บทที่ 2

ทฤษฎีการศึกษาค่าความต้านทานดิน

2.1 ความจำเป็นของระบบการต่อลงดิน (Grounding System)

ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) นั้นมีความสำคัญต่อประเทศชาติและประชาชนเป็นอย่างยิ่งทั้งในด้านเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ ดังนั้นในปัจจุบันระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของ กฟผ. จึงเป็นระบบที่มีการต่อลงดิน (Grounding or Earthling) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประโยชน์ในเรื่องของความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินและป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเช่น ลูกถ้วย สายตัวนำ ฯลฯ เมื่อเกิดอุบัติเหตุจากกระแสไฟฟ้าแรงสูงขึ้นในระบบ ซึ่งอาจจะเกิดจากฟ้าผ่า (Lightning), แรงดันไฟฟ้าผิดปกติ (Surge) หรือเกิดความผิดพร่อง (Electrical Fault) รวมทั้งช่วยให้รีเลย์สามารถทำงานได้อย่างทันที ซึ่งข้อมูลต่างๆที่ได้มาจากการทำงานของรีเลย์จะช่วยให้การปฏิบัติงานของหน่วยบำรุงรักษาสายส่งรวดเร็วและถูกต้องยิ่งขึ้น

จากการที่ระบบมีการต่อลงดินเมื่อเกิดอุบัติเหตุดังกล่าวขึ้นแล้วจะทำให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงไหลผ่านสายตัวนำที่เรียกว่า สายดิน (Ground Conductor) ลงสู่ดินโดยผ่านทาง แท่งสายดิน (Ground Rod or Earth Electrode) ดังนั้นความต้านทานของระบบสายดินต้องมีค่าต่ำ ซึ่งค่าความต้านทานของระบบสายดินที่ กฟผ. ใช้เป็นมาตรฐานอยู่มีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม ค่าความต้านทานสายดินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการเช่น ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) รูปร่างและลักษณะการจัดวางของแท่งสายดิน

2.2 ความต้านทานการต่อลงดิน (Grounding Resistance)

หมายถึง ความต้านทานทางไฟฟ้าของส่วนต่อลงดิน ระบบที่มีการต่อลงดินแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ

- ความต้านทานของตัวนำสำหรับต่อลงดินและความต้านทานของสายตัวนำ
- ความต้านทานสัมผัสระหว่างตัวนำและดิน
- ความต้านทานของดินรอบๆตัวนำ

2.2.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity)

หมายถึง ความต้านทานของดินที่วัดระหว่างด้านตรงข้ามของดินขนาด 1 x 1 x 1 ลูกบาศก์เมตรมีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร (Ω.m) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยต่างๆดังนี้

2.2.1.1 ชนิดของดิน

พื้นที่ที่ทำการตั้งเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงนั้นย่อมมีลักษณะและชนิดของดินแตกต่างกัน บางพื้นที่อาจมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มซึ่งมักจะพบว่าเป็นพวกดินร่วนหรือดินเหนียว บางพื้นที่ก็มีลักษณะเป็นภูเขา ชนิดของดินก็จะเป็นดินปนกรวดหรือหิน เป็นต้น ดังนั้นการจัดเรียงตัวของเม็ดดินย่อมแตกต่างกัน ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่พบส่วนมากในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.1

2.2.1.2 ความชื้น

สิ่งที่เกี่ยวข้องกับความชื้นมากที่สุดคือ ปริมาณน้ำหรือไอน้ำในดิน โดยจะพิจารณาถึงลักษณะพื้นที่และสภาพภูมิอากาศเป็นสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำจะมีความชื้นมากกว่าบริเวณเชิงเขา ลักษณะอากาศที่มีฝนตกย่อมมีความชื้นมากกว่าที่มีอากาศร้อน โดยที่ความชื้นมีผลกับความต้านทานจำเพาะโดยตรงก็คือว่า ถ้าดินบริเวณไหนมีความชื้นมากเท่ากับว่าดินบริเวณนั้นนำไฟฟ้าได้ดี ความต้านทานจึงน้อยนั่นเอง

2.2.1.3 ความเข้มข้นและส่วนประกอบของสารละลายเกลือ

สารละลายเกลือในดินมีผลต่อการนำไฟฟ้าของดินโดยเฉพาะปริมาณไอออนของโซเดียม (Na),แมกนีเซียม (Mg), โปแตสเซียม (K)

2.2.1.4 อุณหภูมิ

เป็นค่าที่มีความแปรเปลี่ยนมากที่สุด เนื่องจากว่าเครื่องมือที่วัดอุณหภูมิในดินแล้วให้ค่าที่ถูกต้อง แม่นยำยังไม่มี อีกทั้งดินที่ความลึกต่างๆกัน ย่อมมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน และค่อนข้างที่จะไม่มีค่าคงตัว แต่จากการวิเคราะห์พบว่าดินที่มีอุณหภูมิมากย่อมมีความต้านทานมาก

2.2.1.5 ความอัดแน่น

ความอัดแน่นของเนื้อดินจะพิจารณาในเรื่องของชั้นดินเป็นสำคัญ ดินที่ชั้นบนจะมีความอัดแน่นน้อยกว่าดินชั้นล่าง เนื่องจากดินชั้นล่างจะถูกกดทับโดยดินชั้นบนซึ่งดินที่มีค่าความต้านทานน้อย ก็คือ ดินที่มีความอัดแน่นน้อยนั่นเอง โดยจะส่งผลให้การดูดซับน้ำในดินไม่ดี เป็นต้น

โดยที่ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญเพราะเป็นตัวทำละลายเกลือต่างๆที่มีอยู่ในดิน สำหรับสูตรที่ใช้คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินคือ

$$\rho = 2\pi LR / \ln[(8L/D) -1]$$

$$R = \rho/2\pi L [\ln(8L/D) -1]$$

เมื่อ

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω.m)

L = ความยาวของแท่งสายดิน (m)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งสายดิน (m)

R = ค่าความต้านทานดินที่วัดได้ (Ω)

2.3 สภาพดิน

สภาพดิน ณ จุดต่างๆของประเทศอาจมีค่าความต้านทานของดินไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินและความชื้นในดินด้วย การสำรวจพื้นที่ในบริเวณที่จะก่อสร้างสถานีไฟฟ้า มักจะมีการสำรวจหาส่วนประกอบทั่วๆไปของดินในบริเวณนั้นตามไปด้วย ซึ่งตามปกติแล้วมักจะสำรวจโดยใช้เครื่องมือเจาะดินที่ความลึกต่างๆกัน ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการจะรู้ว่าชั้นดินบริเวณนั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

2.4 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินนั้น มีจุดประสงค์ที่จะนำตัวอย่างดินนั้นมาทำการวิเคราะห์ให้ทราบถึงสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และสมบัติอื่นๆของดิน เพื่อที่จะใช้ผลวิเคราะห์เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการพิจารณาการจัดการดิน ดังนั้นในการเก็บตัวอย่างดินต้องแน่ใจว่าเป็นตัวแทนของพื้นที่ที่ต้องการทราบข้อมูลทางดินนั้นอย่างแท้จริง

ตารางที่2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและหินชนิดต่างๆ

ที่มา : คู่มือแสดงการต่อกราวด์ในระบบ,การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะของดิน, ρ (Ω.m)
ดินร่วนเปียก	10 – 30
ดินเหนียว	50
ดินร่วนชื้น	100
ดินร่วนปนทราย	150
ทรายชื้น	200
ทรายแห้ง	1,000
ดินกรวดชื้น	500
ดินกรวดแห้ง	1,000
หิน	3,000 – 10,000

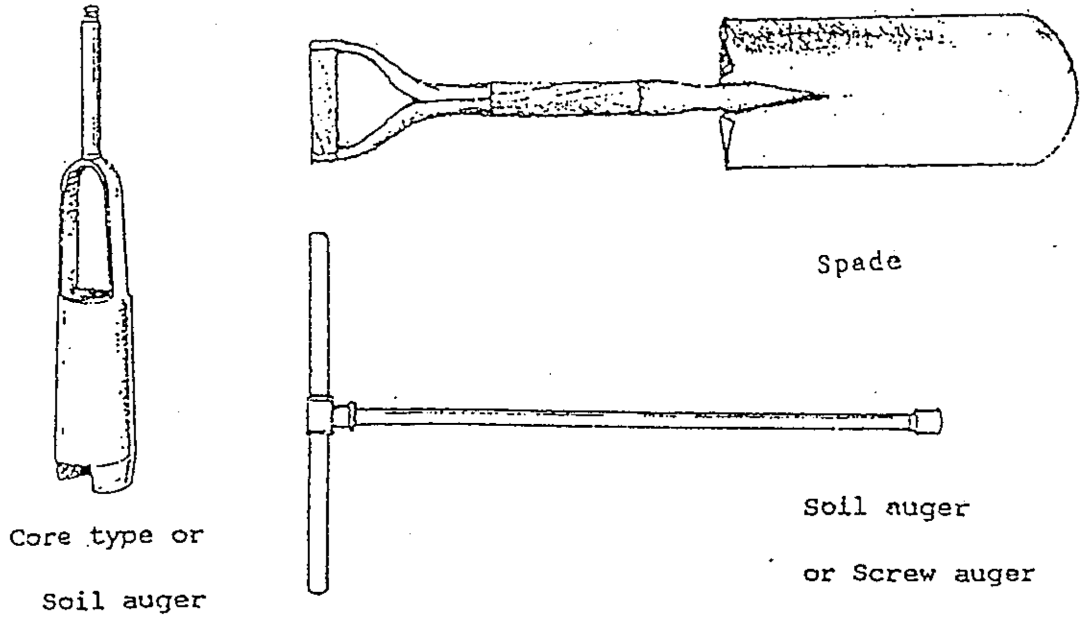
2.4.1 สว่านเจาะ (Soil auger) มีหลายแบบ บางแบบเหมาะสำหรับใช้ในการเจาะสำรวจดินโดยเฉพาะ บางแบบใช้ได้ทั้งการเจาะเพื่อสำรวจ และเพื่อเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ แต่โดยทั่วไปแล้วจะไม่ใช้เพื่อจุดประสงค์ของการเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เพราะตัวอย่างที่ได้จะมีคุณสมบัติบางประการทางฟิสิกส์เปลี่ยนแปลงไปเช่น ความหนาแน่น โครงสร้าง

2.4.2. หลอดเจาะ (Soil sampling tube) มีหลายแบบเช่นกัน ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์ เพราะเจาะได้ในระยะตื้นๆ ที่ส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณรากพืชเหมาะสำหรับเก็บดินที่ไม่มีกรวดหรือหินเจือปน เนื้อดิน (Texture) ของดินปานกลางคือไม่เหนียวหรือร่วนเกินไป และมีความชุ่มชื้นโดยประมาณ จะอย่างไรก็ตามหลอดเจาะนี้อาจทำให้โครงสร้าง (Structure) ของดินเปลี่ยนไปจากเดิมได้

2.4.3. กระบอกเจาะ (Core type) เครื่องมือชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะอย่างคือ ตัวอย่างดินที่ได้จากการใช้เครื่องมือนี้เราเรียกว่า undisturbed sample กล่าวคือโครงสร้างของดินจะยังคงรักษาแบบฉบับคงเดิมของมันไว้ไม่ถูกรบกวน ฉะนั้นเหมาะสำหรับการเก็บตัวอย่างดิน เพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ อาทิ โครงสร้างของดิน (Structure) ขนาดและปริมาณช่องว่าง (pore) เป็นต้น และยังได้วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางเคมีของดินในแต่ละชั้นดินได้ดีอีกด้วย

2.4.4. พลั่วหรือเสียม (Spade) เหมาะสำหรับดินแห้งและมีกรวดดินเจือปนมากๆ วิธีใช้สะดวก เป็นเครื่องมือที่ดีสำหรับเก็บตัวดินโดยทั่วๆไป เพื่อการวิเคราะห์โดยเฉพาะ

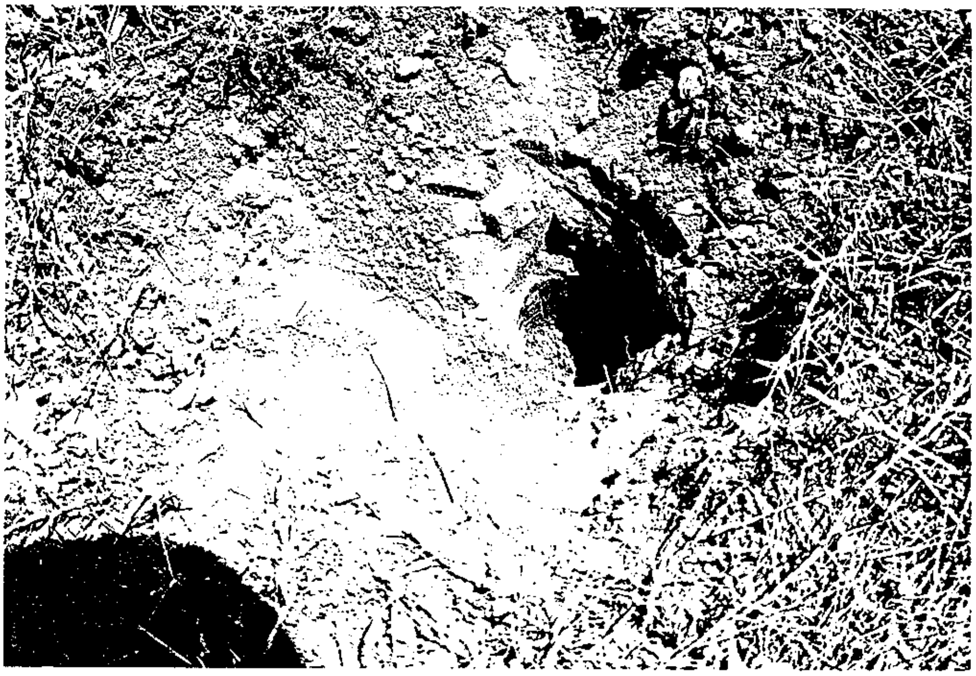
เครื่องมือเก็บตัวอย่างดินที่ดีควรจะทำด้วยโลหะไร้สนิม (Stainlessteel) หรือโลหะอื่นๆที่จะไม่ปะปนกับดิน



รูปที่ 2.1เครื่องมือการเก็บตัวอย่างดิน

2.5 วิธีเก็บตัวอย่างดิน

โดยหลักการถ้าใช้หลอดเจาะหรือสว่านเจาะจะต้องวางเครื่องมือที่ใช้ให้ตั้งได้ฉากกับผิวดินให้มากที่สุดที่จะทำได้ สำหรับความลึกของหลุมที่จะเจาะนั้น ในที่นี้ตั้งไว้ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตรและ 75 เซนติเมตรซึ่งเป็นระดับที่สามารถพบคุณสมบัติต่างๆของดินได้ ในสถานที่ที่เป็นดินอ่อนจะใช้จอบทำการเปิดหน้าดินก่อนแล้วใช้พลั่วหรือเสียมขุดหลุมได้โดยที่ความกว้างของปากหลุมประมาณ 30-50 เซนติเมตร เมื่อได้ความลึกตามระดับข้างต้นแล้วก็ทำการเก็บดินที่ความลึกนั้นใส่ไว้ในถุงพลาสติกแล้วมัดปากถุงให้แน่นซึ่งจะหุ้มด้วยถุงพลาสติกอีก 2 ชั้น ปริมาณการเก็บ ประมาณ 1 กิโลกรัมต่อหลุม



รูปที่ 2.2 การเก็บตัวอย่างดิน

สำหรับการนำดินไปหาความชื้นและความหนาแน่นนั้นจะใช้กระบอกเจาะ (Core type) ตอกลงในเนื้อดินเพื่อต้องการปริมาตรของดินที่แน่นอน ทำการเก็บที่ระดับความลึกเดียวกันกับข้างต้น เก็บในถุงพลาสติก 3 ชั้นมัดปากถุงให้แน่น เพื่อกันความชื้นระเหยออกสู่ภายนอก นำเก็บใส่ขวดแก้วหรือพลาสติกปิดฝาให้แน่น

หมายเหตุ: ดินในบางพื้นที่ซึ่งมีลักษณะเป็นหินแข็งหรือกรวดมีความยากลำบากในการขุดระดับความลึกก็ใช้ที่สามารถขุดได้ คือทำการขุดจนขุดไม่ได้และในบางพื้นที่ไม่สามารถที่จะใช้กระบอกในการเจาะได้

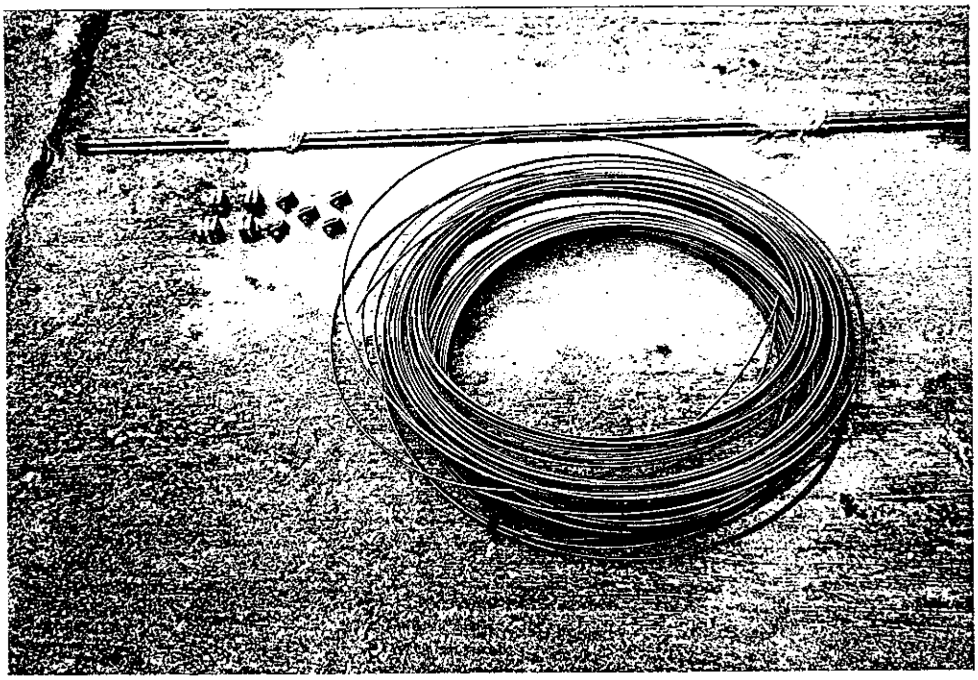
2.6 ส่วนประกอบของระบบดิน

2.6.1 จุดต่อลงดิน

ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีการต่อลงดินของสายโอเวอร์เฮด (O.H.G.-wire) ของระบบสายส่งซึ่งจะช่วยให้ระบบกราวด์ดีขึ้นเนื่องจากมีการต่อลงดินมากจุดขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากฟอลต์จะไหลลงทางดินได้ดีขึ้น

2.6.2 สายดิน

คือ สายตัวนำที่นำกระแสไฟฟ้าไหลลงดินโดยผ่านแท่งสายดิน ดังนั้นสายดินควรทำด้วยโลหะที่นำกระแสไฟฟ้าได้ดีเช่น ทองแดง แต่เนื่องจากทองแดงมีราคาแพงทำให้ต้องลงทุนสูง จึงอาจเปลี่ยนไปใช้สายเหล็กอาบสังกะสี หรือสายเหล็กอาบทองแดงที่มีทั้งแบบกลม แบนและตีเกลียว แต่ที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นแบบสายเหล็กอาบทองแดงชนิดกลม ข้อควรคำนึงสำหรับการต่อสายดินคือ สายดินที่ฝังไว้จะมีจุดต่อที่สามารถตรวจสอบได้โดยง่ายและต่ำจากจุดตรวจสอบนี้ไปจะต้องไม่มีการต่อ สายใดๆนอกจากต่อตรงไปยังแท่งสายดิน



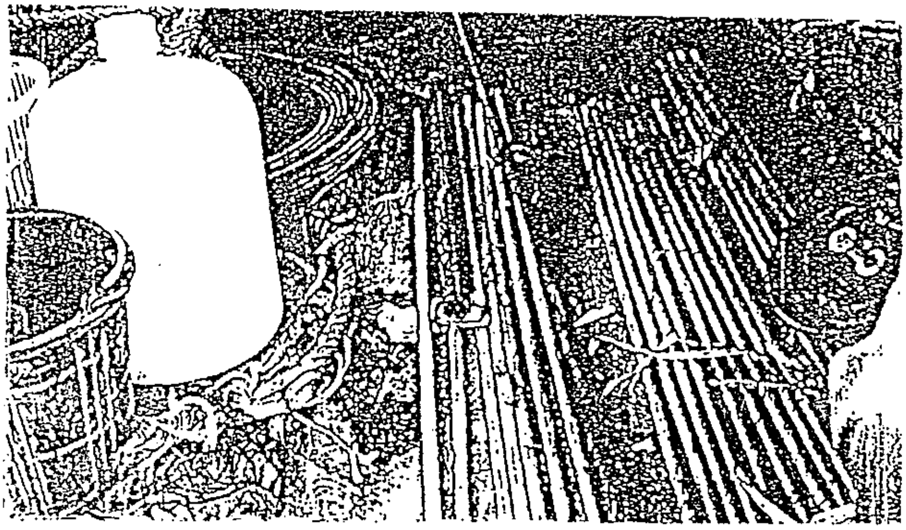
รูปที่ 2.3 สายดิน

2.6.3 แท่งสายดินหรือหลักดิน

แท่งสายดิน (Ground rod or Earth electrode) มีหลายแบบเช่น แท่งกลมยาว (Driven rod, pipe)ยาวอย่างน้อย 2.4 เมตร (8 ฟุต) แถบตัวนำ (Strip) ยาวอย่างน้อย 2.4 เมตร (8 ฟุต) แผ่นตัวนำ (Plate) มีพื้นที่อย่างน้อย 0.186 ตารางเมตร (2 ตารางฟุต) ตัวนำเปลือย (Bare conductor) และแบบต่อเป็นตาข่ายเป็นต้น แท่งสายดินนี้จะต่อจากสาย Ground lead ฝังลงไปในดินเพื่อวัตถุประสงค์

ในการนำกระแสไฟฟ้าจากสาย Ground lead ให้กระจายลงไปในดินให้ดีที่สุด ดังนั้นแท่งสายดินจึงควรทำด้วยโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีเช่น ทองแดง แต่เนื่องจากทองแดงมีราคาแพงจึงได้เปลี่ยนเป็นแท่งเหล็กกลมอาบทองแดง ซึ่งได้นำมาแทนด้วยก็ได้

จุดต่อระหว่างแท่งสายดินกับสายดิน มีความสำคัญเช่นเดียวกับจุดต่อทางไฟฟ้าอื่นๆ ดังนั้นถ้าต้องการให้จุดต่อดีที่สุดควรใช้วิธีการเชื่อมแท่งสายดินกับสายดินเข้าด้วยกันโดยใช้แบบความร้อนสูงเฉียบพลัน (Exothermic process)



รูปที่ 2.4 แท่งหลักดิน

2.7 การดำเนินงานของแท่งสายดิน (Performance of Earth Electrode)

การออกแบบระบบดิน (Earthing system) โดยทั่วไปคำนึงอยู่ 2 อย่างคือค่าอิมพิแดนซ์ (impedance) และความเชื่อมั่นในเรื่องของแรงดันสัมผัสและแรงดันระยะก้าว (Touch and Step potentials) ที่เหมาะสมในกรณีหลักๆคือต้องการลดค่าเหล่านี้ในการออกแบบระยะเริ่มต้น โดยคำนึงถึงค่าอิมพิแดนซ์เป็นสำคัญซึ่งมีความสำคัญกับการป้องกันผลจากค่าอิมพิแดนซ์คือ เส้นผ่านศูนย์กลางและคุณสมบัติของแท่งสายดินและเงื่อนไขของดิน (องค์ประกอบของดินและส่วนประกอบของน้ำเป็นต้น)

ในระบบดินประกอบด้วยค่าความนำของโลหะบนผิวดิน (พันธะของการนำเป็นต้น) แท่งโลหะในดินและดินที่อยู่รอบๆซึ่งแต่ละกรณีมีค่าอิมพิแดนซ์เฉพาะอยู่โดยมีอิทธิพลอย่างมากกับระบบดินคือ ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ในหน่วย โอห์ม.เมตร ค่าความต้านทานที่จุดเชื่อมและที่ผิวของโลหะจะให้มีค่าน้อยที่สุดโลหะที่ใช้จึงต้องมีความนำไฟฟ้าที่ดีคือทองแดงเสียเป็นส่วนใหญ่

ในระบบของแท่งโลหะที่ให้ค่าอิมพิแดนซ์เพื่อให้กระแสไหลผ่านประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำแท่งสายดิน (electrode), ค่าความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างแท่งสายดินกับดินรอบๆและสุดท้ายค่าความต้านทานของดินรอบๆ

ค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำแท่งสายดินต้องมีค่าน้อยๆ ประกอบด้วยค่าอิมพิแดนซ์ตามความยาวของแท่งตัวนำและตัวนำตามแนวนอน คุณสมบัติของโลหะที่ใช้และพื้นที่ภาคตัดขวางในส่วนทางไฟฟ้าทองแดงจะดีกว่าเหล็ก

2.7.1 กระแสตรงและกระแสสลับความถี่ต่ำไหลลงดิน

การออกแบบและสร้างระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า นอกจากจะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงทางกลและความร้อนที่มีผลมาจากกระแสอันเนื่องมาจากความผิดพร่องในระบบ (เพื่อให้ได้ระบบที่มีความมั่นคงและเชื่อถือได้) เช่นการลัดวงจรเป็นต้น ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของคนและสัตว์ด้วย อันตรายสำคัญประการหนึ่งที่อาจเกิดแก่คนและสัตว์อันเป็นผลสืบเนื่องจากการลัดวงจรกระแสลงดิน (เช่นสายไฟขาดลงดินวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย เกิดเบรคดาวน์ลงดิน) ในดินที่มีความต้านทานซึ่งมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน จึงทำให้เกิดความต่างศักดิ์ระหว่างดินที่คนยืนอยู่กับตัวนำต้องลงดินที่คนสัมผัสอยู่ในบริเวณนั้น เรียกว่าแรงดันสัมผัส (Touching voltage) และความต่างศักดิ์ระหว่างช่วงก้าวบนดินเรียกว่า (Step voltage) ถ้าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวมีค่าสูงมากเกินไปจะเกิดอันตรายแก่คนและสัตว์ในบริเวณที่เกิดความผิดพร่อง อันตรายดังกล่าวป้องกันได้โดยการต่อระบบสายดินที่ถูกต้อง คือระบบสายดินจะป้องกันมิให้แรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าวเกินขีดอันตรายเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้น ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบสายดินคือ รากสายดิน (Earthing electrode) ซึ่งเป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าฝังดิน เช่นทองแดง เหล็กหุ้มทองแดง เหล็กอาบสังกะสี กล่าวคือความต้านทานที่ดีควรจะมีค่าต่ำ ความต้านทานที่จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน รูปร่างและการจัดวางเชิงเรขาคณิตของรากสายดิน ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินสูงเราอาจทำให้ความต้านทานของระบบสายดินมีค่าต่ำลงโดยเลือกใช้สายดินที่มีรูปร่างที่เหมาะสมจำนวนและความลึกของการฝังรากสายดินให้มากพอ

สนามไฟฟ้าของกระแสไหลกับสนามไฟฟ้าสถิตย์มีความสัมพันธ์ในลักษณะคล้ายกันคือ

ในสนามไฟฟ้าสถิตย์	ในสนามไฟฟ้ากระแสไหล
$D = \varepsilon E$	$J = \sigma E$
$Q = CU$	$I = U/R$

ฉะนั้นจึงอาศัยกฎการคำนวนสนามไฟฟ้าสถิตย์มาใช้คำนวนหากระแสไฟฟ้าไหลได้ คือ

$$I = {}_A\square\, J\, dA$$

เมื่อ A คือพื้นที่ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

สมมติมีตัวจ่ายกระแสเข้าไปในตัวกลางมีสภาพนำไฟฟ้า σ ให้อิเลคโตรดที่กระแสเป็นทรงกลมฝังลึกอยู่ในดินซึ่งมีสายนำกระแสหุ้มฉนวน พื้นผิวของสายนำมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอิเลคโตรดทรงกลม เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลไปได้ทุกทิศทุกทางรอบตัวอิเลคโตรดทรงกลมที่มีรัศมี **r** ของกระแสเท่ากัน ห่างจากตันนำจ่ายกระแสและมีความหนาฉะนั้นสมการข้างต้นจึงเขียนได้ว่า

$$I = 4\pi r^2 J$$

จากกฎของโอห์มจึงได้

$$I = 4\pi r^2 \sigma E$$

สนามไฟฟ้าในตัวกลางที่มีรัศมี r คือ

$$E(r) = Ir / 4\pi r^2 \sigma$$

ในที่นี้

$$E(r) = I / 4\pi r^2 \sigma$$

ฉะนั้นศักย์ไฟฟ้าที่อิเลคโตรดทรงกลมซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกระแสจึงมีค่าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าศูนย์คือที่มีรัศมี $r = \infty$

จึงคำนวณได้ $$V(r) = \int_r^{\infty} E(r)\, dt$$

แทนค่า E(r) จะได้

$$V(r) = \frac{I \int_r^{\infty} (dr/r^2)}{4\pi\sigma}$$

$$= I/4\pi r\sigma$$

ถ้าอิเลคโตรดทรงกลมมีรัศมี r_0 และมีกระแสไหลไปเท่ากับ I จะมีศักย์ไฟฟ้า V_e

$$V_e = I/4\pi r\sigma$$

2.7.2 ความต้านทานของสายดิน

ความต้านทานของตัวกลาง (ดิน) ที่กระแสแผ่กระจายออกไปจากสายดิน เรียกว่าความต้านทานสายดิน คือ

$$R_e = V_e / I = \frac{\text{ศักย์ไฟฟ้าของรากสายดิน}}{\text{กระแสที่แผ่กระจายออกไป}}$$

ความต้านทานนี้ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของสายดินสามารถคำนวณได้ถ้าทราบลักษณะทางเรขาคณิตของสายดิน

2.7.2.1 รากสายดินทรงกลม

รากสายดินทรงกลมรัศมี ฝังอยู่ในดินที่มีสภาพความนำ มีศักย์ไฟฟ้าที่ผิวรากสายดินคือ

$$V_e = I/4\pi r\sigma$$

แรงดันระหว่างพื้นผิวทรงกลมอิเลคโตรดรากสายดินรัศมี r_0 กับจุดใดๆรัศมี r จากอิเลคโตรดจะมีค่า

$$U = [I/4\pi r\sigma][(1/r_0) - (1/r)]$$

หรือแรงดันระหว่างรัศมีทรงกลม r_2 และ r_3 จะเท่ากับ

$$U = [I/4\pi r\sigma][(1/r_2) - (1/r_3)]$$

ฉะนั้นความต้านทานรากสายดินจึงคำนวณได้

$$R_e = V_e / I = I/4\pi r_0\sigma$$

$$R_e = \rho/4\pi r_0$$

เมื่อ ρ คือความต้านทานจำเพาะของตัวกลาง $1/\sigma$

2.7.2.2 รากสายดินครึ่งทรงกลม

ถ้ารากสายดินทรงกลมฝังไม่ลึกจากผิวดินจึงเสมือนหนึ่งว่าเพียงครึ่งทรงกลมที่ฝังดิน สมมติว่าอิเลคโตรดฝังดินเพียงครึ่งทรงกลมดังในรูปพื้นผิวทรงกลมอิเลคโตรดที่กระแสไหลผ่านออกไปสู่ตัวกลางที่มีค่าเพียงครึ่งเดียวของทรงกลมความหนาแน่นของกระแสที่พื้นผิวอิเลคโตรดจะเพิ่มขึ้นเท่าตัว คือ

$$V_e = I/2\pi r_0\sigma$$

และแรงดันระหว่างอิเลคโตรดครึ่งทรงกลมกับจุดที่รัศมี จะมีค่า

$$U = [I/2\pi r\sigma][(1/r_0) - (1/r)]$$

ความต้านทานของรากสายดินครึ่งทรงกลมจึงคำนวณได้

$$R_e = I/2\pi r_0\sigma = \rho/2\pi r_0$$

2.7.2.3 รากสายดินแท่งทรงกระบอกฝังดิ่ง

ในทางปฏิบัติมักจะใช้แท่งทรงกระบอก (Rod) เป็นรากสายดิน โดยฝังดิ่งลึกลงไปในดิน ความต้านทานของรากสายดินแท่งกลมคำนวณได้ดังนี้

$$R_e = (\rho/2\pi\square)(4\square/d_0)$$

d_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมทรงกระบอก

l = ความยาวยังผลของรากสายดิน ในกรณีดินแห้งให้คิดตั้งแต่ผิวดินลงไป คือ ลึกจากผิวดินลงไป 0.5 ถึง 1 เมตร

2.7.3 แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

แรงดันช่วงก้าวหมายถึงความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนพื้นผิวดินที่มีกระแสไหลผ่านลงไป โดยที่สองจุดนั้นห่างกันเท่ากับช่วงก้าวของคน คือ เกิดความต่างศักย์ระหว่างซ้ายกับเท้าขวาในขณะก้าว ซึ่งมักจะคิดช่วงก้าวเท่ากับ 1 เมตร ส่วนแรงดันสัมผัส คือ ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำหรือโครงสร้างที่กระแสไหลผ่านไปสู่รากสายดินที่คนมีโอกาสสัมผัสกับพื้นดินที่คนยืนอยู่

เมื่อมีกระแสไหลผ่านอิเลคโตรดรากสายดินแผ่กระจายออกไปในดิน จะเกิดแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสเป็นอันตรายแก่คนหรือก็ขึ้นอยู่กับแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสนั้น ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายเกินขีดกระแสที่อันตรายหรือไม่มาตรการแห่งการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ได้กำหนดแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสอันตรายไว้เท่ากับ 50 โวลท์ในประเทศเยอรมันและประเทศอื่นๆในยุโรปได้กำหนดแรงดันอันตรายนี้ไว้เท่ากับ 65 โวลท์ โดยคิดเวลาที่กระแสไหลผ่านไม่เกิน 5 วินาที

แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสที่ก่อให้เกิดอันตรายมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ยืนและลักษณะของแรงดันกระจาย (Voltage distribution) พิจารณาพื้นผิวรากสายดินแบบครึ่งวงกลมฝังดิน ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของรากสายดินเทียบกับจุดที่ไกลออกไปเท่ากับอนันต์ คือ

$$U_e = I\rho/2\pi r_0$$

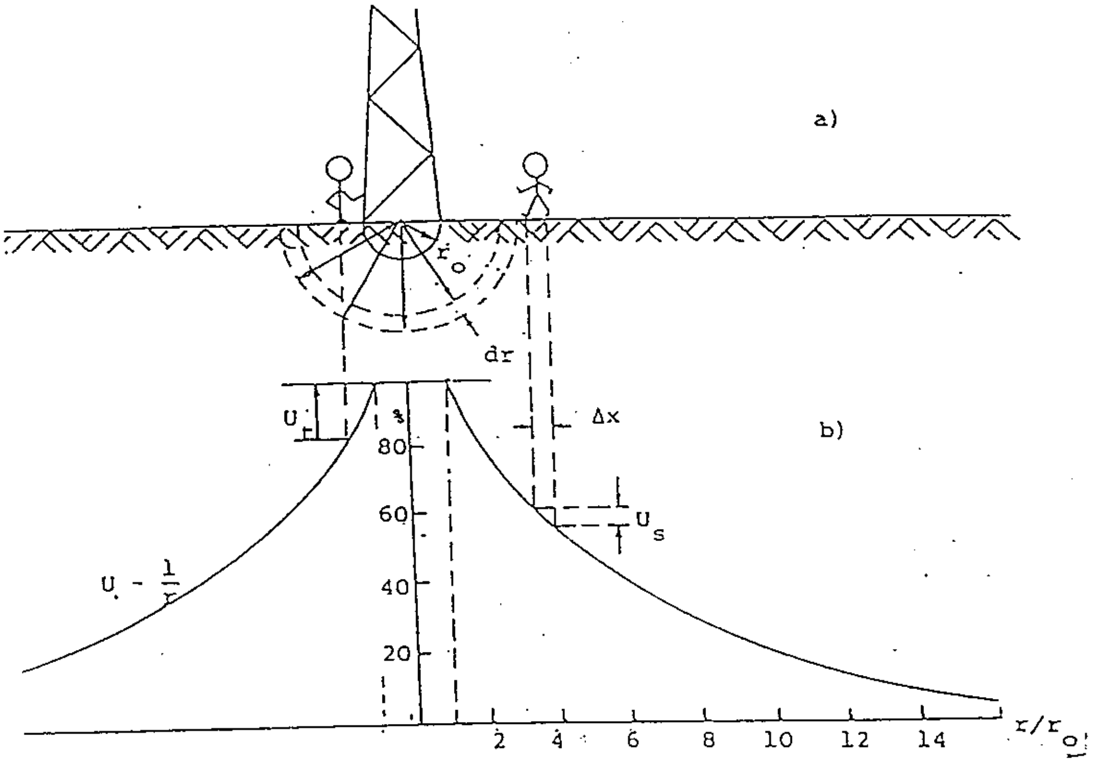
แรงดันที่จุดใดๆบนพื้นผิวดินก็คือ ศักย์ไฟฟ้า ณ จุดนั้นเทียบกับจุดที่ระยะอนันต์ คือ

$$U_r = I\rho/2\pi r$$

เมื่อคิดเทียบแรงดันที่ผิวรากสายดินจะได้ความสัมพันธ์

$$U_r/U_e = r_0/r$$

นั่นคือแรงดันจะลดลงเป็นสัดส่วนกลับกับระยะห่างออกไปจากรากสายดินดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แรงดันสัมผัส และแรงดันระยะก้าว

a). เสาไฟฟ้ามีรากสายดินรูปครึ่งทรงกลมรัศมี r_0

b). เส้นกราฟแสดงแรงดันกระจายในเทอมระยะห่าง x

Us = แรงดันช่วงก้าว

Ut = แรงดันสัมผัส

ในรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแรงดันกระจายคิดเป็นอัตราส่วน U_r/U_0 ในเทอมของ r/r_0 เส้นกราฟจะได้สมมาตรรอบแกนดิ่งของรากสายดิน ในบริเวณใกล้ๆรากสายดินศักย์ไฟฟ้าจะสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะใกล้ $r/r_0 < 3$ แต่เมื่อระยะห่างออกไปมากๆศักย์ไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงเช่นระยะห่าง $r/r_0 = 100$ ศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเหลือเพียง 1% ของศักย์ไฟฟ้าที่รากสายดินแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสอาจจะจำกัดให้มีค่าต่ำโดยการออกแบบระบบรากสายดินให้มีความต้านทานของสายดินต่ำๆ ถ้าหากดินมีความต้านทานจำเพาะสูงก็ฝังรากสายดินให้ลึกมากขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น และค่าโอห์มจะต่ำลงถ้าเชื่อมโยงรากสายดินเหล่านี้เข้าด้วยกันเป็นวงแหวน หรือเป็นตาข่าย ในกรณีใช้รากสายดินหลายอันระยะห่างระหว่างรากสายดินแต่ระอันจะต้องห่างมากพอเมื่อเทียบกับความยาวของรากสายดินที่ฝังลึกลงไป ถ้ารากสายดินเป็นแท่งฝังดิ่งระยะห่างระหว่างแท่งต้องไม่น้อยกว่าหนึ่งเท่าของความยาวแท่งสายดิน

2.7.4 กระแสทรานเซียนไหลลงดิน (Transient earth current)

กระแสทรานเซียนหมายถึงกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เป็นกระแสที่มีความชัน (steepness $s = \Delta I / \Delta t$) สูงเกิดขึ้นในช่วงเวลาอันสั้นและไม่เป็นคาบเช่น กระแสฟ้าผ่าซึ่งบางครั้งเรียกว่ากระแสอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า หรือกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน หรือกระแสผิดพร่องอย่างฉับพลันลงสู่พื้นดิน กระแสก็จะกระจายลงไปในดิน ในทำนองเดียวกันกระแสตรงและกระแสสลับสภาวะคงตัว (Steady state) ในกรณีกระแสทรานเซียนนั้นความลึกที่กระแสไหลเข้าไปในพื้นดินนั้นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ และลักษณะของดินสมมุติว่าดินเป็นตัวนำที่มีพื้นที่ความกว้างเป็นอนันต์ ความลึกที่กระแสความถี่สูงไหลเข้าไปในพื้นดินอาจคำนวณได้จากสมการ

$$h_1 = 1/\sqrt{(\sigma\mu\pi f)}$$

เมื่อ h คือความลึกที่กระแสไหลเข้าไปในดินที่มีความหนาแน่นของกระแสเหลือเพียง 37% ของความหนาแน่นกระแสที่ผิวดิน

f คือ ความถี่ของกระแส

σ คือ สภาพความนำของดิน

μ คือ เปอร์มีบิลลิตี้ของดิน $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

เมื่อแทนค่า $4\pi \times 10^{-7}$ H/m จะได้สมการของ h_1 เป็น

$$h_1 = 10^4/\sqrt{(10\sigma f)}$$

ขนาดความหนาแน่นกระแสที่ความลึก $h_k = kh_1$ อาจหาได้จากความสัมพันธ์

$$|J_{hk}| = J_0 e^{-k}$$

$|J_0|$ คือความหนาแน่นของกระแสที่ผิวดิน

ที่ความลึก h_1 คือ k=1 ความหนาแน่นของกระแสเหลือเพียง 37% และที่ความลึก 2π เท่าของ h_1 คือ $k = 2\pi$ ความหนาแน่นของกระแสจะเหลือเพียง 0.19% ของกระแสที่ไหลเข้าที่ผิวดิน

ความลึกของกระแสที่ไหลเข้าไปในดิน h_1 โดยคิดที่ความต้านทานจำเพาะของดินสองชนิด คือ ρ = 100 Ω.m เป็นดินทราย ที่ความถี่ค่าต่างๆจากความถี่ พลังงาน 50 Hz ถึงความถี่สูงๆ ซึ่งเป็นย่านความถี่ของกระแสฟ้าผ่า (ดังสเปกตรัมความถี่ของกระแสฟ้าผ่ารูปคลื่นต่างๆ) ในความถี่ 1MHz ความลึกของกระแสที่ไหลลึกลงไปในดินเพียงไม่กี่เมตร ฉะนั้นรากสายดินของระบบป้องกันสำหรับกระแสฟ้าผ่าจึงไม่ควรใช้ลักษณะแถบยาวๆ แต่ควรทำในลักษณะที่เป็นรัศมี

สั้นแผ่กระจายออกไปทุกทิศทาง ซึ่งจะช่วยให้ความหนาแน่นของกระแสเริ่มแผ่ไปสู่ดินมีความต่ำลงด้วย

ผลที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสทรานเซียนที่แตกต่างไปจากกระแสคงตัวที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายดินที่มีความเหนียวนำคือสายดินที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและต่ออยู่กับรากสายดิน (Earth electrode) ที่มีความต้านทานดิน Re จะเกิดแรงดันตกคร่อมที่สายดินเป็น Δu คือ

$$\Delta u = iR_e + L(di/dt)$$

เมื่อ Re คือ ความต้านทานของสายดิน

L คือ ความเหนี่ยวนำของสายนำลงดินมีค่าประมาณ 1 μh/m

I คือ กระแสฟ้าผ่าประมาณ 20-30 kA (ค่าที่ 50%ของความน่าจะเป็น)

di/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงหน้าคลื่นประมาณ 10-100 kA/ μsec

ตัวอย่างสมมุติค่าความต้านทานของสายดิน Re = 0.1 Ω และสายตัวนำลงดินมีความยาว 10 m เกิดกระแสฟ้าผ่าค่ายอด 20 kA ซึ่งมีความชัน s = 30 kA/ μsec แรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากความเหนี่ยวนำของตัวนำเป็นส่วนใหญ่แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นต่อความยาวจะมีค่า

$$\hat{u} = 30 \text{ kV/m}$$

เพราะฉะนั้น สายนำมีความยาว 10 เมตร จะเกิดแรงดันเกินที่สายดินที่ระดับสูง 10 เมตร มีค่าสูงถึง 30 kVซึ่งทำให้เกิดวาบไฟด้านข้างไปสู่สวนที่ต่ออยู่กับดิน (Side flashing) หากเป็นสายที่ขึงตรึงในอากาศจะป้องกันการเกิดวาบไฟด้านข้างได้ จะต้องให้มีช่องว่าง (Clearance) ห่างถึง 50 เมตร เช่น ท่อน้ำประปา (โลหะ) สายไฟแรงต่ำ อาคารคอนกรีต โครงเหล็ก

ตารางที่ 2.2 ความลึกของกระแสที่ไหลลงเข้าไปในดิน
(ที่มา : วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ,ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

ความถี่ของกระแส f(Hz)	ความลึก h_1* (m)	
	ρ** = 100 Ω. m	ρ** = 1000 Ω . m
50	711	2251
100	503	1592
1,000	159	503
10,000	50	159
100,000	16	50
1,000,000	5	16

โดยที่ h_1 คือความลึกที่ความหนาแน่นกระแสลดลงเหลือ 1/e ของที่ผิวดิน

ρ คือความต้านทานจำเพาะของดิน

2.7.5 ผลของรูปร่าง ขนาดและตำแหน่งของแท่งสายดิน (Effect of Electrode Shape , Size and Position)

ส่วนที่ครอบคลุมของค่าอิมพิแดนซ์คือ ส่วนทางกายภาพที่ปรับให้เหมาะสมของระบบดิน แสดงอยู่ในกราฟที่ 2.1 ถึง 2.6 แทนผลของการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกับค่าอิมพิแดนซ์ที่สามารถออกแบบให้เหมาะสม

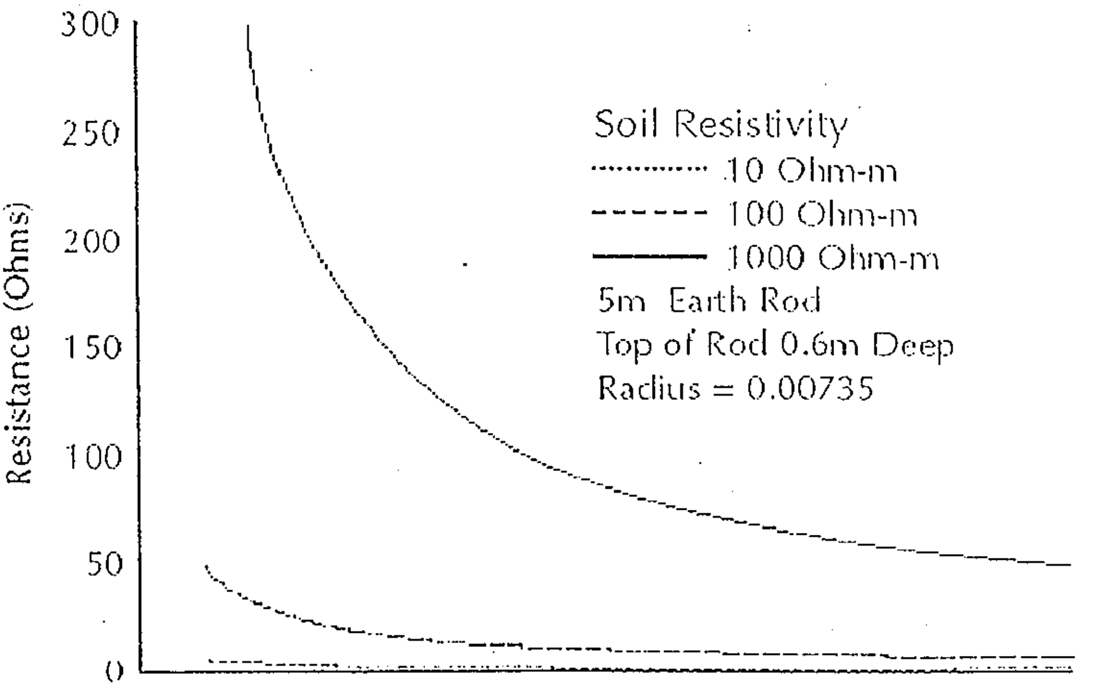
2.7.6 การเพิ่มการฝังความลึกของแท่งตัวนำ (Vertical rod) ในดินสม่ำเสมอ (Increasing the buried depth of a vertical rod in uniform soil)

กราฟที่ 2.1 แสดงผลที่ได้รับจากดินกับความต้านทานต่างๆกัน โดยการเพิ่มความยาวของแท่งตัวนำที่ฝังลงไปเป็นการปรับปรุงค่า P.U (Per unit length) ที่ลดลงกับความยาวของแท่งตัวนำที่เพิ่มขึ้น กราฟแสดงถึงการใช้งานในดินชั้นเดียว (Uniform soil) การลดลงของค่าความต้านทานโดยความยาวของแท่งตัวนำอาจจะต้องมีการออกแบบเฉพาะในดินไม่สม่ำเสมอที่ไม่ใช่ดินชั้นเดียว (Non – Uniform soil) แสดงในกราฟที่ 2.2 เป็นการปรับปรุงค่าความต้านทานของหลักดิน เมื่อเพิ่มความยาวของแท่งตัวนำในดินที่มี 3 ชั้น โดย 2 ชั้นบนสุดจะมีค่าความต้านทานสูงและลึกลงมาได้ 6 เมตร ค่าความต้านทานจะแผ่กระจายไปทั่วทั้งชั้นเนื่องจากค่าความต้านทานของดินรอบๆ แท่งตัวนำมีค่าสูง

ดังนั้นค่าความต้านทานของแท่งตัวนำที่เพิ่มมากขึ้น รวมเอาค่าความต้านทานทั้งหมดเนื่องจากความยาวของแท่งตัวนำที่เพิ่มมากขึ้น ผลเนื่องจากความลึกภายในดินกับสมบัติทางไฟฟ้า

ในกรณีที่มีการเพิ่มความยาวของแท่งตัวนำในการติดตั้ง เพื่อปรับปรุงการใช้งานให้ลึกกว่าในแบบของดินชั้นเดียว แท่งตัวนำหนึ่งแท่งระบบขยายประมาณ 15 เมตร ให้ความแตกแต่งเพียงเล็กน้อยกับค่าความต้านทานของแท่งตัวนำ ในโครงสร้างของดินนี้เมื่อเทียบกับสม่ำเสมอ มีค่าความต้านทานจำเพาะ 60 โอห์ม/เมตร ดังนั้นค่า P.U ที่ปรับปรุงกับการเพิ่มขึ้นของระยะในการติดตั้งเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ในกรณีของดินสม่ำเสมอ

ในเงื่อนไขของดินแทนในกราฟที่ 2.2 มีความสำคัญกับส่วนหัวของแท่งตัวนำ ที่มีความต้านทานตามแนวยาวต่ำ (low longitudinal resistance) เหมือนกันในส่วนที่ใช้เชื่อมเพื่อประโยชน์ของหลักดินที่อยู่ด้านล่างลงไปโดยใช้ทองแดงที่ด้านส่วนหัวหรือใช้กับส่วนที่เป็นแผ่น ในการเพิ่มภาคตัดขวางในพื้นที่จำกัด การใช้แท่งตัวนำแบบแนวดิ่ง (Vertical rod) จะให้ผลที่ดีกว่าแต่ก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของดินด้วยแท่งตัวนำแบบแนวดิ่งเพิ่มระดับความน่าเชื่อถือกับค่าความต้านทานของดินในระบบโดยทั่วไปจะต้องการความยาวที่เพียงพอกับตารางองค์ประกอบน้ำ (Water Table) และใต้เส้นเยือกแข็ง (Freezing Line) ขึ้นอยู่กับเหตุผลของความลึกที่ตำแหน่งนั้นๆซึ่งค่าอิมพิแดนซ์ควรจะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากค่าของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำ



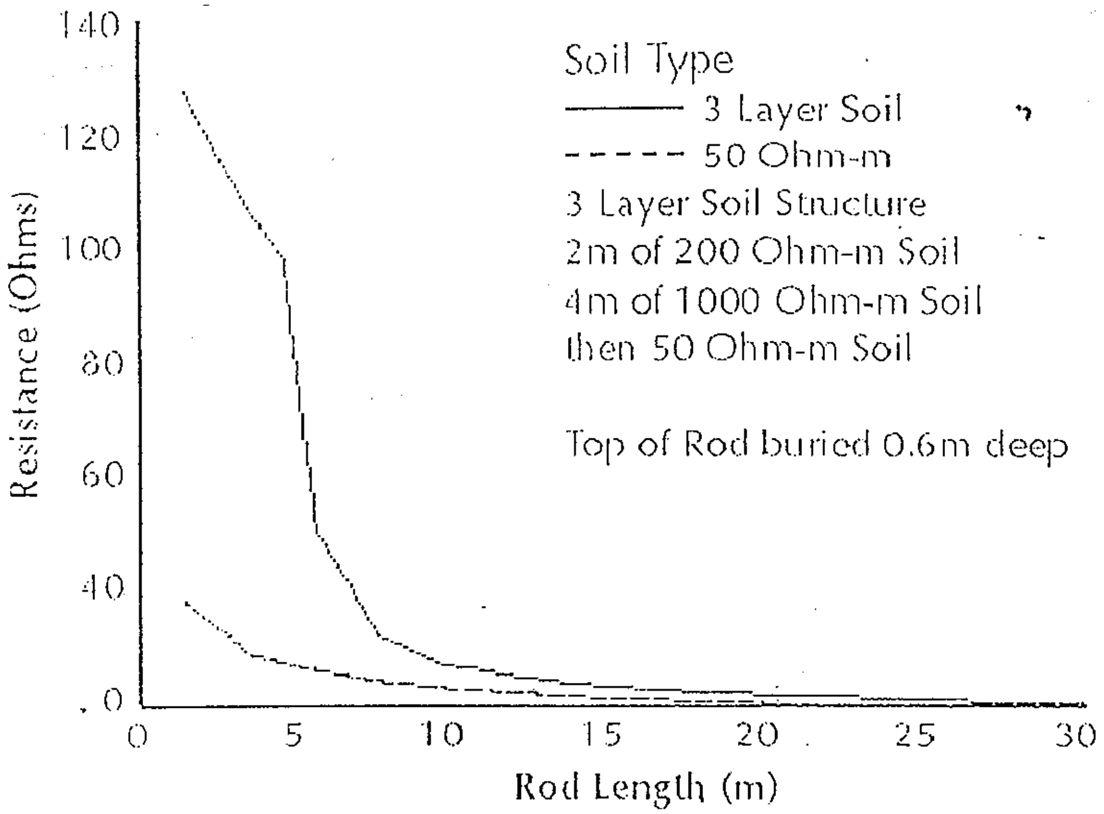
กราฟที่ 2.1 ค่าความต้านทานกับความยาวของแท่งตัวนำทรงตัน

2.7.7 การเพิ่มความยาวของตัวนำในแนวนอน (Increasing the length of a horizontal conductor)

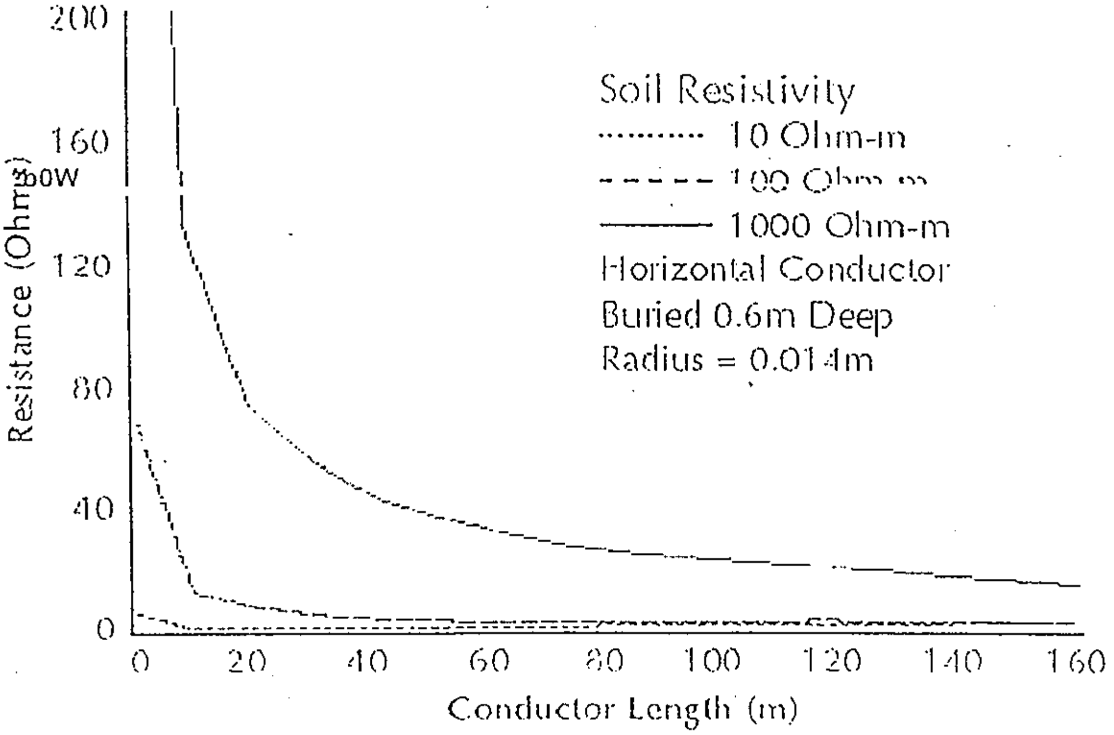
ในกราฟที่ 2.3 แสดงผลที่ได้จากความแตกต่างในดินกับค่าความต้านทานโดยการเพิ่มความยาวของแท่งหลักดินที่วางนอนตามแนวระดับ การคำนวณตามตัวอย่างไม่คำนึงถึงค่าอิมพิแดนซ์เชิงเส้น (Linear impedance) ของตัวนำการปรับปรุงค่าความยาวของP.U. จะลดลงดังนั้นความยาวของหลักดินจะเพิ่มขึ้นแถบที่วางในแนวนอนโดยทั่วไปเป็นทางเลือกที่ดีมีการจัดวางแท่งตัวนำในหลายทิศทางในอนาคตการเพิ่มขึ้นเป็นไปได้ที่จะลดลงแม้จะไม่ถึง 50 % ก็ตามการใช้ประโยชน์มีบ่อยมากขึ้นกับงานในการลดค่าความต้านทานของฟ้าผ่า

2.7.8 การเพิ่มขนาดความยาวของระบบดินแบบตารางสี่เหลี่ยมหรือแผ่น (Square Earth grid or Plate)

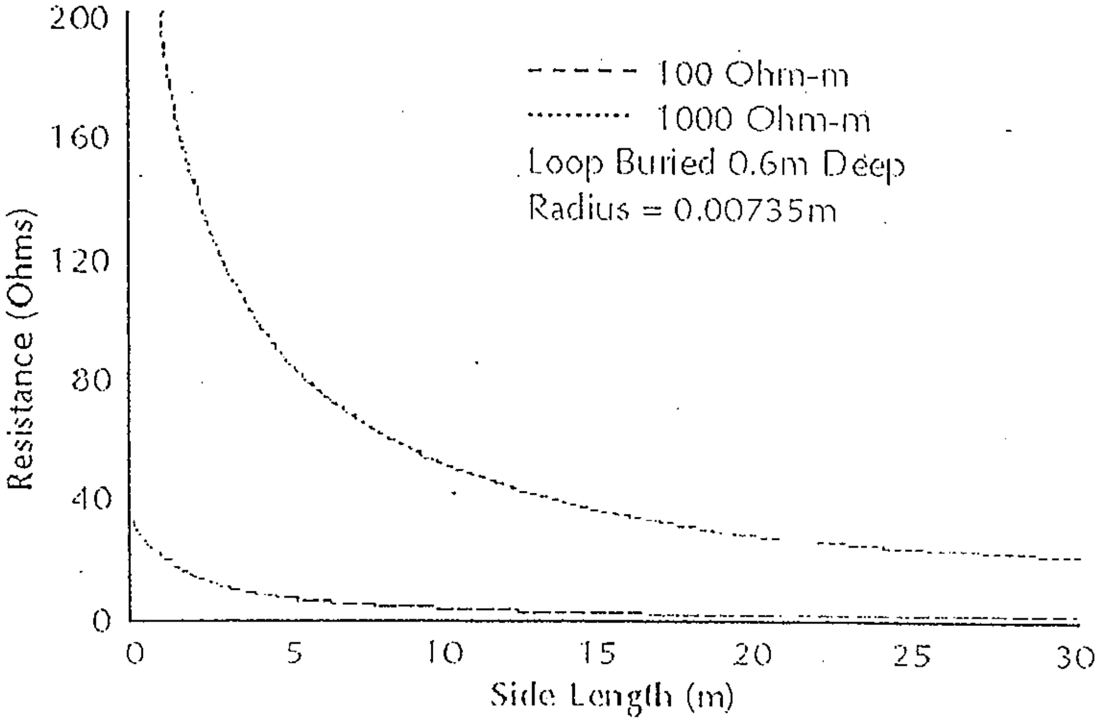
ในกราฟที่ 2.4 แสดงผลที่ได้รับค่าความแตกต่างความต้านทานของดินโดยการเพิ่มความต้านทานของพื้นที่วงปิดโดยหลักดินซึ่งใช้ลดค่า P.U. ของพื้นที่และลดค่าความต้านทานเป็นสำคัญ



กราฟที่ 2.2 ค่าความต้านทานกับความยาวแท่งตัวนำทรงตันในดิน



กราฟที่ 2.3 ค่าความต้านทานกับความยาวแท่งตัวนำแนวนอน



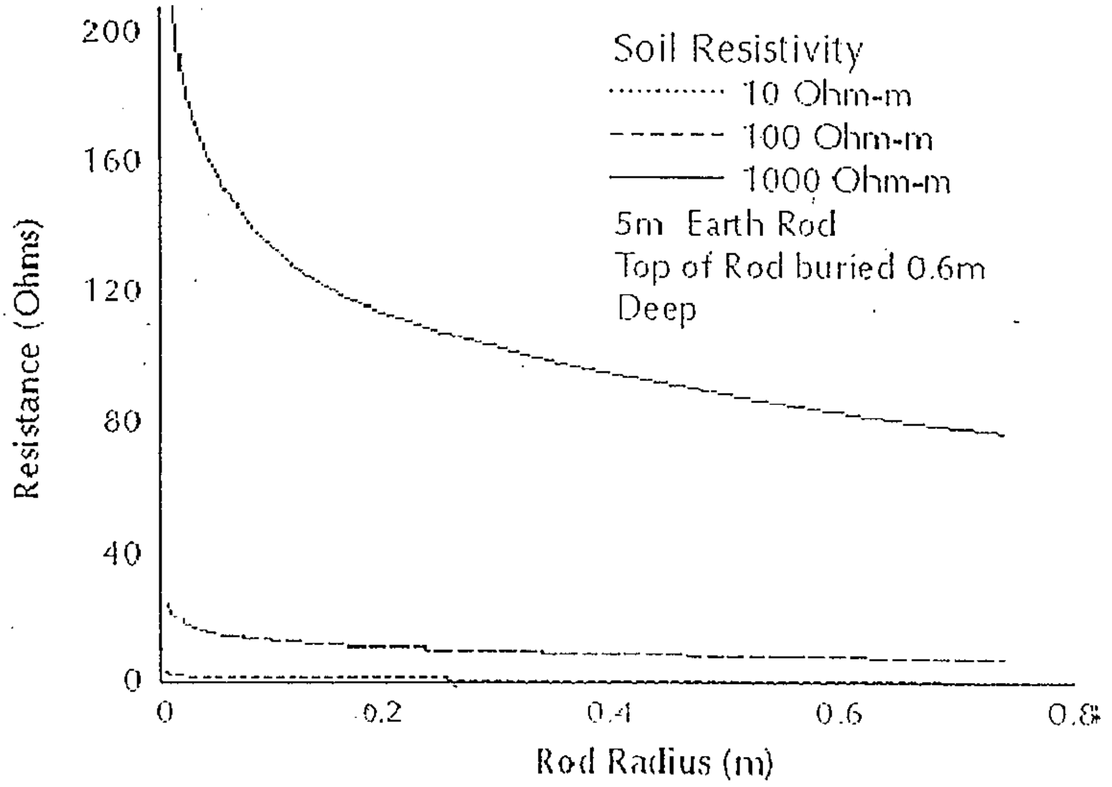
กราฟที่ 2.4 ค่าความต้านทานกับความยาวด้านสี่เหลี่ยมของลูป

2.7.9 การเพิ่มรัศมีของแท่งตัวนำ (Increasing the radius of an earth rod)

ในกราฟที่ 2.5 แสดงผลที่ได้รับจากค่าความต้านทานที่แตกต่างของดินโดยการเพิ่มรัศมีของแท่งตัวนำและการลดลงอย่างรวดเร็วของค่า P.U. กับการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำเกินกว่า 0.05 เมตรยกเว้นในดินที่มีค่าความต้านทานสูงจะให้ผลใกล้เคียงกับการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.2 เมตร โดยธรรมดาอัตราการขยายรัศมีของหลักดินออกไปนั้นไม่มีความจำเป็นมากนัก แต่จะคำนึงถึงสมบัติทางกลและความต้านทานการผุกร่อนเป็นสำคัญ ท่อสามารถใช้แทนตัวนำที่เป็นของแข็งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายนอก แบบนี้มีการเพิ่มปริมาณของโลหะที่ใช้ทำให้มีราคาสูง ในบริเวณที่ประกอบไปด้วยหินเป็นส่วนใหญ่อาจต้องเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินโดยรอบๆโลหะซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยกว่าหินรอบๆ

2.7.10 การฝัง (Buried depth)

เป็นวิธีหนึ่งของการลดค่าความต้านทาน แต่ด้วยราคาที่แพงจึงไม่น่าสนใจ จำไว้ว่าการฝังให้ลึกใช้กับแรงดันเพียงเล็กน้อยที่ไหลไปตามผิวดิน ในสถานีย่อยแรงสูงต้องการหลักดินข้างต้น



กราฟที่ 2.5ค่าความต้านทานกับรัศมีแท่งตัวนำทรงตัน

เพื่อแรงดันสัมผัสที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าแท่งหลักดินมีการแผ่สนามไฟฟ้า เมื่อแรงดันผิวดินมีค่าน้อยคือต้องการลดศักย์ไฟฟ้าระยะก้าว การเพิ่มความลึกของหลักดินจึงเป็นการลดความเสี่ยงจากการโดนไฟช็อทของม้า โค กระบือและสัตว์เลี้ยงที่มีระยะก้าวมากกว่ามนุษย์ เพราะระยะห่าง

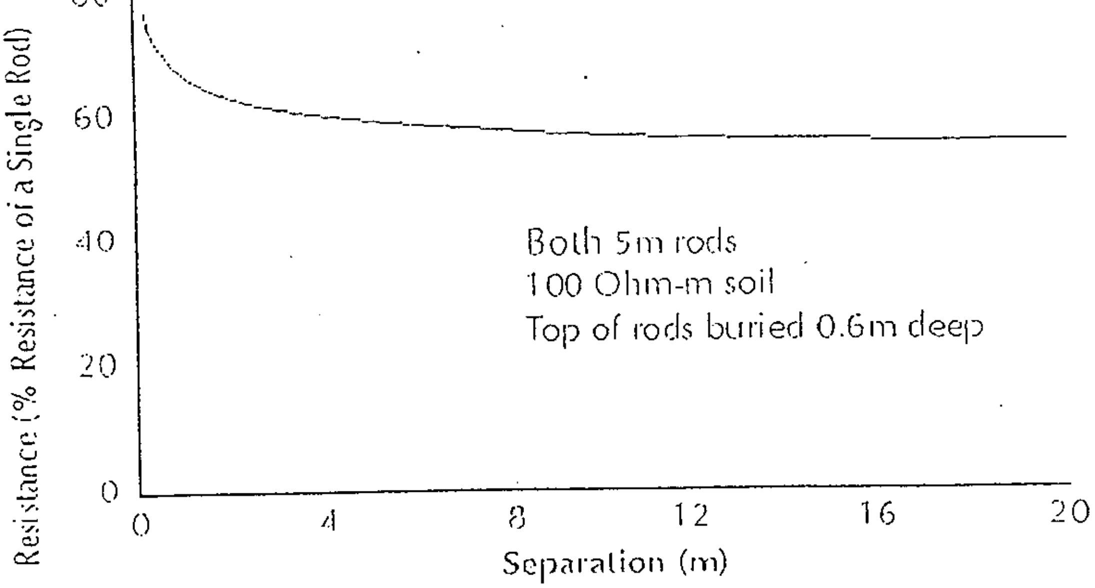
ระหว่างขาหน้าไปจนถึงขาหลัง สำหรับแท่งตัวนำจะมีการติดตั้งท่อพลาสติกรอบๆส่วนบนที่อยู่เหนือผิวดินเพื่อความปลอดภัยจากการสัมผัส

2.7.11 ผลของความใกล้กัน (Proximity Effect)

ถ้ามีแท่งหลักดิน 2 แท่ง วางอยู่ใกล้ๆกันจะมีผลต่อกันไม่ว่าเป็นแบบแท่งตัวนำหรือแบบแนวนอนความใกล้กันทำให้ทั้ง 2 แท่งเชื่อมความต้านทานของดินจนเหมือนเป็นแท่งเดียว ดังนั้นปัจจัยของระยะห่าง ตำแหน่งและลักษณะของดินจึงมีผล ในกราฟที่ 2.6 แสดงผลรวมความต้านทานของแท่งตัวนำขนาด 5 เมตร จำนวน 2 แท่งที่เพิ่มระยะห่างระหว่างแท่งหรืออาจใช้แท่งตัวนำขนาด 4 เมตร ในดินชั้นเดียว การคำนวณแบบนี้เป็นพื้นฐานของการใช้งานจริง

2.7.12 การเตรียมแท่งหลักดินที่ซับซ้อน(Complex Electrode Arrangements)

มีเงื่อนไขในการติดตั้ง หรือใช้งานมีรายละเอียดมากมาย รูปแรกๆแสดงถึงดินชั้นเดียวซึ่งในความเป็นจริงจะพบแค่ดินแบบไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละชั้นของดินมักมีองค์ประกอบอื่นๆมากมาย



กราฟที่ 2.6 การเชื่อมความต้านทานของแท่งตัวนำทรงตัน 2 แท่งกับการเพิ่มระยะห่างระหว่างแท่ง

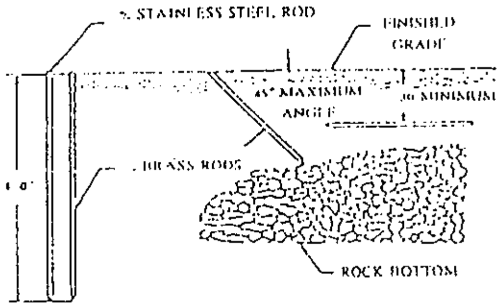
ในชั้นผิวดินอาจมีปุ๋ยอินทรีย์หรือถ่านเนื่องจากการทับถมบนดินกรวดและดินเหนียว ลักษณะของโลหะที่อยู่ใต้อาจเปลี่ยนเป็นหิน สามารถแสดงได้โดยตารางในดิน 3 ชั้น และค่าความต้านทานของแต่ละชั้นเพิ่มขึ้นตามความลึก ในพื้นที่อาจจะมีซิลท์ ทรายหรือกรวดและองค์ประกอบของน้ำที่ผิวดินส่วนโครงสร้างของดินชั้นที่ 2 มีความสำคัญของตารางองค์ประกอบน้ำ (Water Table) น้อยกว่าบนผิวดิน โครงสร้างของดินและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินแต่ละชั้นจะมีผลต่อค่าความต้านทานของแท่งหลักดิน

ค่าที่ได้จากกราฟ จากการเก็บข้อมูลโครงสร้างของดินรูปร่างทางเรขาคณิตของแท่งหลักดินรวมรทั้งการกำหนดค่าสำหรับแท่งหลักดินเพื่อความเข้าใจง่ายๆจะมีสูตรเพื่อใช้คำนวณค่าความถูกต้องที่มีมาตรฐานแตกต่างกันแต่จะให้ค่าความต้านทานที่ใกล้เคียงกันโดยขึ้นอยู่กับงานที่ต้องการและอุปกรณ์ที่ใช้

2.8 <u>ลักษณะการต่อลงดิน</u>

2.8.1 การปักแท่งตัวนำเพียงแท่งเดียว (Single rod)

ตามข้อกำหนดของ NEC คือต้องปักตัวนำลึกอย่างน้อย 8 ฟุต แต่หากดินในบริเวณนั้นมีความแข็ง ยากแก่การปักอนุญาติให้ปักลึกน้อยกว่า 2.4 เมตร คือ ต้องปักในแนวเฉียงแต่ต้องไม่เกิน 45 องศาในแนวดิ่ง มาตรฐานของแท่งตัวนำที่ใช้กันทั่วไปคือ 3 เมตร(10 ฟุต) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5/8 นิ้วเพราะถ้าเพิ่มความมากกว่า 3 เมตร ความต้านทานจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำมีผลต่อความต้านทานน้อยที่สุด การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจึงเป็นการสิ้นเปลือง โดยไม่จำเป็น สิ่งที่พิจารณาคือความแข็งแรงทางกลในการทนแรงตอกมากกว่า ซึ่งขนาดที่เหมาะสมคือ 5/8 นิ้ว



รูปที่ 2.6 ลักษณะการปักแท่งตัวนำแท่งเดียว

2.8.2 การปักแท่งตัวนำหลายแท่งขนานกัน (Multiple rod)

มีความเข้าใจผิดที่ว่าการปกแท่งตัวใกล้กันมากๆจะยิ่งให้ความต้านทานที่ดี แต่ในความเป็นจริงระยะที่เหมาะสมจึงจะอำนวยประโยชน์ได้มากที่สุด ได้มีการศึกษาพบว่าในการปักแท่งตัวนำ 1 แท่งตั้งฉากกับพื้นดินจะเปรียบเสมือนมีแท่งตัวนำทรงกระบอกสัมพัทธ์ของดินที่มีจุดศูนย์กลางตัวนำร่วมกับแท่งตัวนำอยู่ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำเพิ่มมากขึ้นสามารถนำกระแสลงดินมากขึ้น แท่งทรงกระบอกสัมพัทธ์ของดินจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 เท่าของความยาวแท่งตัวนำ

ระยะห่างที่เหมาะสมคือ มากกว่า 2L โดยที่ L คือความยาวของแท่งตัวนำ เช่นถ้าปักแท่งตัวนำ 2 แท่งขนานกัน แต่ละแท่งมีความยาว 3 เมตร ระยะห่างที่เหมาะสมคือ มากกว่า 6 เมตร แต่ในทางปฏิบัติไม่มีบริเวณมากพอ จึงให้ระยะห่างเหลือเพียง 3 เมตร

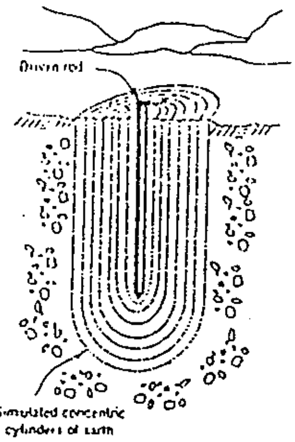
ตารางที่2.3ค่าความต้านทานการต่อลงดินเนื่องจากการปักแท่งตัวนำด้วยจำนวนแท่งต่างกัน

ที่มา : การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า,ดร.ชำนาญ ห่อเกียรติ

ความต้านทานการต่อลงดิน	
แท่งตัวนำ 1 แท่ง	0.33ρ
แท่งตัวนำ 2 แท่ง	0.20ρ
แท่งตัวนำ 3 แท่ง	0.133ρ

หมายเหตุ

1. แท่งตัวนำ 2 แท่งวางห่างกัน 3 เมตร
2. แท่งตัวนำ 3 แท่งวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าห่างกัน 3 เมตร
3. แท่งตัวนำขนาด 5/8 นิ้ว



รูปที่2.7 แท่งทรงกระบอกสัมพัทธ์ของดิน

ป
QC
611
ช429ก
2543
- 9 พ.ค. 2544
4440087
สำนักหอสมุด

2.8.3 ลวดตัวนำฝังดินในแนวนอน (Buried Horizontal wire)

ในกรณีที่ชั้นดินล่างมีความแข็งมากไม่สามารถปักแท่งตัวนำได้ลวดตัวนำที่ใช้กันมาก คือ ลวดตัวนำพื้นที่หน้าตัด 70, 95, 120 ตารางมิลลิเมตร โดยฝังในดินลึก 0.6 เมตร ซึ่งมีลักษณะการวางต่างๆกันดังนี้

- การวางเส้นเดี่ยว (Single Wire)
- การวางเป็นมุมฉาก (Right-angleturn)
- การวางลวดตัวนำกระจายตามแนวรัศมีจากจุดที่ต่อร่วมตรงกลาง (Crowfoot Star)
    - แบบ 3 จุด (Three point star)
    - แบบ 4 จุด (Four point star)
    - แบบ 6 จุด (Six point star)
    - แบบ 8 จุด (Eight point star)

2.8.4 การวางลวดตัวนำเป็นทรงกลม (Ring of wire)

โดยฝังให้ลึกอย่างน้อย 0.75 เมตรเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 2 เมตร

2.8.5 แถบตัวนำฝังดินในแนวนอน (Buried Round strip)

แถบตัวนำโดยมากจะเป็นทองแดงหรืออลูมิเนียมที่เป็นแผ่นบาง ข้อดีคือ อิมพิแดนซ์ที่ผิวจะมีค่าน้อย ข้อเสียคือ ขาดความมั่นคงทางกล เพราะผิวขาด เปราะแตก และเจาะเป็นรูได้ง่าย

2.8.6 การฝังแท่งตัวนำทรงกลมในดิน (Buried round plate)

แผ่นตัวนำมีพื้นที่ผิวมากกว่า 0.186 ตารางเมตร (2 เมตร) การฝังสามารถทำได้ 2 ลักษณะ

- วางแผ่นในแนวราบ (Horizontal plate) ซึ่งมีข้อเสียคือ เมื่อดินทรุดจะทำให้เกิดโพรงอากาศรอบแผ่นตัวนำ ทำให้ความต้านทานการต่อลงดินมีค่าสูงขึ้น
- วางแผ่นในแนวดิ่ง (Vertical plate) โดยทั่วไปควรวางแบบนี้

การต่อลงดินในลักษณะต่างๆกันเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานการต่อลงดินที่เหมาะสมและได้ตามมาตรฐานการต่อลงดิน ซึ่งกำหนดดังนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงมาตรฐานในการต่อลงดิน

ที่มา : การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า,ดร.ชำนาญ ห่อเกียรติ

มาตรฐาน	ความต้านทาน (โอห์ม)
ระบบคอมพิวเตอร์และการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.)	1 Ω
การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)	5 Ω
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)	25 Ω

ในทางปฏิบัติเมื่อต้องการสร้างระบบต่อลงดินให้ได้ความต้านทานการต่อลงดินตามที่กำหนดมีขั้นตอนดังนี้

- วัดค่าความต้านทานดิน
- คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
- เลือกลักษณะการต่อลงดินตามค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณได้

2.9 ทฤษฎีการแก้ไขโดยDEEP DRIVEN METHOD

ระบบสายดินขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน หาได้จากการวัดค่าความต้านทานของดินที่ปรากฏกับแท่งทองแดงทรงกลม

$$Rd = \rho d / 2\pi L[\ln(8L/D) - 1] \quad (1)$$

ρd = พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระยะความลึก L (Ω. m)

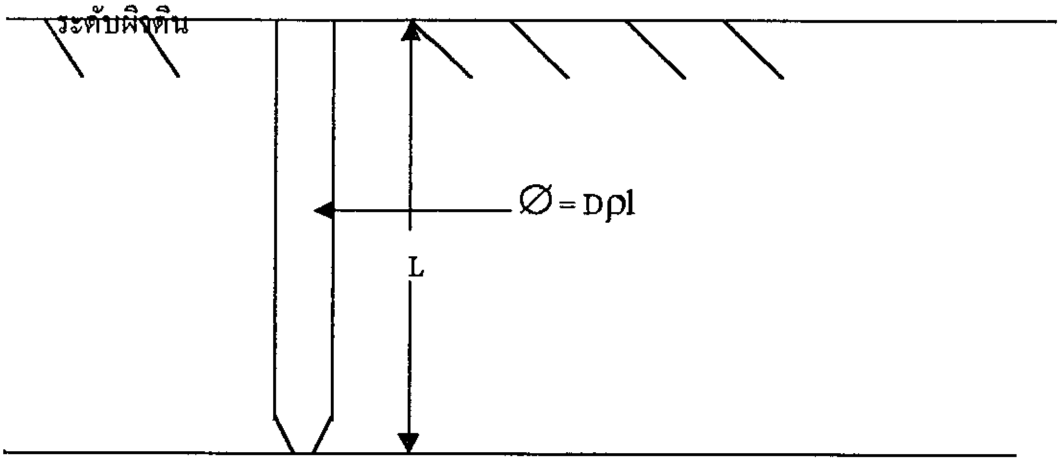
L = ความยาวของแท่งทองแดง (m)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทองแดง (m)

การหาค่าความต้านทานของสายดินยังมีอีกหลายทฤษฎี เช่น

$$Rd = (\rho d / 2\pi) \ln(4L/D) \quad (2)$$

$$Rd = (\rho d / 2.73) \log(4L/D) \quad (3)$$



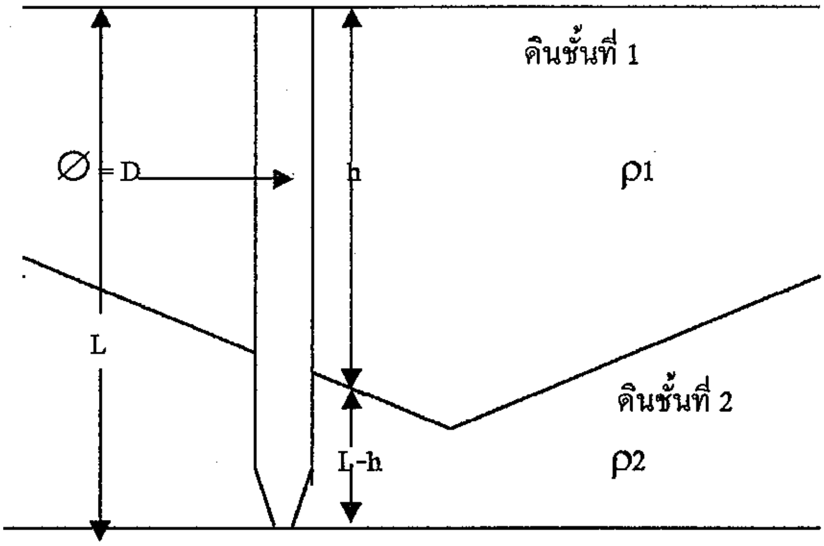
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการฝังแท่งทองแดงทรงกลมในดินชั้น 1

จากสมการ สามารถใช้หาค่าความต้านทานของสายดิน โดยนำค่า ρd พิกัดค่าความต้านทาน

จำเพาะของดินในตารางได้ แต่อาจจะแตกต่างกันตามสภาพแวดล้อม

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของดินแปรผันตรงกับพิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินดังนั้นการที่จะนำวิธี Driven Rod Methods มาใช้ในการลดค่าความต้านทานของระบบดินควรจะฝังแท่งทองแดงในตำแหน่งดินที่มีความชื้นสูงหรือ ρd ต่ำมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยการวางสายตัวนำที่เชื่อมต่อกับแท่งทองแดงออกไปยังตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งจะใช้ได้กับดินลักษณะชั้นเดียว (Uniform Soil) ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้จากผลการคำนวณ

ถ้าเป็นดินที่มีลักษณะ 2 ชั้น (Tow Layer Soil) จะให้ผลการดำเนินการคำนวณสำหรับดินประเภทนี้ ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณจะคิดจากฐานที่ว่าดินที่ใช้ในการตอกแท่งทองแดง จะตอกผ่านชั้นดินทั้ง 2 ชั้น



รูปที่ 2.9 แสดงการติดตั้งแท่งทองแดงลงในดินที่มีชั้นดิน 2 ชั้น

ถ้ากระแส I ไหลผ่านไปในแท่งทองแดงผลลัพธ์ของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า I ในแท่งทองแดงจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของดินคือพิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho 1$ และ $\rho 2$ ซึ่งทางทฤษฎีของ EDAWLIBI สรุปไว้สำหรับแท่งทองแดงแท่งเดียวที่ฝังลงในดิน 2 ชั้น ดังนี้

$$\rho x\, ix = \text{ค่าคงที่ (Constant)} \qquad (4)$$

โดยที่

ix = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าบนแท่งทองแดงที่อยู่ในชั้นดิน x

ρx = พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นดิน x

ถ้าไม่คำนึงถึงผลกระทบของจุดสิ้นสุดของแท่งทองแดง กระแสไฟฟ้ารวมภายในแท่งทองแดง รูปที่ 2 คำนวณได้จากสมการ

$$I = i1h + i2(L - h) \qquad (5)$$

I = ค่ากระแสไฟฟ้ารวมในแท่งทองแดง (A)

i1 = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแท่งทองแดงในชั้นดิน $\rho 1$ (A/m)

h = ความยาวของแท่งทองแดงในชั้นดิน $\rho 1$ (m)

L = ความยาวของแท่งทองแดงที่ฝังลงในดิน (m)

L – h = ความยาวของแท่งทองแดงในชั้นดิน $\rho 2$ (m)

i2 = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในแท่งทองแดงในชั้นดิน $\rho 2$ (A/m)

เมื่อพิจารณาที่ดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2

$$I1 = (2\pi Vr) / \rho 1 [\ln (8L / D)] \qquad (6)$$

$$I2 = (2\pi Vr) / \rho 2 [\ln (8L / D)] \qquad (7)$$

จากสมการความหนาแน่นของกระแส i1 และ i2 หรือแทนค่าสมการ (6),(7) ใน (5) จะได้

$$I = \{(2\pi Vr) / \ln[(8L / D) - 1]\} [(\rho 1 \rho 2) / (h\rho 2 + (L - h) \rho 1] \qquad (8)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของแท่งทองแดงที่ฝังลงในแนวดิ่งกับค่าความต่างศักย์จะได้

$$Rd = Vr / I \qquad (9)$$

แทนค่าสมการ (8) ใน (9)

จะได้

$$Rd = \{\ln [(8L/D) - 1] / 2\pi\}(\rho 1 \rho 2) / [h\rho 2 + (L - h) \rho 1] \qquad (10)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ (10) ลงในสมการ (1) จะได้พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ดังนี้

$$\rho d = (L\rho 1 \rho 2) / [\rho 2h + \rho 1 (L - h)] \qquad (11)$$

โดยที่ ρd = พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่พิจารณาจากแท่งทองแดง (Ω.m)

$\rho 1$ = พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 1 (Ω.m)

$\rho 2$ = พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 2 (Ω.m)

h = ความยาวของส่วนของทองแดงในชั้นดิน $\rho 1$ (m)

L – h = ความยาวของส่วนของทองแดงในชั้นดิน $\rho 2$ (m)

L = ความยาวของแท่งทองแดงที่ฝังลงในดิน (m)

ในกรณีที่ดินชั้นที่ 1 $h \leq 0$; $\rho d = \rho 2$

ในกรณีที่ดินชั้นที่ 1 $h \geq L$; $\rho d = \rho 1$

เมื่อสังเกตความสัมพันธ์ของ ρd จากสมการที่ (11) ในกรณีที่ฝังแท่งทองแดงลงในดินซึ่งมีชั้นดิน 2 ชั้น สรุปได้ดังนี้

1. พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ปรากฏจะคงที่ $\rho 1$ จนกว่าแท่งทองแดงจะฝังผ่านลงไปในชั้นที่ 2
2. ในขณะที่แท่งทองแดงฝังผ่านระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่าง พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่มีค่าต่ำ จะมีผลกระทบต่อความต้านจำเพาะของดินที่ปรากฏมากกว่าพิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่เป็นชั้นดินที่มีค่าสูง
3. พิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ปรากฏ ในขณะที่ทองแดงฝังผ่านระหว่างดินชั้นบนกับดินชั้นล่าง สามารถคิดคำนวณความสัมพันธ์ได้เป็นรูปกราฟลอการิทึม โดยที่ให้แกนตั้งของกราฟแทนพิกัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ปรากฏ ส่วนแกนนอนจะแทนความลึกของการฝังแท่งทองแดงผ่านชั้นดิน

เมื่อวิเคราะห์การลดค่าความต้านทาน เนื่องจากความยาวของแท่งทองแดง จากสมการจะเห็นได้ว่า การเพิ่มความยาวของแท่งทองแดง (L) จะทำให้ค่าความต้านทานของดินมีค่าลดลงและนอกจากนี้ยังมีผลด้านความชื้นของดิน การที่ฝังแท่งทองแดงลึกลงไปมากขึ้นนั้นเท่ากับแท่งทองแดงจะฝังอยู่ในชั้นดินที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นและความชื้นของดินไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเทียบกับความชื้นของผิวดิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ทำให้ระบบค่าความต้านทานดินมีเสถียรภาพดีขึ้น

2.9.1 วิธีการติดตั้ง(Installation method)

ค่าความต้านทานในระบบดินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายเช่น ความต้านทานจำเพาะของดิน,ความต้านทานสัมผัสของแท่งหลักดินกับพื้นผิวดินและความต้านทานของแท่งตัวนำรวมทั้งข้อต่อและจุดเชื่อม

การติดตั้งวิธี deep driven ประกอบไปด้วย

- การเลือกวัสดุของแท่งตัวนำ
- การเลือกชนิดของข้อต่อ
- เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวนำและข้อต่อ
- ชนิดของอุปกรณ์ในการตอก
- วิธีดำเนินการติดตั้ง
- วิธีการทดสอบ
- การเชื่อมลวด

การติดตั้งแท่งตันทรงกระบอก (Rod)ที่มีความ ลึกลงไป 10 ฟุต โดยใช้แท่งตัวนำขนาด 10 – 12 ฟุต ซึ่งใช้ข้อต่อในการเชื่อม เส้นผ่านศูนย์กลางของข้อต่อนั้นต้องมีขนาดใหญ่กว่าของแท่งตัวนำ อาจจะมีขนาดของรูที่ใหญ่กว่าเพื่อเพิ่มผิวสัมผัสของดินกับแท่งตัวนำที่บริเวณผิว

ในการตอกแท่งตัวนำทรงกระบอกโดยใช้การควบคุมเองนั้น อุปกรณ์ต่างๆ เช่นฆ้อนหัวโต (Sledge hammer) ท่อเจาะนำ (Pipe driver) และเครื่องมืออื่นๆล้วนจำเป็นในการตอกแท่งตัวนำ

จึงได้มีการออกแบบวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำและข้อต่อที่จะสามารถทนต่อแรงตอกเพื่อผ่านทะลุชั้นดินแข็งบ่อยๆนั้นได้

แท่งตัวนำทรงกระบอก (rod) แท่งแรกถูกติดตั้งในปี 1988 โดยใช้ (Climbing a ladder) และตัวยึดหัวฆ้อนไฟฟ้าบนสุดของแท่งตัวนำ ขั้นตอนการใช้นั้น ไม่ค่อยสะดวกและอันตรายกับผู้ติดตั้ง เครื่องตอกจึงถูกออกแบบมาเป็นอย่างดีเพื่อความสะดวกสบายและเป็นเครื่องทุนแรง โดยประกอบไปด้วยโครงเสริม (Support frame) กับแม่แรงยกระดับ (Leveling jacks) และล้อ (Wheel) องค์ประกอบที่จับยึดในแนวดิ่งของฆ้อนไฟฟ้ากระแทก (Electric impact hammer) และสามารถควบคุมเครนในการใช้งานยกขึ้นและยกลงได้ ฆ้อนไฟฟ้ากระแทกจะติดตั้งอุปกรณ์พิเศษเพื่อป้องหัวเห็ด(Mushrooming) ของแท่งตัวนำที่อยู่ด้านบนและเพื่อความมั่นคงของด้านล่าง

เนื่องจากแรงสูงสุดที่เราใช้ในการตอกแท่งตัวนำเพื่อให้ทะลุชั้นของดินแข็งๆอาจทำให้ข้อต่อบิดงอหรือคดได้โดยสูญเสียคุณสมบัติทางกลไป หรืออาจเกิดการแตกของปลอกข้อต่อที่เชื่อมอยู่ระหว่างแท่งตัวนำทรงกระบอก ข้อต่อแบบใหม่ที่คิดค้นคือแบบ ข้อต่อชิ้นเรียวๆ (Tuper spline coupler)ซึ่งทำให้เกิดให้ความน่าเชื่อถือในการใช้ข้อต่อมากขึ้น การทดสอบการตอกแท่งตัวนำเพื่อทดสอบความคงทนทางกลของข้อต่อ ซึ่งมีการออกแบบเฉพาะให้สามารถใช้ได้กับแท่งตัวนำที่พื้นผิวเรียบและมีขนาดยาว ทั้งยังอาจติดตั้งภายในอาคารกับฝังที่มีความสูงไม่มากนัก

เมื่อต้องการให้ผิวของแท่งตัวนำทั้งหมดสัมผัสกับดิน จะทำการผสมดินเลนของเม็ดดินเหนียวกับเกลือ (Sodium bentonite) ในธรรมชาติก็คือดินเหนียว ลึกลงไปที่ช่องว่างของข้อต่อของ

แท่งตัวนำที่ติดตั้งจะเพิ่มวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวของแท่งตัวนำกับดินในระดับความลึกได้เป็นอย่างดี แบบที่ใช้แท่งตัวนำลึกลง 60 ฟุต ต้องการเม็ดดินเหนียว 2 – 5 แกลลอน ซึ่งมีการทดสอบผลของความต้านทานหลังเติมเม็ดดินเหนียวในช่องว่างของข้อต่อ

2.9.2 Deep well groundbed

ในพื้นที่ที่ค่าความต้านทานบนผิวดินมีค่าสูง การต่อแท่งอาโนดตามแนวดิ่ง (Vertiocal anode) เพื่อติดตั้งในวิธี deep well (ลึกประมาณ 100 เมตรหรือมากกว่านั้น) ในระดับความลึกที่ต้องการซึ่งเป็นความจำเป็นในการสำรวจครั้งนี้ วิธีการวัดแบบใช้หมุด 4 แท่งวัดค่าความต้านทานที่แปรเปลี่ยนไปตามความลึกโดยการเปลี่ยนระยะห่างของแท่งหมุด วิธี deep well สามารถใช้ได้กับสภาพดินในหลายพื้นที่ โดยพื้นฐานแล้วใช้เหล็กหล่อ (Steel casing) เพื่อป้องกันการพังทลายของรูที่ทำการเจาะ แล้วทำการเชื่อมแท่งอาโนดทั้งหมดเข้าด้วยกัน ในช่องว่างที่เหลืออยู่ทำการเติมผงคาร์บอน แต่หลังจากนั้นอาจมีการผุกร่อนของแท่งอาโนดเกิดขึ้น วิธีนี้มีรูระบายให้แก๊สสามารถหนีออกมาได้ มีการดักจับแก๊สขยายวงกว้างตามความต้านทานของดินพบมากในบริเวณที่เป็นหิน การที่ใช้เหล็กหล่อทำให้มีการนำกระแสที่ดี แต่มีราคาแพงและต้องคำนึงถึงการออกแบบการบำรุงรักษาเพราะเกิดความเสียหายได้ง่าย

ความต้องการเบื้องต้นกับระบบกราวด์ (Grounding)

- กำหนดแรงดันการกระจายให้อยู่ในค่าที่จำกัด
- กำหนดแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ฉนวนได้
- ให้เสถียรภาพของระบบโดยค่าทรานเซียนที่เกินมา (Transient over) และสิ่งรบกวนทางไฟฟ้าให้น้อยที่สุด
- ให้การเกิดฟอลต์ในเงื่อนไขย่อยๆอื่นๆ กับอุปกรณ์เพื่อการป้องกันโดยระบบดิน
- มีการให้ค่าความนำที่เชื่อถือได้กับการสัมผัสของบุคคลและอันตรายจากการช็อค (Shock hazards)
- ลดค่าไฟฟ้าสถิตย์ที่อาจเกิดขึ้นในอุปกรณ์
- ให้การป้องกันที่อาจเกิดการรบกวนจากฟ้าผ่า โดยการลดค่าความต้านทานของดิน

ในระบบกราวด์ของ NEC (National Electrical Code)กล่าวถึงค่ากราวด์ว่า"คือจุดที่เชื่อมอยู่กับโลกหรือมีจุดที่ติดอยู่กับโลก " และกล่าวถึงผลของกราวด์ไว้ว่า "คือต้องการที่จะเชื่อมโลกกับระบบกราวด์หรือเพิ่มส่วนที่มีค่าอิมพิแดนซ์ต่ำ (Impedance) และเพื่อประสิทธิ์ภาพของการเก็บกระแสป้องกันสิ่งปลูกสร้างจากแรงดันเพื่อผลของอันตรายที่มีค่ามากเกินไปในจุดเชื่อมของอุปกรณ์หรือตัวบุคคล"

องค์ประกอบของแท่งหลักดิน (grounding electrode system)

- โครงสร้างของโลหะในอาคาร
- คอนกรีตที่บรรจุแท่งอิเลคโตรด
- วงแหวนกราวด์
- แท่งหรือท่อหลักดิน
- แผ่นหลักดิน

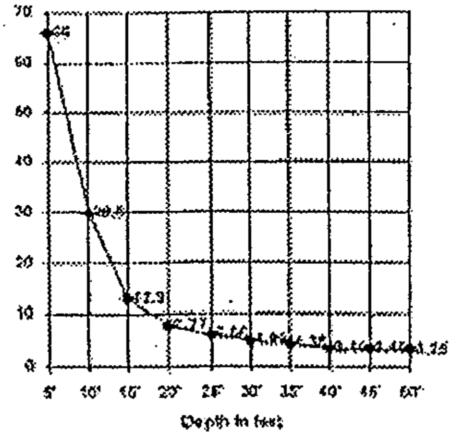
NEC ไม่ได้กำหนดค่าความต้านทานที่มากที่สุดเอาไว้ แต่ในแท่งอิเลคโตรดที่ทำจาก แท่ง ท่อหรือแผ่นโลหะให้ค่าความต้านทาน 25Ω หรือต่ำกว่านี้ สำหรับแท่งอิเลคโตรด 1 แท่ง ส่วนของ IEEEค่าความต้านทานของอิเลคโตรดในสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ขนาดใหญ่ต้องการให้ได้ 1Ω หรือน้อยการนี้ สำหรับการพานิชหรืออุตสาหกรรมค่าความต้านทานยังคงอยู่ที่ในช่วง 2 – 3Ω หรือน้อยกว่านี้ โดยเนื่องจากค่าของแรงดันสูงกับดินในระบบไฟฟ้า ในอุปกรณ์และเครื่องมือทางการสื่อสารต้องการค่าความต้านทานให้น้อยกว่า 3 Ω

ในพื้นที่ที่มีปัญหาเรื่องของค่าความต้านทานมีวิธีใหม่ๆที่คิดค้นเพื่อใช้ในระบบกราวด์ คือ Deep drive grounds rod โดยในปี 1968 มีการศึกษาถึงวิธีลดค่าความต้านทานของดินให้ต่ำลง โดยการทดลองหลายวิธีและชนิดของโลหะ มีวิธีที่คิดค้นก่อนหน้านี้คือแบบแท่งตัวนำกับสารเคมี (Chemical rod) และการเพิ่มโลหะลงในดิน (Soil enhancement materials)

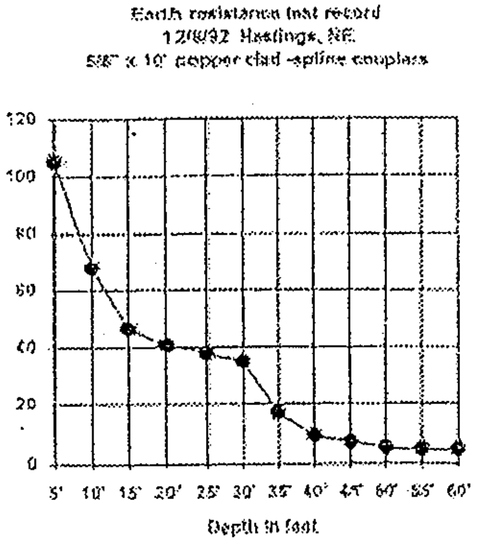
โดยในปี 1988 จึงมีการคิดค้นวิธีตอกแท่งรอด(Deep driven) ทำการทดลองแก้ไขและเก็บข้อมูลใน Nebraska ในช่วงเดือน พฤษภาคม 1988 จนถึง มิถุนายน 1993ใช้แท่งหลักดินทรงตันจำนวน 140 แท่ง ติดตั้งในช่วงความลึก 15 –90 ฟุต ใช้วิธีการวัดความต้านทานแบบ 3 จุด เครื่อง Biddle Megger รุ่น 250220-1 Null Balance Earth Tester

จากข้อมูลการวัดค่าความต้านทานของสายดินจากการติดตั้ง ground rod ในทุกๆ ระยะความลึก 5 ฟุต ซึ่งการวัดความลึกของ ground rod จะทำโดยการวัดค่าความต้านทานที่ตอบสนอง หรือวัดจากการเข้าชนสิ่งกีดขวาง ค่าความต้านของ rod จะถูกนำมาเขียนกราฟเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานที่ระดับความลึกต่างๆ ดังแสดงในกราฟที่ 2.7

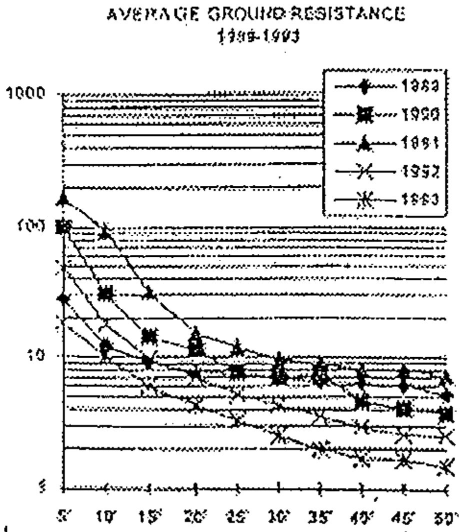
ข้อมูลจากการวัดค่าความต้านโดยทำการวัดค่าจาก ground rod ซึ่งมากกว่า 140 ครั้ง จะได้ค่าเฉลี่ยที่ระยะ 5 ฟุต จะมีค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทาน 66 โอห์ม และที่ 10 ฟุต เป็น 29.8 โอห์ม จากการ interpolation ที่ระยะความลึก 8 ฟุตของ ground rod จะมีค่าความต้านทนเฉลี่ยโดยประมาณ 10 โอห์ม ค่าเฉลี่ยที่ระยะ 8 และ 10 ฟุตของ ground rod ค่าความต้านทานจะลดต่ำลงสู่จุด NEC minimum ที่ 25 โอห์มหรือน้อยกว่านั้น ที่ความลึก 30 ฟุต จะแสดงค่าความต้าน 5 โอห์มหรือน้อยกว่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระยะความลึก 20 ฟุตแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับค่าความต้านทานของสายดิน



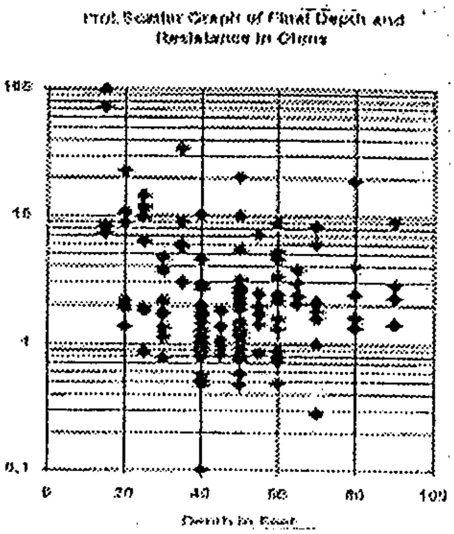
กราฟที่ 2.7 ตัวอย่างค่าความต้านทานของ ground rod จากความสัมพันธ์หน่วยโอห์กับระยะความลึก



กราฟที่ 2.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความต้านทาน



กราฟที่ 2.9 แผนผังแสดงการกระจายของค่าความต้านทาน



กราฟที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าของการวัดค่าความต้านทานในแต่ละปี

จะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกกับค่าความต้านทานของแต่ละ rod สามารถนำมาเขียนกราฟ ซึ่งพบว่าค่าความต้านทานเฉลี่ยจะอยู่ระหว่าง 0.9 – 2.0โอห์ม ที่ระยะความลึก 40 – 60 ฟุต

การเปรียบเทียบสำหรับค่าความต้านทานของแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4 กราฟจะแสดงถึงค่าความต้านทานเฉลี่ยของการติดตั้ง rod ในแต่ละปี ของทุกช่วงเวลา

หมายเหตุ : อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานจะแปรผันอย่างมากกับความลึกที่ระยะ 10 ฟุต หรือน้อยกว่านั้น

ข้อมูลล่าสุดของปี 1993 ที่ผ่านมาพบว่าในช่วงเวลาดังกล่าว ในดินมีค่าความชื้นมากจึงทำให้ค่าของการวัดได้ค่าความต้านทานที่ต่ำ

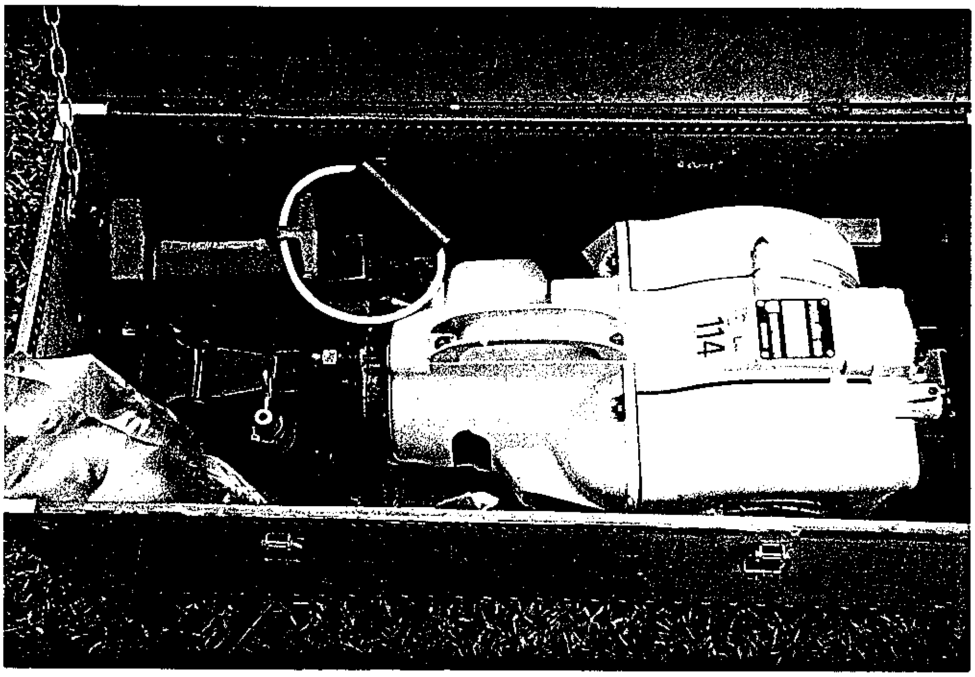
<u>ตัวอย่างวิธีการแก้ไขความต้านทานของดิน</u>

จากการดูงานการแก้ไขค่า Ground สายส่ง 115 เควี. จันทบุรี-ตราด ซึ่งเป็น Radiun Line Single Circuit

2.10 การตอกแท่งรอด (Deep Driven) และสารเคมี

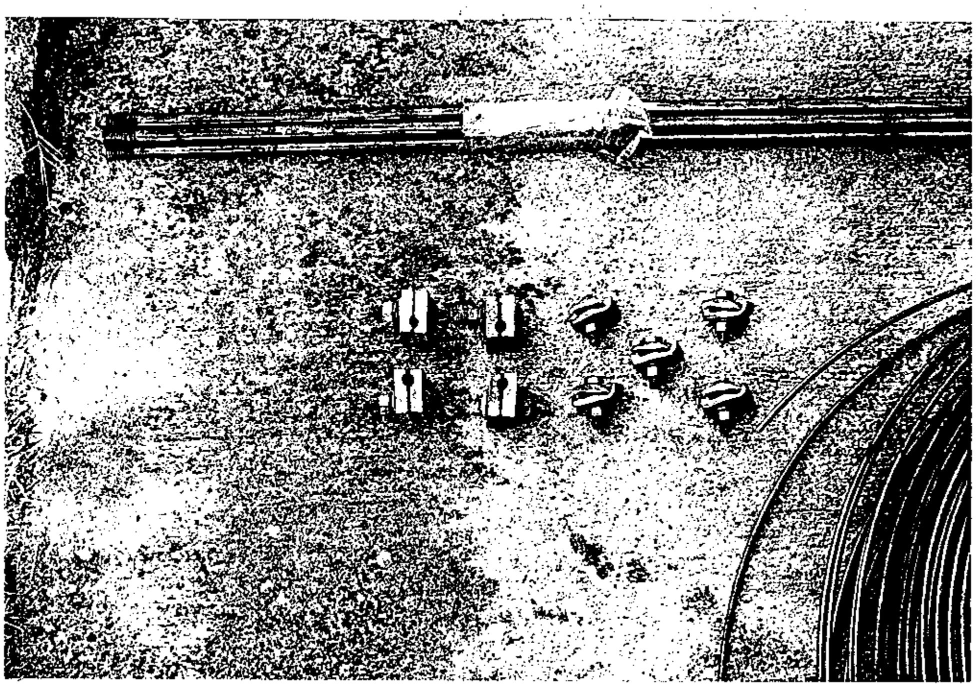
เครื่องมือและอุปกรณ์

1.เครื่องเจาะดินครบชุด (ดังรูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 เครื่องเจาะดินแบบ Hydraulic

1. แท่งทองแดง (Ground rod) ขนาดมาตรฐานยาว 3 m. พร้อมตัวต่อ (Adapter) ระหว่างแท่งทองแดง ดูรูปที่ 2.11
3. กราวด์เคาน์เตอร์พอยส์ (Ground counter poise)
4. เครื่องวัดเสิร์จอิมพิแดนซ์(Surge impedance tester) พร้อมอุปกรณ์ครบชุด
5. สารเคมีชนิดผง (Power Fill)
6. ชุดหลอมทองแดง (Coper weld) พร้อมผงหลอมละลาย (Thermoweld)ใช้เชื่อมต่อระหว่างสายกราวด์ (Ground) กับทาวเวอร์ (Tower)



รูปที่ 2.11 แท่งทองแดง (Ground Rod)

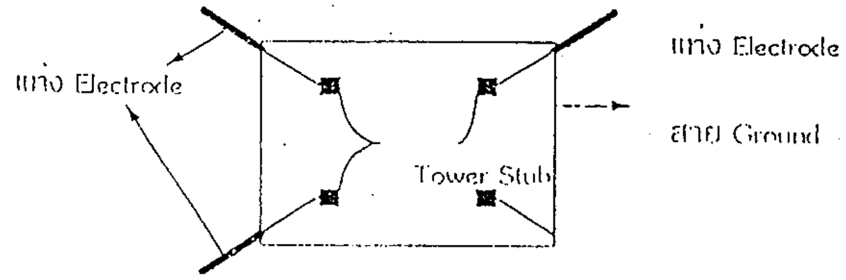
<u>ลำดับขั้นการทำงาน</u>

1. เมื่อทราบผลการทดสอบค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่ทาวเวอร์ ตั้งอยู่เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ ในที่นี้เป็นการทำงานร่วมกันกับกองธรณีวิทยา ซึ่ง ทาวเวอร์ ที่ได้ไปดูงานนี้ก่อนการแก้ไขวัดค่าความต้านทานของระบบกราวด์ดิ้ง(Ground resistance) ได้ 12 โอห์ม
2. ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อเตรียมเจาะดินซึ่งในการเจาะจะมีทั้งใช้เครื่องเจาะแบบไฮดรอลิก(Hyddraulic) และเครื่องเจาะแบบใช้น้ำบาดาลสามขา ดูรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.12 แสดงการเจาะแบบน้ำบาดาลสามขา

จากผลการคำนวณทาวเวอร์(Tower) ต้นนี้ต้องเจาะลึกประมาณ 12 เมตร จำนวน 2 หลุม โดยห่างจากฐานล่าง(Stub) ของทาวเวอร์(Tower) ประมาณ 3 เมตร เพื่อให้ได้ผลสูงสุดควรเจาะและติดตั้งกราวด์รอด(Ground rod) ตามแนวทะแยงตรงกันข้ามกัน โดยหลุมเจาะนั้นจะมีความกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร

3. เมื่อเจาะได้ความลึก 12 เมตร ให้ลองทำการทดสอบค่าความต้านทานของดิน โดยนำแท่งทองแดงใส่ลงไปก่อนทำการแก้ไข หรือต่ำกว่ามาตรฐาน 10 โอห์ม
4. เมื่อได้ค่าความต้านทานที่ต้องการแล้ว นำแท่งกราวด์รอด(Ground rod) ฝังลงไป ในกรณีนี้ต้องใช้อุปกรณ์เชื่อม(Adapter) ต่อแท่งกราวด์รอด(Ground rod) เพื่อให้ได้ความยาว 12 เมตร ตามต้องการ จากนั้นเทสาร Power Fill ลงในหลุมประมาณ 1 ถุง/หลุม เพื่อลดค่าความต้านทานของดิน
5. ทำการต่อกราวด์เคาน์เตอร์พอยส์(Ground counter poise) จากฐานล่าง(Stub) ของทาวเวอร์(Tower) มายังแท่งกราวด์รอด ความลึกประมาณ 50 เซนติเมตร แล้วทำการต่อเข้าด้วยกัน โดย Copper weld จากนั้นให้ทำการวัดค่าความต้านทานของกราวด์ดิ้ง อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเสาต้นที่ทำการแก้ไขนี้วัดค่าได้ 2 โอห์ม



รูปที่ 2.13 การลากสายดินจากฐานล่าง(Stub)ของทาวเวอร์(Tower)

รูปที่ 2.14 ต่อกราวด์ด้วยตัวหนีบ(Clamp)ในกรณีไม่ใช้วิธีเชื่อม(Adapter)

6. เชื่อมสายกราวด์เข้าด้วยกันทั้ง 4 ขา ทั้งนี้เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดินได้อย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2.15 การ Test ค่า Ground Resistance

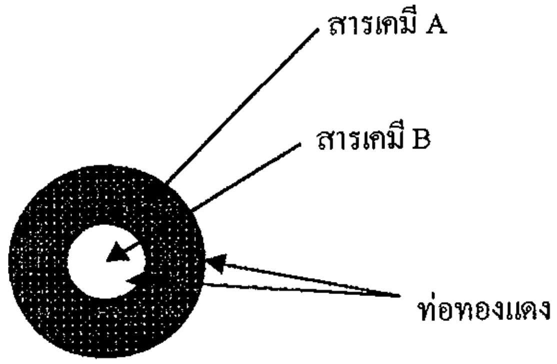
ข้อควรระวัง

1. ก่อนทำการแก้ไขค่ากราวด์ ให้เช็คดูระบบกราวด์ ของทาวเวอร์ให้เรียบร้อย
2. ในการเชื่อมรอยต่อด้วยทองแดง (Coper weld) ต้องทำความสะอาดพื้นผิวบริเวณที่จะเชื่อมให้สะอาด
3. ควรระวังอันตรายจากการเชื่อมรอยต่อ โดยสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล
4. ควรตรวจสอบเครื่องมือและอุปกรณ์ในการเจาะให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ตลอดเวลา

2.11<u>แบบเติมสารเคมี(Additive Metter Methods)</u>

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แท่งอิเลคโตรด (ดูรูปที่2.16 และ 2.17)



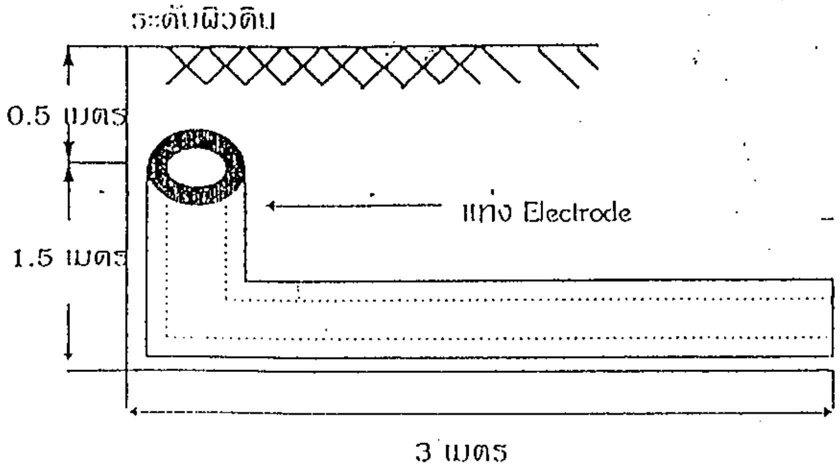
รูปที่ 2.16ส่วนประกอบภายในของแท่ง Electrode

2. อุปกรณ์การขุดดิน
3. กราวด์เคาน์เตอร์พอยส์ (Ground counter poise)
4. ทองแดง(Copper weld) ใช้เชื่อมรอยต่อ

ลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงาน

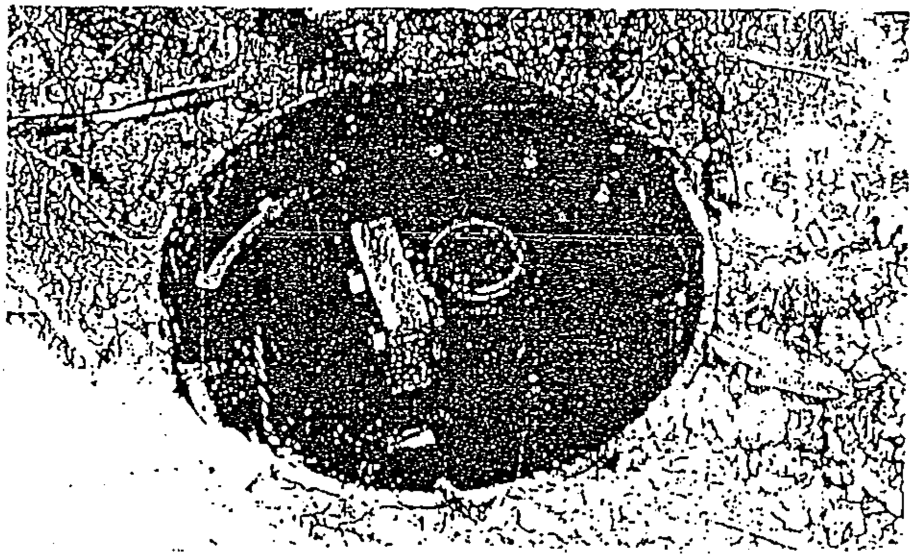
1. ทราบผลการทดสอบค่าความต้านทานจำเพาะของดินแล้ววัดค่าความต้านทานของกราว์ดิ้ง ก่อนที่จะทำการแก้ไข
2. ขุดหลุมตามแนวเส้นทะแยงมุมของทาวเวอร์ (Tower) (45 องศา ตามแนวสายส่ง) ขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 3 เมตร ลึก 2 เมตร โดยห่างจากฐานล่าง(Stub) ของทาวเวอร์ ประมาณ 2 เมตร
3. นำแท่งอิเลคโตรดวางตามแนวหลุม

4. เมื่อฝังแท่งอิเลคโตรด เสร็จเรียบร้อย ใช้กราวด์เคาน์เตอร์พอยส์เชื่อมต่อจากฐานล่าง ของทาวเวอร์ มายังแท่งอิเลคโตรดทั้งสามแท่งโดยเชื่อมรวมกันทั้งหมด (ดังรูปที่ 2.18)
2. ทำการกลบดินฝังแท่งอิเลคโตรด และเช็คค่าความต้านทานของกราวด์ดิ้งอีกครั้ง (ดูรูปที่ 2.19)



รูปที่ 2.17 การฝังแท่งอิเลคโตรดใต้ดิน

รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อสายกราวด์



รูปที่ 2.19 การฝังแท่ง Electrode เสร็จเรียบร้อยแล้ว

หมายเหตุ

วิธีการแก้ไขแบบฝังแท่งอิเลคโตรด (Electrode) นี้ต้องใช้ระยะเวลา 6 เดือน จึงจะสามารถทราบผลการดำเนินการแก้ไขได้ ในการออกแบบระบบกราวด์ (Ground) มีวิธีที่แตกต่างกันออกไปมากมาย ชนิดของอิเลคโตรด (Electrode) เป็นสิ่งจำเป็นที่จะลดค่าความต้านทานของดิน เพื่อที่จะต้องพิจารณาหรือให้ได้ค่าความต้านทานของดินอยู่ในค่าที่ต้องการหรือยอมรับได้ ซึ่งจะถูกกำหนดอีกครั้งโดยคุณลักษณะและคุณสมบัติของดินอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบด้วย

2.12 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการแบ่งชนิดของดินออกตามชั้นต่างๆกันนั้นจะได้เพียงแต่ค่าความต้านทานอย่างคร่าวๆไม่ค่อยจะละเอียดนัก ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของดินจึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญอย่างยิ่ง การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของดินนี้ จะต้องทำการทดสอบกันหลายจุดในบริเวณที่จะก่อสร้าง โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของอิเลคโตรดและด้วยความลึกต่างๆกันจึงจะสามารถรู้ว่าค่าของความต้านทานจำเพาะของดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ซึ่งบางครั้งค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูง ซึ่งจะเป็นข้อเตือนให้รู้ว่าความปลอดภัยเป็นปัญหาที่จะต้องนำมาพิจารณากันอย่างรอบคอบ

รูปที่ 2.20 เครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะของดิน

2.13 การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถหาได้หลายวิธี โดยมีวิธีหลักๆดังนี้

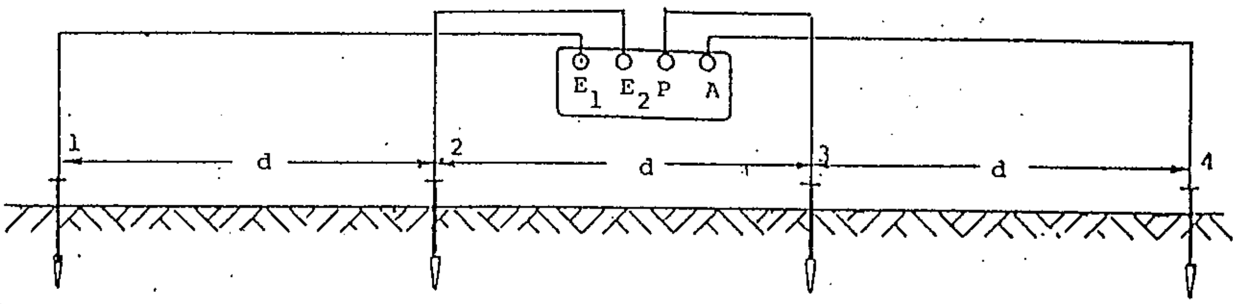
1.จากเครื่องวัดความต้านทานดินที่มีขั้วสี่ขั้วตามวิธีของ Wenner คือใช้อิเลคโตรดปักดิน 4 อันด้วยกัน ปักในแนวเส้นตรงเรียงกันให้ได้ระยะห่างกันเท่าๆกัน เท่ากับ d จากอิเลคโตรดปักดินต่อเข้ากับขั้วของเครื่องวัด อิเลคโทรดโพรบ 2 และ 3 จะต้องปักให้ลึกได้ไม่เกิน 0.05 d แล้วปรับโพเทนซิโอมีเตอร์เพื่อสมดุลย์วงจรวัดความต้านทานดังที่กล่าวมาแล้ว จึงหาความต้านทานจำเพาะได้จากสมการ

$$\rho = 2dR$$

เมื่อ ρ = ความต้านทานเฉพาะของดิน

d = ระยะระหว่างอิเลคโตรด

R = ความต้านทานที่วัดได้

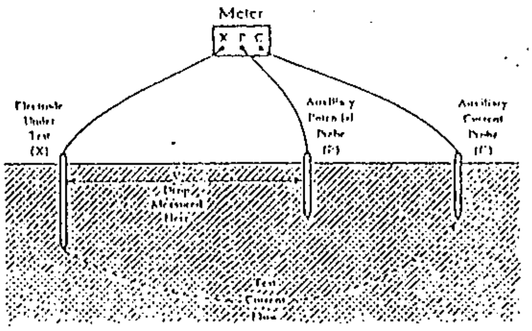


รูปที่ 2.21 การวัดความต้านทานดินโดยวิธีของ Wenner

2.การวัดแบบ 3 จุด (Driven rod or three point method)

$$\rho = \frac{2\pi R}{\ln\frac{8B}{d} - 1}$$

การวัดด้วยวิธีนี้จะให้ค่าความต้านทานที่ตรงกับความเป็นจริงที่สุด โดยต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างแท่งหลักดิน จากการทดลองพบว่าถ้าระยะ XP เป็น 0.5-0.7 เท่าของระยะ XC จะได้ค่าผิดพลาดไม่เกิน 5% ซึ่งระยะ XPควรมีค่าเท่ากับ 0.62 เท่าของระยะ XC จึงจะให้ค่าถูกต้องที่สุด เราเรียกวิธีนี้ว่า “62% method”



รูปที่2.22 การวัดแบบ 3 จุด

3.การวัดแบบ 4 จุด (four point method)

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}}$$

เมื่อ ρ : ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) [Ω. m]

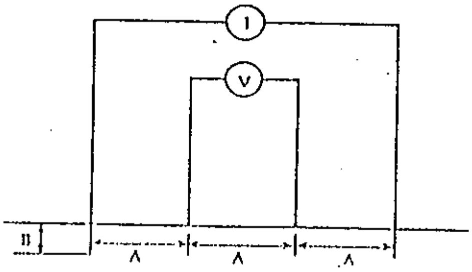
R : ค่าความต้านทานที่วัดได้ [Ω]

A : ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดข้างเคียงที่อยู่ติดกัน [m]

B : ความลึกของแท่งอิเลคโตรดใต้ผิวดิน [m]

ในกรณีที่ $B << A$ เราจะได้ว่า

$$\rho = 2\pi AR$$



รูปที่ 2.23 การวัดแบบ 4 จุด

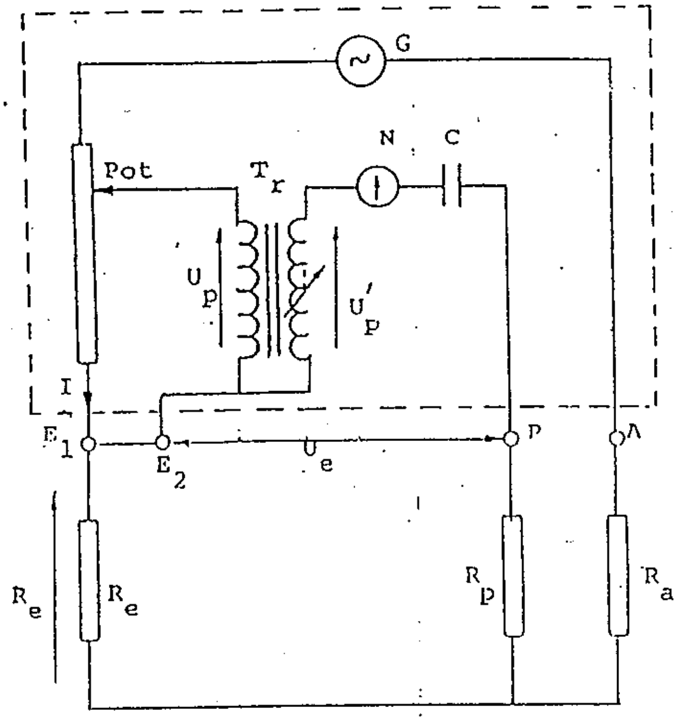
2.12 การวัดความต้านทานสายดิน

ระบบกราวด์ดิ้งของสถานีจ่ายไฟฟ้า จะต้องทำการวัดเพื่อหาค่าความต้านทานที่แน่นอนอีกครั้ง หลังจากที่ได้ทำการก่อสร้างเสร็จ ค่าของความต้านทานที่ได้จากการทดสอบนี้จะเป็นเครื่องช่วยชี้ขั้นสุดท้ายว่า ระบบกราวด์ดิ้งที่ได้ออกแบบได้ค่าโอห์มต่ำดังที่ต้องการหรือไม่และจะใช้งานได้ผลดีเพียงใด

2.14.1 หลักการของเครื่องวัดความต้านทานดิน

เครื่องวัดความต้านทานดินประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงดัน G เป็นตัวจ่ายกระแส I ผ่านความต้านทาน แบ่งแรงดันโพเทนซิโอมิเตอร์ Pot. ลงสู่ดินทางขั้ว E ที่มีความต้านทานของดินคือ R_e และผ่านอิเลคโตรดรากสายดินที่มีความต้านทาน R_e กระแสที่ใช้ในการวัดนี้ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสายดิน R_e เท่ากับ U_e โพรบ P เป็นอิเลคโตรดรากสายดินวัดแรงดันตกคร่อม R_e หม้อแปลง Tr ทำหน้าที่กลับเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมโพเทนซิโอมิเตอร์ U_p เป็นมุม 180 องศา เป็นกัลวานอมิเตอร์หรือมิเตอร์ชี้สมดุล (Nullindicator) N จะวัดผลต่างของแรงดันที่คร่อมความต้านทานดิน R_e กับแรงดันที่คร่อมโพเทนซิโอมิเตอร์ U_e-U_p ถ้าให้อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงเท่ากับ 1:1 และความต้านทาน Pot. เท่ากับ P_e เมื่อปรับวงจรจนกระทั่งกัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ คือได้สมดุลนั่นคือ $U_p = U_e$ ฉะนั้นค่าความต้านทานของสายดิน R_e จึงอ่านได้โดยตรงจากสเกลโพเทนซิโอมิเตอร์ Pot. ค่าความต้านทานที่วัดได้ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส ย่านสเกล (range) ของการวัดความต้านทานอาจปรับได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง Tr เป็นขั้นๆความต้านทานของอิเลคโตรดช่วง A คือ R_e มีผลต่อขนาดค่ากระแสวัด นั่นคือมีผลต่อความไว (Sensitivity) ในการวัดนั่นเอง แต่ไม่มีผลกระทบต่อความถูกต้องในการวัด ซึ่งใน

ทำนองเดียวกับความต้านทานของโพรบ P คือ R_p ไม่มีผลต่อความถูกต้องของค่าที่วัดได้ แต่มีผลต่อความไวในการวัด



รูปที่2.24 เครื่องวัดความต้านทานดิน

G = เครื่องกำเนิดแรงดันกระแสสลับความถี่ 100-150 เฮิร์ซ

T_r = หม้อแปลงแรงดัน

Pot = โพเทนซิโอมิเตอร์

N = กัลวานอมิเตอร์หรือมิเตอร์สมดุลย์วงจร

E1, E2 = ขั้วต่อรากสายดินที่ต้องการวัด

P = ขั้วต่อของโพรบ

A = ขั้วต่อของอิเลคโตรดช่วย

R_e = ความต้านทานสายดินที่ต้องการ

R_p = ความต้านทานโพรบ

R_a = ความต้าน

I = กระแสที่ใช้วัด

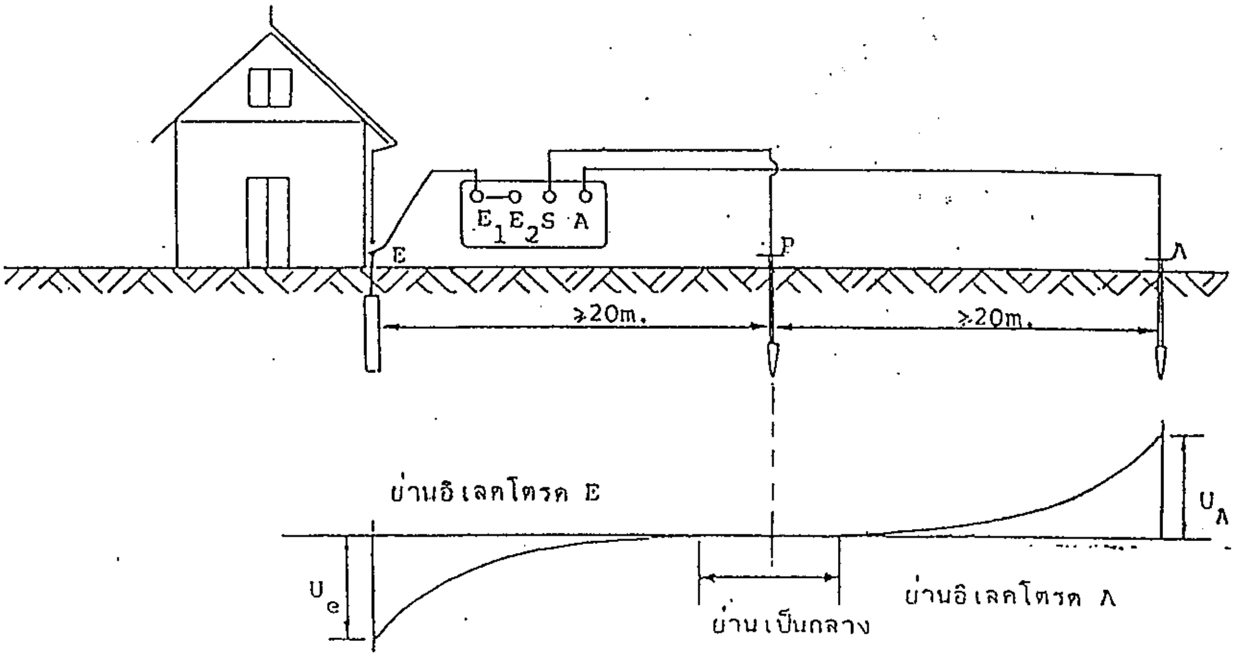
U_p = แรงดันคร่อม P

U_e = แรงดันคร่อม R_e

2.14.2 การต่อวงจรวัดความต้านทานดิน

การต่อวงจรวัดความต้านทานสายดิน ให้ต่อขั้ว E หรือ E_1 ต่อกับ E_2 ของเครื่องวัดดินเข้ากับรากสายดินที่ต้องการวัด E ต่อขั้ว P เข้ารากสายดินโพรบที่ปักห่างออกไปจากรากสายดินที่ต้องการวัดไม่น้อยกว่า 20 เมตร และต่อขั้ว A เข้ากับรากสายดินช่วงที่ปักอยู่ในแนวเดียวกับรากสายดินที่ต้องการวัดกับโพรบ โดยห่างออกไปจากอิเลคโตรดโพรบ P ไม่น้อยกว่า 20 เมตร นั่นคืออิเลคโตรดรากสายดินช่วง A จะอยู่ห่างจาก รากสายดินที่ต้องการวัดไม่น้อยกว่า 20 เมตร หลักอิเลคโตรด P และ A นี้จะปักลึกลงไปในดินประมาณ 40 เซนติเมตร การให้ระยะห่างระห่างอิเลคโตรดรากสายดินช่วง A รากสายดินที่ต้องการวัด E ห่างกันมากพอเช่นนี้ก็เพื่อมิให้ศักย์ไฟฟ้าจากอิเลคโตรดไปรบกวนซึ่งกันและกัน ค่าความต้านทานที่วัดได้จึงจะถูกต้อง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือต้องการให้อิเลคโตรดโพรบ P อยู่ในย่านที่เป็นกลาง ความถูกต้องของการวัดความต้านทานสายดินขึ้นอยู่กับลักษณะการวางอิเลคโตรด A และโพรบ P ในกรณีที่ระบบรากสายดินเล็ก เช่น รากสายดินปักลึกในแนวดิ่งหรือแท่งรากสายดินในแนวนอนยาวไม่เกิน 10 เมตร หรือวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 เมตร ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดประมาณ 20 เมตร ดังกล่าวแล้วข้างต้น แต่ถ้าเป็นระบบรากสายดินกว้างใหญ่จำเป็นต้องใช้ระยะห่างระหว่างอิเลคโทรดรากสายดินช่วง A และอิเลคโตรดโพรบ P มากขึ้น โดยทั่วไป ใช้ระยะห่างประมาณ 3 ถึง 5 เท่าของความยาวด้านที่ยาวที่สุดของระบบสายดิน ความต้านทานของระบบสายดินดังกล่าวมีค่าเพียงไม่กี่โอห์ม ฉะนั้นจะต้องปักอิเลคโตรดโพรบให้อยู่ในย่านศักย์เป็นกลาง แนวทางการปักอิเลคโตรดรากสายดินช่วง A กับโพรบ P ควรปักในแนวตั้งฉากกับแนวความยาวของระบบรากสายดิน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่วัดความต้านทานสายดินต่ำๆ ค่าความต้านทานของอิเลคโตรดรากสายดินช่วง A ไม่ควรเกิน 500 โอห์ม

ถ้าความต้านทานจำเพาะ ของดินมีค่าสูง โดยเฉพาะที่ผิวดินแห้งความต้านทานที่รากสายดินช่วงจะสูงเกินไป อาจแก้โดยปักอิเลคโตรด A ให้ลึกลงไปอีกหรืออาจจะต้องใช้อิเลคโตรดปักหลายอัน ให้ระยะห่างกัน 1 ถึง 2 เมตร และต่อถึงกัน ถ้าจำเป็นอาจต้องช่วยทำให้ผิวดินบริเวณรอบหลักอิเลคโทรด(P และ A) มีความชื้น



รูปที่2.25 การวัดความต้านทานสายดิน

การหาค่าความต้านทานสายดินสามารถใช้เครื่องมือได้หลายแบบแต่วิธีที่นำมาใช้ในโครงงานครั้งนี้คือแบบ MEGGER GROUND TESTER ของบริษัท JAMES G. BIDDLE CO. ซึ่ง สามารถอธิบายส่วนประกอบและวิธีใช้ได้ดังนี้ได้ดังนี้

M: MEGGER GROUND

P1: POTENTIAL TERMINAL

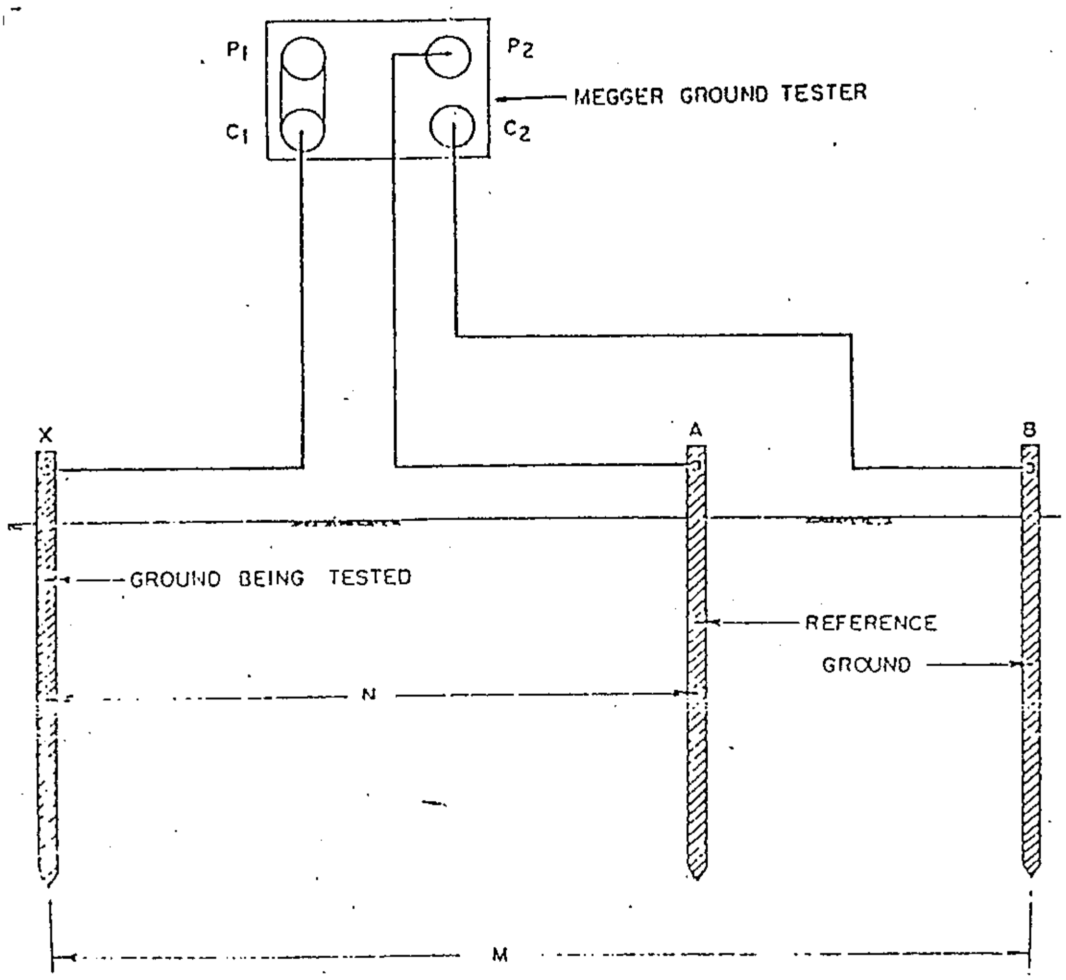
P2: POTENTIAL TERMINAL

C1: CURRENT TERMINAL

C2: CURRENT TERMINAL

X: จุดที่ต้องการทดสอบ (เช่น กราวด์แมท (ground mat หรือ กราวด์รอด (ground rod) เดี่ยว เป็นต้น)

A และ B: แท่งกราวด์รอด (อาจใช้แท่งเหล็กอาบสังกะสี หรือแท่งเหล็กหุ้มทองแดง) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4 " x 1.00 m (หรืออาจจะใช้ยาวกว่า 1.00 m ก็ได้)



รูปที่ 2.26 การวัดค่าความต้านทานกราวด์ดิ้งโดยวิธีวัดแบบ MEGGER

วิธีการทดสอบ

1.ในกรณีที่ X เป็นแท่งหรือ ท่อที่มีขนาดยาว 8-10 ฟุต ฝังอยู่ในดินตามแนวดิ่งแล้ว ให้ใช้ระยะ N = 50-70 % ของระยะ M

2.ในกรณีที่ X เป็นพวกกราวด์แมท (Ground mat) หรือ กราวด์รอด (Ground rod) มีขนาดใหญ่ ระยะ N จะต้องประมาณ 5 เท่า ของความยาวของเส้นทะแยงมุมที่ยาวที่สุดของพื้นที่กราวด์แมท

เมื่อต่อสายและติดตั้งเครื่องมือตามรูปแล้ว ทำการหมุน Crank ของเครื่องวัดโดยให้ได้ความเร็วตามที่ระบุไว้ที่เครื่องวัดและความเร็วที่หมุนนี้จะต้องสม่ำเสมอแล้วอ่านค่าความต้านทานของสายดินจากเครื่องได้โดยตรง มีหน่วยเป็นโอห์มการทดสอบควรทำหลายๆครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยออกมา แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบแต่ละครั้ง ไม่ควรจะแตกต่างกันมากนัก

โดยสรุปแล้วในการออกแบบระบบกราวด์ดิ้งตามวิธีการดังที่ได้กล่าวไว้นี้ พอจะเป็นแนวทางให้การออกแบบระบบกราวด์ดิ้งมีหลักเกณฑ์ที่ถูกต้องยิ่งขึ้น แต่การออกแบบบางครั้งมีความต้องการทางด้านค่าของความต้านทานว่ากราวด์แมทที่สร้างเสร็จแล้วจะต้องมีค่าความต้านทานของสายดินต่ำ ซึ่งหมายถึงว่าจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง เพื่อสร้างระบบกราวด์ให้ได้ผลตามที่ต้องการ นอกจากนี้ไม่ใช่ว่าวัสดุจำพวกทองแดงแต่เพียงอย่างเดียวที่สามารถนำมาใช้ทำระบบกราวด์ดิ้ง ในต่างประเทศโดยเฉพาะทางด้านยุโรปได้มีการใช้วัสดุประเภทเหล็กอาบสังกะสีมาใช้ทำระบบกราวด์ปรากฏว่าได้ผลดีพอสมควร ดังนั้นสำหรับประเทศไทยเราซึ่งดินโดยทั่วๆไปมีลักษณะเป็นพวกดินเคมีอินทรีย์(Organic soil) ซึ่งดินชนิดนี้มีค่าความต้านทานจำเพาะดินต่ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าประเทศไทยโดยเฉลี่ยแล้วไม่ค่อยจะมีปัญหาด้านค่าความต้านทานจำเพาะดินมีค่าสูงมากนัก จึงควรที่จะมีการศึกษาถึงเรื่องการใช้วัสดุเพื่อสำหรับนำมาใช้กับระบบกราวด์ดิ้งของระบบจ่ายกระแสไฟ ในประเทศไทยว่าวัสดุประเภทใด เมื่อนำมาใช้งานแล้วได้ผลดีและประหยัดที่สุด

2.15 <u>วิธีปรับเปลี่ยนสภาพดิน</u>

สืบเนื่องมาจากพื้นที่บางแห่งที่ติดตั้งระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงตามภูเขาของประเทศไทยนั้น มักได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่าในช่วงฤดูฝน ส่งผลให้ลูกถ้วยเกิดแฟลชโอเวอร์ (Flashover) เป็นประจำในเสาต้นที่มีค่าความต้านทานสูง เพราะตั้งอยู่ในพื้นที่ที่เป็นดินแข็ง ทั้งยังมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินสูง และไม่สามารถแก้ไขโดยใช้วิธีตอกแท่งกราวด์รอดได้ วิธีปรับเปลี่ยนสภาพดินนี้มีอยู่ 2 วิธีหลักคือ การเติมเกลือและการเติมสารเคมี โดยเลือกให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่แต่ละพื้นที่ เช่นฝ่ายปฏิบัติการภาคใต้ (ฝปต.) ใช้โซเดียมคลอไรด์ผสมถ่านป่น ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ 15 โอห์ม-เซนติเมตร (Ohm.cm.) แทนสารเคมีโดยฝังรอบแท่งกราวด์รอดฝ่ายปฏิบัติการภาคกลาง (ฝปก.) ใช้วิธีเติมสารเคมีโดยการเจาะหลุมที่มีขนาด และความลึกที่พอเหมาะแล้วใส่สารเคมีลงไปแทนที่ดินเดิม

2.15.1 คุณสมบัติของสารเคมี

1. มีส่วนผสมของทองแดง (Carbon) 96%
2. มีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เซนติเมตร
3. เพิ่มประสิทธิภาพในการสัมผัสระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับดินซึ่งจะช่วยลดความผิดพร่องอิมพีแดนซ์ ได้ในระดับหนึ่ง
4. ช่วยกระจายกระแสฟ้าผ่าได้อย่างรวดเร็วและสะดวก
5. ป้องกันการกัดกร่อนที่สายทองแดงและ กราวด์อิเล็กโทรด
6. ไม่ละลายไปกับน้ำและทำให้สิ่งแวดล้อมเสียหาย

หลักในการเติมสารเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของระบบป้องกันคาทอดิก (Cathodic) ที่ได้ทำการฝังไว้ในดินโดยสามารถเลือกสารเคมีที่จะใช้ในแต่ละชนิดได้ อาทิเช่น

1.การเติมสารเคมีโดยใช้ส่วนผสมของ ผงยิปซัม 70 % ($CaSO_4$) ดินเหนียว 20 % และโซเดียมซัลเฟต 5% สารเคมีชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานจำเพาะ 50 โอห์ม.เซนติเมตร และเหมาะสำหรับใช้กับพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะดินสูง คุณสมบัติของดินเหนียวคือสามารถดูดน้ำไว้ได้นานและแผ่ขยายออกได้ ดังนั้นจะทำให้ดินและแอโนดสัมผัสกันได้ดี แต่ถ้าเป็นส่วนผสมระหว่างดินเหนียว 75 % กับยิปซัม 25% จะมีค่าความต้านทานจำเพาะ 250 โอห์ม.เซนติเมตร เหมาะสำหรับดินที่มีความชื้นต่ำ

2.การเติมสารเคมีที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน ปกติจะเติมผงถ่านชนิดนี้รอบๆแท่งแอโนด โดยผงถ่านจะมีส่วนผสมของถ่านโคก ถ่านปิโตรเลียมและกราไฟต์ จุดประสงค์ของวิธีการเติมสารเคมีแบบนี้เพื่อลดค่าความต้านทานสายดินโดยเพิ่มขนาดของของพื้นที่ผิวให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเด-ชัน ทำให้เพิ่มการสัมผัสทางไฟฟ้าได้ดี การเติมควรโรยรอบๆแท่งแอโนด ค่าความต้านทานจำเพาะของการเติมสารชนิดนี้เท่ากับ 50 โอห์ม.เซนติเมตร ขนาดและรูปร่างของหลุมเป็นสิ่งสำคัญเพราะเป็นส่วนที่ต้องสัมผัสระหว่างแท่งแอโนดกับดินและเพื่อไว้ระบายแก๊ซ โดยปกติวิธีการเติมถ่านโคกนี้เหมาะสำหรับที่จะใช้กับกราวด์แบบตั้งฉากหรือขนานกับพื้นดินที่ไม่ลึก มีค่าความต้านทานจำเพาะ 35 โอห์ม.เซนติเมตร ถ้าแท่งรอดฝังอยู่ในดินลึกๆเราจะใช้ถ่านปิโตรเลียมเผาจนเป็นผงแทน และค่าความต้านทานจำเพาะของมันประมาณ 15 โอห์ม.เซนติเมตร

<u>ขั้นตอนการดำเนินการ</u>

1.สำรวจและวัดค่าความต้านทานจำเพาะเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะที่ระดับความลึกของชั้นดินต่างๆกัน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดประกอบด้วยเครื่องมือ 2 เครื่องหมายการค้า คือ

- เครื่องหมายการค้า "ABEM" รุ่น SAS 300
- เครื่องหมายการค้า "IRIS" รุ่น SYSCAL R2

2.คำนวณหาค่าความต้านทานดินที่ต้องการต่ำสุดจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์ดังนี้คือ

1.Enter Type Of Electrode (S= Surface Or D= Deep)

2.Enter Diameter Of Powerfill Column (inches)

3.Enter Length of Powerfill Column (Feet)

4.Enter Soil Resistivity (Ohm-cm.)

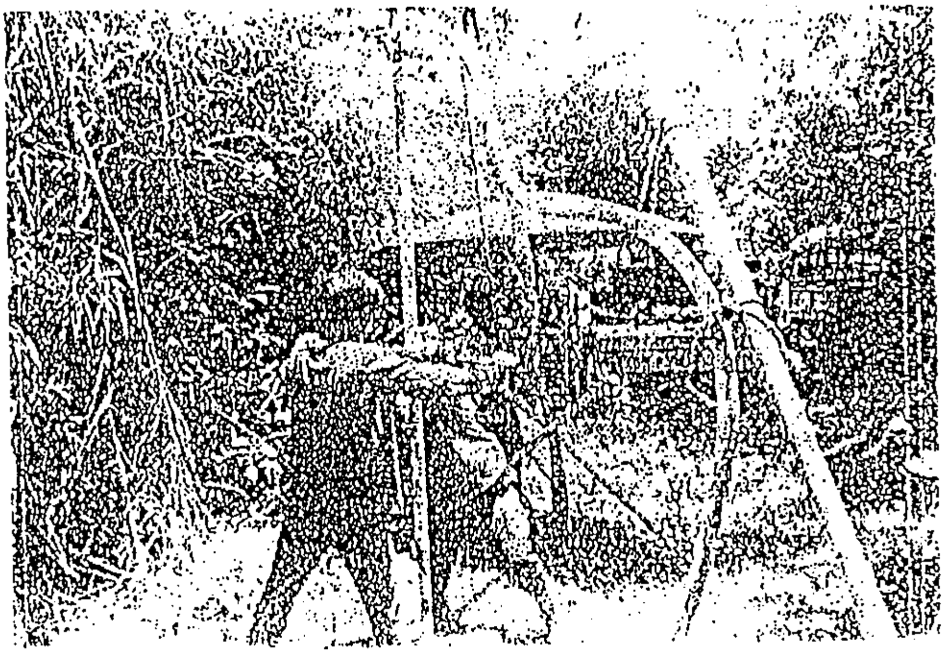
5.Enter Number of Powerfill Column in Parallel?

6.Enter Spacing between Powerfill Column (Feet)

<u>หมายเหตุ</u>

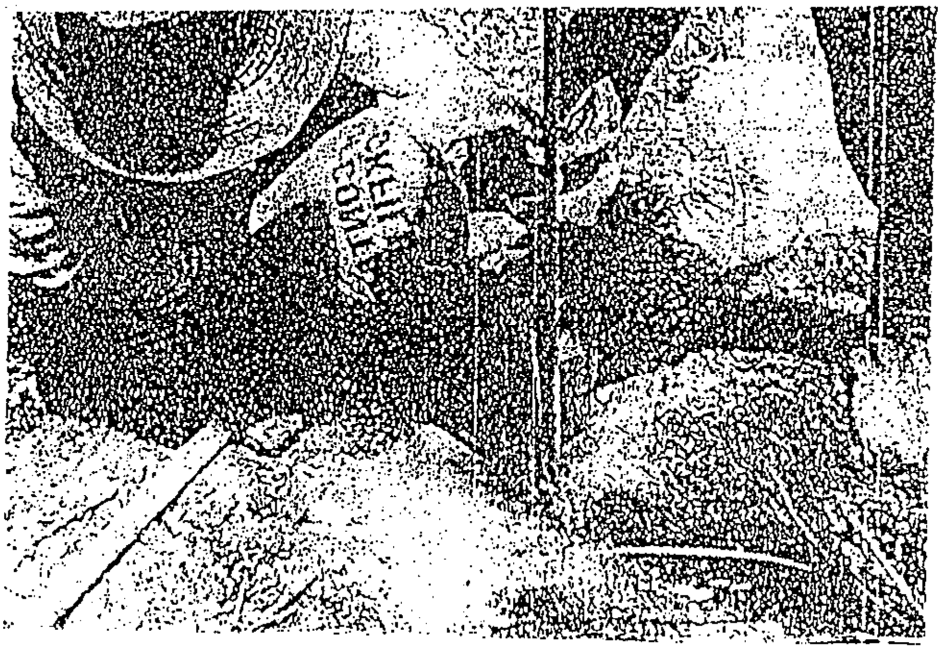
ข้อ 5,6 จะใส่ข้อมูลก็ต่อเมื่อมีการใช้แท่งอิเลคโตรดมากกว่า 2 แท่งขึ้นไป ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณคือ ค่าความต้านทานดินมีหน่วยเป็นโอห์ม

3.กำหนดตำแหน่งที่จะขุดหลุมแล้วเปิดหน้าดินที่ระดับความลึกอย่างน้อย 50 เซนติเมตร ในที่นี้เลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลุมประมาณ 5 นิ้ว เพื่อความเหมาะสมของเครื่องเจาะที่สามารถนำไปปฏิบัติการขุดเจาะในภาคสนาม



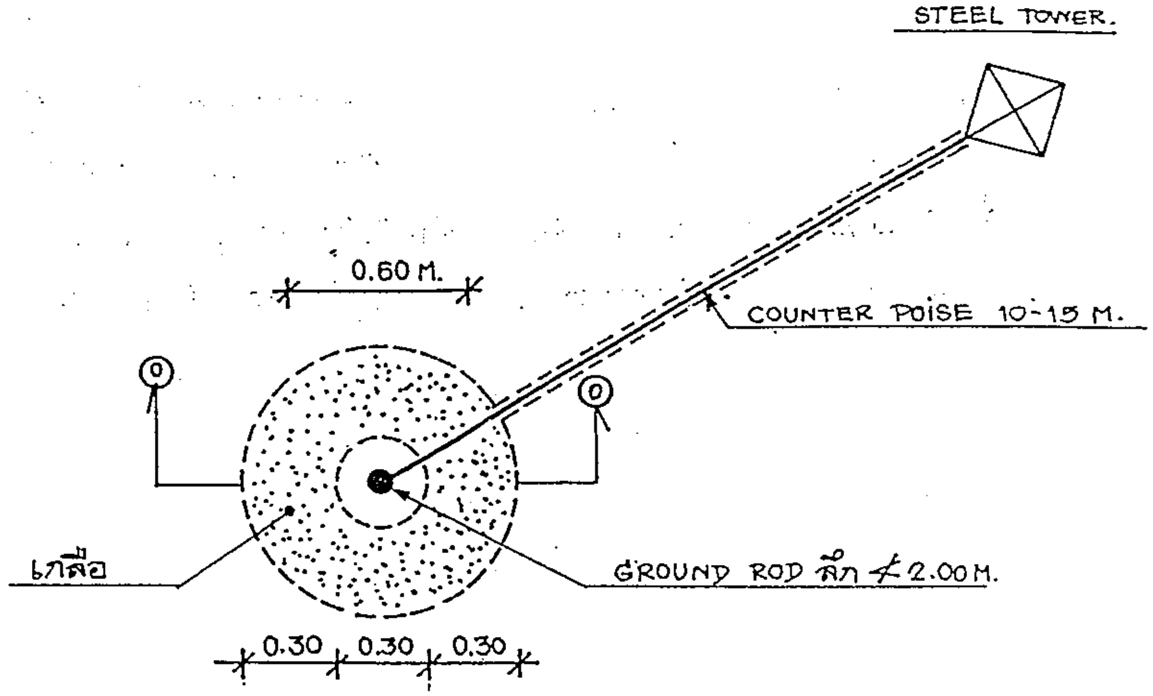
รูปที่ 2.27 การติดตั้งอุปกรณ์

(ก)

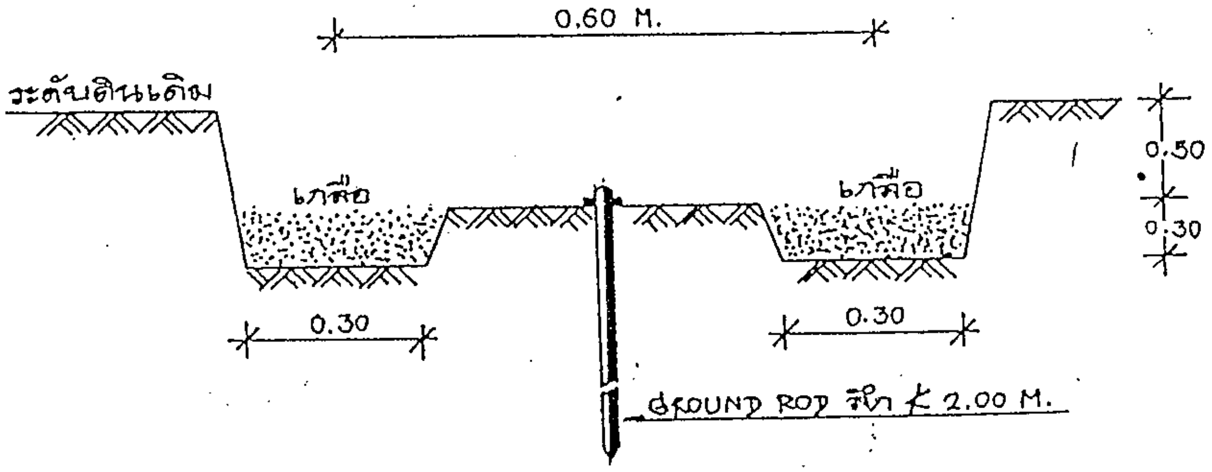


(ข)

รูปที่ 2.28 การปฏิบัติลดค่าความต้านทานกราวด์



(ก)



(ข)

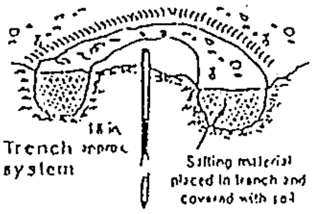
รูปที่ 2.29 การใช้เกลือฝังรอบแท่งกราวด์รอด

4.หลังขุดเจาะเรียบร้อยแล้วเราสามารถลดค่าความต้านทานของดินและลดค่าความต้านทานของกราวด์รอดสัมพัทธ์ของดินในกรณีที่ดินบริเวณนั้นมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินสูง ได้ 3 วิธี คือ

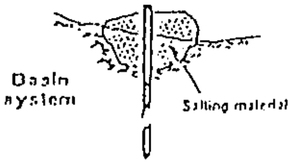
1." การขุดร่อง" (The Trench method) คือการขุดร่องเป็นร่องรูปโดนัทล้อมรอบแท่งตัวนำ ลึก 0.3 เมตร (1 ฟุต) แล้วเทสารเคมีจำพวกเกลือเมทาลิค (Metallic salt) เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต) คอปเปอร์ซัลเฟต ลงในร่องนั้น วิธีนี้จะป้องกันสารเคมีไม่ให้สัมผัสกับแท่งตัวนำโดยตรง

2. "การขุดหลุม" (The Basin method) คือการขุดหลุมที่แท่งตัวนำ แล้วเทสารเคมีลงในหลุมนั้น วิธีนี้จะทำให้สารเคมีสัมผัสกับแท่งตัวนำโดยตรงสองวิธีดังกล่าวข้างต้น จะทำให้เกิดผลเร็วเมื่อเกิดฝนตก เนื่องจากดินจะดูดซึมสารเคมีเหล่านั้นไว้

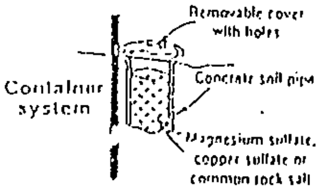
3."การใช้ภาชนะบรรจุ" (The Container method) คือการฝังภาชนะคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ยาว 16 นิ้ว ไว้ข้างแท่งตัวนำ ในภาชนะคอนกรีตนี้จะบรรจุสารเคมีไว้โดยสารเคมีจะซึมผ่านออกมา วิธีนี้จะให้ผลช้า แต่ให้ผลต่อเนื่องเป็นเวลานาน



รูปที่ 2.30 การขุดร่อง



รูปที่ 2.31 การขุดหลุม



รูปที่ 2.32 การใช้ภาชนะบรรจุ