บทที่ 4

ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน ของสถานีไฟฟ้าย่อย

วิธีปฏิบัติที่ผ่านมา การออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นใช้ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน ซึ่งเป็นการสมมุติให้ การกระจายกระแสจากลวดตัวนำลงสู่ดินสม่ำเสมอ ในขณะที่จริงๆ แล้วพบว่า บริเวณรอบนอกของโครงตาข่ายจะมีกระแสรั่วไหล (leakage current) มาก และลดหลั่นลงมาเรื่อยๆ จนถึงจุดศูนย์กลางของโครงตาข่าย ดังนั้นจึงมีการพยายามค้นคว้าถึงผลของการกระจายกระแสจากลวดตัวนำลงสู่ดินไม่สม่ำเสมอ เรื่อยมา

Dawalibi. F และ D. Mukhedkar [19] ได้เสนอวิธีการหาการกระจายกระแสที่ไม่สม่ำเสมอในรูปของตัวประกอบการกระจายความหนาแน่นกระแส (Current Density Distribution Factor)

Heppe. R.H [20] ได้พิจารณาถึงการกระจายกระแสไม่สม่ำเสมอโดยพิจารณาว่าถึงแม้ปกติลวดตัวนำจะมีศักดาไฟฟ้าเกือบเท่ากันตลอดสายตัวนำ แต่การกระจายกระแสไม่สม่ำเสมอจากลวดตัวนำลงสู่ดินนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของความใกล้ชิดกัน (Proximity Effect) ของลวดตัวนำที่วางขนาน หรือตั้งฉากกัน

และได้มีการนำผลของการกระจายกระแสไม่สม่ำเสมอนี้มาใช้ในการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดย J.G. Sverak [18] ซึ่งใช้ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน แต่ก็ยังไม่สามารถกำหนดวิธีออกแบบที่แน่นอนได้

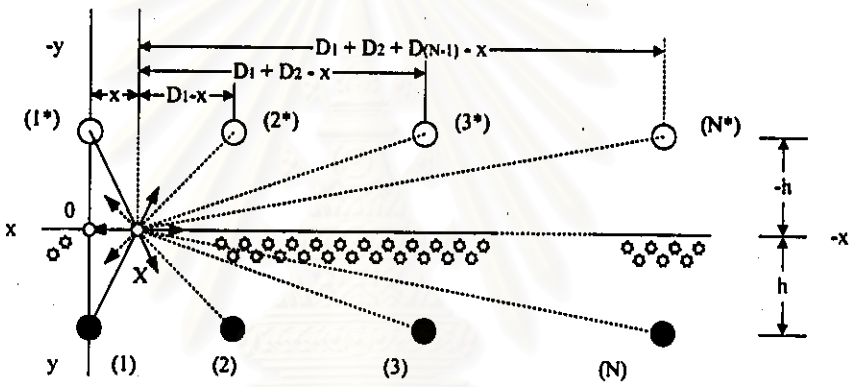
ในที่สุด L.Huang X.Chen และ H.Yen [21] ได้พัฒนาการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาถึงผลของการกระจายกระแสไม่สม่ำเสมอจากลวดตัวนำลงสู่ดินขึ้น

ดังนั้นในบทนี้ จะกล่าวถึง การออกแบบ และการคำนวณหาการกระจายแรงดันบนผิวดินของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน และแผนผังการออกแบบ

4.1 การคำนวณหาการกระจายแรงดันบนผิวดิน

ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันนี้ เป็นการพิจารณาถึงผลของการกระจายกระแสไม่สม่ำเสมอจากลวดตัวนำลงสู่ดิน โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน แต่มีความสมมาตรกันทั้งด้านซ้าย-ขวา และด้านบน-ล่าง

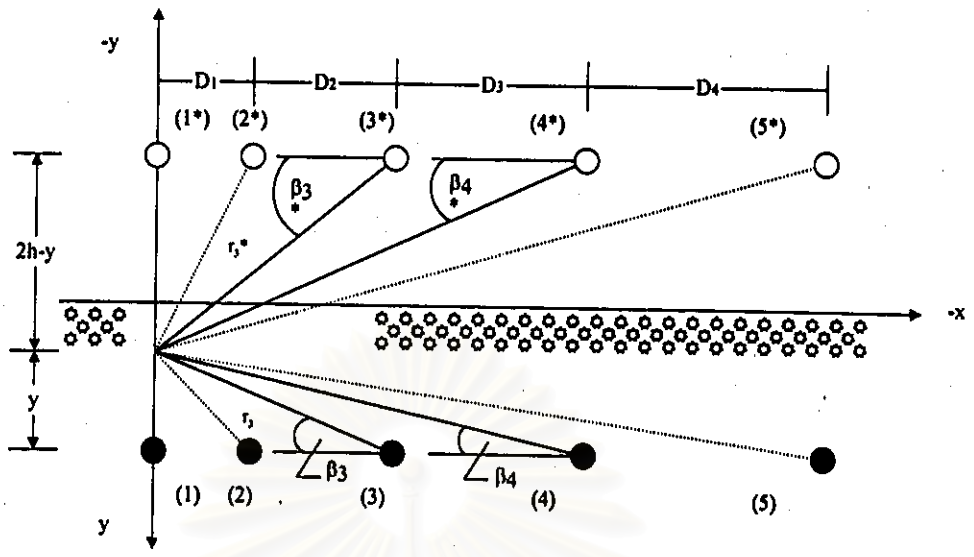
ในทำนองเดียวกันกับระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน โดยอาศัย Recursive Point by Point Integration Method สามารถคำนวณหาความต่างศักย์ในแนวนอนระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ ได้โดยการอินทิเกรตเกรเดียนที่เกิดขึ้นบนผิวดินตลอดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ ดังสมการที่ 3.3 และดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปเรขาคณิตสำหรับการพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวนอนของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน

และเมื่อมองจากด้านบนเหนือผิวดินของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันเช่นเดียวกับรูปที่ 3.2 ความต่างศักย์ในแนวนอนระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ ที่ต้องพิจารณาจึงมี 2 ค่า คือ $\left[E_{x_1}\right]_{x_1}^{x_2}$ และ $\left[E_{x_2}\right]_{x_1}^{x_2}$

เมื่อพิจารณาในแนวดิ่ง โดยคำนึงถึงการสะท้อนของการกระจายกระแส และลวดตัวนำเสมือน สามารถคำนวณค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งได้ ดังสมการ และรูป 4.2



รูปที่ 4.2 รูปเรขาคณิตสำหรับการพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน

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

จากรูปที่ 4.2 พิจารณาลวดตัวนำเส้นที่ 2 และ 2* พบว่า

$$r_2 = \sqrt{y^2+(D(1))^2}$$

โดยที่ $dy = dr(\sin\beta_2) = \frac{y}{r_2}dy$

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

$$r_2^* = \sqrt{(2h-y)^2+(D(1))^2}$$

โดยที่ $dy = -dr^*(\sin\beta_2^*) = \frac{(y-2h)}{r_2^*}dy$

ในทำนองเดียวกัน พิจารณาลวดตัวนำเส้นที่ 3 และ 3* พบว่า

$$r_3 = \sqrt{y^2 + (D(1) + D(2))^2}$$

โดยที่ $dy = dr(\sin\beta_3) = \frac{y}{r_3}dy$

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

$$r_3^* = \sqrt{(2h-y)^2 + (D(1) + D(2))^2}$$

โดยที่ $dy = -dr^*(\sin\beta_3^*) = \frac{(y-2h)}{r_3^*}dy$

เพราะฉะนั้นเมื่อพิจารณาเส้นที่ k จะได้

$$r_k = \sqrt{y^2 + \left(\sum_{j=1}^{k-1} D(j)\right)^2}$$

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

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

$$r_k^* = \sqrt{(2h-y)^2 + \left(\sum_{j=1}^{k-1} D(j)\right)^2}$$

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

เพราะฉะนั้นความต่างศักย์ในแนวดิ่งสามารถหาได้จากสมการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

$$= \frac{\rho i}{4\pi}\ln\left\{\left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)\right)^2+h^2}{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)\right)^2+\frac{1}{4}d^2}\right]\cdot\left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)\right)^2+h^2}{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)\right)^2+\left(2h-\frac{1}{2}d\right)^2}\right]\right\} \quad (4.1)$$

พิจารณา ณ. จุดใดๆ ความต่างศักย์ในแนวดิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_y(k) = \frac{\rho i}{4\pi}\ln\left\{\left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)-x\right)^2+h^2}{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)-x\right)^2+\frac{1}{4}d^2}\right]\cdot\left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)-x\right)^2+h^2}{\left(\sum_{j=1}^{k-1}D(j)-x\right)^2+\left(2h-\frac{1}{2}d\right)^2}\right]\right\} \quad (4.2)$$

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

r คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)

i คือ กระแสโครงตาข่ายต่อหน่วยความยาว (A/m)

D(j) คือ ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเส้นที่ j และ (j+1) (m)

x คือ ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุด x (m)

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

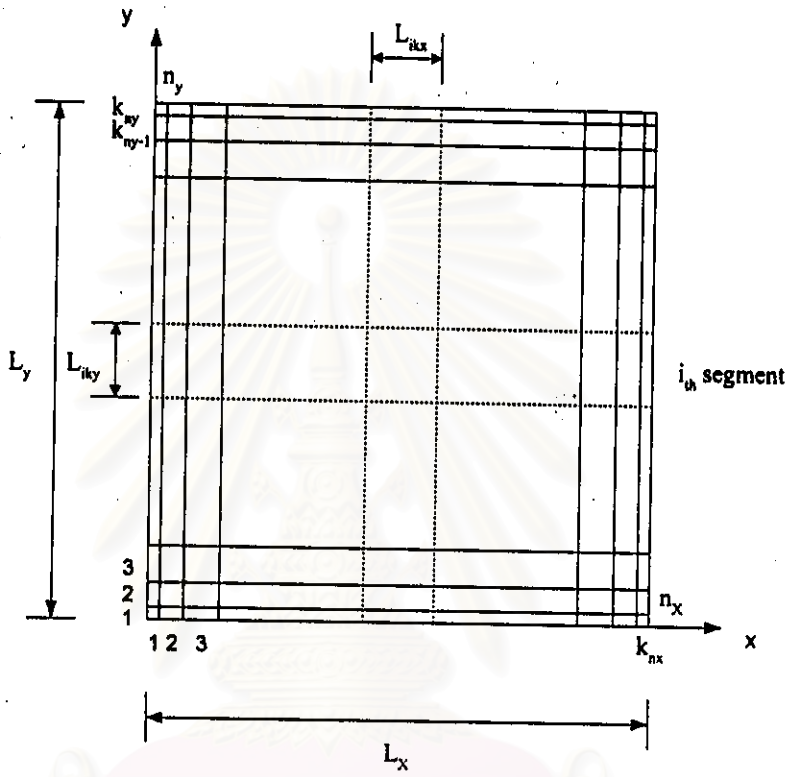
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (m)

ความต่างศักย์ในแนวดิ่งระหว่างจุด x_1 และ x_2 ใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.10

เนื่องจากการจัดวางลวดตัวนำในแนวนอนมี 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 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11

การออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันนั้น สิ่งสำคัญ คือ การกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำ ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่การออกแบบจริง จะพิจารณาหลักการ และสมการที่ใช้ในการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำก่อน ดังรูปที่ 4.3 [21]



รูปที่ 4.3 การกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำของ
ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน

พิจารณารูปที่ 4.3

L_x , L_y คือ ความยาวของโครงตาข่ายในแกน x และ แกน y ตามลำดับ (m)

n_x คือ จำนวนลวดตัวนำที่วางตั้งฉากกับแกน x

n_y คือ จำนวนลวดตัวนำที่วางตั้งฉากกับแกน y

k_x คือ จำนวนช่องทั้งหมดในแกน x

k_y คือ จำนวนช่องทั้งหมดในแกน y

ดังนั้น $k_x = n_x - 1$ และ $k_y = n_y - 1$

i คือ ลำดับที่ของช่อง

L_{ik} คือ ความยาวของของช่องย่อย (m)

จะพบว่าระยะห่างของลวดตัวนำจะขึ้นกับจำนวนช่อง (k_x หรือ k_y) ลำดับที่ของช่องย่อย (i) และความยาวของโครงตาข่าย (L_x หรือ L_y) ถ้าโครงตาข่ายถูกแบ่งเป็น k ช่อง ความยาวของช่องย่อยที่ i มีค่าเท่ากับ L_{ik} ถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวทั้งหมดของโครงตาข่ายในด้านนั้น L จะได้ว่า

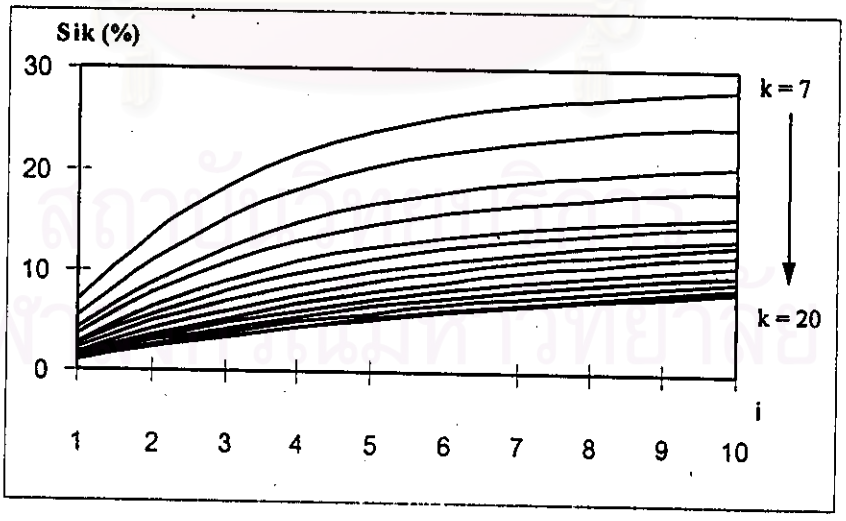
$$S_{ik} = \frac{L_{ik}}{L} \times 100\% \qquad (4.3)$$

เมื่อจัดเข้าสู่ระบบจำนวนนับที่มีความสมมาตรกันของโครงตาข่าย

$$i = \begin{cases} \frac{k}{2} & \text{เมื่อ k เป็นจำนวนคู่} \\ \frac{k+1}{2} & \text{เมื่อ k เป็นจำนวนคี่} \end{cases} \qquad (4.4)$$

โดยที่ L คือ L_x หรือ L_y และ k คือ k_x หรือ k_y ขึ้นอยู่กับลวดตัวนำว่าตั้งฉากกับแกนใด เช่น ถ้าพิจารณา k_x ดังนั้น L จะเป็น L_x

ดังนั้นระยะห่างของขดลวดตัวนำ L_{ik} สามารถคำนวณค่าได้ถ้ารู้ค่าของ S_{ik} ซึ่ง S_{ik} และ i มีความสัมพันธ์กับจำนวนช่องของโครงตาข่าย ดังรูปที่4.4 [21]

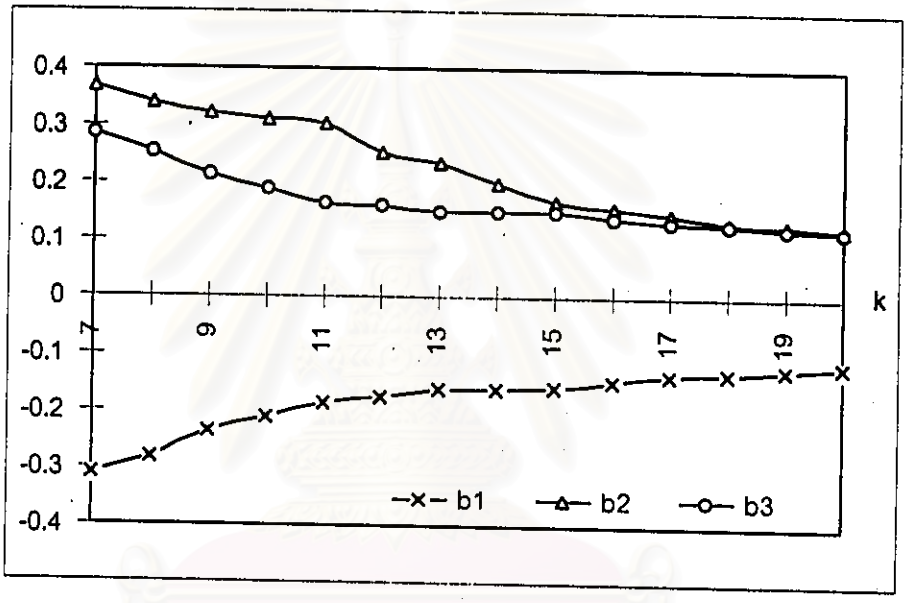


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์
ระยะห่างของช่องย่อยกับลำดับที่ของช่องย่อย และจำนวนช่องตัวนำ

ด้วย Least Square Curve Fitting Method สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง S_{ik} กับ i ได้ดังนี้

$$S_{ik} = b_1 e^{-b_2 i} + b_3 \qquad (4.5)$$

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์ b_1 b_2 และ b_3 ในสมการที่ 4.4 มีความสัมพันธ์กับค่า k ดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1 [21]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมพันธ์ระหว่าง
ค่าสัมประสิทธิ์ b และจำนวนช่องของตัวนำ (k)

ตารางที่4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง
ค่าสัมประสิทธิ์ b และจำนวนช่องของตัวนำ (k)

k	b_1	b_2	b_3
7	-0.312	0.369	0.287
8	-0.281	0.339	0.254
9	-0.237	0.322	0.214
10	-0.211	0.312	0.191

ตารางที่4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง
ค่าสัมประสิทธิ์ b และจำนวนช่องของตัวนำ (k) (ต่อ)

k	b_1	b_2	b_3
11	-0.185	0.304	0.165
12	-0.175	0.255	0.162
13	-0.162	0.234	0.151
14	-0.161	0.199	0.150
15	-0.158	0.167	0.149
16	-0.146	0.157	0.139
17	-0.136	0.146	0.131
18	-0.132	0.133	0.127
19	-0.126	0.127	0.121
20	-0.119	0.112	0.117

4.2 การออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย [21]

4.2.1 ขั้นที่ 1 จัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของสถานีไฟฟ้าย่อย

4.2.1.1 สำรวจความกว้าง และความยาวของสถานีไฟฟ้าย่อย

4.2..1.2 วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

4.2.2 ขั้นที่ 2 คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำที่เล็กที่สุด จากสมการที่ 2.21

4.2.3 ขั้นที่3 คำนวณหาศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม จากสมการที่ 2.19

4.2.4 ขั้นที่ 4 คำนวณหาความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน จากสมการ

$$l = \frac{\eta \rho I}{E_{touch\ 70}} \qquad (4.6)$$

โดยที่ l คือ ความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน (m)

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.7

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)

I คือ กระแสผิดพร่องสูงสุดเป็นค่า rms. (A)

$E_{touch\ 70}$ คือ ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักประมาณ 70 กิโลกรัม (V)

η คือ สัมปรสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.7

4.2.5 ขั้นที่ 5 คำนวณหาลวดตัวนำทั้งหมดของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน

4.2.5.1 ถ้าโครงตาข่ายการต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$n = \frac{1}{\sqrt{A}} \qquad (4.7)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของโครงตาข่าย (m^2)

4.2.5.2 ถ้าโครงตาข่ายการต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$n_x = \frac{l + L_y - L_x}{2L_y} \quad , \quad n_y = \frac{l - L_x + L_y}{2L_x}$$

$$n = n_x + n_y \qquad (4.8)$$

โดยที่ L_x , L_y คือ ระยะทางของโครงตาข่ายตามแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ (m)

n_x , n_y คือ จำนวนลวดตัวนำของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันที่ตั้งฉากกับแกน x และแกน y ตามลำดับ

n คือ จำนวนลวดตัวนำทั้งหมดของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน.

4.2.6 ขั้นที่ 6 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ที่ช่วยประหยัดการใช้วัสดุในการก่อสร้างระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน จากสมการ

$$\lambda = \frac{\alpha \frac{\beta}{100}}{1+\alpha \frac{\beta}{100}} \times 100\% \qquad (4.9)$$

โดยที่ λ คือ เปอร์เซ็นต์ที่ช่วยประหยัดการใช้วัสดุในการก่อสร้างระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน

α, β คือ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งขึ้นกับจำนวนทั้งหมดของลวดตัวนำ ดังสมการ

$$\alpha = \begin{cases} 121.2e^{-0.4n} + 1.4864 & \text{สำหรับ } 8 \le n \le 20 \\ 121.2e^{-0.3n} + 1.2664 & \text{สำหรับ } 20 < n \le 30 \\ 121.2e^{-0.4n} + 1.1400 & \text{สำหรับ } n > 30 \end{cases} \qquad (4.10)$$

$$\beta = -92.6e^{-0.07n} + 66.337 \qquad (4.11)$$

4.2.7 ขั้นที่ 7 คำนวณหาลวดตัวนำทั้งหมดของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน

4.2.7.1 ถ้าโครงตาข่ายการต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$n' = n(1-\lambda)$$
$$n_x' = n_y' = \frac{n'}{2} \qquad (4.12)$$

4.2.7.2 ถ้าโครงตาข่ายการต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$n_x' = n_x(1-\lambda)$$
$$n_y' = n_y(1-\lambda)$$

$$n' = n_x' + n_y' \quad (4.13)$$

โดยที่ n_x' คือ จำนวนลวดตัวนำของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันที่ตั้งฉากกับแกน x

n_y' คือ จำนวนลวดตัวนำของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันที่ตั้งฉากกับแกน y

n' คือ จำนวนลวดตัวนำทั้งหมดของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากัน

4.2.8 ขั้นที่ 8 คำนวณหาระยะห่างระหว่างตัวนำ จากสมการที่ 4.3 และ 4.5

4.2.9 ขั้นที่ 9 คำนวณหาความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย จากสมการ

4.2.9.1 เมื่อลวดตัวนำวางลึกจากผิวดินน้อยกว่า 0.25 m จากสมการที่ 2.24

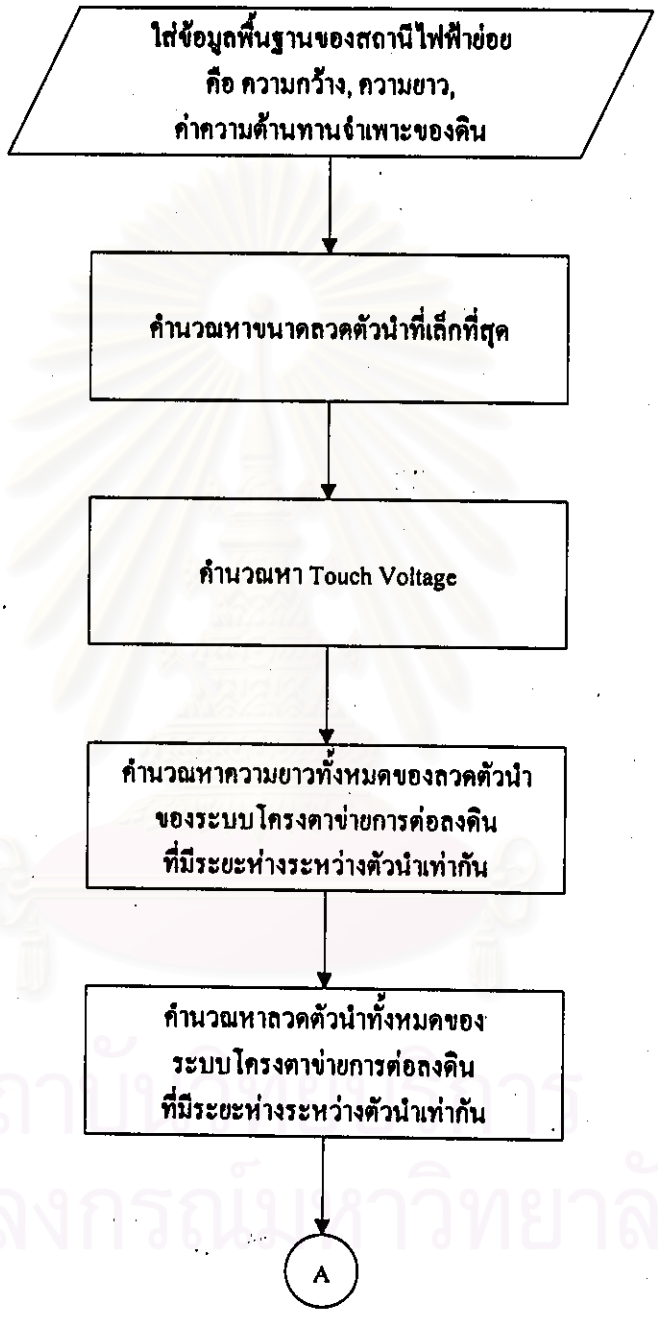
4.2.9.2 เมื่อลวดตัวนำวางลึกจากผิวดินในช่วง 0.25 - 2.5 m จากสมการที่ 2.25

4.2.10 ขั้นที่ 10 คำนวณหาค่ากระแสโครงตาข่ายการต่อลงดิน จากสมการที่ 2.26 หรือ 2.28

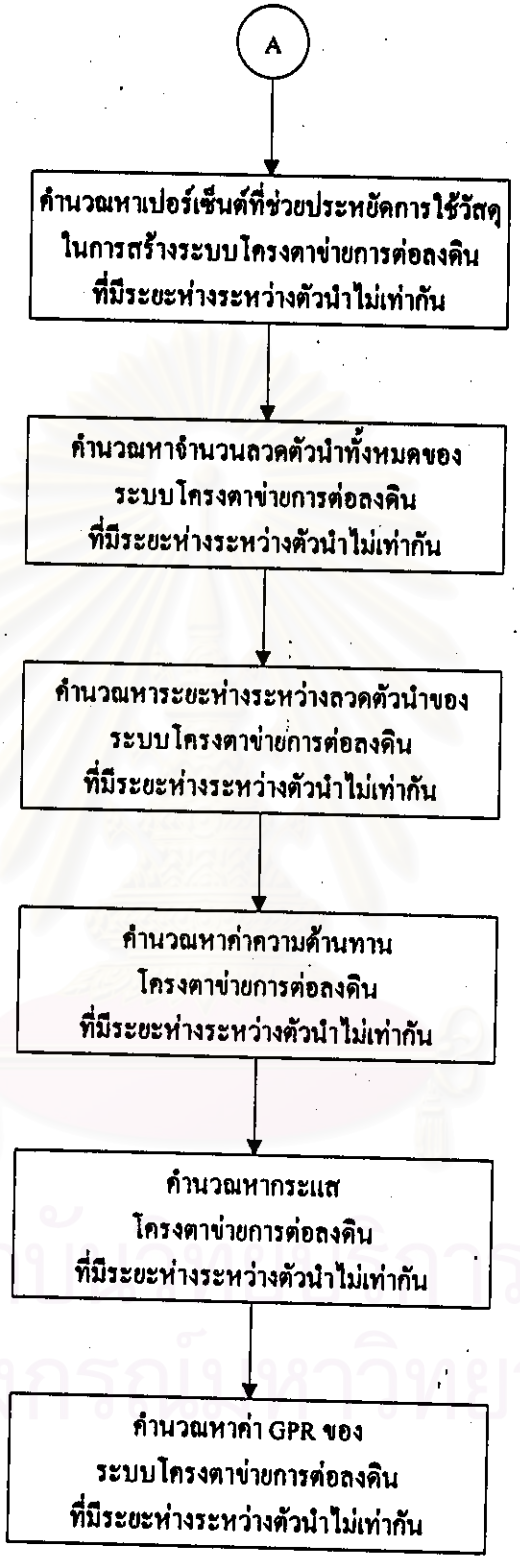
4.2.11 ขั้นที่ 11 คำนวณหาค่า GPR จากสมการที่ 2.29

ขั้นตอนในการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย สามารถแสดงได้ด้วยแผนผังการออกแบบ ดังรูปที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 แผนผังการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดิน
ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย