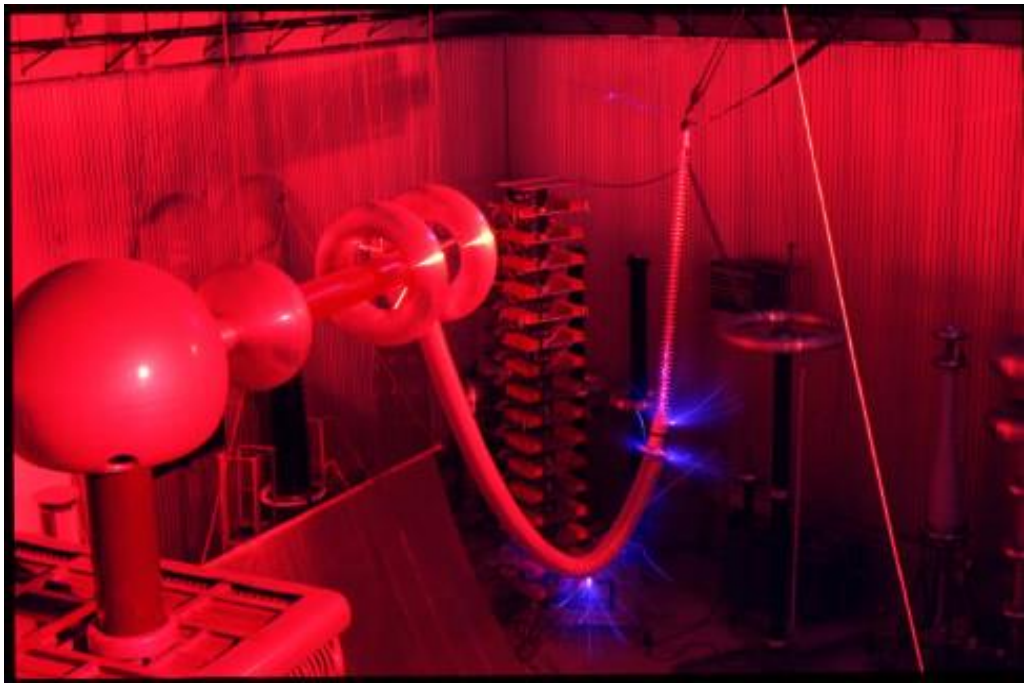
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

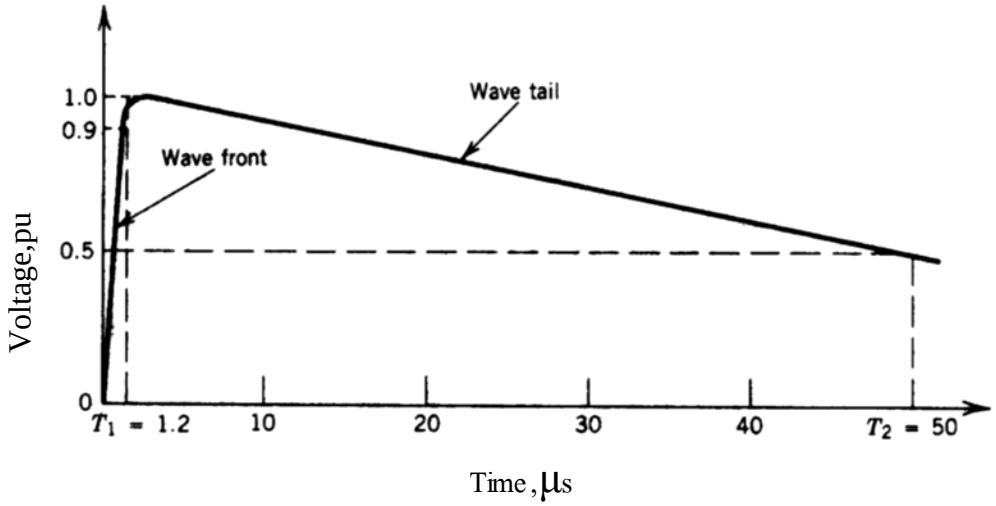
2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์หาค่าแรงดันเกินชั่วครู่และการต่อระบบกราวด์ลงดิน [1]

ปรากฏการณ์ชั่วครู่คือเป็นฟังก์ชั่นของเวลาที่ไม่เป็นรายคาบและเกิดในช่วงสั้นๆ ตัวอย่างของปรากกฏการณ์ชั่วครู่คือแรงดันหรือกระแสเสิร์จซึ่งแรงดันเสิร์จก็คือการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของแรงดันที่จุดใดจุดหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังความเร็วของเสิร์จขึ้นอยู่กับตัวกลางที่เสิร์จกำลังเดินทางผ่านไปแรงดันเสิร์จดังกล่าวโดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับกระแสเสิร์จกระแสเสิร์จถูกสร้างขึ้นมาจากกระแสชาร์จหรือดิสชาร์จตัวเก็บประจุซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุขนานของระบบส่งไฟฟ้าแรงดันเสิร์จมีสาเหตุมาจากฟ้าผ่าการสับสวิตช์หรือการเกิดฟอลต์เป็นต้นเสิร์จแรงดันสูงในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบได้อย่างมากดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดค่าแรงดันเสิร์จให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย



ภาพที่ 2.1 การทดสอบการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าทั้งกระแสและแรงดันจะเคลื่อนที่ไปตามตัวนำเป็นคลื่นจรถ้าคลื่นจรดังกล่าวมีหน้าคลื่นชันและสมมุติว่าคลื่นนี้เดินทางมาถึงยังอุปกรณ์ในระบบ อาจจะเป็นเหตุให้เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนได้เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน

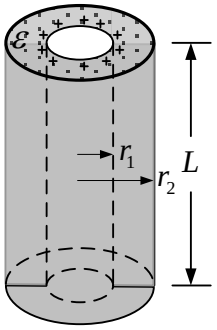
ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของฉนวนภายใต้แรงดันอิมพัลส์ดังกล่าว แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีทิศทางเดียวซึ่งจะเพิ่มขนาดขึ้นถึงค่าสูงสุดอย่างรวดเร็วและจะลดลงเป็นศูนย์อย่างช้าๆ รูปร่างของคลื่นถูกกำหนดด้วยค่าเวลา 2 ค่าคือ T_1 และ T_2 โดยที่หน่วยของค่าเวลาทั้ง 2 เป็นไมโครวินาทีโดยที่เราสามารถคำนวณการเคลื่อนที่ของเสิร์จได้จาก
สมการอนุพันธ์สำหรับแรงดันและกระแสของสายส่งเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC\,\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC\,\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \tag{2.1}$$

สมการหาความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า

$$\vec{E} = \lim_{q \to 0} \frac{\vec{F}}{Q} \qquad \left(V/m\right) \tag{2.2}$$

2.1.1 ทฤษฎีการเกิดสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกระบอกแกนซ้อนร่วมโดยกฎของเกาส์



ภาพที่ 2.3 ทรงกระบอกแกนซ้อนร่วม

หาสมการความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวทรงกระบอกโดยกำหนดตัวแปรของสมการดังนี้

Q คือ ประจุ (Electric Charge)

E_r คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength)

ρ คือ ความต้านทาน (Resistivity)

D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (Electric Displacement Field)

l คือ ความยาวทรงกระบอก (Length)

r คือ รัศมีทรงกระบอก (Radius)

ε คือ $\varepsilon_o\varepsilon_r$

ε_o คือ เปอร์มิตติวิตี้ของอากาศอิสระ (Permittivity of Free Space) มีหน่วยเป็น F/m

มีค่าเท่ากับโดยที่ $\varepsilon_o = 8.854\times10^{-12} = \frac{1}{36\pi}10^{-9}$ F/m

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

กฎของเกาส์

หาค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวทรงกระบอกด้านใน สำหรับทรงกระบอกแกนซ้อนร่วม จากสมการ

โดยที่ $D = \varepsilon E$ $\qquad Q = \oint_s \vec{D}\cdot d\vec{S}$ (2.3)

$$Q = \oint_s (\varepsilon E_\rho a_\rho \cdot dS a_\rho)$$

$$= \oint_s (\varepsilon E_\rho a_\rho \cdot \rho d\emptyset dz a\rho)$$

$$= \oint_s (\varepsilon E_\rho \, \rho d\emptyset dz)$$

$$Q = \varepsilon \, E_\rho \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{l} d\emptyset \cdot dz$$

$$Q = \varepsilon E_\rho \rho \, \emptyset \int_0^{2\pi} Z \int_0^{l}$$

แทนค่าสมการที่ (2.3) จากสมการที่ (2.4)

โดยที่ $\rho = r$ $\qquad Q = \varepsilon E_\rho \, \rho 2\pi L$ (2.4)

$$E_r = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_r L} \tag{2.5}$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าในแนวรัศมีทรงกระบอกที่เกิดจากประจุหาความต่างศักย์ไฟฟ้าได้จากสมการ

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{L} \tag{2.6}$$

$$V = -\int (E_\rho a_\rho \cdot d_\rho a_\rho)$$

โดยที่ $\rho = r$ $\qquad = -\int \frac{Q}{2\pi \varepsilon_\rho L} \cdot d_\rho$

$$= -\int_{r_2}^{r_1} \frac{Q}{2\pi \varepsilon L} dr$$

$$= - \frac{Q}{2\pi\varepsilon L} \int_{r_2}^{r_1} \frac{1}{r} dr$$

$$= - \frac{Q}{2\pi\varepsilon L} (\ln r_1 - \ln r_2)$$

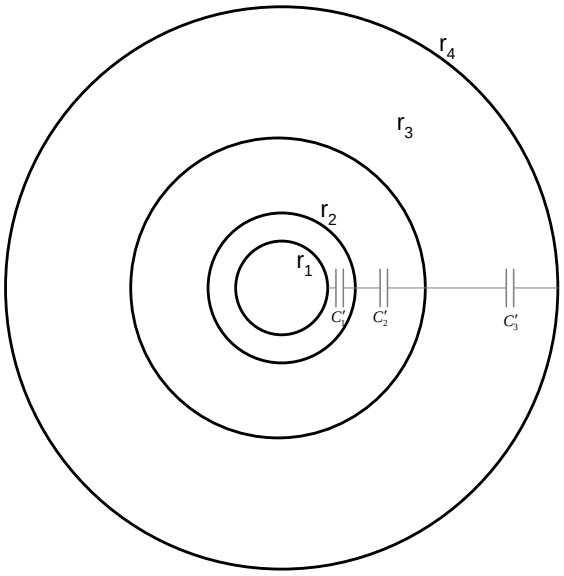
$$V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

ค่าความจุของทรงกระบอก ได้จากสมการ

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.7)$$

$$C' = \frac{C}{L} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.8)$$

กำหนดให้ C′ คือค่าความจุต่อความยาว F/m



ภาพที่ 2.4 รูปด้านตัดของสายเคเบิลทรงกระบอกแกนซ้อนร่วม

โดยหาค่าความจุรวมได้จากสมการ

$$C_1' = \frac{2\pi\varepsilon_1}{\ln\frac{r_2}{r_1}},\ C_2' = \frac{2\pi\varepsilon_2}{\ln\frac{r_3}{r_2}},\ C_3' = \frac{2\pi\varepsilon_3}{\ln\frac{r_4}{r_3}} \text{ และ } C_4' = \frac{2\pi\varepsilon_4}{\ln\frac{r_5}{r_4}}$$

จะได้สมการ

$$C_T' = \frac{1}{\frac{\ln\frac{r_2}{r_1}}{2\pi\varepsilon_1} + \frac{\ln\frac{r_3}{r_2}}{2\pi\varepsilon_2} + \frac{\ln\frac{r_4}{r_3}}{2\pi\varepsilon_3} + \frac{\ln\frac{r_5}{r_4}}{2\pi\varepsilon_4}}$$

$$C'_T = \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4}{\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}}$$

$$Q' = C'_T U = \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 U}{\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}} \quad (2.9)$$

กำหนดให้ Q' คือประจุไฟฟ้าต่อความยาวพิจารณาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุ Q ที่ตำแหน่งรัศมียาว r_x จากสมการ (2.5) และ (2.9) จะได้สมการ

$$E_{r_x} = \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 U}{\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}} \quad (2.10)$$

การหาความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแต่ละชั้นและบริเวณภายนอกทรงกระบอกแกนซ้อนร่วมกำหนดให้ $\varepsilon_1 = \varepsilon_0\varepsilon_{r1}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_0\varepsilon_{r2}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_0\varepsilon_{r3}$, และ $\varepsilon_4 = \varepsilon_0$

พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณทรงกระบอกชั้นที่ 1 โดยที่ $\varepsilon_x = \varepsilon_1, r_x = r_1$

$$E_{Max,1} = \frac{\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 U}{r_1\left(\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}\right)} \quad (2.11)$$

พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณทรงกระบอกชั้นที่ 2 โดยที่ $\varepsilon_x = \varepsilon_2, r_x = r_2$

$$E_{Max,2} = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 U}{r_2\left(\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}\right)} \quad (2.12)$$

พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณทรงกระบอกชั้นที่ 3 โดยที่ $\varepsilon_x = \varepsilon_3, r_x = r_3$

$$E_{Max,3} = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 U}{r_3\left(\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}\right)} \quad (2.13)$$

พิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณทรงกระบอกชั้นที่ 4 โดยที่ $\varepsilon_x = \varepsilon_4, r_x = r_4$

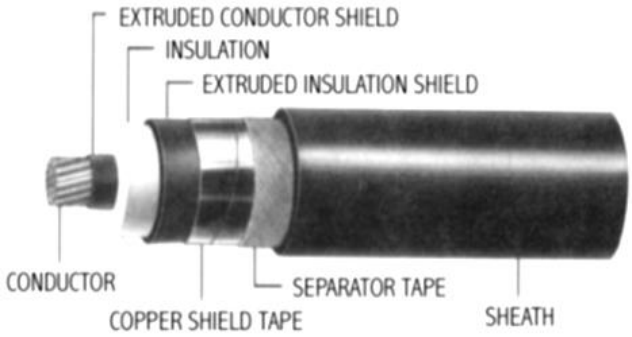
$$E_{Max,4} = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 U}{r_4\left(\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_2}{r_1} + \varepsilon_1\varepsilon_3\varepsilon_4 \ln\frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_4 \ln\frac{r_4}{r_3} + \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3 \ln\frac{r_5}{r_4}\right)} \quad (2.14)$$

2.2 สายเคเบิลใต้ดิน

สายเคเบิลใต้ดินได้ถูกนำมาใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายในเมืองใหญ่ๆหรือพื้นที่ ที่มีจำนวนประชากรหนาแน่น ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของสายเคเบิลไปอย่างมาก สาย

เคเบิลใต้ดินจึงเข้ามาแทนที่สายไฟฟ้าเหนือศีรษะสำหรับการส่งจ่ายไฟฟ้าในระยะทางสั้นๆ ข้อดีของสายเคเบิลเมื่อเปรียบเทียบกับสายเหนือศีรษะมีดังนี้

- ไม่มีการหยุดจ่ายไฟเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะอากาศที่เลวร้ายเช่นพายุฝนฟ้าคะนอง (ในระบบสายอากาศฉนวนอาจจะเกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ลัดวงจรซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการหยุดจ่ายไฟฟ้า)
- ไม่เป็นสาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุกับชุมชน
- เนื่องจากเป็นการเดินสายเคเบิลอยู่ใต้ดินจึงทำให้สภาพโดยรอบดูสวยงามแต่ค่าใช้จ่ายในการใช้สายเคเบิลใต้ดินนั้นมีราคาที่สูงกว่าสายเหนือศีรษะมากซึ่งอาจจะแสดงได้ด้วยอัตราราคาต่อระบบแรงดันต่างๆ ซึ่งสายเคเบิลใต้ดินจะมีราคาเป็น 20, 8 และ 2 เท่าที่ระบบแรงดัน 400, 132 และ11 เควี ตามลำดับ

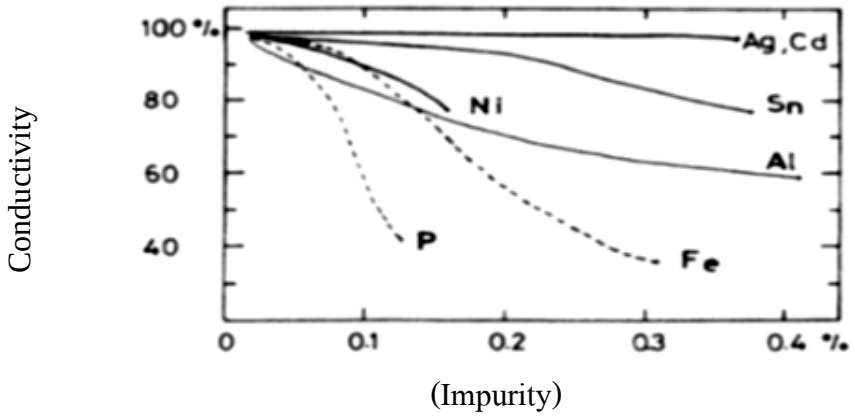


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูง

โครงสร้างของสายเคเบิลประกอบด้วยหลายส่วนสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ประกอบด้วยตัวนำโลหะ 1, 3 หรือ 4 แกนซึ่งล้อมรอบด้วยฉนวนสายเคเบิลยังถูกหุ้มด้วยเปลือกโลหะ (Sheath) เพื่อป้องกันโครงสร้างภายในสายเคเบิลจากภายนอกสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน เกราะโลหะ (Armor) ได้เพิ่มเข้าไปเพื่อประโยชน์ในการป้องกันแรงทางกลและในระบบ HV และ EHV เคเบิลจะเป็นแบบหลายแกน แต่ละแกนจะมีการสกรีนโดยใช้สารที่เป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำเพื่อรักษาความเครียดสนามไฟฟ้าให้เท่ากันทุกจุดบนตัวนำ

2.2.1 ตัวนำ

สำหรับสายเคเบิลทุกชนิดทองแดงและอลูมิเนียมจะถูกนำมาใช้เป็นตัวนำความบริสุทธิ์ของโลหะมีความสำคัญอย่างมาก (มากกว่า 99.95 เปอร์เซ็นต์) ความไม่บริสุทธิ์จะทำให้ความนำไฟฟ้า (Conductivity) มีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.6 ตัวนำโดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบฟั่นเกลียว (Strand) เพื่อที่จะได้ไม่เสียหายเมื่อทำการดัดให้โค้งงออลูมิเนียมมีราคาที่ถูกกว่าทองแดงแต่ในขณะนี้ความแตกต่างของราคาก็ลดลงไปอย่างมากความนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมมีค่าเพียง 60 เปอร์เซ็นต์ของทองแดงเท่านั้นดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของอลูมิเนียมจะมีขนาดใหญ่กว่าทองแดง สำหรับการนำกระแสค่าเดียวกันตัวนำอลูมิเนียมทั้งแบบแกนเดียวหรือแบบฟั่นเกลียวมีใช้อยู่ในโครงสร้างของสายเคเบิลในปัจจุบัน

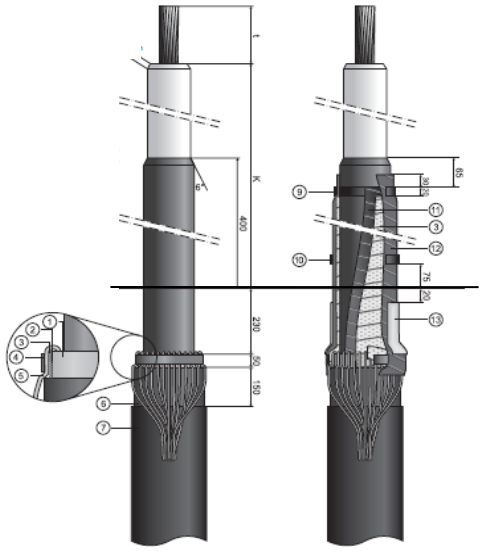


ภาพที่ 2.6 ผลของความไม่บริสุทธิ์ที่มีต่อความนำไฟฟ้าของทองแดง

2.2.2 ฉนวน XLPE

ฉนวน Cross-Link Polyethylene ผลิตขึ้นจากก๊าซเอททีลีนซึ่งได้เปลี่ยนแปลงเป็นโพลีเอททีลีนความหนาแน่นต่ำ(Low Density Polyethylene)ทำให้เป็นส่วนเล็กๆภายใต้แรงกดดันประมาณ 50,000 psi XLPE เป็น Homo Polymer ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นส่วนเล็กๆ เชื่อมโยงทางเคมีโดยโมเลกุลคาร์บอนของโพลีเอททีลีนซึ่งค่า 1 โมเลกุลจะมีอะตอมของคาร์บอนประมาณ 1,000-4,000 อะตอมทำการเชื่อมโยงถึงกันเป็นลูกโซ่ XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนโพลีเอททีลีนแต่เมื่อมีการ Bonding ระหว่างโมเลกุลของโพลีเอททีลีนจึงทำให้ XLPE มีคุณสมบัติทางกลทางกายภาพและความร้อนและมีค่า Tensile Strength ดีกว่าโพลีเอททีลีนเดิมที่อุณหภูมิสูง

ฉนวน XLPE จะผลิตขึ้นโดยกระบวนการที่ต่อเนื่องที่รวมการ Extrusion ฉนวนและการ Screening ไปพร้อมกันตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ



ภาพที่ 2.7 ฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

โดยปกติฉนวน XLPE ได้จากการนำ Polyethylene (PE) ซึ่งเป็น Thermoplastic มาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในทำให้เกิดการเกาะตัวกันระหว่างสายของโมเลกุลของ Polyethylene เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก Thermoplastic ไปเป็น Thermosetting ซึ่งเป็นผลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหลายอย่าง (วิธีการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง นี้เรียกว่า Crosslinking)

ข้อดีของฉนวนประเภท XLPE

- ทนอุณหภูมิได้สูงคือ 90 ^{0}**C**
- มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือ มี Dielectric Loss ต่ำ และมี Dielectric Strength สูง
- มีคุณสมบัติทางกลที่ดีทนต่อแรงกระทำภายนอก
- ทนต่อสารเคมีดีกว่า PE/PVC
- ไม่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

ข้อเสียของฉนวนประเภท XLPE

- มีราคาสูง
- มีขั้นตอนการติดตั้งที่ยุ่งยาก
- ไม่สามารถซ่อมแซมฉนวนได้ ถ้าเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพของวัสดุพอลิเมอร์

วัสดุพอลิเมอร์	อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (ºC)	อุณหภูมิการหลอม (ºC)
Crosslinked Polyethylene	-125	110
Polyethylene (Low Density)	-110	115
Polytetrafluoroethylene	-97	327
Polyethylene (High Density)	-90	137
Polypropylene	-18	175
Nylon 6.6	57	265
Polyester (PET)	69	265
Polyvinyl Chloride	87	212
Polystyrene	100	240
Polycarbonate	150	265

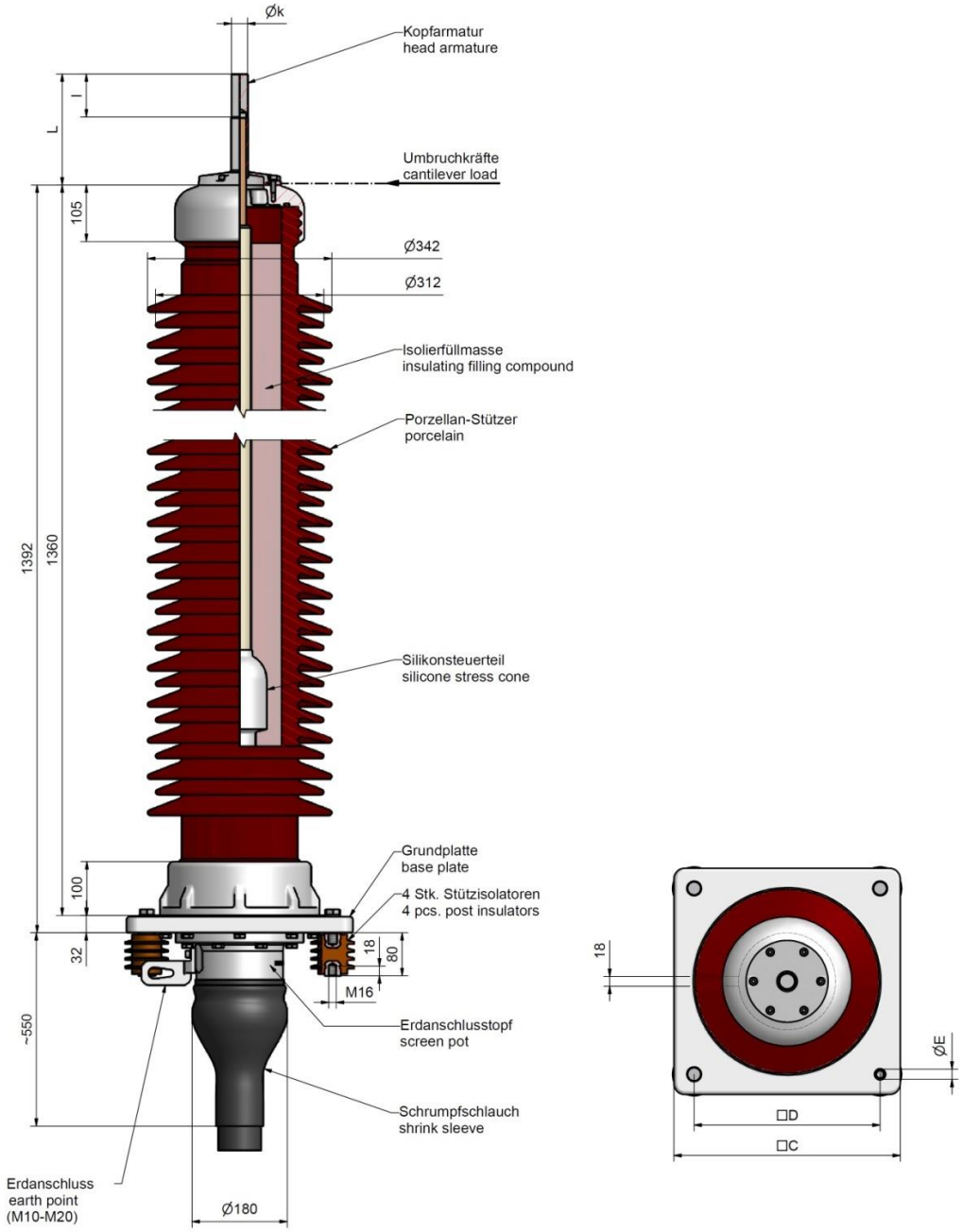
ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน

วัสดุ	XLPE	PE	PVC	ยาง Butyl	ยาง EP	ยาง CR
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.92	0.92	12.-1.5	1.4-1.5	1.3-1.4	1.4-1.6
ความคงทนฉนวนไฟฟ้า (Dielectric strength : kV/mm)	30-50	30-50	20-35	20-30	30-45	15-25
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	2.3	2.3	5-9	4-5	4-5	10
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor : %)	0.03	0.03	4-12	1-3	1-2	10
ความต้านทานแรงตึง (Tensile strength : kg/mm2)	1.4-1.8	1.2-1.5	1.0-2.5	0.4-0.7	0.4-0.9	1.2-2.0
อุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน(ºC)	90	75	60-75	80	90	75

2.3 หัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง

หัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูงแบบติดตั้งภายนอก มี 3 ชนิด คือ

1. แบบชนิดพอร์ชสเลน (Porcelain) ใช้ได้กับสายหลายขนาดมีคุณสมบัติป้องกันความชื้นและน้ำด้วยคุณสมบัติของน้ำยาหล่อ (Compound) ที่บรรจุอยู่ภายในและทนต่อสภาพแวดล้อมที่ภายนอกได้ดีแต่มีข้อเสียก็คือมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก
2. แบบชนิด Slip On เป็นหัวต่อสำเร็จรูปมาจากโรงงานหรือเป็นชิ้นส่วนมาจากโรงงานผลิตติดตั้งได้เร็วแต่มีข้อเสียคือใช้แรงในการดันหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน แต่ละรุ่นจะใช้ได้เฉพาะของขนาดสายเคเบิลนั้น ซึ่งต้องมีขนาดฉนวนเหมาะกันพอดี มิฉะนั้นจะเกิดช่องอากาศภายใน ทำให้เกิดความเสียหาย
3. แบบชนิด Heat Shrink ใช้กับสายเคเบิลได้หลายขนาดมีข้อเสียคือต้องใช้เครื่องมือเป่าไฟและความร้อนซึ่งอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้ ต้องใช้ความเชี่ยวชาญมากในการเป่าไฟเพื่อให้การหดสม่ำเสมออีกทั้งมีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบกันหลายชิ้นส่วนหลายขั้นตอน (อุปกรณ์ควบคุมความเครียด ผิวฉนวน ปีกฉนวน) เพื่อติดตั้งหัวต่อสายเคเบิล



Base plate	C[mm]	D[mm]	ØE[mm]
Standard	420	345	19
Requested	320	270	19

ภาพที่ 2.8 หัวต่อสายไฟฟ้าแรงสูง ชนิดพอร์ชสเลน

2.4 วิธีการประสานเปลือกโลหะของสายเคเบิล

กระแสที่ไหลในตัวนำของเคเบิลจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในเปลือกโลหะ (Sheath) แรงดันที่เหนี่ยวนำขึ้นนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลครบวงจรค่ากระแสนี้จะทำให้เกิดความสูญเสียขึ้นในเปลือกโลหะ วิธีการประสาน (Bonding) หลายๆแบบอาจจะนำมาใช้สำหรับจุดประสงค์เพื่อลดค่าความสูญเสียในเปลือกโลหะให้น้อยที่สุด การประสานถูกออกแบบมาเพื่อรักษาขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำให้อยู่ในค่าที่จำกัด เพื่อป้องกันความเป็นไปได้ที่เปลือกโลหะของเคเบิลเกิดถูกกัดกร่อนเนื่องจากอิเล็กโตไลซิส ระดับของแรงดันที่เปลือกโลหะเทียบกับดิน ซึ่งพอยอมรับได้มีค่าระหว่าง 12 – 17 โวลต์ เพื่อป้องกันการผุกร่อน ในปัจจุบันเคเบิลจะถูกสร้างมาพร้อมกับ Insulating Jacket ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำจึง ไม่เป็นปัญหาที่จะทำให้เกิดการผุกร่อนที่เปลือกโลหะ

วิธีการประสานเปลือกโลหะหรือการต่อลงดินต้องมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- จำกัดค่าแรงดันที่เปลือกโลหะให้น้อยลง
- ลดหรือกำจัดความสูญเสียที่เปลือกโลหะ
- รักษาความต่อเนื่องวงจรเปลือกโลหะเพื่อที่จะยอมให้กระแสฟอลต์ไหลย้อนกลับได้ และรักษาการป้องกันเสิร์จฟ้าผ่าและเสิร์จสวิตชิ่งให้เพียงพอ

2.4.1 การประสานจุดเดียว

รูปแบบของการประสานที่ง่ายที่สุดคือการต่อเปลือกโลหะของเคเบิลทั้ง 3 เข้าด้วยกันและต่อลงดินเพียงจุดเดียวเท่านั้นตลอดความยาวสายสำหรับจุดอื่นแรงดันระหว่างเปลือกโลหะเทียบกับดินจะมีค่าสูงสุดที่ระยะไกลออกไปจากจุดประสานเปลือกโลหะต้องมีการฉนวนที่เพียงพอจากดินเนื่องจากเปลือกโลหะไม่มีวงจรปิด นอกจากเมื่อต่อผ่านตัวจำกัดแรงดันเปลือกโลหะ (Sheath Voltage Limiter) กระแสจะไม่สามารถไหลตามแนวยาวของเปลือกโลหะได้ตามปกติและจะไม่มีความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในเปลือกโลหะ (แต่ Sheath Eddy Loss ยังคงมีอยู่)

2.4.2 การประสานหลายช่วงความยาว

เมื่อวงจรยาวขึ้นและระดับแรงดันตายตัวของเปลือกโลหะเคเบิลมีค่ามากเกินกว่าที่กำหนดอาจจะต้องทำการประสานที่จุดอื่นเพื่อลดระดับแรงดันนี้ตัวอย่างเช่นการจะประสานที่กึ่งกลางความยาวเคเบิลเมื่อเคเบิลยาวมากขึ้นอีกเราสามารถที่จะทำให้แรงดันลดลงได้โดยการใช้วิธีการประสาน

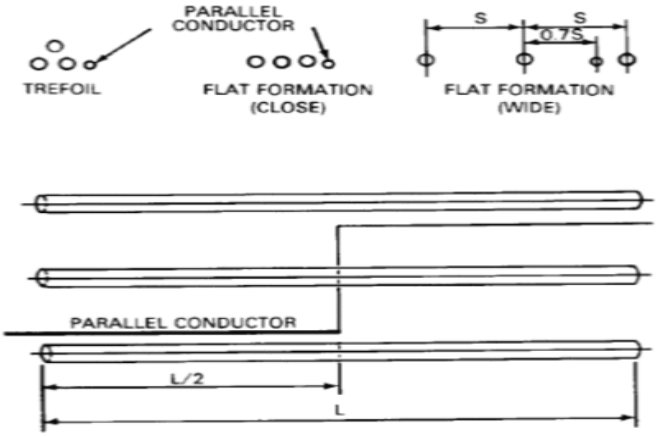
เป็นส่วน (Sectionalizing Joints) ซึ่งจะทำให้แรงดันตายตัวที่เปลือกโลหะเคเบิลในแต่ละส่วนย่อยมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด

2.4.3 ตัวนำสายดินซึ่งต่อขนานไปกับเคเบิล

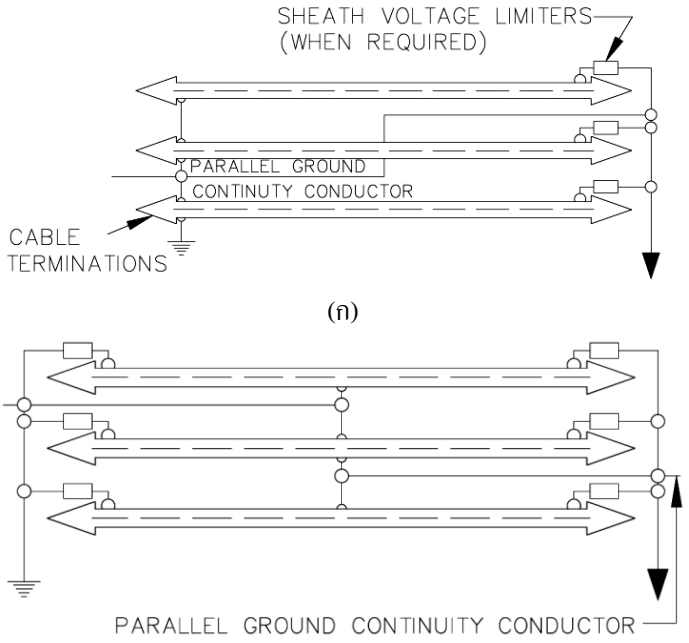
ในระหว่างการเกิดกราวด์ฟอลต์บนระบบไฟฟ้ากำลังกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) ที่ไหลในตัวนำจะไหลย้อนกลับโดยผ่านเส้นทางภายนอกเส้นทางใดทางหนึ่งที่มีอยู่ เนื่องจากการประสานเคเบิลจุดเดียวจะมีการต่อลงดินเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถให้กระแสไหลย้อนกลับได้ (ยกเว้นในกรณีที่เกิดฟอตล์ในเคเบิล) ถ้าเป็นเช่นนี้กระแสย้อนกลับสามารถที่จะไหลผ่านไปตามดินได้เท่านั้น (เว้นเสียแต่ว่าจะมีตัวนำขนานภายนอกที่จะเป็นเส้นทางให้กระแสไหลย้อนกลับได้) เนื่องจากความต้านทานของดินมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับตัวนำกระแสย้อนกลับ จะกระจายผ่านไปในดินในบริเวณที่กว้างมากและความลึกประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean Effective Depth) ขององค์ประกอบความถี่กำลังมีค่าหลายร้อยเมตร ด้วยเหตุที่กระแสย้อนกลับ โดยเฉลี่ยแล้วมีระยะห่างจากกระแสในตัวนำมากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำขนานรวมทั้งในเปลือกโลหะของเคเบิลจะมีค่าสูงมากยิ่งไปกว่านั้นในกรณีที่ไม่มีตัวนำขนานและเกิดกราวด์ฟอลต์ขึ้นในบริเวณใกล้กับเคเบิลฟอลต์ดังกล่าวสามารถที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดความต่างศักย์อย่างมากระหว่างจุดปลายทั้ง 2 ของระบบเคเบิลฉะนั้นการประสานที่จุดเดียวควรจะมีตัวนำขนานซึ่งต่อลงดินทั้ง 2 ปลายของทางเดินสายระยะห่างระหว่างตัวนำดังกล่าวจากวงจรเคเบิลควรจะใกล้เพียงพอเพื่อจำกัดค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นบนเปลือกโลหะให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในระหว่างเกิดฟอลต์ 1 เฟส ขนาดของตัวนำนี้ต้องเพียงพอที่จะรองรับกระแสฟอลต์สูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในระบบเคเบิล ตัวนำขนานปกติแล้วจะมีการฉนวนเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่จะเกิดการผุกร่อนและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากเคเบิล เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสไหลวนและความสูญเสียในตัวนำนี้ควรจะทำการสลับสาย (Transposed) ตัวนำขนานนี้

2.5 รูปแบบของวงจร

ภาพที่ 2.11-2.12 แสดงการประยุกต์ใช้การประสานจุดเดียวกับวงจรที่มีช่วงเดียวและหลายๆช่วงตามลำดับภาพที่ 2.11 การสลับตำแหน่งของตัวนำขนานเพื่อลดแรงดันเหนี่ยวนำ



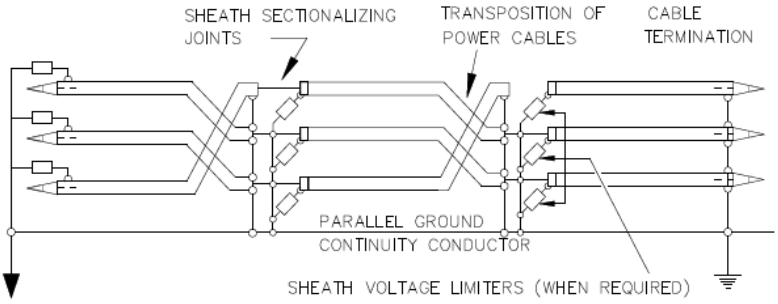
ภาพที่ 2.9 การสลับตำแหน่งของตัวนำขนานเพื่อลดแรงดันเหนี่ยวนำโดยการวางแบบ Trefoil



ภาพที่ 2.10 การประสานเคเบิลที่มีความยาวเพียงช่วงเดียว

(ก) การประสานที่จุดปลาย

(ข) การประสานที่จุดกลางสาย



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงการประสานแบบจุดเดียวสำหรับวงจรที่มี 3 ช่วงความยาว

2.5.1 การประสานสองด้าน

วิธีนี้เปลือกโลหะของเคเบิลทั้ง 3 ชุดจะถูกต่อประสานเข้าด้วยกันและต่อลงดินทั้งด้านหัวและด้านท้ายของความยาวสาย ในกรณีนี้จะมีกระแสไหลในเปลือกโลหะซึ่งจะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียกลายเป็นความร้อน ผลก็คือขีดความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลจะลดลงการประสานสองด้านอาจประยุกต์ใช้ได้สำหรับสายเคเบิลที่เดินใต้น้ำ ทั้งนี้เพราะการประสานลงดินวิธีอื่นทำไม่ได้สำหรับเคเบิลที่อยู่ในน้ำ

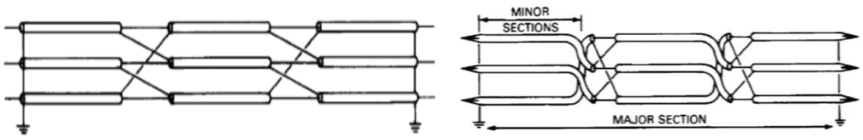
2.5.2 การประสานหลายจุด

วิธีนี้เปลือกโลหะของเคเบิลทั้ง 3 ชุดจะถูกต่อประสานเข้าด้วยกันและต่อลงดินตั้งแต่ 3 จุดขึ้นไปวิธีนี้พบในการเดินสายเคเบิลสำหรับระบบจำหน่าย (Distribution System) แต่ไม่นิยมใช้ในระบบสายส่ง (Transmission System) ทั้งนี้ก็เพราะเกิดกำลังสูญเสีย I^2R ทำให้ค่าพิกัดกระแสของสายไฟมีค่าลดลง

2.5.3 การประสานแบบไขว้

รูปแบบของวงจรการประสานแบบไขว้มีหลักการคือแบ่งเคเบิลออกเป็นส่วนย่อยหลายๆ ส่วนและทำการเชื่อมต่อเปลือกโลหะของส่วนย่อยเหล่านั้นแบบไขว้กันซึ่งจะทำให้ผลรวมของแรงดันเหนี่ยวนำในส่วนที่ต่อกันทั้ง 3 ส่วนมีค่าเป็นศูนย์สำหรับเคเบิลซึ่งไม่มีการสลับตำแหน่ง (Transposition) จะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะทำให้เกิดความสมดุลของแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะยกเว้นการวางเคเบิลเป็นแบบ Trefoil เมื่อมีการสลับตำแหน่งเคเบิลที่แต่ละจุดที่มีการเชื่อมต่อกันแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกโลหะจะรวมกันเป็นศูนย์โดยไม่คำนึงถึงว่าการวางเคเบิลจะเป็นแบบใดภาพที่12 แสดงให้เห็นว่าหลักการดังกล่าวสามารถจะกระทำได้อย่างไรในกรณีที่วงจรมีเพียง 3

ส่วนย่อยเท่านั้นเปลือกโลหะของเคเบิลจะประสานและต่อลงดินที่ทั้ง 2 ปลายของทางเดินสายในการจัดเรียงแบบนี้ส่วนย่อยทั้ง 3 ส่วนรวมกันจะเรียกว่าส่วนหลัก (Major Section)



(ก) (ข)

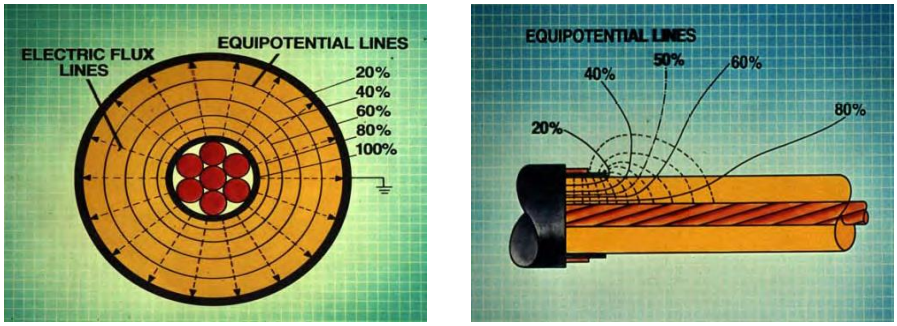
ภาพที่ 2.12 การประสานเคเบิลแบบไขว้

(ก) การประสานซึ่งมีการสลับตำแหน่งสาย

(ข) การประสานโดยไม่มีการสลับตำแหน่งสาย

2.6 ทฤษฎีแนวเส้นแรงของสนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง

สายเคเบิลใต้ดินที่ยังไม่มีการตัดต่อสาย เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำกับ Shield ทำให้มีเส้นแรงไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวของสายจากตัวนำไปยังสาย Shield (ถูกต่อลงดิน) และเกิดเส้นสมศักย์ (เส้นแสดงระดับแรงดันที่มีค่าเท่ากัน) คงที่ไปตลอดความยาวสาย ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอซึ่งมีค่าไม่เท่ากันจากตัวนำไปยังสาย Shield



(ก) (ข)

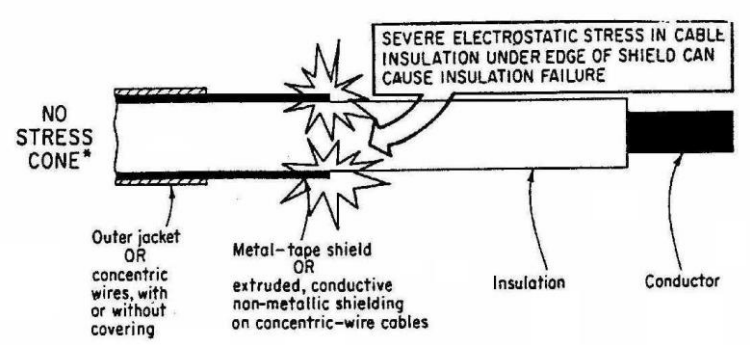
ภาพที่ 2.13 Potential Field และสนามไฟฟ้า

(ก) แสดง Potential Field

(ข) แสดงผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนกะทันหัน

เมื่อสายเคเบิลใต้ดินมีการตัดต่อสาย สายตัวนำที่ถูกปอกฉนวนออกจำเป็นต้องรักษาระยะระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับ Shield (ถูกต่อลงดิน) ให้มีค่ามากพอ เพื่อไม่ให้เกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำไปยัง Shield กรณีนี้สายตัวนำจะถูกคั่นด้วยฉนวนซึ่งมีความหนาแน่นไม่มากเท่านั้นซึ่งในกรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป (เฉพาะช่วงที่ปอก Shield ออก) สนามไฟฟ้าจะเกิดการเบี่ยงเบนอย่างกะทันหันตามที่แสดงในภาพที่ 2.13 (ข)

ผลของค่าสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่น และบริเวณตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric Strength ลดลง จะเป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดการเป็นแปลงโดยกะทันหันเป็นเหตุนำไปสู่การเกิดสภาวะเบรกดาวน์ของฉนวนสายเคเบิล



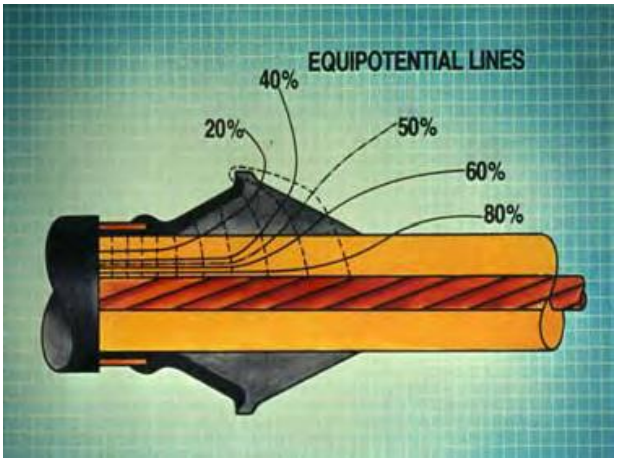
ภาพที่ 2.14 ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบน จะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นที่ปลายสาย Shield

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้ จึงต้องทำการลด Electrical Strength ที่เกิดที่ปลายสาย Shield ก่อนการนำสายเคเบิลที่มี Shield ดังกล่าวไปใช้งาน โดยการทำ Stress Cone/Stress Relief Cone

2.6.1 อุปกรณ์ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

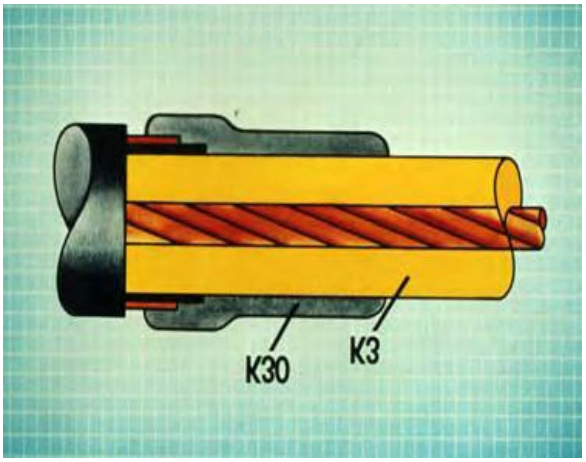
ตามมาตรฐาน IEEE 48-1990 ได้แบ่งอุปกรณ์ควบคุมความเครียดเนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้ามี 2 หลักการคือ

1) การเพิ่มฉนวนด้วยทรงเรขาคณิต (Geometric Cone/Stress Cone) อุปกรณ์ควบคุมความเครียดโดยการเพิ่มความหนาของฉนวนในรูปทรงกรวยและมีผิวนอกเป็นสารกึ่งตัวนำแล้วนำมาควบคุม บริเวณปลายสาย Shield ของเคเบิลแรงสูง ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเกิดการกระจายลงบนสารกึ่งตัวนำของอุปกรณ์มากกว่าที่ปลายสาย Shield ของเคเบิล



ภาพที่ 2.15 เส้นแรงไฟฟ้าที่มีการกระจายสนามไฟฟ้าโดย Stress Relief Control/Stress Cone

2) การหักเหด้วยวัสดุที่มีค่าคงที่ ε สูง (High Permittivity Material) อุปกรณ์ควบคุมความเครียดที่ทำจากวัสดุที่มีค่า ε สูง (Dielectric Constant) โดยอาศัยหลักการหักเหของคลื่นสนามไฟฟ้าที่วัสดุ 2 ชนิดมีค่าดัชนี ที่แตกต่างกัน(Dielectric Constant (ε)ของสายเคเบิลและวัสดุ High ε) ทำให้สนามไฟฟ้าเกิดการหักเหและเกิดการกระจายเส้นแรงไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่จุดใดจุดหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถลดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ปลายสาย Shield ลงได้



ภาพที่ 2.16 การกระจายสนามไฟฟ้าโดย High Permittivity Material

2.7 เบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริกเหลวและไดอิเล็กตริกแข็ง

ไดอิเล็กตริกก็คือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างไดอิเล็กตริก เพื่อกั้นหรือให้ทนแรงดันสูงขึ้นกว่าก๊าซรวมทั้งอากาศด้วย เช่น คั่นระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์ คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของเคเบิล คั้นระหว่างขอลวดกับแกนเหล็กในหม้อแปลง เป็นต้น

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

1) ความต้านทาน
2) เปอร์มิตติวิตี้หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3) แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก
4) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ของไดอิเล็กตริก

2.7.1 ความต้านทานของฉนวน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้น ถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมาก เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั้นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนที่ดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็คโตรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่งอยู่ตัว จะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อยเรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้าง กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้แบ่งออกเป็นสองทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนใน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวมีสภาพนำ เนื่องจากมีสิ่งเปรอะเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume Resistance) และความต้านทานเชิงผิว (Surface Resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความหนา d พื้นที่ภาคตัด A ของไดอิเล็กตริก เช่นในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระนาบคาปาซิเตอร์ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{d}{A} \tag{2.15}$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์แบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho \cdot dx}{2\pi lx} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \qquad (2.16)$$

เมื่อ x คือ รัศมีใดๆวัดจากแกน และ dx ความหนาส่วนย่อยของฉนวน

r_1 และ r_2 เป็น รัศมีตัวนำในและตัวนำนอกตามลำดับ

l เป็นความยาว

2.7.2 เปอร์มิตติวิตี้

เปอร์มิตติวิตี้บางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ε เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะบอกไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาปาซิแตนซ์ หรือกล่าวง่ายๆ ε ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาปาซิเตอร์สูญญากาศเมื่อใส่ไดอิเล็กตริกมีเปอร์มิตติวิตี้ (ε) เข้าไปแทนที่นั่นคือ

$$C = \varepsilon C_0 \qquad (2.17)$$

ปกติเปอร์มิตติวิตี้ (ε) จะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ ε_r เทียบกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสูญญากาศหรือความว่างเปล่า ε_0 คือ

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \qquad (2.18)$$

โดยที่ $$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854 \times 10^{-12} \quad (F/m)$$

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ε_r) นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปฉนวนที่มีใช้ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ε_r จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

2.7.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไดอิเล็กตริก

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะให้ไดอิเล็กตริกเบรกดาวน์ หาได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน์ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและทางฟิสิกส์ที่ต่างกัน สารประเภทมีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเบรกดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นแนวเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลว เบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ถ้าในฉนวนของแข็งเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็ดีอาจมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือปน อย่างไรก็ดีการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนอาจเนื่องจากหลายสาเหตุ

2.7.4 เบรกดาวน์เนื่องจากโพรงและฟองก๊าซ

ในฉนวนเหลวอาจมีฟองก๊าซเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น มีโพรงก๊าซอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรด หรือเนื่องจากแรงอิเล็กโตรสแตติกส์ระหว่างกลุ่มประจุด้วย ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าแรงดึงผิวที่อิเล็กโตรด หรือเกิดก๊าซจากการแตกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลวเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนหรือโคโรนาดิสชาร์จทำให้ฉนวนเหลวระเหยเป็นไอ เมื่อมีฟองก๊าซเกิดขึ้นก็จะขยายตัวยืดในแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า สมมุติว่าปริมาตรของฟองก๊าซคงตัวในขณะที่ยืดออก เบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเซน (Pischen's Curve) ของฟองก๊าซ Alston ได้ให้ความสัมพันธ์ง่ายๆสำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ E_g ในฉนวนเหลวซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ (ε_1) ไว้คือ

$$E_g = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \tag{2.19}$$

โดยที่ E_0 คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเหลวเมื่อไม่มีฟองก๊าซ เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซ E_g มีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซขึ้นจะเกิดดีสชาร์จผ่านฟองก๊าซเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว นำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ทั้งหมด ถ้าบนอิเล็กโตรดมีจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ฉนวนเหลวอาจเกิดเป็นไอ ณ จุดนั้น ดิสชาร์จผ่านฟองไอทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้เช่นกัน

ในกรณีฉนวนเหลวมีสิ่งเจือปนเป็นหยดลูกกลมของเหลวชนิดอื่นปนอยู่ เช่น หยดน้ำ เบรกดาวน์อาจเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่คงรูปของหยดน้ำนี้ในสนามไฟฟ้า สมมุติว่าหยดลูกกลมนี้มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ (ε_2) จมอยู่ในฉนวนเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ (ε_1) อยู่ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ คืออยู่ระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนาน เนื่องจากหยดลูกกลมนี้อัดไม่ได้ ผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้หยดลูกกลมนี้ยืดตัวออกตามแนวสนามไฟฟ้า

2.7.5 เบรกดาวน์เนื่องจากสิ่งเจือปนของแข็ง

สิ่งเจือปนของแข็งที่อาจมีอยู่ในฉนวนเหลว เป็นผงฝุ่นหรือในรูปไฟเบอร์ ถ้าสิ่งเจือปนมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่างไปไปจากค่าของฉนวนเหลว และอยู่ในสนามไฟฟ้า E จะเกิดแรงกระทำบนอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะทรงกลมจะเป็น (Alston)

$$F = \frac{1}{2} r^3 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \text{ grad } E^2 V \qquad (2.20)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของอนุภาคของแข็ง

ε_2 คือ เปอร์มิตติวิตี้ของฉนวนเหลว

ε_1 คือ เปอร์มิตติวิตี้ของอนุภาคของแข็งเจือปน

ถ้า $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นเช่นนั้น แรงนี้จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง เหตุผลนี้จะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นถ้าหากสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่ในทางกรณีของฟองก๊าซ $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ จะมีทิศทางของแรงกระทำในทางตรงข้าม คือเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งเรียงตัวต่อกันเป็นลูกโซ่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด ทำให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นได้

2.7.6 ฉนวนแข็ง

ฉนวนไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มั่นคง หรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่การฉนวนทางไฟฟ้าได้ดีและเพียงพอ แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบทำหน้าที่ยึดและรับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่น สายไฟขึงในอากาศ ใช้อากาศทำหน้าที่ฉนวน แต่สายไฟจะลอยหรือยึด

อยู่ในอากาศได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยทำหน้าที่ยึดสายไฟฟ้าไว้ให้มั่นคงห่างจากดินและสายไฟอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือเคเบิลอัดก๊าซหรืออัดน้ำมันก็ตามต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดตัวนำ หรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซเป็นตัวฉนวน แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดขดลวดต่าง ๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่างตามที่กำหนดออกแบบ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ คือ

- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)
- เปอร์มิตติวิตี้ (ε)
- แฟตเตอร์พลังงานสูญเปล่าในไดอิเล็กตริก ($tg\delta$)
- ความคงทนต่อแรงกล
- ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี,ความร้อน

ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดันมีพลังงานสูญเปล่าในไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดจากฟองก๊าซและความชื้นและไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี

2.7.7 กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนแข็ง

ผลของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว คือ ฉนวนก๊าซสามารถกลับเข้าสู่สภาพการฉนวนได้ดังเดิมภายในเวลาอันรวดเร็วหลังจากการเบรกดาวน์นั้นได้ผ่านพ้นไปแล้ว ฉนวนเหลวก็ทำนองเดียวกันฉนวนสามารถกลับคืนสู่สภาพการฉนวนได้แต่อาจช้ากว่าก๊าซ แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวน์แล้วฉนวนจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรใช้งานอีกไม่ได้ กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนแรงดันและที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของการเกิดเบรกดาวน์ได้ คือ

2.7.8 เบรกดาวน์เนื่องจากดีสชาร์จภายใน

ดีสชาร์จภายในไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นเพราะมีไดอิเล็กตริกที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเป็นอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวนหรือที่เขตต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็คโตรด สารเจือปนนี้จะเกิดเบรกดาวน์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนทั้งนี้เพราะว่า ปกติสารเจือ

ปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำกว่าเนื้อฉนวน ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะมีค่าสูงกว่าในฉนวน จึงเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก่อน

2.7.9 โพรงฉนวนเป็นก๊าซ

ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิดหรือเบรกดาวน์ของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน และมิติของโพรง

2.7.10 โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน

กระบวนการหล่อหรือหุ้มฉนวนอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือเศษวัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรกดาวน์ในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรง ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะลดต่ำลงหลังจากได้เกิดเบรกดาวน์ครั้งแรกแล้ว

2.7.11 โพรงฉนวนเป็นน้ำมัน

โพรงฉนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มชุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลงหรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีของโพรงก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน ε_1 จะเป็น $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน ε_2 ในกรณีที่โพรงแบบตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรกดาวน์ในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและดีสชาร์จภายในขึ้น

2.8 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน [3][4]

การเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) คือการเกิดการเสียสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวนเป็นการเกิดเบรกดาวน์หรือดีสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโตรด ไม่ได้เป็นการเสียเภาพการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งใน

สนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับการเกิดดีสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ การเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน โคโรนาดีสชาร์จและดีสชาร์จตามผิว

2.8.1 ผลกระทบของดีสชาร์จบางส่วน

ในการเกิดดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆและเกิดผิดพร่องขยายตัวเพิ่มมากขึ้นและอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวน

2.8.2 หลักการตรวจจับ PD

การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุด คือการวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วของสายอุปกรณ์ ซึ่งมีมาตรฐานการวัด PD IEC 60270 และ IEC 60076-3

2.8.3 การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน

การวัดค่า PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น Microvolt, pC วิธีที่นิยมใช้แสดงผล PD คือการแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป แสดงได้ 2 แบบคือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์หรือแสดงในรูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

2.8.4 การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD)

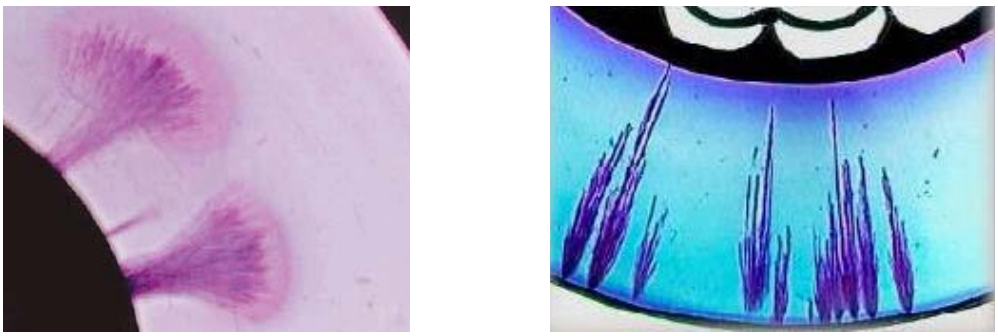
ในสมัยเริ่มแรกที่มีการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้ามักจะใช้วิธีวัดความต้านทาน แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่า tan δ และทดสอบหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ พบว่าค่า tan δ นั้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน จึงใช้เป็นเงื่อนไขในการกำหนดคุณภาพของการฉนวน การค้นคว้าวิจัยต่อมาพบว่า โพรงรอยร้าว หรือการฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ภายในจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น (PD) ดิสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดผลได้หลายอย่าง เช่น แสง เสียง รังสี ปฏิกิริยาเคมี และผลทางไฟฟ้าเป็นต้น ผลของดิสชาร์จทำให้เกิดพลังงานสูญเปล่าและยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการ

ฉนวน ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งาน ของอุปกรณ์สั้นลง และนำไปสู่การเบรกดาวน์ในที่สุด ฉะนั้นวิศวกรผู้ออกแบบการออกแบบฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จึงถือเอา PD เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่บอกถึงคุณภาพของอุปกรณ์ จึงพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิด PD ขึ้น โดยออกแบบลักษณะอิเล็กโตรดที่ ปราศจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดความคงทนของฉนวน

2.9 ปรากฏการณ์ Water Treeing

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง พบว่าการถูกทำลายและความเสียหายของสายเคเบิลส่วนใหญ่มักมาจากกรณีการเกิดปรากฏการณ์ Water treeing ซึ่งเกิดจากความชื้นจากน้ำที่อยู่ภายนอกของเนื้อฉนวน XLPE ความชื้นของน้ำจะซึมเข้าสู่รอยตัดของเนื้อฉนวน (ในกรณีที่สายเคเบิลไฟฟ้ามีรอยตัดจากการใช้งาน) หรือช่องว่างระหว่างเกลียวของสารตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียว ซึ่งนำไปสู่การสึกกร่อนของเนื้อฉนวนและสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า อันเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมอายุของฉนวนเคเบิลไฟฟ้า ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะขยายตัวไปอย่างช้าๆ ในช่วงระยะเวลาเป็นเดือนหรือเป็นปี โดยมีลักษณะคล้ายโรคมะเร็ง จนฉนวนและสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าของสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงหมดคุณสมบัติความเป็นฉนวน การป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ Water Treeing สามารถทำได้โดยการหลีกเลี่ยงความชื้นให้ห่างไกลจากตัวสายเคเบิลไฟฟ้า หากสายเคเบิลไฟฟ้ามีการถูกตัดนำมาใช้แล้ว ควรหาอุปกรณ์ปิดหัวสายเคเบิลไฟฟ้าที่ถูกตัดเพื่อไม่ให้ความชื้นเข้ามายังเนื้อฉนวนได้

ความเครียดทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และปัจจัยอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำงานของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูง สามารถขยายตัวได้รวดเร็วขึ้น ปรากฏการณ์ Water Treeing เกิดขึ้นได้ 2 แบบคือการเกิดจากภายในของตัวสารกึ่งตัวนำออกสู่ภายนอกและเกิดจากภายนอกสารกึ่งตัวนำเข้าสู่ภายใน



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.17 การเกิดปรากฏการณ์ Water Treeing ในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง

(ก) การเกิดจากภายในสู่ภายนอก

(ข) การเกิดจากภายนอกสู่ภายใน

การเกิดปรากฏการณ์ Water Treeing เป็นหนึ่งในกลไกความผิดพร่องที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลไฟฟ้าขนาดแรงดันไฟฟ้ากลางและสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินหรือสายเคเบิลใต้น้ำควรทำการป้องกันเป็นพิเศษ ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ควรสามารถป้องกันการเกิด Water Treeing ได้