

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน



นาย ชานูชัย เล่าห์พงศัไพศาล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

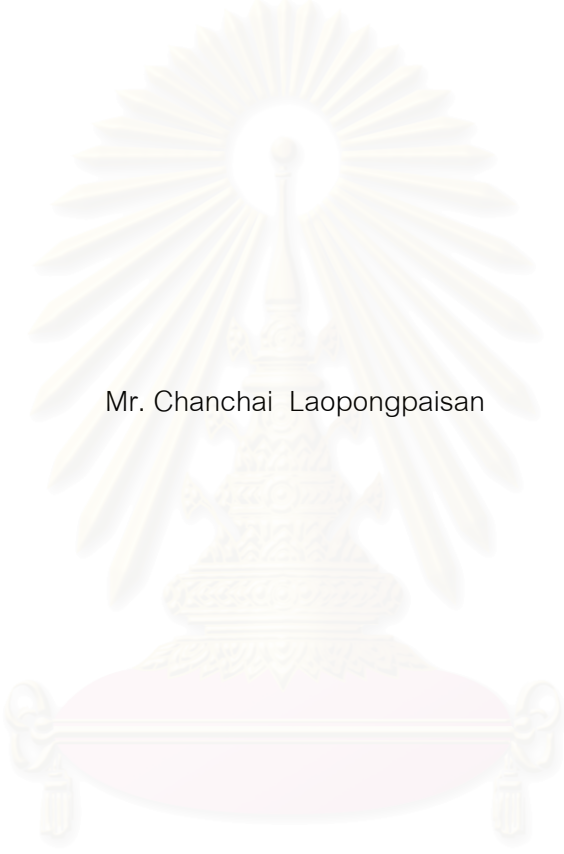
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0429-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SUBSTATION GROUNDING SYSTEM DESIGN WITH
LAYERS OF SOILS CONSIDERATION

Mr. Chanchai Laopongpaisan



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0429-3

ชาญชัย เลাহ์พงศ์ไพศาล : การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณา
ผลเนื่องจากชั้นดิน (SUBSTATION GROUNDING DESIGN WITH LAYER OF SOILS
CONSIDERATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ , อาจารย์ปรึกษาร่วม :
ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ , 101 หน้า. ISBN 974-13-0429-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยแยกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของความรู้ทางทฤษฎีและส่วนของซอฟต์แวร์ โดยในส่วนของทฤษฎีนั้นครอบคลุมความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์การออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและดินสองชั้น ในส่วนของซอฟต์แวร์นั้นได้พัฒนาโปรแกรมในการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน ด้วยภาษา Visual Basic เวอร์ชัน 6.0

ระบบต่อลงดินที่พิจารณาเป็นระบบที่มีลักษณะ โครงดาข่ายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยแนวโน้มของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงอย่างเดียว การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพิจารณาระบบต่อลงดินที่มีเฉพาะ โครงดาข่ายและระบบต่อลงดินที่มีแท่งดินติดตั้งรอบโครงดาข่าย โดยมีข้อกำหนดที่ใช้ลวดตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร และฝังโครงดาข่ายลึก 0.5 เมตรจากผิวดิน การออกแบบได้แสดงผลออกมาในรูปของ ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว โดยค่าความปลอดภัยในการออกแบบจะพิจารณาจากกรณีดินเนื้อเดียว ตามมาตรฐาน IEEE Std 80 -1986

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิติศ _____
สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา _____ 2543 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

##4270291021 :MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: TWO LAYER SOILS / SUBSTATION GROUNDING SYSTEM / MESH VOLTAGE / TOUCH
VOLTAGE

CHANCHAI LAOPONGPAISAN : SUBSTATION GROUNDING DESIGN WITH LAYER OF
SOILS CONSIDERATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF . PRASIT PITTAYAPAT.

CO-ADVISOR : DR. KOMSAN PETCHARAK 100 pp. ISBN 974-13-0429-3

This thesis describes a substation grounding system , which comprises of two sections, i.e. the theoretical background study and software development. In the first section, describes the basic theory ,the analysis and design of substation grounding system for one layer and two layer soil. For the software section ,the program was written by Visual Basic version 6.0.

The grounding system considered are of square grid shape, the soil resistivity can increase or decrease for two layer soil. The grounding system considered have grid pattern with rods around the perimeter. The wire used had the diameter of 10 mm and layed at the depth of 0.5 m. The result of the substation grounding design was displayed in the form of mesh and step voltage to the safty value according to IEEE standard 80 - 1986.



Department Electrical Engineering Student's signature _____.

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature _____.

Academic year 2000 Co'advisor's signature _____.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม โดยทั้งสองท่านได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ มาด้วยดีโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ ต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ไชยะ แฉ่มซ้อย และ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำ ในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา และทุกๆ คนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ชาญชัย เลาห์พงศ์ไพศาล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำทั่วไป	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สภาพปัญหาและแนวทางแก้ไข	3
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ	3
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	4
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	4
2. ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	5
2.1 มาตรฐานการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	6
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	6
2.2.1 ดิน	6
2.2.2 หินกรวด	9
2.2.3 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์	10
2.2.3.1 วงจรสมมูลย์ของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส	11
2.2.3.2 วงจรสมมูลย์ของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน	13
2.2.4 กระแส และช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ	14
2.2.5 ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด	16
ที่มนุษย์สามารถทนได้	
2.2.6 ลวดตัวนำ	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.7 GPR กระแส และความต้านทานของระบบการต่อลงดิน ของสถานีไฟฟ้าย่อย	20
2.2.8 สักดาไฟฟ้าเมฆ และสักดาไฟฟ้าช่วงก้าว	23
3. ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียว	26
3.1 การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว	26
3.2 การคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว	26
3.3 การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีดินเนื้อเดียว	28
4. ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น	32
4.1 การประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะ ของดินชั้นล่าง และความหนาของดินชั้นบน โดยใช้ Finite Wenner Resistivity Expression	32
4.2 การคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น	38
4.3 การคำนวณค่า Non-uniform Correction Factors ซึ่งใช้ปรับค่าแรงดันเมฆ โดยโครงตาข่ายถูกฝังในดินชั้นบนห่างจากผิวดิน 0.5 เมตร	40
4.4 การคำนวณค่า Non-uniform Correction Factors ซึ่งใช้ปรับค่าแรงดันช่วง ก้าวโดยโครงตาข่ายถูกฝังในดินชั้นบนห่างจากผิวดิน 0.5 เมตร	41
4.5 การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีดินสองชั้น	43
5. โปรแกรมการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	47
5.1 คำนำ	47
5.2 ภาพรวมของ Visual Basic	47
5.3 หลักการ โปรแกรมเชิงภาพของ Visual Basic	47
5.4 ลักษณะของโปรแกรม	49
6. เปรียบเทียบและวิเคราะห์การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ย่อยกรณีดินเนื้อเดียวและดินสองชั้น	59
6.1 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1	59
6.1.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและการออกแบบการต่อลงดิน กรณีสมมติเป็นดินสองชั้น	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.2 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น	63
6.1.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและการออกแบบการต่อลงดิน	64
กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว	
6.1.4 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว	67
6.1.5 เปรียบเทียบผลการออกแบบการต่อลงดินระหว่างกรณีดินสองชั้น	67
และดินเนื้อเดียว	
6.2 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2	68
6.2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและการออกแบบการต่อลงดิน	69
กรณีสมมติเป็นดินสองชั้น	
6.2.2 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น	72
6.2.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและการออกแบบการต่อลงดิน	72
กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว	
6.2.4 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว	75
6.2.5 เปรียบเทียบผลการออกแบบการต่อลงดินระหว่างกรณีดินสองชั้น	75
และดินเนื้อเดียว	
6.3 สรุปผลการวิเคราะห์	76
7. สรุปและข้อเสนอแนะ	78
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	82
ก. การวัดค่าความต้านทานภาคสนามและการออกแบบระบบต่อลงดิน	83
ข. หลักการคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว	90
ค. หลักการคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีดินสองชั้น	97
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 7
2.2	ค่าความต้านทานจำเพาะของหินประเภทต่างๆ 10
2.3	ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์ 11
2.4	ปริมาณกระแสที่เพศชาย และเพศหญิงสามารถทนได้ 14
2.5	ปริมาณกระแสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับร่างกายมนุษย์ 14
2.6	ค่าคงที่ของวัสดุประเภทต่างๆ ที่ใช้เป็นลวดตัวนำ 18
2.7	ขนาดลวดตัวนำที่เล็กที่สุดต่อหนึ่งหน่วยกระแส (cmils/A) 20
2.8	ค่าตัวประกอบการลด (D _p) 21
6.1	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 61 กรณีดินสองชั้น โดยติดตั้งแท่งดินรอบ โครงตาข่าย
6.2	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 62 กรณีดินสองชั้น โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย
6.3	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 64 กรณีดินเนื้อเดียว โดยติดตั้งแท่งดินรอบ โครงตาข่าย
6.4	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 66 กรณีดินเนื้อเดียว โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย
6.5	เปรียบเทียบผลการออกแบบกับชนิดของชั้นดินเมื่อความต้านทาน 68 จำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง
6.6	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2 70 กรณีดินสองชั้น โดยติดตั้งแท่งดินรอบ โครงตาข่าย
6.7	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2 71 กรณีดินสองชั้น โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย
6.8	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2 72 กรณีดินเนื้อเดียว โดยติดตั้งแท่งดินรอบ โครงตาข่าย

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.9	ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2 74 กรณีดินเนื้อเดียวโดยมีเฉพาะโครงตาข่าย
6.10	เปรียบเทียบผลการออกแบบกับชนิดชั้นดินเมื่อความต้านทาน 75 จำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง
ก.1	ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 1 83
ก.2	ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 2 84
ก.3	ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 3 84
ก.4	ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 4 84
ก.5	ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะโครงตาข่ายโดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 1 ... 85
ก.6	ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะโครงตาข่ายโดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 2 ... 86
ก.7	ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะโครงตาข่ายโดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 3 ... 87
ก.8	ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะโครงตาข่ายโดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 4 ... 88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	ลักษณะของอันตรายที่อาจเกิดขึ้นทั้ง 4 แบบ 2
2.1	ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อค่า 7 ความต้านทานจำเพาะของดิน
2.2	วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะด้วยวิธีแบบ 4 จุด 8
2.3	การโรยหินกรวด 10
2.4	วงจรสมมูลย์ของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส 11
2.5	วงจรสมมูลย์ของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน 13
2.6	ขนาดที่เล็กที่สุดของลวดตัวนำกับช่วงเวลาที่เกิดผิพรอง 19
2.7	ค่า G ของสาย Overhead Ground Wire 22
2.8	ค่า B ของสาย Overhead Ground Wire 23
3.1	แผนภาพการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว 31
4.1	การพิจารณาค่าความต่างศักย์เมื่ออยู่บนดินสองชั้น 32
4.2	วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด 33
4.3	แผนภาพขั้นตอนการหาค่าความต้านทานจำเพาะของ 37 ชั้นดินกรณีดินสองชั้น
4.4	แผนภาพการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น 46
5.1	การเขียนโปรแกรมแบบธรรมดากับแบบ Even-Driven 48
5.2	แสดงหน้าต่างเมื่อเข้าสู่โปรแกรม 49
5.3	แสดงหน้าต่างเมื่อเข้าสู่ Menu ส่วน ABOUT 49
5.4	แสดงหน้าต่างเมื่อคลิก Menu ส่วน Calculate 50
5.5	แสดงหน้าต่างการหาขนาดตัวนำ 50
5.6	แสดงหน้าต่าง Admittance of Ladder Network 51
5.7	หน้าต่าง Information Soil Test เมื่อกำหนด Data Measurement 52 เป็นแบบ Apparent Resistivity Value
5.8	หน้าต่าง Information Soil Test เมื่อกำหนด Data Measurement 53 เป็นแบบ Apparent Measure Resistance

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9	หน้าต่างกราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด 53
5.10	หน้าต่างกำหนดระยะระหว่างตัวนำกรณีดินเนื้อเดียว 54
5.11	หน้าต่างกำหนดระยะระหว่างตัวนำกรณีดินสองชั้น 54
5.12	หน้าต่างแสดงศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด 55 ที่มนุษย์สามารถทนได้สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 และ 70 กิโลกรัม
5.13	หน้าต่างแสดงผลการคำนวณค่า Ground Grid และ GPR 56
5.14	หน้าต่างแสดงผลการคำนวณศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว 56 ที่เกิดขึ้นเมื่อผลการออกแบบไม่ผ่านค่าความปลอดภัย
5.15	หน้าต่างแสดงผลการคำนวณศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว 57 ที่เกิดขึ้นเมื่อผลการออกแบบอยู่ภายใต้ค่าความปลอดภัย
5.16	หน้าต่างแสดงผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย 57 กรณีดินเนื้อเดียว
5.17	หน้าต่างแสดงผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย 58 กรณีดินสองชั้น
5.18	หน้าต่างการออกจากโปรแกรมนี้ 58
6.1	กราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด 60
6.2	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 61 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำโดยมีแท่งดินรอบโครงตาข่าย กรณีค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่าง
6.3	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 63 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำโดยมีเฉพาะโครงตาข่าย กรณีค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่าง
6.4	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 65 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำโดยมีแท่งดินรอบโครงตาข่าย กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 65 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำ โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว
6.6	กราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด 69
6.7	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 70 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำ โดยมีแท่งดินรอบ โครงตาข่าย กรณีค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนสูงกว่าดินชั้นล่าง
6.8	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 71 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำ โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย กรณีค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนสูงกว่าดินชั้นล่าง
6.9	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 73 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำ โดยมีแท่งดินรอบ โครงตาข่าย กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว
6.10	ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้น 74 ที่ระยะห่างของลวดตัวนำ โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว
ก1	แสดงบริเวณที่ทำการวัดค่าความต้านทานดินของสนาม 82
ก2	การวัดค่าความต้านทานดินที่ระยะ 2.5 เมตร 83
ก3	การวัดค่าความต้านทานดินที่ระยะ 7.5 เมตร 83
ก4	แนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 1 85
ก5	แนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 2 86
ก6	แนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 3 87
ก7	แนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 4 88

บทที่ 1

บทนำทั่วไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าช้อยนั้นมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าช้อยโดยจุดประสงค์ของการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าช้อยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) จัดเตรียมจุดเชื่อมต่อกับดินสำหรับจุดศูนย์ที่ต่อลงดินแล้วของหม้อแปลง Reactor และ Capacitor เป็นต้น
- 2) เป็นทางผ่านสำหรับคายประจุสำหรับสายล่อฟ้า (Surge Arresters) กับดักแรงดันเกิน (Over Voltage Gaps) และอุปกรณ์อื่นๆที่ทำหน้าที่ลักษณะเดียวกันนี้
- 3) จัดเตรียมอุปกรณ์คายประจุไฟฟ้าและลดพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่อุปกรณ์อื่นสามารถทำงานได้
- 4) เพื่อจัดเตรียมเส้นทางไหลลงดินของกระแสที่มีค่าความต้านทานต่ำพอที่จะสามารถทำให้การเพิ่มของค่าความต่างศักย์ของดินมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับดินที่อยู่ห่างออกไป
- 5) เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยการจำกัดค่าแรงดันที่สามารถเกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าช้อยขณะเกิดการผิดพลาด

อันตรายที่อาจเกิดขึ้นมีสาเหตุได้หลากหลายประการ โดยอาจเกิดจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ฯลฯ หรืออาจเกิดเนื่องจากความผิดพลาดของระบบไฟฟ้าเอง เช่น การเกิดลัดวงจร ฯลฯ เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดิน เกิดเกรเดียน (Gradient) ขึ้นทั้งบริเวณภายในและใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าช้อยนั้นคือเกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่าง 2 จุดใด ๆ เป็นผลให้เกิดศักดาไฟฟ้าขึ้นที่ผิวดินเหนือโครงตาข่าย

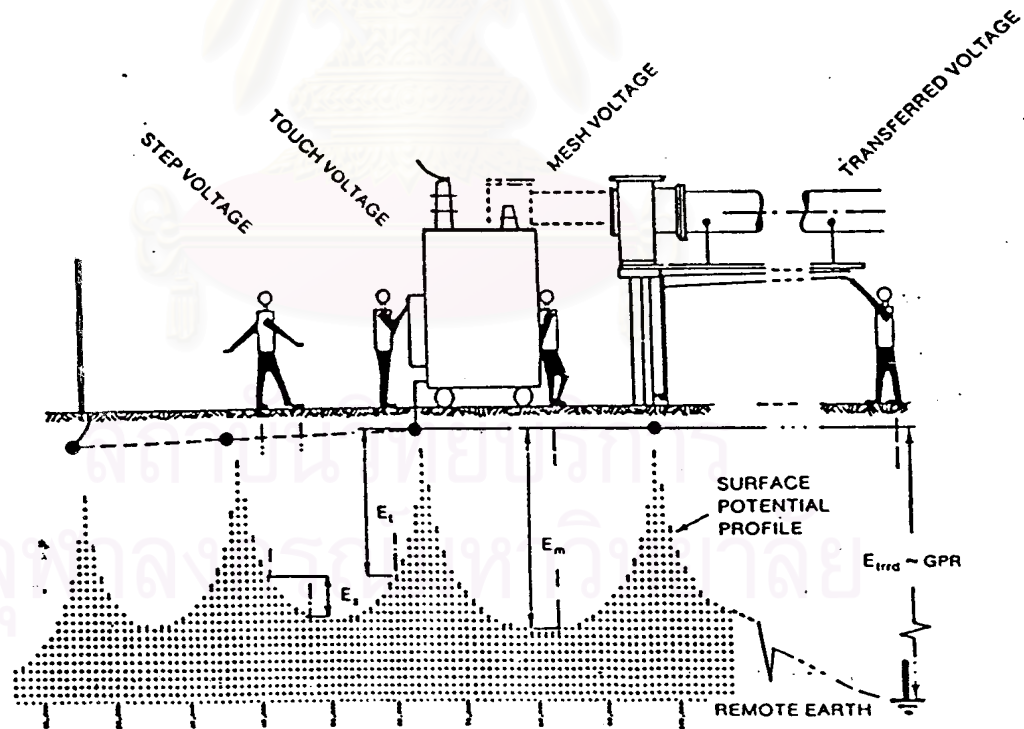
โดยศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวดินเมื่อเทียบกับศักดาไฟฟ้าของดินในขณะที่ไม่เกิดการผิดพลาด หรือเทียบกับศักดาไฟฟ้าของดิน ณ จุดที่ไกลจากสถานีไฟฟ้าช้อย เรียกว่า Ground Potential Rise (GPR) และเกิดการไหลของกระแสระหว่าง 2 จุดนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่าง จุดทั้ง 2 ซึ่งสิ่งที่ทำหน้าที่เชื่อมต่ออาจได้แก่ มนุษย์ สัตว์ ที่มีอวัยวะสัมผัสอยู่กับ 2 จุดนั้น เป็นผลให้มนุษย์ หรือสัตว์เกิดอันตราย ซึ่งการเกิดอันตรายแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) คือ ความต่างศักย์บริเวณผิวดินระหว่างจุด 2 จุด ที่มีระยะห่างกัน 1 เมตรซึ่งประมาณเท่ากับ 1 ช่วงก้าวของมนุษย์ โดยมีเท้าเป็นสิ่งที่เชื่อมต่อระหว่าง จุด ทั้ง 2 และไม่มีส่วนอื่นใดสัมผัสกับดิน หรือสัมผัสกับโครงสร้างหรืออุปกรณ์ ที่มีการต่อลงดิน

แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) คือ ความต่างศักย์ระหว่าง GPR กับศักดาไฟฟ้าที่ผิว ดิน ณ. จุดที่มนุษย์หรือสัตว์นั้นยืนอยู่ในขณะที่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของร่างกายสัมผัสกับโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ที่มีการต่อลงดิน

แรงดันไฟฟ้าเมฆ (Mesh Voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในโครงตาข่ายการต่อลงดินซึ่งเท่ากับ ความต่างศักย์ระหว่าง GPR กับศักดาไฟฟ้าบริเวณผิวดิน ณ. จุดกึ่งกลางของเมฆ

แรงดันไฟฟ้าทรานเฟอร์ (Transfer Voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นเมื่อบุคคลที่ยืนอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยสัมผัสกับโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ที่ต่อลงดิน ณ. จุดที่ห่างออกไป หรือบุคคลนั้นยืนอยู่ ณ. จุดที่ห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ไปสัมผัสกับโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินกับสถานีไฟฟ้าย่อยในขณะที่เกิดความผิดปกติซึ่งเป็นกรณีพิเศษ โดยทั่วไปแรงดัน ทรานเฟอร์จะมีค่าเท่ากับค่า GPR



รูปที่ 1.1 ลักษณะของอันตรายที่อาจเกิดขึ้นทั้ง 4 แบบ

1.2 สภาพปัญหาและแนวทางแก้ไข

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ใช้ในปัจจุบันจะทำการออกแบบโดยสมมติว่าดินมีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอตลอดความลึกของดินแต่ในความเป็นจริงแล้วค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความลึกของดินซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าศักดาไฟฟ้าเมฆและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวอันเป็นเกณฑ์ในการคำนวณค่าความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตาม IEEE Std 80-1986

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบระบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น แล้วทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการออกแบบทั้งสองกรณี

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.3.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน

1.3.2 เพื่อพัฒนาการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยให้สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้มากยิ่งขึ้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษากระบวนการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีดินชั้นเดียวและกรณีดินสองชั้น

1.4.2 ศึกษาการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งสองกรณี

1.4.3 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามหลักการที่ศึกษา

1.4.4 ทำการวัดภาคสนามและทดลองออกแบบ

1.4.5 สรุปและประเมินผล

1.4.6 เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1.5.1 เปรียบเทียบการออกแบบระบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวกับดินสองชั้น

1.5.2 พัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว และกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง มาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบ และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบต่อลงดิน

บทที่ 3 กล่าวถึง การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินกรณีพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียว

การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน และการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว

บทที่ 4 กล่าวถึง การประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นดินกรณีดินสองชั้นและการคำนวณค่าความต้านทานระบบการต่อลงดิน และการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น

บทที่ 5 กล่าวถึง ลักษณะ Visual Basic และ โปรแกรมออกแบบระบบการต่อลงดินที่ได้พัฒนา

บทที่ 6 แสดงตัวอย่างการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบทั้งสองวิธี

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.7.1 เพื่อพิจารณาผลที่ได้ระหว่างการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งกรณีดินเนื้อเดียวและดินสองชั้น

1.7.2 เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาการออกแบบระบบต่อลงดินให้สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้มากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย มีวัตถุประสงค์เพื่อความปลอดภัยของมนุษย์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือยืนอยู่ในบริเวณสถานีไฟฟ้าที่มีโครงสร้างหรืออุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่จะได้รับผลจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรลงดินซึ่งจะทำให้เกิดเกรเดียนท์ของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradient) สูงที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ นอกจากนี้จะเป็นทางผ่านให้อุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินคายประจุลงดิน หรือเป็นทางผ่านการไหลกลับของกระแสหม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการต่อขอลวดแบบวาย

โดยปรกติกระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูงในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงนิยมทำเป็นแบบโครงตาข่าย (Ground Grid) เพื่อให้กระแสลัดวงจรลงดินไหลผ่านได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าสูงจนเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ศักดาไฟฟ้านี้เป็นศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนผิวดิน (Ground Potential Rise) และศักดาไฟฟ้าที่มนุษย์ได้รับโดยตรงประกอบด้วย ศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และ ศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) เพื่อลดอันตรายจากศักดาไฟฟ้าทั้งสอง จึงต้องมีการควบคุมหรือแก้ไขไม่ให้ศักดาทั้งสองดังกล่าวมีค่าเกินกว่าที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เป็นอันตราย

ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นโครงตาข่าย (Ground Grid) และส่วนที่เป็นแท่งดิน (Ground Rod) โดยส่วนที่เป็นโครงตาข่ายประกอบด้วย คานนำขนานและตั้งฉากกันใต้ดินเกิดเป็นเมฆย่อยๆ รวมกันเป็นตาข่ายครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยจุดที่ตัดกันโดยเฉพาะบริเวณขอบรอบๆ โครงตาข่ายจะถูกติดตั้งแท่งดินเพื่อลดค่าศักดาไฟฟ้าเมฆเนื่องจากบริเวณขอบโครงตาข่ายจะมีศักดาไฟฟ้าเมฆสูงกว่าบริเวณอื่น วิธีการติดตั้งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Exothermic Welding) เพราะฉะนั้นการใช้ลวดตัวนำจำนวนเท่าใดนั้นเป็นสิ่งสำคัญเพราะถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งวัสดุ แรงงาน และเวลาที่ใช้ในการสร้าง แต่ถ้าใช้น้อยเกินไปจะเกิดความไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ สัตว์และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อย ดังนั้นในการออกแบบระบบการต่อลงดินจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นด้วย

ในบทนี้จะอธิบายถึง มาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

2.1 มาตรฐานการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

มาตรฐานการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นมีมากมายตามที่แต่ละประเทศคิดค้นขึ้น แต่มาตรฐานทั่วไปที่โลกยอมรับเป็นมาตรฐานจากประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศในทวีปยุโรป ในขณะที่ประเทศไทยได้นำมาตรฐานเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับสภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยด้วย มาตรฐานการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่หลายประเทศได้นำไปเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้ มีดังนี้

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

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

- ดิน
- หินกรวด
- ความต้านทานร่างกายมนุษย์
- กระแสและช่วงเวลาที่เกิดการผิพร้อง
- ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้
- ลวดตัวนำ
- กระแส และความต้านทานของระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย
- ศักดาไฟฟ้าเมฆและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว

2.2.1 ดิน

ดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดินมากเพราะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้ต้องใช้ตัวนำมากหรือน้อยและมีผลต่อศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับระบบการต่อลงดินเมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้น ดังนั้นก่อนออกแบบระบบต่อลงดินจึงต้องมีการวัดค่าความต้านทานดินเพื่อนำไปหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพื่อใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินต่อไป การพิจารณาว่าดินนั้นมีคุณสมบัติดีหรือไม่ จะพิจารณาจากค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะขึ้นกับ ชนิดของดิน ความลึกของดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นภายในดิน อุณหภูมิ สารเคมีภายในดิน ฯลฯ ซึ่งค่า ความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ เป็นดังตารางที่ 2.1 [1,8,10,11,12,13]

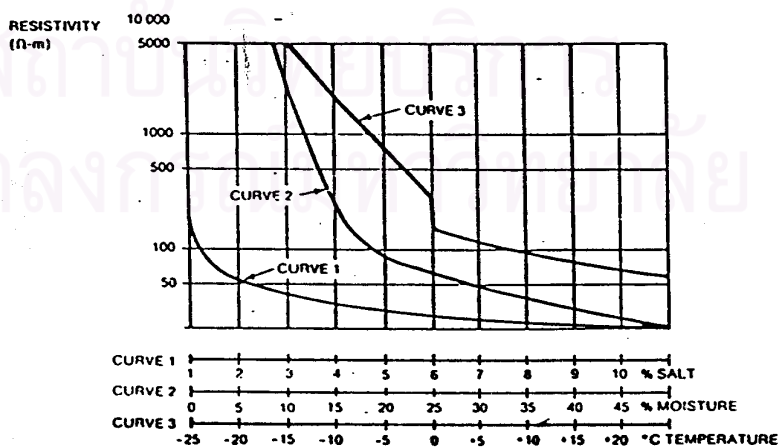
ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน (Ω -m)
ดินผสมวัชพืชเปียก (Wet Organic Soil)	10
ดินชื้น (Moist Soil)	100
ดินแห้ง (Dry Soil)	1,000
ทราย (Sand)	500-1,000
หินแข็ง (Bed Rock)	10,000

ความชื้นภายในดินจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของเนื้อดิน ความหนาแน่นของดินและความหลากหลายของขนาดอนุภาคของเนื้อดิน ซึ่งถ้าภายในดินมีความชื้นน้อยกว่า 15% ของน้ำหนักดิน จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นดังเส้นกราฟเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.1 [1,8] ซึ่งแสดงผลของความชื้นภายในดินที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และถ้าภายในดินมีความชื้นมากกว่า 22% ของน้ำหนักดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

อุณหภูมิของดินนั้นอาจไม่ต้องนำมาพิจารณาถ้าอุณหภูมิของดินมีค่ามากกว่า 0°C แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า 0°C น้ำภายในดินจะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ค่าความต้านทานภายในดินเพิ่มขึ้นรวดเร็วมากดังเส้นกราฟที่ 3 ของรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 15.2% ของน้ำหนักดิน

สารเคมีภายในดิน โดยทั่วไปมักเป็นสารประกอบของเกลือ กรด หรือโลหะ ซึ่งจะช่วยให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำลงได้ดังเส้นกราฟที่ 1 ของรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงผลของสารเคมีภายในดินที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 30% ของน้ำหนักดิน



รูปที่ 2.1 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

จากปัจจัยต่างๆ ภายในดินเป็นผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละแห่งแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบระบบการต่อลงดินแต่ละครั้งจึงจำเป็นต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินทุก ๆ ครั้ง การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และให้ผลที่ถูกต้องอีกทั้งยังสะดวกเนื่องจากไม่ต้องใช้แท่งดินขนาดยาวๆ ในการวัดความต้านทานจำเพาะของชั้นดิน คือ [1,14]

การวัดแบบ 4 จุด

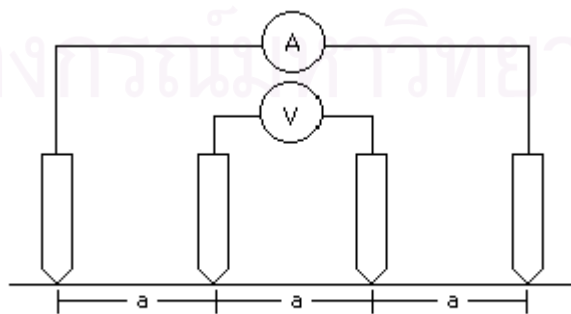
เป็นการหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยการวัดค่ากระแส และแรงดันโดยปักแท่งดิน 4 แท่งโดยระยะห่างมีทั้งที่เท่ากันและไม่เท่ากัน แต่วิธีที่นิยมปฏิบัติกันคือ กำหนดระยะห่างระหว่างแท่งดินมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นวิธีของเวนเนอร์ (Wenner's Four-Pin Method) ดังรูปที่ 2.2 และสามารถคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (2.1)$$

- โดยที่ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)
 R คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ (Ω)
 A คือ ระยะห่างระหว่างแท่งดินข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (m)
 B คือ ความลึกของแท่งดินจากผิวดิน (m)

ในกรณีที่ $B \ll A$ เราจะได้ว่า

$$\rho = 2\pi AR \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด

2.2.2 หินกรวด

โดยทั่วไปภายในสถานีไฟฟ้าย่อยจะโรยหินกรวดหนาประมาณ 0.08 - 0.15 m เนื่องจากหินกรวดมีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดินมาก ดังนั้นจึงสามารถจำกัดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสลัดพร้อมได้ ช่วยให้สามารถลดจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ในระบบการต่อลงดินให้น้อยลงได้ หินกรวดที่ใช้โรยจะมีค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันไปดังตารางที่ 2.2 แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 3,000 $\Omega\cdot\text{m}$ สำหรับผลของการโรยหินกรวดสามารถแทนได้ด้วยแฟกเตอร์ลด (Reduction Factor for Derating the Normal Value of Surface Layer Resistivity) ดังรูปที่ 2.3 และสมการที่ 2.3 และ 2.4 [1,7,8,14]

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

$$C = 1 - a \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{(2h_s + a)} \right] \quad (2.3)$$

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

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

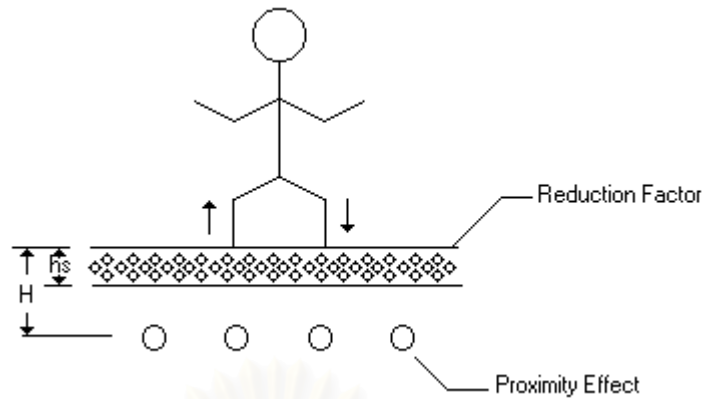
โดยที่ C คือ แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการโรยกรวด

h_s คือ ความลึกของหินกรวด (m)

$a = 0.106 \text{ m}$. ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด ($\Omega\cdot\text{m}$)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดินเฉลี่ย ($\Omega\cdot\text{m}$)



รูปที่ 2.3 การโรยหินกรวด

ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานจำเพาะของหินประเภทต่างๆ

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

2.2.3 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์

โดยโอกาสที่มนุษย์จะได้รับอันตรายมี 2 สาเหตุ คือจากการสัมผัสโครงโลหะของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดิน(Touch Voltage) และจากการเดินอยู่ภายในหรือใกล้เคียงกับสถานีไฟฟ้าย่อย (Step Voltage) ซึ่งจะมีกระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์จากมือสู่เท้าในกรณีแรก หรือจากเท้าสู่เท้าในกรณีที่สองดังนั้นความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปพิจารณาถึงขีดจำกัดของกระแสหรือแรงดันที่มนุษย์สามารถทนได้ดัง ตารางที่ 2.3 [7] แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทานเฉลี่ยของร่างกายมนุษย์มีค่าประมาณ 1,000 Ω

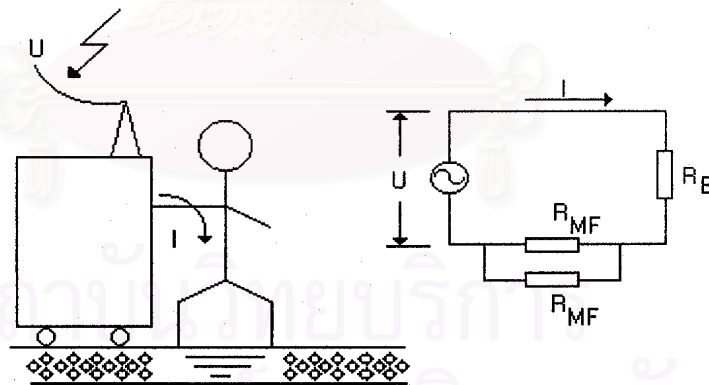
ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างของมนุษย์

รายละเอียด	ความต้านทาน (Ω)	หมายเหตุ
เนื้อเยื่อในร่างกาย	300	ไม่รวมผิวหนัง
ร่างกายรวมผิวหนัง	500-3,000	-
มือกับมือ	2,330	ทดลองโดยแช่มือในน้ำเกลือ
มือกับเท้า	1,130	ทดลองโดยแช่มือและเท้าในน้ำเกลือ

การพิจารณาค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยจำลองอันตรายที่เกิดขึ้นจริงกับมนุษย์เป็นวงจรสมมูลของการเกิดอันตราย ซึ่งสามารถจำลองได้ 2 แบบ ตามสาเหตุของการเกิดอันตรายดังนี้ [1,7,10,14]

2.2.3.1 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

เมื่อมนุษย์สัมผัสโครงโลหะของอุปกรณ์ที่ต่อลงดินกับโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยในขณะที่เกิดผิดปกติพร้อมเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากมือสู่เท้า โดยสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

สามารถคำนวณค่าความต้านทานระหว่างมือกับเท้าได้ ดังนี้

$$R_A = R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF}) \quad (2.5)$$

โดยที่	R_A	คือ ความต้านทานรวมระหว่างมือกับเท้า (Ω)
	R_B	คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Ω)
	R_F	คือ ความต้านทานรวมระหว่างเท้ากับดิน (Ω)
	R_{MF}	คือ ความต้านทานรวมระหว่างเท้าทั้งสอง (Ω)

เราสามารถแทนเท้าทั้ง 2 ด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี b และห่างกัน d_F วางอยู่บนพื้นดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ เพราะฉะนั้น

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \quad (2.6)$$

$$R_{MF} = \frac{\rho}{2\pi d_F} \quad (2.7)$$

ขนาดเท้าเฉลี่ยของมนุษย์มีค่าประมาณ 0.083 m และ R_{MF} มีค่าน้อยมากจึงไม่คิดผลของ R_{MF} ดังนั้นสมการ 2.5 สามารถเขียนได้เป็น

$$R_A = R_B + 1.5\rho \quad (2.8)$$

และเมื่อคิดผลของการโรยหินกรวด สมการที่ 2.8 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

แต่เนื่องจากโครงตาข่ายที่ฝังอยู่ใต้ดินมีศักดาไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่ผู้ได้รับอันตรายยืนอยู่ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายลงดินได้ยากขึ้น นั่นคือความต้านทานรวมมีค่าสูงขึ้น

(Proximity Effect) ดังสมการ

$$R_A = R_B + 1.5C\rho \left(1 + \frac{1.3a}{h + h_s} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่ h คือ ความลึกของตัวนำจากผิวดิน (m)

h_s คือ ความลึกของหินกรวด (m)

C คือ แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการโรยกรวด

$a = 0.106$ m. ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม

2.2.3.2 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน

เป็นการจำลองการไหลของกระแสจากเท้าข้างหนึ่งผ่านร่างกายไปสู่เท้าอีกข้างหนึ่ง ดังนั้นวงจรสมมูลสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.5 และสามารถคำนวณค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับเท้าได้ดังนี้

$$R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF} \quad (2.11)$$

โดย	R_A	คือ ความต้านทานรวมระหว่างมือกับเท้า (Ω)
	R_B	คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Ω)
	R_F	คือ ความต้านทานระหว่างเท้ากับดิน (Ω)
	R_{MF}	คือ ความต้านทานร่วมระหว่างเท้าทั้งสอง (Ω)

ในทำนองเดียวกันกับวงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส สมการ 2.11 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_A = R_B + 6C\rho \quad (2.12)$$

เมื่อคิดผลของการโรยหินกรวด และผลจากการฝังตัวนำใต้ดิน (Proximity Effect) สมการ 2.12 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

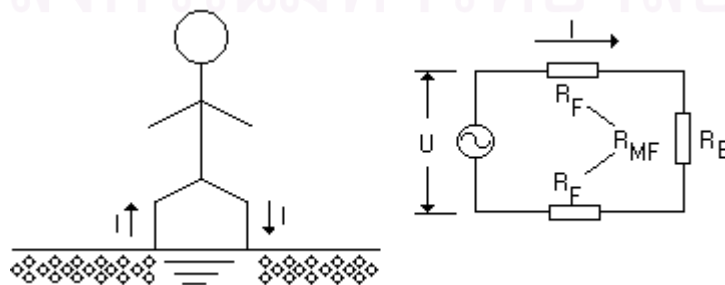
$$R_A = R_B + 6C\rho \left(1 + \frac{1}{h + h_s} \right) \quad (2.13)$$

โดยที่ h คือ ความลึกของตัวนำจากผิวดิน (m)

h_s คือ ความลึกของหินกรวด (m)

C คือ แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการโรยกรวด

$a = 0.106 \text{ m}$. ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน

2.2.4 กระแส และช่วงเวลาที่เกิดการผัดพ้อง

กระแสผัดพ้องอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น จากการทำงานของผิดพลาดของอุปกรณ์ จากการเสื่อมสภาพของฉนวนป้องกัน หรือจากปรากฏการณ์ธรรมชาติต่าง ๆ ฯลฯ โดยจะคำนึงถึงการผัดพ้องที่มีความรุนแรงที่สุด เมื่อมีการผัดพ้องขึ้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดินในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และถ้ามีมนุษย์ไปสัมผัสกับอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหรือเดินอยู่ภายใน จะเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ผู้นั้น ซึ่งช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้องกันว่าสามารถตัดกระแสผัดพ้องได้เร็วเท่าไร ซึ่งโอกาสที่จะเกิดอันตรายก็จะมีน้อยลงเท่านั้น

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ ในแต่ละคนจะทนได้ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับ ค่าความต้านทานของร่างกายของผู้นั้น แต่สามารถประมาณได้ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 [8,10] โดยตารางที่ 2.4 จะเปรียบเทียบปริมาณกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ระหว่างเพศหญิงและเพศชาย ส่วนตารางที่ 2.5 จะแสดงปริมาณกระแสที่มีผลให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับร่างกายมนุษย์

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกระแสที่เพศชาย และเพศหญิงสามารถทนได้

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

หมายเหตุ กำหนดให้ความต้านทานร่างกายมนุษย์เท่ากับ 1,000 โอห์ม

ตารางที่ 2.5 ปริมาณกระแสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับร่างกายมนุษย์

ขนาดของกระแส ที่ความถี่ 50-60 Hz	ผลที่เกิดขึ้นกับร่างกาย เมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 วินาที
1 mA	ร่างกายสามารถรู้สึกได้
5 mA	ร่างกายรู้สึกได้แต่ไม่ทำให้เกิดอันตรายใด ๆ
10 – 20 mA	เกิดอาการเกร็งจนไม่สามารถสลัดให้หลุดได้
50 mA	รู้สึกปวด อาจเกิดอาการหน้ามืด เป็นลมไม่มีเรี่ยวแรง แต่ระบบหายใจยังคงทำงานปกติ

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 Frabilation ถ้าหากช่วยโดยการผายปอดได้ทันอาจรอดตายได้แต่จะเกิดการเผาไหม้ตามร่างกาย

การคำนวณหาขีดจำกัดสูงสุดของกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้จะพิจารณาขณะที่กระแสไหลผ่านร่างกายในช่วงเวลา 0.03 – 3 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ไมทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายถึงขั้นหัวใจทำงานผิดปกติ โดยมีความน่าจะเป็นถึง 99.5 % สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้

สำหรับมนุษย์หนัก 50 kg

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.14)$$

สำหรับมนุษย์หนัก 70 kg

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.15)$$

โดยที่ I_B คือ กระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (A)

t คือ ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (s)

2.2.5. ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์
(Step and Touch Voltage Criteria)

จากผลการพิจารณาถึงขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์โดยไม่ทำให้เป็นอันตรายถึงชีวิตและความต้านทานของร่างกาย และ เท้า – ดิน ในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย สามารถแสดงสมการ ศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ได้ดังนี้ [1,7,10,13,14]

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 kg

$$E_{\text{touch}50} = \left[R_B + 1.5C\rho \left(1 + \frac{1.3a}{h + h_s} \right) \right] \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.16)$$

$$E_{\text{step}50} = \left[R_B + 6C\rho \left(1 + \frac{1.3a}{h + h_s} \right) \right] \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.17)$$

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 kg

$$E_{\text{touch}70} = \left[R_B + 1.5C\rho \left(1 + \frac{1.3a}{h + h_s} \right) \right] \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.18)$$

$$E_{\text{step}70} = \left[R_B + 6C\rho \left(1 + \frac{1.3a}{h + h_s} \right) \right] \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.19)$$

โดย C คือ แฟกเตอร์ลดเนื่องจากการโรยหินกรวด

R_B คือ ความต้านทานร่างกายมนุษย์ (Ω)

h คือ ความลึกของลวดตัวนำจากผิวดิน (m)

h_s คือ ความลึกของหินกรวด (m)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)

$a = 0.106$ m ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม

t คือ ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (s)

2.2.6 ลวดตัวนำ

ลวดตัวนำเป็นอุปกรณ์หลักที่นำมาใช้ประกอบเป็นระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทำหน้าที่นำกระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นกระจายลงสู่ดิน ดังนั้นลวดตัวนำที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี แข็งแรง ไม่หลอมละลายเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกระแสผิดพ่วง ทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นทางกล และเนื่องจากลวดตัวนำต้องวางไว้ใต้ดินจึงต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ตัวนำทองแดงมีคุณสมบัติครบถ้วน นอกจากทองแดงที่นิยมใช้กันมากก็มีตัวนำที่ทำด้วยเหล็กที่มีใช้ในยุโรปบางประเทศและบางประเทศทางแถบเอเชีย แต่ต้องมีการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสนิมเป็นอย่างดี ดังตารางที่ 2.6 [1,11,14,15]

ขนาดลวดตัวนำที่ไม่หลอมละลายเมื่อมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านเป็นระยะเวลาหนึ่งหาได้จากสมการ [1,7,8,11,15]

$$A = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{\text{TCAP} \ln \left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right]}} \quad (2.20)$$

เมื่อ

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกริด (mm^2)

I = กระแสลัดวงจรลงดินเป็นค่า rms (kA)

T_m = อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย ($^{\circ}\text{C}$)

T_a = อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

T_r = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ ($^{\circ}\text{C}$)

α_0 = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0°C

α_r = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_r^{\circ}\text{C}$

ρ_r = ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ T_r ($\mu\Omega/\text{cm}^3$)

t_c = เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (วินาที)

TCAP = แฟกเตอร์ทางความจุความร้อน ($\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$)

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

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ของวัสดุประเภทต่างๆ ที่ใช้เป็นลวดตัวนำ

Description	Material Conductivity (%)	α_r at 20°C	K at 0°C	Fusing Temperature (°C)	ρ_r at 20°C ($\mu\Omega/\text{cm}^3$)	TCAP ($\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copper-Clad Steel Core Wire	40.0	0.00378	245	1084/1300	4.397	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30.0	0.00378	245	1084/1300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminium 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
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

จากสมการ (2.20) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

หรือ

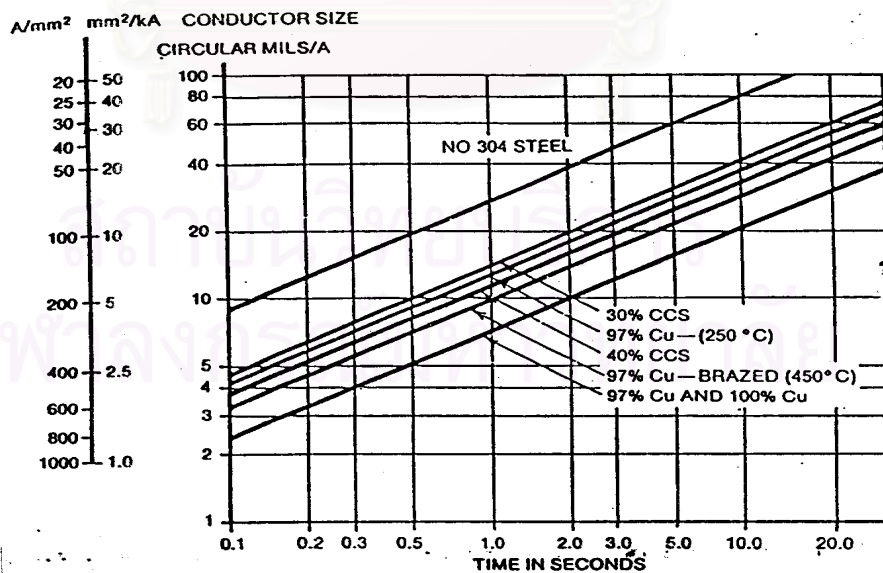
$$\frac{I}{A} = \sqrt{\frac{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}{t_c \alpha_r \rho_r 10^4 / TCAP}} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.21) และ (2.22) นี้ เราสามารถประมาณขนาดที่เล็กที่สุดของลวดตัวนำได้จากรูปที่ 2.6 หรือ ตารางที่ 2.7 [1,8,11,15] โดยที่

$T_a = 40^\circ\text{C}$, T_m มีค่าตาม Fusing Temperature ในตารางที่ 2.6

อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ ณ จุดที่มีการเชื่อมต่อด้วยทองเหลืองมีค่าเท่ากับ 450°C

อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้ ณ จุดที่มีการเชื่อมต่อระหว่างลวดตัวนำต่างๆ ไปมีค่าเท่ากับ 250°C



รูปที่ 2.6 ขนาดที่เล็กที่สุดของลวดตัวนำกับช่วงเวลาที่เกิดการผิพรอง

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 และความต้านทานของระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ความต้านทานของระบบการต่อลงดิน ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้กระแสผิดพร่องไหลผ่านได้สะดวกที่สุด และให้ค่า GPR (Ground Potential Rise) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่า GPR ขึ้นกับ ผลคูณของกระแสโครงข่ายกับความต้านทานระบบการต่อลงดิน โดยค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งสมมติว่าเนื้อดินสม่ำเสมอได้จากสมการของ Sverak [1,7, 8,10, 11,13] ดังนี้

เมื่อโครงข่ายถูกฝังลึกจากผิวดินในช่วง 0.25-2.5 m

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \times \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.23)$$

โดยที่ R_g คือ ความต้านทานของระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย (Ω)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)

A คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

L คือ ความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำที่ประกอบเป็นระบบต่อลงดิน

h คือ ความลึกของลวดตัวนำจากผิวดิน

กระแสโครงตาข่ายการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย หรือกระแสกริด คือ กระแสสูงสุดที่ไหลจากโครงตาข่ายลงสู่ดินเนื่องจากเกิดการผิดพลาด โดยสามารถคำนวณกระแสสูงสุดได้จากสมการ [1,7,8,10,13,14]

$$I_G = C_p D_f I_g \quad (2.24)$$

$$I_g = S_f I_f \quad (2.25)$$

- โดยที่ I_G คือ กระแสกริดสูงสุด (A)
 I_g คือ กระแสกริดสมมาตร (A)
 I_f คือ กระแสผิดพลาดสูงสุดเป็นค่า rms (A)
 C_p คือ Corrective Projection Factor สำหรับการเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพลาดในช่วงอายุการใช้งานของสถานีไฟฟ้าย่อย
 D_f คือ ตัวประกอบการลดลงสำหรับการตัดกระแสผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกัน เป็นผลให้เกิดการผิดพลาดในช่วงเวลา t_f โดยมีค่าดังตารางที่ 2.8 [1,4,12,13]
 S_f คือ ตัวประกอบการกระจายกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของกระแสผิดพลาดที่ไหลจากโครงตาข่ายลงสู่ดิน

ตารางที่ 2.8 ค่าตัวประกอบการลด (Df)

ช่วงเวลาการเกิดผิดพลาด (s)	ตัวประกอบการลด (Df)
0.008	1.65
0.1	1.25
0.25	1.10
0.5 หรือมากกว่า	1.0

หรือสามารถคำนวณค่ากระแสกริดสูงสุดได้โดยใช้วิธีของ Thaper [7,8,16] ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าโดยพิจารณาค่ากระแสสูงสุดจากค่าความต้านทานโครงตาข่าย ผลของสาย Overhead Ground Wire ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance) และระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Tower Span) ดังนี้

$$I_G = \left(\frac{Z}{R_g + Z} \right) I_f \tag{2.26}$$

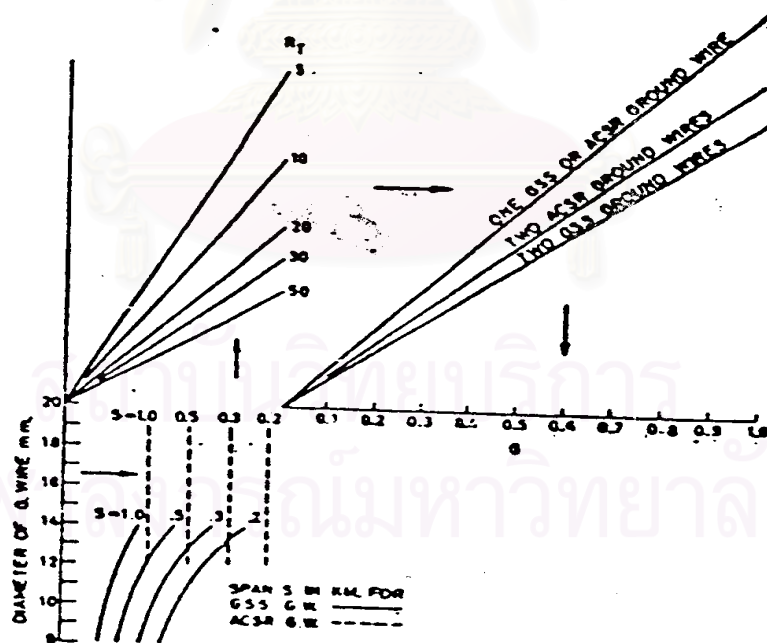
โดยที่ $Z = \frac{1}{Y'}$

Y' คือ Admittance of Ladder Network ที่ประกอบด้วย Overhead Ground Wire และ Tower Footing

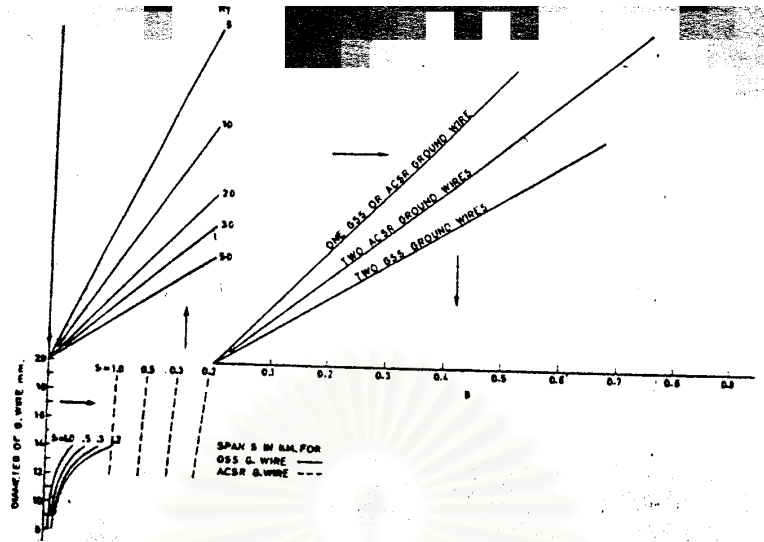
$$Y' = G + jB$$

สำหรับค่า G และ B สามารถดูได้จากกราฟในรูป 2.8 และ 2.9 [7,8,16] ซึ่งค่า G และ B ขึ้นอยู่กับ

- 1) ชนิดของสาย Overhead Ground Wire (ในที่นี้พิจารณาเฉพาะชนิด GSS และ ACSS)
- 2) เส้นผ่านศูนย์กลางของสาย Overhead Ground Wire
- 3) ระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Span Tower)
- 4) ค่าความต้านทานของเสาส่ง (Tower Footing Resistance)
- 5) จำนวนของสาย Overhead Ground Wire



รูปที่ 2.7 ค่า G ของสาย Overhead Ground Wire



รูปที่ 2.8 ค่า B ของสาย Overhead Ground Wire

ค่า GPR (Ground Potential Rise) เป็นค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดซึ่งขึ้นกับค่าความต้านทานระบบการต่อลงดิน และค่ากระแสโครงตาข่าย ดังสมการ [1,7,8,10,13]

$$GPR = I_G \times R_g \tag{2.27}$$

2.2.8 ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว

ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่พิจารณานี้เป็น ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงภายในสถานีไฟฟ้าย่อยเนื่องจากระบบการต่อลงดิน โดยศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่มากเกินไป ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ทำนองเดียวกับศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวต้องมีค่าไม่เกินค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

เราสามารถคำนวณศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวโดยประมาณได้จากสมการ

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L} \tag{2.28}$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L} \tag{2.29}$$

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

สำหรับโครงตาข่ายที่มีแท่งดินบริเวณรอบนอก หรือบริเวณมุมหรือทั้งรอบนอกและภายในตลอดทั้งโครงตาข่าย

$$K_{ii} = 1$$

สำหรับโครงตาข่ายที่ไม่มีแท่งดิน หรือมีน้อยมาก โดยที่ไม่มีแท่งดินบริเวณรอบนอก หรือบริเวณมุม

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

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

โดยที่ h_0 คือ ความลึกอ้างอิงของโครงตาข่าย = 1 m

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

สำหรับโครงตาข่ายที่มีความลึกอยู่ในช่วง 0.25-2.5 m

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

สำหรับการคำนวณค่า E_m

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

สำหรับการคำนวณค่า E_s

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

โดยที่ E_m คือ สักดาไฟฟ้าเมฆ ณ บริเวณมุมของโครงตาข่าย(V)

E_s คือ สักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว ณ ที่ห่างจากขอบของโครงตาข่ายเป็นระยะทาง 1 m

K_m คือ Spacing Factor สำหรับสักดาไฟฟ้าเมฆ

K_s คือ Spacing Factor สำหรับสักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว

- K_i คือ Corrective Factor สำหรับลักษณะโครงสร้างของโครงตาข่าย
 K_{ii} คือ Corrective Weighting Factor สำหรับผลของลวดตัวนำ
 K_h คือ Corrective Weighting Factor สำหรับผลเนื่องจากความลึกของโครงตาข่าย
 ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)
 I_G คือ กระแสโครงตาข่ายสูงสุดที่ไหลลงสู่ดิน (A)
 $L = L_g + 1.15L_r$ สำหรับโครงตาข่ายที่มีแท่งดินอยู่รอบๆ
 หรือ $= L_g$ สำหรับโครงตาข่ายที่ไม่มีแท่งดิน
 L_g คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำในแนวนอน (m)
 L_r คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำในแนวตั้ง (m)
 D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (m)
 h คือ ความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำ (m)
 n คือ จำนวนลวดตัวนำเฉลี่ย หรือจำนวนลวดตัวนำที่ขนานกันในทิศทางหนึ่ง
 n_x, n_y คือ จำนวนลวดตัวนำในแนวแกน x, y ตามลำดับ
 โดยสมการที่ 2.23 นั้นจะให้ผลถูกต้องก็ต่อเมื่อ

$$n \leq 25$$

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

$$d < 0.25 h$$
 ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากัน และมากกว่า 2.5 m

บทที่ 3

ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียว

ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยในปัจจุบัน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินถูกสมมติว่าเป็นดินเนื้อเดียว (Uniform Resistivity) และคำนวณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินจะใช้สูตรของ Sverak ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวกับกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น ซึ่งกรณีดินสองชั้นจะอิงทฤษฎี Numerical Moment Method , Current Image และ Duality Concept

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว การคำนวณค่าความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว [3,18] โดยอิงทฤษฎี Numerical Moment Method , Current Image และ Duality Concept และกล่าวถึงแผนผังการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว

3.1 การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว

เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานที่ระยะห่างระหว่างแท่งดินระยะต่าง ๆ จากภาคสนามจะสามารถพิจารณาเป็นค่าความต้านทานจำเพาะได้จากสมการ 2.1 โดยค่าความต้านทานจำเพาะเมื่อพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียวจะเฉลี่ยค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้จากระยะต่างๆ ดังสมการ

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_j}{n} \quad (3.1)$$

โดย ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ย (Ohm-m)

ρ_j คือ ค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากระยะต่างๆ

n คือ จำนวนระยะที่วัด (โดยทั่วไปวัดประมาณ 5-6 ระยะ)

3.2 การคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว (Homogenous Soil)

การคำนวณความต้านทานระบบต่อลงดินซึ่งถูกฝังลงในชั้นดินเนื้อเดียวที่มีความต้านทาน ρ สามารถอธิบายได้ดังนี้ (รายละเอียดพิจารณาภาคผนวก ข)

ขั้นที่ 1 คำนวณความต้านทานโครงตาข่ายถูกฝังลึก h จากพื้นผิวของดินเนื้อเดียว [3,18]

$$R_{\text{grid}} = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{4}} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.165 \Delta \ell}{e x d_0} \right) \right] \left(1 - \frac{2h}{\sqrt{A}} \times 1.128 \right) \quad (3.2)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณความต้านทานแท่งดินถูกฝังในดินเนื้อเดียว โดยประยุกต์จากกรณีดินสองชั้น [5] ตามภาคผนวก ค สมการ ก.6 คือ

$$R_{\text{rod}} = \frac{\rho}{\ell} g_0 \frac{F}{N_r} \quad (3.3)$$

$$\text{โดย } F = 1 + \left(N_r - \frac{1}{\sqrt{N_r}} \right) \frac{R_s}{R_\ell}$$

$$\frac{R_s}{R_\ell} = \frac{\sqrt{\frac{\ell}{r} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{\ell}{\ell + \frac{r}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}}{2\pi g_0}$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{d_0} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2)h}{\ell}} \right]$$

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว ($\Omega \cdot \text{m}$)

A คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

$$L = 2\Delta \ell (N_m + \sqrt{N_m})$$

$\Delta \ell$ คือ ระยะระหว่างโครงตาข่ายเฉลี่ย (m) = $\sqrt{\Delta \ell_x \Delta \ell_y}$

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ (m)

N_m คือ จำนวนเมฆของโครงตาข่าย

N_r คือ จำนวนแท่งดิน

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

ℓ คือ ความยาวของแท่งดิน (Rodbed) (m)

r คือ Effective radius of Rodbed Configuration กำหนดเท่ากับ $= \frac{\sqrt{\text{Area}}}{2}$ (m)

ขั้นที่ 3 คำนวณความต้านทานระบบต่อลงดินรวม ประกอบด้วย โครงดาข่ายและแท่งดิน [5]

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_{\text{grid}}}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_{\text{rod}}}\right)^3}} \quad (3.4)$$

3.3 การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียว

ขั้นที่ 1 จัดเก็บข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อย

- สำรวจความกว้าง และ ความยาวของสถานีไฟฟ้าย่อย ฯลฯ
- วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ขั้นที่ 2 คำนวณหาขนาดลวดตัวนำที่เล็กที่สุด โดยพิจารณาจากสมการ 2.20

ขั้นที่ 3 คำนวณหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

- สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 kg จากสมการที่ 2.16 และ 2.17
- สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 kg จากสมการที่ 2.18 และ 2.19

ขั้นที่ 4 ออกแบบระบบการต่อลงดิน

- กำหนดความลึกของโครงดาข่ายจากผิวดินเท่ากับ 0.5 m
- กำหนดความหนาของหินกรวด โดยควรอยู่ในช่วง 0.08-0.15 m
- กำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนาน โดยควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 m
- กำหนดระยะความยาวของแท่งดิน

ขั้นที่ 5 คำนวณค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจากสมการที่ 2.23 กรณีสูตรของ Sverak และ จากสมการที่ 3.4 กรณีสูตรของ Simplified Method

ขั้นที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสโครงดาข่ายการต่อลงดิน จากสมการที่ 2.26

ขั้นที่ 7 คำนวณหาค่า GPR จากสมการที่ 2.27

- ถ้าค่า GPR น้อยกว่า E_{touch} แสดงว่าระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นใช้ได้ สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งภายใน

- ถ้าค่า GPR มากกว่า E_{touch} แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยอาจใช้ไม่ได้ ต้องพิจารณาคัดดาไฟฟ้าเมฆ และคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวในชั้นตอนที่ 8 ต่อไป

ขั้นที่ 8 คำนวณค่าคัดดาไฟฟ้าเมฆ และคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย จากสมการที่ 2.28 และ 2.29

ขั้นที่ 9 พิจารณาคัดดาไฟฟ้าเมฆที่คำนวณได้

- ถ้าคัดดาไฟฟ้าเมฆ น้อยกว่าคัดดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ต้องพิจารณาคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวในขั้นที่ 10 ต่อไป

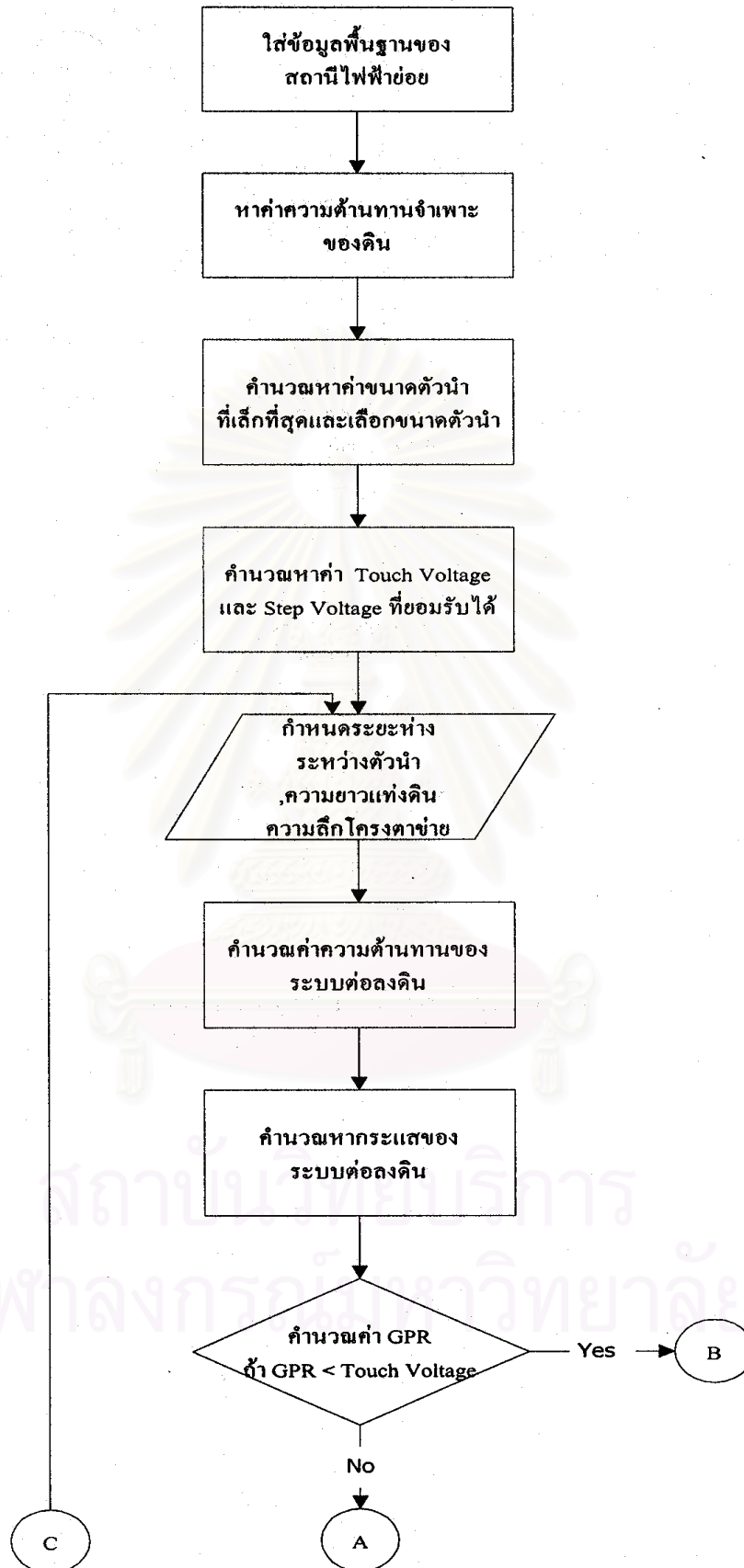
- ถ้าคัดดาไฟฟ้าเมฆมากกว่าคัดดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้แสดงว่าระบบการต่อลงดินที่ออกแบบนั้นใช้ไม่ได้ ต้องเปลี่ยนการออกแบบใหม่ โดยกลับไปสู่ขั้นที่ 4 อีกครั้ง

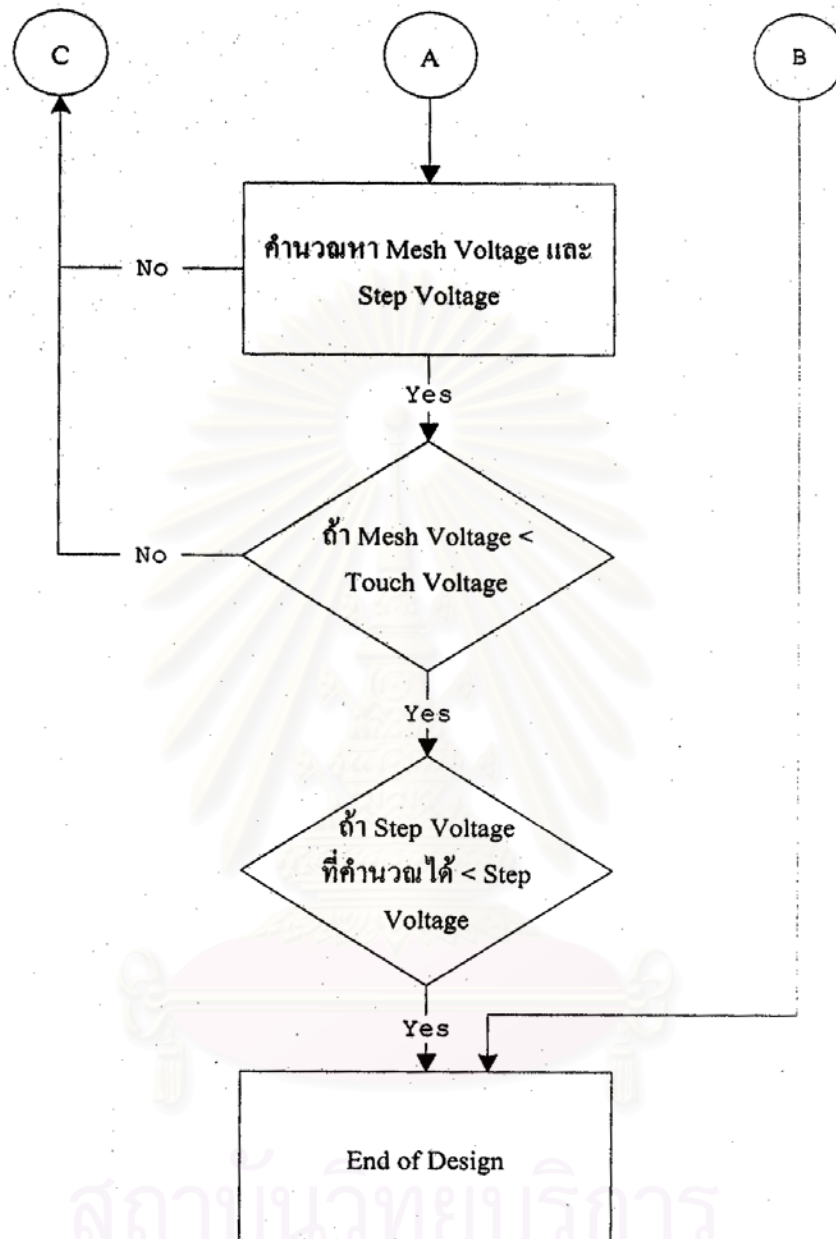
ขั้นที่ 10 พิจารณาคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวที่คำนวณได้

- ถ้าค่าคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นใช้ได้ สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อยได้

- ถ้าคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าคัดดาไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบใช้ไม่ได้ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่ โดยกลับไปสู่ขั้นที่ 4 อีกครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.1 แผนผังการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

บทที่ 4

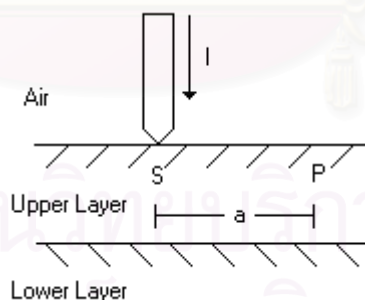
ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น

ในบทนี้แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินกรณีพิจารณาว่าเป็นดินสองชั้น (Two Layer Soil) โดยจะต้องทำการคำนวณ ความหนาของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง จากนั้นทำการคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น โดยสูตรการคำนวณนั้นอิงทฤษฎี Numerical Moment Method , Current Image และ Duality Concept คำนวณ Non-uniform Correction Factor ที่ใช้ปรับ Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดบนดินสองชั้น

การคำนวณค่าความหนาของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน และความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง การประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะใช้ Finite Wenner Resistivity Expression โดย สามารถแสดงได้ดังแผนผังดังรูปที่ 4.3 ส่วนรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

4.1 การประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง และความหนาของดินชั้นบน โดยใช้ Finite Wenner Resistivity Expression [4]

พิจารณาสูตรที่ใช้ในการประมาณค่า



รูปที่ 4.1 พิจารณาความต่างศักย์เมื่ออยู่บนดินสองชั้น

เมื่อพิจารณาความต่างศักย์ที่จุด P (V_p) เมื่อจุด P ห่างจากจุด S (Point Current Source) ตามแนวระดับเท่ากับ a โดยทั้งจุด P และจุด S อยู่บนพื้นผิวของดินสองชั้นมีค่าดังนี้

$$V_p = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} \right] \quad (4.1)$$

- โดยที่ ρ_1 คือ ความต้านทานของดินชั้นบน ($\Omega\text{-m}$)
 ρ_2 คือ ความต้านทานของดินชั้นล่าง ($\Omega\text{-m}$)
 h คือ ความหนาของดินชั้นบน (m)
 k คือ แฟกเตอร์การสะท้อน $= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$
 I คือ กระแสที่กระจายลงดินโดยจุด S (A)

สำหรับโครงสร้างของดินเมื่อให้ตัวแปร ได้แก่ ρ_1, k, h มีค่าคงที่ สามารถเขียนความต่างศักย์ที่จุด P (V_p) ใน รูปฟังก์ชันของ ระยะห่างตามแนวระดับ (a) ได้ดังนี้

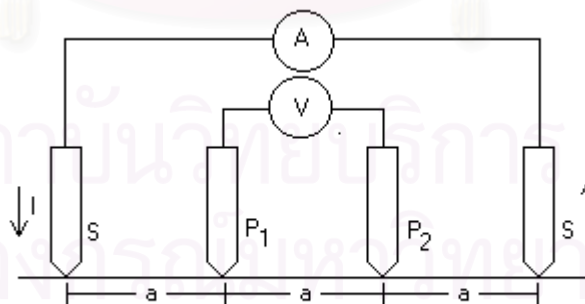
$$V_p = \frac{I * F(a)}{2\pi a} \quad (4.2)$$

โดยที่

$$F(a) = (2\pi a) \frac{V_p}{I} \quad (4.3)$$

$$= \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} \right] \quad (4.4)$$

โดยจาก รูปแบบวิธีการวัดของ Wenner ซึ่งเป็นการวัดแบบ 4 จุดโดยระยะห่างระหว่างแท่งดินที่ใกล้กันมีค่าเท่ากัน (a) ดังรูปที่ 4.2 ความต่างศักย์ที่คร่อมระหว่างแท่งดิน P_1 และ P_2 จะเป็นดังนี้



รูปที่ 4.2 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด

$$\begin{aligned} V &= \left(\frac{I * F(a)}{2\pi a} - \frac{I * F(2a)}{2\pi(2a)} \right) - \left(\frac{I * F(2a)}{2\pi(2a)} - \frac{I * F(a)}{2\pi a} \right) \\ &= \frac{I}{2\pi a} [2F(a) - F(2a)] \end{aligned} \quad (4.5)$$

จาก สมการ (2.2) , (4.4) และ (4.5) จะได้

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (4.6)$$

เนื่องจาก ρ_a มีจำนวนเทอมเป็นอนันต์ จึงทำการประมาณด้วย Finite Expression แยกได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณี ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมากกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน
2. กรณี ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมากกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

กรณีที่ 1. ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมากกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน

จากสมการ(2) สำหรับความต่างศักย์ V_p ซึ่งเป็น Infinite Series Equation สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

$$V_p = V_e + V_r \quad (4.7)$$

โดย V_r เป็นผลรวมของสมการ (4.7) ตั้งแต่เทอม $n=2$ ถึง $n=\infty$

ส่วน V_e เป็นผลของสมการ (4.7) โดยไม่รวม V_r

ดังนั้นสำหรับ V_r มีสูตรดังนี้

$$V_r = I V_b \sqrt{\frac{c}{c + (a/h)\beta}} \quad (4.8)$$

โดยที่

$$V_b = \frac{\rho_1}{2\pi h} [-k - \ln(1-k)] \quad (4.9)$$

$$c = x_1 \left(\ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{x_3} \quad (4.10)$$

$$\beta = 2.0 - x_2 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad (4.11)$$

$$x_1 = 16.4133 \quad x_2 = 0.136074 \quad x_3 = 0.393468$$

จากสมการ (2.2) , (4.3) , (4.5) , (4.7) , (4.8) จะได้ Finite Expression ดังนี้

$$\rho_a = \rho_1 + 4\rho_1ka \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 + 4h^2}} \right) + 4\pi V_b a \left(\sqrt{\frac{c}{c + (a/h)^\beta}} - \sqrt{\frac{c}{c + (2a/h)^\beta}} \right) \quad (4.12)$$

กรณีที่ 2. ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมากกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

$$V_p = \frac{I}{2\pi a} \left[\rho_2 + (\rho_1 - \rho_2)e^{-ba} \right] \quad (4.13)$$

โดยที่

$$b = \frac{1}{h} \left[b_m - (b_m - x_1)e^{-x_2 a/h} \right] \quad (4.14)$$

$$b_m = x_3 - x_4 (\rho_2 / \rho_1)^{x_5} \quad (4.15)$$

$$\text{และ } x_1 = 0.673191, \quad x_2 = 0.479513, \quad x_3 = 1.33335, \quad x_4 = 0.882645, \quad x_5 = 0.697106$$

ได้ค่า Finite Expression สำหรับ ρ_a ดังนี้

$$\rho_a = \rho_2 + (\rho_1 - \rho_2) \left(2e^{-b(a)a} - e^{-b(2a)2a} \right) \quad (4.16)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะพิจารณาโดย Minimized function เป็น

$$F = \sum_{j=1}^n \left(\frac{m_j - c_j}{m_j} \right)^2 \quad (4.17)$$

$$\text{โดย } m_j = \ln(\rho'_j)$$

$$c_j = \ln(\rho_j(\rho_1, \rho_2, h))$$

โดยค่า ρ'_j เป็นค่าที่ได้จากการวัด

$$\rho_j(\rho_1, \rho_2, h) \text{ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ}$$

โดยลำดับขั้นตอนเพื่อที่จะหาค่า ρ_1, ρ_2, h แสดงดังแผนภาพรูปที่ 4.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้น $\rho_1^0, \rho_2^0, h^0 = 1.5$
2. ทำการพิจารณาว่าเป็นกรณี $\rho_1^0 > \rho_2^0$ หรือ $\rho_1^0 < \rho_2^0$ ซึ่งจะเป็นการเลือกฟังก์ชัน ρ_a คือสมการ 4.12 หรือ 4.16 ในการประมาณค่า
3. ตั้งค่านับจำนวนการวน Loop (k)=0
4. ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการหาค่า $\rho_1^{k+1}, \rho_2^{k+1}, h^{k+1}$ โดยพิจารณาจากค่า ρ_1^k, ρ_2^k, h^k โดยพารามิเตอร์ที่ต้องหาได้แก่ เมตริก D และ B

$$D = \begin{bmatrix} m_1 - c_1 \\ m_2 - c_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ m_n - c_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial c_1}{\partial \rho_1} & \frac{\partial c_1}{\partial \rho_2} & \frac{\partial c_1}{\partial h} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial c_n}{\partial \rho_1} & \frac{\partial c_n}{\partial \rho_2} & \frac{\partial c_n}{\partial h} \end{bmatrix}$$

5. หาค่าเวกเตอร์ $x = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad h]^T$

โดยค่า

$$x^{k+1} = x^k + \lambda [B^T W B]^{-1} B^T W D$$

โดยค่า λ เป็นค่าสเกลาร์ที่ถูกเลือกโดยการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกินในแต่ละรอบไม่เกิน 50%

W เป็น $n \times n$ Diagonal Matrix โดยเทอมในแถวที่ j เป็น $1/m_j^2$

6. ทำการหาค่า per unit difference คือ

$$\frac{(\rho_1^{k+1} - \rho_1^k)}{\rho_1^k}, \quad \frac{(\rho_2^{k+1} - \rho_2^k)}{\rho_2^k} \quad \text{และ} \quad \frac{(h^{k+1} - h^k)}{h_1^k}$$

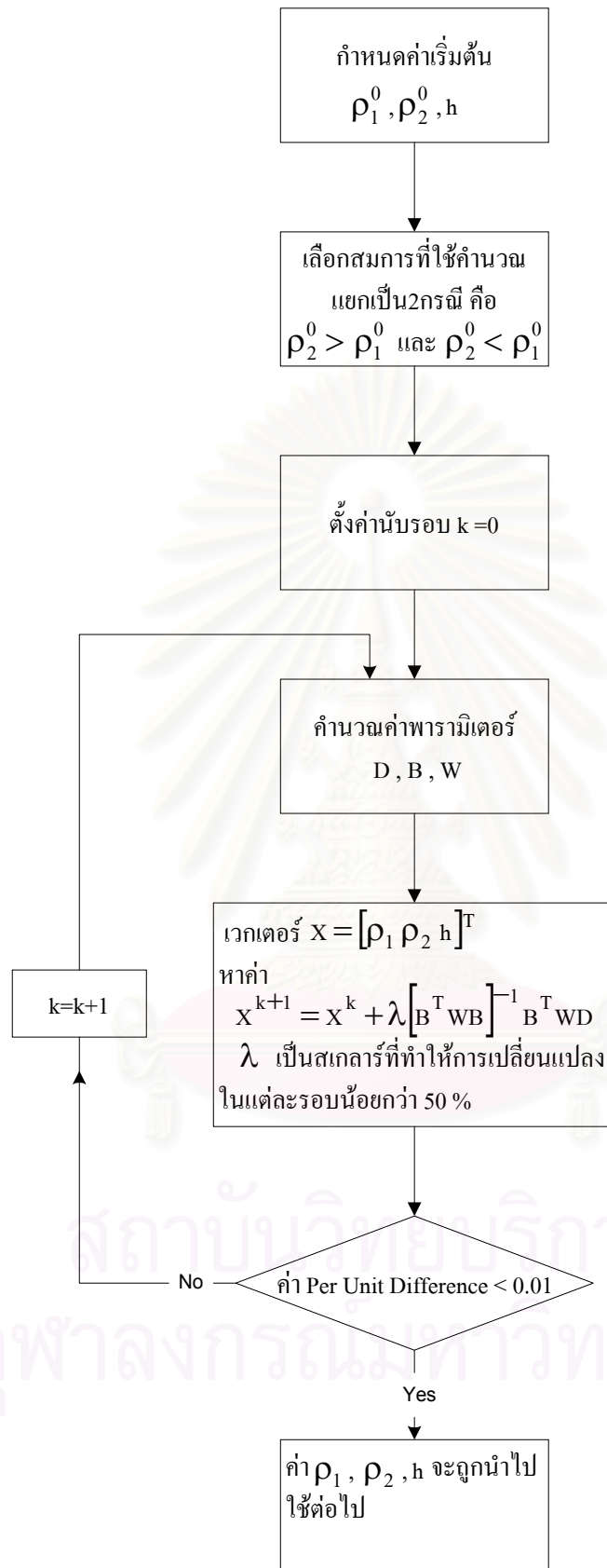
โดยถ้ามีค่ามากกว่า 0.01 จะทำการวนซ้ำ โดยทำขั้นตอน 4-6 ซ้ำแล้วเพิ่มค่า k (count)

เมื่อมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01 จะจบการวน Loop ทำให้ได้ค่า ρ_1, ρ_2, h ออกมา

โดย ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ($\Omega\text{-m}$)

ρ_2 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\Omega\text{-m}$)

h คือ ความหนาของดินชั้นบน (m)



รูปที่ 4.3 แผนภาพขั้นตอนการหาค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นดินกรณีดินสองชั้น

4.2 การคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น[5]

เมื่อได้ค่า ρ_1, ρ_2, h จะทำการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินมีลำดับขั้นดังนี้

ขั้นที่1. หาค่าความต้านทานของระบบโครงตาข่าย โดยสูตรความต้านทานระบบโครงตาข่ายคือ

$$R_{\text{grid}} = \rho_1 \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.061 \Delta l}{d_0} \right) \right) \left(1 - \frac{2.256 h_b}{\sqrt{A}} \right) - \rho_1 \frac{\ln(1-K)}{2\pi(h+h_0)} \quad (4.18)$$

โดยค่า $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

$$h < 0.2\sqrt{A}, h_b < h$$

$$h_0 = c_f \sqrt{\frac{A}{2\pi}} (\ln(1-K)) \frac{K-1}{2K}$$

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_x \Delta l_y}$$

Δl_x คือ ความยาว mesh ในแนวแกน X (m)

Δl_y คือ ความยาว mesh ในแนวแกน Y (m)

$$L = 2\Delta l (N_m + \sqrt{N_m})$$

A คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ (m)

h_b คือ ระยะความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

h คือ ความหนาของดินชั้นบน (m)

c_f คือ Shape Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9 กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส

N_m คือ จำนวนเมฆของโครงตาข่าย

ขั้นที่2. หาค่าความต้านทานของแท่งดิน (Rodbbed Resistance) (R_{rod})

$$R_{\text{rod}} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (4.19)$$

โดยที่ $R_a = \frac{\rho_2}{(l + h_b - h)} g_0 \frac{F_0}{N_r}$

$$R_b = \frac{\rho_1}{(h - h_b)} g_0 \frac{F_0}{N_r} + \frac{\rho_1}{h} \phi_0$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2\ell}{a}\right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4\ln 2)h_b}{\ell}} \right]$$

$$F = 1 + \left(N_r - \frac{1}{\sqrt{N_r}} \right) \frac{R_s}{R_\ell}$$

$$F_0 = F \Big|_{\ell \rightarrow \frac{\ell}{1-0.9K}}$$

$$\frac{R_s}{R_\ell} = \frac{\sqrt{\frac{\ell}{r} \left[\left(\frac{1}{2}\right)^3 + \left(\frac{\ell}{\ell + \frac{r}{2}}\right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}}{2\pi g_0}$$

$$\phi = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N_r}{F_0} - 1\right)^2 \left(\frac{\ell + h_b}{h}\right)^2 + 1}}$$

$$\phi_0 = \phi \Big|_{h=\ell+h_b} = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N_r}{F_0} - 1\right)^2 + 1}}$$

N_r = จำนวนของแท่งดิน

a = รัศมีของแท่งดิน (m)

ℓ = ความยาวของแท่งดิน (Rodbed) (m)

r = Effective radius of Rodbed Configuration = $\frac{\sqrt{\text{Area}}}{2}$

ขั้นที่3. หาความต้านทานของระบบการต่อลงดินโดยรวมทั้งโครงตาข่ายและแท่งดินเข้าด้วยกัน โดย ค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดิน (R_T) เป็นดังนี้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_{\text{grid}}}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_{\text{rod}}}\right)^3}} \quad (4.20)$$

4.3 การหาค่า Non-uniform Correction Factors (C_m) ซึ่งใช้ปรับค่าแรงดันเมฆโดยโครงตาข่าย ถูกฝังในดินชั้นบนห่างจากผิวดินชั้นบนเท่ากับ 0.5 m มีสมการดังนี้ [6]

$$C_m = \frac{E_m}{E_{\text{mu}}} \quad (4.21)$$

โดยที่ C_m เป็น Correction Factor ที่ใช้ปรับค่าแรงดันเมฆ
 E_m เป็นค่าแรงดันเมฆที่มุมของระบบต่อลงดินที่ถูกฝังใน Non-uniform Soil
 E_{mu} เป็นค่าแรงดันเมฆที่มุมของระบบต่อลงดินซึ่งถูกฝังใน Uniform Soil โดยถูกฝังในดินชั้นบน

$$\text{ซึ่งค่า} \quad E_{\text{mu}} = \frac{K_m K_i \rho_1 I_G}{L} \quad (4.22)$$

โดย K_m คือ Spacing Factor สำหรับสัปดาห์ไฟฟ้าเมฆ ดังกล่าวแล้วในบทที่ 2
 K_i คือ Corrective Factor สำหรับลักษณะ โครงสร้างของ โครงตาข่าย ดังกล่าวในบทที่ 2
 ρ_1 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ($\Omega\text{-m}$)
 ρ_2 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\Omega\text{-m}$)
 I_G คือ กระแสโครงตาข่ายลงดิน (A)
 $L = L_g + 1.15L_r$ สำหรับโครงตาข่ายที่มีแท่งดินอยู่รอบๆ
 $= L_g$ สำหรับโครงตาข่ายที่ไม่มีแท่งดิน
 L_g คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำในแนวนอน (m)
 L_r คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำในแนวตั้ง (m)

จากสมการ 4.21และ4.22 จะได้

$$E_m = \frac{C_m K_m K_i \rho_1 I_G}{L} \quad (4.23)$$

$$\text{ค่า } C_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \quad (4.24)$$

แยกได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1. ระบบต่อลงดินมีเฉพาะ โครงตาข่ายไม่มีแท่งดิน

$$x = \begin{cases} 0.075 \left(\log_{10} \frac{\sqrt{A}}{H} \right)^2, & H < \sqrt{A} \\ 0, & H \geq \sqrt{A} \end{cases} \quad (4.25)$$

กรณีที่ 2. ระบบต่อลงดินมีทั้ง โครงตาข่ายและแท่งดิน

$$x = \begin{cases} 0.33 \log_{10} \frac{10H}{H_0}, & \rho_2 < \rho_1 \\ 0.16 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{A}{A_0}} \frac{H}{H_0} \right) - 0.1, & \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (4.26)$$

โดยที่ $A_0 = 1 \text{ m}^2$, $H_0 = 1 \text{ m}$

H = ความหนาของดินชั้นบน (m)

A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

4.4 การหาค่า Non-uniform Correction Factors ซึ่งใช้ปรับค่าแรงดันช่วงก้ำวโดยโครงตาข่ายถูกฝังในดินชั้นบนห่างจากผิวดินชั้นบนเท่ากับ 0.5 m มีสมการดังนี้ [6]

$$C_s = \frac{E_s}{E_{su}} \quad (4.27)$$

โดยที่ C_m เป็น Correction Factor ที่ใช้ปรับค่าแรงดันช่วงก้ำว

E_s เป็นค่าแรงดันช่วงก้ำวที่มุมของระบบต่อลงดินที่ถูกฝังใน Non-uniform Soil

E_{su} เป็นค่าแรงดันช่วงก้ำวที่มุมของระบบต่อลงดินซึ่งถูกฝังใน Uniform Soil

โดยถูกฝังในดินชั้นบน

$$\text{ซึ่งค่า } E_{su} = \frac{K_s K_i \rho_1 I_G}{L} \quad (4.28)$$

- โดย K_s คือ Spacing Factor สำหรับค้ำคานไฟฟ้าช่วงก้าว ดังกล่าวแล้วในบทที่ 2
 K_i คือ Corrective Factor สำหรับลักษณะโครงสร้างของโครงตาข่าย ดังกล่าวในบทที่ 2
 ρ_1 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ($\Omega\text{-m}$)
 ρ_2 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\Omega\text{-m}$)
 I_g คือ กระแสโครงตาข่ายลงดิน (A)
 $L = L_g + 1.15L_r$ สำหรับโครงตาข่ายที่มีแท่งดินอยู่รอบๆ
 $= L_g$ สำหรับโครงตาข่ายที่ไม่มีแท่งดิน
 L_g คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำในแนวนอน (m)
 L_r คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำในแนวตั้ง (m)

จากสมการ 4.27 และ 4.28 จะได้

$$\text{ดังนั้น } E_s = \frac{C_s K_s K_i \rho_1 I_g}{L} \quad (4.29)$$

$$\text{ค่า } C_s = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^y \quad (4.30)$$

แยกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1. ระบบต่อลงดินมีเฉพาะโครงตาข่ายไม่มีแท่งดิน

$$y = \begin{cases} \left(\frac{2h}{H} \right)^{1/3} (0.3 \log_{10} \frac{L}{\sqrt{A}} + 0.1) & , H < \sqrt{A} \\ 0 & , H \geq \sqrt{A} \end{cases} \quad (4.31)$$

กรณีที่ 2. ระบบต่อลงดินมีทั้งโครงตาข่ายและแท่งดิน

$$y = \begin{cases} 0.475 \log_{10} \left(140 \sqrt{\frac{NA_0}{A}} \right) + 0.14 \log_{10} \frac{H}{H_0} & , \rho_2 < \rho_1 \\ 0.16 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{A}{A_0}} \frac{H}{H_0} \right) - 0.1 & , \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (4.32)$$

โดยที่ $A_0 = 1 \text{ m}^2$, $H_0 = 1 \text{ m}$

H = ความหนาของดินชั้นบน (m)

A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

N = จำนวนเมฆของโครงตาข่าย

สมการ 4.25, 4.26, 4.31 และ 4.32 จะใช้สำหรับลวดตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm.

4.5 การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น

ขั้นที่ 1 จัดเก็บข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อย

- สํารวจพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย ฯลฯ
- วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ขั้นที่ 2 หาค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นดิน และความหนาของชั้นดิน ตามแผนภาพรูป

ที่ 4.3

ขั้นที่ 3 คำนวณหาขนาดลวดตัวนำที่เล็กที่สุด โดยพิจารณาจากสมการ 2.20 โดยโปรแกรม จะกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm.

ขั้นที่ 4 คำนวณหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์ สามารถทนได้

- สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 kg จากสมการที่ 2.16 และ 2.17
- สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 70 kg จากสมการที่ 2.18 และ 2.19

ขั้นที่ 5 ออกแบบระบบการต่อลงดิน

- กำหนดความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดินเท่ากับ 0.5 m
- กำหนดความหนาของหินกรวด โดยควรอยู่ในช่วง 0.08-0.15 m
- กำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนาน โดยควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 m
- กำหนดระยะความยาวของแท่งดิน โดยมีค่าเป็น 2 เท่าของความหนาชั้นดิน

ขั้นที่ 6 คำนวณค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจาก สมการที่ 4.20

ขั้นที่ 7 คำนวณหาค่ากระแสโครงตาข่ายการต่อลงดิน จากสมการที่ 2.26

ขั้นที่ 8 คำนวณหาค่า GPR จากสมการที่ 2.27

- ถ้าค่า GPR น้อยกว่า E_{touch} แสดงว่าระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย นั้นใช้ได้ สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งภายใน
- ถ้าค่า GPR มากกว่า E_{touch} แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยอาจ ใช้ไม่ได้ ต้องพิจารณาศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวในขั้นตอนที่ 9 ต่อไป

ขั้นที่ 9 คำนวณค่าศักดาไฟฟ้าเมฆ และศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบต่อ ลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย จากสมการที่ 4.23 และ 4.29 ตามลำดับ

ขั้นที่ 10 พิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าเมซที่คำนวณได้

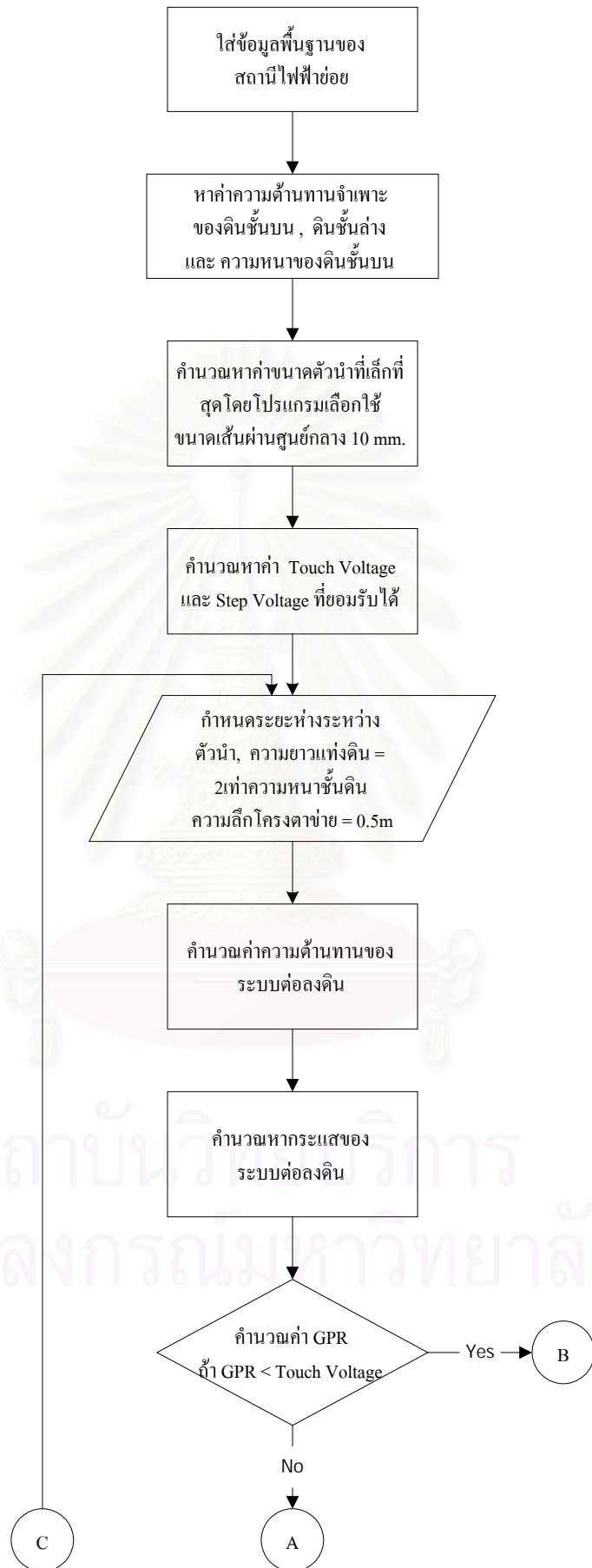
- ถ้าศักดาไฟฟ้าเมซ น้อยกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ต้องพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวในขั้นที่ 11 ต่อไป

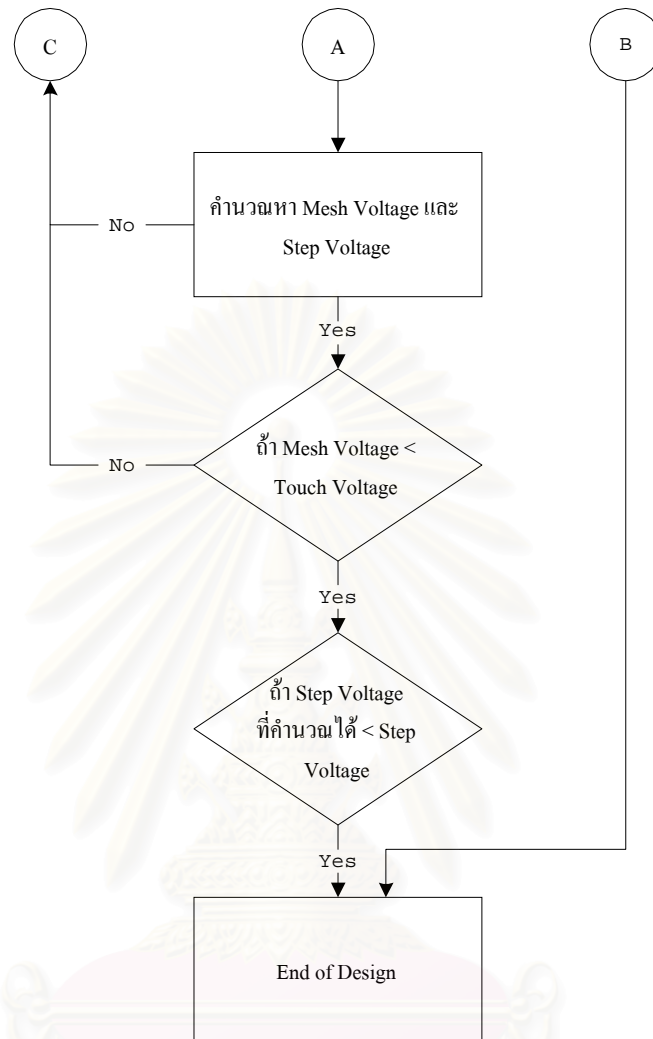
- ถ้าศักดาไฟฟ้าเมซมากกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบการต่อลงดินที่ออกแบบนั้นใช้ไม่ได้ ต้องเปลี่ยนการออกแบบใหม่ โดยกลับไปสู่ขั้นที่ 5 อีกครั้ง

ขั้นที่ 11 พิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้

- ถ้าค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้ มีค่าน้อยกว่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าข้อย่อยนั้นใช้ได้ สามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ สัตว์ และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าข้อย่อยได้

- ถ้าค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าข้อย่อยที่ออกแบบใช้ไม่ได้ ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่ โดยกลับไปสู่ขั้นที่ 5 อีกครั้ง





รูปที่ 4.4 แผนภาพการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

โปรแกรมการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

5.1 คำนำ

ปัจจุบันระบบปฏิบัติการบน Windows เป็นระบบปฏิบัติการที่กำลังเป็นที่นิยมมาก และเครื่องคอมพิวเตอร์กว่า 70% ทั่วโลกล้วนแต่ใช้ระบบปฏิบัติการบน Windows ทั้งสิ้น เนื่องจากง่ายต่อการเรียนรู้และการใช้งาน การทำงานในโหมดกราฟฟิกสามารถทำงานหลายโปรแกรมพร้อมกัน สามารถโอนถ่ายข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชันได้ง่าย สนับสนุนหน่วยความจำเสมือน (Visual Memory) และอื่นๆ อีกหลายประการ โดยหนึ่งในภาษาที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows ที่ผู้สนใจการเขียนโปรแกรมมักจะเรียนกันได้แก่ ภาษา Visual Basic

5.2 ภาพรวมของ Visual Basic

โปรแกรม Visual Basic มีสภาพแวดล้อมสำหรับการพัฒนาบน Windows ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ครบถ้วนไม่ว่าจะเป็นส่วนของการออกแบบ User Interface , ส่วนออกแบบเมนู (Menu Design) , การสร้างรายงาน (Report Writer) , Editor สำหรับป้อนโปรแกรม และ Debugger เพื่อการตรวจหาข้อผิดพลาดในโปรแกรม องค์ประกอบเหล่านี้นับว่าเอื้ออำนวยต่อการทำงานของโปรแกรมเมอร์อย่างมาก

ในส่วนของตัวภาษา Visual Basic ได้นำเอาไวยากรณ์ของ BASICA และ GW-BASIC มาใช้โดยสนับสนุนความสามารถเดิมเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ยังเพิ่มการโปรแกรมแบบมีโครงสร้างของ Quick Basic ซึ่งคล้ายกับในภาษาที่มีโครงสร้าง เช่น Pascal หรือ C เข้าไปด้วย นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มคำสั่ง และฟังก์ชันที่เกี่ยวกับ Object และการเรียกฟังก์ชันของระบบปฏิบัติการ (API) เพื่อให้การทำงานกว้างขวางขึ้น รวมทั้งสนับสนุนความสามารถของระบบ เช่น OLE , DDE และการใช้งานคลิปบอร์ด เป็นต้น

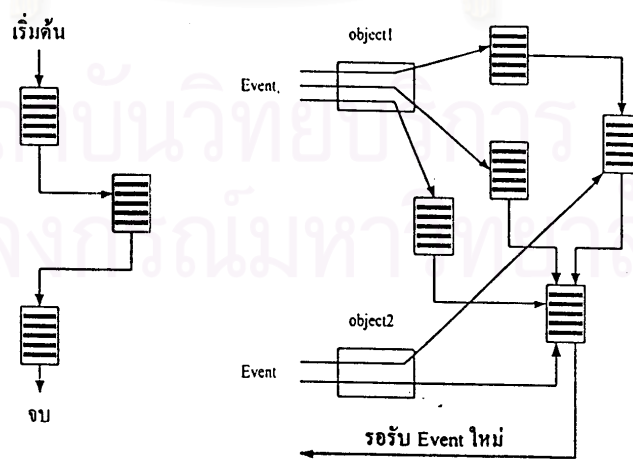
5.3 หลักการโปรแกรมเชิงภาพของ Visual Basic

สำหรับ Visual Basic การพัฒนาและเขียนโปรแกรมจะเป็นไปในรูปแบบหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากการเขียนโปรแกรมแบบเดิม กล่าวคือ ต้องออกแบบหน้าจอ ระบุตำแหน่งการแสดงผล คิดหาขั้นตอนการทำงานและอื่นๆ จากนั้นจึงทำการเขียนโปรแกรม โปรแกรมที่ได้จะอธิบายภาพ และ

การมองเห็นโดยเริ่มจากออกแบบวินโดวส์ย่อย หรือที่ใน Visual Basic เรียกว่า ฟอรัม โดยในฟอรัมจะประกอบด้วยสิ่งต่างๆ ที่เราจะทำงานด้วย หรือเรียกว่าเป็น Object เช่น ข้อความ , ช่องรับข้อความ , Scrollbar หรือ ปุ่ม (Button) เมื่อกำหนดสิ่งเหล่านี้ครบถ้วนแล้วจึงระบุว่าจะประกอบแต่ละอย่างทำงานอย่างไร โดยเขียนโปรแกรมย่อยๆปะเข้าไปใน Object เหล่านี้ ที่ต้องทำแบบนี้ เพราะการทำงานใน Windows เป็นแบบที่เรียกว่า Even-Driven คือ ขึ้นกับเหตุการณ์

ส่วนการเขียนโปรแกรมแบบเดิม คือ เขียนสั่งงานตามลำดับจะยุ่งยากมากหรือบางกรณีอาจทำไม่ได้เลย เพราะในขณะใดขณะหนึ่งนั้น ในระบบไมโครจะมีเพียงแอฟพลิเคชั่นของเราเท่านั้นที่ดำเนินการอยู่ Windows จะจัดการกับแอฟพลิเคชั่นที่ทำงานในขณะนั้นทั้งหมดไปพร้อมๆ กัน (เนื่องจากระบบเป็นแบบ Multitasking หรือดำเนินการหลายงานได้ในเวลาเดียวกัน) ในขณะที่ผู้ใช้อาจพิมพ์ข้อมูลเข้าไปหรืออาจใช้เมาส์เลื่อนไปคลิกตรงนั้นตรงนี้ได้โดยอิสระ ทำให้ยากที่จะเขียนโปรแกรมธรรมดาที่คอยดักเส้นทางการทำงานในการรับค่าว่าจะเกิดอะไรขึ้นตรงไหนได้ จึงต้องใช้รูปแบบการโปรแกรมในลักษณะ Even-Driven ดังกล่าว ซึ่ง Object แต่ละตัวก็จะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับมันได้หลายอย่าง ถ้าเราสนใจเฉพาะเหตุการณ์ก็สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงานให้คอยดัก หรือทำงานตามเฉพาะเหตุการณ์นั้นๆ ได้ เช่น ถ้าสิ่งที่เราสนใจเป็นปุ่มควบคุม และเราต้องการให้ทำงานเมื่อคลิก หรือดับเบิลคลิก ก็ระบุไว้ว่า หากมีการคลิกที่ปุ่มควบคุมนี้ โปรแกรมจะต้องทำอย่างไร หรือถ้ามีการ ดับเบิลคลิกจะต้องทำอย่างไร ส่วนเหตุการณ์อื่นๆ ที่ไม่ได้ระบุไว้ก็ไม่มีผลต่อ Object นั้น

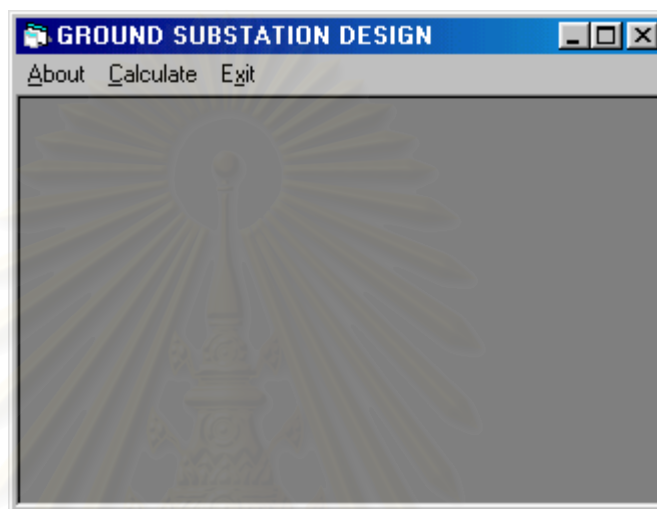
ดังนั้นหลักการในการออกแบบใน Visual Basic ก็คือ เริ่มจากออกแบบจอภาพ และเขียนโปรแกรมแต่ละ Even ของ Object ต่างๆให้ทำงานตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยทุก Object จะมีคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ของตัวเอง



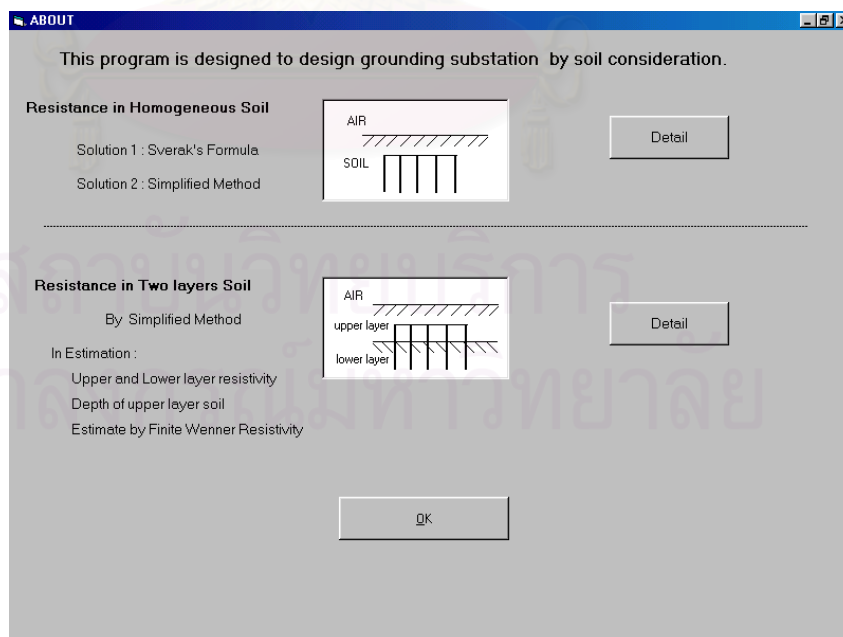
รูปที่ 5.1 การเขียนโปรแกรมแบบธรรมดา กับแบบ Even-Driven

5.4 ลักษณะของโปรแกรม

- ใช้สีพื้นของหน้าต่าง (Windows) ทั้งหมดเป็นสีเทา เพื่อผู้ใช้ให้เกิดความสบายตา
- แบ่งส่วนที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดและผลการคำนวณออกจากกันเพื่อป้องกันความสับสนของผู้ใช้
- ใช้ Object แบบ 3 มิติ เช่น 3D Command Button เพื่อเพิ่มความสวยงาม และเน้นรายละเอียดให้กับรูปแบบของโปรแกรม



รูปที่ 5.2 แสดงหน้าต่างเมื่อเข้าสู่โปรแกรม



รูปที่ 5.3 แสดงหน้าต่างเมื่อเข้าสู่ Menu ส่วน ABOUT

รูปที่ 5.4 แสดงหน้าต่างเมื่อคลิก Menu ส่วน Calculate

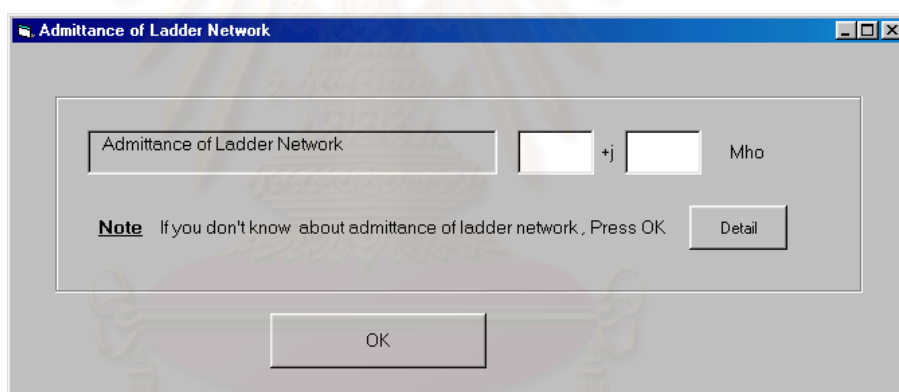
ในรูปที่ 5.4 เมื่อเข้าสู่ Menu ส่วน Calculate ผู้ใช้ต้องใส่ค่าข้อมูลพื้นฐานของสถานีไฟฟ้าย่อย ได้แก่ ความกว้างและความยาวของสถานีไฟฟ้าย่อย , ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด , ความหนาของชั้นหินกรวด , ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ , ค่ากระแสผิดพลาดสูงสุด และระยะเวลาการเกิดผิดพลาด ส่วนขนาดของลวดตัวนำ , ค่า Admittance ของ Ladder Network และ Soil Resistivity สามารถเติมรายละเอียดโดยคลิกเมาส์ที่ปุ่ม Enter

รูปที่ 5.5 แสดงหน้าต่างการหาขนาดตัวนำ

เมื่อเข้าสู่หน้าต่างการหาขนาดตัวนำดังรูปที่ 5.5 ข้อมูลที่ต้องเติมมีอยู่ 6 ช่องโดยประกอบด้วย รายละเอียดของชนิดของตัวนำซึ่งประกอบด้วย

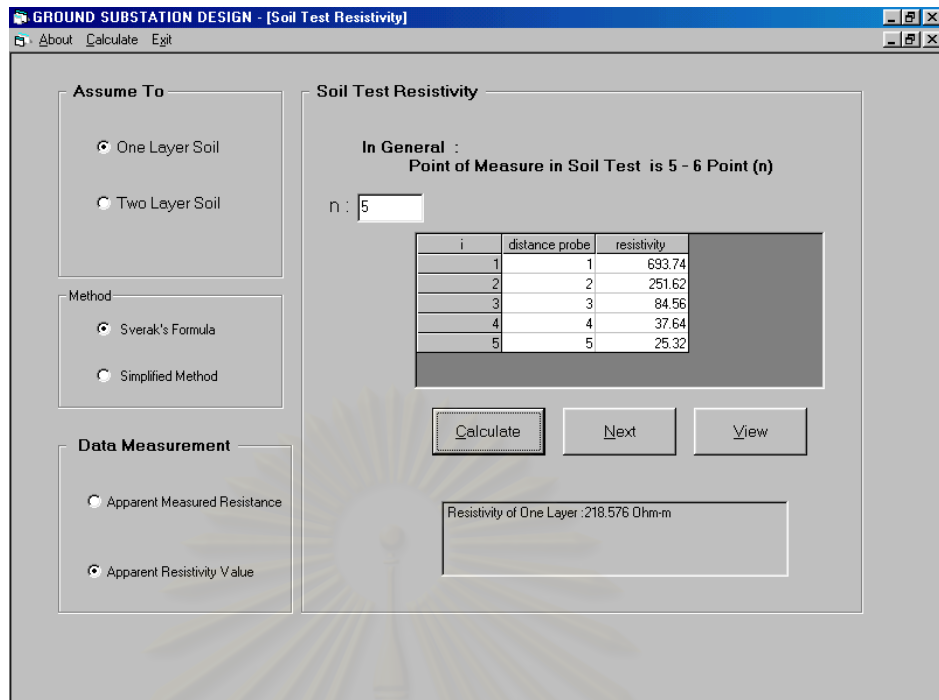
- Thermal Coefficient of Resistivity at 20 °C
- Thermal Coefficient of Resistivity at 0 °C
- Resistivity of Conductor at 20 °C ($\mu\Omega/\text{cm}^3$)
- Thermal Capacity Factor ($\text{J}/\text{cm}^3 / ^\circ\text{C}$)
- Maximum Allowable Temperature Conductor
- Ambient Temperature ($^\circ\text{C}$)

โดยในโปรแกรมทำการเลือกตัวนำพื้นที่หน้าตัดขนาด 78.54 ตร.มม เพื่อให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มม. (เป็นข้อจำกัดจากการคำนวณ Factor ในการปรับค่า Mesh และ Step Voltage เนื่องจากผลของชั้นดินกรณีดินสองชั้น) เมื่อคลิกเมาส์ OK จะกลับไปแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 5.4 เมื่อคลิกเมาส์ Enter ที่ Admittance of Ladder Network จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงหน้าต่าง Admittance of Ladder Network

จากหน้าต่างรูปที่ 5.6 มีข้อมูลที่ต้องเติมคือ ค่า G และ B ของ Ladder Network ซึ่งหาได้โดยวิธีการของ Thapar ซึ่งค่า ของ G และ B จะขึ้นกับ ชนิดของสาย Overhead Ground Wire , เส้นผ่านศูนย์กลางของสาย Overhead Ground Wire , จำนวนของสาย Overhead Ground Wire , ระยะห่างระหว่างเสาต่ง (Span Tower) , ค่าความต้านทานของเสาต่ง (Tower Footing Resistance) , โดยพิจารณาค่า G และ B จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ โดยกรณีที่ไม่ทราบค่าตัวแปรที่ใช้หาค่า Admittance of Ladder Network ให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม OK โดยไม่ต้องเติมค่าลงในช่องว่างซึ่งโปรแกรมจะเซตค่า กระแสที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินมีค่าเท่ากับ 0.8 เท่าของกระแสผิดพ่วงสูงสุด เมื่อกดปุ่ม OK โปรแกรมจะกลับมาแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 5.4 และปุ่ม Enter ที่ Admittance of Ladder Network จะไม่สามารถกดได้



รูปที่ 5.7 หน้าต่าง Information Soil Test เมื่อกำหนด Data Measurement เป็นแบบ Apparent Resistivity Value

เมื่อกด Enter จะเข้าสู่หน้าต่าง Soil Test Resistivity ดังรูปที่ 5.7 โดยจะประกอบด้วยหน้าต่างย่อย 4 ส่วน คือ

1. ส่วนสมมติชนิดชั้นดิน แยกเป็นกรณีดินเนื้อเดียวและกรณีดินสองชั้น
2. ส่วนทฤษฎีของกรณีสมมติว่าเป็นดินเนื้อเดียว คือ Sverak's Formula และ Simplified Method โดยในส่วนกรณีดินสองชั้นจะใช้ทฤษฎี Simplified Method
3. ส่วน Data Measurement แยกเป็น 2 แบบ คือ Apparent Measure Resistance และ Apparent Resistivity Value
4. Soil Test Resistivity เป็นส่วนเติมค่าที่ได้จากการวัด โดย
 - สำหรับกรณี Apparent Measured Resistance จะต้องเติม ระยะห่างระหว่างแท่งดิน และค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ดังรูปที่ 5.7
 - สำหรับกรณี Apparent Resistivity Value จะต้องเติม ระยะห่างระหว่างแท่งดิน , ค่าความลึกของชั้นดิน และค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ ดังรูปที่ 5.8

เมื่อคลิกที่ปุ่ม Calculate จะปรากฏผลการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
เมื่อคลิกที่ปุ่ม View จะแสดงกราฟของค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดดังรูปที่ 5.9

GROUND SUBSTATION DESIGN - [Soil Test Resistivity]

About Calculate Exit

Assume To

One Layer Soil

Two Layer Soil

Method

Sverak's Formula

Simplified Method

Data Measurement

Apparent Measured Resistance

Apparent Resistivity Value

Soil Test Resistivity

In General :
Point of Measure in Soil Test is 5 - 6 Point (n)

n : 5

i	distance probe	resistance	depth probe
1	1	110.412	0.01
2	2	20.023	0.02
3	3	4.480	0.03
4	4	1.4976	0.04
5	5	0.805	0.05

Calculate Next View

Upper Layer Soil : 1004.1787 Ohm-m
Lower Layer Soil : 21.126 Ohm-m
Depth of Upper Layer Soil : 9923 m Counter17

รูปที่ 5.8 หน้าต่าง Information Soil Test เมื่อกำหนด Data Measurement เป็นแบบ Apparent Measure Resistance



รูปที่ 5.9 หน้าต่างกราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด

กรณีสมมติชนิดของชั้นดินเป็นดินเนื้อเดียว (One Layer Soil) เมื่อคลิกที่ปุ่ม Next จะปรากฏ หน้าต่างดังรูปที่ 5.10

รูปที่ 5.10 หน้าต่างกำหนดระยะระหว่างตัวนำกรณีดินเนื้อเดียว

กรณีสมมติเป็นดินสองชั้น (Two Layer Soil) เมื่อคลิกที่ปุ่ม Next จะปรากฏ หน้าต่างดังรูปที่ 5.11

รูปที่ 5.11 หน้าต่างกำหนดระยะระหว่างตัวนำกรณีดินสองชั้น

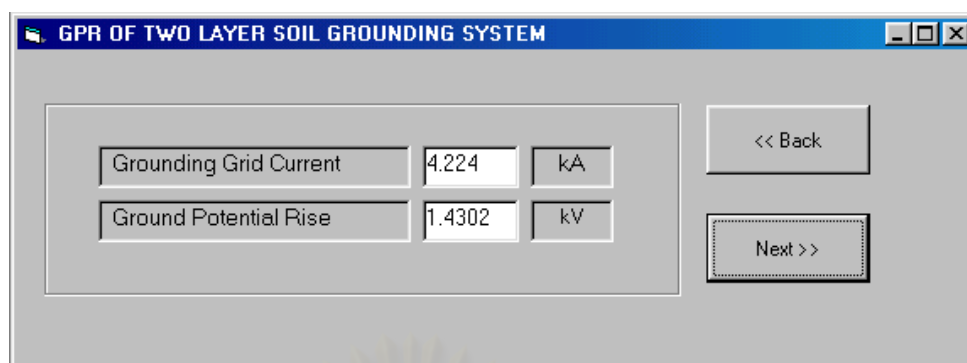
จากรูปที่ 5.10 และ รูปที่ 5.11 จะประกอบด้วยหน้าต่างย่อย 3 ส่วน คือ หน้าต่างย่อยแรกจะเป็นผลการคำนวณความต้านทานจำเพาะของดิน หน้าต่างย่อยที่สองจะเป็นส่วนกำหนดระยะระหว่างตัวนำ ความยาวแท่งดิน จำนวนแท่งดิน และระยะความลึกของโครงตาข่ายโดยโปรแกรมจะกำหนดเท่ากับ 0.5 m เมื่อกำหนดข้อมูลในหน้าต่างย่อยส่วนที่สองแล้วคลิกที่ปุ่ม Calculate หน้าต่างย่อยส่วนที่สามจะแสดงผลการคำนวณซึ่งจะแสดงจำนวนของลวดตัวนำโครงตาข่ายที่ขนานกัน จำนวน Conductor ทั้งหมดที่ใช้ และผลการคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดิน เมื่อคลิกปุ่ม Next จะปรากฏหน้าต่างแสดงศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนัก 50 และ 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังรูปที่ 5.12

TOUCH AND STEP VOLTAGE		
Tolerable Touch Voltage 50	712.285	V
Tolerable Touch Voltage 70	2399.8738	V
Tolerable Step Voltage 50	964.0408	V
Tolerable Step Voltage 70	3248.105	V

<< Back Next >>

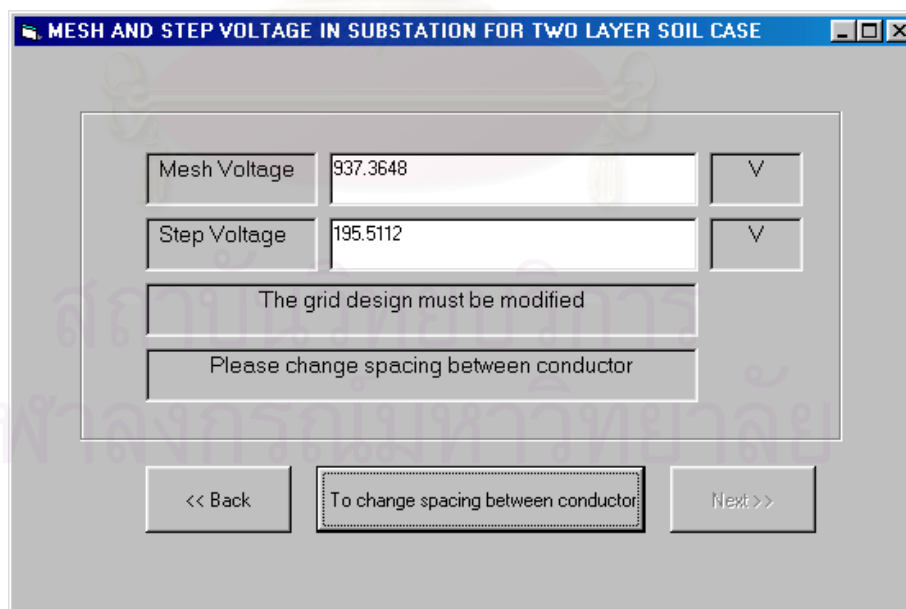
รูปที่ 5.12 หน้าต่างแสดงศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 และ 70 กิโลกรัม

จากรูปที่ 5.12 เมื่อคลิกปุ่ม Next จะปรากฏหน้าต่างแสดงค่า Ground Grid Current และ GPR (Ground Potential Rise) ดังรูปที่ 5.13 โดยรูปแบบทั้งกรณีดินเนื้อเดียวกับดินสองชั้นจะต่างกันเพียง Title Bar

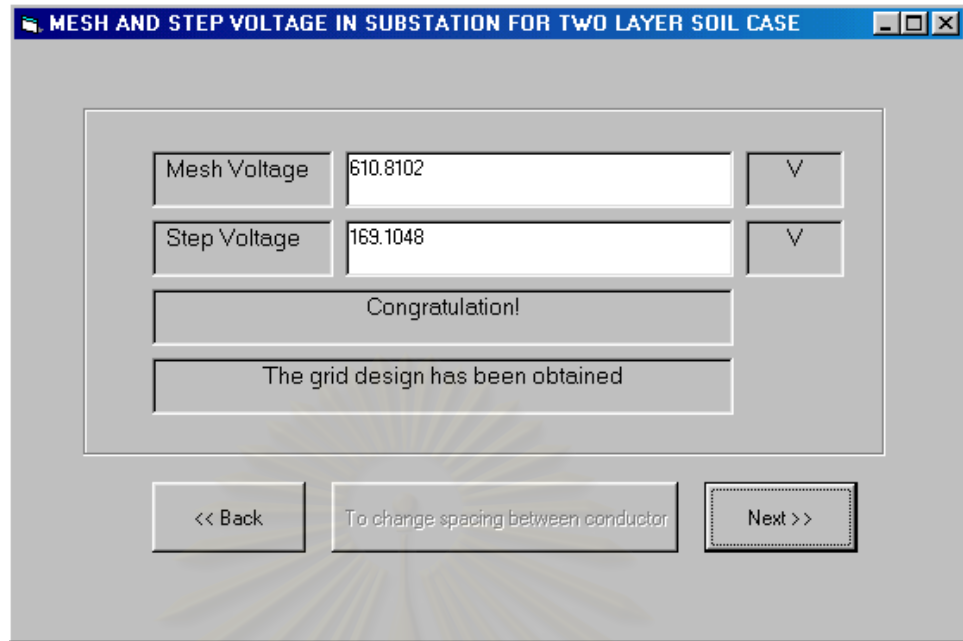


รูปที่ 5.13 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณค่า Ground Grid และ GPR

จากรูปที่ 5.13 เมื่อคลิกปุ่ม Next จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 5.14 ซึ่งแสดงผลการออกแบบว่าจะต้องทำการออกแบบใหม่ โดยต้องทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างลวดตัวนำของโครงตาข่าย หรือ อาจทำการตัดแต่งดินออกสำหรับกรณีดินสองชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมากกว่าดินชั้นบน โดยคลิกที่ปุ่ม To change spacing between conductor ซึ่งจะกลับไปแสดง หน้าต่างที่ 5.10 สำหรับกรณีดินเนื้อเดียว และจะกลับไปแสดงหน้าต่างที่ 5.11 สำหรับกรณีดินสองชั้น เมื่อผลการออกแบบได้รับการยอมรับจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 5.15 โดยรูปแบบทั้งกรณีดินเนื้อเดียวกับดินสองชั้นจะต่างกัน เพียง Title Bar

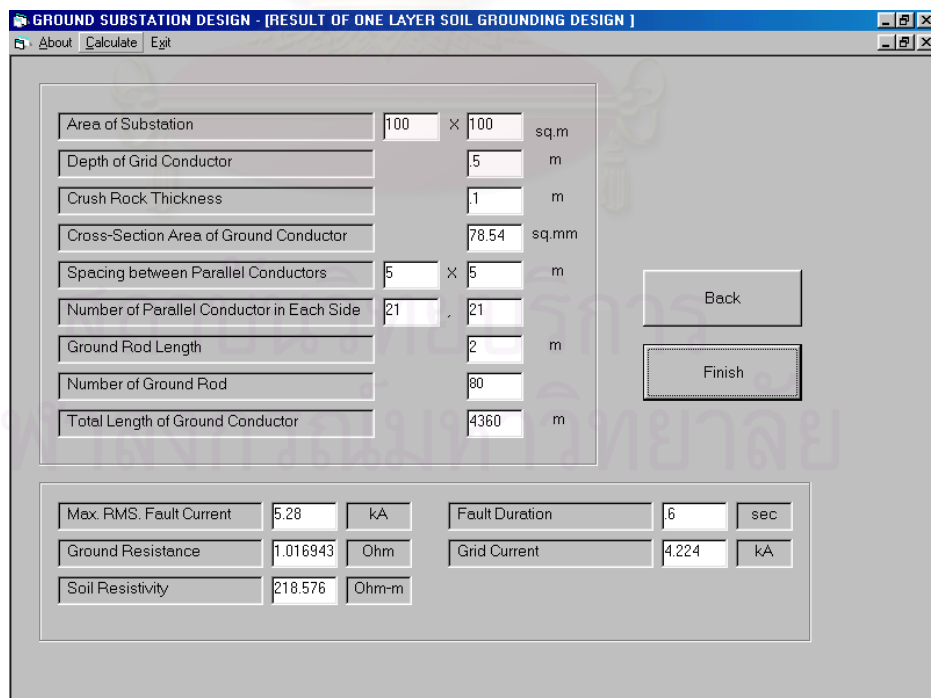


รูปที่ 5.14 แสดงผลการคำนวณศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นเมื่อผลออกแบบไม่ผ่านค่าความปลอดภัย



รูปที่ 5.15 แสดงผลการคำนวณศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้น
เมื่อผลการออกแบบอยู่ภายใต้ค่าความปลอดภัย

เมื่อผลการออกแบบได้รับการยอมรับดังรูปที่ 5.15 แล้วคลิกปุ่ม Next จะปรากฏหน้าต่างดัง
รูปที่ 5.16 สำหรับกรณีดินเนื้อเดียว และดังรูปที่ 5.17 สำหรับกรณีดินสองชั้น



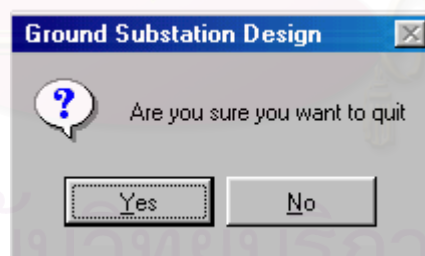
รูปที่ 5.16 ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีดินเนื้อเดียว

GROUND SUBSTATION DESIGN - [RESULT OF TWO LAYER SOIL GROUNDING DESIGN]			
Area of Substation	100	× 100	sq.m
Depth of Grid Conductor	5		m
Crush Rock Thickness	1		m
Cross-Section Area of Ground Conductor	78.54		sq.mm
Spacing between Parallel Conductors	5	× 5	m
Number of Parallel Conductor in Each Side	21	× 21	
Ground Rod Length	2		m
Number of Ground Rod	80		
Total Length of Ground Conductor	4360		m

Max. RMS. Fault Current	5.28	kA	Ground Resistance	3339	Ohm
Upper Layer Soil Resistivity	1003.72	Ohm-m	Fault Duration	6	sec
Lower Layer Soil Resistivity	21.1411	Ohm-m	Grid Current	4.224	kA
Depth of Upper Layer Soil	9924	m			

รูปที่ 5.17 ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีดินสองชั้น

จากรูปที่ 5.16 และ 5.17 เมื่อคลิกปุ่ม Finish จะแสดงหน้าต่าง ดังรูปที่ 5.18 เพื่อตามความแน่ใจว่าต้องการออกจากโปรแกรมนี้หรือไม่ ถ้าไม่ต้องการให้คลิกที่ปุ่ม No ถ้าต้องการให้คลิกที่ปุ่ม Yes



รูปที่ 5.18 หน้าต่างการออกจากโปรแกรมนี้

บทที่ 6

เปรียบเทียบและวิเคราะห์การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย กรณีดินเนื้อเดียวและดินสองชั้น

ในบทนี้จะเปรียบเทียบผลการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยสมมติเป็นกรณีดินเนื้อเดียวและกรณีดินสองชั้น

โดยใช้โปรแกรมที่ได้ศึกษาและพัฒนาโดยขั้นตอนการออกแบบและแสดงผลเป็นดังนี้

- 1) ป้อนข้อมูลส่วนกลางของสถานีไฟฟ้าย่อย
- 2) กำหนดหาขนาดตัวนำที่เล็กที่สุดโดยเลือกตัวนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม
- 3) ป้อนข้อมูลที่ได้จากการวัดความต้านทานดินภาคสนาม และเลือกวิธีการออกแบบ
- 4) กำหนดหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้
- 5) แสดงผลการออกแบบการต่อลงดิน

เนื่องจากผลการออกแบบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน โดยกรณีดินสองชั้นมีข้อจำกัดในการออกแบบที่ค่าความยาวของแท่งดินที่ต่อกับระบบต่อลงดินมีค่าเป็น 2 เท่าของความหนาของชั้นดินชั้นบน ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินเพื่อเปรียบเทียบ จะทำการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้นก่อนเพื่อให้ค่าตัวแปรของการออกแบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียวและดินสองชั้นมีค่าเท่ากัน

6.1 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1

พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยแห่งหนึ่งมีขนาด $100 \times 100 \text{ m}^2$ กระแสผิดปกติสูงสุดลงดิน 5.28 kA ช่วงเวลาการผิดปกติ 0.6 sec โครงตาข่ายต่อลงดินลึก 0.5 m โรยหินกรวดหนา 0.1 m ความต้านทานจำเพาะหินกรวด 3000 Ohm-m. ความต้านทานร่างกายมนุษย์ 1000 Ohm ใช้ลวดทองแดงเป็นวัสดุในการสร้างระบบต่อลงดิน

การวัดค่าความต้านทานดินตามวิธีการวัดแบบ Four Probe มีรายละเอียดดังนี้

ระยะห่างแท่งดิน	2 m	วัดค่าความต้านทานได้	9.92 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.1 m
ระยะห่างแท่งดิน	4 m	วัดค่าความต้านทานได้	7.49 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.2 m
ระยะห่างแท่งดิน	6 m	วัดค่าความต้านทานได้	6.91 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.3 m
ระยะห่างแท่งดิน	8 m	วัดค่าความต้านทานได้	6.20 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.4 m
ระยะห่างแท่งดิน	10 m	วัดค่าความต้านทานได้	5.83 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.5 m

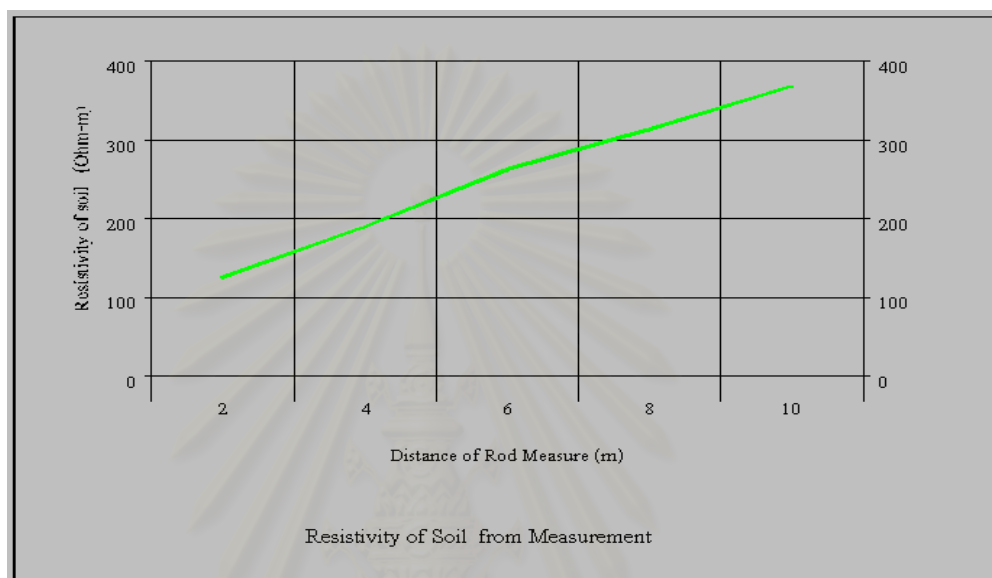
ผลการคำนวณค่าความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEEE Std 80-1986

Tolerable Touch Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 50 kg = 715.32 V

Tolerable Touch Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 70 kg = 2412.01 V

Tolerable Step Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 50 kg = 968.15 V

Tolerable Step Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 70 kg = 3264.52 V



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นแนวโน้มของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างแท่งดินที่ใช้วัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำการออกแบบโดยเปรียบเทียบผลการออกแบบระหว่างกรณีดินเนื้อเดียวและดินสองชั้นดังนี้

6.1.1 ค่าความต้านทานจำเพาะและการออกแบบระบบต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (Upper Layer Soil Resistivity) เท่ากับ 100.71 Ohm-m. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (Lower Layer Soil Resistivity) เท่ากับ 924.48 Ohm-m. ความหนาของดินชั้นบน เท่ากับ 2.45 m

จากนั้นทำการออกแบบโดยกำหนดระยะห่างระหว่างลวดตัวนำ โดยแยกเป็น 2 กรณีคือ กรณีติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดิน โดยกรณีติดตั้งแท่งดินค่าความยาวของแท่งดินเท่ากับ 2 เท่าของความหนาของดินชั้นบนซึ่งเท่ากับ 4.9 m โดยติดตั้งรอบโครงตาข่าย

เมื่อกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 3 m ผลการคำนวณกรณีติดตั้งแท่งดินค่าความต้านทานเท่ากับ 1.8687 Ohm ใช้จำนวนลวดตัวนำเท่ากับ 7,447 m ค่า GPR (Ground Potential Rise) เท่ากับ 11.864 kV ค่า Mesh Voltage เท่ากับ 266.91 V ค่า Step Voltage เท่ากับ 1106.72 V

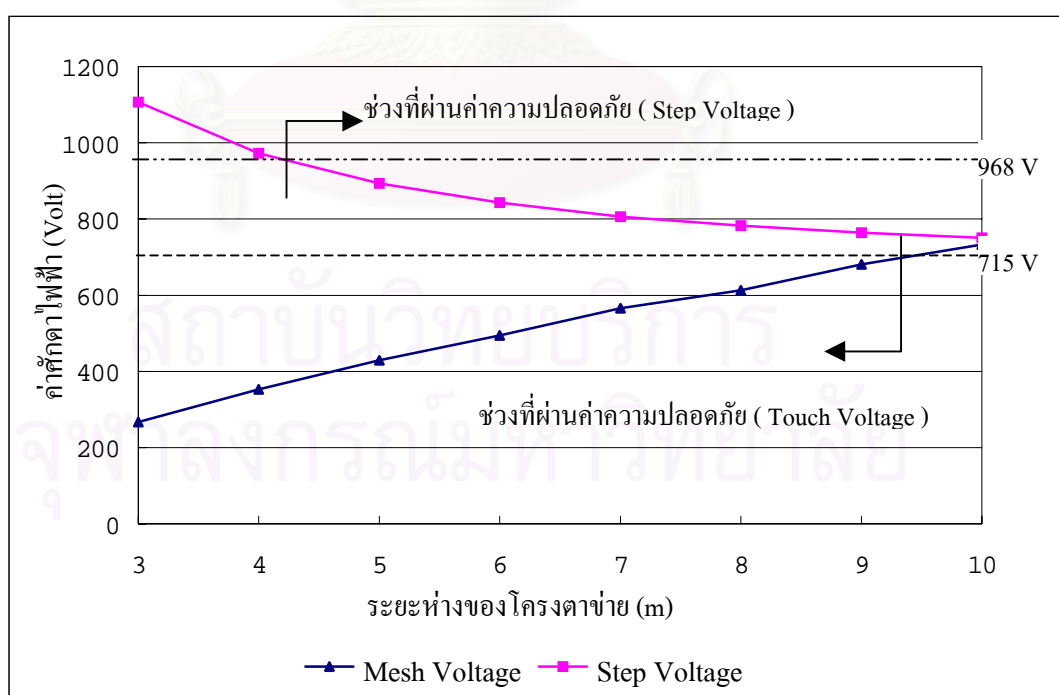
ผลการออกแบบพบว่าจะต้องทำการกำหนดระยะห่างของลวดตัวนำใหม่เนื่องจากค่า Mesh Voltage และ Step Voltage เกินค่าความปลอดภัย ดังนั้นทำการออกแบบโดยพิจารณาที่ระยะห่างของลวดตัวนำต่าง ๆ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1
กรณีดินสองชั้น โดยติดตั้งแท่งดินรอบโครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
จำนวนแท่งดิน	132	100	80	68	56	52	44	40
Mesh (V)	266.91	353.02	429.42	494.88	566.38	613.09	681.36	733.08
Step (V)	1106.72	972.55	893.12	843.04	806.29	783.01	763.94	750.55
Rg (Ohm)	2.8088	2.8365	2.8631	2.8848	2.914	2.9251	2.9537	2.9703
GPR (kV)	11.864	11.981	12.094	12.185	12.309	12.356	12.476	12.547
Conductor(m)	7447	5690	4592	3934	3275	3055	2616	2396
ผลออกแบบ	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	×

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

× คือ ผลออกแบบไม่ผ่าน โดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.2 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำ โดยมีแท่งดินรอบโครงตาข่ายกรณีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่าง

จากผลการออกแบบที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำกรณีติดตั้งแท่งดินรอบโครงตาข่ายและค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่างตามรูปที่ 6.2 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าต่ำ เมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้านนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงในตารางที่ 6.1 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นด้วยทั้งนี้เป็นเพราะจำนวนลวดตัวนำที่ฝังอยู่ในดินมีจำนวนลดลง ส่วนค่า GPR จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีค่าแปรตามความต้านทานของระบบต่อลงดิน จากตารางที่ 6.1 ที่ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 3 , 4 m มีค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้านเท่ากับ 1106.72 V และ 972.55 V ตามลำดับซึ่งมีค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้านเกินค่าความปลอดภัย คือ 968.15 V โดยระยะห่างลวดตัวนำที่ยอมรับได้ภายใต้ค่าความปลอดภัย คือ ที่ระยะ 5 , 6 , 7 , 8 , 9 m ส่วนที่ระยะ 10 m มีค่าศักดาไฟฟ้าเมฆเท่ากับ 733.08 V ซึ่งมีค่าเกินค่าความปลอดภัยสำหรับศักดาไฟฟ้าสัมผัสคือ 715.32 V

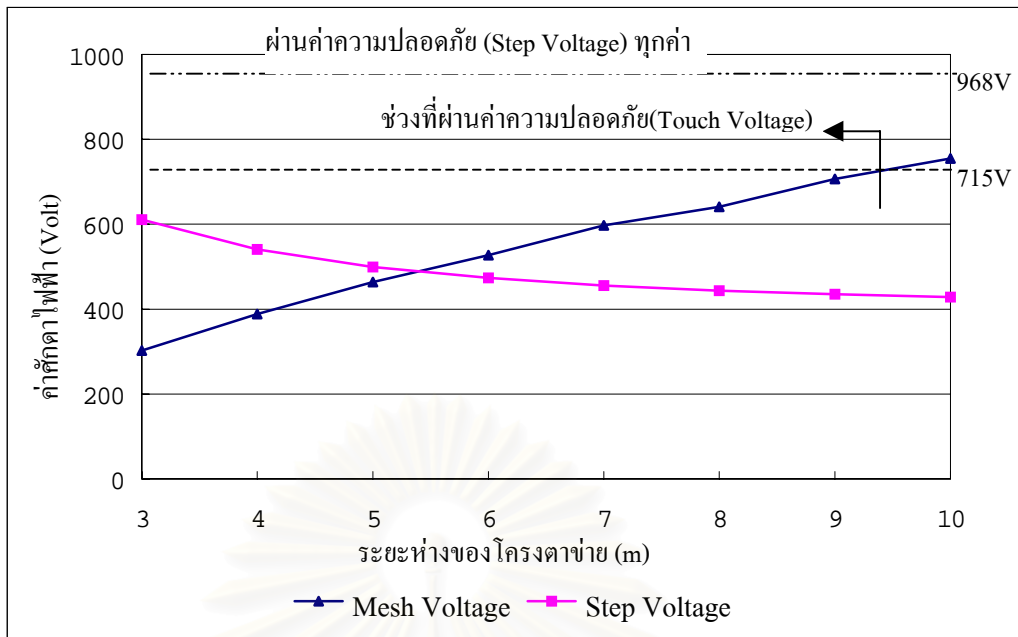
การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยไม่ติดตั้งแท่งดินที่ระยะห่างของตัวนำระยะต่างๆ ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1
กรณีดินสองชั้น โดยมีเฉพาะโครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	302.43	388.25	463.69	527.40	597.05	641.18	706.54	755.16
Step (V)	610.66	540.53	499.39	473.56	455.50	443.34	434.82	428.53
Rg (Ohm)	3.1678	3.1706	3.1738	3.1764	3.1811	3.182	3.1876	3.1905
GPR (kV)	13.380	13.393	13.406	13.417	13.437	13.441	13.464	13.477
Conductor(m)	6800	5200	4200	3600	3000	2800	2400	2200
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

× คือ ผลออกแบบไม่ผ่านโดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.3 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำ โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย กรณีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่าง

ผลการออกแบบที่ระยะห่างต่าง ๆ ของลวดตัวนำเมื่อมีเฉพาะ โครงตาข่ายและค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่างตามรูปที่ 6.3 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าต่ำ เมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงในตารางที่ 6.2 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่า GPR จากตารางที่ 6.2 ที่ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 m มีค่าศักดาไฟฟ้าเมฆเท่ากับ 755.16 V ซึ่งมีค่าเกินค่าปลอดภัยของศักดาไฟฟ้าสัมผัส คือ 715.32 V โดยระยะห่างลวดตัวนำที่ยอมรับได้ ภายใต้อาคารความปลอดภัย คือ ที่ระยะ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 m

6.1.2 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น

เมื่อเปรียบเทียบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้นเมื่อระบบต่อลงดินติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดิน จากรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ จะพบว่าค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยในระบบที่มีแท่งดิน ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่มีแท่งดิน โดยเป็นผลเนื่องมาจากจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินคือลวดตัวนำยิ่งมากค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะยิ่งมีค่าลดลง ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่มีแท่งดิน ซึ่งเป็นผลมาจากการต่อแท่งดินลงสู่ดินชั้นล่าง ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ส่วนผลของการต่อแท่งดินรอบ โครงตาข่ายทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่า

ลดลงแม้ว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างจะสูงกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนก็ตาม

6.1.3 ค่าความต้านทานจำเพาะและการออกแบบระบบต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว ผลการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะ (Soil Resistivity) เท่ากับ 251.36 Ohm-m. จำนวนค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ระยะห่างตัวนำต่างๆ กรณีติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดินเป็นดังตารางที่ 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานต่อลงดิน (R_g) ที่แสดงดังตารางที่ 6.3 และ 6.4

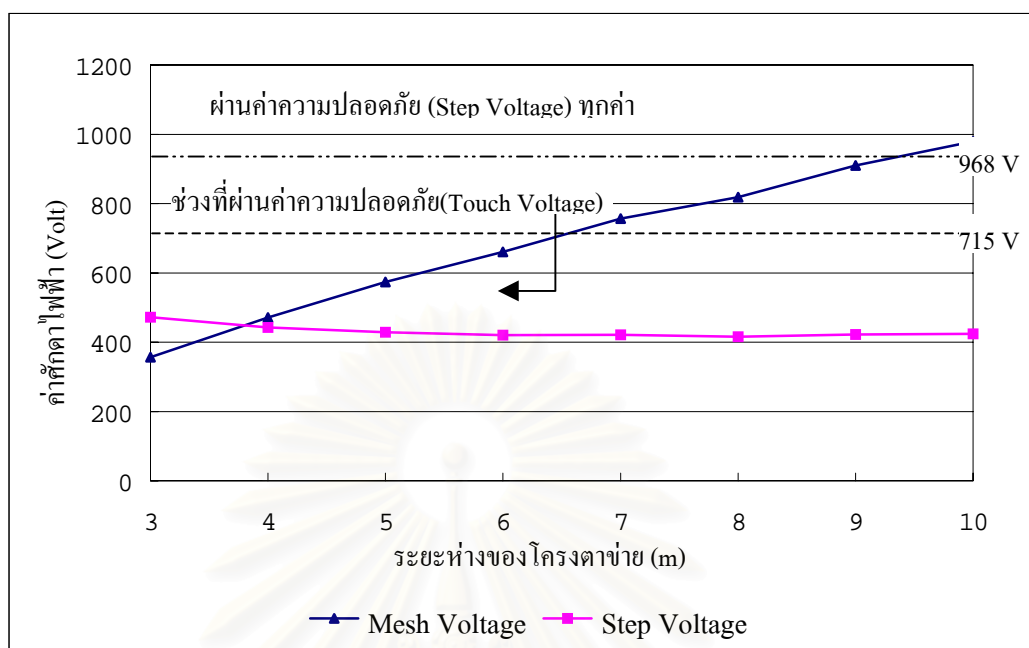
ตารางที่ 6.3 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1
กรณีดินเนื้อเดียวโดยติดตั้งแท่งดินรอบโครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
จำนวนแท่งดิน	132	100	80	68	56	52	44	40
Mesh (V)	356.37	471.34	573.35	660.75	756.21	818.58	909.72	978.78
Step (V)	471.76	442.70	428.57	420.39	420.96	416.02	422.24	424.30
R_g (Ohm)	1.0763	1.0892	1.1018	1.1118	1.1275	1.1314	1.1484	1.1574
GPR (kV)	4.546	4.601	4.654	4.696	4.763	4.779	4.851	4.889
Conductor(m)	7447	5690	4592	3934	3275	3055	2616	2396
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

× คือ ผลออกแบบไม่ผ่าน โดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.4 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำ โดยมีแท่งดินรอบโครงตาข่ายกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

ผลการออกแบบที่ระยะห่างต่าง ๆ ของลวดตัวนำ เมื่อมีแท่งดินรอบโครงตาข่ายกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว ตามรูปที่ 6.4 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าต่ำ เมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้านั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ระยะห่างลวดตัวนำเท่ากับ 9 และ 10 m สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงในตารางที่ 6.3 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่า GPR จากตารางที่ 6.3 ที่ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 7 , 8 , 9 , 10 m มีค่าศักดาไฟฟ้าเมฆเท่ากับ 756.21 , 818.58 , 909.72 และ 978.78 V ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเกินค่าปลอดภัยของศักดาไฟฟ้าสัมผัส คือ 715.32 V โดยระยะห่างลวดตัวนำที่ยอมรับได้ ภายใต้ค่าความปลอดภัยคือ ที่ระยะ 3 , 4 , 5 , 6 m

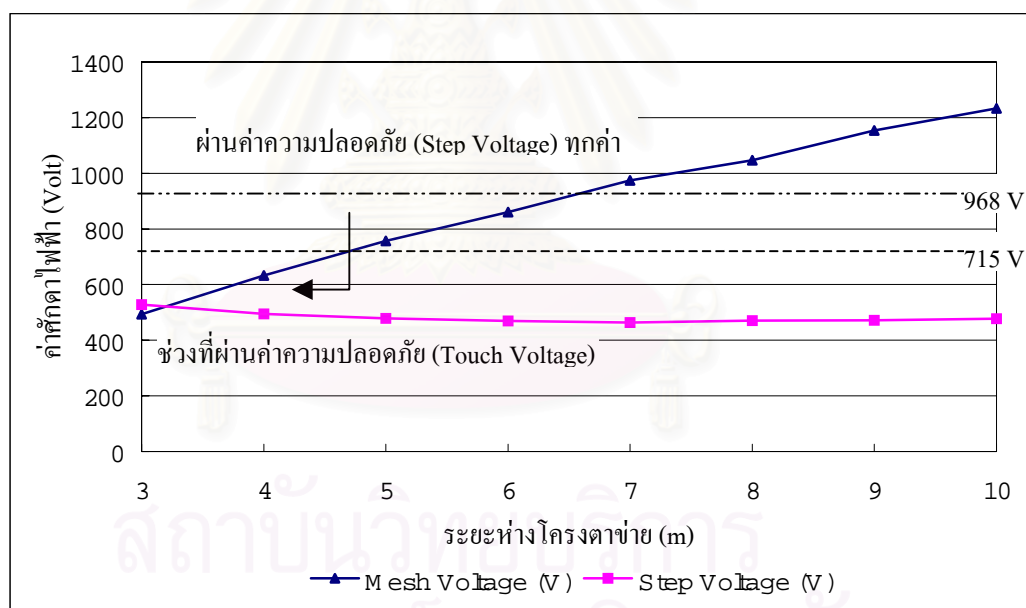
การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยไม่ติดตั้งแท่งดินที่ระยะห่างของตัวนำระยะต่าง ๆ ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1
กรณีดินเนื้อเดียวโดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	490.20	629.30	751.58	854.85	967.75	1039.3	1145.2	1224.0
Step (V)	523.37	490.67	474.57	465.13	465.23	459.56	465.87	467.77
Rg (Ohm)	1.1183	1.1255	1.1334	1.140	1.1517	1.154	1.1679	1.1751
GPR (kV)	4.724	4.754	4.788	4.815	4.865	4.875	4.933	4.964
Conductor(m)	6800	5200	4200	3600	3000	2800	2400	2200
ผลออกแบบ	✓	✓	×	×	×	×	×	×

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่าน โดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

× คือ ผลออกแบบไม่ผ่าน โดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.5 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำ
โดยมีเฉพาะ โครงตาข่ายกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

ผลการออกแบบที่ระยะห่างต่าง ๆ ของลวดตัวนำเมื่อมีเฉพาะ โครงตาข่ายตามรูปที่ 6.5 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าต่ำ เมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ระยะระหว่างลวดตัวนำมีค่าเท่ากับ 8 , 9 และ

10 m สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงใน ตารางที่ 6.4 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่า GPR จากตารางที่ 6.4 ที่ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5, 6, 7, 8, 9, 10 m มีค่าศักดาไฟฟ้าเมฆเกินค่าปลอดภัยของศักดาไฟฟ้าสัมผัส คือ 715.32 V โดยระยะห่างลวดตัวนำที่ยอมรับได้ภายใต้ค่าความปลอดภัย คือ ที่ระยะ 3 และ 4 m

6.1.4 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

เมื่อเปรียบเทียบการต่อลงดิน กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวโดยระบบต่อลงดินติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดินจาก รูปที่ 6.4 และ 6.5 จะพบว่าค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยในระบบที่มีแท่งดินค่าศักดาไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่มีแท่งดิน และค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวจะมีค่าลดลงเมื่อมีการต่อแท่งดินเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าจากตารางที่ 6.3 และ 6.4 ค่า GPR และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน ผลของการติดตั้งแท่งดินจะทำให้ค่า GPR และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าลดลง โดยทั้งระบบที่ติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดินเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า GPR และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าสูงขึ้น

6.1.5 สรุปการออกแบบระบบต่อลงดินระหว่างกรณีดินสองชั้นและดินเนื้อเดียวตัวอย่างที่ 1

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สามารถพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียวได้ โดยสำหรับผลการออกแบบระบบต่อลงดินโดยพิจารณาผลเนื่องจากชั้นดินจากตารางที่ 6.1 และ 6.2 ควรเลือกการออกแบบที่ระยะห่างลวดตัวนำเท่ากับ 9 เมตรโดยไม่ต้องทำการติดตั้งแท่งดิน ซึ่งเป็นระยะที่ใช้จำนวนลวดตัวนำต่ำที่สุด โดยสำหรับกรณีผลการออกแบบกรณีดินเนื้อเดียวตามตารางที่ 6.3 และ 6.4 นั้น ทำเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นผลการออกแบบกรณีไม่คิดผลเนื่องจากชั้นดินโดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีดินเนื้อเดียวกับกรณีดินสองชั้นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง เป็นดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบผลการออกแบบกับชนิดชั้นดิน
เมื่อความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

พิจารณา	ดินเนื้อเดียว	ดินสองชั้น เมื่อ $\rho_{บน} < \rho_{ล่าง}$
ผลการเพิ่มแท่งดิน รอบ โครงตาข่าย	ศักดาไฟฟ้าเมชลดลง	ศักดาไฟฟ้าเมชลดลง
	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลดลง	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวเพิ่มขึ้น
	ค่าความต้านทานลดลง	ค่าความต้านทานลดลง
ระยะห่างโครงตา ข่ายเพิ่มขึ้น	ศักดาไฟฟ้าเมชเพิ่มขึ้น	ศักดาไฟฟ้าเมชเพิ่มขึ้น
	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลดลง	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลดลง
	ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น	ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

6.2 การออกแบบและวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2

พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยแห่งหนึ่งมีขนาด $80 \times 80 \text{ m}^2$ กระแสผิดพลาดสูงสุดลงดิน 4.2 kA
ช่วงเวลาการผิดพลาด 0.5 sec โครงตาข่ายต่อลงดินลึก 0.5 m โยหินกรวดหนา 0.1 m ความต้าน
ทานจำเพาะหินกรวด 3000 ohm-m. ความต้านทานร่างกายมนุษย์ 1000 ohm ใช้ลวดทองแดงเป็น
วัสดุในการสร้างระบบต่อลงดิน

การวัดค่าความต้านทานดินตามวิธีการวัดแบบ Four Probe มีรายละเอียดดังนี้

ระยะห่างแท่งดิน	1 m	วัดค่าความต้านทานได้	40.36 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.05 m
ระยะห่างแท่งดิน	2 m	วัดค่าความต้านทานได้	19.05 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.10 m
ระยะห่างแท่งดิน	3 m	วัดค่าความต้านทานได้	5.12 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.15 m
ระยะห่างแท่งดิน	4 m	วัดค่าความต้านทานได้	1.49 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.20 m
ระยะห่างแท่งดิน	5 m	วัดค่าความต้านทานได้	0.81 Ohm	ความลึกของแท่งดิน	0.25 m

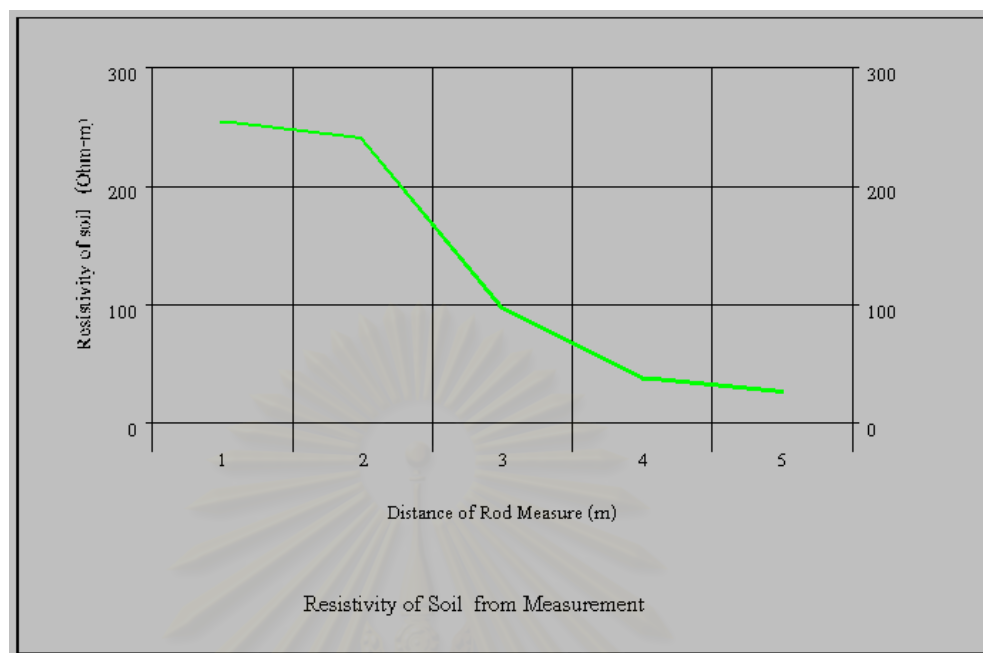
ผลการคำนวณค่าความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEEE Std 80-1986

Tolerable Touch Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 50 kg = 771.03 V

Tolerable Touch Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 70 kg = 2591.99 V

Tolerable Step Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 50 kg = 1043.55 V

Tolerable Step Voltage สำหรับมนุษย์หนัก 70 kg = 3508.13 V



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นแนวโน้มของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดว่ามีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างแท่งดินที่ใช้วัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำการออกแบบโดยเปรียบเทียบผลการออกแบบระหว่างกรณีดินเนื้อเดียวและดินสองชั้นดังนี้

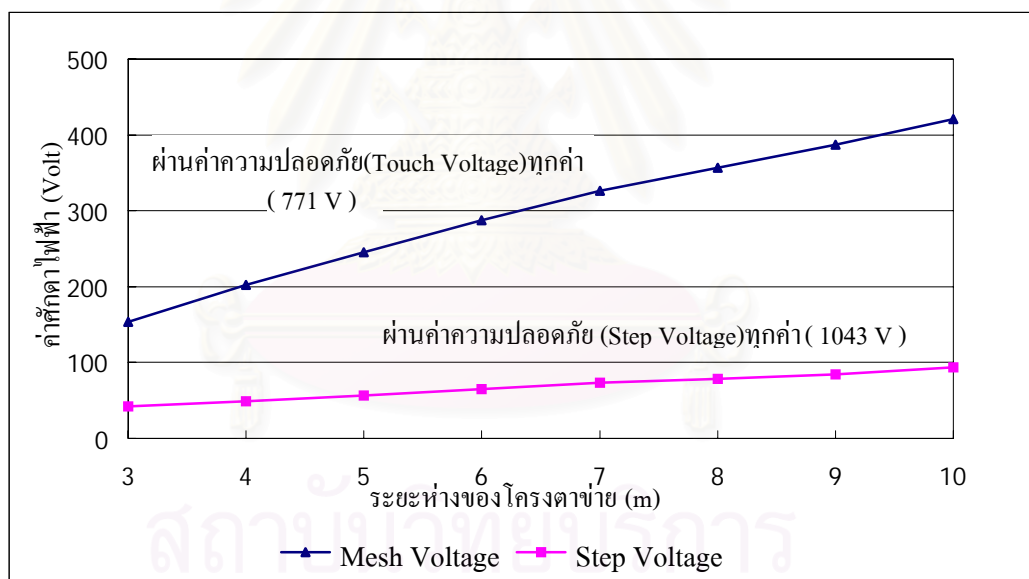
6.2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะและการออกแบบระบบต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (Upper Layer Soil Resistivity) เท่ากับ 364.56 Ohm-m. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (Lower Layer Soil Resistivity) เท่ากับ 11.39 Ohm-m. ความหนาของดินชั้นบน เท่ากับ 1.434 m จากนั้นทำการออกแบบโดยกำหนดระยะห่างระหว่างลวดตัวนำ โดยแยกเป็น 2 กรณีคือ กรณีติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดิน โดยกรณีติดตั้งแท่งดินค่าความยาวของแท่งดินเท่ากับ 2 เท่าของความหนาของดินชั้นบนซึ่งเท่ากับ 2.868 m โดยติดตั้งรอบโครงตาข่ายทำการออกแบบโดยพิจารณาที่ระยะห่างของลวดตัวนำต่าง ๆ ดังตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.7

ตารางที่ 6.6 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2
กรณีดินสองชั้น โดยติดตั้งแท่งดินรอบ โครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
จำนวนแท่งดิน	108	80	64	52	44	40	36	32
Mesh (V)	153.17	202.61	245.71	287.83	326.51	356.30	387.38	421.02
Step (V)	42.04	49.31	56.30	64.92	73.29	78.11	84.61	93.27
Rg (Ohm)	0.1512	0.166	0.1795	0.1963	0.2126	0.2219	0.2341	0.2503
GPR (kV)	0.508	0.556	0.603	0.660	0.714	0.746	0.787	0.841
Conductor(m)	4790	3590	2904	2390	2047	1875	1704	1532
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

× คือ ผลออกแบบไม่ผ่านโดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.7 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำ โดยมีแท่งดินรอบ โครงตาข่ายกรณีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าดินชั้นล่าง

จากผลการออกแบบที่ระยะห่างต่างๆของลวดตัวนำกรณีติดตั้งแท่งดินรอบโครงตาข่ายและค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าดินชั้นล่าง จากรูปที่ 6.7 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมซจะมีค่าต่ำ เมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมซจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้นสำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงในตารางที่ 6.6 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่าง

ลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นด้วยทั้งนี้เป็นเพราะจำนวนลวดตัวนำที่ฝังอยู่ในดินมีจำนวนลดลง ส่วนค่า GPR จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีค่าแปรตามความต้านทานของระบบต่อลงดิน จากตารางที่ 6.6 พบว่าที่ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10 m มีค่าศักดาไฟฟ้าเมชและค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวต่ำกว่าค่าความปลอดภัย คือ 771.03 V และ 1043.55 V ตามลำดับ

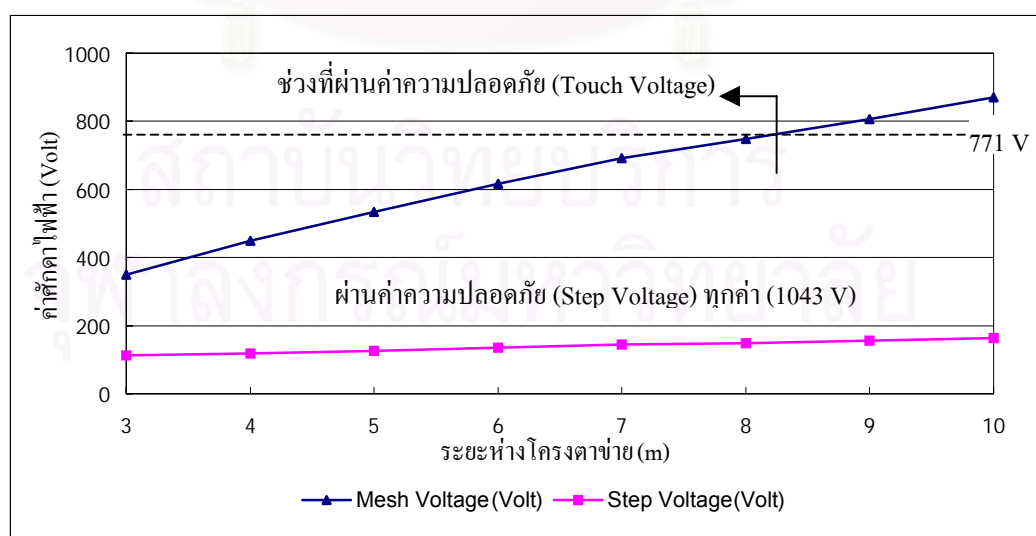
การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยไม่ติดตั้งแท่งดินที่ระยะห่างของตัวนำระยะต่างๆ ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2
กรณีดินสองชั้น โดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	348.51	447.45	532.38	614.64	689.08	745.40	803.97	867.01
Step (V)	113.14	120.05	127.06	136.39	145.19	149.59	156.02	164.77
Rg (Ohm)	0.2038	0.2215	0.2390	0.2614	0.2833	0.2935	0.3086	0.3304
GPR (kV)	0.685	0.744	0.803	0.878	0.952	0.986	1.037	1.110
Conductor(m)	4480	3360	2720	2240	1920	1760	1600	1440
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

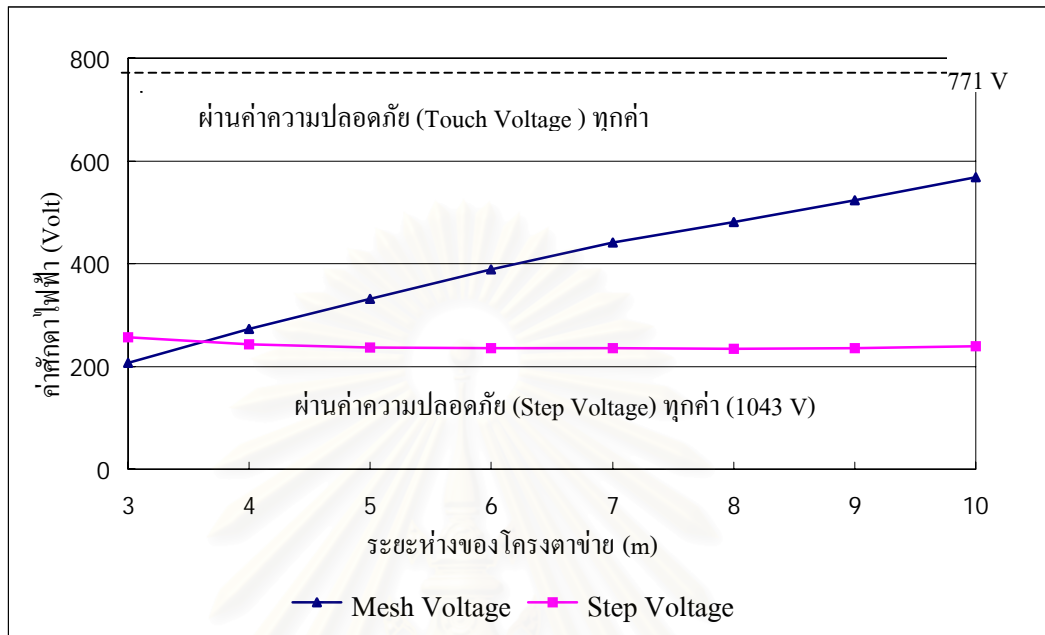
× คือ ผลออกแบบไม่ผ่านโดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.8 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำ โดยมีเฉพาะ โครงตาข่ายกรณีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าดินชั้นล่าง

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

✗ คือ ผลออกแบบไม่ผ่านโดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.9 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำโดยมีแท่งดินรอบโครงตาข่ายกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

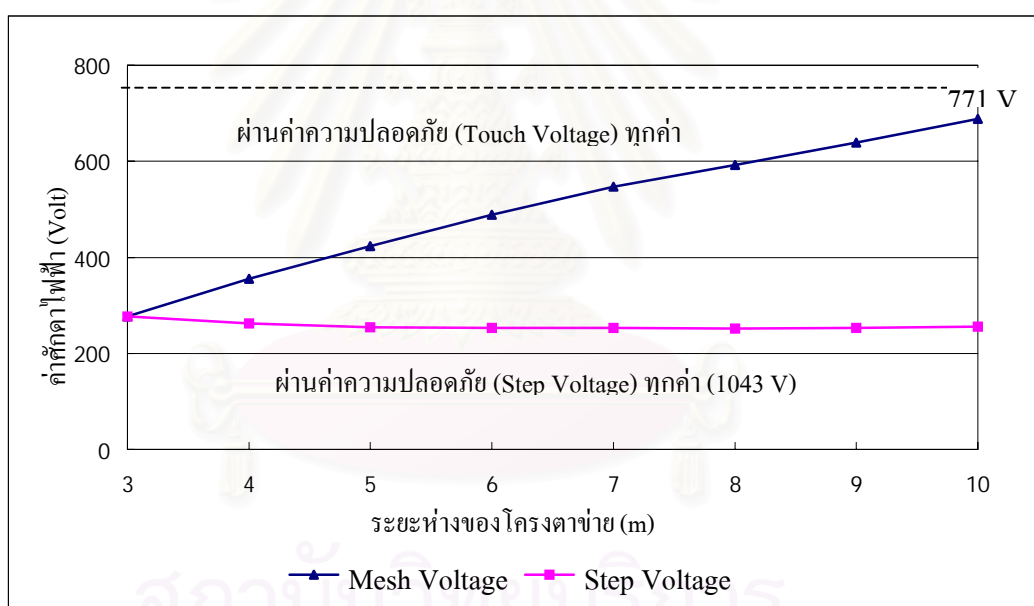
ผลการออกแบบที่ระยะห่างต่าง ๆ ของลวดตัวนำเมื่อมีแท่งดินรอบโครงตาข่าย ตามรูปที่ 6.9 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมซจะมีค่าต่ำเมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมซจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้านนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงในตารางที่ 6.8 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่า GPR จากตารางที่ 6.8 พบว่าโดยระยะห่างลวดตัวนำที่ยอมรับได้ภายใต้ค่าความปลอดภัย คือ ที่ระยะ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 และ 10 m

ตารางที่ 6.9 ผลการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2
กรณีดินเนื้อเดียวโดยมีเฉพาะ โครงตาข่าย

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	276.82	355.41	422.87	488.21	547.34	592.07	638.59	688.67
Step (V)	277.17	262.10	254.90	253.15	253.36	252.09	253.08	256.23
Rg (Ohm)	0.7288	0.7351	0.7414	0.7495	0.7573	0.7610	0.7664	0.7742
GPR (kV)	2.449	2.470	2.491	2.518	2.545	2.557	2.575	2.601
Conductor(m)	4480	3360	2720	2240	1920	1760	1600	1440
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ คือ ผลออกแบบผ่านโดยศักดาไฟฟ้าอยู่ภายใต้ความปลอดภัย

× คือ ผลออกแบบไม่ผ่านโดยศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความปลอดภัย



รูปที่ 6.10 ค่าศักดาไฟฟ้า Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างต่างๆ ของลวดตัวนำโดยมีเฉพาะ โครงตาข่ายกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

ผลการออกแบบที่ระยะห่างต่าง ๆ ของลวดตัวนำเมื่อมีเฉพาะโครงตาข่ายตามรูปที่ 6.10 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำใกล้ ๆ กันศักดาไฟฟ้าเมซจะมีค่าต่ำ เมื่อลวดตัวนำมีระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมซจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้แสดงใน ตารางที่ 6.9 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจะ

เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่า GPR จากตารางที่ 6.9 ระยะห่างลวดตัวนำที่ยอมรับได้ภายใต้ค่าความปลอดภัย คือ ที่ระยะ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 และ 10 m

6.2.4 วิเคราะห์ผลการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียว

เมื่อเปรียบเทียบการต่อลงดิน กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวโดยระบบต่อลงดินติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดินจาก รูปที่ 6.9 และ 6.10 จะพบว่าค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เท่ากัน โดยในระบบที่มีแท่งดินค่าศักดาไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่มีแท่งดิน และค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวจะมีค่าลดลงเมื่อมีการต่อแท่งดินเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าจากตารางที่ 6.8 และ 6.9 ค่า GPR และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน ผลของการติดตั้งแท่งดินจะทำให้ค่า GPR และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าลดลง โดยทั้งระบบที่ติดตั้งแท่งดินและไม่ติดตั้งแท่งดินเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า GPR และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าสูงขึ้น

6.2.5 สรุปการออกแบบระบบต่อลงดินระหว่างกรณีดินสองชั้นและดินเนื้อเดียวตัวอย่างที่ 2

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้จากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีแนวโน้มลดลง ซึ่งไม่สามารถพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียวได้ โดยสำหรับผลการออกแบบระบบต่อลงดินโดยพิจารณาเป็นดินสองชั้นดังตารางที่ 6.6 และ 6.7 นั้นควรเลือกการออกแบบที่ระยะห่างลวดตัวนำเท่ากับ 10 เมตรที่มีการติดตั้งแท่งดิน ซึ่งจะใช้ปริมาณลวดตัวนำต่ำสุดแต่อย่างไรก็ตาม จะต้องมีการติดตั้งแท่งดินซึ่งมีราคาแพงโดยหากเปรียบเทียบกรณีการออกแบบที่ระยะห่างลวดตัวนำเท่ากับ 8 เมตรโดยไม่ติดตั้งแท่งดินพบว่า ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวของกรณีแรกจะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่สองอย่างมากดังนั้นจึงควรเลือกการออกแบบกรณีที่ระยะห่างลวดตัวนำเท่ากับ 10 เมตรโดยติดตั้งแท่งดินรอบโครงตาข่าย สำหรับ กรณีผลการออกแบบกรณีดินเนื้อเดียวตามตารางที่ 6.8 และ 6.9 นั้นทำเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นผลการออกแบบกรณีไม่คิดผลเนื่องจากชั้นดินเท่านั้น เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มแท่งดิน รอบโครงตาข่ายและระยะระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีดินเนื้อเดียวกับ กรณีดินสองชั้นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างเป็นดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10

เปรียบเทียบผลการออกแบบกับชนิดชั้นดินเมื่อความต้านทาน
จำเพาะของดินชั้นบนสูงกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

พิจารณา	ดินเนื้อเดียว	ดินสองชั้น เมื่อ
ผลการเพิ่มแท่งดิน รอบ โครงตาข่าย	ศักดาไฟฟ้าเมฆลดลง	ศักดาไฟฟ้าเมฆลดลง
	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลลดลง	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลลดลง
	ค่าความต้านทานลดลง	ค่าความต้านทานลดลง
ระยะห่างโครงตา ข่ายเพิ่มขึ้น	ศักดาไฟฟ้าเมฆเพิ่มขึ้น	ศักดาไฟฟ้าเมฆเพิ่มขึ้น
	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลลดลง	ศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลเพิ่มขึ้น
	ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น	ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

6.3 สรุปผลการวิเคราะห์

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและสมมติเป็นดินสองชั้นในการออกแบบการต่อลงดินจะต้องพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งประกอบด้วยศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวล และศักดาไฟฟ้าเมฆ โดยผลการวิเคราะห์เนื่องจากสมมติเป็นชั้นดินมีดังนี้

ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวล

- กรณีดินสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมากกว่าดินชั้นล่าง แนวโน้มของค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าระยะห่างระหว่างลวดตัวนำโครงตาข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น การติดตั้งแท่งดินจะส่งผลให้ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลมีค่าลดลง
- กรณีดินสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าดินชั้นล่าง แนวโน้มของค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลจะมีค่าลดลงเมื่อค่าระยะห่างระหว่างลวดตัวนำโครงตาข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น การติดตั้งแท่งดินจะส่งผลให้ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลมีค่าเพิ่มขึ้น
- กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวแนวโน้มของค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลจะมีค่าลดลง เมื่อค่าระยะห่างระหว่างลวดตัวนำโครงตาข่ายเพิ่มขึ้น การติดตั้งแท่งดินส่งผลให้ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวลมีค่าลดลง

ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆ

- ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆที่ได้จากการคำนวณมีค่าขึ้นกับระยะห่างระหว่างลวดตัวนำ และการติดตั้งแท่งดิน โดยเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำโครงตาข่ายมีค่าเพิ่มขึ้นค่าศักดาไฟฟ้าเมฆจะมีค่าเพิ่ม

ขึ้นด้วย ส่วนการต่อแท่งดินรอบโครงตาข่ายจะส่งผลให้ค่าศักดาไฟฟ้าเมฆมีค่าลดลงทั้งกรณีดินชั้นเดียวและดินสองชั้น

สำหรับค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินและ GPR (Ground Potential Rise) ขึ้นกับระยะห่างระหว่างลวดตัวนำโครงตาข่ายและการติดตั้งแท่งดิน โดยเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน และค่า GPR จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการติดตั้งแท่งดินจะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและค่า GPR มีค่าลดลง ทั้งกรณีดินเนื้อเดียวและกรณีดินสองชั้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ถึงระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลเนื่องจากชั้นดิน โดยแยกเป็นกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น และพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบ ระบบการต่อลงดินทั้งสองกรณี โดยโปรแกรมที่กล่าวถึงนี้ได้ รับการพัฒนาจากภาษา Visual Basic เวอร์ชัน 6 ซึ่งถือว่าเป็นภาษาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการบน Windows และจะมีบทบาทสำคัญต่อไปในอนาคต

การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลเนื่องจากชั้นดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่พิจารณาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หรือลดลง โดยแยกทำการพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น พบว่าค่าความต้านทานจำเพาะตามความลึกที่ทำการพิจารณาจะส่งผลต่อการออกแบบ โดยต่างจากกรณีที่สมมติเป็นดินเนื้อเดียว โดยสามารถสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้ดังนี้

-กรณีที่ดินชั้นบนมีค่าความต้านทานจำเพาะมากกว่าดินชั้นล่างควรติดตั้งแท่งดินเนื่องจากจะช่วยลดค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำว และค่าศักดาไฟฟ้าเมฆได้

-กรณีที่ดินชั้นบนมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำกว่าดินชั้นล่างไม่ควรติดตั้งแท่งดินเนื่องจากจะทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามระยะห่างของลวดตัวนำก็จะมีผลต่อค่าความปลอดภัยซึ่งจะพิจารณาได้จากค่าศักดาไฟฟ้าเมฆและค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวอันเป็นเกณฑ์ที่ IEEE Std 80-1986 ใช้ในการพิจารณาผลการออกแบบการต่อลงดิน สำหรับค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินและ GPR (Ground Potential Rise) ขึ้นกับ ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำโครงค้ำยและการติดตั้งแท่งดิน โดยเมื่อระยะห่างระหว่างลวดตัวนำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน และค่า GPR จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการติดตั้งแท่งดินจะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและค่า GPR มีค่าลดลงทั้งกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและกรณีสมมติเป็นดินสองชั้น

อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาครั้งนี้ศึกษาภายใต้ขอบเขตที่จำกัด ดังนั้นการที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติจำเป็นต้องปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1). วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาที่ลวดตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มม. ระยะลึกโครงค้ำยเท่ากับ 0.5 เมตร และสถานีไฟฟ้าย่อยมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น เนื่องมาจาก Non-uniform Correction Factor ที่ใช้ในการปรับค่า Mesh Voltage และ Step Voltage กรณีดินสองชั้น

นั้นได้ทำการพิจารณาจากเงื่อนไขดังกล่าว หากสามารถศึกษาค่า Non-uniform Correction Factor สำหรับ Mesh Voltage และ Step Voltage ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง ความถี่ระยะ โครงตาข่าย และรูปร่างของสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ จะสามารถพิจารณา Mesh Voltage และ Step Voltage ได้ครอบคลุมการออกแบบกรณีดินสองชั้นมากยิ่งขึ้น

2). วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาพิจารณาที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่มีแนวโน้มของดินชั้นบนสูงหรือต่ำกว่าดินชั้นล่างเท่านั้น ซึ่งในบางครั้งหากผลการวัดค่าความต้านทานดินที่ได้มีค่าแกว่งมากเกินไป ค่าที่คำนวณได้อาจไม่ถูกต้องหรือไม่สามารถคำนวณได้ โดยอาจต้องทำการพิจารณาเป็นดินมากกว่าสองชั้น (Multi-layer of Soil)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. 1980-86
2. B. Thapar , S.K. Madan , “Current for Design of Grounding Systems” , IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems , Vol. PAS-103 , No.9 , September 1984
3. Y.L. Chow , M.M.A. Salama , “A Simplified Method for Calculating the Substation Grounding Grid Resistance” , IEEE Transaction on Power Delivery , Vol 9 , No.2 , April 1994
4. H.R. Seedher , J.K. Arora , “Estimation of Two Layer Soil Parameters Using Finite Wenner Resistivity Expressions” , IEEE Transaction on Power Delivery , Vol 7 , No.3 , July 1992
5. Y.L. Chow , M.M Elsherbiny , M.M.A. Salama , “Resistance Formulas of Grounding Systems in Two-Layer Earth” , IEEE Transaction on Power Delivery , Vol 11 , No.3 , July 1996
6. J.M. Nahman , V.B. Djordjevic , “Nonuniform Correction Factors for Maximum Mesh- and Step-Voltages of Ground Grids and Combined Ground Electrodes” , IEEE Transaction on Power Delivery , Vol.10 , No.3 , July 1995
7. วิมลวรรณ พรรณเชษฐ์ , “การออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์” , วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร. 2538
8. วรวิทย์ กังสมุทร , “การวิเคราะห์ระบบโครงตาข่ายการต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่เท่ากันของสถานีไฟฟ้าย่อย” , วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 2540
9. National Electrical Safety Code. 1993.
10. สุวัฒน์ วันสุทัศน์ , “การต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อย” , โครงการงานวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร
11. J.G. Sverak , R.U. Benson, W.K. Dick, T.H. Dodds, D.L. Garrat , J.E. Idzkowski, R.P. Kell, S.G. Patel, M.E. Regan, G.E. Smith, R. Verma, and L.G. Zukerman. Safety Substation Grounding-Part II . IEEE Transactions on Power Apparatus and System. Vol PAS-101 , No. 10 October 1982.

12. Peter A. Zotos. "Ground Grid Design in Large Industrial Plants". IEEE Transactions on Industrial Applications. Vol. 24 , No.3 May/June 1988.
13. A.Y. Wu and A.P. Melipoulos. "Analysis of Ground Potential Gradients Around Power Substations". Conference Record of 1990 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. New York : IEEE , 1990.
14. สราวุธ พงษ์เพชร. "การออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย". วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.2532.
15. J.G. Sverak. "Sizing of Ground Conductors Against Fusing". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-100 , No.1 January 1981.
16. B. Thapar and Sunil K. Madan. "Current for Design of Grounding Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-103 , No. 9 September 1984.
17. Y.L. Chow , M.M. Yovanovich , "The Shape Factor of the Capacitance of a Conductor" Journal of Applied Physics , Vol. 53 , No.12 , 1982.
18. M.M.A. Salama , M.M.El Sherbiny , Y.L. Chow , "A Formula for Resistance of Substation Grounding Grid in Two-Layer Soil" . IEEE Transactions on Power Delivery ,Vol. 10 , No.3 , July 1995.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

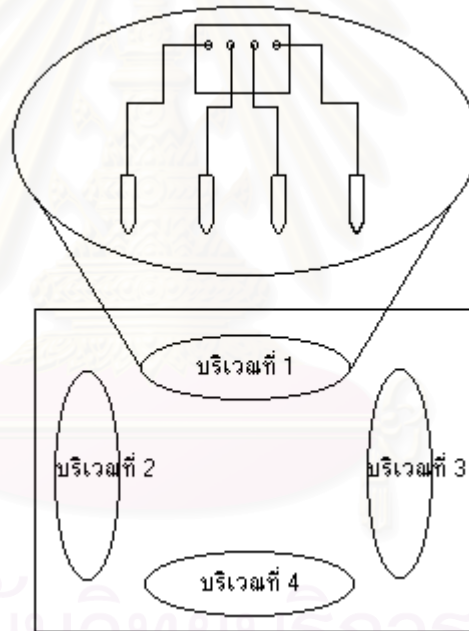
ภาคผนวก ก

การวัดค่าความต้านทานภาคสนามและการออกแบบระบบต่อลงดิน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานดิน มีดังนี้

- แท่งดิน จำนวน 4 แท่ง
- ม้วนสายไฟ จำนวน 4 ม้วน
- โอห์มมิเตอร์
- ดัลบีเมตรวัดระยะทาง

จากการสำรวจพื้นที่เพื่อทำการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 80 x 80 m โดยบริเวณที่ทำการวัดค่าความต้านทานแบ่งเป็น 4 ส่วน



รูปที่ ก1 แสดงบริเวณที่ทำการวัดค่าความต้านทานดินของสนาม

ทำการวัดที่ระยะห่างแท่งดินเท่ากับ 2.5 เมตร โดยปักแท่งดินลึก 0.0625 เมตร

ทำการวัดที่ระยะห่างแท่งดินเท่ากับ 5 เมตร โดยปักแท่งดินลึก 0.125 เมตร

ทำการวัดที่ระยะห่างแท่งดินเท่ากับ 7.5 เมตร โดยปักแท่งดินลึก 0.1875 เมตร

ทำการวัดที่ระยะห่างแท่งดินเท่ากับ 10 เมตร โดยปักแท่งดินลึก 0.250 เมตร

ทำการวัดที่ระยะห่างแท่งดินเท่ากับ 12.5 เมตร โดยปักแท่งดินลึก 0.3125 เมตร



รูปที่ ก2 การวัดค่าความต้านทานดินที่ระยะ 2.5 เมตร



รูปที่ ก3 การวัดค่าความต้านทานดินที่ระยะ 7.5 เมตร

ผลการวัดค่าความต้านทานภาคสนามโดยใช้วิธี “ Wenner Four Pin Method ”

ตาราง ก.1 ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 1

ระยะห่างแท่งดิน (m)	ความลึกแท่งดิน (m)	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ohms)
2.5	0.0625	9.73
5	0.125	7.56
7.5	0.1875	6.86
10	0.25	6.39
12.5	0.3125	5.95

ตาราง ก.2 ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 2

ระยะห่างแท่งดิน (m)	ความลึกแท่งดิน (m)	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ohms)
2.5	0.0625	8.78
5	0.125	7.95
7.5	0.1875	6.37
10	0.25	5.49
12.5	0.3125	6.36

ตาราง ก.3 ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 3

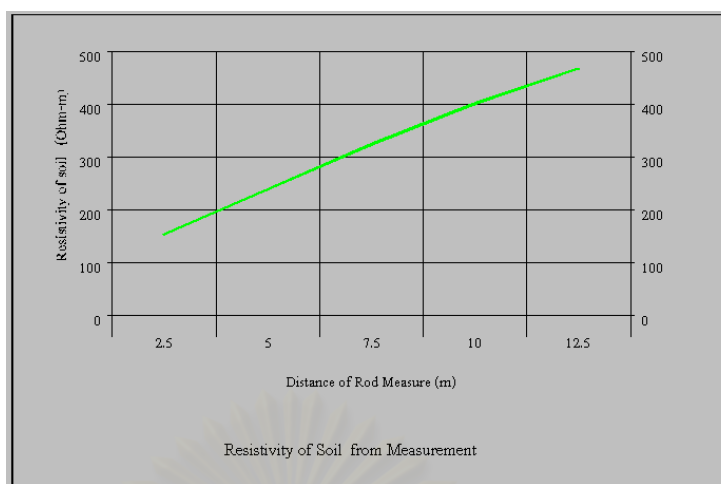
ระยะห่างแท่งดิน (m)	ความลึกแท่งดิน (m)	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ohms)
2.5	0.0625	12.74
5	0.125	9.55
7.5	0.1875	7.32
10	0.25	6.84
12.5	0.3125	6.11

ตาราง ก.4 ผลการวัดค่าความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 4

ระยะห่างแท่งดิน (m)	ความลึกแท่งดิน (m)	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ohms)
2.5	0.0625	9.26
5	0.125	6.24
7.5	0.1875	6.79
10	0.25	5.85
12.5	0.3125	4.96

ทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยกระแสฟีดพร้อมสูงสุดลงดิน 4.8 kA ช่วงเวลาการฟีดพร้อม 0.5 sec โครงต่ายต่อลงดินลึก 0.5 m รัยหินกรวดหนา 0.1 m ความต้านทานจำเพาะหินกรวด 3000 Ohm-m. ความต้านทานร่างกายมนุษย์ 1000 Ohm ใช้ลวดทองแดงเป็นวัสดุในการสร้างระบบต่อลงดิน

พิจารณาผลที่ได้จากการวัดความต้านทานดิน ณ บริเวณที่ 1 เมื่อทำการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะ และออกแบบการต่อลงดินได้ผลดังนี้



รูปที่ ก4 แนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 1

จากรูปที่ ก4 เห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างของแท่งดินเพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดจะมีค่ามากขึ้นด้วยแสดงให้เห็นว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างจะมีค่าสูงกว่าดินชั้นบน

ผลการคำนวณค่าความปลอดภัย $E_{mesh} = 790.53 \text{ V}$, $E_{step} = 1069.94 \text{ V}$ (น้ำหนัก 50 kg)

บริเวณที่ 1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน 120.53 Ohm-m.

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 1261.54 Ohm-m.

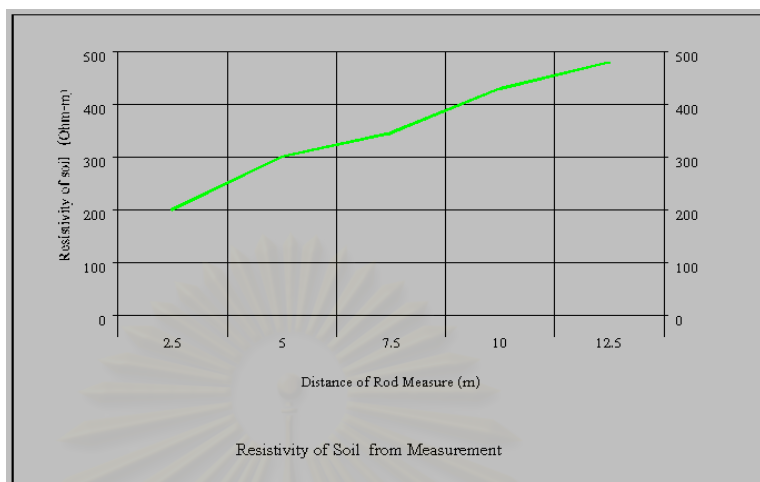
ความหนาของดินชั้นบน 2.9651 m

เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นแบบกรณีดินชั้นบนมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างดังนั้นจะทำการออกแบบการต่อลงดินโดยไม่ทำการติดตั้งแท่งดิน เนื่องจากการติดตั้งแท่งดินจะส่งผลให้ค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้ำวามีค่าสูงขึ้น

ตาราง ก.5 ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะ โครงตาข่าย โดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 1

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	417.36	535.85	637.55	736.06	825.21	892.65	962.79	1038.3
Step (V)	808.51	719.13	668.60	637.12	617.06	602.69	592.88	586.96
R_g (Ohm)	4.724	4.7299	4.7357	4.7431	4.7503	4.7537	4.7587	4.7659
GPR (kV)	18.140	18.163	18.185	18.214	18.241	18.254	18.273	18.301
Conductor (m)	4480	3360	2720	2240	1920	1760	1600	1440
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×

พิจารณาผลที่ได้จากการวัด ณ บริเวณที่ 3 เมื่อทำการคำนวณค่าความต้านทานและออกแบบการต่อลงดิน ได้ผลดังนี้



รูปที่ ก6 แสดงแนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 3

ผลการคำนวณค่าความปลอดภัย $E_{mesh} = 794.14 \text{ V}$, $E_{step} = 1074.83 \text{ V}$

บริเวณที่ 3 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน 163.0305 Ohm-m.

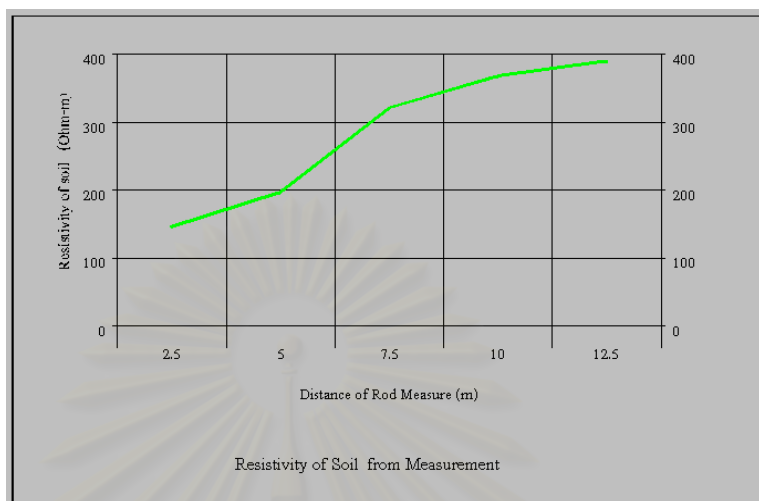
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 744.3605 Ohm-m.

ความหนาของดินชั้นบน 2.74 m

ตาราง ก.7 ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะ โครงตาข่ายโดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 3

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	502.69	645.41	767.91	886.56	993.94	1075.2	1159.65	1250.58
Step (V)	776.20	704.74	665.21	642.75	629.42	618.59	612.69	611.15
R_g (Ohm)	3.3248	3.3327	3.3405	3.3505	3.3603	3.3648	3.3716	3.3813
GPR (kV)	12.767	12.797	12.828	12.866	12.904	12.921	12.947	12.98
Conductor (m)	4480	3360	2720	2240	1920	1760	1600	1440
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	×	×	×	×	×

พิจารณาผลที่ได้จากการวัด ณ บริเวณที่ 4 เมื่อทำการคำนวณค่าความต้านทาน และ
ออกแบบการต่อลงดิน ได้ผลดังนี้



รูปที่ ก7 แสดงแนวโน้มค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดบริเวณที่ 4

ผลการคำนวณค่าความปลอดภัย $E_{mesh} = 787.09 \text{ V}$, $E_{step} = 1065.29 \text{ V}$

บริเวณที่ 4 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน 120.8953 Ohm-m.

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง 1148.2519 Ohm-m.

ความหนาของดินชั้นบน 3.402 m

ตาราง ก.8 ผลออกแบบการต่อลงดินมีเฉพาะ โครงข่ายโดยใช้ผลการวัดบริเวณที่ 4

ระยะห่าง (m)	3	4	5	6	7	8	9	10
Mesh (V)	400.93	514.76	612.46	707.09	792.73	857.52	924.90	997.43
Step (V)	744.09	665.26	620.87	593.70	576.61	564.06	555.83	551.31
R_g (Ohm)	4.2145	4.2204	4.2262	4.2336	4.2409	4.2442	4.2492	4.2565
GPR (kV)	16.184	16.206	16.229	16.257	16.285	16.298	16.317	16.345
Conductor (m)	4480	3360	2720	2240	1920	1760	1600	1440
ผลออกแบบ	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×

จากผลการออกแบบกรณีดินสองชั้น โดยเปรียบเทียบการออกแบบที่จุดวัดทั้ง 4 จุด โดยดิน
ชั้นบนมีค่าความต้านทานจำเพาะมากกว่าดินชั้นล่าง ดังนั้นจึงทำการออกแบบโดยไม่ติดตั้งแท่งดิน
พบว่าทำการออกแบบที่ระยะ 3 m , 4 m และ 5 m จะอยู่ภายใต้ค่าความปลอดภัย

ภาคผนวก ข

หลักการคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินเนื้อเดียว (Homogenous Soil)

สูตรการคำนวณความต้านทานระบบต่อลงดินซึ่งถูกฝังลงในชั้นดินที่มีความต้านทาน ρ สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ [3,5,18]

1. คำนวณความต้านทานของแผ่นโลหะบางซึ่งถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียว
2. ใช้ Moment Method เพื่อคำนวณความต้านทานโครงตาข่ายที่ถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียว
3. คำนวณความต้านทานโครงตาข่ายวางอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางเนื้อเดียว
4. คำนวณความต้านทานโครงตาข่ายถูกฝังลึก h จากพื้นผิวของดินเนื้อเดียว
5. คำนวณความต้านทานแท่งดิน
6. คำนวณความต้านทานของระบบการต่อลงดินโดยรวมโครงตาข่ายและแท่งดินเข้าด้วยกัน

โดยขั้นตอนที่ 1 - 4 เป็นการคำนวณความต้านทานเนื่องจากโครงตาข่ายถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียวและขั้นตอนที่ 5 - 6 เป็นการคำนวณความต้านทานของแท่งดินและรวมความต้านทานทั้งโครงตาข่ายและแท่งดินเข้าด้วยกัน

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าความต้านทานของแผ่นโลหะบางซึ่งถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียว [3]

โดยพิจารณาจาก ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะบางถูกฝังในดินเนื้อเดียว ถูกพัฒนาโดย Chow และ Yovanovich ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C_0 = c_f \epsilon_0 \sqrt{8\pi A}$$

โดย C_0 เป็นค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะบาง (Farads)

A เป็นพื้นที่ของแผ่นโลหะบาง (m^2)

c_f เป็นค่า Shape factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9 สำหรับ Square Plate

ϵ_0 เป็นค่า Permittivity constant (Farads / m)

ρ เป็นค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω/m)

โดยจาก Duality Principle : $R_0 = \frac{\epsilon_0}{C_0} \rho$

เมื่อแทนค่า C_0 โดยการประมาณค่าให้ $\frac{\sqrt{8}}{\pi \times 0.9} = 1$

จะได้ค่าความต้านทานซึ่งถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียวเท่ากับ $R_0 = \rho \left(\frac{1}{8} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \right)$ (ข.1)

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความต้านทานเนื่องจากโครงตาข่ายถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียว[3]

- ใช้ Moment Method แบ่งแผ่นโลหะบาง พื้นที่ A เป็น N_m ส่วนเท่าๆ กัน (ΔA_0) โดยแต่ละพื้นที่ย่อย (ΔA_0) มีความต่างศักย์คงที่ (V_0) โดยสามารถแสดงประจุที่แต่ละพื้นที่ย่อย (ΔA_0) ได้ในรูปเมตริกดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{N1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & P_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ q_n \end{bmatrix} \quad (ข.2)$$

โดย เทอม Self Potential (P_{ii0}) มีค่าเท่ากับ

$$P_{ii0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\sqrt{\Delta A_0}} \quad (0.8814) \quad (ข.3)$$

ส่วนเทอม Mutual Potential (P_{ij}) มีค่าเท่ากับ

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}}, \quad i \neq j \quad (ข.4)$$

r_{ij} = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อย i และ j

โดยประจุ q_i ของสมการ (ข.2) สามารถหาค่าได้โดยแก้สมการหาอินเวอร์สมเมตริกประจุมรวม (Q_0) และค่าความจุไฟฟ้า (C_0) ของแผ่น โลหะบางสามารถหาค่าโดย

$$Q_0 = \sum_{i=1}^N q_i \quad (ข.5)$$

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} \quad (ข.6)$$

โดยสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าในรูปการคูณของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{Q_0^2} (q^T [P_0] q) \quad (ข.7)$$

- ทำการปรับพื้นที่แผ่นโลหะบางทั้งหมดให้เป็น Pseudo-Grid โดยการตัดโลหะพื้นที่ ΔA ออกจากแต่ละพื้นที่ย่อย (ΔA_0)

$$\text{ค่า Self Potential} \quad P_{ii0} = \frac{1}{\pi \epsilon_0 \sqrt{\Delta A}} (0.8814) \quad (\text{ข.8})$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในเทอม Self Potential เป็น

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} - P_{ii0} = \Delta P_0 \quad (\text{ข.9})$$

เนื่องจาก ΔP_0 มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่า i ดังนั้นสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$[P_0] = [P] - [\Delta P_0] \quad (\text{ข.10})$$

โดยค่า $[\Delta P]$ เป็น Diagonal Matrix

$$[\Delta P] = \Delta P_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อแทนค่า สมการ (ข.11) ลงสมการ (ข.7) จะได้

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{Q_0^2} (q^T \{ [P] - [\Delta P] \} q) \quad (\text{ข.12})$$

$$\text{ซึ่งจะได้} \quad \frac{1}{C_0} = \frac{1}{C} - \frac{\Delta P}{N_m} \quad (\text{ข.13})$$

- การปรับ Pseudo-Grid ให้เป็น Wire-Grid

จากพื้นที่ย่อยของ Wire-Grid ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นลวดซึ่งมีความยาว $\Delta \ell$ โดยแต่ละส่วนของเส้นลวด จะมี Self Potential เท่ากับ

$$P_w = \frac{1}{2\pi \epsilon_0 \Delta \ell} \left[\ln \frac{2\Delta \ell}{d_0} \right] \quad (\text{ข.14})$$

โดยค่า d_0 เป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด

แต่พื้นที่ย่อยมีส่วนของลวดตัวนำสองส่วนที่ตั้งฉากกัน โดยค่า Self Potential เท่ากับ

$$P_{ii} = \frac{P_w}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi\epsilon_0\Delta\ell} \left[\ln \frac{2\Delta\ell}{d_0} \right] \quad (\text{ข.15})$$

แทนค่าสมการ ข.9 , ข.15 ลงในสมการ ข.13 จะได้ค่า C ของโครงตาข่ายที่ถูกฝังในตัวกลางเนื้อเดียว จากนั้นใช้ Duality Principle เพื่อหาค่าความต้านทานของโครงตาข่ายจะได้

$$R_m = R_0 + \frac{\rho}{N_m\pi\Delta\ell} \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \frac{2\Delta\ell}{d_0} - 0.8814 \right) \quad (\text{ข.16})$$

ขั้นที่ 3 คำนวณความต้านทานโครงตาข่ายซึ่งถูกวางบนผิวของดินเนื้อเดียว [3]

จากขั้นที่ 2 เมื่อทำการวางโครงตาข่ายบนดินเนื้อเดียวโดยสมมติว่าอากาศมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ จากเงื่อนไขนี้จะทำให้เกิด Image ซ้อนทับกับโครงตาข่ายต้นแบบจะให้ความต้านทาน ($R_{m1/2}$) โดย

$$R_{m1/2} = 2R_m \quad (\text{ข.17})$$

เมื่อแทนค่า R_m จะได้

$$R_{m1/2} = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{N_m\Delta\ell} \left(\frac{1}{\sqrt{2}\pi} \ln \frac{0.165\Delta\ell}{d_0} \right) \right] \quad (\text{ข.18})$$

ขั้นที่ 4 คำนวณความต้านทานโครงตาข่ายซึ่งถูกฝังลึก h จากพื้นผิวของดินเนื้อเดียว [3]

พิจารณาแผ่นโลหะบาง 2 แผ่นขนานกัน ค่า Mutual Potential คือ

$$P_{12} = P_{11} - \frac{1}{2C_p} \quad (\text{ข.19})$$

โดยที่ $C_p = \epsilon_0 \frac{A}{t}$

P_{11} คือ ค่า Self Potential ของแผ่นโลหะบางซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\epsilon_0 0.9\sqrt{8\pi A}}$

A คือ พื้นที่ของ Plate

t คือ ระยะห่างระหว่าง Plate

จากแผ่นโลหะบางขนานกันโดยมีค่าความต่างศักย์ V_0 และมีประจุ Q_0 โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_0 และ Q_0 คือ

$$V_0 = (P_{11} + P_{12})Q_0 \quad (\text{ข.20})$$

ประจุไฟฟ้ารวมของแผ่นโลหะทั้งสองเท่ากับ $2Q_0$ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นโลหะทั้งสองถึงจุดอนันต์เท่ากับ

$$C_t = \frac{2}{(P_{11} + P_{12})} \quad (\text{ข.21})$$

เมื่อแทนค่าสมการ ข.19 ในสมการ ข.21 จะได้

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{2}{\left(P_{11} + P_{11} - \frac{1}{2C_p} \right)} \\ &= \frac{1}{P_{11} \left(1 - \frac{1}{4P_{11}C_p} \right)} \end{aligned} \quad (\text{ข.22})$$

พิจารณาค่าความต้านทานของแผ่นโลหะบางโดยแทนสมการ ข.19-ข.22 ลง Duality Concept จะได้

$$R_t = \frac{\epsilon_0 \rho}{C_t} = \frac{\rho}{4.512\sqrt{A}} \left(1 - \frac{t}{\sqrt{A}} \times 1.128 \right) \quad (\text{ข.23})$$

เนื่องจากชั้นดินระหว่าง Plate ครึ่งชั้นบนเป็นอากาศ ส่งผลให้เกิด Image ที่ Plate ชั้นล่าง เนื่องจาก Air - Soil Interface ทำให้ค่าความต้านทานมีค่าเป็นสองเท่า ดังนั้น

$$R_g = 2R_t = R_{1/2} \left(1 - \frac{t}{\sqrt{A}} \times 1.128 \right) \quad (\text{ข.24})$$

โดยที่ $R_{1/2} = \frac{2\rho}{4.512\sqrt{A}}$

นั่นคือ ความต้านทานของแผ่นโลหะในดินชั้นเดียวสามารถพิจารณาได้จากสมการ ข.24 โดยแผ่นโลหะถูกฝังลึก h ดังนั้นจากสมการ ข.24 จะได้ $t = 2h$ ดังนั้นถ้าแผ่นโลหะบางถูกเปลี่ยนเป็นโครงตาข่ายของการต่อลงดินที่มีความต้านทานต่อลงดินเท่ากับ $R_{m1/2}$ จากสมการ ข.18 จะสามารถหาค่าความต้านทานโครงตาข่ายของระบบต่อลงดินได้เท่ากับ

$$R_{bm1/2} = R_{m1/2} \left(1 - \frac{2h}{\sqrt{A}} \times 1.128 \right) \quad (\text{ข.25})$$

แทนค่า $R_{m1/2}$ จากสมการ ข.18 จะได้ค่าความต้านทานโครงตาข่ายถูกฝังในดินชั้นเดียวลึก h

$$R_{\text{grid}} = R_{bm1/2} = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{N_m \Delta \ell} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \ln \frac{0.165 \Delta \ell}{d_0} \right) \right] \left(1 - \frac{2h}{\sqrt{A}} \times 1.128 \right) \quad (\text{ข.26})$$

จาก APPENDIX A ของ [18] ได้ทำการแก้ไขจาก [3] โดยเปลี่ยนแปลงสมการ ข.14 และ ข.15 เป็นสมการ ข.27 และ ข.28 ตามลำดับ ดังนี้

$$P_w = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \Delta \ell} \left[\ln \frac{2\Delta \ell}{d_0} - 1 \right] \quad (\text{ข.27})$$

$$P_{ii} = \frac{P_w}{2} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \Delta \ell} \frac{1}{2} \left[\ln \frac{2\Delta \ell}{d_0} - 1 \right] \quad (\text{ข.28})$$

จะได้สมการ ข.29 ซึ่งจะใช้สมการนี้ในการคำนวณต่อไป

$$R_{\text{grid}} = R_{bm1/2} = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.165 \Delta \ell}{e \times d_0} \right] \left(1 - \frac{2h}{\sqrt{A}} \times 1.128 \right) \quad (\text{ข.29})$$

โดย $e = 2.71828$

$$\Delta \ell = \sqrt{\Delta \ell_x \Delta \ell_y}$$

$\Delta \ell_x, \Delta \ell_y$ คือ ระยะระหว่างโครงตาข่ายตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ (m)

$$L = 2\Delta \ell (N_m + \sqrt{N_m})$$

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ (m)

A คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

ขั้นที่ 5 คำนวณความต้านทานเนื่องจากแท่งดินถูกฝังในดินเนื้อเดียว ถูกประยุกต์จาก [5]

(ภาคผนวก ค)

$$R_{\text{rod}} = \frac{\rho}{\ell} g_0 \frac{F}{N_r} \quad (\text{ข.30})$$

$$\text{โดย } F = 1 + \left(N_r - \frac{1}{\sqrt{N_r}} \right) \frac{R_s}{R_\ell}$$

$$\frac{R_s}{R_\ell} = \frac{\sqrt{\frac{\ell}{r} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{\ell}{\ell + \frac{r}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}{2\pi g_0}$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{d_0} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2)h}{\ell}} \right]$$

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว ($\Omega \cdot m$)

A คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_x \Delta l_y}$$

$\Delta l_x, \Delta l_y$ คือ ระยะระหว่างโครงตาข่ายตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ (m)

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ (m)

N_r คือ จำนวนแท่งดิน

N_m คือ จำนวนเมฆ

h คือ ความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

ℓ คือ ความยาวของแท่งดิน (m)

r คือ Effective radius of Rodbed Configuration

ขั้นที่ 6. คำนวณความต้านทานรวม (R_T) เนื่องจากโครงตาข่ายและแท่งดินถูกฝังในดินเนื้อเดียว

จาก [5]

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_{\text{grid}}} \right)^3 + \left(\frac{1}{R_{\text{rod}}} \right)^3}} \quad (\text{ข.31})$$

ภาคผนวก ก

หลักการคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น (Twolayer Soil)

ขั้นที่ 1. คำนวณค่าความต้านทานเนื่องจากโครงตาข่ายถูกฝังในดินชั้นบนกรณีดินสองชั้น

จากภาคผนวก ข สมการ ข.29 จะได้ค่า

$$R_{b\ m1/2} = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.165 \Delta \ell}{e * d_0} \right) \right] * \left(1 - \frac{2h}{\sqrt{A}} * 1.128 \right) \quad (\text{ก.1})$$

จากสมการ ก.1 สามารถพิจารณาได้เป็น

$$R_{b\ m1/2} = R_{m1/2} * C_b$$

โดยที่

$$R_{m1/2} = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.165 \Delta \ell}{e * d_0} \right) \right]$$

$$C_b = \left(1 - \frac{2h_b}{\sqrt{A}} * 1.128 \right)$$

ซึ่ง $R_{m1/2}$ เป็นค่าความต้านทานโครงตาข่ายวางบนผิวดินเนื้อเดียว

$R_{b\ m1/2}$ เป็นค่าความต้านทานกรณีฝังในดินเนื้อเดียว

C_b เป็นเทอมที่คิดผลจากการฝังโครงตาข่ายลึกจากผิวดิน h_b (m)

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานเนื่องจากโครงตาข่ายอยู่บนผิวของดินชั้นบนของดินสองชั้น
ได้จากสมการ

$$R_{tm1/2} = R_{m1/2} - R_p \quad (\text{ก.2})$$

โดย $R_{tm1/2}$ เป็นค่าความต้านทานเมื่อโครงตาข่ายวางอยู่บนผิวดินกรณีดินสองชั้น

$R_{m1/2}$ เป็นค่าความต้านทานกรณีวางบนผิวดินเนื้อเดียว

R_p เป็นเทอม Correction เนื่องจากดินชั้นล่าง

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของโครงตาข่ายซึ่งถูกฝังในดินชั้นบนลึก h_b จากผิวดิน

$$R_{\text{grid}} = R_{\text{btm}1/2} = R_{\text{m}1/2} * C_b - R_p \quad (\text{ค.3})$$

โดย $R_{\text{btm}1/2}$ เป็นค่าความต้านทานเมื่อโครงตาข่ายถูกฝังในดินชั้นบน

$R_{\text{m}1/2}$ เป็นค่าความต้านทานกรณีวางบนผิวดินเนื้อเดียว

C_b เป็นเทอมที่คิดผลจากการฝังโครงตาข่ายลึกจากผิวดิน h_b (m)

R_p เป็นเทอม Correction เนื่องจากดินชั้นล่าง โดย $R_p = \frac{\rho_1 \ln(1-K)}{2\pi(h+h_0)}$

K เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของดิน ซึ่งค่า $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

h เป็นความหนาของดินชั้นบน (m)

c_f เป็น Shape Factor กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าเท่ากับ 0.9

$$h_0 = c_f \sqrt{\frac{A}{2\pi}} (\ln(1-K)) \frac{K-1}{2K}$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงสมการ ค.3 ได้ค่าความต้านทานของโครงตาข่ายเท่ากับ

$$R_{\text{grid}} = \rho \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{0.061 \Delta l}{d_0} \right) \right) \left(1 - \frac{2.256 h_b}{\sqrt{A}} \right) - \rho_1 \frac{\ln(1-K)}{2\pi(h+h_0)} \quad (\text{ค.4})$$

โดยค่า $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

$$h < 0.2\sqrt{A}, h_b < h$$

$$h_0 = c_f \sqrt{\frac{A}{2\pi}} (\ln(1-K)) \frac{K-1}{2K}$$

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_x \Delta l_y}$$

$\Delta l_x, \Delta l_y$ คือ ระยะห่างของโครงตาข่ายตามแนวแกน X และ Y ตามลำดับ

ρ_1 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ($\Omega\text{-m}$)

ρ_2 คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\Omega\text{-m}$)

A คือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (m^2)

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำ (m)

h_b คือ ระยะความลึกของโครงตาข่ายจากผิวดิน (m)

h คือ ความหนาของดินชั้นบน (m)

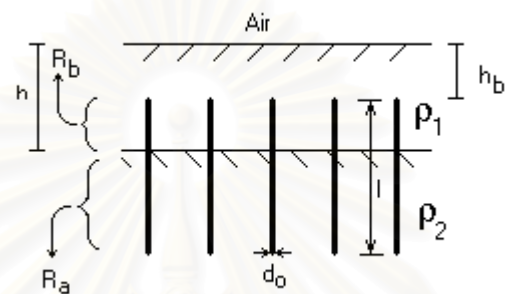
c_f คือ Shape Factor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9 กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$L = 2\Delta\ell(N_m + \sqrt{N_m})$$

N_m คือ จำนวนเมฆของโครงตาข่าย

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าความต้านทานของแท่งดิน [5]

กรณีดินสองชั้นเมื่อค่าความหนาของดินชั้นบนมีค่าไม่มาก (Shallow Upper Layer) โดยแท่งดินถูกฝังถึงดินชั้นล่าง ค่าความต้านทานแท่งดินจำนวน N_r แท่ง มีค่าเท่ากับ (R_{rods})



$$R_{rods} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \tag{ค.5}$$

โดย

$$R_a = \frac{\rho_2}{(\ell + h_b - h)} g_0 \frac{F_0}{N_r} \quad \text{และ} \quad R_b = \frac{\rho_1}{(h - h_b)} g_0 \frac{F_0}{N_r} + \frac{\rho_1}{h} \phi_0$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2\ell}{d_0}\right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2)h_b}{\ell}} \right]$$

$$F = 1 + \left(N_r - \frac{1}{\sqrt{N_r}} \right) \frac{R_s}{R_\ell}$$

โดย F เป็น Factor สำหรับแท่งดินจำนวน N_r แท่ง ในดินเนื้อเดียว เมื่อพิจารณาเป็นดินสองชั้นค่าความยาวประสิทธิผลของแท่งดินจะเปลี่ยนไปเป็นค่า F_0

$$F_0 = F \Big|_{\ell \rightarrow \frac{\ell}{1-0.9K}}$$

$$R_s = \frac{\sqrt{\frac{\ell}{r} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{\ell}{\ell + \frac{r}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}{2\pi g_0}$$

$$\phi = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N_r}{F_0} - 1 \right)^2 \left(\frac{\ell + h_b}{h} \right)^2 + 1}}$$

$$\phi_0 = \phi|_{h=\ell+h_b} = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N_r}{F_0} - 1 \right)^2 + 1}}$$

จากสมการ ค.5 เมื่อพิจารณาเป็นดินเนื้อเดียวจะได้

$$R_{rods} = \frac{\rho}{\ell} g_0 \frac{F}{N_r} \quad (\text{ค.6})$$

โดย N_r คือ จำนวนแท่งดิน

ℓ คือ ความยาวแท่งดิน (m)

r คือ ค่า effective radius of rodbed configuration

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเนื้อเดียว

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินรวม [5]

โดยระบบต่อลงดินประกอบด้วยโครงตาข่ายและแท่งดินซึ่งค่าความต้านทานระบบต่อลงดินรวมมีค่าเท่ากับ

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_{grid}} \right)^3 + \left(\frac{1}{R_{rods}} \right)^3}} \quad (\text{ค.7})$$

ประวัติผู้เขียน

นาย ชาญชัย เลาะห์พงศ์ไพศาล เกิดวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย