

# การคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดในดินเนื้อเดียว (Homogeneous earth) และดินสองชั้น (Two-layer earth)

ประดิษฐ์ เฟื่องฟู

วศก. ระดับ 5 แผนกวิจัย กองวิจัย ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า

email : [pradit\\_f@hotmail.com](mailto:pradit_f@hotmail.com) , Tel : 590-5577

## 1. บทนำ

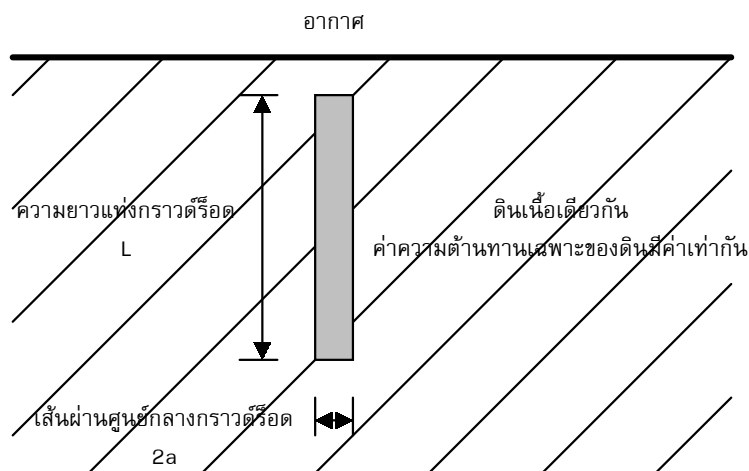
ค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดที่ใช้ในระบบการต่อลงดินของ กฟผ. เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญมากในการออกแบบระบบการต่อลงดินที่มีความปลอดภัยต่อบุคคลและความมั่นคงของระบบส่งจ่ายหรือระบบจำหน่าย กล่าวคือ เมื่อเกิดเฟสฟอสต์ลงดินค่าความต้านทานของดินที่จุดเกิดฟอสต์ต้องมีค่าต่ำเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิด Step voltage หรือ Touch voltage เป็นอันตรายต่อบุคคล ณ. จุดเกิดฟอสต์และบริเวณใกล้เคียง อีกทั้งต้องมีค่าไม่มากจนทำให้ Ground fault relays ที่สถานีฯ ทำงานผิดพลาดไม่สามารถแยกแยะออกได้ว่าเป็นกระแสไหลตหรือกระแสฟอสต์ และถ้าฟ้าผ่าลงสายส่งหรือสายจำหน่ายโดยตรง (Direct stroke) หรือฟ้าผ่าใกล้สายส่งหรือสายจำหน่าย (Nearby stroke) ค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยเกินค่า CFO ของลูกถ้วยและเกิดแฟลชโอเวอร์ได้

ในบทความนี้จะแสดงสูตรการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดในดินเนื้อเดียวและในดินสองชั้นที่เป็น Power frequency grounding และ Impulse grounding เพื่อไว้ใช้อ้างอิงหรือไว้ใช้ประมาณค่าในการออกแบบระบบการต่อลงดินต่อไป

## 2. การคำนวณหาค่าความต้านทาน Power frequency grounding ของแท่งกราวด์รีด

### 2.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดในดินเนื้อเดียว

ดินเนื้อเดียว คือดินที่มีลักษณะของดินเป็นชนิดเดียวกัน เช่น เป็นดินทรายเหมือนกันและชั้นดินลึกมากกว่า 10 เมตร จึงจะกำหนดให้มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากันหมดดังรูปที่ 1 แสดงการปักแท่งกราวด์รีดในดินเนื้อเดียว



รูปที่ 1 แสดงการปักแท่งกราวด์รีดในดินชั้นเดียว

จาก IEEE Std 142 [1] สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีด 1 แท่งที่ปักในดินเนื้อเดียว ( $R_S$ ) ได้ดังนี้

$$R_S = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1 \right] \quad \dots (1)$$

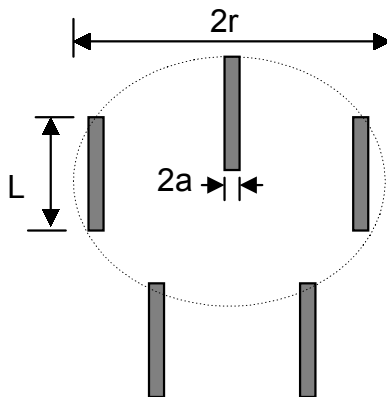
- โดย  $\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว ( $\rho$ -m.)  
 $L$  คือ ความยาวของแท่งกราวด์รีด (m.)  
 $a$  คือ รัศมีของแท่งกราวด์รีด (m.)

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันไปตามตารางที่ 1 ซึ่งมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับความชื้นในเนื้อดิน, อุณหภูมิ, เฟอร์ริซิตีของเกลือที่อยู่ในเนื้อดินและอื่นๆ ดังนั้นในการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดจึงต้องคำนวณหาค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดเพื่อใช้ในการออกแบบระบบการต่อลงดินที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของดินแต่ละชนิด

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะ ( $\Omega.m$ )		
	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด
เถ้า, ดินดาล, ถ่าน	5.9	23.7	70
ดินเหนียว	3.4	40.6	163
ดินเหนียวปนทรายและกรวด	10.2	158	1,350
หินกรวดทรายที่มีเนื้อดินปนอยู่เล็กน้อย	590	940	4,580

โดยทั่วไปค่า  $\rho$  ที่นิยมใช้ในการคำนวณคือ  $100 \Omega-m$  หากใช้แท่งกราวด์รีดของ กฟภ. ที่มีความยาว 2 เมตร เมื่อปักแท่งกราวด์รีดหนึ่งแท่งจะมีค่าความต้านทาน 50 โอห์ม มากกว่าข้อกำหนดของ กฟค. ที่กำหนดให้ไม่เกิน 25 โอห์ม และยังเป็นบริเวณทางภาคตะวันออกซึ่งเป็นพื้นที่ดินทราย ค่า  $\rho$  จะมีค่าประมาณ  $100-600 \Omega.m$  (ข้อมูลจากการไปตรวจวัดของ กวจ.) จึงจำเป็นต้องปักแท่งกราวด์รีดเพิ่มเติม ซึ่งการปักกราวด์รีดจะปักเป็นวงรอบเสา (Rodbed grounding) ดังแสดงในรูปที่ 2 แต่การปักแท่งกราวด์รีดต้องไม่เกิน 5 แท่ง แต่ละแท่งห่างเท่าๆ กัน และระยะห่างต้องไม่ต่ำกว่า 2 เท่าของความยาวแท่งกราวด์รีด



รูปที่ 2 แสดงการปักกราวด์รีดหลายแท่งแบบเป็นวง 5 แท่ง

การคำนวณหาความต้านทานของแท่งกรวดรีดที่ปักเป็นวง (Rodbed resistance) คำนวณได้จาก [2]  
ดังนี้

$$R_t = \left( \frac{R_s}{N} \right) F \quad \dots (2)$$

โดย  $R_t$  คือ ความต้านทานรวมของ Rodbed

$R_s$  คือ ความต้านทานของกรวดรีดหนึ่งแท่งในดินเนื้อเดียวตามสมการที่ (1)

$N$  คือ จำนวนของแท่งกรวดรีด

$F$  คือ แฟคเตอร์การคูณตั้งสมการที่ (3)

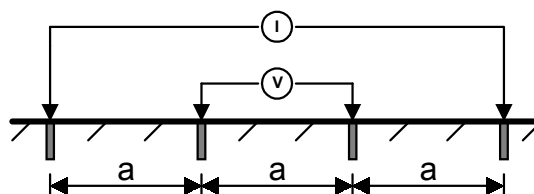
$$F = 1 + \left( N - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \frac{\sqrt{\frac{L}{r} \left[ \left( \frac{1}{2} \right)^3 + \left( \frac{L}{L + \frac{r}{2}} \right)^3 \right]^{1/3}}}{\ln \left( \frac{4L}{a} - 1 \right)} \quad \dots (3)$$

เมื่อ  $r$  คือรัศมีของวงกลมที่มีเส้นรอบวงยาวเท่ากับพื้นที่ของ Rodbed (ดังรูปที่ 2)

ในการปักแท่งกรวดรีดแบบ Rodbed นี้สามารถปักแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (อัตราส่วนด้านทั้งสองของสี่เหลี่ยมผืนผ้าต้องอยู่ระหว่าง 0.5-1.5) ที่มีเส้นรอบวงเท่ากับกรวดแบบวงกลมได้ ซึ่งมีความต้านทานมีความผิดพลาดน้อยกว่า 3% [2]

## 2.2 การคำนวณค่าความต้านทานของแท่งกรวดรีดในดินสองชั้น

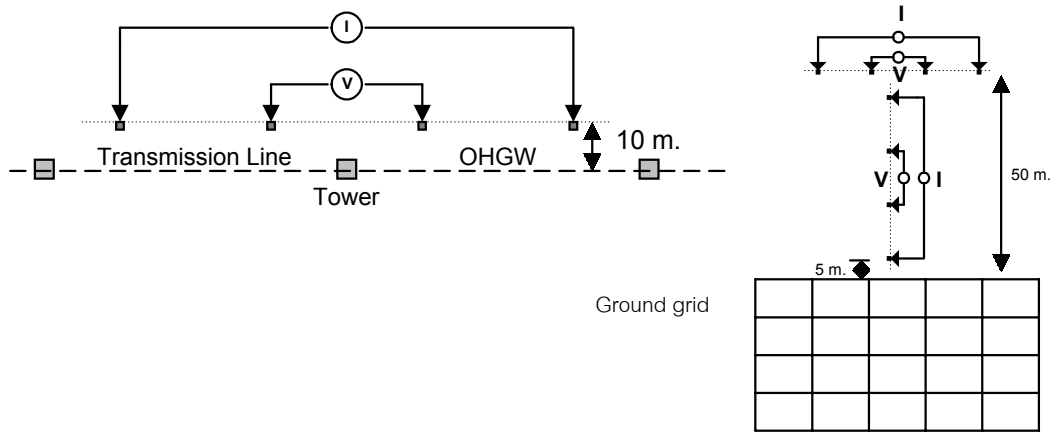
สภาพดินโดยทั่วไปเป็นลักษณะสองชั้น แต่เพื่อความง่ายในการคำนวณจึงสมมติให้เป็นดินเนื้อเดียว ซึ่งบางครั้งพบว่าเมื่อวัดค่าจากเครื่องวัดมีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณสูง นั่นอาจเป็นเพราะไม่ได้เป็นดินเนื้อเดียว ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบชนิดดินว่าเป็นดินชนิดใดโดยใช้วิธีวัดแบบ 4 จุดหรือที่เรียกว่า Wenner Method ซึ่งมีการวัดได้ดังรูปที่ 3 เมื่อวัดค่ามาได้เป็นค่า  $R_w$  ที่ระยะระหว่าง Probe (a) ทั้ง 4 ที่ค่า a ต่างๆ ได้ค่า  $\rho_w = 2\pi a R_w$  แล้วใช้โปรแกรม Cymgrd ของบริษัท Cyme เพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและชั้นล่าง และความลึกของดินชั้นบน



รูปที่ 3 แสดงการวัดแบบ 4 จุด หรือ Wenner Method

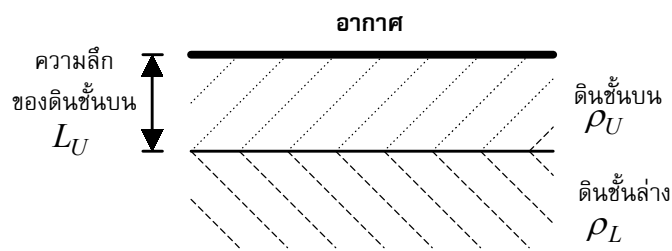
ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินใกล้สายส่งหรือสายจำหน่ายให้ Probe ที่ใช้วัดแรงดันคร่อมอยู่ระหว่างเสาตั้งรูปที่ 4 และให้วัดขนาดกับไลน์มากกว่า 10 เมตร แต่ในกรณีที่มีกรวดกริด (Ground grid) อยู่ใกล้

กับจุดวัดให้วัดตั้งฉากกับกราวด์กริดโดยจุดแรกอยู่ห่างจากกราวด์กริด 5 เมตร แต่ถ้าต้องการได้ค่าที่มีความคลื่อนต่ำกว่านี้ต้องวัดในแนวขนานกับกราวด์กริดและห่างจากกริดมากกว่า 50 เมตร ตาม [3] ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อลดผลของกราวด์ลูป (Ground loop) ของสาย OHGW และกราวด์กริด



รูปที่ 4 แสดงการวัดแบบ 4 จุดเพื่อลดผลกระทบจากกราวด์ลูปและกราวด์กริด

สำหรับแบบจำลองของดินสองชั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5 ประกอบด้วยความต้านจำเพาะของดินชั้นบน ( $\rho_U$ ) ความลึกดินชั้นบน ( $L_U$ ) และความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ( $\rho_L$ )



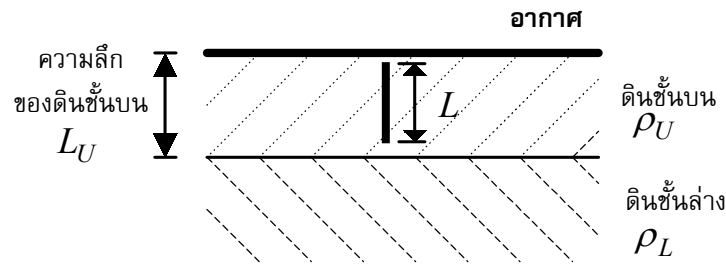
รูปที่ 5 แสดงลักษณะของดินสองชั้น

### 2.2.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดเมื่อปักแท่งกราวด์รีดไม่ทะลุผ่านดินชั้นบน

เมื่อปักแท่งกราวด์รีดในดินสองชั้นไม่ทะลุผ่านดินชั้นบนดังแสดงในรูป 6 สามารถคำนวณหาความต้านทานจำเพาะปรากฏ ( $\rho_D$ ) ของแท่งกราวด์รีดจาก [4,5] ได้ดังนี้

$$\rho_D = \rho_U \left[ 1 + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln \left[ \frac{nL_U + L}{nL_U - L} \right]}{\ln \frac{2L}{a} - 1} \right] \Omega.m \quad \dots (4)$$

โดยที่  $K$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $K = \frac{\rho_L - \rho_U}{\rho_L + \rho_U}$

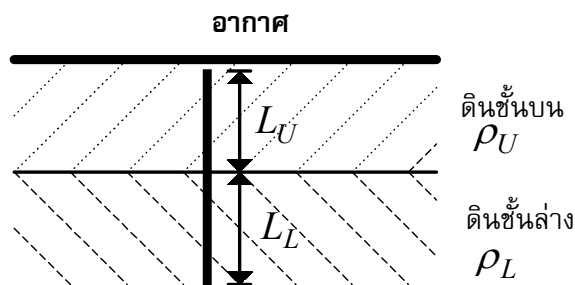


รูปที่ 6 แสดงการปักแท่งกราวด์รีดในดินสองชั้นเมื่อปักแท่งกราวด์รีดไม่ทะลุผ่านดินชั้นบน

การหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดหนึ่งแท่งสามารถหาได้โดยแทนค่า  $(\rho_D)$  ในสมการที่ (4) ลงใน  $\rho$  ของสมการที่ (1) และเมื่อปักแท่งกราวด์รีดแบบหลายแท่งแบบวง (Rodbbed) สามารถหาค่าความต้านทาน Rodbed resistance โดยแทนค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดหนึ่งแท่ง (ที่คำนวณได้จากการแทนสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (1)) ลงในสมการที่ (2)

### 2.2.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดตเมื่อปักแท่งกราวด์รีดทะลุผ่านดินชั้นบน

เมื่อปักแท่งกราวด์รีดในดินสองชั้นทะลุผ่านดินชั้นบน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงการปักแท่งกราวด์รีด ในดินสองชั้นเมื่อปักแท่งกราวด์รีดทะลุผ่านดินชั้นบน

จากสมการที่ (3) เป็นการคำนวณ F แฟคเตอร์ในดินเนื้อเดียว แต่ถ้าดิน 2 ชั้นสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$F = 1 + \left(N - \frac{1}{\sqrt{N}}\right) \frac{\sqrt{\frac{L_e}{r} \left[ \left(\frac{1}{2}\right)^3 + \left(\frac{L_e}{L_e + \frac{r}{2}}\right)^3 \right]^{1/3}}}{\ln\left(\frac{4L_e}{a} - 1\right)} \dots (5)$$

โดย  $L_e$  คือ  $L_{Ue}$  หรือ  $L_{Le}$

$L_{Ue}$  คือ ระยะประสิทธิผลของกราวด์รีดในดินชั้นบนตามสมการที่ (6)

$L_{Le}$  คือ ระยะประสิทธิผลของกราวด์รีดในดินชั้นล่างตามสมการที่ (7)

K คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$L_{Ue} = L_U \left( \frac{1+0.9K}{1-K} \right) \quad \dots (6)$$

$$L_{Le} = L_L \left( \frac{1}{1-K} \right) \quad \text{สำหรับ } K < 0 \quad \dots (7)$$

$$= L_L \quad \text{สำหรับ } K \geq 0$$

ในกรณีที่มีการต่อกราวด์รีดแบบ Rodbed ในดินสองชั้นเมื่อปักแท่งกราวด์รีดทะลุผ่านดินชั้นบน สามารถหาค่าความต้านทานของ Rodbed resistance ได้จาก

$$R_t = \frac{1}{\left[ \left( \frac{1}{R_U} \right)^\alpha + \left( \frac{1}{R_L} \right)^\alpha \right]^{1/\alpha}} \quad \dots (8)$$

โดย  $R_U = \frac{\rho_U}{2\pi L_U} \left[ \ln \left( \frac{4L_U}{a} \right) - 1 \right] \frac{F_U}{N} \quad \dots (9)$

$$R_L = \frac{\rho_L}{2\pi L_L} \left[ \ln \left( \frac{4L_L}{a} \right) - 1 \right] \frac{F_L}{N} \quad \dots (10)$$

เมื่อ

$F_U$  และ  $F_L$  คือ  $F$  แฟคเตอร์ที่ได้จากสมการที่ (5)

$\alpha$  เป็นค่าคงที่มีค่าระหว่าง  $1 \leq \alpha < 2$  แต่โดยทั่วไป  $\alpha \approx 1$  ใช้เมื่อปักแท่งกราวด์รีดแบบ 1 แท่ง (เป็นค่าต่ำสุด) และ  $\alpha \approx 2$  เมื่อปักแท่งกราวด์รีดแบบ Solid plate (เป็นค่าสูงสุด) สำหรับแบบ Rodbed ค่า  $\alpha$  ที่ใช้คือ 1.30

เงื่อนไขการใช้สมการที่ (8) มีอยู่ 2 ประการคือ

1.) อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีของแท่งกราวด์รีดต้องมากกว่า 2.50 เท่าคือ

$$L > 2.5a \quad \dots (11)$$

ในทางปฏิบัติกราวด์รีดที่มีจำหน่ายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53, 12.70, 15.88, 19.05 และ 25.40 มม. ( $\frac{3}{8}, \frac{1}{2}, \frac{5}{8}, \frac{3}{4}$  และ 1 นิ้ว) ยาว 1.5-12.20ม. (5-40 ฟุต) จากสมการที่ (11) จึงไม่ขัดกับเงื่อนไขนี้

2.) ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนไม่ควรเป็นศูนย์ และค่า  $K < 1$  คือ

$$\rho_L > 0 \quad \dots (12)$$

### 3. การคำนวณหาความต้านทานอิมพัลส์ (Impulse grounding) ของแท่งกราวด์รีด [6]

การคำนวณหาความต้านทานอิมพัลส์ ( $R_I$ ) ของแท่งกราวด์รีดขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสอิมพัลส์ ( $I_m$ ) ความต้านทานจำเพาะของดินและความยาวของแท่งกราวด์รีด ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$R_I = R_s \alpha \quad \dots (14)$$

โดย  $R_s$  คือความต้านทานของแท่งกราวด์รีดหนึ่งแท่งตามสมการที่ (1)

$\alpha$  คือสัมประสิทธิ์ของอิมพัลส์ (Impuse coefficient)

$$\alpha = 2.75\rho^{-0.4}(1.8 + \sqrt{L}) [0.75 - \exp(-1.50I_m^{-0.2})]$$

โดย  $I_m$  คือขนาดกระแสอิมพัลส์ (KA)

$\rho$  คือความต้านทานจำเพาะของดิน ( $\Omega - m$ )

L คือความยาวแท่งกราวด์รีด (m)

#### 4. ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีด

##### 4.1 ค่าความต้านทาน Power frequency grounding

###### 4.1.1 กรณีดินเนื้อเดียว

แท่งกราวด์รีดของ กฟภ. ที่ใช้ในปัจจุบันมีความยาว 2 เมตร มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่แฉก แต่การคำนวณค่าความต้านทานจากสมการที่ (1) ใช้กับพื้นที่หน้าตัดที่เป็นวงกลมจึงต้องประมาณค่ารัศมีเทียบเท่าของแท่งกราวด์รีดเป็นวงกลม ในที่นี้ใช้ค่ารัศมี 16 มม.

รูปที่ 8 แสดงค่าความต้านทานของแท่งกราวด์เมื่อปักจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 แท่ง ที่ค่า  $\rho$  ต่างๆ ตามลำดับ

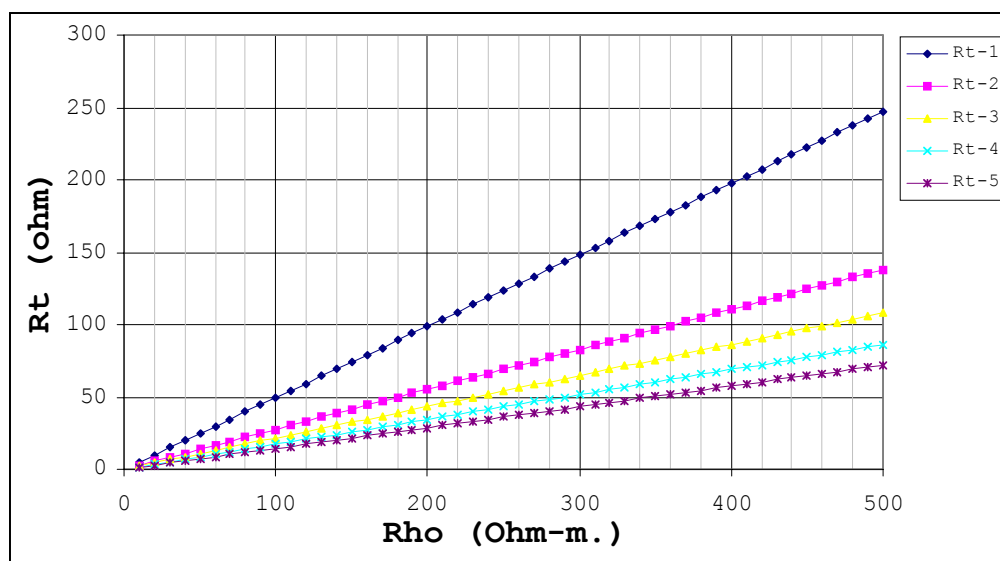
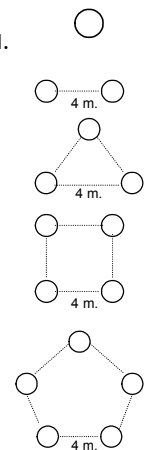
โดย การปักกราวด์รีด 1 แท่ง มีระยะห่างแต่ละแท่ง 0.0 ม. และ  $r = 0.0016$  ม.

การปักกราวด์รีด 2 แท่ง มีระยะห่างแต่ละแท่ง 4.0 ม. และ  $r = 4.0$  ม.

การปักกราวด์รีด 3 แท่ง มีระยะห่างแต่ละแท่ง 4.0 ม. และ  $r = 2.309$  ม.

การปักกราวด์รีด 4 แท่ง มีระยะห่างแต่ละแท่ง 4.0 ม. และ  $r = 2.828$  ม.

การปักกราวด์รีด 5 แท่ง มีระยะห่างแต่ละแท่ง 4.0 ม. และ  $r = 3.403$  ม.

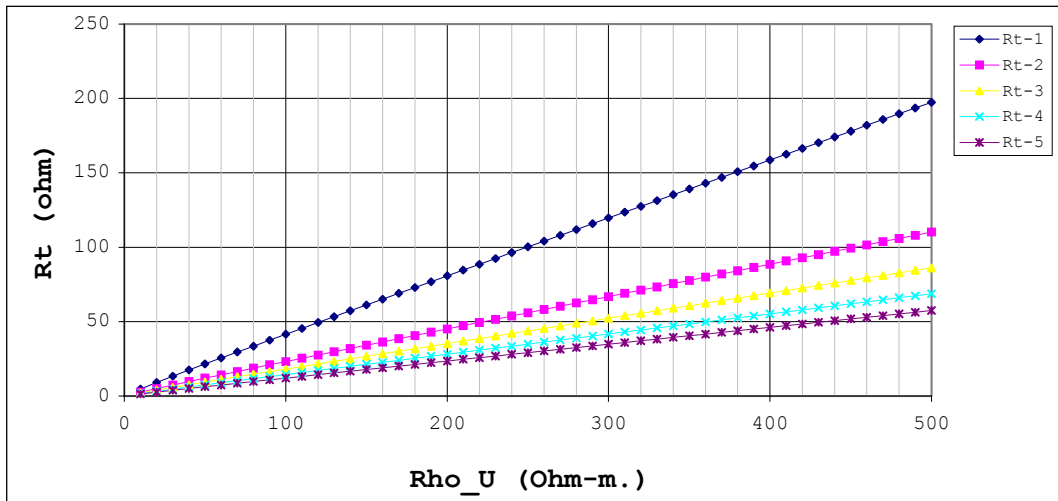


รูปที่ 8 แสดงกราฟความต้านทานของแท่งกราวด์รีด ที่ค่า  $\rho$  ต่างๆ

#### 4.1.2 กรณีดิน 2 ชั้น

##### 4.1.2.1 เมื่อปักแท่งกราวด์รีดไม่ทะลุผ่านดินชั้นบน

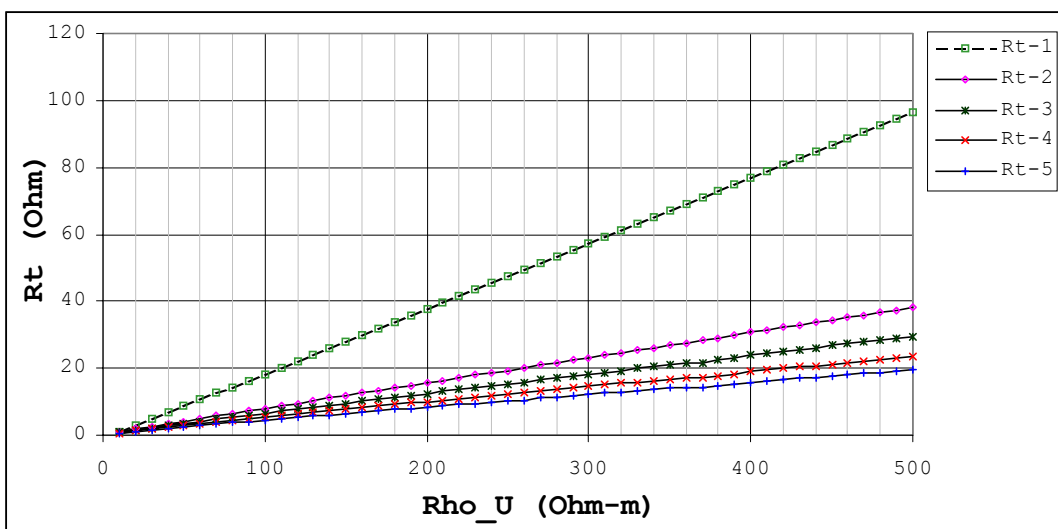
การคำนวณค่าความต้านทานแท่งกราวด์รีดยาว 2 เมตร และดินชั้นบนที่ค่า  $\rho_U$  ต่างๆ เมื่อมีความลึกของดินชั้นบน  $L_U = 5$  ม. และดินชั้นล่างมีค่า  $\rho_L = 100 \Omega\text{-m}$  รูปที่ 9 แสดงค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดเมื่อปักจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 แท่ง ที่ค่า  $\rho_U$  ต่างๆ ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างแท่งกราวด์เหมือนกับข้อ 4.1.1



รูปที่ 9 ความต้านทานของแท่งกราวด์รีดเมื่อปักแท่งกราวด์รีดไม่ทะลุผ่านดินชั้นบน

##### 4.1.2.2 เมื่อปักแท่งกราวด์รีดทะลุผ่านดินชั้นบน

ทดลองหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดเหมือนกับข้อ 4.1.2.1 แต่ให้กราวด์รีดยาว 8 เมตร ดังแสดงค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดในรูปที่ 10

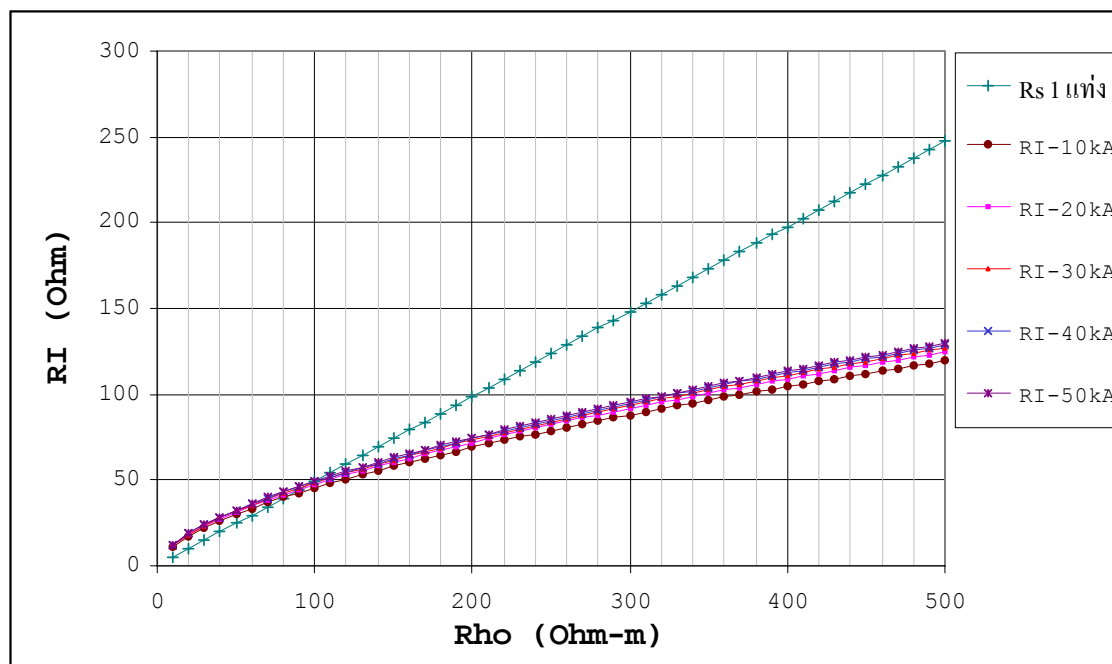


รูปที่ 10 ความต้านทานของแท่งกราวด์รีดเมื่อปักแท่งกราวด์รีดทะลุผ่านดินชั้นบน



## 4.2 ค่าความต้านทานอิมพัลส์

ทดลองหาค่าความต้านทานอิมพัลส์ของแท่งกราวด์รีดยาว 2 เมตรที่ปักในดินเนื้อเดียวที่ค่า  $\rho$  ต่างๆ เมื่อกระแสอิมพัลส์เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 kA. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงค่าความต้านทานอิมพัลส์ของแท่งกราวด์รีด

## 5. สรุป

บทความนี้ได้รวบรวมการคำนวณหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดที่ใช้ในระบบของ กฟภ. เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบการต่อลงดินได้อย่างเหมาะสมถูกต้องตรงตามมาตรฐาน เพื่อความปลอดภัยและความมั่นคงของระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่าย สำหรับการนำสูตรการคำนวณไปใช้งานเพื่อให้การหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รีดมีความถูกต้อง อันนำไปสู่การออกแบบการต่อลงดินที่เหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยไม่มีการปักมากเกินไปหรือน้อยเกินไป แต่อาจจะมีปัญหาในการใช้งานบ้างเนื่องจากยังไม่ทราบค่าพารามิเตอร์บางค่า เช่น ชนิดของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และอื่นๆ ซึ่งทาง กวจ. กำลังดำเนินการวิจัยศึกษารวบรวมข้อมูลให้ กฟภ. ต่างๆ นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] "IEEE Recommended practice far grounding of industrial and commercial power systems" ANSI/IEEE Std 142 1991.
- [2] M.M. Elsherbiny, M.M.A. salamma and Y.L. Chow, "Rodbed Grounding Resistance From the Single Driven Rod Resistance the "F" Multiplication Factor", Industry Applications, Conference, 1995, Thirtieth IAS Annual Meeting IAS 95, pp. 1749-1753.

- [3] J.Ma and F.P. Dawalibi, "Study of Influence of Buried. Metallic Structures on Soil Resistivity Measurements", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. 13, No.2, Apr. 1998, pp. 356-365.
- [4] C.J. Blattner, "Study of Driven Ground Rods and Four Point soil Resistivity Tests", IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-101, No.8 Aug. 1982, pp. 2837-22850.
- [5] C.J. Blattner, "Analysis of Soil Resistivity Test Methods in Two-Layer Earth", IEEE Transactions on power Apparatus and systems Vol. PAS-104, No.12, Dec. 1985, pp.3603-3608.
- [6] He Jinliang, Zeng Rong, Chen Shuiming, Li Siyun and Wu Weihai "Impulse characteristics of Grounding Systems of Transmission- Line Towers in the Regions with High soil Resistivity". IEEE Trans on Power Delivery, Vol.13, No.1. Jan.1998, pp.156-162.