

บทที่ 3

การศึกษาและการออกแบบ

3.1 การศึกษาและออกแบบการทดลองหัวต่อสายไฟฟ้าและสายเคเบิลแรงสูง

สำหรับการศึกษาวิเคราะห์และทดลองในโครงการนี้ เราจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลของอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือหัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง ชนิดพอร์ซเลน (Porcelain) และสายเคเบิลแรงสูง ขนาดแรงดัน 115 เควี ชนิด HXPE/CWS/PE 1x800 sq.mm. โดยเราจะทำการออกแบบและคำนวณหาความเครียดสูงสุดของสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง โดยเราจะนำทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's Law) สำหรับการหาสมการสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวทรงกระบอกด้านใน ของทรงกระบอกแกนซ้อนร่วมและใช้ทฤษฎีความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิด ที่สามารถผ่านทะลุพื้นผิวปิดใดๆ โดยเราจะทำการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนของสายเคเบิลว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเกินค่าความคงทนของฉนวน (Dielectric Strength) ต่อแรงดันไฟฟ้าหรือไม่ จนทำให้เกิดสภาวะเบรกดาวน์ขึ้นในที่สุด โดยเราจะแบ่งขั้นตอนการศึกษาและทดลอง ออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- ศึกษาขั้นตอนการติดตั้งหัวต่อสายไฟฟ้า, สายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์ส่วนประกอบ จากภาพถ่ายที่บันทึก
- ศึกษาและวิเคราะห์รายละเอียดของหัวต่อสายไฟฟ้า, สายเคเบิลใต้ดินที่เกิดระเบิดจากภาพถ่ายที่บันทึก
- การศึกษาและวิเคราะห์รายละเอียดของฉนวนสายเคเบิลที่เกิดเบรกดาวน์ด้วยวิธีการเอ็กซ์เรย์
- การศึกษาและวิเคราะห์รายละเอียดของฉนวนสายเคเบิลโดยการต้มด้วยกลีเซอริน
- การนำทฤษฎีการเกิดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกระบอก แกนซ้อนร่วมจากกฎของเกาส์ หาสมการความเครียดสนามไฟฟ้าสายเคเบิลภายในหัวต่อสาย
- ออกแบบและจำลองการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนสายเคเบิลใต้ดินที่มีความหนาและบางไม่เท่ากันด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics

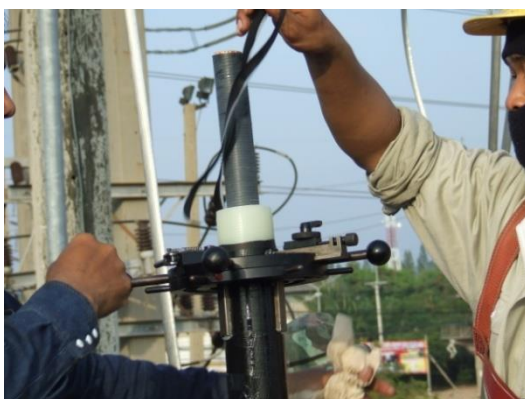
3.2 ศึกษาขั้นตอนการตอนการติดตั้งหัวต่อสายไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการติดตั้งหัวต่อและสายเคเบิลแรงสูง

- (ก) การจัดตำแหน่ง
- (ข) การตัดสายเคเบิลแรงสูง
- (ค) การปลอกสายเคเบิล
- (ง) การขูดฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

ภาพที่ 3.1 (ก) การจัดเฟสของสายเคเบิล เพื่อเตรียมขั้นตอนการตัดสายให้ได้ความยาวในภาพ (ข) หลังจากที่เรากัดสายเคเบิลแล้ว เราจะทำการปลอกฉนวนหรือเปลือกชั้นนอก (Cable Jacket) ด้วยเครื่องปลอก ภาพ (ค) เป็นขั้นตอนที่สำคัญต้องระวังการปลอกไม่ให้กินผิวสายลึกลงเกินไป

เมื่อเราปลดจนถึงชั้นผิวฉนวนสายเคเบิลและสามารถกำหนดระยะได้แล้ว เราจึงทำการชุดผิวฉนวนด้วยแผ่นพลาสติกบางๆ แสดงในภาพ (ง)



ภาพที่ 3.2 การติดตั้งและวัดระยะของอุปกรณ์ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า (Stress Cone)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.3 การตรวจสอบสภาพหัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง (Cable Housing)

(ก) ตรวจสอบสภาพภายใน

(ข) ตรวจสอบสภาพภายนอก



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.4 การติดตั้งหัวต่อสายไฟฟ้ากับสายเคเบิลใต้ดิน

(ก) ขั้นตอนการสวม Housing

(ข) การสวม Housing ที่แล้วเสร็จ

ตารางที่ 3.1 หมายเลขของ Stress Cone and Insulator Serial Numbers

	Insulator	Stress Cone	Routine test Report
Art. No.	180048	190547 size 3	
A	C14 38	00010087	Provided
A'	C14 61	00010082	Provided
B	C14 20	00010103	Provided
B'	C14 70	00009988	Provided
C	Illegible	00010014	Provided
C'	C14 68	00010111	Provided

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลทดสอบตามมาตรฐาน IEC

IEC item	IEC 60840 (2004) Clause 15	Test	Type test	Check
E	Partial discharge test at ambient temperature	1	Partial discharge test at ambient temperature	✓
h	Heating cycle voltage test	2	Heating cycle voltage test	✓
	Partial discharge test at high temperature	3	Partial discharge test at high temperature	✓
i	Partial discharge test at ambient temperature (after final cycle or after lightning impulse voltage test in item i)	4	Partial discharge test at ambient temperature	✓
	Lightning impulse voltage test followed by power frequency voltage test	5	Lightning impulse voltage test followed by power frequency voltage test	✓
		6	Power frequency voltage wet withstand test	
		7	Radio influence voltage test	
		8	Pressure leak test	
		9	Voltage test of pedestal insulator	
j	Partial discharge test at high temperature (if not carried out after item g) above)			
	Partial discharge test at ambient temperature (if not carried out after item g) above)			
l	Examination	10	Examination	✓

Check Sheet

Customer:	Contract No:
Project:	Termination Type: Outdoor
Circuit name: TL to Substation	Serial Number: -
Phase: -	
Name of Terminal point: EGAT- RY 1	
Jointer name: - Supervisor	Date: -
Supervisor name: -	Date: -

No.	Description	Value mm.
1	Before mounting stress cone Dimension F Min. Diameter of prepared core insulation	69.2
2	Dimension K Length of K used	133.2
3	Dimension t Length of exposed conductor	203
4	Direct after filling with compound Dimension E Compound level	200

Comment:

After installation please sign and send back the original check sheets to the address below for final approval:

ภาพที่ 3.5 Check Sheet บันทึกข้อมูลระหว่างการติดตั้งหัวต่อสายไฟฟ้า

3.3 ศึกษาและวิเคราะห์รายละเอียดของหัวต่อสายไฟฟ้าที่เกิดระเบิดจากภาพถ่าย



ภาพที่ 3.6 สายเคเบิลใต้ดิน



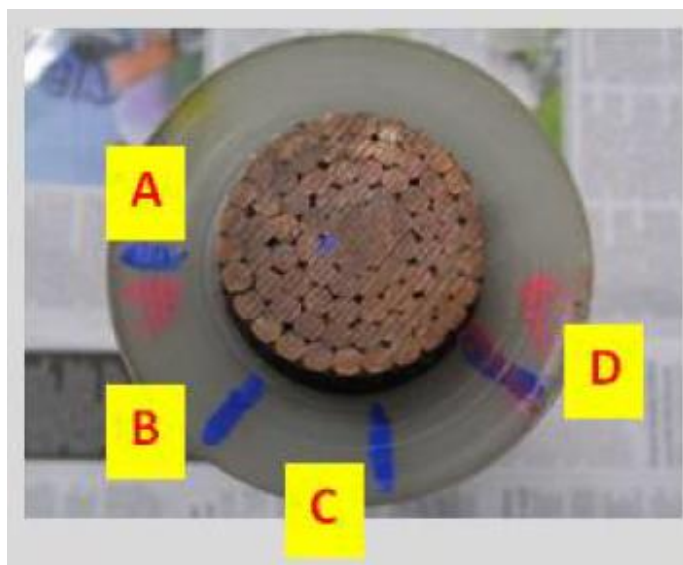
ภาพที่ 3.7 หัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดระเบิด



ภาพที่ 3.8 อุปกรณ์ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า (Stress Cone) ที่เกิดเบรกดาวน

3.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบสายเคเบิลที่เกิดเบรกดาวน์ด้วยวิธีการเอ็กซ์เรย์

จากภาพสายเคเบิลแรงสูง 115 kV HXPE/CWS/PE1 x 800 sq. mm. ที่เกิดเหตุเบรกดาวน์ (Breakdown) ขึ้น เราจะทำการทดลองโดยการกำหนดตำแหน่งสำหรับสายเคเบิลออกเป็น 4 จุด โดยทุกด้านของสายเคเบิล เราจะวิเคราะห์สายเคเบิลทางกายภาพ (Physics) ด้วยวิธีการเอ็กซ์เรย์ (X-Ray)



ภาพที่ 3.9 ตัวนำและฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงที่เกิดเบรกดาวน์



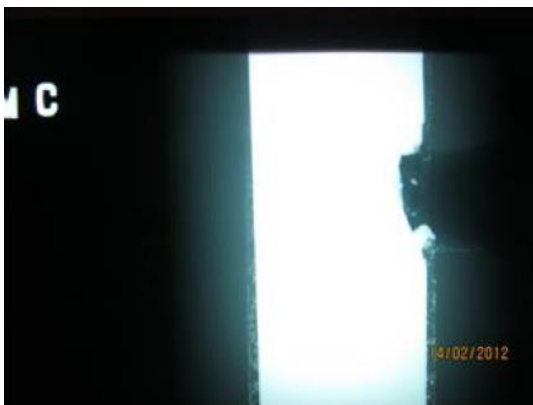
ภาพที่ 3.10 การเอ็กซ์เรย์รูปด้านตัดของตัวนำและฉนวนของสายเคเบิลที่เกิดเบรกดาวน์



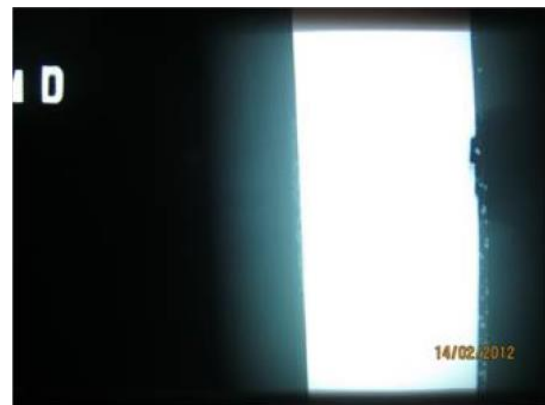
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3.11 การเอ็กซ์เรย์ฉนวนสายเคเบิล

(ก) รูปด้านของจุด A

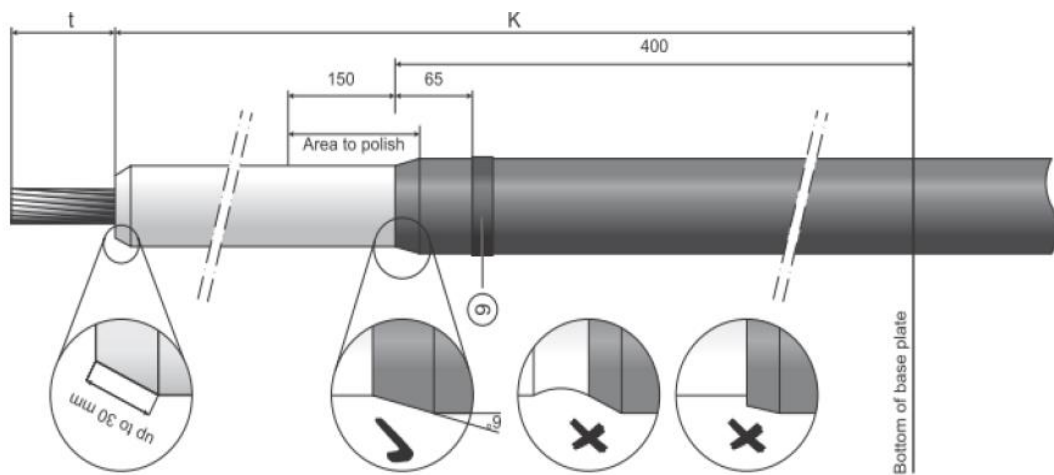
(ข) รูปด้านของจุด B

(ค) รูปด้านของจุด C

(ง) รูปด้านของจุด D



(ก)

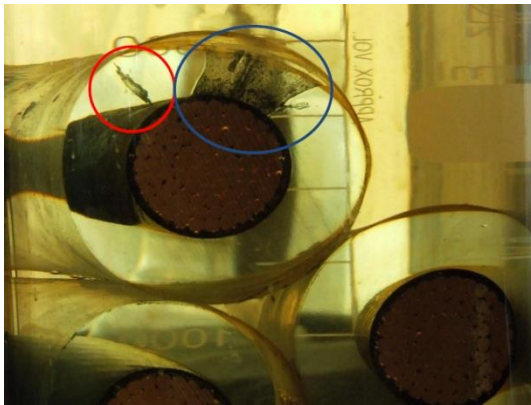


(ข)

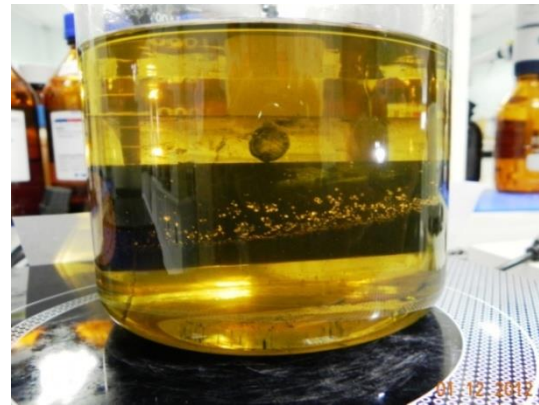
ภาพที่ 3.12 การเทียบเคียงกับไม้บรรทัดเหล็ก โดยที่จนวนสายเคเบิลไม่เป็นเส้นตรง

(ก) วัดเทียบเคียงกับไม้บรรทัด

(ข) คำแนะนำขั้นตอนการติดตั้ง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.13 การต้มจนวนสายเคเบิลที่เกิดเบรกควานด้วยกลีเซอริน (Glycerin) ที่อุณหภูมิ 120°C

(ก) โพรงอากาศภายในเนื้อฉนวน

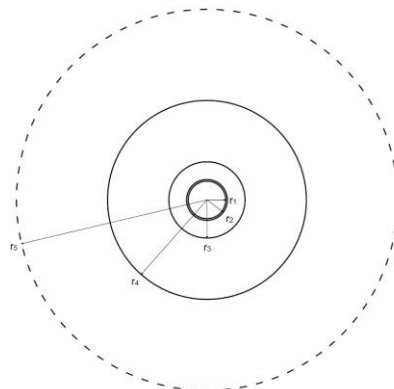
(ข) การหลอมละลายของตัวนำ

3.5 หาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด สำหรับบริเวณตัวนำและฉนวนสายเคเบิล

การคำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวทรงกระบอกแกนซ้อนร่วม กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส จะได้

$$V = \text{Voltage in Conductor} = 66,397 \text{ V}$$

(*ค่าแรงดันที่มาคำนวณมาจากแรงดันเฟส : $115/\sqrt{3} \text{ kV}$)



ภาพที่ 3.14 รูปหน้าตัดของตัวนำ, ฉนวนสายเคเบิลแรงสูง และภายนอก Cable Housing

กำหนดรัศมี r_1, r_2, r_3, r_4 และ r_5 ตามสเปคของฉนวนสายเคเบิลแรงสูงขนาด 800 sq.mm

r_1 = Radius of Conductor (Copper) $r_1 = 17$ mm.

r_2 = Radius of Conductor Screen (Semiconductor Tape) $r_2 = 18.5$ mm

r_3 = Radius of Insulation (Polyethylene) $r_3 = 34.5$ mm

r_4 = Radius of Cable Housing $r_4 = 90$ mm

r_5 = Radius of Outer Cable Housing $r_5 = 172.5$ mm

วิธีการคำนวณ

กำหนดค่าตัวแปรในสมการดังนี้

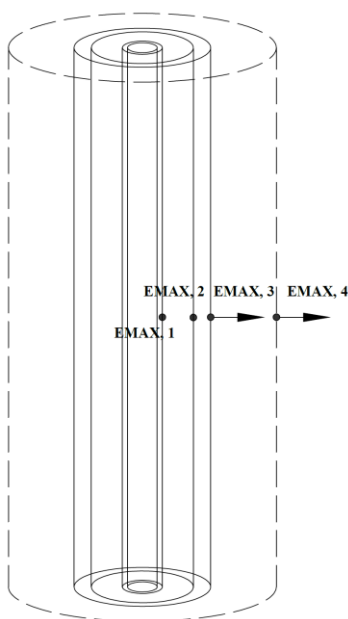
ϵ_{r1} : Relative Permittivity; Conductor = 1

ϵ_{r2} : Relative Permittivity; Conductor Screen = 2.1

ϵ_{r3} : Relative Permittivity; Polyethylene = 2.3

โดยเราจะคำนวณจากรัศมีของตัวนำ, ฉนวน และหัวต่อสายเคเบิลโดยกำหนดให้

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1}, \quad \epsilon_2 = \epsilon_0 \epsilon_{r2}, \quad \epsilon_3 = \epsilon_0 \epsilon_{r3} \text{ และ } \epsilon_4 = \epsilon_0$$



รูปที่ 3.15 แสดงทิศทางสนามไฟฟ้า บริเวณสายและภายนอกหัวต่อสายเคเบิล

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณตัวนำ (Conductor) โดยที่ $\epsilon_x = \epsilon_1$, $r_x = r_1$

$$E_{Max,1} = \frac{\epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 U}{r_1 \left(\epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_4 \ln \frac{r_4}{r_3} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \ln \frac{r_5}{r_4} \right)}$$

$$E_{Max,1} = \frac{(3.36 \times 10^{-33}) \cdot (66397)}{(17) \left((2.86 \times 10^{-34}) + (9.92 \times 10^{-34}) + (1.40 \times 10^{-33}) + (2.20 \times 10^{-33}) \right)} \quad \text{kV/mm}$$

$$= \frac{(2.23 \times 10^{-28})}{(17) (4.878 \times 10^{-33})} \quad \text{kV/mm}$$

$$E_{Max,1} = 2.68 \quad \text{kV/mm}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณตัวนำ (Conductor Screen) โดยที่ $\epsilon_x = \epsilon_2$, $r_x = r_2$

$$E_{Max,2} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_4 U}{r_2 \left(\epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_4 \ln \frac{r_4}{r_3} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \ln \frac{r_5}{r_4} \right)}$$

$$E_{Max,2} = \frac{(1.60 \times 10^{-33}) \cdot (66397)}{(18.5) \left((2.86 \times 10^{-34}) + (9.92 \times 10^{-34}) + (1.40 \times 10^{-33}) + (2.20 \times 10^{-33}) \right)} \quad \text{kV/mm}$$

$$= \frac{(1.06 \times 10^{-28})}{(18.5) (4.878 \times 10^{-33})} \quad \text{kV/mm}$$

$$E_{Max,2} = 2.68 \quad \text{kV/mm}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณจนวนสายเคเบิล โดยที่ $\epsilon_x = \epsilon_3, r_x = r_3$

$$E_{\text{Max},3} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_4 U}{r_3 \left(\epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_4 \ln \frac{r_4}{r_3} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \ln \frac{r_5}{r_4} \right)}$$

$$E_{\text{Max},3} = \frac{(1.46 \times 10^{-33}) \cdot (66397)}{(34.5) \left((2.86 \times 10^{-34}) + (9.92 \times 10^{-34}) + (1.40 \times 10^{-33}) + (2.20 \times 10^{-33}) \right)} \quad \text{kV/mm}$$

$$= \frac{(9.70 \times 10^{-29})}{(34.5)(4.878 \times 10^{-33})} \quad \text{kV/mm}$$

$$E_{\text{Max},3} = 0.576 \quad \text{kV/mm}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณภายนอกหัวต่อสาย โดยที่ $\epsilon_x = \epsilon_4, r_x = r_4$

$$E_{\text{Max},4} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 U}{r_4 \left(\epsilon_2 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_4 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_4 \ln \frac{r_4}{r_3} + \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \ln \frac{r_5}{r_4} \right)}$$

$$E_{\text{Max},4} = \frac{(3.36 \times 10^{-33}) \cdot (66397)}{(90) \left((2.86 \times 10^{-34}) + (9.92 \times 10^{-34}) + (1.40 \times 10^{-33}) + (2.20 \times 10^{-33}) \right)} \quad \text{kV/mm}$$

$$= \frac{(2.23 \times 10^{-28})}{(90)(4.878 \times 10^{-33})} \quad \text{kV/mm}$$

$$E_{\text{Max},4} = 0.51 \quad \text{kV/mm}$$

3.6 ออกแบบและจำลองการป้อนแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิล

เราจะออกแบบโครงสร้างของสายเคเบิลเป็นแบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.5a โดยจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

โครงสร้างทางกายภาพ (Physics) ของแบบจำลอง (Model)

- ชนิดของวัสดุ ประเภทนวน (Library Material)
- ตัวนำ (Conductor)

การป้อนค่าพารามิเตอร์ (Parameters) สำหรับแบบจำลอง

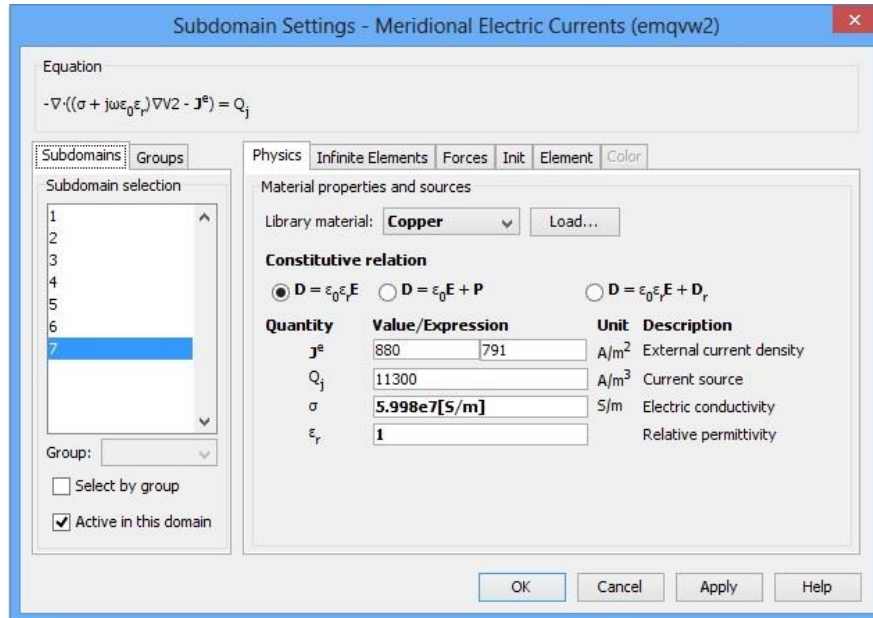
- ปริมาณความเข้ม/ความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณผิวตัวนำ (External Current Density)
- ค่ากระแสของตัวนำ (Current Source)
- ค่าทางไฟฟ้าตัวนำ (Electric Conductivity)
- ค่าเปอิมิตติวิตี้ (Relative Permittivity)
- ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

โดยเราจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับแบบจำลองของสายเคเบิล 2 มิติ จากตารางที่ 3.3

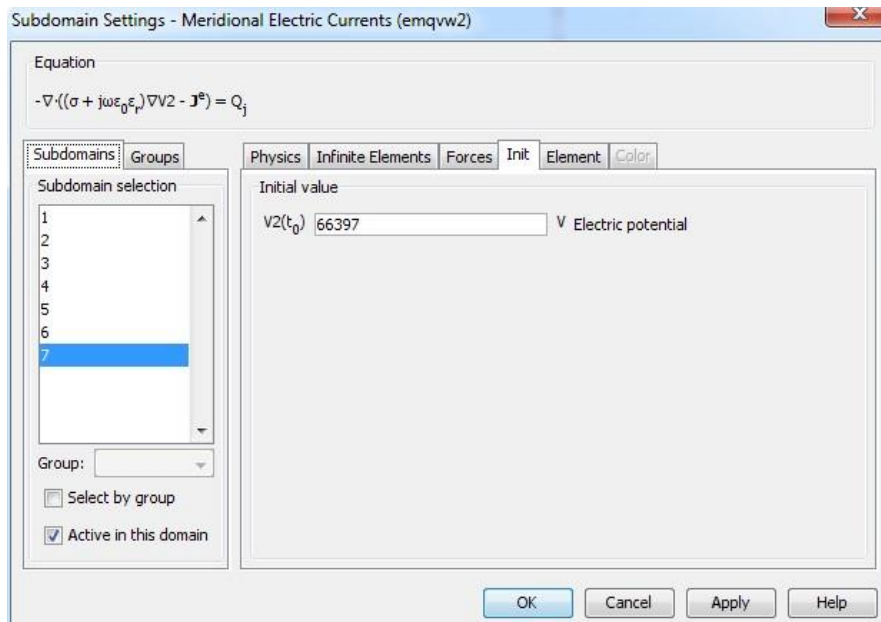
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับแบบจำลองของสายเคเบิล 2 มิติ

Tables of the Parameters for Simulation of the Power Cable						
Layer	Library Material	J^e : External Current Density (A/m ²)	Q_j : Current Source (A/m ³)	σ : Electric Conductivity [S/m]	ϵ_r : Relative Permittivity	V2(t_0) : Init (V)
1	Polyethylene	880 / 791	11,360	0	2.3	0
2	Aluminum	880 / 791	11,360	3.774e7	1	0
3	Copper	880 / 791	11,360	5.998e7	1	0
4	Polyethylene	880 / 791	11,360	0	2.3	0
5	Polyethylene	880 / 791	11,360	0	2.3	0
6	Polyethylene	880 / 791	11,360	0	2.3	0
7	Copper	880 / 791	11,360	5.998e7	1	66,397

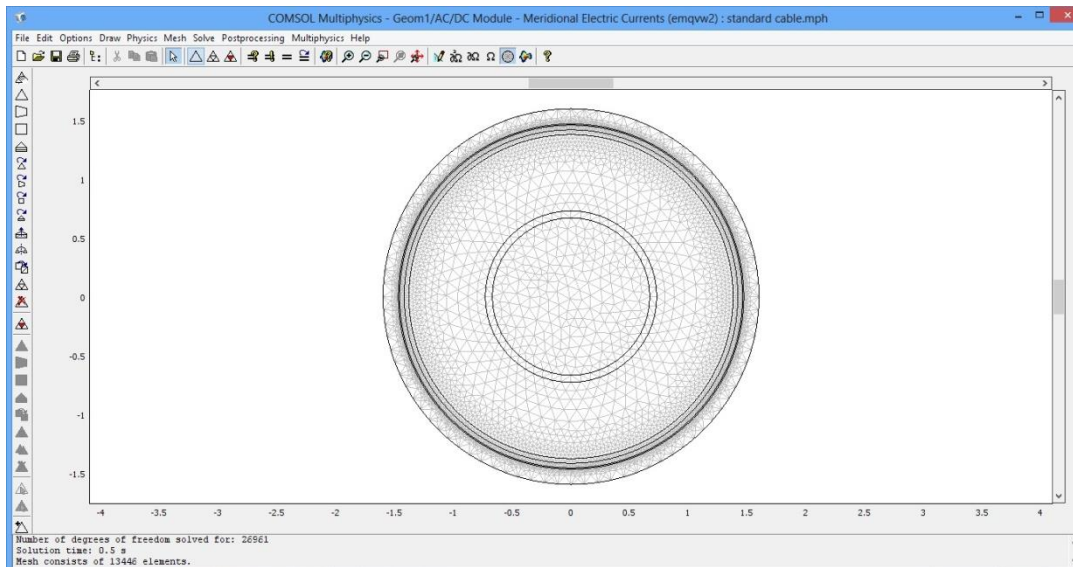
3.6.1 การสร้างแบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ



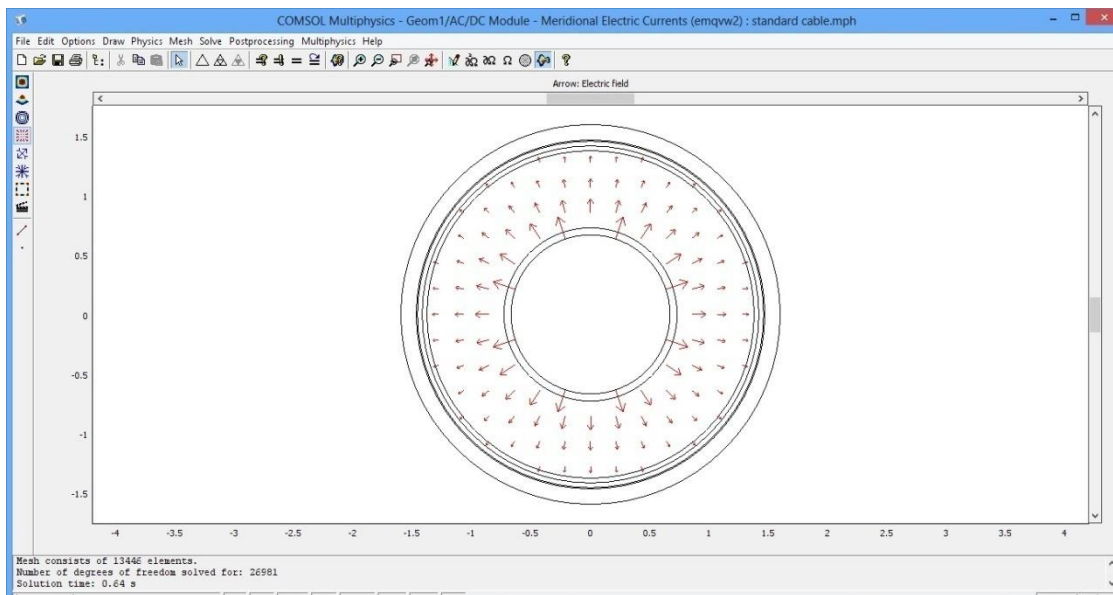
ภาพที่ 3.16 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ
แสดง Subdomain Setting ของโปรแกรม



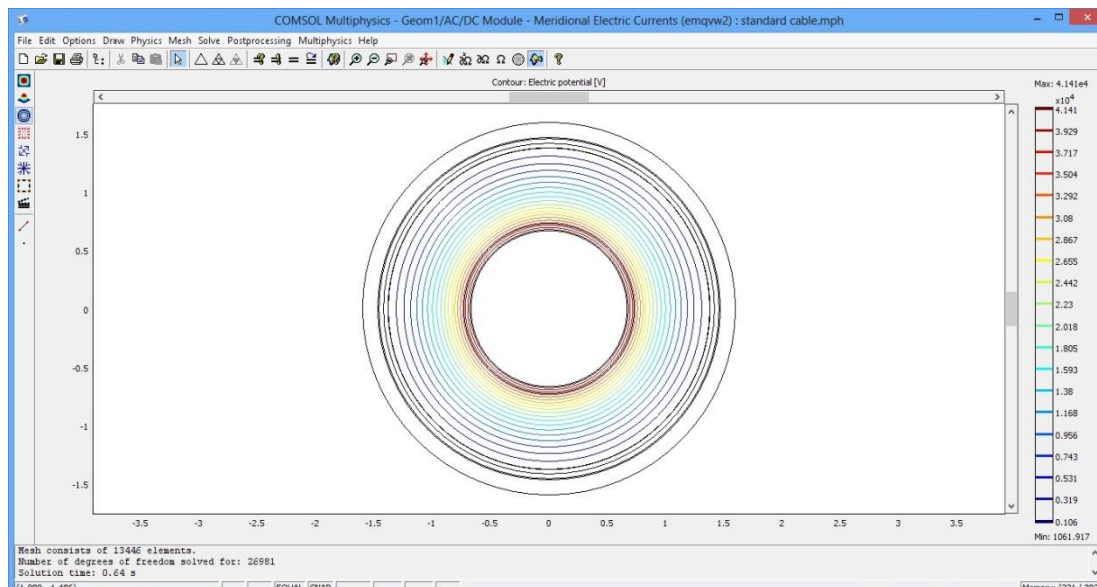
ภาพที่ 3.17 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ
แสดงการจำลองป้อนแรงดันขนาด 66,397 โวลต์



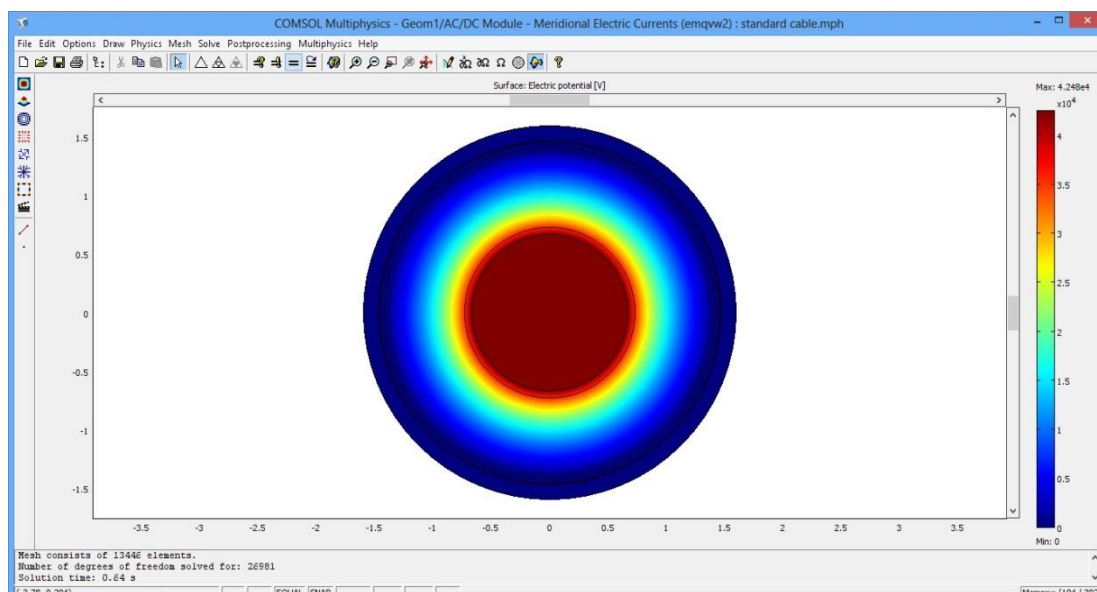
ภาพที่ 3.18 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ์
แสดงโครงสร้างของสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล



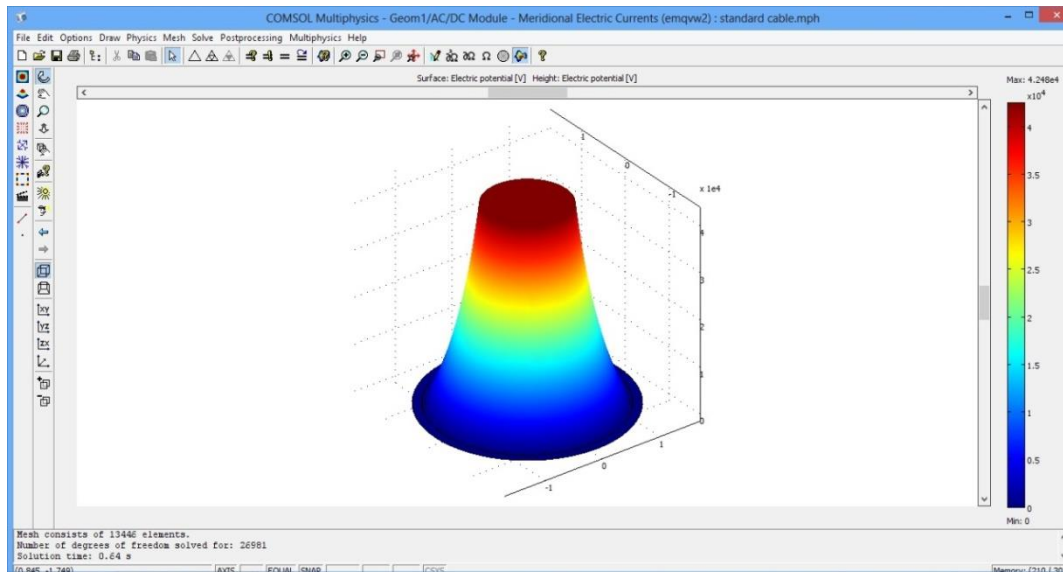
ภาพที่ 3.19 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ์
แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล



ภาพที่ 3.20 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ์
แสดงสนามไฟฟ้าบริเวณชั้นฉนวนของสายเคเบิล

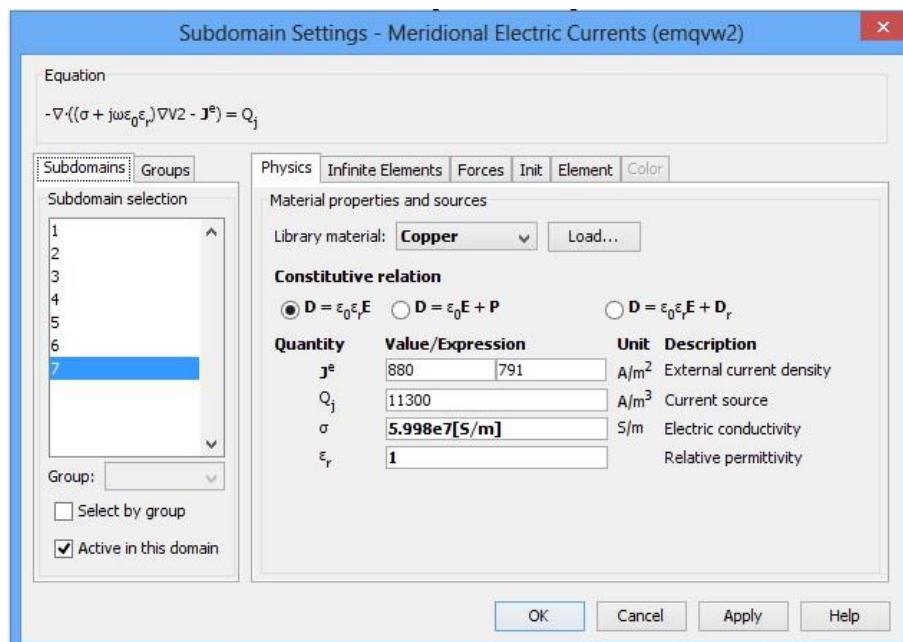


ภาพที่ 3.21 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมบูรณ์
แสดงระดับความเครียดของสนามไฟฟ้า
บริเวณชั้นฉนวนของสายเคเบิล

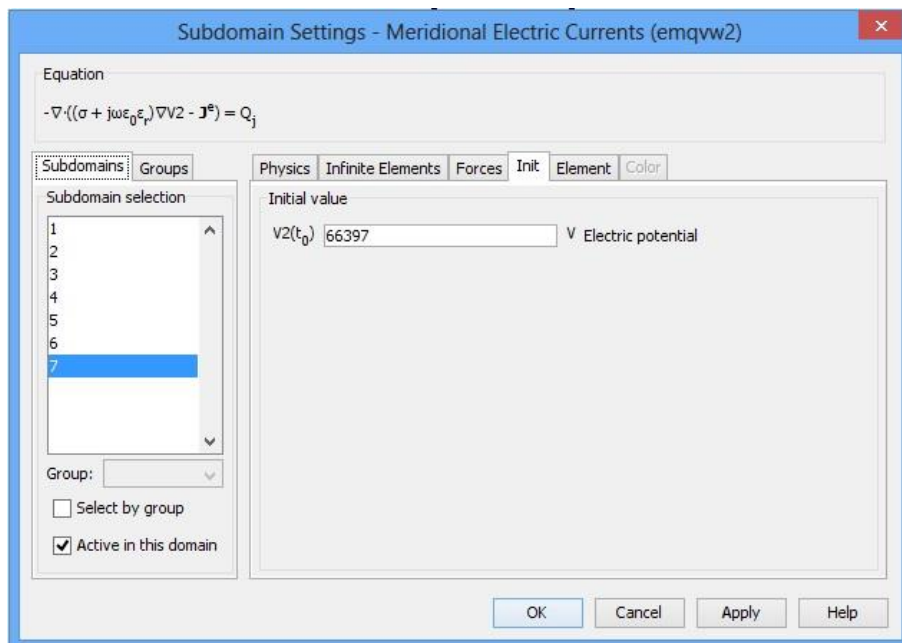


ภาพที่ 3.22 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบสมมาตรแสดงค่าความเคียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในของตัวนำและฉนวนสายเคเบิล

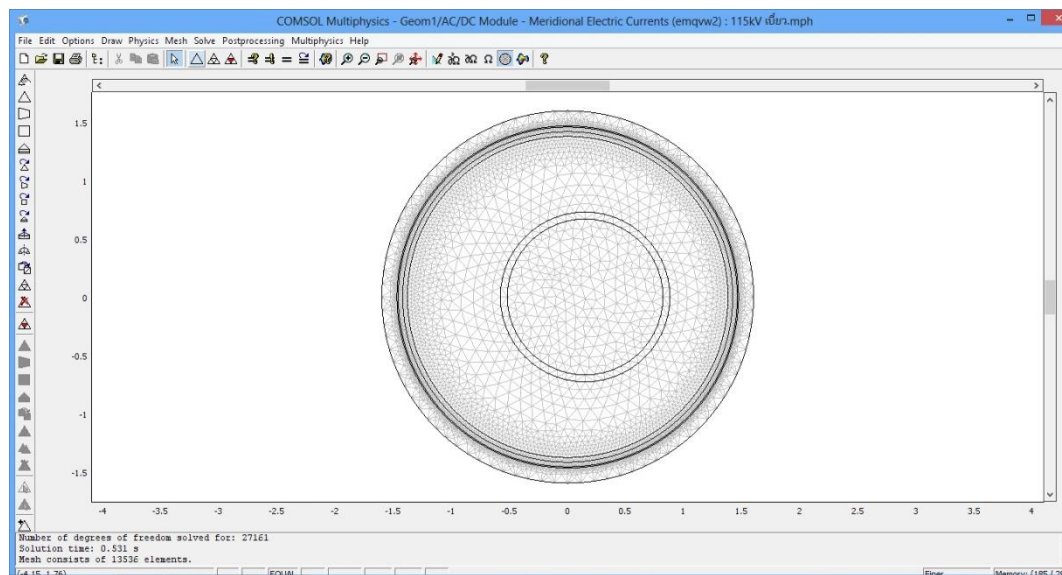
3.6.2 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมมาตร โดยที่ชั้นฉนวนมีความหนาผิดปกติ



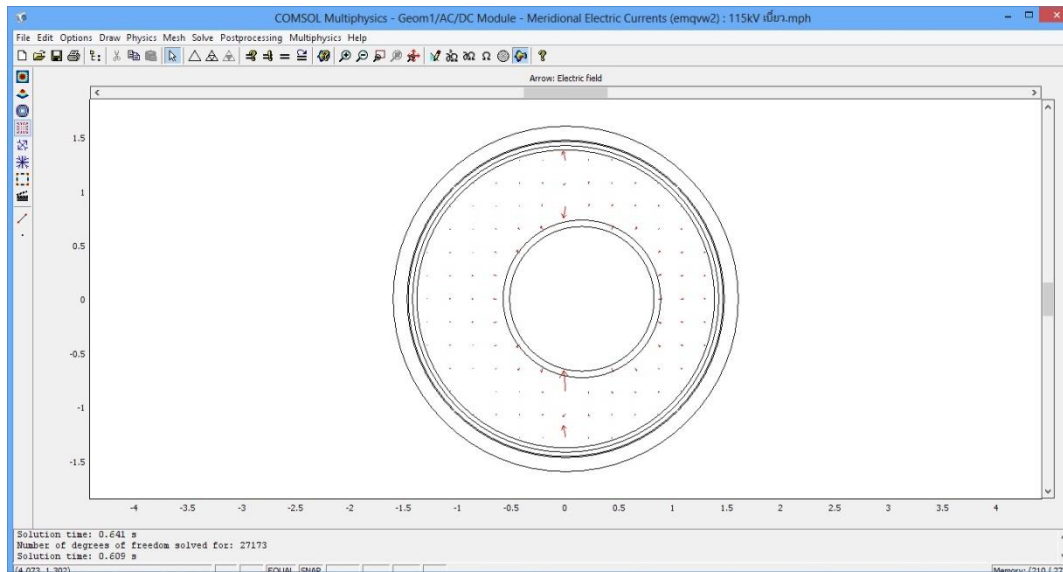
ภาพที่ 3.23 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมมาตรโดยที่ชั้นฉนวนมีความหนาผิดปกติ แสดง Subdomain Setting ของโปรแกรม



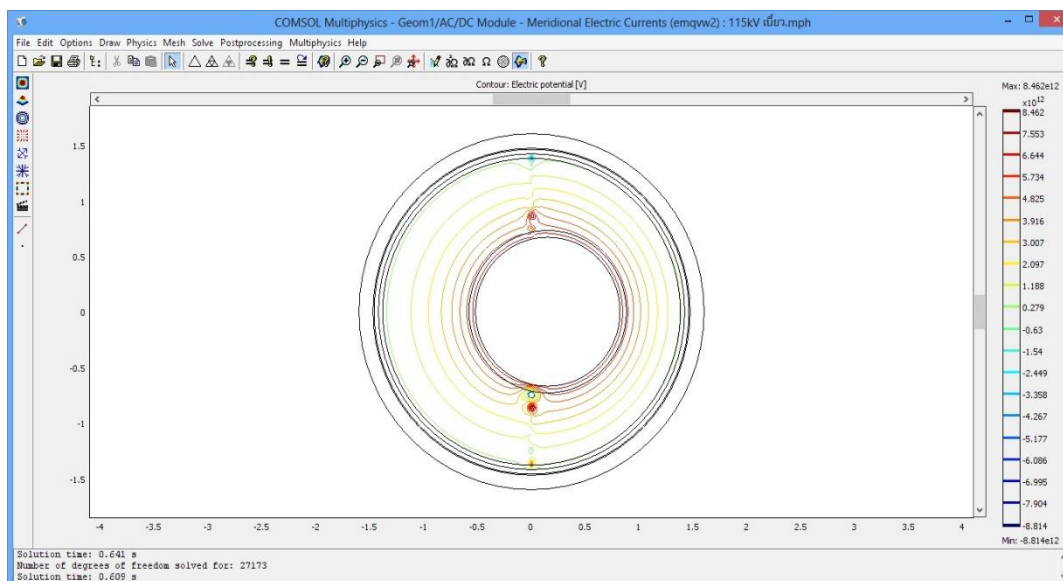
ภาพที่ 3.24 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมมาตร โดยที่ชั้นฉนวน มีความหนาผิดปกติ แสดงการจำลองป้อนแรงต้นขนาด 66,397 โวลต์



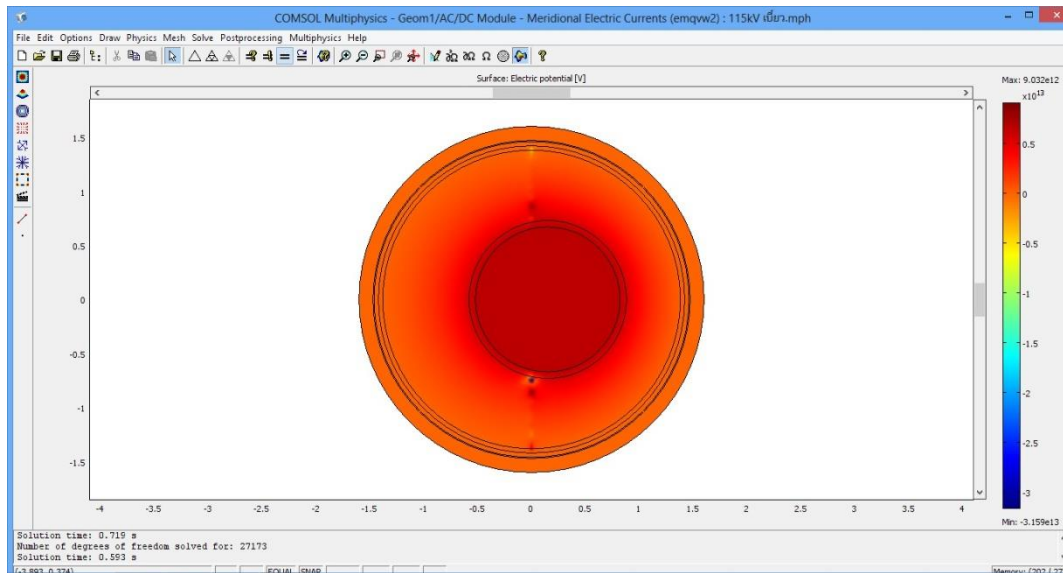
ภาพที่ 3.25 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมมาตร โดยที่ชั้นฉนวน มีความหนาผิดปกติแสดงโครงสร้างของสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล ที่เกิดข้อผิดพลาดบริเวณชั้นฉนวน



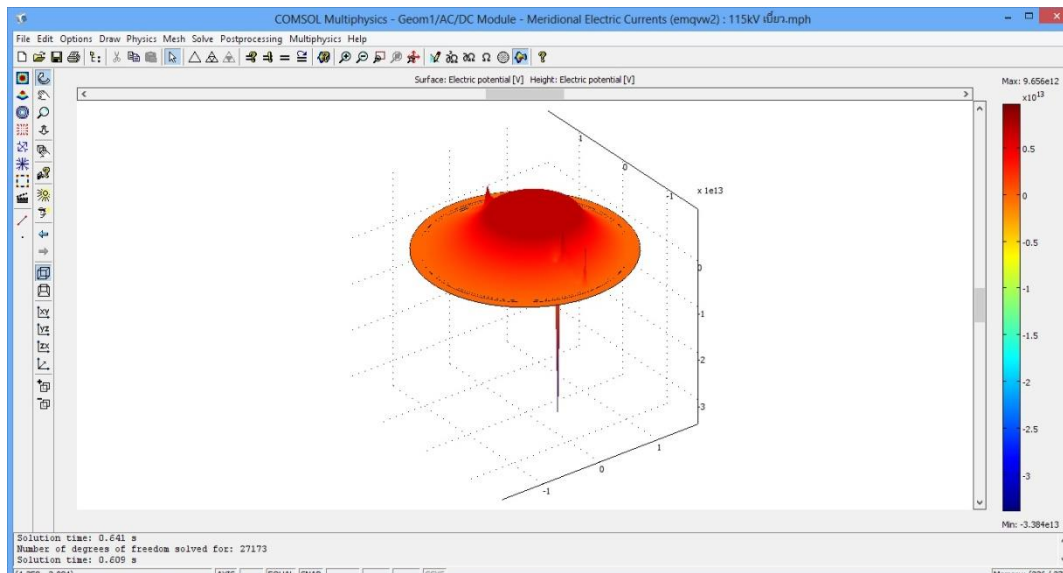
ภาพที่ 3.26 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมบูรณ์ โดยที่ชั้นฉนวน มีความหนาผิดปกติแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าภายในฉนวนสายเคเบิล



ภาพที่ 3.27 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมบูรณ์ โดยที่ชั้นฉนวน มีความหนาผิดปกติแสดงลักษณะของสนามไฟฟ้า ภายในฉนวนสายเคเบิลที่เกิดเปลี่ยนแปลง

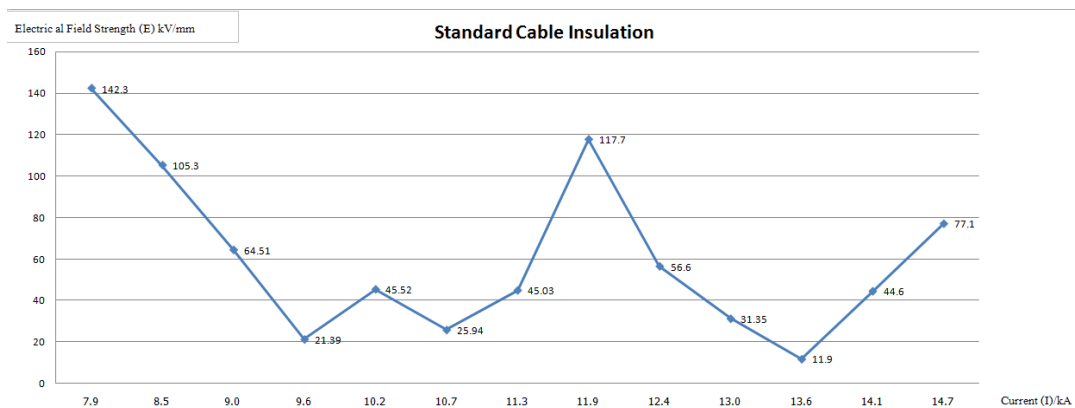


ภาพที่ 3.28 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมมาตร โดยที่ชั้นฉนวน มีความหนาผิดปกติแสดงระดับความเครียดของสนามไฟฟ้า บริเวณชั้นฉนวนสายเคเบิล

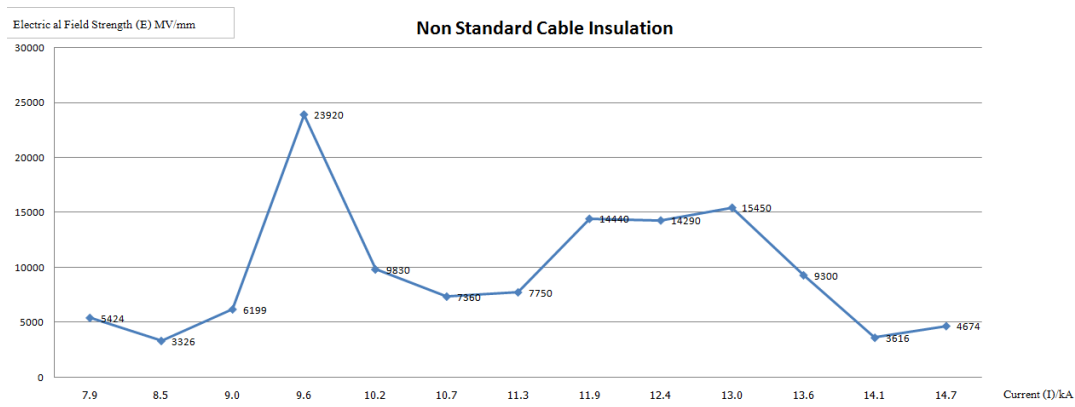


ภาพที่ 3.29 แบบจำลองรูปแบบสายเคเบิลแรงสูง แบบไม่สมมาตร โดยที่ชั้นฉนวน มีความหนาผิดปกติแสดงสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นของสายเคเบิล

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนสายเคเบิล โดยการนำ Cable Simulation Program และปรับค่า Q_j : Current Source ให้มีค่าเท่ากับ 11.36 kA โดยเพิ่ม/ลด $\pm 5\%$ เพื่อทดสอบค่าความคงทนของฉนวน ในลักษณะการจำลองความหนาของฉนวนสายเคเบิลแบบ Standard and Non Standard of the Cable Insulation



ภาพที่ 3.30 แสดงกราฟการปรับเปลี่ยน Q_j : Current Source แบบ Standard Cable Insulation



ภาพที่ 3.31 แสดงกราฟการปรับเปลี่ยน Q_j : Current Source แบบ Non Standard Cable Insulation