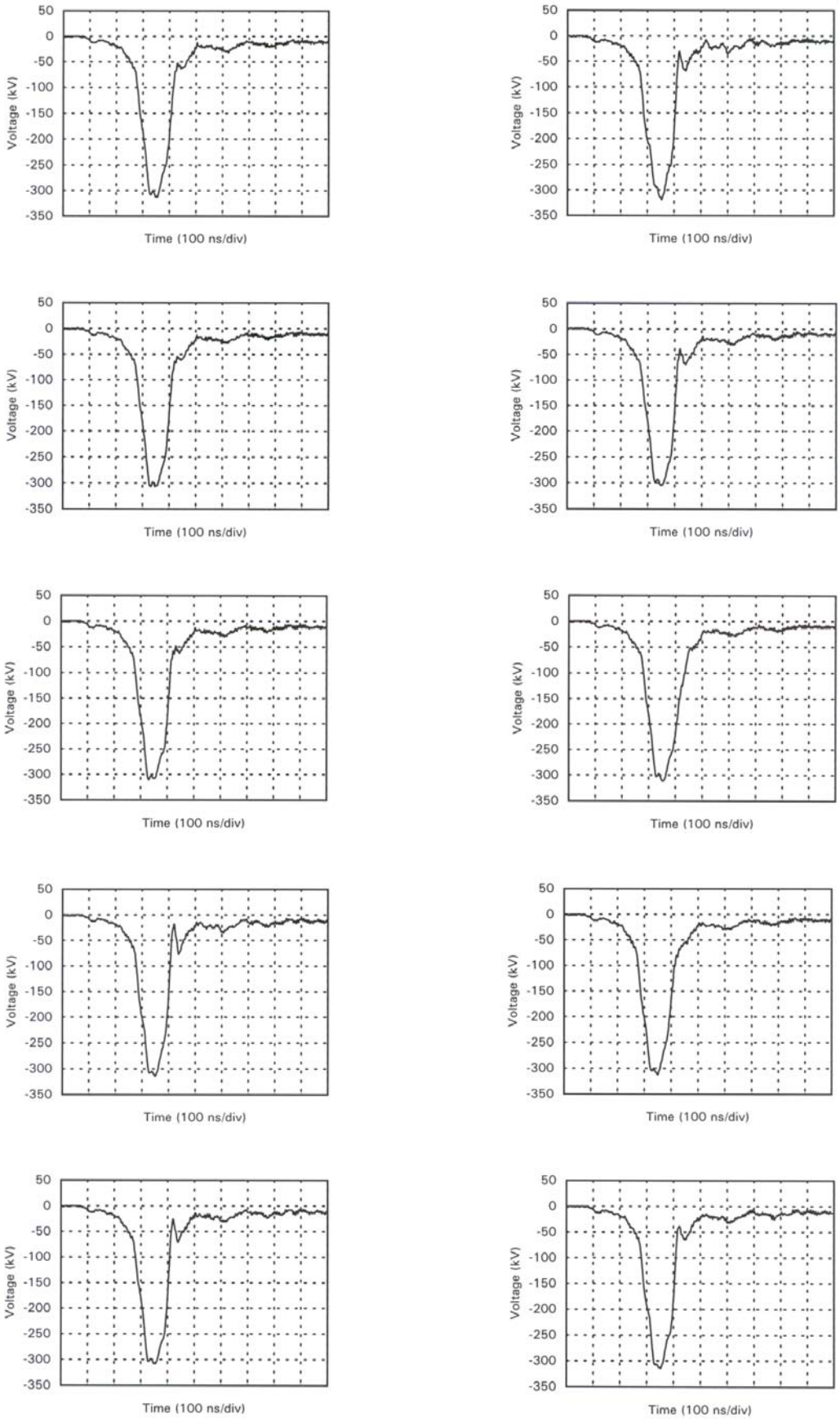
รูปที่ 4.9 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

4.8 การทดลองใช้งานจริง

ในการทดลองวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่เกิดขึ้นจริง ใช้ลูกถ้วย ANSI Class 52-8 เป็นวัสดุทดสอบ ทำการทดสอบที่แรงดัน 2.3 p.u. โดย 1 p.u. คือค่าแรงดันวาบไฟตามผิว 50 % ขั้วลบ ที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐาน [9] ในที่นี้ได้ค่า 130.2 kV ดังนั้น จึงทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันขนาด 299.5 kV ขั้วบวกและตามด้วยขั้วลบ ขั้วละ 10 ครั้ง ผลการทดสอบปรากฏว่า โวลเตจดิไวเดอร์ที่ประกอบสร้างสามารถวัดแรงดันดังกล่าวได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ดังรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถคำนวณความชันได้มากกว่า 4000kV/μs



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่บันทึกได้



รูปที่ 4.10 (ต่อ) รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันที่บันทึกได้

บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

4.1 การหาผลตอบสนองรูปขั้น

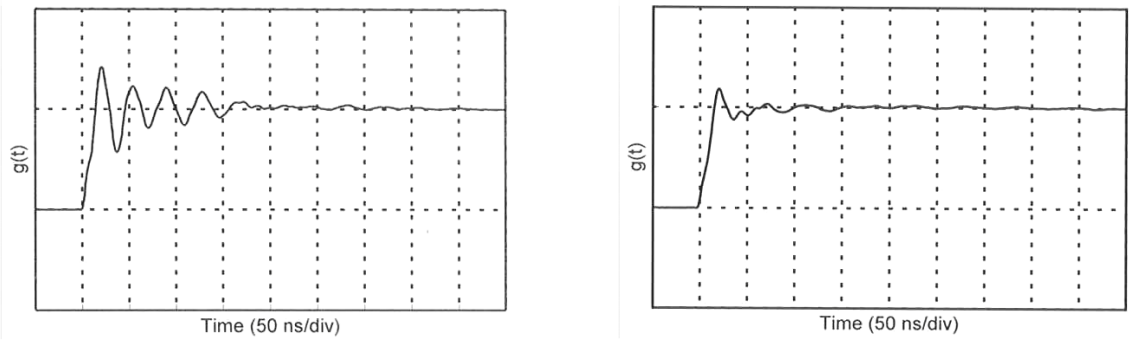
การหาผลตอบสนองรูปขั้นใช้วงจรตามที่กำหนดในมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น (Unit step generator) ของ HAEFELY รุ่น USG 40 มีค่าแรงดันขาออก – 90 ± 10 V ใช้รีเลย์แบบปรอทเปียกเป็นตัวตัดแรงดันลงดินด้วยความถี่ 50 Hz และมีค่าเวลาขึ้นน้อยกว่า 5 ns

การศึกษาวิจัยหาลักษณะสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์และระบบวัด จะเลือกใช้วงจรที่มาตรฐานแนะนำคือ วงจรในรูปที่ 2.5 ข)

4.1.1 โวลเตจดิไวเดอร์

ในการทดสอบ สายนำที่ใช้เป็นแผ่นทองแดงกว้าง 80 mm ความยาว 1.4 m ส่วนสายดินใช้แถบทองแดงกว้าง 300 mm ได้ผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก) โดยสามารถหาค่าเวลาตอบสนองบางส่วนได้ 7.1 ns

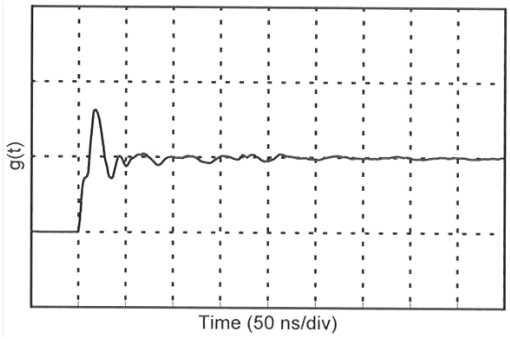
เนื่องจากผลตอบสนองรูปขั้นยังแกว่งอยู่ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่เรียบขึ้นจึงทำการใส่ตัวความต้านทานหน่วงในสายนำค่าประมาณ 150 Ω ได้ผลตอบสนองรูปขั้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 ข) และคำนวณค่าเวลาตอบสนองบางส่วนได้ 8.9 ns



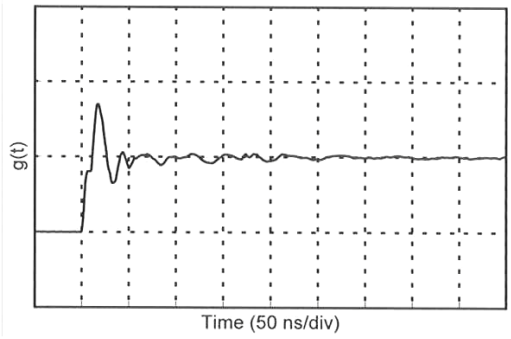
ก) $R_d = 0$ ข) $R_d = 150\ \Omega$

รูปที่ 4.1 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์

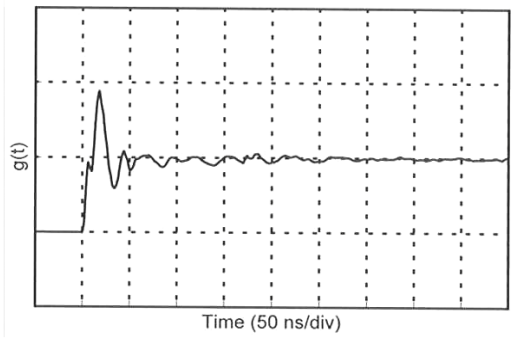
เนื่องจากได้ค่าเวลาตอบสนองบางส่วนที่ช้าอยู่ ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่เร็วขึ้น จึงทำการทดลองใส่ตัวเหนี่ยวนำ (L) ค่าต่างๆ ต่ออนุกรมกับภาคแรงต่ำ [11] ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2



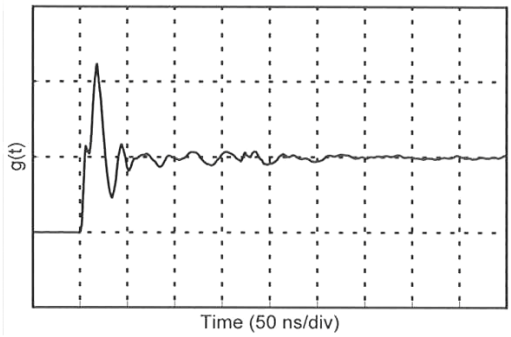
ก) L = 15 nH, T_α = 3.8 ns



ข) L = 20 nH, T_α = 3.4 ns



ค) L = 24 nH, T_α = 2.8 ns



ง) L = 30 nH, T_α = 1.8 ns

รูปที่ 4.2 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์
ที่ค่าความเหนี่ยวนำต่างๆ

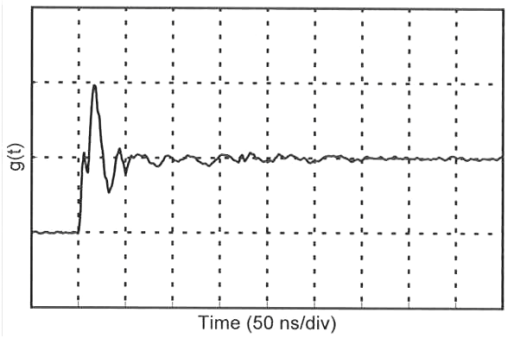
จากออสซิลโลแกรมจะเห็นได้ว่าที่ค่าความเหนี่ยวนำ 24 และ 30 nH ได้เวลาตอบสนองบางส่วนน้อยกว่า 3 ns อย่างไรก็ตาม ที่ค่าความเหนี่ยวนำ 30 nH มีส่วนพุ่งเกินมากกว่า 100 % ซึ่งไม่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 24 nH ที่ได้เวลาตอบสนองบางส่วน 2.8 ns

4.1.2 ระบบวัด

เนื่องจากตัวลดทอนเป็นส่วนหนึ่งของระบบวัดที่ประกอบสร้าง ดังนั้น จึงต้องทำการทดลองหาผลตอบสนองรูปขั้นด้วย โดยวงจรที่ใช้ทดสอบเป็นวงจรเดียวกับโวลเตจดิไวเดอร์ พารามิเตอร์ผลตอบสนองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 และผลตอบสนองรูปขั้นแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัด

พารามิเตอร์ผลตอบสนอง	ค่าที่ได้จากการทดลอง
β (%)	88
T_α (ns)	2.2
T_N (ns)	-0.1
t_S (ns)	48



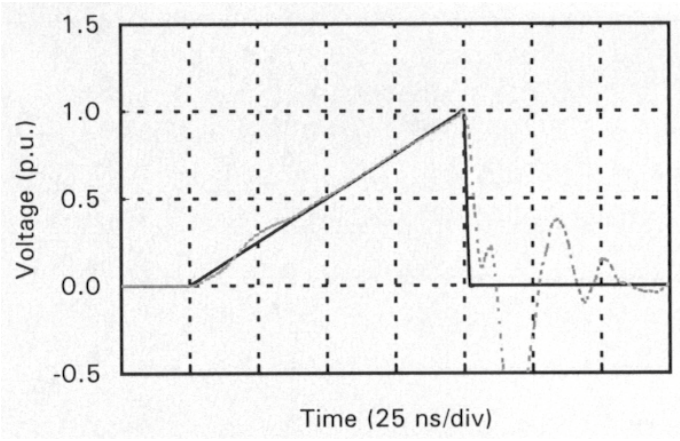
รูปที่ 4.3 ออสซิลโลแกรมผลตอบสนองรูปขั้นของระบบวัด

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ระบบวัดที่ประกอบสร้างมีค่าพารามิเตอร์ผลตอบสนองเป็นไปตามข้อกำหนด กล่าวคือ ได้เวลาตอบสนองบางส่วน 2.2 ns

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า ค่าความผิดพลาดในการวัดค่ายอดเนื่องจากผลตอบสนองรูปขั้น (Response error) มีค่าไม่เกิน 5 % จึงได้ทำการจำลองหาค่าความผิดพลาดดังกล่าวตามสมการ (2.8) โดยใช้วิธีคอนโวลูชัน ในที่นี้ ใช้แรงดันป้อนเข้าเป็นฟังก์ชันรูปแรมป์ (Ramp function) ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงฟังก์ชันได้ ดังนี้

$$U_i(t) = \begin{cases} t & ; 0 \le t \le T_C \\ 0 & ; t < 0, t > T_C \end{cases} \qquad (4.1)$$

โดยเลือกค่า T_C = 100 ns ผลการจำลองที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดในการวัดค่ายอดได้ 1.25 %



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองหาค่าความผิดพลาดในการวัดค่ายอด
เนื่องจากผลตอบสนองรูปขั้น โดยวิธีคอนโวลูชัน

4.2 การหาสเกลแฟกเตอร์

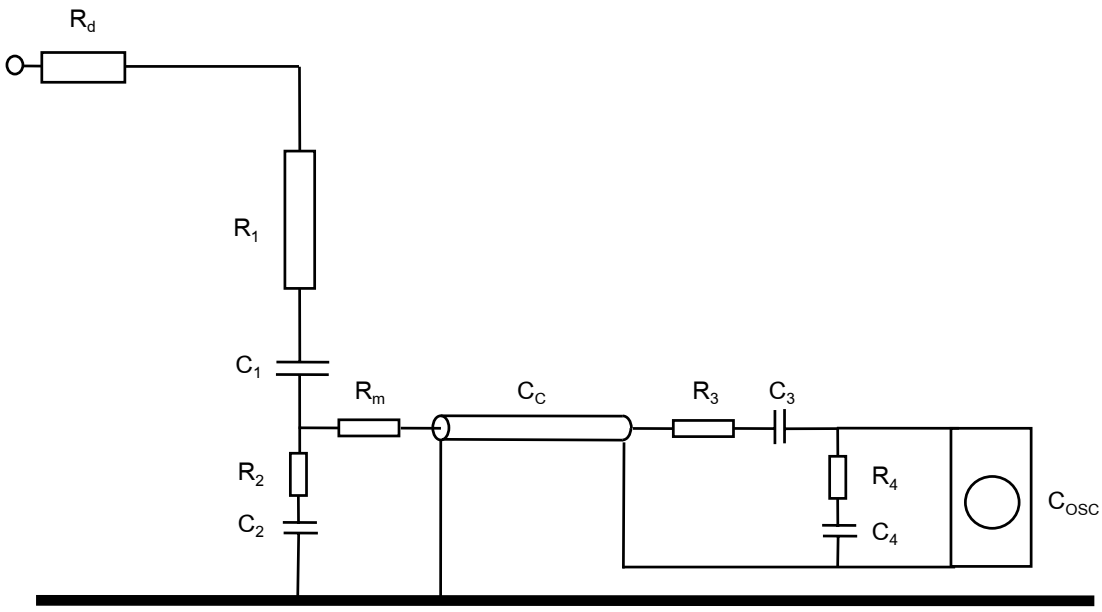
การหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด ในที่นี้ใช้วิธีคำนวณจากค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้โดยใช้ Schering bridge ของ TETTEX รุ่น 2801 [16] วัดค่าเก็บประจุ โดยค่าเก็บประจุที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเก็บประจุขององค์ประกอบในระบบวัด

องค์ประกอบ	แรงดันทดสอบ (V)	ค่าเก็บประจุมาตรฐาน (pF)	สัญลักษณ์	ค่าเก็บประจุที่วัดได้ (nF)
โวลเตจดิไวเดอร์	10,000 – 50,000	49.98	C_1	0.3870*
	200	99.997	C_2	236.35
เคเบิลวัด	200	99.997	C_C	1.6961
ตัวลดทอน	200	99.997	C_3	9.5562
	40	99.997	C_4	205.71

* เป็นค่าเฉลี่ย โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.02 pF

จากค่าเก็บประจุที่วัดได้ สามารถคำนวณหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลในการหาสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดแบบตัวเก็บประจุ

จากวงจรสมมูล สามารถคำนวณสเกลแฟกเตอร์ (F) ได้ตามสมการ

$$F = \left(\frac{C_1 + C_2 + C_C + C_B}{C_1}\right) \cdot \left(\frac{C_3 + C_4 + C_{OSC}}{C_3}\right) \qquad (4.2)$$

โดย $C_B = \dfrac{C_3 \cdot (C_4 + C_{OSC})}{C_3 + C_4 + C_{OSC}}$

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.2 จะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดเท่ากับ 14,412 และเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าค่าสเกลแฟกเตอร์ที่ได้มีค่าผิดพลาดไม่เกิน 2 % จึงทำการทดสอบวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันกระแสสลับ

มาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [8] กำหนดวิธีทดสอบวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดอ้างอิงไว้ดังนี้ โดยในการทดสอบจะต้องอ่านค่าแรงดันที่ได้จากทั้ง 2 ระบบพร้อมกัน และนำค่าแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดอ้างอิงหารด้วยระบบวัดที่ต้องการทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จะกำหนดให้เป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ F_i การทดสอบจะทำจนกระทั่งได้ค่าทั้งหมด n ค่า ($n \geq 10$) และค่าเฉลี่ย F_m จะถือเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดของระบบวัดที่ต้องการทดสอบ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ที่คำนวณได้จาก

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n - 1}} \qquad (4.3)$$

จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 % ของ F_m

ระบบวัดแรงดันกระแสสลับที่ใช้อ้างอิงเป็นชนิดที่ภาคแรงสูงเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวมาตรฐาน (Standard compressed gas capacitor) มีค่าเก็บประจุ 100 pF และแรงดันพิกัด 100 kV_{rms} ภาคแรงต่ำเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สามารถเลือกสเกลแฟกเตอร์ค่าต่างๆ ได้โดยมีแรงดันพิกัด 100 V ในที่นี้ เลือกทดสอบที่แรงดัน 50 kV และตั้งค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัดที่ใช้อ้างอิงเป็น 50 kV / 100 V ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบด้วยแรงดันกระแสสลับ ที่ระดับแรงดัน 50 kV

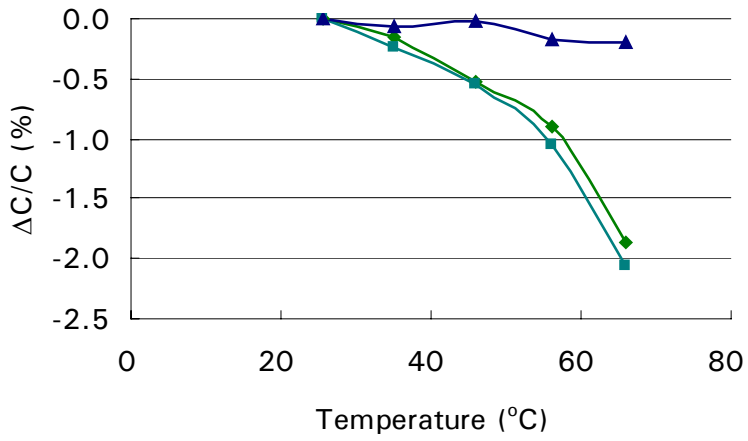
สเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด F_m	ค่าผิดพลาด ΔU (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ (%)
1.0020	– 0.20	0.02

4.3 การหาผลกระทบของอุณหภูมิ

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบว่า อุณหภูมิสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงมีผลกระทบต่อสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์อย่างไร โดยมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [10] กำหนดให้ผลกระทบดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 1 %

การทดสอบทำโดยการวัดค่าเก็บประจุของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงและภาคแรงต่ำ โดยใช้ค่าที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) เป็นค่าอ้างอิง จากนั้นจึงนำตัวเก็บประจุไปเข้าเตาอบและปรับอุณหภูมิไปที่ค่าต่างๆ ในช่วง 35 – 65 °C ผลการวัดค่าเก็บประจุที่อุณหภูมิเหล่านี้จะนำมาคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่าเริ่มต้น ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ (C2/C1) มีค่าน้อยกว่า 0.2 % ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 65 °C ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน



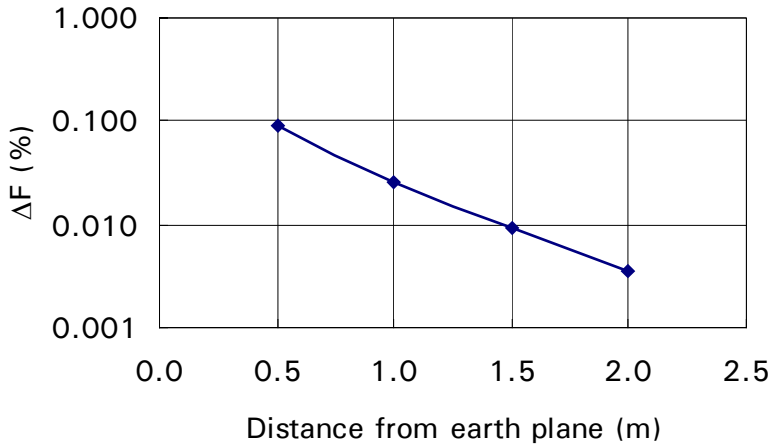
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อตัวเก็บประจุ

โดย ◆ C1 ■ C2 ▲ C2/C1

4.4 การหาผลกระทบของวัตถุรอบข้าง

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบว่า เมื่อติดตั้งโวลเตจดิไวเดอร์ห่างจากวัตถุที่มีศักย์เท่ากับดิน จะมีผลทำให้สเกลแฟกเตอร์เปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยมาตรฐาน IEC 60-2 (1994) [10] กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 1 %

การทดสอบทำโดยการวัดค่าเก็บประจุภาคแรงสูง ที่ระยะห่างจากรั้วที่ต่อลงดินที่ระยะต่างๆ (0.5, 1, 1.5, 2 m) จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่าเริ่มต้น (2.5 m) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7



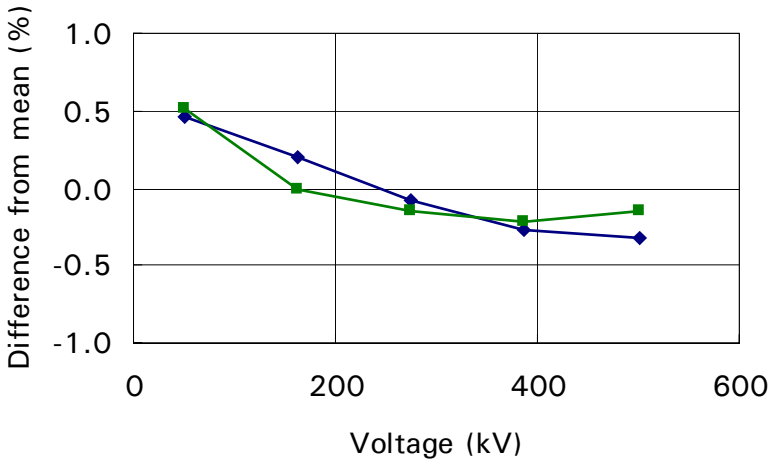
รูปที่ 4.7 ผลกระทบของวัตถุรอบข้าง

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อติดตั้งโวลเตจดิไวเดอร์ไว้ห่างจากรั้วที่ต่อลงดิน 0.5 m (ครึ่งหนึ่งของความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์) ค่าสเกลแฟกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเพียง 0.1 %

4.5 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

การทดสอบในหัวข้อนี้จะต้องทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 5 ค่าตลอดช่วงของการใช้งาน โดยอาจทำการวัดเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง แกปทรงกลมหรือแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ก็ได้ ถ้าค่าอัตราส่วนของแรงดันอ้างอิงกับแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดมีค่าไม่เกิน ± 1 % ของค่าเฉลี่ย ระบบวัดที่ทำการทดสอบถือได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้น [10]

ในการทดสอบเลือกใช้แรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันอ้างอิง และกำหนดช่วงแรงดันใช้งานเป็น 10 – 100 % ผลการทดสอบที่ได้แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด
โดย ◆ ขั้วบวก ■ ขั้วลบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ระบบวัดแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงที่ประกอบสร้างขึ้นมีความเป็นเชิงเส้นตามที่มาตรฐานกำหนด กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนแรงดันอ้างอิงกับแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดทั้ง 5 ค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $\pm$ 0.5 %

4.6 การทดสอบเสถียรภาพระยะสั้น

ในหัวข้อการทดสอบนี้ ทำโดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่ค่าแรงดันพิกัดด้วยจำนวนครั้งที่ใช้งานจริง โดยค่าสเกลแฟกเตอร์ก่อนและหลังการป้อนแรงดันต้องแตกต่างกันไม่เกิน 1 % [10]

ในที่นี้ จึงป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานขนาด 500 kV ขั้วลบ จำนวน 30 ครั้ง ใช้วิธีวัดแรงดันขาเข้าและขาออกพร้อมกันในการหาค่าสเกลแฟกเตอร์ ผลการทดสอบได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ก่อนและหลังการทดสอบเปลี่ยนแปลงไป + 0.03 %

4.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

เพื่อให้มั่นใจได้ว่า การฉนวนภายในภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์จะไม่เกิดเบรกดาวน์ในขณะใช้งาน มาตรฐานจึงกำหนดให้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันด้วยค่าแรงดัน 110 % ของค่าพิกัด [10] จึงทดสอบตัวเก็บประจุภาคแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานขนาด 550 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วละ 15 ครั้ง ผลการทดสอบสรุปได้ว่า ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบสร้างขึ้นสามารถทนต่อแรงดันทดสอบข้างต้นได้ ดังออสซิลโลแกรมแสดงในรูปที่ 4.9

บทที่ 5

สรุปผลงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและประกอบสร้าง โวลเตจดิไวเดอรวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันแบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง ขนาด 500 kV ซึ่งสรุปผลงานได้ดังนี้

1) ข้อมูลทางเทคนิคที่ออกแบบ แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทางเทคนิคของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง

รายละเอียดองค์ประกอบ	ค่าขององค์ประกอบ
- ตัวความต้านทานหน่วงภายนอก	R_d = 151.53 Ω
- ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์	C_1 = 0.3870 nF
	R_1 = 581.55 Ω
- ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์	C_2 = 236.35 nF
	R_2 = 1.1928 Ω
- ภาคปฐมภูมิของตัวลดทอน	C_3 = 9.5562 nF
	R_3 = 1051.7 Ω
- ภาคทุติยภูมิของตัวลดทอน	C_4 = 205.71 nF
	R_4 = 49.700 Ω
สเกลแฟกเตอร์จากการคำนวณ	
- โวลเตจดิไวเดอร์	616.11
- ตัวลดทอน	22.526
- ระบบวัด	14,412

2) พารามิเตอร์ผลตอบสนองของระบบวัด แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้าง

พารามิเตอร์ผลตอบสนอง	ค่าพารามิเตอร์
β	88 %
T_α	2.2 ns
T_N	− 0.1 ns
t_s	48 ns

3) ผลการทดสอบหาสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนด โดยใช้วิธีวัดเปรียบเทียบกับโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดภาคแรงสูงเป็นแบบตัวเก็บประจุมาตรฐานด้วยแรงดันกระแสสลับ ได้ค่าแตกต่างจากวิธีคำนวณจากค่าเก็บประจุที่วัดได้ 0.20 %

4) ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น เทียบกับแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ได้ค่าอัตราส่วนแรงดันอ้างอิงกับแรงดันที่อ่านได้จากระบบวัดแตกต่างจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า ± 1 %

5) ผลการทดสอบเสถียรภาพระยะสั้นโดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานขนาด 500 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วละ 15 ครั้ง ค่าสเกลแฟกเตอร์ก่อนและหลังการป้อนแรงดันเปลี่ยนแปลง + 0.03 %

6) ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูง โดยทดสอบที่ระดับแรงดัน 110 % ของแรงดันพิกัด จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันขั้วละ 15 ครั้ง ปรากฏว่าตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ประกอบสร้างสามารถทนแรงดันดังกล่าวได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยไม่เกิดเบรกดาวน์ใดๆ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เวลาตอบสนองบางส่วนที่ได้มีค่ามากกว่าที่คำนวณ โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากค่าความเหนี่ยวนำภายใน (Leakage inductance) ของตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่นำมาประกอบสร้าง ในที่นี้ได้ทำการแก้ไขโดยการใส่ตัวเหนี่ยวนำในภาคแรงต่ำเพื่อชดเชยผลดังกล่าว วิธีการปรับปรุงผลตอบสนองรูปขั้นเพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนด สามารถทำได้โดยการลดค่าเก็บประจุลง เนื่องจากตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อยจะมีจำนวนรอบในการพันน้อยกว่า ซึ่งหมายถึงค่าความเหนี่ยวนำที่ลดลง หรืออาจเปลี่ยนไปใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำมาก [17] แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุมีขนาดค่อนข้างโต ทำให้การประกอบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ที่จำกัดความสูงไว้ 1 m อาจทำได้ยาก

การสร้างทีมวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน" ดำเนินการวิจัยโดย

1. รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นหัวหน้าโครงการ และเป็นที่ปรึกษา

2. นายประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นนักวิจัยรุ่นใหม่และเป็นผู้วิจัยหลักในโครงการนี้

คุณประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์ จบการศึกษาระดับปริญญาโท ทางสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2539 โดยทำวิทยานิพนธ์เรื่องการออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 1000 kV เมื่อจบการศึกษาก็ยังปฏิบัติงานอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และได้เป็นนักวิจัยร่วมในโครงการวิจัยร่วมกับหัวหน้าโครงการมาโดยตลอด อาจกล่าวได้ว่า คุณประเสริฐเป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถสูงในด้านโวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดันสูง คนหนึ่งของประเทศไทยในปัจจุบัน (2545) เป็นผู้ที่ให้คำปรึกษาแก่ นักศึกษาสถาบันต่างๆ อยู่เป็นประจำ

เอกสารอ้างอิง

[1] A National Standard of Canada, CAN/CSA-C411.1M89, AC Suspension Insulators, 1989.

[2] Australian Standard, AS 2947.1, Insulators Porcelain and Glass for Overhead Lines Voltage Greater Than 1000 V A.C. Part 1 : Test Methods, 1989.

[3] สำรวย สังข์สะอาด, วิทวัส งามประดิษฐ์, ณรงค์ชัย ลิ่มเศรษฐกานต์, การออกแบบสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน, วิศวกรรมสาร เล่มที่ 51 ธันวาคม 2542, หน้า 125-131.

[4] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 1000 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

[5] วรา จูห้อง, การศึกษาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 300 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.

[6] วิชัย เตยวงศ์ศักดิ์, การศึกษาพัฒนาออกแบบสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 400 กิโลโวลต์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

[7] ประเสริฐ รังสีโสภณอาภรณ์, การออกแบบและสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 1000 กิโลโวลต์, รายงานผลการประดิษฐ์, ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

[8] ไพศาล จิรานันตรัตน์, อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 400 กิโลโวลต์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วงกระจาย, รายงานผลการประดิษฐ์, ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

[9] IEC Report 1211, Insulators of Ceramic Material or Glass for Overhead Lines with Nominal Voltage Greater Than 1000 V – Puncture Testing, Technical Report Type 2, 1994.

[10] IEC Publication 60-2, High-Voltage Test Techniques Part 2 : Measuring Systems, 1994.

[11] E. Kuffel and W.S. Zaengl, *High Voltage Engineering Fundamental*, Pergamon Press, Oxford, 1984.

[12] IEC Publication 60-1, High-Voltage Test Techniques Part 1 : General Definition and Test Requirements, 1989.

[13] CIGRE Task Force 33.07.01, Puncture Testing of Ceramic and Glass Insulators, Final Report, 1989.

[14] W.S. Zaengl, High Voltage Measurement Techniques, Lecture Note, ETH, Zurich, 1994.

[15] J. Jouaire, W.S. Zaengl, A. Pedersen, L. Thione, High Voltage Measurments : Present State and Future Development, RGE, 1978.

[16] A.J. Schwab, *High Voltage Measurement Techniques*, Cambridge, MIT Press, 1972.

[17] W.S. Zaengl, A New Universal Reference Voltage Divider for Voltage up to 500 kV, Lecture Note, Chulalongkorn University, Bangkok, 1999.

[18] L. Thione, High Voltage Measurement Techniques, CESI Training Materials, 1987.

[19] HAEFELY Operating Instructions, Mixed Capacitive and Ohmic Voltage Dividers Type RCR/RCZ.

[20] IEEE Std. 4, IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, 1995.

[21] N. Hylten-Cavallius, *High Voltage Laboratory Planning*, Kirchgarten-Druckerei AG, Basel, 1986.

[22] สำรวย สังข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2528.

[23] K. Feser, Transient Behaviour of Damped Capacitive Voltage Dividers of Some Million Volts, HAEFELY.