

การศึกษาการใช้ Stress cone เพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน ในสายเคเบิล

ธนากร น้ำหอมจันทร์¹ อติกร เสรีพัฒนานนท์¹ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ¹

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย คลอง 5 รังสิต-นครนายก ัญบุรี ปทุมธานี 12110

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการใช้ stress cone เพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 มม.² โดยซูเปอร์สึนไนลอนกลิ้งขึ้นรูปสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ capacitive stress control บริเวณปลายสายเคเบิล ในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาใช้ในการจำลองหาขนาดของ stress cone และการกระจายของสนามไฟฟ้า โดย stress cone ที่ออกแบบสร้างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.86 ซม. ยาว 12 ซม. ซึ่งมีขนาดที่สั้นกว่าหัวต่อสายแบบที่ออกแบบโดยมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ถึงร้อยละ 40 และไม่ต้องใช้ฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า เนื่องจาก stress cone จะช่วยลดการหักเหของความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสาย ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวลดลง โดยสามารถลดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสายได้ 7.67 kV และสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ทั้งในห้องทดสอบและในสถานที่ติดตั้งได้ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 และ IEC 60270 เนื่องจากหัวต่อสายที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายสะดวก มีต้นทุนการสร้างต่ำ

คำสำคัญ : ตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน / หัวต่อสายเคเบิล

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

The Study to Use Stress Cone Terminators for Partial Discharge Measurement in High Voltage Underground Cable

Thanakorn Namhormchan ¹, Atigon Sarephattananon ¹ and Pongsawat Kotchapoom ¹

Eastern Asia University, Rangsitnakhonnayok Rd. (Khong 5), Thanyaburi, Pathumthani 12110

Abstract

This paper presents the studying of using the stress cone terminator for partial discharge measurement. The stress cone terminator is used for high voltage underground cable witch has rated voltage of 12/20 (24) kV and a cross section area of 240 mm.² The stress cone terminator is produced from superlene nylon for electric stress control like a capacitive stress control. The dimension of the stress cone and an electric field stress distribution are simulated using Finite Element Method (FEM). The stress cone terminators have a diameter of 8.86 cm. and a length of 12 cm. It is shorter than optimization oil tube terminator 40% and it does not use insulation for stress control because a stress cone can reduce an electric field. Those can reduce an electric field to 7.67 kV. Furthermore, the cable terminator is utilized in measuring the partial discharges both in laboratory and on-site tests according to IEC standards, No.60502-2 and No.60270. With low cost to produced and mobility in use, because it's has smallest size.

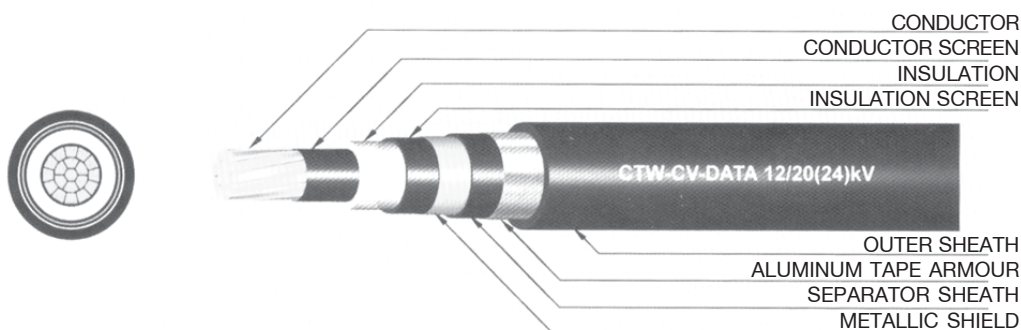
Keywords : Partial Discharge Measurement / Cable Terminator

¹ Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน เป็นรายการหนึ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพจากผู้ผลิตเสมอ เนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียหายเป็นจุดๆ และเกิดความผิพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเบรกดาวอย่างสมบูรณ์ได้ ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง ดิสชาร์จบางส่วนที่พบมากในสายเคเบิล คือ ดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่มีโพรงหรือฟองก๊าซหรือมีสิ่งเจือปนที่มีค่า ϵ_r ต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก [1]

ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ การทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย ในการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวางไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรกดาวในฉนวนได้ จึงต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด [2]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV 240 มม.² [3]

จากปัญหาที่กล่าวข้างต้น พบว่าขั้วต่อสายเคเบิลมีความจำเป็นสำหรับการทดสอบสายเคเบิลเป็นอย่างมาก เนื่องจากขั้วต่อสายจะช่วยควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด ป้องกันการเกิดการวางไฟตามผิวฉนวนและป้องกันการเกิดเบรกดาวของฉนวนในการทดสอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูง แต่ยังมีขนาดใหญ่และมีความยาวมากเป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบและสิ้นเปลืองฉนวนเหลวหรือฉนวนก๊าซที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า [4-7] และมีการพัฒนาให้ขั้วต่อสายมีขนาดที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

โดยใช้มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันและระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ [8-9] แต่ยังคงต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น เป็นวิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ refractive stress control งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ stress cone ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ capacitive stress control จากเดิมจะใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงสำหรับการต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหรือต่อกับสายเคเบิลแรงสูงด้วยกัน [10-11] สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV 240 มม.²

sq.mm. เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ลดความสิ้นเปลือง
ฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าในการทดสอบ
และมีต้นทุนการสร้างที่ต่ำลง

ความเครียดสนามไฟฟ้ากำหนดค่าความคงทนของการ
ฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ
คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่น
ระนาบวางขนานกัน (plate-to-plate)

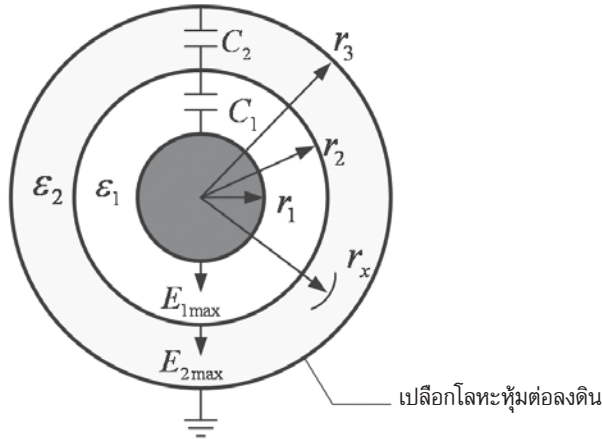
2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า [12]

หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนาม
ไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความ
เสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ
ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่า
แรงดันต่อความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโตรด

2.2 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง [12]

การใช้ฉนวนที่มี ϵ_r ต่างกัน เหมาะที่จะใช้กับ
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนาม
ไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี ϵ_r ต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันได้
เช่น สายเคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และปลอก
ฉนวนนำ (bushing) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม [12]

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมี r_x
คำนวณได้จาก สมการที่ 1

$$E_{rx} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \tag{1}$$

โดยที่

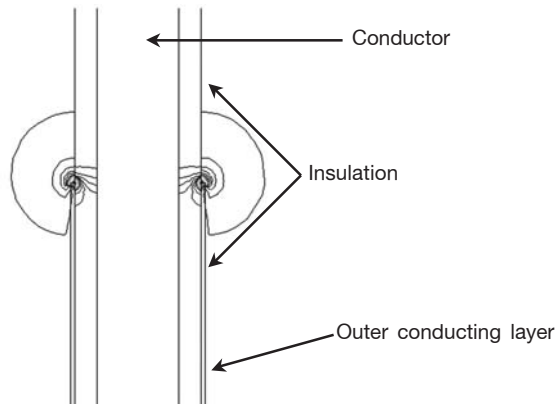
E_{r_x}	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน ที่รัศมี r_x (kV/มม.)
U	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (kV)
ϵ_1, ϵ_2	คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2
r_1	คือ รัศมีของตัวนำ (มม.)
r_2, r_3	คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2 (มม.)

2.3 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล [4]

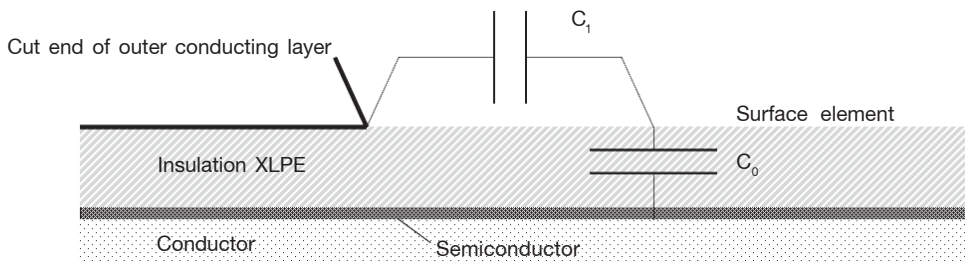
ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย ถ้าทำการทดสอบ

จะเกิดการวาวไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำออกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมา คือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนได้ จึงต้องควบคุมสนามไฟฟ้าให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด การควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาค่าคาปาซิแตนซ์ 2 ตัว คือ

1. ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออกกับฉนวน (C_1)
2. ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ (C_0)

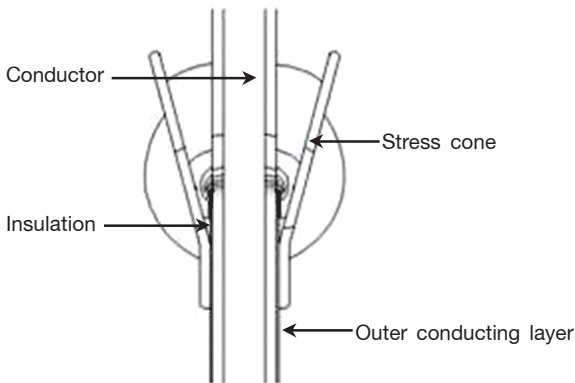


รูปที่ 3 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีกรแก้ไข [4]

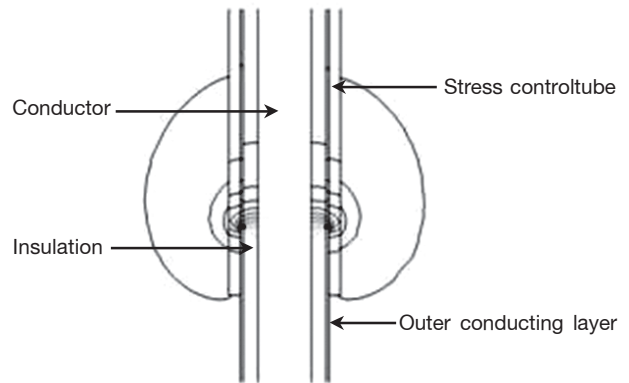


รูปที่ 4 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง [4]

ถ้ารอบๆ สายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า C_1 จะน้อยมาก เมื่อเทียบกับ C_0 จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวนมีค่าต่ำ ทำให้เบรกดาวนได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง C_1/C_0 มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้ C_1 เพิ่มขึ้นหรือ C_0 ลดลงนั่นเอง การควบคุมสนามไฟฟ้ามี 2 วิธี คือ



ก. Capacitive stress control



ข. Refractive stress control

รูปที่ 5 การแก้ไขสนามไฟฟ้า [4]

2.4 ดิสชาร์จบางส่วน

2.4.1 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน [12]

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชุนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียหายเป็นจุดๆ และเกิดผิวดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเบรกดาวนอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

2.4.2 วงจรเทียบเคียงของดิสชาร์จบางส่วน [12]

โดยเหตุที่ดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถตรวจวัดหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรเทียบเคียงของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็นดิสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรเทียบเคียงได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ

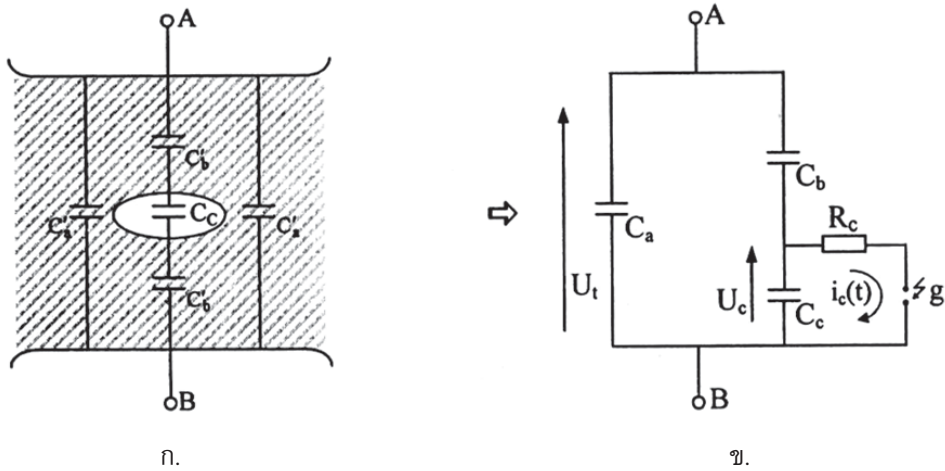
1. Capacitive stress control เป็นการลด C_0 ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มรัศมีของชั้นกึ่งตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 5 ก.

2. Refractive stress control เป็นการเพิ่ม C_1 โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆ ไว้รอบสายเคเบิล ดังรูปที่ 5 ข.

เข้าใจ จึงใช้วงจรเทียบเคียงสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรเทียบเคียงของฉนวนในรูปที่ 6

ในรูปที่ 6 ก.) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C'_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_0 ส่วนฉนวนที่สมมูลกันโดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C'_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 6 ข.) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_0 มากๆ นั่นคือ

$$C_t \approx C_a \gg C_c > C_b$$

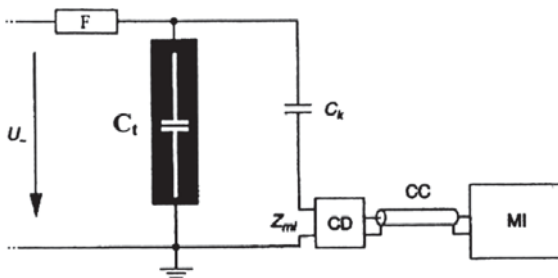


รูปที่ 6 วงจรเทียบเคียงของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิซชาร์จบางส่วนภายใน [12]

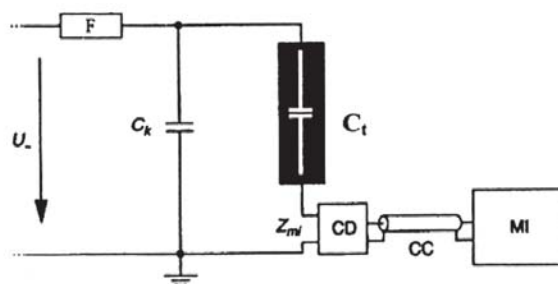
2.4.3 การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ [12]

การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่ตำแหน่งการต่ออิมพีแดนซ์วัด Z_m ซึ่งมาตรฐานการวัด PD ฉบับใหม่คือ IEC 60270

เรียกว่าอุปกรณ์คัปเปิล (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์วัด Z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังในรูปที่ 7ก. และ 7ข. ซึ่งเป็นวงจรตรวจวัด PD วิธีตรง (straight detection circuit)



ก. CD ต่ออนุกรมกับ C_k



ข. CD ต่ออนุกรมกับ C_k

รูปที่ 7 วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง [12]

- $U \sim$ คือ แรงสูงตัวจ่าย
- F คือ ตัวกรอง
- Z_{mi} คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
- CC คือ เคเบิลวัด
- C_t คือ ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
- C_k คือ ค่าเก็บประจุคัปเปิล
- CD คือ อุปกรณ์คัปเปิล

ความแตกต่างของวงจรแบบ 7ก. และแบบ 7ข. คือ แบบ 7ก. ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ 7ข. เพราะ PD ที่เกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ C_i แบบ 7ข. จะมีความไวสูงกว่า เพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ C_i ค่าเก็บประจุสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดิน

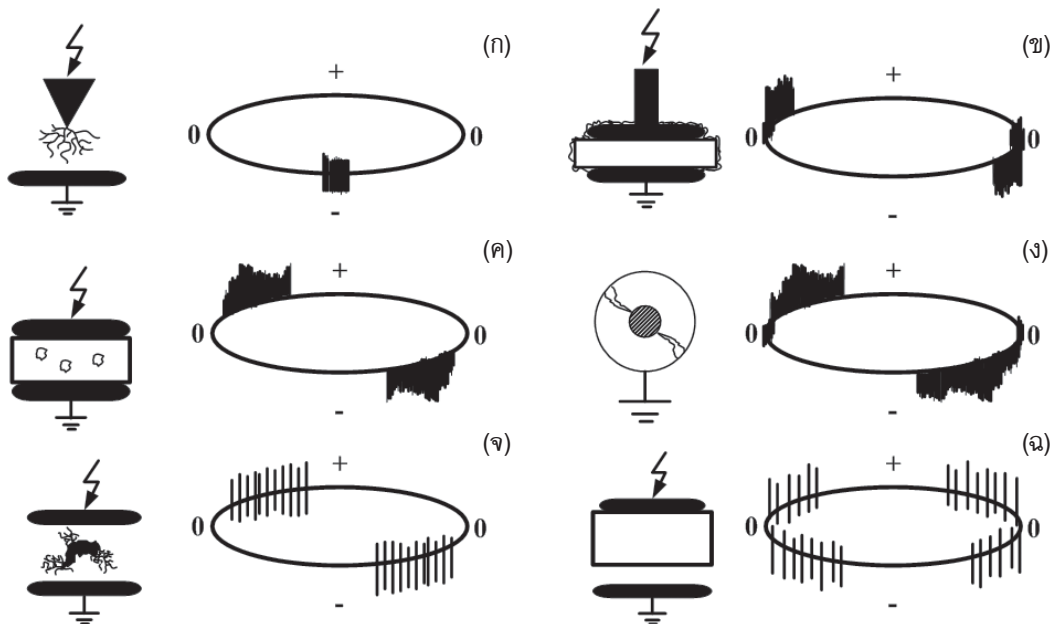
จะเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัด PD เสียหายได้

2.4.4 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน [13]

ดิสชาร์จบางส่วนในการทดสอบ โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด ดังตารางที่ 1 และลักษณะสัญญาณของดิสชาร์จบางส่วนโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 1 ชนิดของดิสชาร์จบางส่วนโดยทั่วไป [13]

ชนิดของดิสชาร์จบางส่วน	สาเหตุของดิสชาร์จบางส่วน
ก. Corona Discharge	เกิดขึ้นบริเวณปลายแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลว
ข. Surface Discharge	เกิดขึ้นที่ผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวสูง
ค. Internal Discharge	เกิดขึ้นในโพรงหรือฟองก๊าซในเนื้อฉนวน
ง. Electric Tree	เกิดจากขอบคมของตัวนำหรือจากโพรงหรือฟองก๊าซในฉนวนแข็ง
จ. Floating Part	เกิดขึ้นในกรณีที่มีโลหะที่อยู่ใกล้ฉนวนทดสอบไม่ได้ทำการต่อลงกราวด์
ฉ. Contact Noise	เกิดขึ้นจากการต่อกราวด์ในวงจรทดสอบไม่ดี



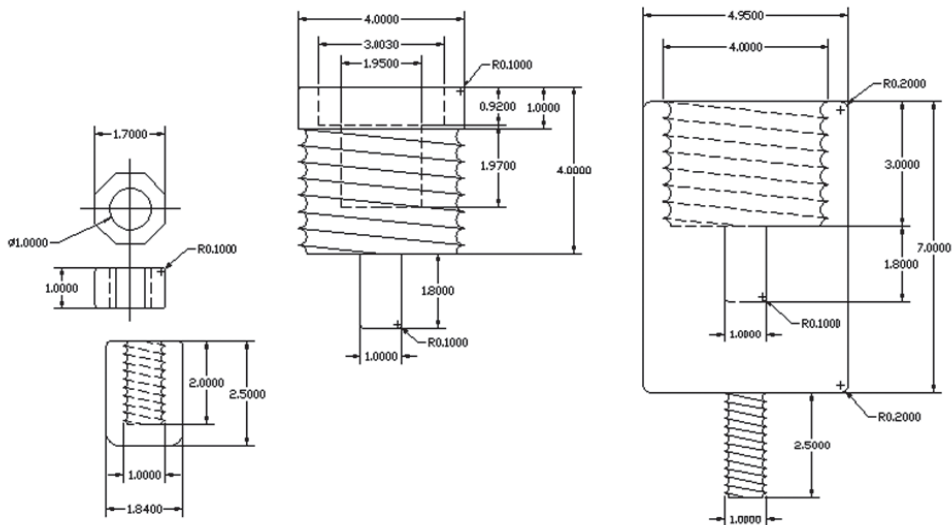
รูปที่ 8 ลักษณะสัญญาณของดิสชาร์จบางส่วนโดยทั่วไป [13]

3. การออกแบบ และการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

3.1 ปลายสาย

เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณตัวนำสายเคเบิล และเป็นจุดต่อระหว่างสายเคเบิลและแรงดัน

ทดสอบ ในการออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดของตัวนำ และ ฉนวนของสายเคเบิล โดยอ้างอิงขนาดตัวนำ และความหนาของฉนวนของสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [14] ขนาดของปลายสาย แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ขนาดของปลายสายที่ออกแบบ

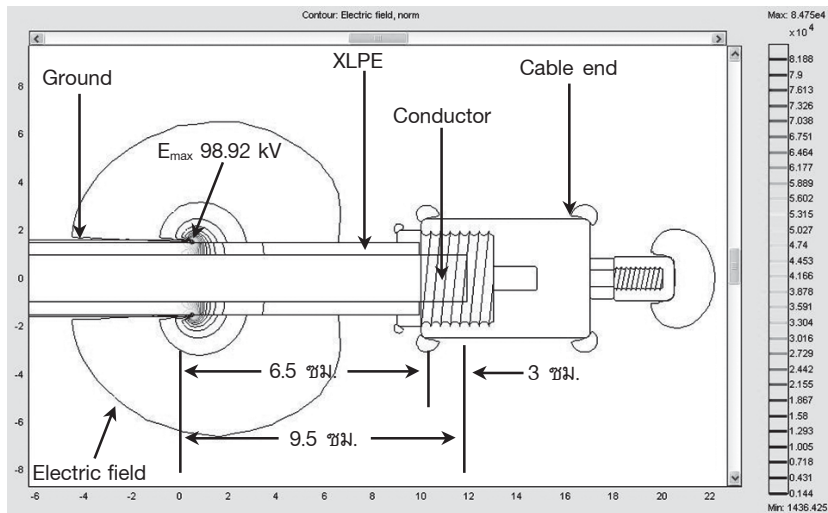


รูปที่ 10 ตัวอย่างของปลายสายที่สร้างขึ้น

3.2 ระยะปกอสายเคเบิล

พิจารณาจากแรงดันทดสอบ และระยะห่างระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [14] คือ $2U_0$ เท่ากับ 24 kV ส่วนระยะการปกอสาย ได้จากการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และไม่คำนึงถึงผลของประจุตกค้าง โดยใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 [15] ในการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าจะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 24

kV [14] ค่า ϵ_r ของ XLPE และซูเปอร์ลีนโนนอล เท่ากับ 2.3 [16] และสภาวะรอบนอกของสายเคเบิลเป็นอากาศ ϵ_r เท่ากับ 1 [16] และใช้ขนาดเท่ากับขนาดจริงที่ได้ออกแบบ ซึ่งจะได้ระยะการปกอสายเท่ากับ 6.5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 11 โดยพิจารณาจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะต้องไม่มากเกินไปกว่าที่จะทำให้ฉนวนสายเคเบิลและฉนวนระหว่างปลายสายและกราวด์เกิดการเบรกดาวน์ [16] เมื่อพิจารณาร่วมกับขนาดของปลายสาย ดังนั้นระยะการปกอสายทั้งหมด เท่ากับ 9.5 เซนติเมตร

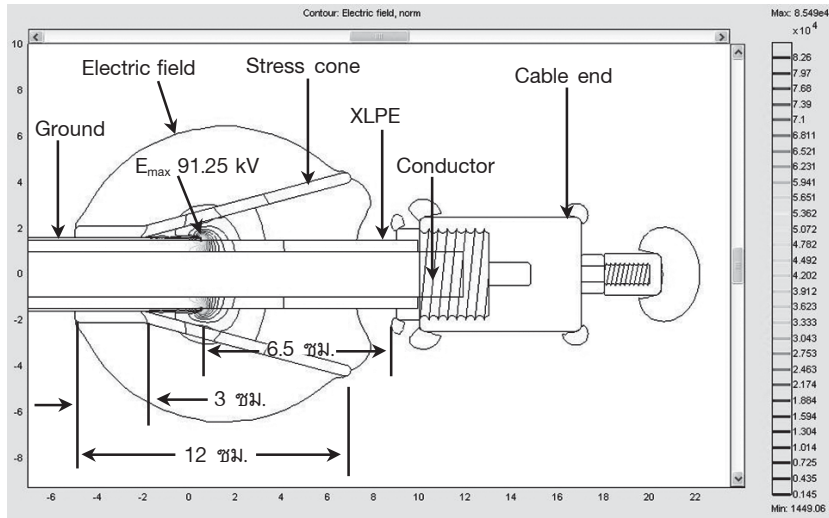


รูปที่ 11 สนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล

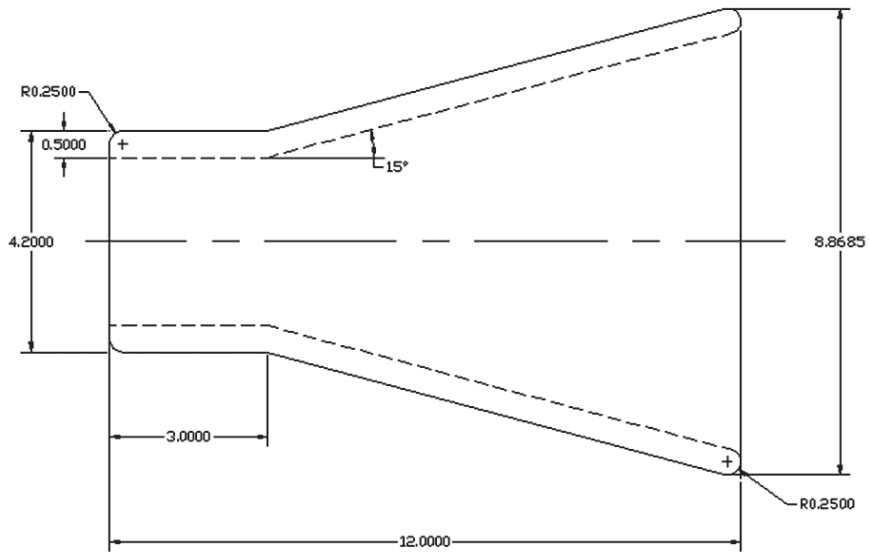
3.1 Stress Cone

เนื่องจากการออกแบบ stress cone ไม่มีมาตรฐานรองรับ จึงใช้การจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า เพื่อหาขนาดของ stress cone ที่ช่วยควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าได้เหมาะสม ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและขนาดของ stress cone แสดง

ดังรูปที่ 12 และ 13 โดยเลือกใช้ซูเปอร์ลีนโนนอลลิ่งชั้นรูปเป็น stress cone เนื่องจากซูเปอร์ลีนโนนอลเป็นวัสดุที่แข็ง เหนียว สามารถลิ่งชั้นรูปได้ง่ายและมีค่าเปอร์มิตติวิตีเท่ากับ XLPE ซึ่งเป็นวัสดุฉนวนสายเคเบิล stress cone ที่ลิ่งชั้นรูปเสร็จแสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า



รูปที่ 13 ขนาดของ stress cone ที่ได้จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

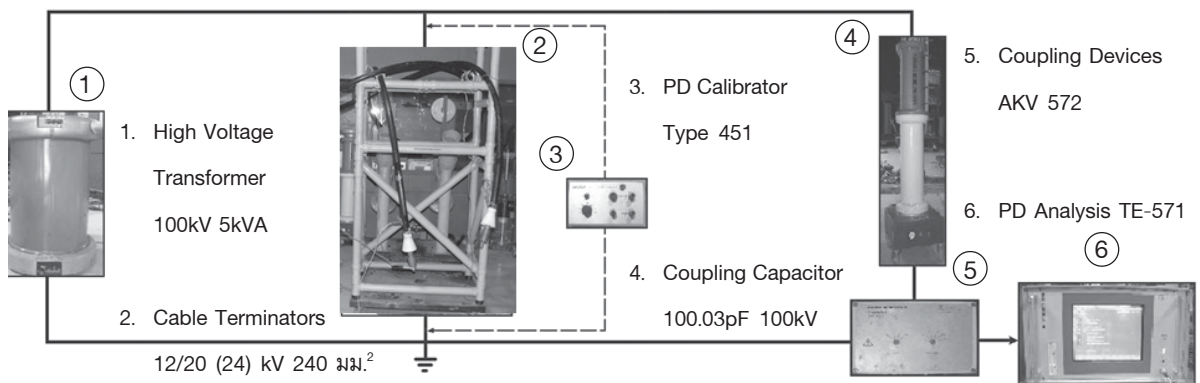


รูปที่ 14 stress cone สำหรับตรวจวัด PD ในสายเคเบิลพิกัด 12/20(24) kV 240 มม.²

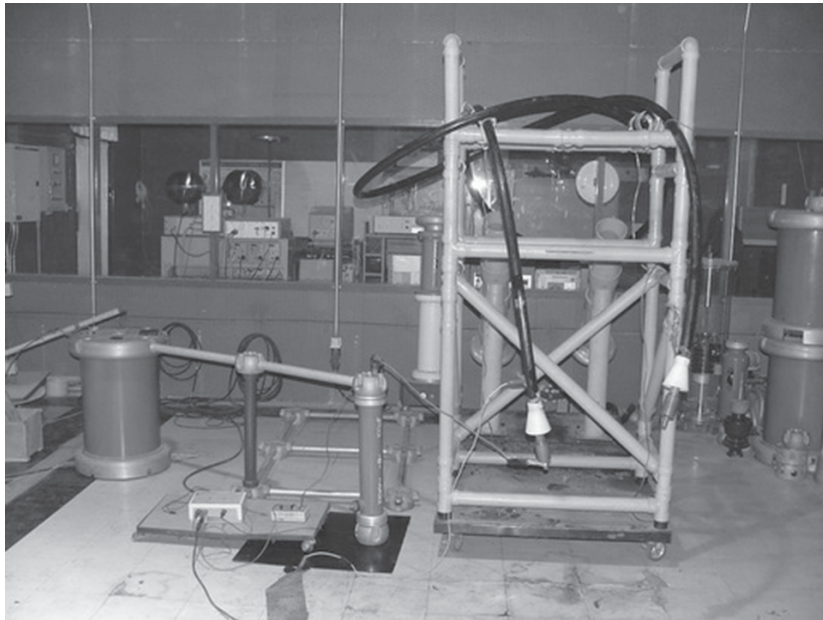
จากการออกแบบและการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าจะพบว่า stress cone ที่ได้ออกแบบสร้างสามารถลดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสายได้ถึง 7.67 kV และมีความยาวเพียง 12 ซม. ซึ่งมีขนาดที่สั้นกว่าหัวต่อสายแบบ oil tube terminator [8-9] ถึงร้อยละ 40 และไม่ต้องใช้ฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า เนื่องจาก stress cone จะช่วยลดการหักเหของสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสาย ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวลดลง

4. การทดสอบ

ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลความยาว 15 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [14] โดยป้อนแรงดันทดสอบที่ $2U_0$ คือ 24 kV เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดแรงดันลงที่ $1.732U_0$ คือ 20.78 kV แล้วทำการตรวจวัดปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้เครื่องวัดดิสชาร์จบางส่วน HAEFELY TRENCH รุ่น TE-571 ตามมาตรฐาน IEC 60270 [17] ใช้วงจรทดสอบดังรูป 7ก.)



รูปที่ 15 วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง ตามมาตรฐาน IEC 60270 [17]



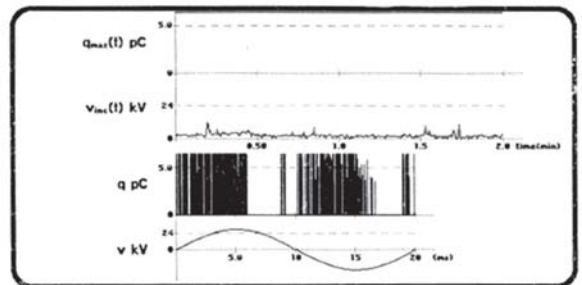
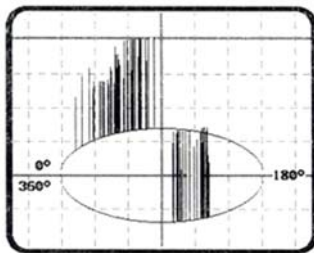
รูปที่ 16 การทดสอบตรวจวัด PD ในสายเคเบิล โดยใช้ stress cone

Routine Measurement

PD Level **7.2** pC

Voltage **21.1** kV
50 Hz

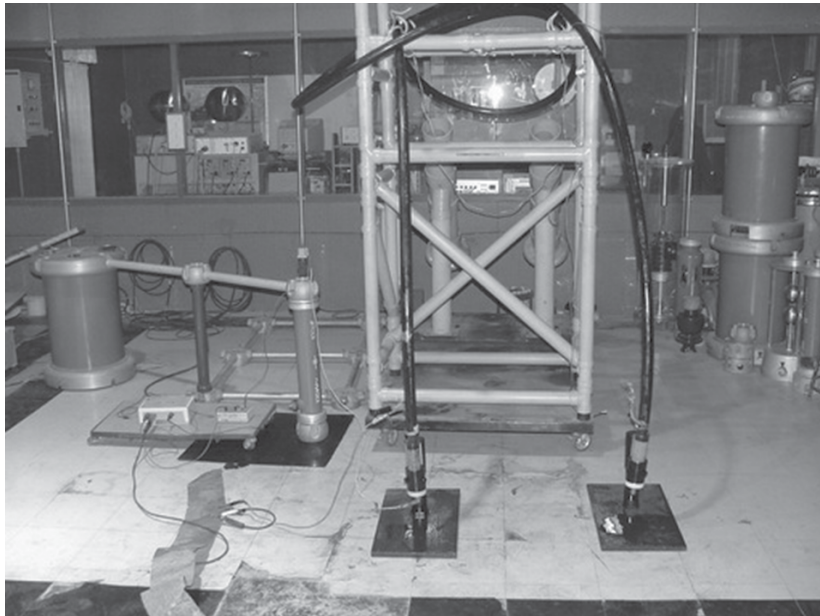
PD-Range: 5 pC/div
Noise Suppression: 55 %
Synchronisation: Auto
Gain: Auto
Bandwidth: 40-400kHz



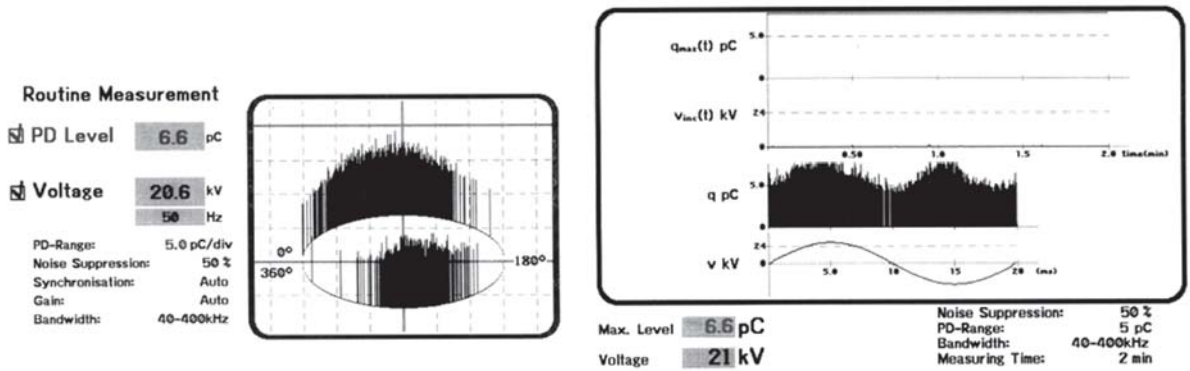
Max. Level **7.2** pC
Voltage **21** kV

Noise Suppression: 55 %
PD-Range: 5 pC
Bandwidth: 40-400kHz
Measuring Time: 2 min

รูปที่ 17 ผลการทดสอบตรวจวัด PD ในสายเคเบิล โดยใช้ stress cone



รูปที่ 18 การทดสอบตรวจวัด PD ในสายเคเบิล โดยใช้ oil tube terminator



รูปที่ 19 ผลการทดสอบตรวจวัด PD ในสายเคเบิล โดยใช้ oil tube terminator

จากรูปที่ 17 ผลการทดสอบตรวจวัดปริมาณ PD ในสายเคเบิล โดยใช้ stress cone terminator ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV มีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบที่ 7.2 pC และในรูปที่ 19 ผลการทดสอบตรวจวัดปริมาณ PD ในสายเคเบิล โดยใช้ oil tube terminator ที่ระดับแรงดัน 20.6 kV โดยใช้สายเคเบิลเส้นเดิม พบว่ามีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนที่ 6.6 pC จากผลการทดสอบจะพบว่า stress cone terminator มีค่า PD มากกว่าแบบ oil tube terminator เพียง 0.6 pC. เนื่องจากการดิสชาร์จภายในระหว่าง stress cone และฉนวนสายเคเบิล ทั้งนี้สามารถนำ stress cone terminator ที่ออกแบบสร้างไปใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ได้ โดยปรับปรุงให้เกิดช่องว่างระหว่าง stress cone และฉนวนสายเคเบิลให้น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5. สรุปและวิเคราะห์ผล

การออกแบบสร้าง stress cone terminator สำหรับตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงพิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 มม.² โดยใช้ระเบียบวิธีไฟฟ้าน้ำมันช่วยในการออกแบบและการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าจะพบว่า stress cone ที่ได้ออกแบบสร้างสามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสายได้ถึง 7.67 kV จากรูปที่ 11 และ 12 และมีความยาวเพียง 12 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดที่สั้นกว่าขั้วต่อสายแบบ oil tube terminator [8-9] ถึงร้อยละ 40 และไม่ต้องใช้ฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า เนื่องจาก stress cone จะช่วยลดการหักเหของสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสาย ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวลดลง โดยสามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสายได้ถึง 7.67 kV ซึ่ง stress cone terminator ที่สร้างขึ้นสามารถทดสอบตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในสายได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 [17] จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสายเคเบิลที่ใช้ stress cone terminator และ oil tube terminator [8-9] ผลจากการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้โดยขั้วต่อสายแบบ stress cone terminator ที่สร้างขึ้นมี

ค่า PD ต่างจากแบบ oil tube terminator [8-9] เพียง 0.6 pC. เนื่องจากการดิสชาร์จภายในระหว่าง stress cone และฉนวนสายเคเบิล โดยมีสาเหตุจากการออกแบบจะอ้างอิงขนาดของสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [14] แต่สายเคเบิลที่ใช้มีขนาดเล็กกว่าที่ได้ออกแบบสร้าง จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง stress cone และฉนวนสายเคเบิล ทั้งนี้สามารถแก้ไขได้โดยทำการวัดขนาดสายที่ต้องการทดสอบก่อนการกลึงขึ้นรูป stress cone ก็จะสามารถลดค่าดิสชาร์จภายในได้ ซึ่ง stress cone terminator สามารถใช้ในการทดสอบตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงได้ทั้งในห้องทดสอบและในสถานที่ติดตั้งได้ เนื่องจากขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายสะดวก และใช้ระยะในการปกสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความสิ้นเปลืองสายเคเบิลจากการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบ นายศิระ ศักดินันท์กาญจน์ และนายยุทธพล แก้วน้อย นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จจลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

1. Kreuger, F.H., 1989, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, New York,
2. Chan J.C., Duffy P., and Hiivala L.J., 1991, "Partial Discharge - Part VIII : PD Testing of Solid Dielectric Cable", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 7, No. 5, Sep./Oct., pp. 9-20
3. Charoong Thai Wire & Cable Public Company Limited, 2007, *Medium and High Voltage Power Cable Catalog*.
4. พร้อมศักดิ์ อภิตกุล, 2545, *การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จ*

บางส่วน และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV., วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สจล.

5. พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล จงรักษ์ บุญเลี้ยง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์, 2544, “ข้อต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 1 : การออกแบบและสร้างข้อต่อสายเคเบิล” *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24*, 22 - 23 พฤศจิกายน, หน้า 77 - 82

6. Boonseng C., Apiratikul P. and Nakaviwat K., 2002, “A High Voltage Cable Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement”, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA*, April 7-10, pp. 62-65

7. พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล ศุภวุฒิ คัมภีรานนท์ กนกพล นาคะวิวัฒน์ และจงรักษ์ บุญเลี้ยง, 2546, “ข้อต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล XLPE โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26*, 6 - 7 พฤศจิกายน หน้า 396-401

8. ธนากร น้ำหอมจันทร์ และศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, 2549, “มิติที่เหมาะสมของข้อต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วน พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm.”, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม

9. ธนากร น้ำหอมจันทร์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล และศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, 2549, “การออกแบบและสร้างข้อต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้า ครั้งที่ 29*, 9-10 พฤศจิกายน, หน้า 217-220.

10. Schuster, M., 2005, “Plug-in Type Connection Techniques on Encapsulated Components on High-voltage Equipment up to $U_m = 245$ kV”, PFISTERER Kontaktsysteme GmbH & Co. KG.

11. Strobl, R., Haverkamp, W., Malin, G., and Fitzgerald, F., 2001, “Evolution of Stress Control System in Medium Voltage Cable Accessories”, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Vol. 2, 28 Oct.-2 Nov., pp. 843-848.

12. สำรวย สังข์สะอาด, 2547, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, พิมพ์ครั้งที่ 1 (ฉบับปรับปรุง), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

13. E. Gulski, “Digital Analysis of Partial Discharge”, 1995, *IEEE Trans. Dielectric and Electric In Sulation*, Vol. 2, No. 5, Oct., pp. 822-837.

14. *Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*, IEC Std. 60502-2/2005.

15. COMSOL AB. 2004. FEMLAB 3 Multiphysics Modeling. [CD ROM]. Los Angeles : COMSOL, Inc.

16. Siemens AG., 1981, *Electrical Engineering Handbook*.

17. *High-voltage Test Techniques Partial Discharge Measurements*, IEC Std. 60270/2000.