

การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด 200 กิโลโวลต์ Design and Construction of a 200 kV High Voltage Capacitor

บุญชู สมบุญเพ็ญ* และ ปิยะภัทร พ่วงศรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

E-mail: boonchoo1963@hotmail.com

Boonchoo Somboonpen* and Piyapat Pounsri

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology,

833 Rama 1 Rd., Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: boonchoo1963@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ที่มีความดันแก๊ส 3 บาร์ เพื่อใช้ทำตัวเก็บประจุมาตรฐานที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำมากสำหรับขนาดพิกัดแรงดัน 200 กิโลโวลต์ โครงสร้างของตัวเก็บประจุใช้สแตนเลสทำเป็นอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมกับอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และมีอิเล็กโทรดการ์ด ติดตั้งอยู่ในตัวท่อนวนพีวีซี โดยการประกอบตัวเก็บประจุที่พัฒนาขึ้นทำภายในห้องสะอาด และงานวิจัยนี้ทดสอบค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแรงสูงและสอบเทียบตัวเก็บประจุแรงสูงสำหรับใช้ทำเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อเป็นเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐานโดยกองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีค่า 50.611 พิโกฟารัด แพลเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.001% ผลการสอบเทียบของโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดัน ได้ค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ตัวคูณเท่ากับ 925.99 ค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.61\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับผลการสอบเทียบตัวเก็บประจุต่ออนุกรมวัดค่าออกแรงดันด้วยวิธีของซิมป์แอนด์ฟอสเททิว ได้ค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ตัวคูณ เท่ากับ 198.91 ค่าความไม่แน่นอน $\pm 1.65\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ: ตัวเก็บประจุแรงสูง, โวลเตจดีไวเดอร์, แพลเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

Abstract

The purposes of this research are to design and fabricated a high voltage capacitor using insulator of Sulphur hexafluoride (SF_6) at pressure gauge of 3 bar in order to obtain the very low dissipation factor at rated voltage of 200 kV, designed and figured with stainless concentric a half of sphere-coaxial cylinder electrode, mounted guard electrode in the insulated PVC tube. All the apparatuses are improved, correctly dimensional specified and constructed in the custom cleanroom. The capacitance of high voltage capacitor is measured and the calibration of high voltage capacitor for constructing a voltage divider as a standard measurement is carried out at High voltage testing department, Transmission system maintenance division, Electricity generating authority of Thailand. The result of the capacitance measurement of capacitor is 50.611 pF when the dissipation factor is 0.001%. The calibration result of voltage divider measurement shows that the average scale factor is 925.99 at uncertainty $\pm 0.61\%$ with a probability of 95% and the Chubb and Fortescue method measurement for peak value of measured voltage shows that the average scale factor is 198.91 at uncertainty $\pm 1.65\%$ with a probability of 95%.

Keywords: High voltage capacitor, Voltage divider, Dissipation factor

1. บทนำ

ในการศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุแรงสูง ทั้งภาคปฏิบัติและงานวิจัยต่างๆ รวมถึงภาคอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุแรงสูงในการทดสอบอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นตามที่มาตรฐานกำหนด ตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างจากตัวเก็บประจุที่ใช้กันทั่วไป คือต้องมีค่าแฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำมาก จึงต้องใช้ตัวเก็บประจุแรงสูงแบบก๊าซอัดความดันที่ออกแบบโดยรูปทรงของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น และทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม มีอิเล็กโทรดคาร์ดสำหรับทำหน้าที่เป็นชิลด์ ทำให้ไม่มีสนามไฟฟ้ารบกวนจากภายนอกซึ่งติดตั้งอยู่ในตัวถังฉนวนพีวีซี และใช้การฉนวนด้วยก๊าซ SF_6 อัดความดันที่ทำให้ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง ในการออกแบบเพื่อใช้งานต้องมีค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุแรงสูง มีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 30-100 พิโกฟารัด (pF) [1] โดยทั่วไป ใช้เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐาน เพราะจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยมาก ความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์สำคัญต่อการฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ในการออกแบบวัสดุฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จะต้องคำนึงถึงความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมาการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง เพื่อใช้ในงานทดสอบและเป็นส่วนหนึ่งของชุดวัดแรงดันไฟฟ้าสูงเพียง 30-150 กิโลโวลต์ (kV) เท่านั้น [3-6] บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด 200 kV เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และเป็นแนวทางสำหรับศึกษาเพื่อพัฒนาตัวเก็บประจุชนิด

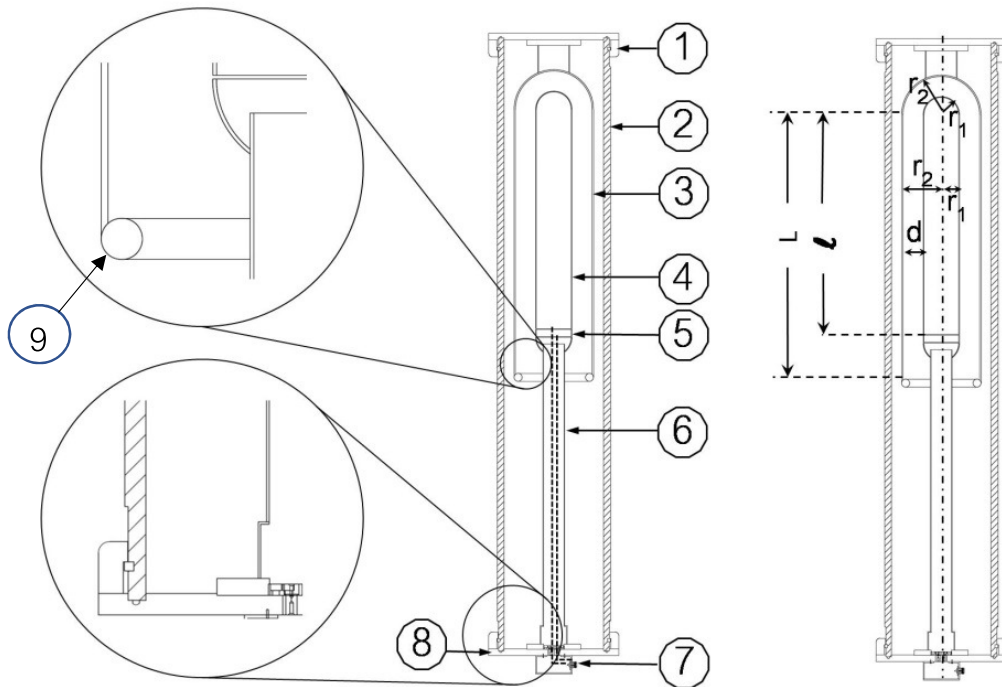
นี้ต่อไป โดยมีผลการทดสอบการวัดค่าความจุไฟฟ้า การสอบเทียบเมื่อใช้ทำเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบโวลเตจดีไวเซอร์ และการสอบเทียบเมื่อใช้ทำเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่ายอดด้วยวิธีของชับบ์แอนด์ฟอร์เทสคิว (Chubb and Fortescue)

2. การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุแรงสูง

การออกแบบคำนึงถึงโครงสร้างของตัวเก็บประจุและมิติที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบโดยสรุป มีดังนี้

2.1 ลักษณะโครงสร้างตัวเก็บประจุแรงสูง

ตัวเก็บประจุแรงสูงนี้ได้จากสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดแบบครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์ร่วมและทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม มีอิเล็กโตรดการ์ดอัดก๊าซ SF_6 ที่ความดันเกจ 3 บาร์ (ความดันสัมบูรณ์ 4 บาร์) เพื่อเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก และใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ที่ผลิตภายในประเทศ ชนิดทนความดันได้ 13.5 บาร์ เป็นภาชนะอัดความดัน และเป็นฉนวนภายนอกให้กับตัวเก็บประจุแรงสูง ซึ่งตัวเก็บประจุนี้จะไม่ผลต่อระบบวัดแรงดันจากค่าเก็บประจุสเตรย์ (Stray capacitance) โดยโครงสร้างมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซ SF_6

- | | | |
|------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1) ฝาปิดบน | 2) ตัวถังฉนวนพีวีซี | 3) อิเล็กโตรดแรงสูง |
| 4) อิเล็กโตรดวัดแรงดัน | 5) อิเล็กโตรดการ์ด | 6) อิเล็กโตรดต่อลงดิน |
| 7) ขั้วต่อสายเคเบิล | 8) ฝาปิดล่าง | 9) อิเล็กโตรดวงแหวนโดนัท |

ตัวเก็บประจุแรงสูงที่สร้างขึ้นด้วยโลหะสแตนเลส ที่ออกแบบโดยรูปทรงของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น และทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม มีอิเล็กโทรดการ์ดสำหรับทำหน้าที่เป็นชีลด์อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกซึ่งเป็นอิเล็กโทรดแรงสูงส่วนบนเป็นครึ่งทรงกลมจะยึดอยู่กับหน้าแปลนโลหะด้านบนที่รองรับด้วยฉนวนพีวีซี ปลายล่างของอิเล็กโทรดแรงสูงเชื่อมด้วยอิเล็กโทรดวงแหวนโค่นัท เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า ส่วนอิเล็กโทรดทรงกระบอกในเป็นอิเล็กโทรดแรงต่ำ ส่วนบนจะเป็นครึ่งทรงกลมยึดด้วยท่อในแนวดิ่งให้มีลักษณะซ้อนกันแน่นกับอิเล็กโทรดนอก ท่อโลหะที่ใช้ยึดอิเล็กโทรดทรงกระบอกในจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับและอิเล็กโทรดต่อลงดินหรือชีลด์ให้กับสายวัดแรงต่ำและสายต่ออิเล็กโทรดการ์ด ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดวัดแรงดัน อิเล็กโทรดการ์ด และอิเล็กโทรดต่อลงดิน ยึดตรึงและกันด้วยฉนวนชุบเปอร์ลีน

การออกแบบและพัฒนาตัวเก็บประจุทรงกระบอกซ้อนกันแน่นอัดก๊าซนี้ ได้ใช้มิติของครึ่งทรงกลมเป็นเกณฑ์ในการเลือกมิติที่เหมาะสม เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ครึ่งทรงกลม ค่าความจุที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุแรงสูงที่มีโครงสร้างแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น และใช้ก๊าซอัดความดันเป็นไดอิเล็กตริกจะมีค่าอยู่ในย่าน 30-100 pF ในที่นี้ออกแบบให้มีค่าความจุไฟฟ้า 50 pF

2.2 มิติโครงสร้างตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่ออกแบบ

มิติโครงสร้างตัวเก็บประจุแรงสูงสร้างตามเงื่อนไขคือแรงดัน 200 kV ความดันแก๊ส SF₆ เท่ากับ 3 บาร์ ค่าความจุไฟฟ้า 50 pF วัสดุโครงสร้างสามารถหาได้ภายในประเทศ การออกแบบเริ่มต้นด้วยการเลือกขนาดอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลมใน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ต้องไม่เกิดโคโรนาที่แรงดันกำหนดโดยคำนึงถึงค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งาน สภาพผิวของอิเล็กโทรด และความคลาดเคลื่อนจากการประกอบ และต้องได้ค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการ โดยที่มิติของตัวเก็บประจุไม่ใหญ่จนเกินไป การเลือกอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลมนอกต้องคำนึงถึงมิติที่เหมาะสม ส่วนขนาดของท่อพีวีซีต้องคำนึงถึงความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศตามผิวความยาวท่อพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 4 kV/cm ความยาวภาชนะอัดความดันที่เหมาะสมควรยาวประมาณสองเท่าของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก ลักษณะโครงสร้างตัวเก็บประจุดังกล่าวแบ่งได้ 2 ส่วน คือ บริเวณครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม และบริเวณทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

ในอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น ส่วนบนเป็นครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมซึ่งสามารถหาค่า r_1 จากสมการ (1) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองและความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซ SF₆ ที่ความดันสัมบูรณ์ 4 บาร์

$$r_1 = \frac{U_n}{0.5E_{max}} = 4.83 \text{ cm} \quad (1)$$

เมื่อ

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซ SF₆ ที่ความดันสัมบูรณ์ 4 บาร์ มีค่า 351.2 kV/cm (87.8 kV/cm·bar)

U_n คือ แรงดันค่าขอดระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง [kV] ซึ่งคำนวณจาก $U_n = U \cdot K$ โดยที่ U คือ แรงดันค่าขอดที่กำหนดมีค่า $200\sqrt{2} = 282.8$ kV และ K คือ แฟกเตอร์ความปลอดภัยขณะใช้งานมีค่าเท่ากับ 3 จะได้ $U_n = 200\sqrt{2} \times 3 = 849$ kV นั่นคือแรงดันต่ำสุดที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาชนิดต่างๆ มีค่า 849 kV เพื่อใช้หาชนิดที่พอเหมาะจากบริเวณทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม

เมื่อได้ค่า r_1 พิจารณาหาชนิด อาศัยสมการ (2) สามารถคำนวณหา r_2 ได้ดังต่อไปนี้

$$r_2 = \frac{r_1}{0.5} = 9.66 \text{ cm} \quad (2)$$

ผลจากการคำนวณจะได้รัศมี $r_1 = 4.83$ cm ค่า $r_2 = 9.66$ cm แต่ท่อสแตนเลสที่ผลิตตามมาตรฐานที่สามารถจัดหาซื้อได้ ขนาดใกล้เคียงอยู่ที่ 3.5 นิ้ว มีรัศมี 5.08 cm และขนาด 8 นิ้ว รัศมี 10.95 cm จากมิติดังกล่าว ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม จากสมการ (3)

$$\begin{aligned} C &= \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} \\ &= \frac{4\pi(8.854 \times 10^{-12})(1.00191)(5.08 \times 10^{-2})(10.95 \times 10^{-2})}{2[(10.95 \times 10^{-2}) - (5.08 \times 10^{-2})]} \\ &= 5.28 \text{ pF} \end{aligned} \quad (3)$$

พิจารณาที่ทรงกระบอก เมื่อ C บริเวณครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมเท่ากับ 5.28 pF แต่ค่า C ที่ต้องการคือ 50 pF ดังนั้นค่า C บริเวณทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมที่ต้องการเท่ากับ $50 - 5.28 = 44.72$ pF อาศัยสมการ (4) สามารถคำนวณหาความยาว ℓ ของอิเล็กโทรดทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \ell &= \frac{C \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \\ &= \frac{44.72 \ln\left(\frac{10.95}{5.08}\right)}{2\pi(8.854)(1.00191)} = 61.62 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (4)$$

ดังนั้น ในที่นี้ออกแบบให้ ℓ เท่ากับ 61.50 cm และเพื่อให้อิเล็กโทรดทรงกระบอกภายนอกห่อหุ้มอิเล็กโทรดภายในได้หมด จึงออกแบบให้อิเล็กโทรดภายนอกยาวกว่าอิเล็กโทรดภายในประมาณ 10-15 cm อิเล็กโทรดทรงกระบอกภายนอกจึงมีความยาว L เท่ากับ 75 cm สำหรับท่อ พีวีซี ต้องคำนึงถึงความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศตามผิวความยาวท่อพีวีซี ซึ่งมีค่าประมาณ 4 kV/cm ความยาวภาชนะอัดความ

คันที่เหมาะสมควรยาวประมาณสองเท่าของอิเล็กโทรดทรงกระบอกนอก เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาด 12 นิ้ว รัศมี 15.9 cm Class 13.5 ความยาวของท่อ 170 cm

เมื่อทำการกลึงและขัดผิวแล้วอิเล็กโทรดทรงกระบอกในวัดความยาวได้ 60.50 cm มีรัศมี 5 cm ส่วนอิเล็กโทรดทรงกลมใน มีรัศมี 5 cm อิเล็กโทรดทรงกระบอกนอกเมื่อทำเสร็จแล้ววัดความยาวได้ 75 cm มีรัศมี 10.57 cm ส่วนอิเล็กโทรดทรงกลมนอก มีรัศมีภายในได้ 10.57 cm เพราะขนาดวัสดุที่เลือกใช้ตามจริงมีขนาดเล็กกว่าที่ระบุเล็กน้อย ท่อพีวีซีรัศมี 15.9 cm เมื่อทำเสร็จแล้ววัดความยาวของท่อได้ 169 cm อิเล็กโทรดการ์ดยาว 2 cm และมีช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดวัดแรงดันและอิเล็กโทรดต่อลงดิน 2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดต่อลงดินมีรัศมี 3 cm ที่ปลายล่างของอิเล็กโทรดแรงสูงเชื่อมด้วยท่อสแตนเลสวงแหวนรูปโดนัท เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า ขนาดของท่ออิเล็กโทรดวงแหวนมีรัศมีของท่อ 1.1 cm และรัศมีในวงแหวนโดนัท 8.73 cm ท่อยึดอิเล็กโทรดวัดแรงดัน ใช้ท่อสแตนเลสขนาด 2 นิ้ว รัศมี 3 cm ยาว 75.5 cm

จากมิติที่สร้างเสร็จแล้วสามารถคำนวณหาค่า C , U_i , η^* และ $E_{\max}$ โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน

ส่วนที่ 1 บริเวณครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม ใช้ $r_1 = 5$ cm $r_2 = 10.57$ cm และ $\epsilon_r = 1.00191$

1) ค่าความจุไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ (5)

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} = 5.29 \text{ pF} \quad (5)$$

2) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ (6)

$$\eta^* = \frac{r_1}{r_2} = 0.473 \quad (6)$$

3) แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด คำนวณได้จากสมการ (7)

$$\begin{aligned} U_i &= \left(\frac{E}{p} \right)_c \left[1 + \frac{a}{\sqrt{p \cdot r_1}} \right]^2 p \cdot d \cdot \eta^* \\ &= 87.8 \left[1 + \frac{0.0881}{\sqrt{4 \times 5}} \right]^2 4 \times (10.57 - 5) \times 0.473 = 962 \text{ kV} \end{aligned} \quad (7)$$

4) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด คำนวณได้จากสมการ (8) ใช้ $U = 282.84$ kV

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right)} = 107.36 \text{ kV/cm} \quad (8)$$

ส่วนที่ 2 บริเวณทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ใช้ $r_1 = 5 \text{ cm}$ $r_2 = 10.57 \text{ cm}$ $\epsilon_r = 1.00191$ และ $\ell = 60.5 \text{ cm}$

1) ค่าความจุไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ (9)

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r\ell}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 45.05 \text{ pF} \quad (9)$$

2) แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ (10)

$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{(r_2 - r_1)} = 0.672 \quad (10)$$

3) แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด คำนวณได้จากสมการ (11) ใช้ $b = 0.125$

$$U_i = \left(\frac{E}{p}\right)_c p \cdot d \cdot \eta^* \left[1 + \frac{b}{\sqrt{p \cdot r_1}}\right] = 1,351 \text{ kV} \quad (11)$$

4) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จากสมการ (12)

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = 75.56 \text{ kV/cm} \quad (12)$$

ส่วนที่ 3 บริเวณทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ r_1 เท่ากับ 5 cm r_2 เท่ากับ 10.57 cm $\epsilon_r = 1.00191$ และ ความยาวอิเล็กทรอนิกส์ เท่ากับ 2 cm ทำการคำนวณได้ค่าความจุไฟฟ้า 1.49 pF เมื่อเปรียบเทียบจากการวัดค่าความจุไฟฟ้า ด้วยเครื่องวัดแบบ Schering bridge ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 10 kV ได้ค่า 1.745 pF

ส่วนที่ 4 ทรงกระบอกซ้อนวงแหวนโดนัท ใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่อลงดินมีรัศมี 3 cm อิเล็กทรอนิกส์วงแหวนโดนัทรัศมีของท่อ 1.1 cm และรัศมีในวงแหวนโดนัท 8.73 cm [7]

1) คำนวณที่อิเล็กทรอนิกส์ต่อลงดิน ได้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta_A^* = 0.692$ และมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ที่อิเล็กทรอนิกส์ต่อลงดิน $E_{\max} = 71.33 \text{ kV/cm}$

2) คำนวณที่อิเล็กทรอนิกส์วงแหวนโดนัท ได้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta_B^* = 0.667$ และมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ที่อิเล็กทรอนิกส์วงแหวนโดนัท $E_{\max} = 74.01 \text{ kV/cm}$

ดังนั้นสามารถสรุปค่า C , U_i , η^* และ $E_{\max}$ ที่คำนวณได้จากมิติที่แล้วเสร็จทั้ง 4 ส่วน คือ ครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และที่ทรงกระบอกซ้อนวงแหวน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า C, U_i และ η^* ที่คำนวณได้จากมิติที่สร้างขึ้น

	C (pF)	U_i (kV)	η^*	$E_{\max}$ (kV/cm)
ครึ่งทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม	5.29	962	0.473	107.36
ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	45.05	1,351	0.672	75.56
ส่วนอิเล็กทรอนิกส์	1.49	1,351	0.672	75.56
ทรงกระบอกซ้อนวงแหวนโดนัท ที่อิเล็กทรอนิกส์ต่อลงดิน			$\eta_A^* = 0.692$	71.33
ทรงกระบอกซ้อนวงแหวนโดนัท ที่อิเล็กทรอนิกส์วงแหวนโดนัท			$\eta_B^* = 0.667$	74.01

เมื่อพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วนปรากฏว่า ส่วนที่ 1 คือบริเวณทรงกลมซ้อนแกนร่วมมีแนวโน้มที่จะเกิดการเบรกดาวน์มากกว่าส่วนที่เหลือ แต่ตัวเก็บประจุนี้ทำการอัดก๊าซ ไวที่ความดันเกจ 3 บาร์ ซึ่งสามารถทนแรงดันระดับ 200 kV และสามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้มากถึง 351.2 kV/cm จึงทำให้ไม่เกิดเบรกดาวน์ระหว่างอิเล็กทรอนิกส์

ดังนั้นตัวเก็บประจุแรงสูงที่ออกแบบสร้างขึ้นมา (ดังรูปที่ 2) จะมีความจุไฟฟ้า 50.34 pF แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด 962 kV ที่บริเวณครึ่งทรงกลมซ้อนแกนร่วม ความดันเกจก๊าซ SF_6 3 บาร์ ท่อพีวีซีทนความดัน 13.5 บาร์ ยาว 169 cm เป็นภาชนะอัดความดัน



รูปที่ 2 โครงสร้างตัวเก็บประจุอัดก๊าซ SF_6 ที่สร้างเสร็จแล้ว

3. ผลการทดสอบ

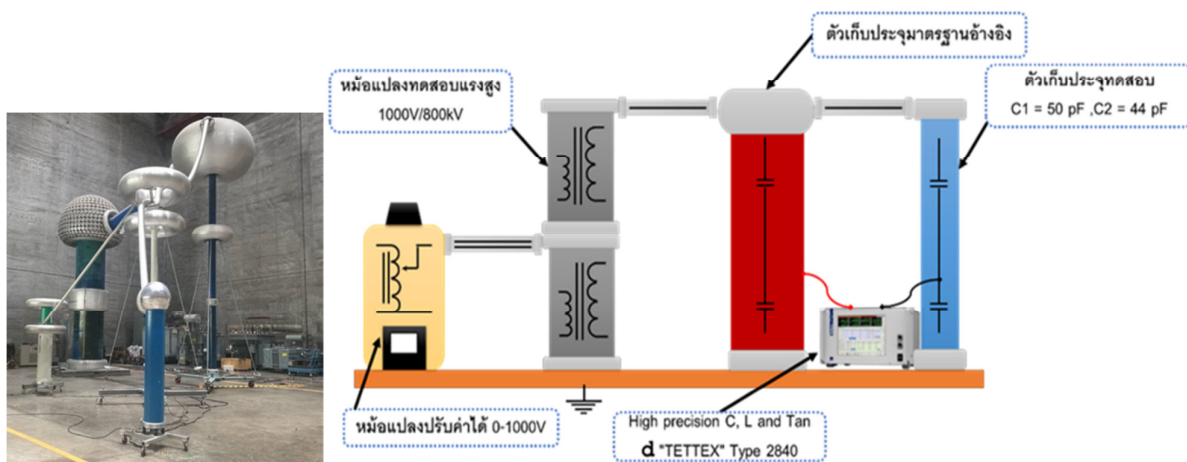
การทดสอบและสอบเทียบด้วยระบบแรงดันสูงตามมาตรฐาน [8-11] สำหรับตัวเก็บประจุแรงสูงที่ได้พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดสอบที่กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) สภาพแวดล้อม อุณหภูมิห้อง 33.7°C ความชื้น 53.7% ความดันบรรยากาศ 1,015 mbar

3.1 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้า

จากการออกแบบสร้างตัวเก็บประจุมาตรฐานอัดก๊าซ SF_6 และแก้ไขอุปกรณ์ต่างๆ จะต้องทำการวัดและทดสอบหาค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์กำลังสูญเสียโดยการใช้อุปกรณ์ Schering Bridge ดังรูปที่ 3 เมื่อจ่าย

แรงดัน 10 kV 50 kV และ 100 kV ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันคือ 50.611 pF โดยที่แรงดัน 100 kV ได้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกคือ 0.001% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-5} ตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF₆ ดังแสดงในตารางที่

2



รูปที่ 3 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า

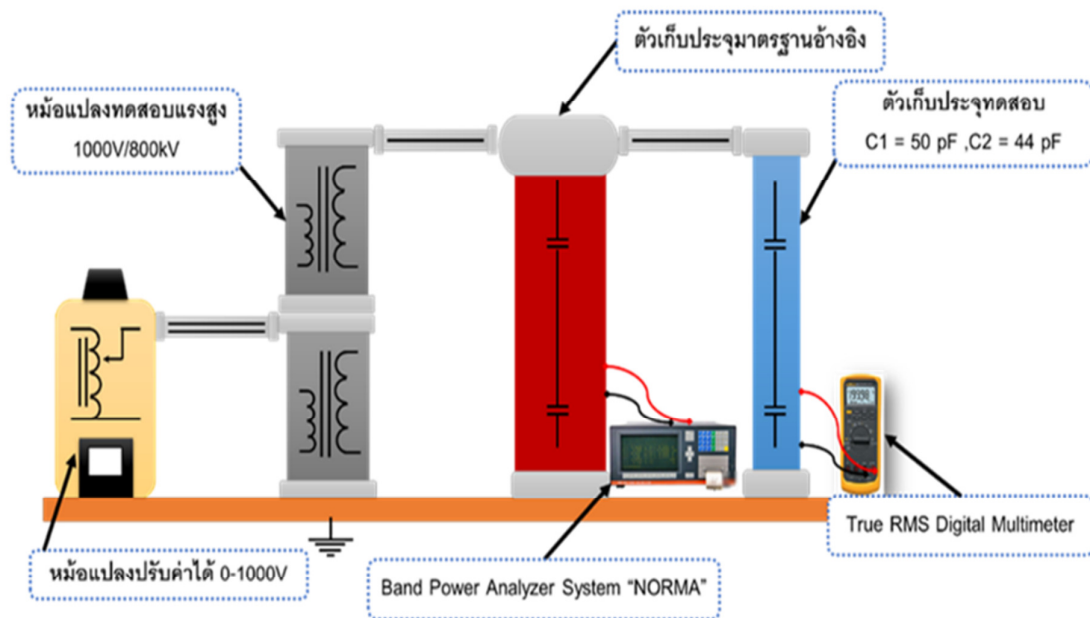
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้า

U_{test} (kV _{rms})	f (Hz)	C (pF)	DF ($\tan\delta$) %
10	50	50.611	0.0013
50	50	50.611	0.0011
100	50	50.611	0.0010

3.2 การสอบเทียบเมื่อใช้ทำเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบโวลเตจดีไวเดอร์

โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าสูงกระแสสลับทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงให้ต่ำลงพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์ หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำวัดได้ โดยใช้ $C_1 = 50$ pF 200 kV (50.611 pF) และ $C_2 = 44$ pF 2 kV (ค่า C_2 รวมค่า C ของสาย Coaxial RG-11 ยาว 25 เมตร = 46.8 nF) ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงผลการสอบเทียบได้ค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ตัวคูณ (F_s) ของระดับแรงดันตั้งแต่ 20 kV ถึง 200 kV เท่ากับ 925.99 ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ $\pm 0.61\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการสอบเทียบความไม่มีเสถียรภาพในระยะเวลาช่วงสั้น 5 นาที ที่ระดับแรงดันสูงสุด 200 kV ได้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ 925.66



รูปที่ 4 วงจรเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบโวลเตจดิไวเดอร์

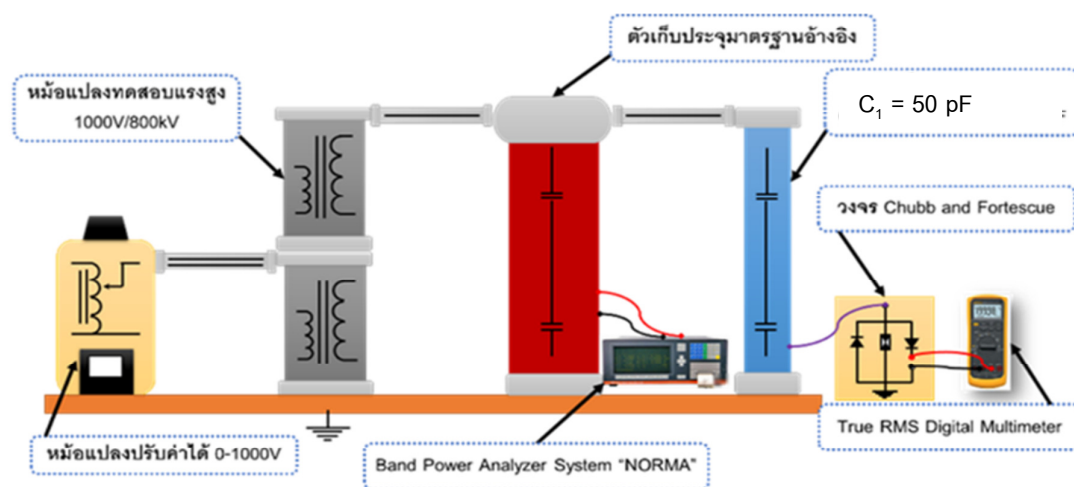
ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบเมื่อใช้ทำเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบโวลเตจดิไวเดอร์

Level (kV)	U_{ref} (kV)	U_{SF6} (V)	F_s	U_{SF6} (kV)	δF (%)	sF	sF (%)	$U_{\pm}$
20	21.839	23.58	926.09	21.84	0.011	0.32	0.034	0.6051
40	40.259	43.47	926.03	40.26	0.004	0.45	0.0482	0.6042
60	61.567	66.48	926.08	61.57	0.01	0.3	0.0327	0.6040
80	80.165	86.56	926.15	80.16	0.017	0.24	0.0256	0.6039
100	100.579	108.6	926.11	100.58	0.013	0.25	0.0273	0.6039
120	119.961	129.54	926.07	119.96	0.008	0.28	0.0306	0.6039
140	142.019	153.38	925.92	142.02	-0.007	0.24	0.026	0.6039
160	160.324	173.17	925.81	160.32	-0.019	0.2	0.0216	0.6039
180	181.003	195.48	925.93	181	-0.006	0.16	0.0171	0.6039
200	200.976	217.1	925.71	200.98	-0.03	0.19	0.0201	0.6039
200*	201.1	217.25	925.66	201.1	-0.035	0.14	0.015	0.6030

หมายเหตุ : 200* = Short term instability 200 kV 5 mins

3.3 การสอบเทียบเมื่อใช้ทำเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่ายอดวิธีของ Chubb and Fortescue

รูปที่ 5 แสดงวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่ายอดวิธีของ Chubb and Fortescue โดยใช้มิเตอร์วัดกระแสตรงวัดค่าเฉลี่ย ซึ่งค่ากระแสเฉลี่ยที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างระหว่างค่ายอดบวกกับค่ายอดลบของแรงดัน



รูปที่ 5 วงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่ายอดวิธีของ Chubb and Fortescue

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบวงจรต่ออันดับวัดค่ายอดกระแสสลับ วิธีของ Chubb and Fortescue

Level (kV)	$\hat{U}_{ref}$ (kV)	$\bar{I}_{SF6}$ (mA)	F_s	$\delta F(\%)$	sF	sF(%)	$U_{\pm}$
60	86.19	0.432	199.70	0.399	0.37	0.1861	1.63
80	114.71	0.576	199.15	0.122	0.22	0.1082	1.37
100	145.86	0.734	198.83	-0.039	0.43	0.2176	1.22
120	167.67	0.843	198.80	-0.052	0.23	0.1181	1.16
140	198.17	0.995	199.13	0.111	0.41	0.2035	1.10
160	226.67	1.139	198.97	0.034	0.42	0.2126	1.07
180	255.33	1.287	198.42	-0.243	0.40	0.2013	1.04
200	283.3	1.431	198.25	-0.332	0.33	0.1655	1.02
200*	282.55	1.427	198.06	-0.426	0.21	0.1084	1.02

หมายเหตุ : 200* = Short term instability 200 kV 5 mins

ค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ตัวคูณ (F_s) ของระดับแรงดันตั้งแต่ 60 kV ถึง 200 kV เท่ากับ 198.91 ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ $\pm 1.65\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับผลการสอบเทียบความไม่มีเสถียรภาพในระยะเวลาช่วงสั้น 5 นาที ที่ระดับแรงดันสูงสุด 200 kV ได้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณ 198.06 ดังแสดงผลในตารางที่ 4

4. สรุป

การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) เพื่อใช้ทำตัวเก็บประจุมาตรฐานที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำมาก พิกัดแรงดัน 200 kV โครงสร้างใช้สแตนเลสทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม กับอิเล็กทรอนิกส์บอกร่วม และมีอิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งอยู่ในตัวฉนวนพีวีซี การออกแบบได้เลือกวัสดุโลหะสแตนเลสสำหรับทำอิเล็กทรอนิกส์ มีการปรับแต่งขนาดการกำหนดขนาดในงานออกแบบตามขนาดวัสดุที่มีให้ใช้ได้ การประกอบในขั้นตอนสุดท้ายจัดทำกระบวนการสร้างในห้องสะอาด ใช้ก๊าซ SF_6 อัดความดันเกจที่ 3 บาร์ ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีค่า 50.611 pF แฟกเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.001% ผลการสอบเทียบเมื่อใช้ทำโวลเตจดีไวเดอร์วัดแรงดัน ได้ค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ตัวคูณเท่ากับ 925.99 ค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.61\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับผลการสอบเทียบตัวเก็บประจู่่อนุกรมวัดค่ายอดแรงดันแบบชับบ์แอนด์ฟอสเทสคิว ได้ค่าเฉลี่ยของแฟกเตอร์ตัวคูณ เท่ากับ 198.91 ค่าความไม่แน่นอน $\pm 1.65\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด 200 kV นี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวประจุมาตรฐานได้ วิธีการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางศึกษาและพัฒนาตัวเก็บประจุนิตนี้ได้อีกต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (บางพลี) ที่ช่วยอนุเคราะห์และให้ความร่วมมือ เอื้อเฟื้อสถานที่และให้คำแนะนำที่จำเป็นในการดำเนินงานในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, High Voltage Engineering Fundamentals, 2nd edition, Newnes, Oxford, 2000.
- [2] ตำราวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, พิมพ์ครั้งที่ 3, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2549.
- [3] บุญชู สมบุญเพ็ญ, “การออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด 100 กิโลโวลต์,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10, กาญจนบุรี, 2561, หน้า 516-519.

- [4] มินเรศน์ เตชะวงศ์ และ วรพงศ์ กันทะ, “การออกแบบและสร้างชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์,” วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, 2556, หน้า 38-43.
- [5] อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนากร น้ำหอมจันทร์, พงสวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์ “การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ,” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย, ปีที่ 2, ฉบับที่ 1, 2551, หน้า 19-25.
- [6] ซามูเอล พรหมาน และคณะ, “ตัวเก็บประจุมาตรฐานสำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับ 30-100 kV,” ปรินญา นิพนธ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, ประเทศไทย, 2557.
- [7] ศราวุฒิ คลี่สุวรรณ, เอกสารประกอบการสอนวิชา 113603 วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง 1, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2548.
- [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] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC standard publication 60060-3: High-voltage Test Techniques - Part 3: Definitions and requirements for on-site testing, 2006.
- [11] IEEE Standards Association, IEEE 4-2013: Standard Techniques for High-Voltage Testing, 2013.