

การออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุฉนวนสุญญากาศ พิชิตการวัดสูงสุด 200 กิโลโวลต์

Design and Creation of a Voltage Divider with a Vacuum-Insulated Capacitor Type for Maximum Peak Measurement of 200 Kilovolts.

^{1*}ไตรรัตน์ ปะทิ

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

^{1*}Trirath Pati

¹Department of Electrical Power Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

*TRP_OFF@RMUTL.ac.th

Received: September 22, 2023

Revised: September 16, 2024

Accepted: October 14, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุขนาดพิชิต 200 กิโลโวลต์ ฉนวนแบบสุญญากาศ มีอัตราส่วนในการลดทอนแรงดันคือ 1000:1 ใช้ตัวเก็บประจุย่อยชนิดโพลีพรอพิลีนฟิล์มที่สามารถทนแรงดันและอุณหภูมิได้สูง ภาคแรงดันสูงใช้ตัวเก็บประจุย่อยขนาด 47 นาโนฟารัด นำมาต่อกันเพื่อให้มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.91 พิโกฟารัด บรรจุภายในฉนวนทำจากวัสดุพีวีซีทรงกระบอกและฉนวนภายในด้วยการทำสุญญากาศ ภาคแรงดันต่ำใช้ตัวเก็บประจุชนิดเดียวกันมาต่อผสมกัน มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.92 นาโนฟารัด ซึ่งการออกแบบและทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60060-2 (2010)

ผลการทดลองพบว่าการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมMatlab/Simulink ป้อนแรงดันขาเข้าที่ 200 กิโลโวลต์ แรงดันขาออกที่ 200 โวลต์ ตามที่ได้คำนวณออกแบบไว้ นำไปใช้ในการทดสอบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสสลับจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบที่ระดับแรงดัน 100 kV_{rms} ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.059 และค่าแรงดันที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้งมีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดอ้างอิงไม่เกิน $\pm 1\%$ ฉะนั้นโวลเตจดีไวเดอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

คำสำคัญ: ไฟฟ้าแรงสูง, ฉนวนสุญญากาศ, การวัดแรงดันสูง

Abstract

This research presents the design and create of a voltage divider utilizing vacuum-insulated capacitors for measuring peak voltages up to 200 kilovolts. The divider achieves a voltage reduction ratio of 1000:1 by employing polypropylene film sub-capacitors, which are capable of withstanding high voltages and temperatures. In the high-voltage section, sub-capacitors with a nominal value of 47 nanofarads are connected in series to provide a total capacitance of 97.91 picofarads. This assembly is encapsulated in a thick-walled PVC cylindrical housing

and insulated using a vacuum. The low-voltage section uses the same type of sub-capacitors connected in parallel, resulting in a total capacitance of 97.92 nanofarads. The design and testing comply with the IEC 60060-2 (2010) standard.

Experimental results demonstrated that simulations using Matlab/Simulink software, with an input voltage of 200 kilovolts and an output voltage of 200 volts, were consistent with the designed 1000:1 voltage reduction ratio. This configuration was then used for actual high-voltage AC measurements in a high-voltage electrical laboratory. Comparative measurements at a voltage level of 100 kVrms showed a deviation from the standard of 0.000594, with measured values differing from the reference system by no more than ± 1 . Consequently, the designed and constructed voltage divider meets the specified standards.

Keywords: voltage divider, capacitors, measurements, vacuum-insulated

1. บทนำ

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงต้องผ่านการทดสอบความทนทานต่อแรงดันตามมาตรฐานที่กำหนดเพื่อรับรองคุณภาพและความปลอดภัยในการใช้งานจริง การทดสอบอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือวัดที่แม่นยำเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้ นอกจากนี้ ยังต้องมีการควบคุมความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานอย่างเคร่งครัด โวลเตจดีไวเดอร์ถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการทดสอบหลังจากกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์ โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบอาจต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาที่สูงและจุดคุ้มทุนต่ำมากหากนำไปใช้เฉพาะด้านการศึกษา

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุที่มีพิกัดวัดแรงดันได้สูงสุด 200 kV สำหรับการวัดแรงดันกระแสสลับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประกอบการเรียนภาคปฏิบัติทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การวิจัยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นำนาน รวมถึงช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในกระบวนการทำเครื่องมือวัดและการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขอบเขตงานวิจัย

ออกแบบและสร้างสร้างโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจื่อย่อยต่ออันดับสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์แบ่งแรงดันไฟฟ้าทั้งภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำ โดยคำนวณค่าคาปาซิเตอร์ให้เป็นอิมพีแดนซ์ในวงจรแล้วจำลองผลการออกแบบวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink การคำนวณอุปกรณ์ด้วยสุญญากาศโดยใช้การทำสุญญากาศออกจากภายในฉนวนบรรจุอิมพีแดนซ์แบ่งแรงดัน ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดันได้จาก Bourdon Gauge

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงๆมีข้อแตกต่างจากการวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำคืออุปกรณ์ตัวชี้ค่าและผู้วัดค่าจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการวัดมากพอที่จะไม่เกิดอันตราย จะต้องอาศัยการคำนวณที่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่จะวัดถ้าแรงดันสูงมากขึ้นระยะการคำนวณและระยะห่างของผู้วัดจะต้องมากขึ้น การวัดแรงดันสูงจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ

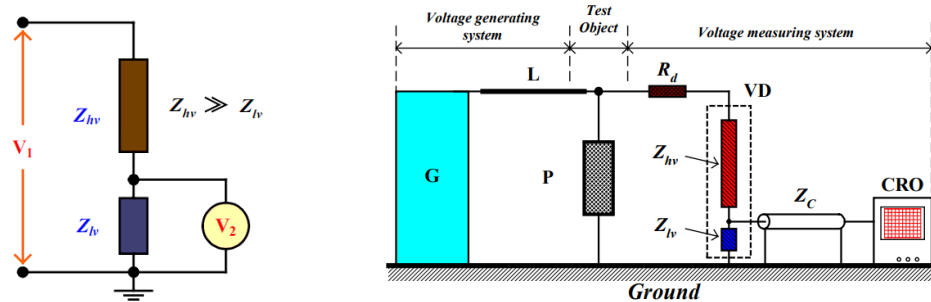
โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วยลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญ ได้แก่ ความถูกต้องเที่ยงตรง และความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด, ความเชื่อถือได้, จิตความสามารถของเครื่องวัด รวมถึงความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน [1] [2] เทคนิคการวัดแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสองชนิดหลังนี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลองส่วนชนิดแรกคือแรงดันกระแสสลับนั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการและในระบบส่งจ่าย การวัดแรงดันกระแสสลับภายในห้องปฏิบัติการอาจวัดได้ด้วยวิธีต่อไปนี้ คือ 1) โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic voltmeter) 2) แกปทรงกลม (sphere gap) 3) อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (series impedance) 4) โวลเตจไดvider (voltage divider)

โวลเตจไดvider เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำวัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง Z_{hv} ต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัดแล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่เพียงส่วนน้อยออกมาวัด

โวลเตจไดvider แบ่งออกเป็นภาคแรงดันสูง Z_{hv} และภาคแรงดันต่ำ Z_{lv} ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่ออยู่กับสายแรงดันสูงที่จะวัดส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายหนึ่งของภาคแรงดันต่ำซึ่งอีกข้างหนึ่งของภาคแรงดันต่ำจะต่อกับดินตรงรอยต่อระหว่างภาคแรงดันสูงกับภาคแรงดันต่ำนี้เองจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงต่ำที่จะต่อเข้ากับโวลเตจไดvider นี้จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด คือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ และค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของโวลเตจไดvider เมื่อวัดค่า V_2 ด้วยเครื่องวัดแรงต่ำได้แล้ว จึงคำนวณค่าแรงดันสูงที่ต้องการวัดได้ คือ [3]

$$V_1 = \frac{Z_{hv} + Z_{lv}}{Z_{lv}} V_2 \quad (1)$$

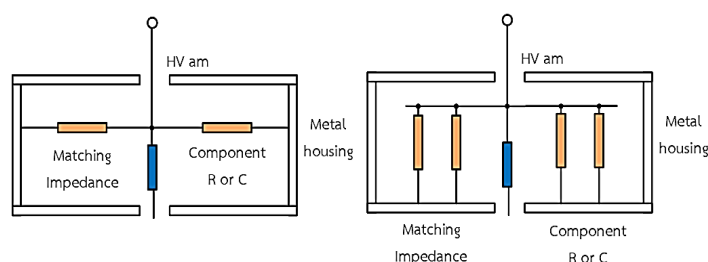
การวัดแรงดันกระแสสลับแรงสูงจะวัดด้วยโวลเตจไดvider แบบตัวเก็บประจุ อาจเกิดความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_{hv} และ Z_{lv} เป็นสารประเภทเดียวกัน ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไป ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่งคือองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเช่น ผลกระทบจากความร้อน, ค่าอิมพีแดนซ์ภายในวงจร [4]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของโวลเตจไดvider ชนิดตัวเก็บประจุและการต่อวัดค่าด้วยออสซิลโลสโคป [5]

โวลเตจไดvider มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูงและมีอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำเป็นแบบตัวเก็บประจุ ภาคแรงดันสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุต่ออันดับกันหรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยจะต่ออนุกรมกันค่าเก็บประจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุย่อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมัน หรือเซรามิก ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวประจุแบบอัดความดันโดยมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวมภายในอัดก๊าซซึ่งก๊าซที่ใช้ อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซ SF_6 เนื่องจากโวลเตจไดvider สำหรับวัดแรงดัน

ต้องมีเวลาตอบสนองไวการที่มีความเหนี่ยวนำแฝงในระบบวัดโดยเฉพาะภาคแรงดันต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่ง การเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้ความเหนี่ยวนำน้อยที่สุด จึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ ให้ความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนี่ยวนำได้ [6]



รูปที่ 2 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

4. การดำเนินการวิจัย

การออกแบบและกำหนดคุณลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์ จะกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบและสร้างถือเป็นชนิดตัวเก็บประจุ สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับที่มีพิกัดแรงดันขาเข้าไม่เกิน 200 kV และมีแรงดันขาออกอยู่ที่ไม่เกิน 200 V อัตราส่วนการลดทอนแรงดันคือ 1000:1 ในการออกแบบสร้างและการทดสอบอ้างอิงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ซึ่งจะกำหนดวิธีการและข้อกำหนดสำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยมุ่งเน้นที่การวัดแรงดันไฟฟ้าและการทดสอบความทนทานต่อแรงดัน เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง [7][8][9]

ตารางที่ 1 พิกัดแรงดันของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบ

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
พิกัดแรงดัน	200 kV _{AC}
ความถี่	50 Hz
อัตราส่วนลดทอนแรงดัน	1000 : 1
ค่าความแม่นยำที่ต้องการ	±1%

4.1 การสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุนวนสูญญากาศ

โดยทั่วไปมักใช้ก๊าซทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก เนื่องจากคุณสมบัติที่ดี หลังจากเกิดการเบรกดาวน์แล้วจะสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีพลังงานสูญเสียใดเล็กน้อย ในด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้าได้ยอมรับในการใช้ SF₆ แต่เป็นก๊าซที่อันตรายที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงกว่า CO₂ ปัจจุบันบริษัท 3M ได้มีการคิดค้นก๊าซฉนวน Novec (Novec Insulating Gases) เข้ามาใช้งานแทนที่ SF₆ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ความเป็นสูญญากาศในกระบอกบรรจุ คาปาซิเตอร์แรงสูงและแรงต่ำ ซึ่งมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้า 20 – 40 MV/m และมีคุณสมบัติด้าน Dielectric strength

4.1.1 การออกแบบสร้างภาคแรงดันสูงโดยจะนำตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้การทนแรงดัน 200 kV

1) การออกแบบกระบอกบรรจุคาปาซิเตอร์ในงานวิจัยนี้กำหนดใช้ฉนวนภายในแบบฉนวนสูญญากาศ คาปาซิเตอร์ทั้งหมดจะบรรจุในท่อโพลีไวนิลคลอไรด์ คุณสมบัติที่ดีมีความเหนียวยืดหยุ่นตัวได้ดี ทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการกัดกร่อน ในการออกแบบนี้จะนำท่อพีวีซีขนาด 150 mm สามารถคำนวณหาความหนาของท่อได้จากสมการ [4] [5]

$$t_{\min} = \frac{pD}{2(SE + 0.4p)} + A \quad (2)$$

เมื่อ t_{min} = ค่าความหนาของท่อที่ต่ำที่สุด
 p = ความดันบรรยากาศภายในท่อ (Pa)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (mm)
 S = ค่าความเค้นที่ยอมให้วัสดุรับได้ (Pa)
 E = ตัวประกอบคุณภาพ
 A = ค่าระยะเพื่อสำหรับความผิดพลาดในชิ้นงานจริง

$$t_{min} = \frac{101325 \times 165 \text{ mm}}{2(100 \text{ MPa} \times 0.85) + 0.4(101325))} + 0.4$$

$$t_{min} = 0.40009 \text{ mm.}$$

ความหนาของท่อกระบอกพีวีซีต้องมีขนาดอย่างน้อย 0.4 mm เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 125 mm คลาส 13.5 หนา $9.9 \pm 0.55 \text{ mm}$ ออกแบบให้ชั้นวางตัวเก็บประจุย่อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm โดยสามารถจัดวางตัวเก็บประจุย่อยต่อ 1 แผ่นได้ 20 ตัว แรงดันตกคร่อมของตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นจะได้ (600×20) เท่ากับ 12 kV เมื่อคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนอากาศ 25 kV/cm ดังนั้นระยะห่างระหว่างชั้นจะต้องไม่ต่ำกว่า 0.67 cm ระยะห่างระหว่างชั้นห่าง 3.5 cm ขนาดของอะคริลิกที่ใช้ยึดชั้นตัวเก็บประจุย่อย องค์ประกอบย่อยของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงทั้งหมดบรรจุไว้ในท่อฉนวนพีวีซี โดยความยาวของท่อพีวีซีที่ใช้มีความยาว 100 cm และภาคแรงดันต่ำบรรจุอยู่ในกล่องพักสายจำนวน 1 ชั้น อิเล็กโทรดออกแบบสร้างจากฝาคือรอบปลายท่อพีวีซี ซึ่งจะช่วยให้สามารถถอดประกอบได้

2) ความจุสเตรย์ลงดิน เป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือค่าความจุสเตรย์ลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลเตจดีไวเซอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงดันสูงเป็นตัวเก็บประจุย่อย เมื่อบรรจุอยู่ในท่อพีวีซี สามารถถือได้ว่าเป็นประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอกคัง ในทางปฏิบัติค่าความจุสเตรย์อาจประมาณค่าจากความสูงของตัวแบ่งแรงดัน โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10-15 pF/m ค่าความจุภาคแรงสูงควรใช้ Schering Bridge หรือ Transformer Ratio Arm Bridge แต่การใช้ LCR วัดค่าอาจทำให้สายวัดและความจุสเตรย์ถูกรวมค่าเข้าไปในการวัด ส่งผลให้ค่าสเกลเฟคเตอร์คลาดเคลื่อน สามารถหาค่าความจุสเตรย์ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [7]

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\left[\ln \left(\frac{2l}{d} \right) \left(\sqrt{\frac{4h+1}{4h+3l}} \right) \right]} \quad (3)$$

ท่อพีวีซีที่เลือกใช้มีความยาว (l) ของท่อที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 1 m ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) เท่ากับ $15 \pm 0.4 \text{ cm}$ มีความสูงวัดจากพื้นดิน (h) เท่ากับ 20 cm นำมาแทนในสมการที่(4) จะได้

$$C_e = \frac{2\pi \times (8.854 \times 10^{-12}) \times 1}{\ln \left[\left(\frac{2 \times 1}{0.165} \right) \left(\sqrt{\frac{(4 \times 0.216) + 1}{(4 \times 0.216) + (3 \times 1)}} \right) \right]} \quad (4)$$

$$= \frac{55.631 \times 10^{-12}}{2.1304} = 26.11 \text{ pF}$$

3) ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง สำหรับวัดแรงดันกระแสสลับตามมาตรฐาน IEEE Std.4 กำหนดให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีขนาดอยู่ที่ 50-100 pF/m ของความสูงโวลเตจดีไวเซอร์ เพื่อเป็นการลดจำนวนของจำนวนของตัวเก็บประจุจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดัน 600 V เป็นอย่างต่ำจากพิกัดแรงดันของชุดแบ่งแรงดันที่ต้องการออกแบบสร้าง 200 kV แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐานคือการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำการทดสอบที่ 110 % ของพิกัดแรงดันคือ 220 kV ดังนั้นทำการออกแบบสร้างชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ 120 % ของพิกัดแรงดันคือ

240 kV เลือกใช้แบบโพลีพรอพิลีนฟิล์ม R76 125C ขนาด 47 nF ทนแรงดันได้ 600 V จำนวนตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงดันสูง $n = \frac{200 \times 10^3 V}{600 V}$ จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งสิ้นจำนวน 334 ตัวเนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่จะวัด จึงต้องคิดเพื่อความปลอดภัยที่ 1.2 เท่า หรือ 120% ของแรงดันทดสอบใช้ Capacitor จำนวน $\frac{1.2 \times 200 kV}{600 V} = 400$ ตัว ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมด $C = \frac{47 \times 10^{-9}}{480} = 97.916 pF$ เลือกใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 480 ตัว เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบสร้างและมีอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงและด้านแรงดันต่ำใกล้เคียงกับ 1000:1 มากที่สุด ต่ออนุกรมกันแบ่งเป็น 24 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีตัวเก็บประจุอยู่ที่ 20 ตัว ที่ความปลอดภัย 1.2 เท่าหรือ 120 % และในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงควรมีค่ามากกว่าความจุสเตรย์ประมาณ 3 เท่า ความจุสเตรย์ยังดินมีค่าเท่ากับ 26.112 pF เมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดเท่ากับ 98 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าความจุสเตรย์มาก โดยหาพิกัดกระแสได้จาก

$$X_c = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 97.916 pF} = 31.83 M\Omega$$

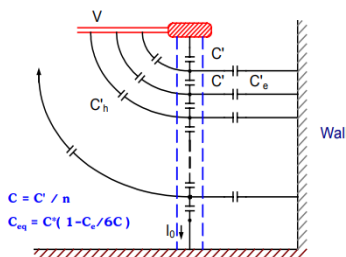
แทนสมการ

$$I = \frac{200 kV}{31.830 M\Omega} = 6.283 mA$$

4) จดวาทไฟตามฉนวน ความยาวท่อพีวีซีซึ่งใช้เป็นโครงสร้างของโวลเตจดีไวเดอร์ กำหนดด้วยระยะวาทไฟตามฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของท่อพีวีซีในกรณีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะใช้ระยะวาทไฟตามฉนวนมีค่าน้อย 0.5 m/100 kV โวลเตจดีไวเดอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดเท่ากับ 200 kV ดังนั้นระยะวาทไฟตามฉนวนควรมีค่าน้อยเท่ากับ 1 เมตรซึ่งในกรณีนี้ออกแบบท่อจะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ออกแบบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของท่อพีวีซี [6]

ในการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนเราจะมีกำหนดค่าแรงดันทดสอบ ซึ่งแรงดันทดสอบนี้ผู้จัดทำได้เลือกให้เหมาะสมกับแรงดันที่ใช้งานจริงโดยปกติจะเลือกแรงดันทดสอบอยู่ที่ประมาณ 2 เท่าของแรงดันที่ใช้งาน เมื่อเลือกแรงดันทดสอบได้แล้วก็ทำการทดสอบค่าฉนวนไฟฟ้า แล้วค่าฉนวนไฟฟ้าต้องการถึงแสดงว่าอุปกรณ์ไฟฟ้ามีสภาพสมบูรณ์พร้อมใช้งานตามมาตรฐาน IEC 60364

5) แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดเนื่องจากการกระจายแรงดันของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งตัวเก็บประจุตัวบนสุดจะรับแรงดันสูงกว่าตัวอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดันไฟฟ้าตามเงื่อนไขการกำหนดแรงดันที่ 200 kV



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

$$V_k = \frac{V}{C'_e + C'_h} \left[\frac{C'_e \sinh(\alpha k / n)}{\sinh \alpha} + C'_h \left[\frac{1 - \sinh(\alpha k / n)}{\sinh \alpha} \right] \right] \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{C'_e + C'_h}{C'}} \quad (6)$$

เมื่อ C_h' = ความจุระหว่างตัวเก็บประจุย่อยกับอิเล็กโทรดแต่ละตัว
 C_e' = ความจุระหว่างตัวเก็บประจุย่อยลงดินแต่ละตัว
 C' = ความจุแต่ละตัว
 K = ตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด

$$\alpha = \sqrt{\frac{0.0541 pF}{47 nF}} = 1.0728 \times 10^{-3}$$

$$V_k = \frac{200 kV}{0.0541 pF} \left[\frac{0.0541 pF x \sinh(1.0728 \times 10^{-3} / 480)}{\sinh(1.0728 \times 10^{-3})} \right]$$

$$= 416.976 \text{ V}$$

4.1.2 การออกแบบภาคแรงดันต่ำ

กาปาซิเตอร์ภาคแรงดันต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดีไวเซอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงดันต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้ [10] [11]

1) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่นจากกระแสที่ไหลในซิลิค์ของเคเบิลสายวัดหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

2) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำและความต้านทานแมชชีงของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำที่มีต่ออุปขาเข้าของเคเบิลวัดและต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้อิมพีแดนซ์ ที่ภาวะทรานเซียนต์มีค่าต่ำทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงดันต่ำกับความต้านทานแมชชีงให้อยู่ในลักษณะสมนัย [12]

4.1.3 การเลือกแรงดันขาออกแรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดีไวเซอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิลโลสโคป หรือมัลติมิเตอร์วัดค่ายอดเมื่อทราบแรงดันขาเข้า และขาออกที่กำหนดจะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดีไวเซอร์ดังสมการ (7)

$$a = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (7)$$

เมื่อ a = อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดีไวเซอร์
 C_1 = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง
 C_2 = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ
 เลือกแรงดันขาออก 200 V ซึ่งอัตราส่วนแรงดันโวลต์เตจดีไวเซอร์มีค่า 1000:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บตัวประจุและค่าความต้านทานภาคแรงต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

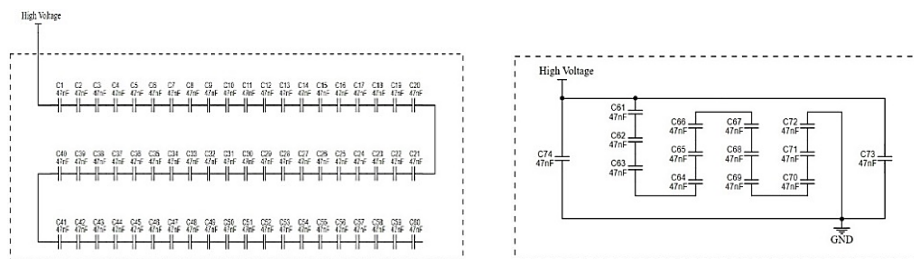
$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (8)$$

4.1.4 หาตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ จากอัตราส่วนของโวลเตจดีไวเดอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 200 V จะได้ อัตราส่วนลดทอนของโวลเตจดีไวเดอร์เท่ากับ 1000:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงดันสูงทั้งหมดเท่ากับ 98 nF ซึ่งเลือกตัวเก็บประจุเป็นแบบโพลีพรอฟิลีนฟิล์มค่าเก็บประจุภาคแรงดันต่ำคำนวณได้ดังสมการ (9)

$$\begin{aligned} C_2 &= (1000 \times C_1) - C_1 \\ C_2 &= (1000 \times 97.916 \text{ pF}) - 97.916 \text{ pF} \\ &= 97.818 \text{ nF} \approx 98 \text{ nF} \end{aligned} \quad (9)$$

4.2 รายละเอียดการออกแบบวงจรของโวลเตจดีไวเดอร์

การต่อตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงดันสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 480 ตัว การประกอบทำได้ โดยใช้แผ่นอะคริลิกเป็นวงกลมหนา 2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 cm ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 24 ตัวต่อชั้นระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 3.5 cm ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบอนุกรมและภาคแรงดันต่ำบรรจุอยู่ในกล่องโลหะพักสายแยกออกจากภาคแรงดันสูง



รูปที่ 4 วงจรสมมูลภาคแรงดันสูงและวงจรสมมูลภาคแรงดันต่ำ

4.3 การออกแบบอิเล็กโทรด

ออกแบบอิเล็กโทรดที่ดีควรจะไม่มีความคม เพราะจะทำให้จุดนั้นเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงส่งผลต่อการเกิดโคโรนาขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งควรมีความแข็งแรงทางกลด้วยเมื่อนำไปประกอบเข้ากับกระบอกรักษาความดันในการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงหรืออุปกรณ์แรงดันสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ทำควรป้องกันการรั่วซึมเนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลวหรือก๊าซบรรจุอยู่เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนระหว่างตัวอุปกรณ์กับผิวท่อ โดยจะหาค่าขนาดของรัศมีที่มากที่สุดของอิเล็กโทรดได้จากการคำนวณดังนี้ [12]

$$r \geq \frac{V_p}{E_{\max}} = \frac{V_p}{25 \text{ kV}} \quad (10)$$

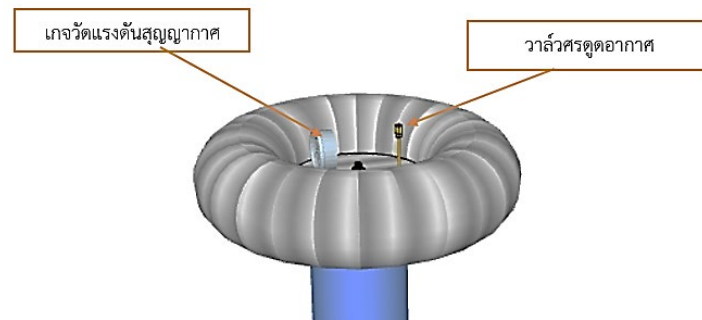
$$r \geq \frac{200 \text{ kV}_{\text{rms}} \times \sqrt{2}}{25 \text{ kV}_p} = 11.3 \text{ cm}$$

เมื่อ r = รัศมีของอิเล็กโทรด

V = ค่ายอดของแรงดันใช้งาน

$E_{\max}$ = ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ 25 kV/cm

โดยการออกแบบอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสร้างโวลเตจดีไวเดอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 22.6 cm รัศมีไม่น้อยกว่าขนาด 11.3 cm จึงออกแบบอิเล็กโทรดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23.3 cm และรัศมีขนาด 11.65 cm

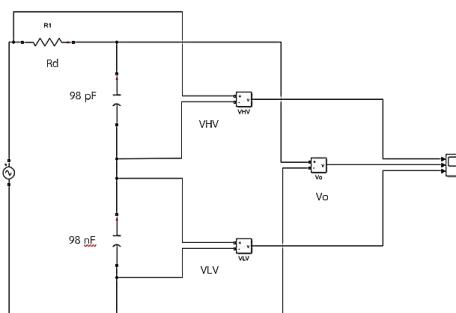


รูปที่ 5 แบบอิเล็กทรอนิกส์ส่วนบนพร้อมBourdon Gauge

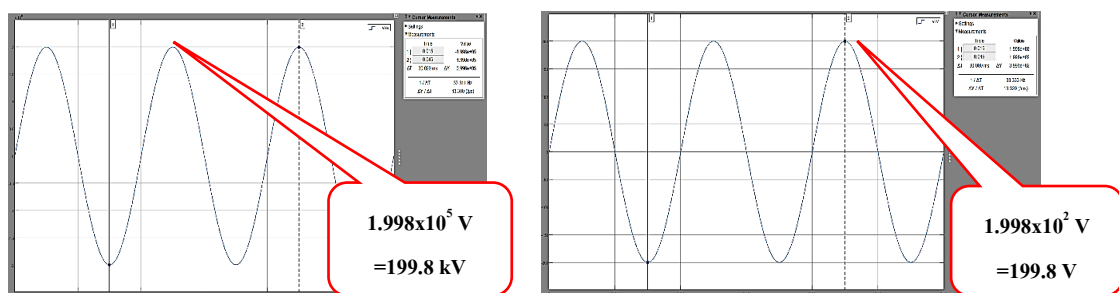
ค่าของความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทนอยู่ได้ ค่าความคงทนของฉนวนมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm ในงานวิจัยนี้คือค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด

4.4 การจำลองผลการทดลองผ่าน โปรแกรมMatlab/Simulink

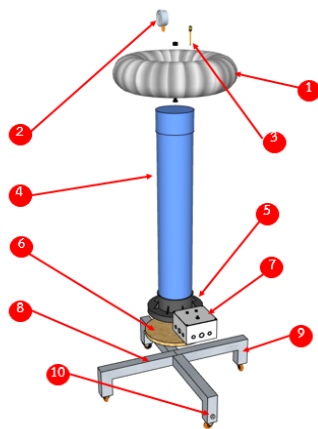
การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการช่วยวิเคราะห์ผลการออกแบบวงจร ทำให้ทราบพฤติกรรมการทำงานและปัจจัยต่าง ๆ ของระบบที่ส่งผลต่อการทำงานเช่นผลตอบสนองแรงดันและผลตอบสนองเชิงความถี่ การจำลองวงจรโวลเตจไดโวลเตอร์แบบตัวเก็บประจุด้วยโปรแกรม MATLAB เริ่มต้นด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ของวงจร เช่น ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_1 , C_2) และระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นใช้เครื่องมือ Simulink เพื่อสร้างและกำหนดค่าของวงจรที่ออกแบบไว้ การจำลองจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์การแบ่งแรงดันและการตอบสนองของวงจรในสภาวะต่าง ๆ โดยการจำลองและตรวจสอบผลลัพธ์ หากผลลัพธ์ไม่ตรงตามข้อกำหนด อาจต้องปรับปรุงการออกแบบและทำการจำลองซ้ำ ก่อนนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างวงจรจริง



รูปที่ 6 จำลองการออกแบบวงจรของโวลเตจไดโวลเตอร์ด้วยMATLAB/Simulink



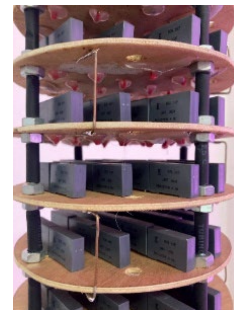
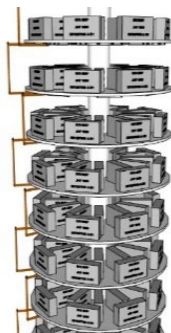
รูปที่ 7 สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมภาคแรงดันต่ำ



1. อิเล็กโทรดส่วนบน
2. เกจวัดแรงดันสูญญากาศ
3. วาล์วสำหรับดูดอากาศ
4. ท่อ PVC
5. หน้าแปลนรองท่อ PVC
6. แผ่นไม้นวน
7. กล่อง 6'x6' สำหรับวัดค่าแรงดัน
8. ฐานหลักของโวลเตจดีไวเดอร์
9. ล้อเลื่อน
10. จุดต่อกราวด์



รูปที่ 8 แบบแยกส่วนโวลเตจดีไวเดอร์



รูปที่ 9 การวางตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงในแต่ละชั้น

5.ผลการวิจัย

อุปกรณ์บางอย่างที่ได้ออกแบบไม่มีจำหน่ายตามท้องตลาดจึงเลือกอุปกรณ์มีค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุดและส่วนในการออกแบบส่วนอื่นก็ปรับไปตามด้วย ซึ่งต้องทำการทดสอบและเก็บผลการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 6006-2 (2010) เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ประกอบการศึกษาและเพื่อให้นักศึกษานำไปใช้ศึกษาปรับปรุงและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งการทดสอบสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

5.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำโดยใช้เครื่องมือวัด LCR meter HP Agilent 4263B

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

จุดวัดค่า ความจุไฟฟ้า	ค่าจากการคำนวณ (pF)	ค่าจากการวัด (pF)	% ความผิดพลาด % Error
ตัวเก็บประจุ ภาคแรงดันสูง	97.91	97.11	0.817
ตัวเก็บประจุ ภาคแรงดันต่ำ	97.90	96.99	0.929

จากตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงมีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.01 pF ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดต่ำกว่าค่าที่คำนวณ ซึ่งจากคำนวณได้มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.91 nF ค่าความผิดพลาดอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว ในงานวิจัยนี้ใช้ LCR วัดค่าซึ่งอาจทำให้สายวัดและความจุสเตรย์ถูกรวมค่าเข้าไปในการวัด ส่งผลให้ค่าสเกลแฟกเตอร์มีความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 10 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงและค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำที่วัดได้จาก LCR Meter Agilent 4263B

5.2 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

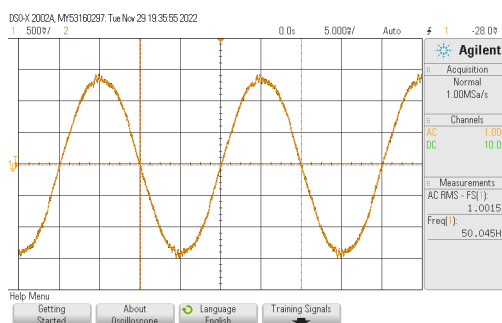
มาตรฐาน IEC 60060-1:2010 ข้อ 7.4.3 Check of the scale factors of the components ได้ระบุ ความไม่แน่นอนขยายไม่เกิน 1 % หากความแตกต่างของสเกลแฟกเตอร์ของแต่ละส่วนประกอบจากค่าก่อนหน้าไม่เกิน ± 1 % ระบบจะถือว่าสเกลแฟกเตอร์ที่กำหนดนั้นยังคงใช้ได้ หากความแตกต่างใดๆ เกิน 1% ค่าใหม่ของตัวประกอบมาตราส่วนที่กำหนดจะต้องถูกกำหนดในการทดสอบประสิทธิภาพ (การสอบเทียบ)

ในการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำการทดสอบที่แรงดันที่พิกัด 100 kV โดยมาตรฐานกำหนดว่าจะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) โดยจะทำการทดสอบจำนวน 15 ครั้ง โดยมาตรฐานกำหนดว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องน้อยกว่า 1% ของค่าเฉลี่ย F_m วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 13 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3 (สถานที่ทำการทดสอบห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบอุณหภูมิห้อง 21.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 69%)

ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV

ครั้งที่	V_{supply} (kV)	$V_{\text{measurement}}$ (V)	F_i (V_{REF}/V_m)
1	100.00	1.002	9,980.00
2	100.00	1.003	9,970.00
3	100.00	1.002	9,980.00
4	100.00	1.003	9,970.00
5	100.00	1.002	9,980.00
6	100.00	1.002	9,980.00
7	100.00	1.003	9,970.00
8	100.00	1.002	9,980.00
9	100.00	1.002	9,980.00

10	100.00	1.002	9,980.00
11	100.00	1.001	9,990.00
12	100.00	1.002	9,980.00
13	100.00	1.003	9,970.00
14	100.00	1.002	9,980.00
15	100.00	1.003	9,970.00
ค่าเฉลี่ย Fm			9,977.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			5.93
%ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)/ค่าเฉลี่ย Fm			0.059



รูปที่ 11 สัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 100 kV ขณะไม่มีโหลด

จากรูปที่ 11 ผลการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับจะทำการทดสอบที่แรงดัน 100 kV จำนวน 15 ครั้ง ผลการทดสอบตามตารางที่ 3 ค่าสเกลแฟกเตอร์มีค่าเท่ากับ 9,977.33 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.059 ของค่าเฉลี่ย Fm (มีค่าน้อยกว่า 1%) ซึ่งเป็นตามข้อกำหนดมาตรฐาน

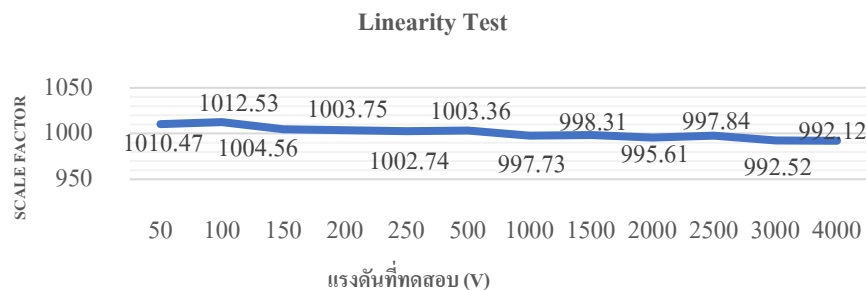
5.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ได้ทำการทดสอบวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง เพื่อดูผลของระบบที่ต้องการทดสอบว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ตามข้อกำหนดมาตรฐาน การทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการทดสอบจะทำการทดสอบ 5 ช่วง ตลอดแรงดันใช้งานซึ่งแต่ละค่าของระดับแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยแต่ละระดับแรงดัน ตามมาตรฐาน IEC ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันทดสอบกับแรงดันที่เปรียบเทียบมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย Fm ให้ถือว่าเครื่องมือที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการทดสอบจะทำการทดสอบระดับแรงดัน 5 ช่วงตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ซึ่งแต่ละค่าของระดับแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดันมาตรฐานได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันทดสอบกับแรงดันที่เปรียบเทียบมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย ให้ถือว่าเครื่องมือที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ครั้งที่	V_{REF} (kV)	V_m (V)	F_i (V_{REF}/V_m)
1	0.50	0.498	1.004
2	1.00	1.002	0.998
3	2.00	2.008	0.996
4	3.00	3.002	0.999
5	4.00	4.031	0.992
ค่าเฉลี่ย F_m			0.998
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			0.004
% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)/ค่าเฉลี่ย F_m			0.40%

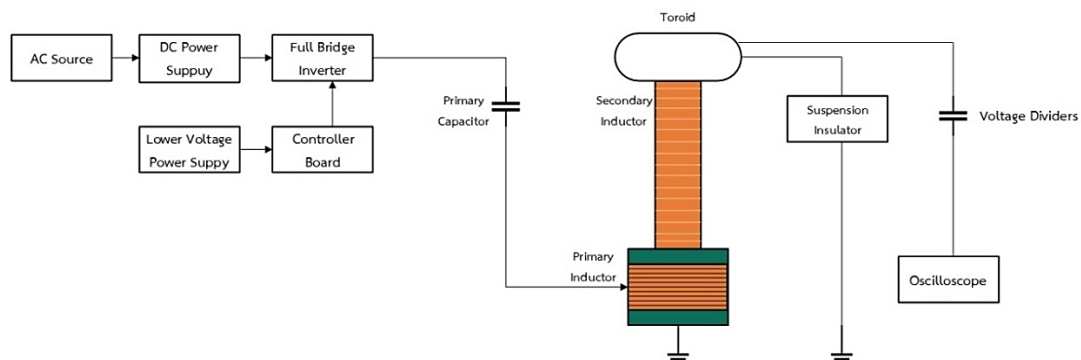


รูปที่ 12 กราฟคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

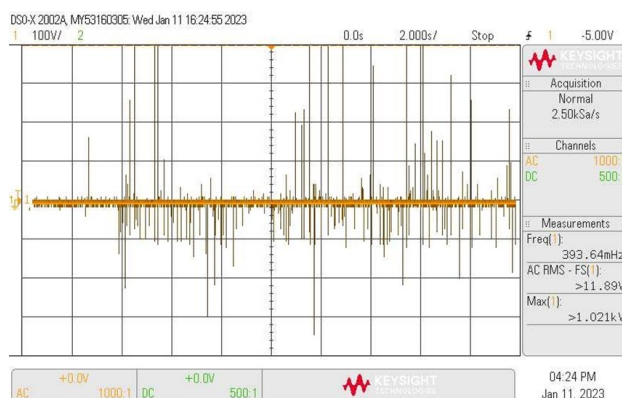
จากผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.04% ของ F_m ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย F_m ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

5.4 การทดสอบความเป็นเสถียรภาพ (Stability Test)

ทำการทดสอบโดยการนำโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างวัดค่าแรงดันสูงจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงขนาดพิกัด 200 kV 200 kHz โดยนำมาต่อกับหม้อแปลงแล้วทำการวัดค่าผ่านออสซิลโลสโคปแล้วบันทึกผล เพื่อทำการทดสอบคาปาซิทีฟโวลเตจดีไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่พิกัดตามกำหนดได้เมื่อใช้งานที่พิกัด ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110% ของพิกัด เป็นเวลา 1 นาที ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 13 แผนผังการต่อโวลเตจดีไวเดอร์ใช้งานร่วมกับหม้อแปลงแรงดันสูง



รูปที่ 14 กราฟผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเสถียรภาพของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 15 การทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ในการทดสอบลูกถ้วยด้วยหม้อแปลงทดสอบวัดขณะมีโหลด

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเสถียรภาพผ่านหม้อแปลงแรงดันสูงขณะมีโหลด

ครั้งที่	Vm(V)	Vr (kV)	Times (s)	Status
1	1.34	134.10	60	Withstands
2	1.24	124.70	60	Withstands
3	1.29	129.98	60	Withstands
4	1.30	130.05	60	Withstands
5	1.21	121.25	60	Withstands

การสร้างเครื่องมือวัดไฟฟ้า จะเกิดความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุในมาตรฐาน ใช้กับระดับการทดสอบที่ระบุใน IEC 60071-1 หลักการของมาตรฐานนี้ยังใช้กับระดับที่สูงขึ้นด้วย แต่ความไม่แน่นอนอาจมากกว่านั้น วิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วยไฟฟ้าแรงสูง ที่ระบุข้อกำหนดที่ระบบการวัดต้องเป็นไปตามกำหนดวิธีการในการตรวจสอบระบบการวัดและตรวจสอบส่วนประกอบ รวมไปถึงกำหนดข้อกำหนดของผู้ใช้สำหรับระบบการวัดนี้ จะทำให้เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนั้นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

การออกแบบโวลเตจดีไวเซอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีพรอพิลีนฟิล์ม ซึ่งมีความทนทานต่อแรงดันสูงและอุณหภูมิได้ดี ใช้การบรรจุในฉนวนแบบสุญญากาศและวัสดุพีวีซีทรงกระบอก ซึ่งเป็นการเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษเพื่อรองรับการใช้งานที่มีแรงดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีราคาไม่สูง อัตราส่วนในการลดทอนแรงดันที่เลือกใช้คือ 1000:1 ซึ่งทำให้โวลเตจดีไวเซอร์นี้มีความสามารถในการลดทอนแรงดันได้อย่างแม่นยำ และมีค่าความจุไฟฟ้ารวมที่ถูกคำนวณและออกแบบมาอย่างละเอียด ซึ่งอาจแตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่ใช้วิธีการฉนวน การใช้ MATLAB/Simulink ในการจำลองและวิเคราะห์การทำงานของโวลเตจดีไวเซอร์ ช่วยให้การออกแบบและการทดสอบเป็นไปอย่างมีระบบและมีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นการพัฒนาเทคนิคในการจำลองการทำงานการตรวจสอบก่อนการสร้างวงจรจริง

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบโวลเตจดีไวเซอร์สามารถวัดแรงดันสูงกระแสสลับ มีคุณสมบัติสอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ขณะทำการทดสอบเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของแรงดันที่จ่ายทดสอบ ตามปกติของโวลเตจดีไวเซอร์ในบางครั้ง แต่ก็สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี หรือนำไปใช้งานต่อร่วมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแรงดันกระแสสลับ อาจเกิดจากหลายสาเหตุดังต่อไปนี้

1) ค่าความผิดพลาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้มีค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำมาต่อใช้งานกับวงจรในภาคแรงดันสูงและแรงดันต่ำที่ออกแบบไว้ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นกับระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

2) ความผิดพลาดของเครื่องมือวัด เครื่องมือวัดที่นำมาใช้ในการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีทั้งแบบดิจิตอลมัลติมิเตอร์ อนุาล็อกมัลติมิเตอร์และดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งมีค่าความผิดพลาดในตัวเครื่องมือวัด

3) การเกิดโคโรนาในการทดสอบนั้นทำให้เกิดคลื่นรบกวนในระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้และเนื่องจากคุณสมบัติระบบวัดทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า จึงมีผลทำให้ระบบวัดเกิดความผิดพลาดขึ้น

4) ผลของอุณหภูมิและความชื้นในขณะการทดสอบ

5) ระหว่างการทำการทดลองเครื่องกำเนิดหรือแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จ่ายแรงดันขาออกแต่ละครั้งอาจมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้ระบบวัดเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนในการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ รวมถึงให้สถานที่ตลอดจนถึงเครื่องมือต่างๆ ในการจัดทำงานวิจัย และขอขอบคุณนางสาววิไลวรรณ กาวินคำ นายภูจิต อินตะวงค์ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยเหลือในการร่วมจัดทำงานวิจัยและเก็บผลการทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำราฯ สังข์สะอาด. (2549). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] ณัฐพงศ์ คั่นทะนุช. (2564). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [3] Kuffel, E. & Zaengl, W.S. (2000). **High Voltage Engineering Fundamentals**. Great Britain. A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

- [4] มินเรศน์ เตชะวงศ์ และ วรพงษ์ กันทะ. (2556).การออกแบบและสร้างชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์.วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT), 1(2): 43-48.
- [5] อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนากร น้ำหอมจันทร์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2563). การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์ สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ. วารสารมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, 2(1): 19-25.
- [6] ไชยพร หล่อทองคำ. (2546). โวลเตจดีไวเซอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับ กระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์” (โครงการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร).
- [7] อานนท์ อิศรมงคลรักษ์ และคณะ. (2565). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคการแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุพิกัด100kV สำหรับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง. ในการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14(931-942). นครปฐม: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- [8] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC Standard Publication 60060-1: High-Voltage Test Techniques - Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd Edition, 2010.
- [9] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC Standard Publication 60060-2: High-Voltage Test Techniques - Part 2: Measuring Systems, 3rd Edition, 2010.
- [10] IEEE Standards Association, IEEE 4-2013: Standard Techniques for High-Voltage Testing, 2013.
- [11] Uros Kovacevic, Zijad Bajramovic and Bojan Jovanovic.(2022). The Construction of Capacitor Voltage Divider for Measurement Ultrafast Pulse Voltage. Retrieved on December 1,2022, from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7296889>
- [12] Simon, B. (2022).Testing and Analysis of Universal High Voltage Divider. (Master Degree Thesis, Tampere University).