

## บทที่ 2

### ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยประกอบด้วยลวดตัวนำวางขนาน และตั้งฉากกันได้ดิน เกิดเป็นเมฆย่อยๆ รวมกันเป็นโครงตาข่ายครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย และจะเชื่อมจุดที่ลวดตัวนำวางตัดกัน ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Exothermic Welding) เพราะฉะนั้นการจะใช้ลวดตัวนำเป็นจำนวนเท่าใดจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะ ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งวัสดุ แรงงาน และเวลาที่ใช้ในการสร้างจริง แต่ถ้าใช้น้อยเกินไปจะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ทั้งภายใน และบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อย ดังนั้นการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้น ความประหยัดในการลงทุน และความสะดวกในการก่อสร้างจริงด้วย ถ้าพิจารณาได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงเท่าใดก็จะยังสามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้มากเท่านั้น จึงมีวิศวกรไฟฟ้าหลายท่านพยายามพัฒนาระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยขึ้น จนสามารถกำหนดเป็นมาตรฐานอ้างอิงสำหรับการออกแบบสำหรับวิศวกรไฟฟ้าทั่วไปได้ และแต่ละประเทศได้นำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับลักษณะของประเทศนั้นๆ แม้แต่ในประเทศไทยก็มีหลายหน่วยงานที่นำมาประยุกต์ใช้

ในบทนี้จะอธิบายถึง มาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย และการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดี

#### 2.1 มาตรฐานการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

มาตรฐานการออกแบบระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นมีมากมายตามที่แต่ละประเทศคิดค้นขึ้น แต่มาตรฐานทั่วไปที่ทั่วโลกยอมรับเป็นมาตรฐานจากประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศในทวีปยุโรป ในขณะที่ประเทศไทยได้นำมาตรฐานเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ให้

เข้ากับสภาพภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยด้วย มาตรฐานการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่หลายประเทศได้นำไปเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้ มีดังนี้

- IEEE. Guide for Safety in AC Substation Grounding [1]
- National Electrical Safety Code. 1993 edition [9]

## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

- ดิน
- หินกรวด
- ความต้านทานของร่างกายมนุษย์
- กระแส และช่วงเวลาที่เกิดการผิดพลาด
- ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้
- ลวดตัวนำ
- GPR กระแส และความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย
- ศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว

### 2.2.1 ดิน

ดินที่ลวดตัวนำวางฝังอยู่นั้น เป็นทางไหลของกระแสไฟฟ้าจากลวดตัวนำ ดังนั้นถ้าดินมีคุณสมบัติจะช่วยให้การไหลของกระแสมีความสะดวกขึ้น การพิจารณาว่าดินนั้นมีคุณสมบัติหรือไม่ จะพิจารณาจากค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity)

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะขึ้นกับ ความลึกของดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นภายในดิน อุณหภูมิ สารเคมีภายในดิน ฯลฯ ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดินชนิดต่างๆ เป็นดังตารางที่ 2.1 [1,4,10,11,12]

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน (Ohm-Meter)
ดินผสมวัชพืชเปียก (Wet Organic Soil)	10
ดินชื้น (Moist Soil)	100

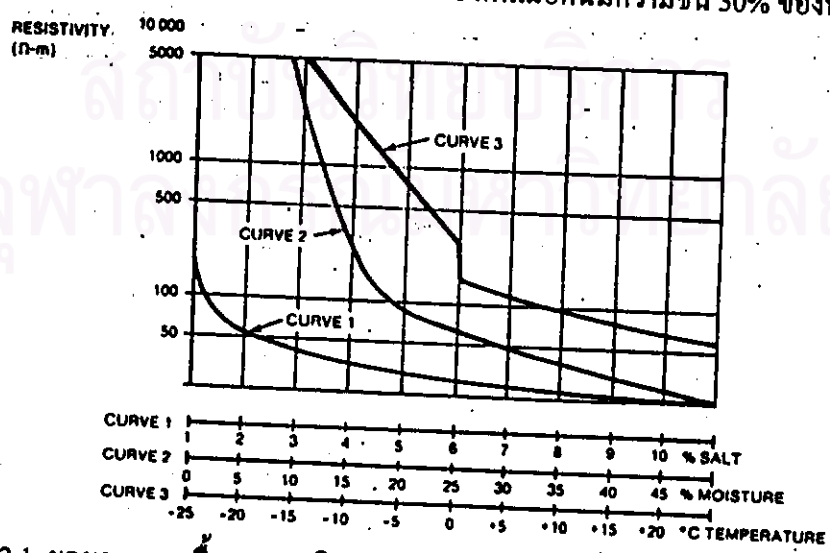
ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ต่อ)

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน (Ohm-Meter)
ดินแห้ง (Dry Soil)	1,000
ทราย (Sand)	500-1,000
หินแข็ง (Bed Rock)	10,000

ความชื้นภายในดินจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของเนื้อดิน ความหนาแน่นของดิน และความหลากหลายของขนาดอนุภาคของเนื้อดิน ซึ่งถ้าภายในดินมีความชื้นน้อยกว่า 15% ของน้ำหนักดินจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นดังกราฟเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.1 [1,10,12] ซึ่งแสดงผลของความชื้นภายในดินที่มีต่อค่าความต้านจำเพาะของดิน และถ้าภายในดินมีความชื้นมากกว่า 22% ของน้ำหนักดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

อุณหภูมิของดินนั้นอาจไม่ต้องนำมาพิจารณา ถ้าอุณหภูมิของดินมีค่ามากกว่า 0°C แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า 0°C น้ำภายในดินจะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ค่าความต้านทานภายในดินเพิ่มขึ้นรวดเร็วมาก ดังกราฟเส้นที่ 3 ของรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าความต้านจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 15.2% ของน้ำหนักดิน

สารเคมีภายในดิน โดยทั่วไปมักเป็นสารประกอบของเกลือ กรด หรือโลหะ ซึ่งจะช่วยให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำลงได้ ดังกราฟเส้นที่ 1 ของรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงผลของสารเคมีภายในดินที่มีต่อค่าความต้านจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 30% ของน้ำหนักดิน



รูปที่ 2.1 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

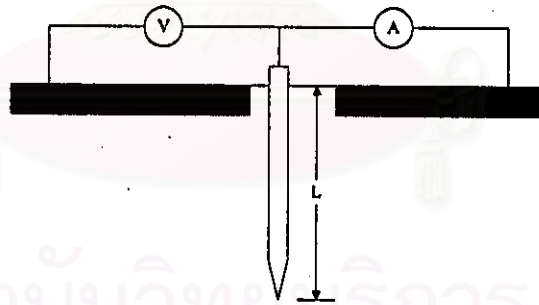
จากปัจจัยต่างๆ ภายในดิน เป็นผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละแห่งมีค่าแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบระบบโครงดาข่ายกาต่อลงดินแต่ละครั้งจึงจำเป็นต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินทุกๆ ครั้ง การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มี 2 วิธี ดังนี้ [13]

#### 2.2.1.1 การวัดแบบ 3 จุด (Three-Point Method or Driven Rod Method)

เป็นการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยการวัดกระแสและแรงดันจากการปักแท่งดินที่มีความลึกต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และสามารถคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi R}{\ln\left(\frac{8B}{d}\right) - 1} \quad (2.1)$$

- โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)  
 $R$  คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ (ohm)  
 $B$  คือ ความลึกของแท่งดินจากผิวดิน (m)  
 $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแท่งดิน (m)



รูปที่ 2.2 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 3 จุด

การวัดด้วยวิธีวัดแบบ 3 จุดนี้ เป็นการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในระยะ 5-10 เมตรของความยาวของแท่งดิน เพราะฉะนั้นจะต้องใช้แท่งดินที่มีความยาวมากเพื่อจะวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของสถานีไฟฟ้าที่มีพื้นที่มากๆ ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับในกรณีนี้ สำหรับการวัดโดยทั่วไปก็ควรวัดหลายๆ จุดทั่วทั้งพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด

### 2.2.1.2 การวัดแบบ 4 จุด

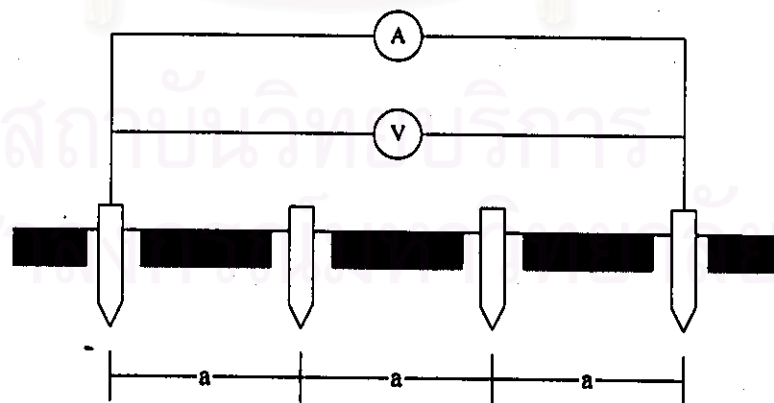
เป็นการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยการวัดค่ากระแส และแรงดันเหมือนวิธีแรก แต่ต่างกันตรงที่วิธีนี้ใช้การปักแท่งดิน 4 แท่งในการวัด ระยะห่างระหว่างแท่งดินนั้นมีทั้งเท่ากัน และไม่เท่ากัน แต่ที่นิยมปฏิบัติกันคือ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างแท่งดินมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นวิธีของเวนเนอร์ (Wenner's Four-Pin Method) ดังรูปที่ 2.3 และสามารถคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho = \frac{4\pi R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (2.2)$$

- โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)  
 $R$  คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ (ohm)  
 $A$  คือ ระยะห่างระหว่างแท่งดินข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (m)  
 $B$  คือ ความลึกของแท่งดินจากผิวดิน (m)

ถ้า  $B \ll A$  สามารถคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho = 2\pi R \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด

วิธีการนี้ให้ผลที่ถูกต้องกว่าวิธีการวัดแบบ 3 จุด อีกทั้งยังสะดวก และประหยัดกว่าการวัดแบบ 3 จุดด้วย เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้แท่งดินขนาดยาวๆ ในทำนองเดียวกันการวัดควรวัดหลายๆ ทิศทาง และระยะห่างระหว่างแท่งดินควรมีค่าน้อยเท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดของสถานีไฟฟ้าขอยนั้น

สมการที่ 2.1-2.3 เป็นสมการที่ใช้กับดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ (Uniform Soil) เท่านั้น ถ้ามีความต้านทานจำเพาะไม่สม่ำเสมอต้องหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีอื่น ซึ่งจะไม่กล่าวถึง ณ. ที่นี้

### 2.2.2 หินกรวด

โดยทั่วไปภายในสถานีไฟฟ้าขอยจะโรยหินกรวดหนาประมาณ 0.08-0.15 เมตร เนื่องจากหินกรวดมีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดินมาก ดังนั้นจึงสามารถจำกัดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสผิวดินได้ ช่วยให้สามารถลดจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ในระบบการต่อลงดินให้น้อยลงได้ หินกรวดที่ใช้โรยจะมีค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2.2 [1] แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 3,000 ohm-m. สำหรับผลของการ โรยหินกรวดสามารถแทนได้ด้วยแฟคเตอร์ลดเนื่องจากการโรยหินกรวด (Reduction Factor for Derating the Normal Value of Surface Layer Resistivity) ดังรูปที่ 2.4 และสมการที่ 2.4 และ 2.5 [1,3,4,13]

สำหรับความลึกหินกรวด  $0 \leq h_s \leq 0.3048 \text{ m}$ .

$$C = 1 - a \left[ \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{(2h_s + a)} \right] \quad (2.4)$$

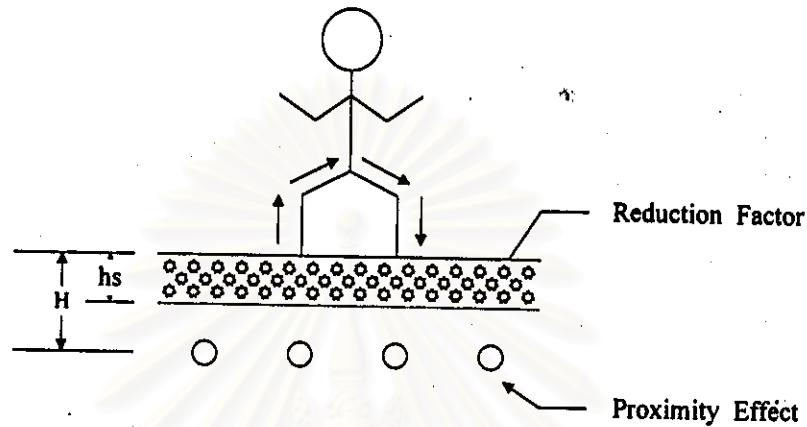
สำหรับความลึกหินกรวด  $h_s > 0.3048 \text{ m}$ .

$$C = 1 - a \left[ \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{(2h_s - a)} \right] \quad (2.5)$$

โดยที่ C คือ แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการโรยหินกรวด

$h_s$  คือ ความลึกของหินกรวด (m)

$a = 0.106$  m. ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม



รูปที่ 2.4 การโรยหินกรวด

ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานจำเพาะของหินประเภทต่างๆ

ประเภทของหิน	ค่าความต้านทานจำเพาะ (ohm - m)		
	แห้ง	เปียกด้วยน้ำธรรมดา	เปียกด้วยน้ำเกลือ
หินแกรนิตขนาดเล็ก	$141.8 \times 10^6$	1,318.7	705.0
หินแกรนิตที่ล้างสะอาด ขนาด 3/4 - 1 นิ้ว	$192.5 \times 10^6$	8,106.8	2,166.5
หินปูนที่ล้างสะอาด	$7.3 \times 10^6$ - $68.5 \times 10^6$	2,094.8 - 2,912.4	1,274.8 - 1,470.8
ดินปนกรวด	$1.22 \times 10^6$	8,534.4	24.4
หินกรวด	$18.3 \times 10^6$	4,267.2	121.9

### 2.2.3 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์

มนุษย์ในที่นี้ หมายถึง ผู้ที่อาจได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้ร่อง โดยโอกาสที่มนุษย์ผู้นั้นจะได้รับอันตรายมี 2 สาเหตุ คือ จากการสัมผัสโครงโลหะของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดิน

(Touch Voltage) และจากการเดินอยู่ภายในหรือใกล้เคียงกับสถานีไฟฟ้าย่อย (Step Voltage) ดังนั้น จะมีกระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์จากมือสู่เท้าในกรณีแรก หรือจากเท้าสู่เท้าในกรณีที่ 2 ดังนั้น ความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปพิจารณาถึงขีดจำกัด ของกระแส หรือแรงดันที่มนุษย์สามารถทนได้ ดังตารางที่ 2.3 [3] แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทาน เฉลี่ยของร่างกายมนุษย์มีค่าประมาณ 1,000 ohm

ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์

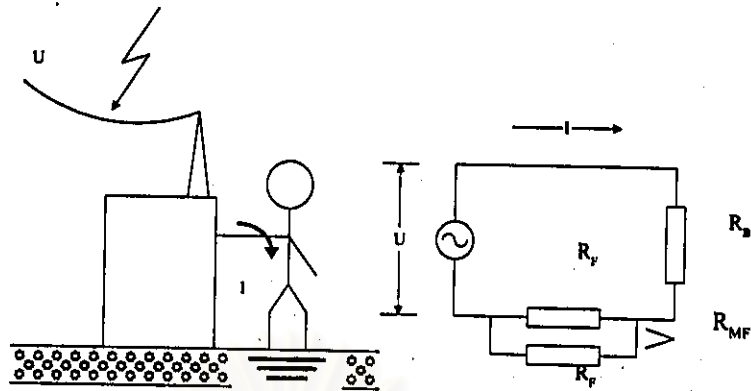
รายละเอียด	ความต้านทาน (ohm)	หมายเหตุ
เนื้อเยื่อในร่างกาย	300	ไม่รวมผิวหนัง
ร่างกายรวมผิวหนัง	500-3,000	-
มือกับมือ	2,330	ทดลองโดยแช่มือในน้ำเกลือ
มือกับเท้า	1,130	ทดลองโดยแช่มือ และเท้าใน น้ำเกลือ

การพิจารณาค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยจำลองอันตรายที่เกิดขึ้นจริงกับ มนุษย์เป็นวงจรสมมูลของการเกิดอันตราย ซึ่งสามารถจำลองได้ 2 แบบ ตามสาเหตุของการเกิด อันตรายดังนี้ [1,2,3,4,13]

#### 2.2.3.1 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

เมื่อเราสัมผัส โครงโลหะของอุปกรณ์ที่ต่อลงดินกับโครงตาข่ายการต่อลง ดินของสถานีไฟฟ้าย่อยในขณะที่เกิดผิพร่อง เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากมือสู่เท้า ดัง นั้นวงจรสมมูลนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5





รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

สามารถคำนวณค่าความต้านทานระหว่างมือกับเท้าได้ ดังนี้

$$R_A = R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF}) \quad (2.6)$$

โดยที่  $R_A$  คือ ความต้านทานรวมระหว่างมือกับเท้า (ohm)

$R_B$  คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (ohm)

$R_F$  คือ ความต้านทานระหว่างเท้ากับดิน (ohm)

$R_{MF}$  คือ ความต้านทานร่วมระหว่างเท้าทั้งสอง (ohm)

เราสามารถแทนเท้าทั้ง 2 ด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี  $b$  และห่างกัน  $d_f$  วางอยู่บนพื้นดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ  $\rho$  เพราะฉะนั้น

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \quad (2.7)$$

$$R_{MF} = \frac{\rho}{2\pi d_f} \quad (2.8)$$

ขนาดเท้าเฉลี่ยของมนุษย์มีค่าประมาณ 0.083 เมตร และ  $R_{MF}$  มีค่าน้อยมาก จึงไม่คิดผลของ  $R_{MF}$  ดังนั้นสมการ 2.6 สามารถเขียนได้เป็น

$$R_A = R_B + 1.5\rho \quad (2.9)$$

และเมื่อคิดผลของการโรยหินกรวด สมการที่ 2.9 สามารถเขียนใหม่ได้  
เป็น

$$R_A = R_B + 1.5C\rho \quad (2.10)$$

แต่เนื่องจากระบบโครงตาข่ายนั้นฝังอยู่ใต้ดิน ซึ่งมีศักดาไฟฟ้าสูงกว่าจุด  
ที่ผู้ได้รับอันตรายยืนอยู่ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายลงดินได้ยากขึ้น นั่นคือค่าความ  
ต้านทานรวมมีค่าสูงขึ้น (Proximity Effect) ดังสมการ

$$R_A = R_B + 1.5C\rho \left( 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่  $h$  คือ ความลึกของลวดตัวนำจากผิวดิน (m)  
 $h_s$  คือ ความลึกของหินกรวด (m)  
 $C$  คือ แฟกเตอร์คิดเนื่องจากการโรยหินกรวด  
 $a = 0.106$  m. ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม

### 2.2.3.2 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน

เป็นการจำลองการไหลของกระแสจากเท้าข้างหนึ่งผ่านร่างกายไปสู่เท้า  
อีกข้างหนึ่ง ดังนั้นวงจรสมมูลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และสามารถคำนวณค่าความต้านทาน  
ระหว่างเท้ากับเท้าได้ดังนี้

$$R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF} \quad (2.12)$$

โดยที่  $R_A$  คือ ความต้านทานรวมระหว่างมือกับเท้า (ohm)  
 $R_B$  คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (ohm)  
 $R_F$  คือ ความต้านทานระหว่างเท้ากับดิน (ohm)  
 $R_{MF}$  คือ ความต้านทานร่วมระหว่างเท้าทั้งสอง (ohm)

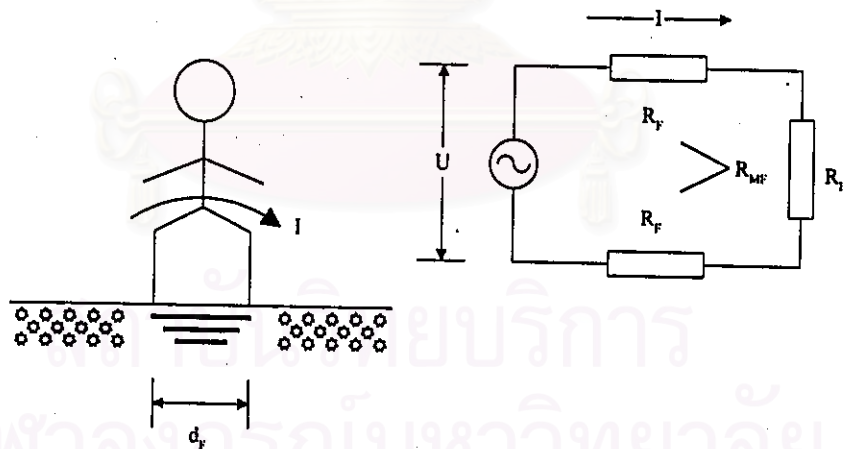
ในทำนองเดียวกันกับวงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส สมการ 2.12 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_A = R_B + 6C\rho \tag{2.13}$$

เมื่อคิดผลของการโรยหินกรวด และผลจากการฝังตัวนำใต้ดิน (Proximity Effect) สมการ 2.13 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_A = R_B + 6C\rho \left( 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \right) \tag{2.14}$$

- โดยที่  $h$  คือ ความลึกของลวดตัวนำจากผิวดิน (m)
- $h_s$  คือ ความลึกของหินกรวด (m)
- $C$  คือ แฟคเตอร์ลดเนื่องจากการโรยหินกรวด
- $a = 0.106$  m. ซึ่งได้มาจากการแทนที่ด้วยครึ่งทรงกลม



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน

2.2.4 กระแส และช่วงเวลาที่เกิดการผิดพลาด

กระแสผิดพลาดอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น จากการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ จากการเสื่อมสภาพของฉนวนป้องกัน หรือจากปรากฏการณ์ธรรมชาติต่างๆ ฯลฯ โดยเราจะคำนึงถึงการผิดพลาดที่รุนแรงที่สุด นั่นคือ การลัดวงจรแบบสามเฟส Three Phase Fault

เมื่อเกิดการผัดพ่วงขึ้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดินในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และถ้ามีมนุษย์ไปสัมผัสกับอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหรือ เดินอยู่ภายใน หรือบริเวณใกล้เคียง สถานีไฟฟ้าย่อย เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ผู้นั้น ซึ่งช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร ถ้าอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรสามารถตัดกระแสผัดพ่วงได้เร็วเท่าไร โอกาสที่จะเกิดอันตรายก็จะมีน้อยลงเท่านั้น

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์นั้น ในแต่ละคนจะทนได้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของร่างกายของผู้นั้น แต่สามารถประมาณได้ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 [4] โดยตารางที่ 2.4 จะเปรียบเทียบปริมาณกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ระหว่างเพศหญิง และเพศชาย ในขณะที่ตารางที่ 2.5 จะแสดงปริมาณกระแสที่มีผลให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับร่างกายของมนุษย์

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกระแสที่เพศชาย และเพศหญิงสามารถทนได้

	ผู้ชาย	ผู้หญิง
ขนาดของกระแสที่รู้สึกได้ (mA)	1.1	1.6
ขนาดของกระแสที่สามารถช่วยให้ตัวเองหลุดได้ (mA)	0.7	1.05

หมายเหตุ กำหนดให้ค่าความต้านทานของมนุษย์มีค่าเท่ากับ 1,000 โอห์ม

ตารางที่ 2.5 ปริมาณกระแสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับร่างกายมนุษย์

ขนาดของกระแสที่ความถี่ 50-60 Hz	ผลที่เกิดขึ้นกับร่างกายเมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 วินาที
1 mA	ร่างกายสามารถรู้สึกได้
5 mA	ร่างกายรู้สึกได้แต่ไม่ทำให้เกิดอันตรายใดๆ
10 - 20 mA	เกิดอาการเกร็งจนไม่สามารถสลัดให้หลุดได้
50 mA	รู้สึกปวด อาจเกิดอาการหน้ามืด เป็นลม ไม่มีเรี่ยวแรง แต่หัวใจ และระบบหายใจยังทำงานปกติ

ตารางที่ 2.5 ปริมาณกระแสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ  
กับร่างกายมนุษย์ (ต่อ)

ขนาดของกระแส ที่ความถี่ 50-60 Hz	ผลที่เกิดขึ้นกับร่างกาย เมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 วินาที
100 - 300 mA	เกิดอาการ Ventricular Frabilation ซึ่งทำให้หัวใจหยุดการสูบฉีดโลหิต และอาจถึงตายภายในเวลาไม่กี่นาที
6 A	กล้ามเนื้อหัวใจเกิดอาการเกร็งตัว ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดอาการ Ventricular Fribilation ถ้าหากช่วยโดยการผายปอดได้ทันอาจรอดตายได้ แต่จะเกิดการเผาไหม้ตามร่างกาย

การคำนวณหาขีดจำกัดสูงสุดของกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้จะพิจารณาขณะที่กระแสไหลผ่านร่างกายในช่วงเวลา 0.03 - 3.0 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ไมทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายถึงขั้นหัวใจทำงานผิดปกติ โดยมีความน่าจะเป็นถึง 99.5% สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้ [1,2,3,4,13]

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.15)$$

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.16)$$

โดยที่  $I_B$  คือ กระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (A)  
 $t$  คือ ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (s)

2.2.5 คักคาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และคักคาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

คักคาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และคักคาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้นั้น เป็นเกณฑ์ที่ใช้กำหนดระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยว่ามาสารลป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับมนุษย์ได้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับคักคาไฟฟ้าเมฆ และคักคาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงตาข่ายการต่อลงดิน ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง ค่าคักคาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และคักคาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้นี้ เราสามารถคำนวณได้จากสมการ [1,2,3,4,12,13]

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

$$E_{touch50} = \left[ R_B + 1.5C\rho \left( 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \right) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right] \quad (2.17)$$

$$E_{step50} = \left[ R_B + 6C\rho \left( 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \right) \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right] \quad (2.18)$$

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$E_{touch70} = \left[ R_B + 1.5C\rho \left( 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \right) \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right] \quad (2.19)$$

$$E_{step70} = \left[ R_B + 6C\rho \left( 1 + \frac{1.3a}{h+h_s} \right) \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right] \quad (2.20)$$

- โดยที่  $R_B$  คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (ohm)
- $C$  คือ แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการโรยหินกรวด
- $\rho$  ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)
- $h$  คือ ความลึกของลวดตัวนำจากผิวดิน (m)
- $h_s$  คือ ความลึกของหินกรวด (m)
- $a = 0.106$  m. ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม
- $t$  ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (sec)

### 2.2.6 ถวดั่วนำ

ถวดั่วนำเป็นอุปกรณ์หลักที่นำมาใช้ประกอบเป็นโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทำหน้าที่นำกระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้นกระจายสู่ดิน ดังนั้นถวดั่วนำที่ดีจึงต้องมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี ไม่หลอมละลายเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกระแสผิดพลาด และเนื่องจากถวดั่วนำต้องวางไว้ใต้ดินจึงต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และสัตว์ที่อยู่ในดินด้วย ถวดั่วนำที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทองแดง แต่ก็มีบางประเทศในแถบยุโรป และเอเชียที่นิยมใช้เหล็กชุบสังกะสี (Galvanize Steel) ดังตารางที่ 2.6 [1,10,13,14]

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ของวัสดุประเภทต่างๆ ที่ใช้เป็นถวดั่วนำ

Description	Material Conductivity (%)	$\alpha_r$ at 20° C	K at 0° C	Fusing Temperature (° C)	$\rho_r$ at 20° C ( $\mu\Omega/\text{cm}^3$ )	TCAP ( $\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$ )
Standard Annealed Soft Copper Wire	100.0	0.00393	234	1,083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1,084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1,084/1,300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1,084/1,300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminum Alloy Wire 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ของวัสดุประเภทต่างๆ ที่ใช้เป็นลวดตัวนำ (ต่อ)

Description	Material Conductivity %	$\alpha_r$ at 20° C	K at 0° C	Fusing Temperature (° C)	$\rho_r$ at 20° C ( $\mu\Omega/\text{cm}^3$ )	TCAP ( $\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$ )
Aluminum-Clad Steel Core Wire	20.3	0.00360	258	660/1,300	8.4805	2.670
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.00320	293	419/1,300	20.1	3.931
Stainless Steel No. 304	2.4	0.00130	749	1,400	72	4.032

ขนาดของลวดตัวนำที่เล็กที่สุดสามารถคำนวณได้จากสมการ [1,10,14]

$$A = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r * 10^4}{TCAP \ln \left[ 1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right]}} \quad (2.21)$$

- โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดของลวดตัวนำ  
ที่ประกอบกันเป็น โครงดาข่ายการต่อลงดิน ( $\text{mm}^2$ )
- I คือ กระแสผิดพ่วงสูงสุดเป็นค่า rms. (A)
- $T_m$  คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ลวดตัวนำยังไม่หลอมละลาย ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_a$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_r$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ ( $^\circ\text{C}$ )
- $\alpha_0$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะ  
ที่อุณหภูมิ 0
- $\alpha_r$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะ  
ที่อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ
- $\rho_r$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของลวดตัวนำ  
ที่อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ ( $\mu\Omega/\text{cm}^3$ )



$t_c$  คือ ช่วงเวลาที่เกิดการผิตพร่อง (sec.)

TCAP คือ แฟกเตอร์ทางความจุความร้อน

$$K_0 = \frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{\alpha_r} - T_r$$

สมการที่ 2.21 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{A}{I} = \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r * 10^4}{TCAP}}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}} \quad (2.22)$$

หรือ

$$\frac{I}{A} = \sqrt{\frac{\ln \left[ 1 + \left( \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}{\frac{t_c \alpha_r \rho_r * 10^4}{TCAP}}} \quad (2.23)$$

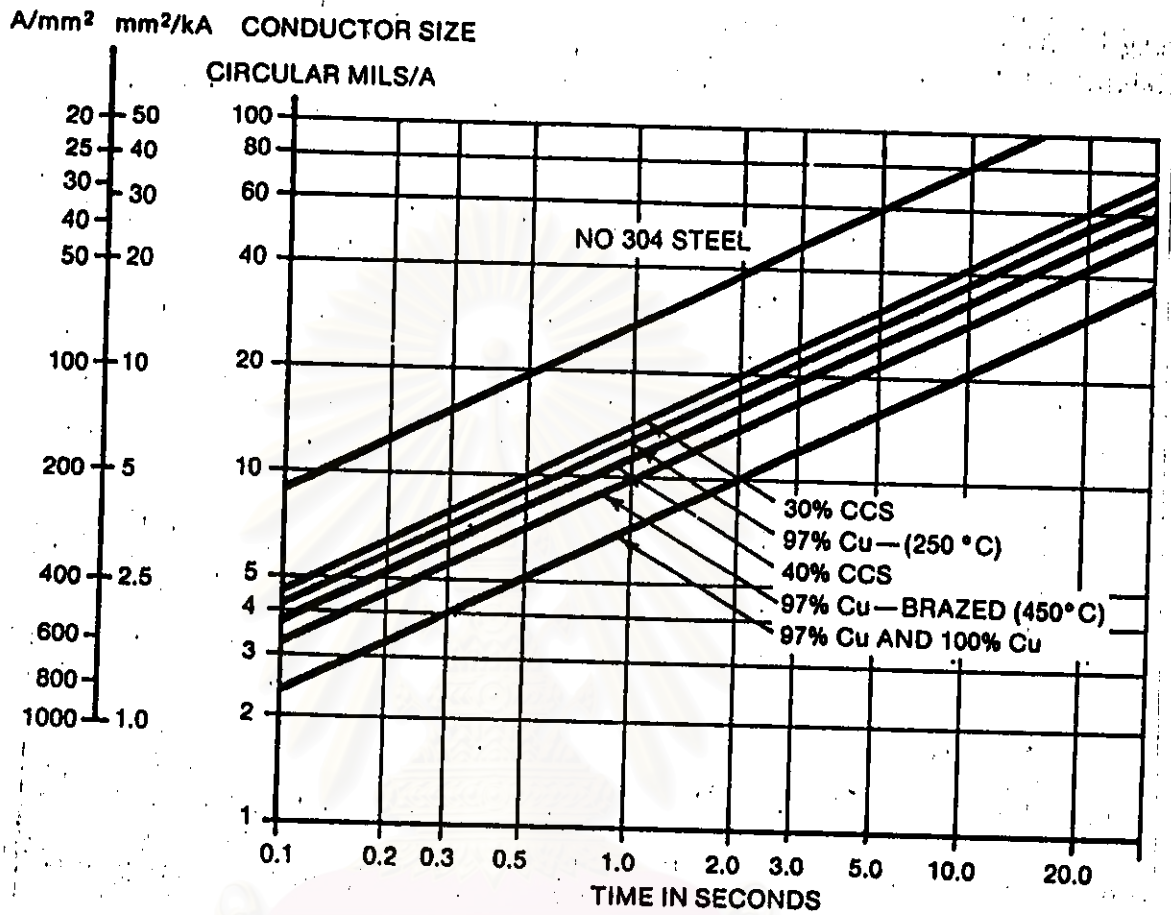
จากสมการ 2.22 และ 2.23 นี้ เราสามารถประมาณขนาดที่เล็กที่สุดของลวดตัวนำได้จากรูปที่ 2.7 หรือตารางที่ 2.7 [1,10,14] โดยที่

$$T_a = 40^\circ \text{C}$$

$T_m$  มีค่าตาม Fusing Temperature ในตารางที่ 2.6

อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ ณ จุดที่มีการเชื่อมต่อด้วยทองเหลืองมีค่าเท่ากับ  $450^\circ \text{C}$

อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ ณ จุดที่มีการเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำต่างๆ ไปมีค่าเท่ากับ  $250^\circ \text{C}$



รูปที่ 2.7 ขนาดที่เล็กที่สุดของลวดตัวนำกับช่วงเวลาที่เกิดผิดพลาด

ตารางที่ 2.7 ขนาดลวดตัวนำที่เล็กที่สุดต่อหนึ่งหน่วยกระแส (cmils/A)

Fault Time (sec.)	100% Cu Only	97% Cu Only	40% CCS Only	30% CCS Only	97% Cu (450° C)	Temperature Limits (250° C)
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	18.7	23.5
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3

### 2.2.7 GPR กระแส และความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินควรมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อให้กระแสผิดพลาดผ่านได้สะดวก ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ จึงเพียงแต่จำกัดให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ค่า GPR มีค่าน้อยที่สุด

เราสามารถคำนวณค่าความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินได้จากสมการ [1,3,4,10,12]

เมื่อลวดตัวนำวางตั้งฉากผิวดินน้อยกว่า 0.25 m

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad (2.24)$$

เมื่อลวดตัวนำวางตั้งฉากผิวดินในช่วง 0.25 - 2.5 m

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \times \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.25)$$

โดยที่	$R_g$	คือ ความต้านทานของระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย (ohm)
	$\rho$	คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)
	$A$	คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย ( $m^2$ )
	$L$	คือ ความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำที่ประกอบเป็นโครงตาข่ายการต่อลงดิน (m)
	$h$	คือ ความลึกของลวดตัวนำจากผิวดิน (m)

กระแสโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย หรือกระแสกริด คือ กระแสสูงสุดที่ไหลจากโครงตาข่ายลงสู่ดินเนื่องจากเกิดการผิดพลาด นั่นคือถ้ากระแสกริดมีค่ามากเป็นผลให้ GPR มีค่ามากด้วย เราสามารถคำนวณค่ากระแสสูงสุดได้จากสมการ [1,3,4,12,13]

$$I_G = C_p D_f I_x \quad (2.26)$$

$$I_x = S_f I_f \quad (2.27)$$

- โดยที่  $I_G$  คือ กระแสกริดสูงสุด (A)  
 $I_x$  คือ กระแสกริดสมมาตร (A)  
 $I_f$  คือ กระแสผิพรงสูงสุดเป็นค่า rms (A)  
 $C_p$  คือ Corrective Projection Factor สำหรับการเพิ่มขึ้นของกระแสผิพรงในช่วงอายุการใช้งานของสถานีไฟฟ้าย่อย  
 = 1 ถ้าในอนาคตไม่มีการเพิ่มขึ้นของกระแสผิพรง  
 $D_f$  คือ ตัวประกอบการลดลงสำหรับการลดกระแสผิพรงของอุปกรณ์ป้องกัน เป็นผลให้เกิดการผิพรงในช่วงเวลา  $t_f$  โดยมีค่าดังตารางที่ 2.8 [1,4,12,13]  
 $S_f$  คือ ตัวประกอบการกระจายกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของกระแสผิพรงที่ไหลจากโครงคาน้ำไปสู่ดิน

ตารางที่ 2.8 ค่าตัวประกอบการลด ( $D_f$ )

ช่วงเวลาการเกิดผิพรง	ตัวประกอบการลด ( $D_f$ )
0.008	1.65
0.1	1.25
0.25	1.10
0.5 หรือมากกว่า	1.0

หรือเราสามารถคำนวณค่ากระแสกริดสูงสุดได้โดยใช้วิธีของ Thaper [3,15] ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า โดยพิจารณาค่ากระแสกริดสูงสุดจากค่าความต้านทานโครงคาน้ำไปสู่อิน

สาย Overhead Ground Wire ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance) และระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Tower Span) ดังนี้

$$I_G = \left( \frac{Z}{R_x + Z} \right) I_f \quad (2.28)$$

$$\text{โดยที่ } Z = \frac{1}{Y'}$$

$Y'$  คือ Admittance of Ladder Network ที่ประกอบด้วย

Overhead Ground Wire และ Tower Footing

$$Y' = G + jB$$

สำหรับ  $G$  และ  $B$  สามารถดูได้จากกราฟในรูปที่ 2.8 และ 2.9 [3,15] ซึ่ง

ค่า  $G$  และ  $B$  นั้น ขึ้นอยู่กับ

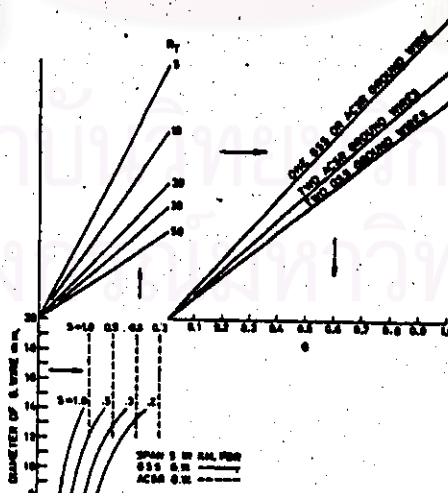
- ชนิดของสาย Overhead Ground Wire (ในที่นี้พิจารณาเฉพาะชนิด GSS และ ACSS)

- ระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Span Tower)

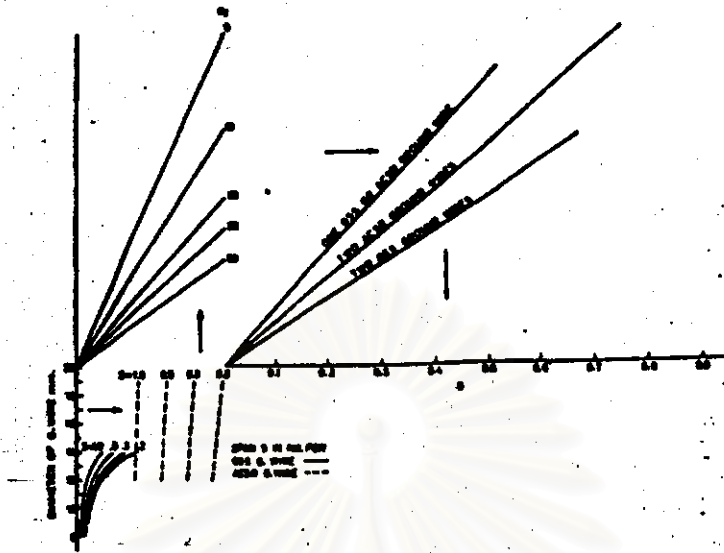
- ค่าความต้านทานเสาส่ง (Tower Footing Resistance)

- เส้นผ่านศูนย์กลางของสาย Overhead Ground Wire

- จำนวนของสาย Overhead Ground Wire



รูปที่ 2.8 ค่า  $G$  ของสาย Overhead Ground Wire



รูปที่ 2.9 ค่า B ของสาย Overhead Ground Wire

GPR เป็นค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น ซึ่งขึ้นกับค่าความต้านทานโครงตาข่าย และกระแสโครงตาข่าย ดังสมการ [1,3,4,12]

$$GPR = I_G \times R_g \quad (2.29)$$

### 2.2.8 ศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว

ศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่พิจารณา เป็นศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงภายในสถานีไฟฟ้าย่อยเนื่องจากระบบโครงตาข่ายการต่อลงดิน ศักดาไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นต้องมีค่าไม่มากเกินไปเกินศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ในทำนองเดียวกันศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวต้องมีค่าไม่เกินศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ซึ่งโดยทั่วไปถ้าศักดาไฟฟ้าเมฆมีค่าไม่เกินศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้แล้ว ศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวจะมีค่าไม่เกินศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ด้วย

เราสามารถคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวโดยประมาณได้จากสมการ [1,3,4,16,17]

$$E_m = \frac{\rho K_m K_f I_G}{L} \quad (2.30)$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_l I_G}{L} \quad (2.31)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{II}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (2.32)$$

สำหรับโครงตาข่ายที่มีแท่งดินบริเวณรอบนอก หรือบริเวณมุม หรือทั้งรอบนอก และภายในตลอดทั้งโครงตาข่าย

$$K_{II} = 1$$

สำหรับโครงตาข่ายที่ไม่มีแท่งดิน หรือมีน้อยมาก โดยที่ไม่มีแท่งดินบริเวณ รอบนอก หรือบริเวณมุม

$$K_{II} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

โดยที่  $h_0$  คือ ความลึกอ้างอิงของโครงตาข่าย  
= 1 m

$$K_l = 0.656 + 0.172n \quad (2.33)$$

สำหรับโครงตาข่ายที่มีความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 2.5 m

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (2.34)$$

สำหรับโครงตาข่ายที่มีความลึกน้อยกว่า 0.25 m

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right) \quad (2.35)$$

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n-1}$$

$$\approx \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423 \quad \text{เมื่อ } n \geq 6$$

สำหรับการคำนวณค่า  $E_m$

$$n = \sqrt{n_x * n_y}$$

สำหรับการคำนวณค่า  $E_s$

$$n = \max(n_x, n_y)$$

โดยที่  $E_m$  คือ ศักดาไฟฟ้าเมฆ ณ. บริเวณมุมของโครงตาข่าย (V)

$E_s$  คือ ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว ณ. ที่ห่างจากขอบของโครงตาข่ายเป็นระยะทาง 1 เมตร (V)

$K_m$  คือ Spacing Factor สำหรับศักดาไฟฟ้าเมฆ

คือ Spacing Factor สำหรับศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว

$K_1$  คือ Corrective Factor สำหรับลักษณะโครงสร้างของโครงตาข่าย

$K_{ii}$  คือ Corrective Weighting Factor สำหรับผลของทวดตัวนำ ณ. เมฆบริเวณมุมของโครงตาข่าย

$K_n$  คือ Corrective Weighting Factor สำหรับผลเนื่องจากความลึกของโครงตาข่าย

$\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (ohm-m)

$I_0$  คือ กระแสโครงตาข่ายสูงสุดที่ไหลลงสู่ดิน (A)



- L คือ ความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำที่ประกอบเป็นโครง  
ดาข่าย (m)
- D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (m)
- h คือ ความลึกของโครงดาข่ายจากผิวดิน (m)
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (m)
- n คือ จำนวนลวดตัวนำเฉลี่ย หรือจำนวนลวดตัวนำที่  
ขนานกันในทิศทางหนึ่ง
- $n_x$  คือ จำนวนลวดตัวนำในแนวแกน x
- $n_y$  คือ จำนวนลวดตัวนำในแนวแกน y

สมการที่ 2.24 และ 2.25 นั้นจะให้ผลถูกต้องก็ต่อเมื่อ

$$n \leq 25$$

$$0.25 \text{ m} \leq h \leq 2.5 \text{ m}$$

$$d < 0.25h$$

ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน และมากกว่า 2.5 เมตร

### 2.3 การออกแบบระบบโครงดาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดี

ระบบโครงดาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดี จะต้องสามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ภายใน และบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้ โดยประหยัดทั้งวัสดุ ค่าใช้จ่าย และเวลาที่ใช้ในการสร้างจริงด้วย นั่นคือในการออกแบบจะต้องให้ระบบโครงดาข่ายการต่อลงดินมีค่าความต้านทานของโครงดาข่ายต่ำ สักดาไฟฟ้าเมฆ และสักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบโครงดาข่ายการต่อลงดินมีค่าต่ำกว่าสักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และสักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยใช้จำนวนลวดตัวนำน้อยที่สุด และสะดวกต่อการสร้างจริงด้วย