บทที่ 3

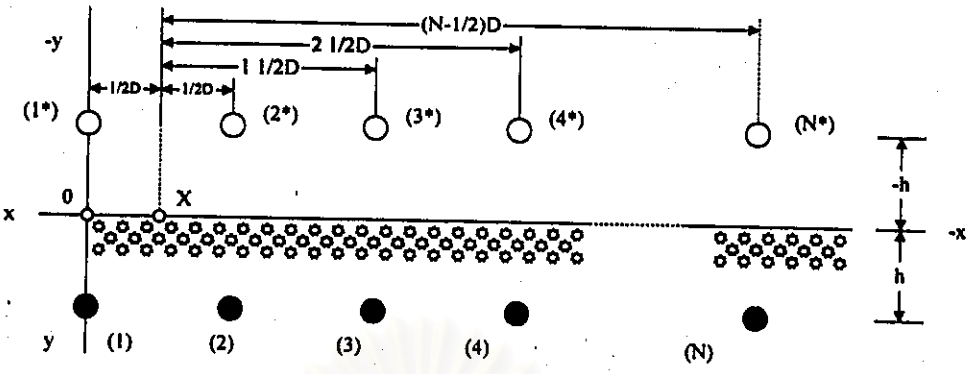
ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน ของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินในอดีตนั้น ใช้ค่าความต้านทานของโครงตาข่ายเป็นตัวกำหนดว่าระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินนั้นใช้ได้หรือไม่ แต่พบว่าไม่สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับ มนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ภายใน และบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้ ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าหาหลักเกณฑ์ในการออกแบบใหม่ จนในที่สุดพบว่าการใช้ศักดาไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินมีความเหมาะสมกว่า และได้พัฒนาต่อมาจนเป็นระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน ดังเช่นปัจจุบันนี้

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบ และการคำนวณหาการกระจายแรงดันบนผิวดินของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินทีมีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน และแผนผังการออกแบบ

3.1 การคำนวณหาการกระจายแรงดันบนผิวดิน

ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันนั้น สมมุติให้การถระจายกระแสจากลวดตัวนำลงสู่ดินมีความสม่ำเสมอ และระยะห่างระหว่างตัวนำที่วางขนานกันมีค่าเท่ากัน โดยอาศัย Recursive Point by Point Integration Method สามารถคำนวณหาแรงดันในแนวนอนระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ ได้ โดยการอินทิเกรตเกรเดียนที่เกิดขึ้นบนผิวดินตลอดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย เมื่อเกิดการผิดพร่อง ดังสมการ [18]และดังรูปที่ 3.1 [1]



รูปที่ 3.1 ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของเมชบริเวณมุมของโครงตาข่ายการต่อลงดิน กับลวดตัวนำที่วางขนานกัน และลวดตัวนำเสมือน

$$G(x) = \frac{\rho i}{\pi}\left[\frac{x}{x^2+h^2} + \frac{D(1)-x}{\left(D(1)-x\right)^2+h^2} + \frac{D(1)+D(2)-x}{\left(D(1)+D(2)-x\right)^2+h^2} + \cdots\right] \tag{3.1}$$

โดยที่ G(x) คือ เกรเดียนที่เกิดขึ้น ณ. X ใดๆ

r คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)

i คือ กระแสโครงตาข่ายต่อหน่วยความยาว (A/m)

x คือ ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุด x (m)

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายการต่อลงดินจากผิวดิน (m)

D(0) = 1 m

D(1) คือ ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 (m)

D(2) คือ ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเส้นที่ 2 และเส้นที่ 3 (m)

$$\left[E_x\right]_{x_1}^{x_2} = \frac{\rho i}{\pi}\int_{x_1}^{x_2} G(x)dx \tag{3.2}$$

$$\left[E_x\right]_{x_1}^{x_2} = \frac{\rho i}{\pi}\left[\sum_{j=1}^{n-1}\frac{\sum_{k=0}^{j-1} D(k)-x}{\left[\sum_{k=0}^{j-1} D(k)-x\right]^2+h^2}\right]\Delta x + c \Bigg|_{x_1}^{x_2} \tag{3.3}$$

โดยที่ $[E_x]_{x_1}^{x_2}$ คือ ความต่างศักย์ในแนวนอนระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ

r คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)

i คือ กระแสโครงตาข่ายต่อหน่วยความยาว (A/m)

x คือ ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุด x (m)

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายการต่อลงดินจากผิวดิน (m)

D(k) คือ ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเส้นที่ k และเส้นที่ k+1 (m)

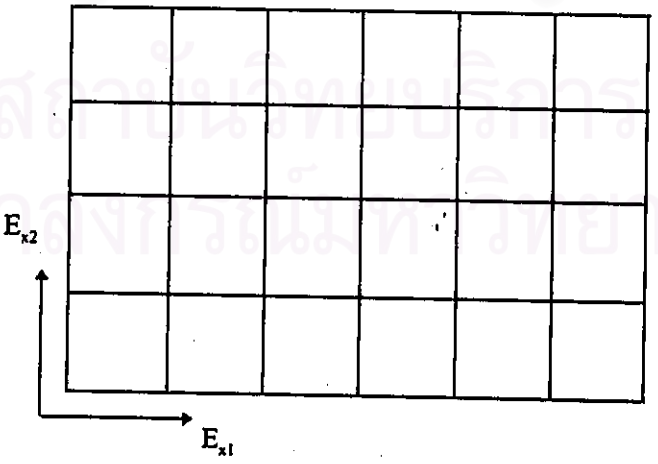
$\Delta x + c$ คือ ช่วงย่อยจาก x_1 ถึง x_2

n คือ จำนวนลวดตัวนำ

แต่เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำมีค่าเท่ากันทุกช่วง ดังนั้นสมการ 3.3 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$[E_x]_{x_1}^{x_2} = \frac{\rho i}{\pi}\left[\frac{(j-1)D-x}{\left[(j-1)D-x\right]^2+h^2}\right]_{x_1}^{x_2}\Delta x + c \qquad (3.4)$$

เมื่อมองจากด้านบนเหนือผิวดิน พบว่าแกนแนวนอนมี 2 ทิศทาง ดังนั้น ความต่างศักย์ในแนวนอนระหว่างจุด x_1 และx_2 ใดๆ จึงต้องพิจารณาทั้ง 2 ทิศทาง ดังรูป3.2

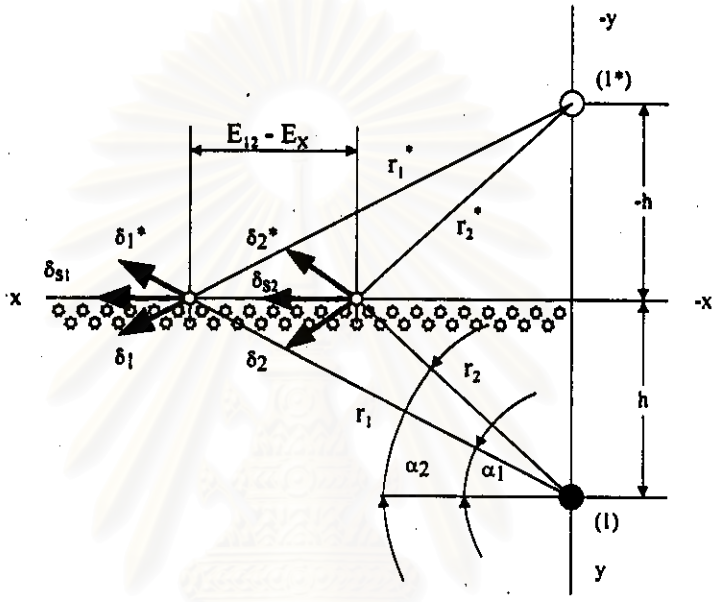


รูปที่ 3.2 ภาพโครงตาข่ายจากด้านบน

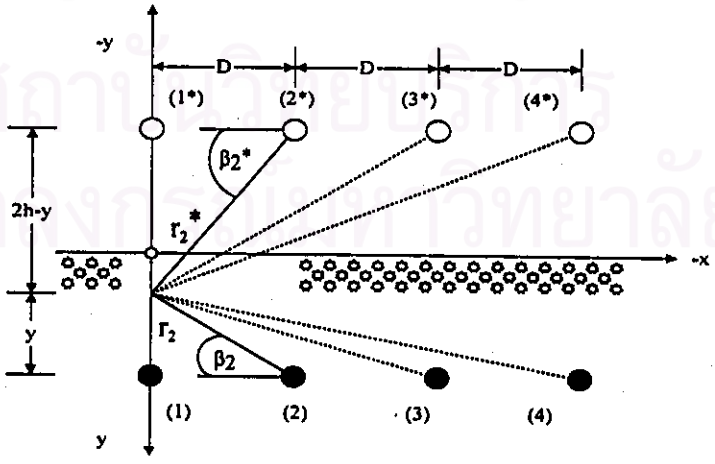
I 17599660

พิจารณาในแนวดิ่ง โดยพิจารณาถึงการสะท้อนของการกระจายกระแสกับผิวดิน จึงเสมือนว่ามีลวดตัวนำเสมือน (image) วางอยู่เหนือพื้นดิน h เมตร ดังรูปที่3.3 และเมื่อพิจารณาตัวนำจำนวน k เส้น ดังรูปที่ 3.4 สามารถคำนวณค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งได้ดังสมการ [1]

$$E_y(k) = C\int\frac{1}{r_k}dr + C\int\frac{1}{r_k^*}dr \qquad (3.5)$$



รูปที่ 3.3 รูปเรขาคณิตสำหรับการพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวนอนของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน



รูปที่ 3.4 รูปเรขาคณิตสำหรับการพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน

จากรูปที่ 3.4 ค่า r_k และ r_k^* สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$r_k = \sqrt{y^2 + (k-1)^2 D^2} \tag{3.6}$$

โดยที่ $dy = dr(\sin\beta_k) = \frac{y}{r_k} dy$

$$C = \frac{\rho i}{2\pi}$$

$$r_k^* = \sqrt{(2h-y)^2 + (k-1)^2 D^2} \tag{3.7}$$

โดยที่ $dy = -dr^*(\sin\beta_k^*) = \frac{(y-2h)}{r_k^*} dy$

เพราะฉะนั้น สมการ 3.5 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E_y(k) = \frac{\rho i}{2\pi} \int_{\frac{1}{2}d}^{h} \frac{y\,dy}{y^2 + (k-1)D^2} + \frac{\rho i}{2\pi} \int_{\frac{1}{2}d}^{h} \frac{(y-2h)\,dy}{(2h-y)^2 + (k-1)^2 D^2}$$

$$= \frac{\rho i}{4\pi} \ln\left\{\left[\frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + \frac{1}{4}d^2}\right] \cdot \left[\frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + \left(2h - \frac{1}{2}d\right)^2}\right]\right\} \tag{3.8}$$

พิจารณา ณ. จุดใดๆ ความต่างศักย์ในแนวดิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_y(k) = \frac{\rho i}{4\pi} \ln\left\{\left[\frac{((k-1)D-x)^2 + h^2}{((k-1)D-x)^2 + \frac{1}{4}d^2}\right] \cdot \left[\frac{((k-1)D-x)^2 + h^2}{((k-1)D-x)^2 + \left(2h - \frac{1}{2}d\right)^2}\right]\right\} \tag{3.9}$$

โดยที่ $E_y(k)$ คือ ความต่างศักย์ในแนวดิ่ง เมื่อพิจารณาลวดตัวนำเส้นที่ k (V)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)

i คือ กระแสโครงตาข่ายต่อหน่วยความยาว (A/m)

D คือ ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำที่วางขนานกัน (m)

x คือ ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุด x (m)

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (m)

ความต่างศักย์ในแนวดิ่งระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\left[E_y\right]_{x_1}^{x_2} = \sum_{k=1}^{n}\left[E_y(k)\right]_{x_1}^{x_2} \qquad (3.10)$$

เนื่องจากการจัดวางลวดตัวนำในแนนอนมี 2 ทิศทาง เกิดความต่างศักย์ในแนวนอน 2 ค่า คือ E_{x1} และ E_{x2} ดังนั้นความต่างศักย์ในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นจึงมี 2 ค่า ด้วย คือ Ey_1 และ E_{y2}

ขนาดของความต่างศักย์ระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$[E]_{x_1}^{x_2} = \sqrt{\left(E_{x_1}\right)^2+\left(E_{x_2}\right)^2+\left(E_{y_1}+E_{y_2}\right)^2} \qquad (3.11)$$

3.2 การออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย

การออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันนี้ จะอ้างอิงกับ IEEE. Guide for Safety in AC Substation Grounding [1]

3.2.1 ขั้นที่ 1 จัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของสถานีไฟฟ้าย่อย

3.2.1.1 สำรวจความกว้าง และความยาวของสถานีไฟฟ้าย่อย

3.2..1.2 วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

3.2.2 ขั้นที่ 2 คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำที่เล็กที่สุด จากสมการที่ 2.21

3.2.3 ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

3.2.3.1 สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม จากสมการที่ 2.17 และ 2.18

3.2.3.2 สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม จากสมการที่ 2.19 และ 2.20

3.2.4 ขั้นที่ 4 ออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดิน

3.2.4.1 กำหนดความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน โดยควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.25-2.5 เมตร

3.2.4.2 กำหนดความหนาของหินกรวด โดยควรอยู่ในช่วง 0.08-0.15 เมตร

3.2.4.3 กำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำที่วางขนานกัน โดยควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร

3.2.5 ขั้นที่ 5 คำนวณค่าความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

3.2.5.1 เมื่อลวดตัวนำวางลึกจากผิวดินน้อยกว่า 0.25 m จากสมการที่ 2.24

3.2.5.2 เมื่อลวดตัวนำวางลึกจากผิวดินในช่วง 0.25 - 2.5 m จากสมการที่ 2.25

3.2.6 ขั้นที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสโครงตาข่ายการต่อลงดิน จากสมการที่ 2.26 หรือ 2.28

3.2.7 ขั้นที่ 7 คำนวณหาค่า GPR จากสมการที่ 2.29

3.2.7.1 ถ้า GPR น้อยกว่า E_{touch} แสดงว่าระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นใช้ได้ สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งภายใน และบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้ เสร็จสิ้นการออกแบบหรืออาจเพิ่มแท่งดินตามจุดต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อเพิ่มความปลอดภัย

3.2.7.2 ถ้า GPR มากกว่า E_{touch} แสดงว่า ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นอาจใช้ไม่ได้ ต้องพิจารณาศักดาไฟฟ้าเมช และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป

3.2.8 ขั้นที่ 8 คำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าเมช และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย จากสมการที่ 2.30 และ 2.31

3.2.9 ขั้นที่ 9 พิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าเมชที่คำนวณได้

3.2.9.1 ถ้าศักดาไฟฟ้าเมชน้อยกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ต้องพิจารณาศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวในขั้นที่ 10 ต่อไป

3.2.9.2 ถ้าศักดาไฟฟ้าเมชมากกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบนั้นใช้ไม่ได้ ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่ โดยกลับไปสู่ขั้นที่ 4 อีกครั้ง

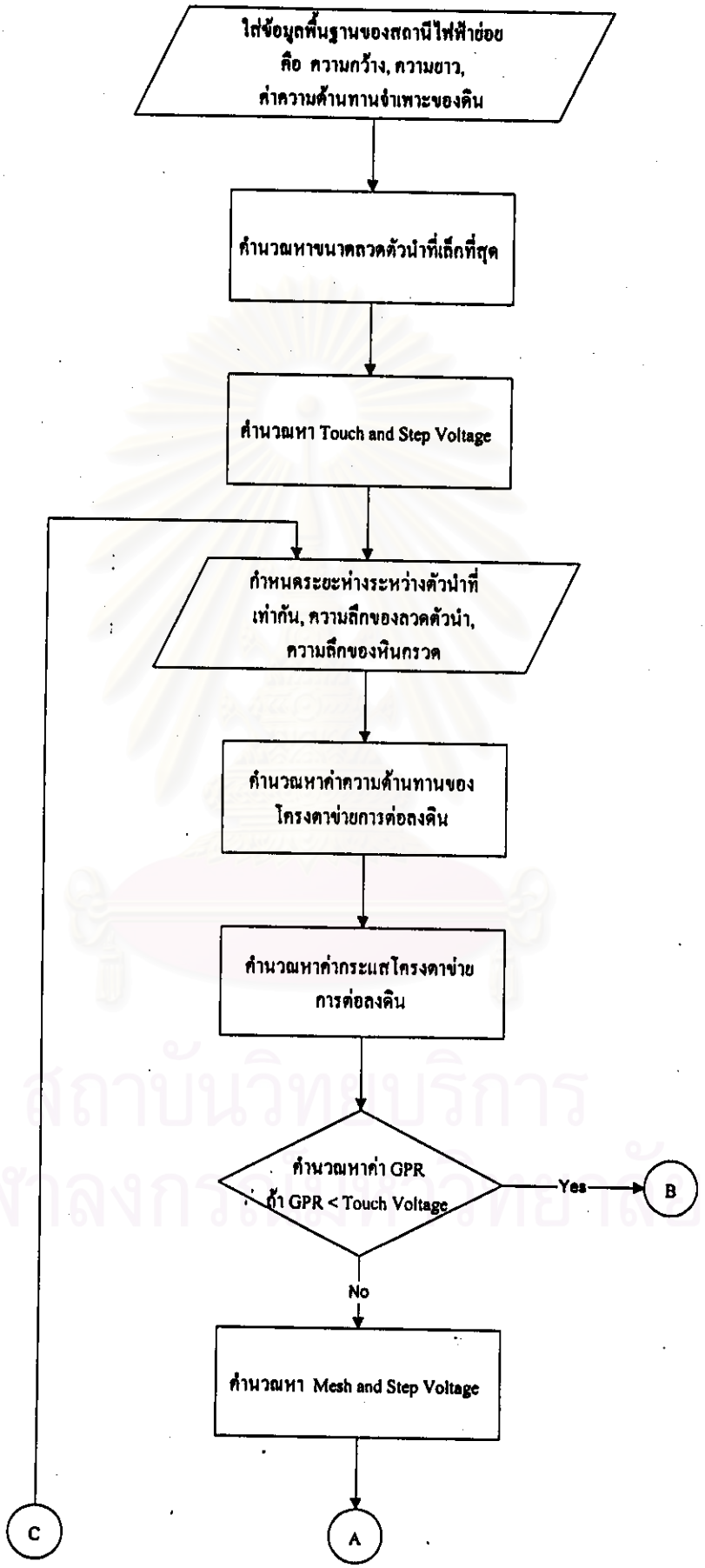
3.2.10 ขั้นที่ 10 พิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้

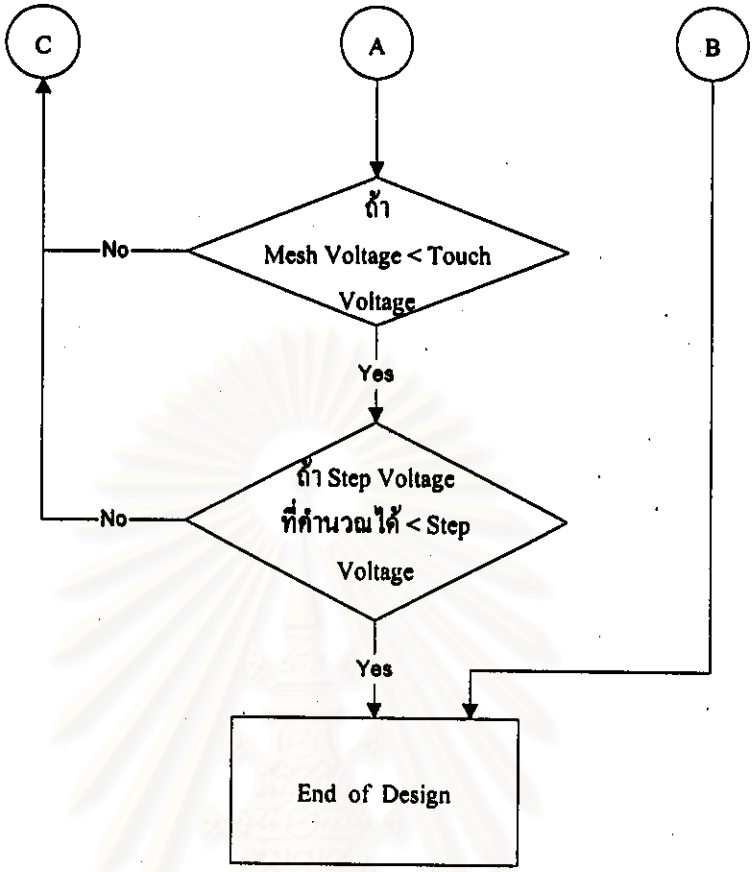
3.2.10.1 ถ้าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นใช้ได้ สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งภายใน และบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้ เสร็จสิ้นการออกแบบ หรืออาจเพิ่มแท่งดินตามจุดต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อเพิ่มความปลอดภัย

3.2.10.2 ถ้าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบนั้นใช้ไม่ได้ ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่ โดยกลับไปสู่ขั้นที่ 4 อีกครั้ง

ขั้นตอนในการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย สามารถแสดงได้ด้วยแผนผังการออกแบบ ดังรูปที่ 3.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ใส่ข้อมูลพื้นฐานของสถานีไฟฟ้าย่อย
คือ ความกว้าง, ความยาว,
ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
คำนวณหาขนาดลวดตัวนำที่เล็กที่สุด
คำนวณหา Touch and Step Voltage
กำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำที่
เท่ากัน, ความลึกของลวดตัวนำ,
ความลึกของหินกรวด
คำนวณหาค่าความต้านทานของ
โครงตาข่ายการต่อลงดิน
คำนวณหาค่ากระแสโครงตาข่าย
การต่อลงดิน
คำนวณหาค่า GPR
ถ้า GPR < Touch Voltage
Yes
B
No
คำนวณหา Mesh and Step Voltage
C
A



รูปที่ 3.5 แผนผังการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดิน ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย