การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์

COMPUTER AIDED DESIGN FOR SUBSTATION GROUNDING

T030955

นายบัณฑูร พิทักษ์วงศ์

MR.BUNTOON PHITHAKWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2541

ISBN 974-622-182-5

ลขหมู่..............................
ลขทะเบียน.....30955.....
นั, เดือน, ปี...4 ก.ย. 2541

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPUTER AIDED DESIGN FOR SUBSTATION GROUNDING

BUNTOON PHITHAKWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1998

ISBN 974-622-182-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นายบัณฑูร พิทักษ์วงศ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ศุลี บรรจงจิตร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2541

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบต่อลงดินที่ดีควรจะต้องเป็นระบบที่มีความปลอดภัยสำหรับมนุษย์และอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ซึ่งยังคงทำงานได้ถูกต้องในเวลาปกติและขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจำเป็นต้องพิจารณาความต้านทานจำเพาะของดิน ศักดาไฟฟ้าเมช, ศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว ซึ่งเป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบต่อลงดินที่สำคัญในความปลอดภัยของบุคคลที่ทำงานอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญ เช่น ลักษณะร่องตาข่ายของตะแกรงต่อลงดินที่สมมาตร และไม่สมมาตร กราวด์ร๊อด อีกทั้งการนำแผ่นพลาสติกมาเพิ่มความต้านทานที่เท้าในบางจุดของสถานีไฟฟ้าย่อย พร้อมกับวิธีการรลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตรทำให้สามารถลดวัสดุได้ถึง 30-40 เปอร์เซนต์ ซึ่งไม่การประหยัดและยังมีความปลอดภัยดีขึ้นการออกแบบครั้งนี้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Computer Aided Design for Substation Grounding

Student Mr.Buntoon Phithakwong

Thesis Advisor Assoc.Prof.Sulee Banjongjit

Level of Study Master of in Electrical Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Year 1998

Abstract

The best design of a grounding system is to make safe that the human and the protective device can work accurately in both usual time and ground fault time. The design of a grounding system for a substation will be consider of soil resistivity, mest voltage, touch voltage, and step voltage that are considerably important factor in safety of the person who works in the substation. Thus, this thesis presents the design of the grounding system have some inportant parameter such as equal and unequal spaced grid, ground rod. In a substation use of a plastic sheet below the layer of crushed rock increases the grounding resistance of the foot. Which a new method can decrease the number of conductors of an unequally spaced grid. It also uses 30-40 percents less grounding grid material, safe and economical design. This presents the design a compact easily used software program which is developed to be most practical.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากท่าน รองศาสตราจารย์ ศุลี บรรจงจิตร ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับข้อมูลต่าง ๆ โดยตลอด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ อาจารย์สมนึก ญาติปราโมทย์ อาจารย์วิษณุ กอพยัคฆินทร์ ที่กรุณาได้ให้คำแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศรีอู่ทอง จำกัด ที่ได้กรุณาแนะนำข้อมูลในการออกแบบ รวมทั้งคุณเมธัส นันก้อน ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับโปรแกรม ตลอดจนคุณ อำพรรณ พิทักษ์วงศ์ ที่ให้กำลังใจต่อผู้เขียนอย่างใกล้ชิดตลอดเวลา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บัณฑูร พิทักษ์วงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..........I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..........II

กิตติกรรมประกาศ..........III

สารบัญ..........IV

สารบัญตาราง..........VI

สารบัญภาพ..........VII

บทที่

1 บทนำ..........1

2 ทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบต่อลงดิน..........4

2.1 หลักการพิจารณาและการออกแบบระบบต่อลงดิน..........4

2.2 นิยามเกี่ยวกับศักดาไฟฟ้า..........4

2.3 ขีดจำกัดเกี่ยวกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์..........7

2.4 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์..........8

2.5 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ..........9

3 การโรยหินกรวดบนพื้นผิวดิน..........13

3.1 เกณฑ์ความปลอดภัยของแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว..........18

3.2 การพิจารณาไฟฟ้าเมชและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว..........19

3.3 การประมาณค่าความยาวของตัวนำที่ใช้อย่างน้อยที่สุด..........21

3.4 การหาความต้านทานของระบบต่อลงดิน..........22

3.5 การหาความต้านทานจำเพาะของดิน..........23

3.6 การหาขนาดของตัวนำกริด..........33

3.7 การหากระแสกริดสูงสุด..........37

3.8 การใช้แผ่นพลาสติก ใส่เพิ่มในชั้นของดิน..........40

3.9 แนวทางใหม่ของการลดจำนวนตัวนำกริด..........42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

4 การคำนวณและการออกแบบ..49
4.1 สรุปขั้นตอนและการออกแบบระบบต่อลงดิน....................................50
4.2 ตัวอย่างการคำนวณ..55
4.3 ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบการต่อลงดิน..............................60
5 ผลของการออกแบบระบบต่อลงดิน..68
5.1 ตัวอย่างการคำนวณโดยคิดผลของการโรยหินกรวดแต่ไม่ใส่แผ่นพลาสติก..............69
5.2 ตัวอย่างการคำนวณ เมื่อใส่แผ่นพลาสติก....................................73
5.3 ส่วนของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน....................................81
5.4 ผลลัพธ์ของการออกแบบที่แสดงหน้าจอ....................................85
5.5 ตัวอย่างการคำนวณและออกแบบระบบการต่อลงดิน grounding grid
ขนาด 220 V..104
5.6 ตัวอย่างการคำนวณและออกแบบระบบการต่อลงดินเมื่อใส่แผ่นพลาสติก............109
5.7 แนวทางใหม่การลดจำนวนตัวนำตะแกรงกริด....................................112
5.8 รูปแบบทั่วไปของโปรแกรมและผลลัพธ์ของการออกแบบที่แสดงหน้าจอ............116
6 สรุปผลของการวิจัยและข้อเสนอแนะ..135

บรรณานุกรม..136
ภาคผนวก..138
ประวัติผู้เขียน..151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1. แสดงค่าเฉลี่ยของความต้านทานจำเพาะของดิน..........23
2. แสดงค่าคงที่ของวัสดุ..........36
3. แสดงค่า Decrement Factor..........38
4. แสดงถึงรัศมีสมมูลย์ของตัวนำรูปทรงกระบอก..........41
5. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง b กับ k..........46
6. ตารางทดสอบหาค่าความต้านทานของดิน..........61
7. ตารางทดสอบหาค่าความต้านทานของดิน..........80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1. ระบบการต่อลงดินและศักดาไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน....................................5
2. สภาวะการเกิดช็อตเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน..6
3. แสดงการเกิด External Transferred Potential..7
4. แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ...10
5. กราฟแสดง Function F(X) Versus X and Reflection Factor K.........................14
6. กราฟแสดง Reduction Fator C_s 15
7. แสดงชั้นหินกรวดบนสถานีไฟฟ้าย่อย..16
8. กราฟแสดงการแปรเปลี่ยนของค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อมีความชื้น.........24
9. กราฟแสดงการแปรเปลี่ยนของค่าความต้านทานจำเพาะของดินกับอุณหภูมิ เมื่อมีความชื้นในดิน 18.6%...25
10. กราฟแสดงค่าความต้านทานแผ่กระจายของดินเมื่อใช้แท่งกราวด์แบบแท่ง..............27
11. กราฟแสดงค่าความต้านทานแผ่กระจายของแท่งกราวด์แบบเส้น..............................28
12. ลักษณะของการฝังแท่งกราวด์ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Wenner...30
13. การวัดความต้านทานดิน แบบ 4 จุด...30
14. การต่อกราวด์ร็อคร่วมกับกราวด์กริด...32
15. (ก) แสดงแผ่นโลหะที่ใช้แทนเท้าบนผิวของพื้นเรียบ...41
(ข) แสดงอิเล็กโทรดรูปทรงกระบอกวางไว้จุดกึ่งกลางของพลาสติก...............................41
16. แสดงพื้นที่ตะแกรงกริดที่มีระยะสมมาตรและไม่สมมาตร..42
17. แสดงถึงการแผ่กระจายของกระแสที่ตัวนำ...43
18. แสดงให้เห็นถึงการเกิดความต่างศักย์...43
19. แสดงให้เห็นถึงการเกิดความต่างศักดิ์...43
20. แสดงระยะของกราวด์กริดที่ไม่สามารถ...44
21. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sik และ I กับ k...45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

22. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง b กับ k..45
23. แผนภูมิขั้นตอนการออกแบบวิธีการเดิมกับแนวทางใหม่.................................54
24. ลักษณะการฝังกราวด์กริดและกราวด์ร็อด..68
25. ลักษณะการฝังแผ่นพลาสติก, กราวด์กริดและกราวด์ร็อด.................................73
26. แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม..85
27. แสดงหน้าต่างค่าคงที่ต่าง ๆ ในกรณีคิดผลของโรยหินกรวด................................86
28. แสดงหน้าต่างค่าคงที่ต่าง ๆ ในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก....................................86
29. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย....................................87
30. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของดิน.................................89
31. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานของระบบกราวด์...............................90
32. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาขนาดของตัวนำกริด...91
33. แสดงหน้าต่างการคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์..............................92
34. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาค่าความต้านทานรวมในกรณีคิดผลของการโรย
หินกรวด...93
35. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาค่าความต้านทานรวมในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก............94
36. แสดงหน้าแรงดันไฟฟ้าในกรณีคิดผลของการโรยหินกรวด................................95
37. แสดงหน้าต่างแรงดันไฟฟ้าในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก.....................................96
38. แสดงหน้าต่างกระแสกริดสูงสุด..97
39. แสดงหน้าต่างการหาค่าแฟกเตอร์..98
40. แสดงหน้าต่างการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมช และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว......................99
41. แสดงหน้าต่างการตรวจสอบค่าสุดท้ายว่าปลอดภัย (ในกรณีคิดผลของการ
โรยหินกรวด)...100
42. แสดงหน้าต่างการตรวจสอบค่าสุดท้ายว่าปลอดภัย (ในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก).......101
43. แสดงหน้าต่างการตรวจสอบค่าสุดท้ายว่าไม่ปลอดภัย...................................101
44. แสดงหน้าต่างให้ใส่ค่าที่ต้องการเปลี่ยนแปลง (ในกรณีที่ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ปลอดภัย....102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

45. แสดงหน้าต่างการออกแบบจากโปรแกรม..103
46. แสดงผลการออกแบบตะแกรงกริด..115
47. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาพื้นที่ และขนาดของตัวนำ..................................117
48. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาศักดาไฟฟ้า ในกรณีไม่ใส่แผ่นพลาสติก..................118
49. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริด.....................................119
50. แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Grid Potential Rise..120
51. แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Mesh & Step..121
52. แสดงหน้าต่างการเช็คค่าความปลอดภัยหรือไม่ปลอดภัย....................................122
53. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาศักดาไฟฟ้า ในกรณีใส่แผ่นพลาสติก.......................123
54. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทางกราวด์กริด.......................................124
55. แสดงหน้าต่างการคำนวนหา Grid Potential Rise...125
56. แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Mesh & Step..126
57. แสดงหน้าต่างการเช็คค่าความปลอดภัยหรือไม่ปลอดภัย....................................127
58. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าในกรณีใส่แผ่นพลาสติก..........................128
59. แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริด.......................................129
60. แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Grid Potential Rise...130
61. แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Mesh & Step..131
62. แสดงหน้าต่างการเช็คค่าความปลอดภัยหรือไม่ปลอดภัย....................................132
63. แสดงหน้าต่างการหาระยะระหว่างตัวนำกริด...133
64. แสดงหน้าต่างการหาระยะระหว่างตัวนำกริด...133
65. แสดงหน้าต่างการหาระยะระหว่างตัวนำกริด...134
66. แสดงหน้าต่างความสัมพันธ์ระหว่างค่า b และ k..134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยมีไว้เพื่อให้กระแสลัดวงจรลงดิน (Ground fault) ที่เกิดขึ้นไหลลงดินได้สะดวก ในขณะเกิดการลัดวงจรจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในและบริเวณรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อย ถ้าผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านร่างกายของมนุษย์(ซึ่งอาจจะเป็นระหว่างเท้าทั้งสองข้างหรือระหว่างมือกับเท้า)ที่อยู่ในบริเวณนั้นสูงกว่าค่ากระแสที่มนุษย์ยอมรับได้ ผลอันนี้อาจทำให้เกิดอาการช็อค หรือเสียชีวิตได้ นอกจากนี้ผลของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ทำงานผิดพลาดได้

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ถูกพัฒนามาตามลำดับ โดยใช้มาตรฐาน IEEE-80(1986) และต่อมาได้มีการค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติม จึงมีการปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวออกมาเป็น ANSI/IEEE Std.80-1986 [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกันโดยทั่วไปการออกแบบระบบต่อลงดินที่มีความต้านทานต่ำมากๆ อาจไม่ได้หมายถึงว่าจะมีความปลอดภัยสูงกว่าระบบการต่อลงดินที่มีความต้านทานสูงกว่าเสมอไป ควรจะเน้นเกี่ยวกับการออกแบบที่มีความปลอดภัยและประหยัดวัสดุอุปกรณ์

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยมีตัวแปรที่สำคัญเกี่ยวข้องกับการออกแบบหลายประการคือขนาดของตัวนำ, ความลึกของตะแกรง, ขนาดของตะแกรง, จำนวนร่องตาข่าย, ความหนาของชั้นหินกรวด รวมไปถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัส และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เป็นเกณฑ์ในความปลอดภัยของบุคคลที่ทำงานแต่บางครั้งก็ไม่ได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการ ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเอาแผ่นพลาสติกฝังใต้ชั้นหินกรวด เพื่อเพิ่มความต้านทานที่เท้าในบางจุดของสถานีไฟฟ้าย่อยให้มีความปลอดภัยมากขึ้นโดยการลดความหนาของชั้นหินกรวดเป็นการประหยัดวัสดุและค่าใช้จ่าย

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษาที่ใช้แผ่นพลาสติกใส่เพิ่มเข้าไปนั้น จุดประสงค์ก็เพื่อต้องการที่จะทราบว่าเกิดค่าความต้านทานที่เท้าของบุคคลมากน้อยเพียงใด อีกทั้งจะทำให้เกิดความปลอดภัยได้หรือไม่ ซึ่งวัตถุประสงค์ทั้งหมดนี้อาจจะมีการพัฒนาการออกแบบระบบต่อลงดินในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาโดยใช้แผ่นพลาสติก ฝังใต้ชั้นหินกรวดนั้นยังมีค่าตัวแปรที่ต้องนำมาพิจารณาอีก เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด, ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, ความหนาของชั้นหินกรวด ในการศึกษาครั้งนี้ ตามมาตรฐานของชั้นหินกรวดคือ 0.8 - 0.15 เมตร แต่เมื่อใส่แผ่นพลาสติก ซึ่งจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 0.15 ม.ม และมีความสูงจากแผ่นพลาสติกถึงหินกรวดประมาณ 0.2 เมตร โดยอ้างถึงบทความวิจัยของ Thapar และ Ziad โดยใช้แผ่นพลาสติกที่ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน, เพอร์มาลอน, พีวีซี หรือนีโอพรีน ฝังใต้ชั้นหินกรวด การใช้แผ่นพลาสติกสามารถช่วยลดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสได้

ขอบเขตของการศึกษา

ในการออกแบบระบบต่อลงดินจะเป็นการพิจารณาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยรูปร่างสี่เหลี่ยมจตุรัส และรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีแท่งตัวนำประกอบด้วย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาใส่แผ่นพลาสติกเฉพาะสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยจะนำเอาแผ่นพลาสติกใส่ไว้ในร่องตะแกรงกริด อีกทั้งการเสนอแนวทางใหม่เพื่อลดจำนวนตัวนำกริด

ขั้นตอนของการศึกษา

ควรจะต้องรู้ข้อมูลเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าย่อยที่จะนำมาพิจารณา เช่น พื้นที่ของสถานี ความต้านทานจำเพาะของดิน (โดยการสุ่มวัดหาความต้านทานของดิน) โดยจะมีขั้นตอนในการพิจารณาอยู่ 12 ขั้นตอน ซึ่งบางครั้งค่าต่าง ๆ ที่ได้มานั้นต้องผ่านการคำนวณมาก่อนถึงจะนำมาเขียนโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินได้

ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการออกแบบระบบต่อลงดินของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการใช้แผ่นพลาสติกฝังใต้ชั้นของหินกรวด เพื่อเพิ่มความต้านทานที่เท้าของบุคคลที่ทำงานอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยบางจุดเท่านั้น และเป็นการลดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสมีความปลอดภัยมากขึ้น อีกทั้งเป็นการประหยัดวัสดุ

ความจำกัดของการศึกษา

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้นมีข้อจำกัดในการศึกษา คือไม่สามารถที่จะไปวัดหาค่าความต้านทานของดิน ในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยจริง ๆ ได้ แต่มีข้อมูลบางอย่างที่ได้นำมาจากการออกแบบในพื้นที่จริงของสถานีไฟฟ้าย่อยปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีที่ใช้ศึกษาค้นคว้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิจัยเอกสาร หรือบทความที่มีอยู่แล้ว รวมทั้งเก็บข้อมูลจากหน่วยงานต่าง ๆ เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บริษัทศรีอู่ทอง จำกัด รวมไปถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบไปแล้ว แต่ข้อมูลหลักที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบระบบต่อลงดินนั้นได้มาจาก ANSI/IEEE Standard 80, 1986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการออกแบบระบบต่อลงดิน

วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบต่อลงดิน

1. เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าไหลลงดินได้สะดวก ทั้งในภาวะที่เกิดกระแสสูงผิดปกติเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า หรือกระแสลัดวงจรไหลลงดินในระบบเองให้ไหลลงดินได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่กระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน และเครื่องมือต่าง ๆ

2. เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยสามารถรับรู้ถึงกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย

3. เพื่อให้แน่ใจว่ามีความปลอดภัยต่อคนที่อยู่ใกล้เคียงกับระบบต่อลงดิน จะไม่ได้รับอันตรายหรือช็อค

2.1 หลักการพิจารณาการออกแบบระบบต่อลงดิน พอสรุปได้ดังนี้

2.1.1 ศึกษาแบบแปลนของสถานีไฟฟ้าแอะตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ

2.1.2 สำรวจค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.

2.1.3 หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินสูงสุด และเวลาที่กระแสลัดวงจรไหลในระบบ

2.1.4 หาขนาดของตัวนำกริดจากกระแสลัดวงจร

2.1.5 หาศักดาไฟฟ้าสัมผัส และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เกิดอันตราย

2.1.6 กำหนดกระแสกริดสูงสุด

2.1.7 วางแนวการฝังตัวนำกริดให้ครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งหมด

2.1.8 คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์

2.1.9 คำนวณหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้น

2.2 นิยามศักดาไฟฟ้าที่พบบ่อยในการออกแบบระบบต่อลงดิน

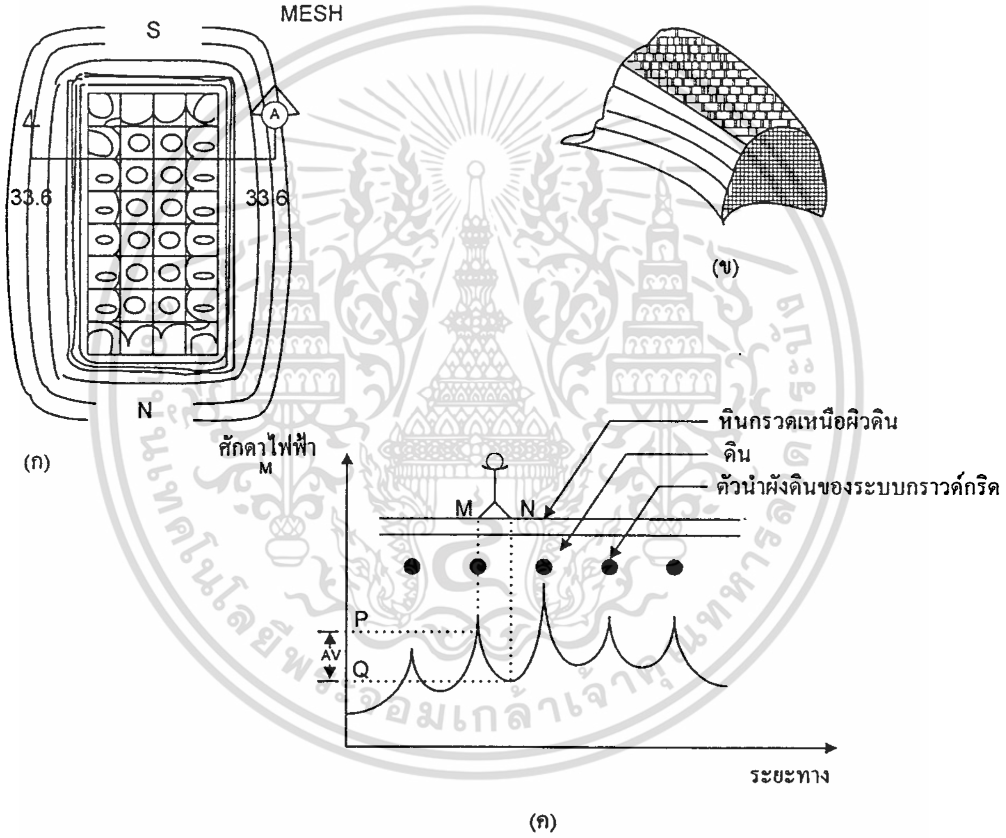
ขณะเกิดการลัดวงจรจะทำให้เกิดความต่างศักดิ์ขึ้นที่ผิวดินบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย โดยศักดาไฟฟ้าต่าง ๆ นิยามได้ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน (Grid Potential Rise ; GPR) คือแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ระบบต่อลงดิน (เมื่อเทียบกับศักดาไฟฟ้าของดินที่อยู่ไกล

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสถานีไฟฟ้าย่อย) ศักดาไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับผลคูณกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดที่ไหลผ่านตะแกรงต่อลงดิน (I_g) กับความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (R_g)

ศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage ; E_s) คือแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่ผิวดินระหว่างจุด 2 จุด ที่มีระยะห่างกันหนึ่งเมตรหรือประมาณหนึ่งช่วงก้าวของมนุษย์ โดยไม่มีส่วนอื่นของร่างกายสัมผัสกับอุปกรณ์หรือดิน



รูปที่ 1 แสดงระบบการต่อลงดินและศักดาไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน

ก) ระบบกราวด์กริดและเส้นสมศักย์ทั้งภาพในและรอบ ๆ

ข) แนวเส้นสมศักย์ 3 มิติ (equipotential contour)

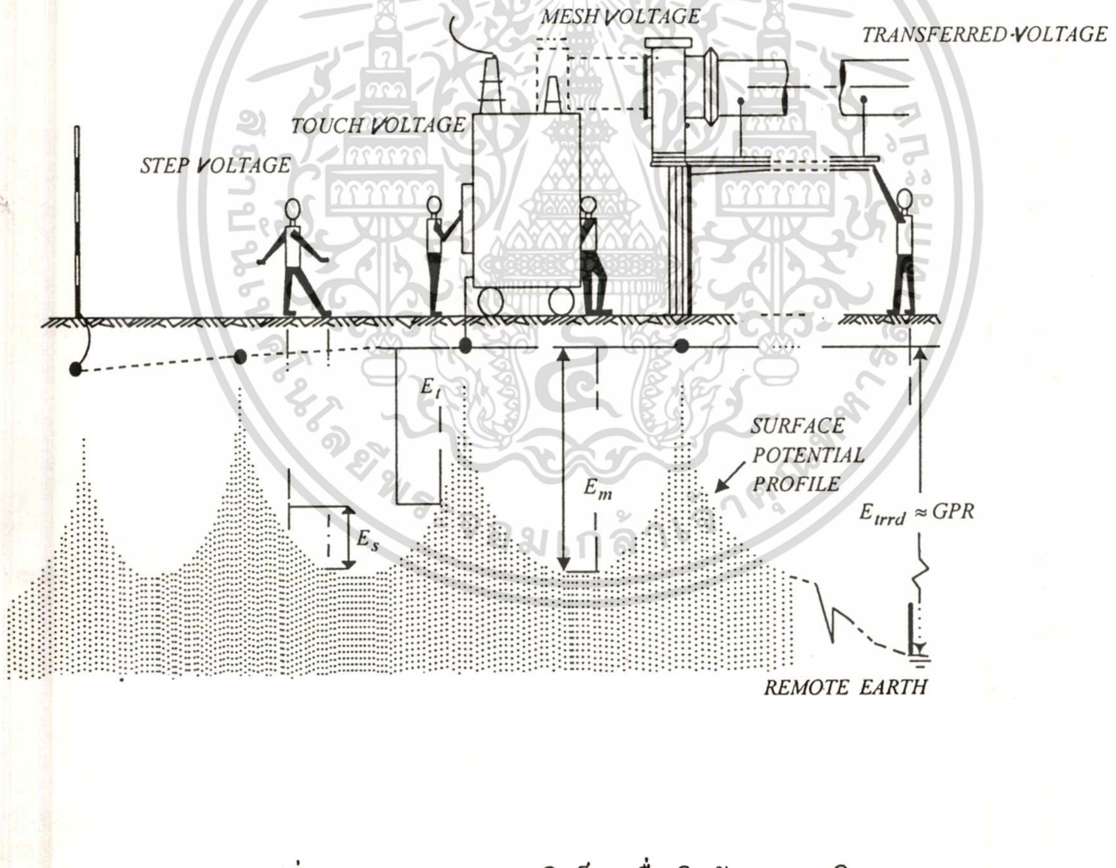
ค) ศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ตามแนวตัดขวาง A ในรูปที่ ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage ; E_t) คือแรงดันไฟเข้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างระบบต่อลงดินกับจุดที่มนุษย์ยืนอยู่และมือไปสัมผัสกับโครงสร้าง หรือเปลือกของอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

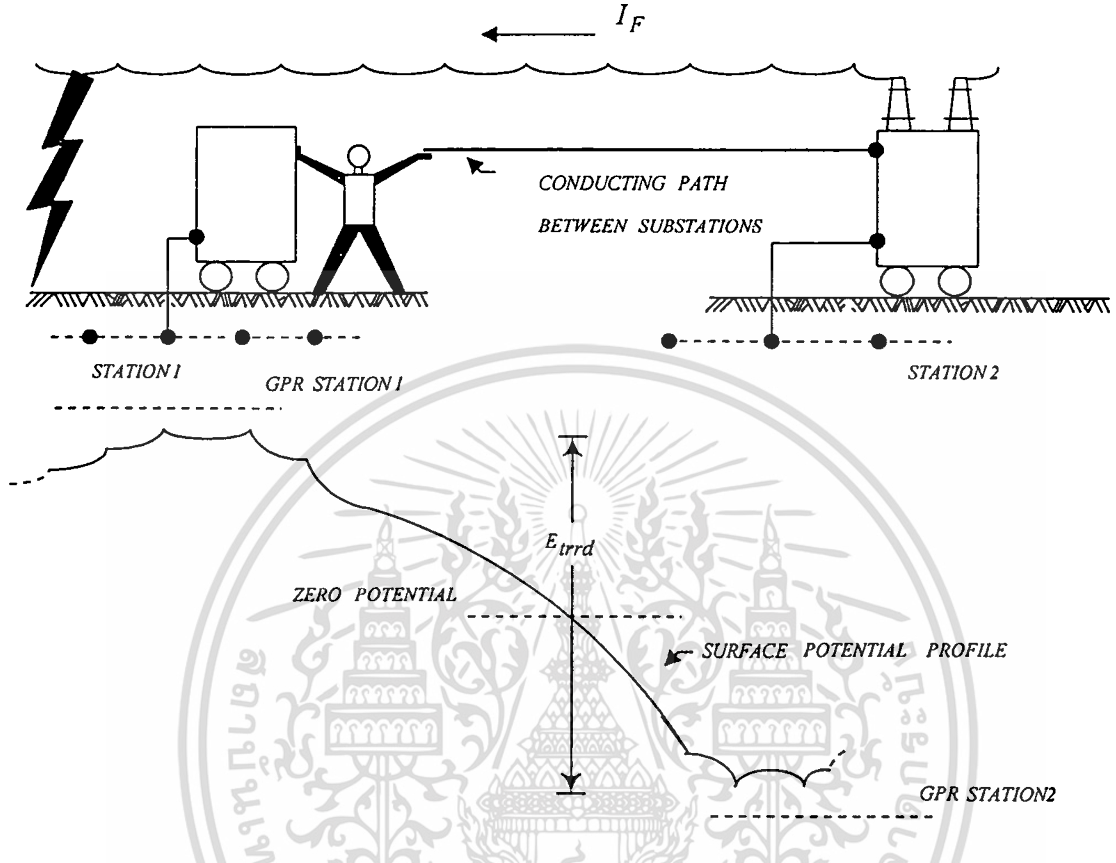
ศักดาไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage ; E_m) คือแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เป็นไปได้ภายในร่องตาข่ายของตะแกรงต่อลงดิน

ศักดาไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transferred Voltage ; E_{trrd}) คือแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้ามาหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นกรณีย่อยกรณีหนึ่งของศักดาไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 2 แสดงสภาวะการเกิดช็อคเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Typical Situation of External Transferrd Potential

รูปที่ 3 แสดงการเกิด Enternal Transferred Potential

2.3 ขีดจำกัดของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์

ขนาดของกระแสที่มีผล หรือเป็นอันตรายต่อร่างกายในระดับต่างๆที่ความถี่ 50-60 Hz ดังนี้

1 *mA* จุดเริ่มต้นรู้สึกว่ามีกระแสไหลผ่าน ค่านี้อาจเพิ่มขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพร่างกาย เพศ และน้ำหนัก

1-6 *mA* ยังสามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้ยังไม่ทำให้เกิดอันตราย

9-25 *mA* รู้สึกเจ็บปวดเกิดอาการเกร็งจนไม่อาจสลัดมือจากตัวนำได้

100-300 *mA* หัวใจทำงานล้มเหลวกล้ามเนื้อหัวใจไม่สามารถสูบฉีดโลหิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์จำเป็นต้องพิจารณาถึงช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายด้วย ขนาดของกระแสที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายถึงขั้นหัวใจทำงานผิดปกติในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ คือประมาณ 0.03-3 วินาที โดยมีความน่าจะเป็น (probability) 95% ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ร่างกายได้รับเข้าไป ดังสมการ

$$I_B^2 \cdot t_s = S_b \qquad (2.1)$$

เมื่อ I_B = กระแสที่ไหลผ่านร่างกาย *(A)*

t_s = ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่าน *(sec)*

s_b = พลังงานที่สะสมในร่างกายมนุษย์เมื่อได้รับกระแส *(W_s)*

จากสมการที่ (2.1)สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกระแสได้ดังนี้

$$I_B = \sqrt{\frac{S_b}{t_s}} \qquad (2.2)$$

ร่างกายมนุษย์โดยเฉลี่ยทั่ว ๆ ไปที่มีน้ำหนักประมาณ 50 ก.ก.จะมีความน่าจะเป็น 99.5% ที่จะปลอดภัยเมื่อได้รับพลังงานสะสม 0.0135 W_s ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) จะเขียนใหม่ได้

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 50 ก.ก.} \qquad (2.3)$$

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักประมาณ 70 ก.ก. ซึ่งได้จากการทดลองกับสัตว์ที่ขนาดหัวใจใกล้เคียงมนุษย์ในช่วงเวลาไม่เกิน 3 นาที โดยมีค่าพลังงานสะสม 0.0246 W_s จะได้สมการ

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 70 ก.ก.} \qquad (2.4)$$

2.4 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Resistance of the Human Body)

ในสภาวะปกติร่างกายมนุษย์จะมีค่าความต้านทานประมาณ 500-3000 โอห์ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นว่ามีค่ามากน้อยเพียงไร ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป ความต้านทานร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

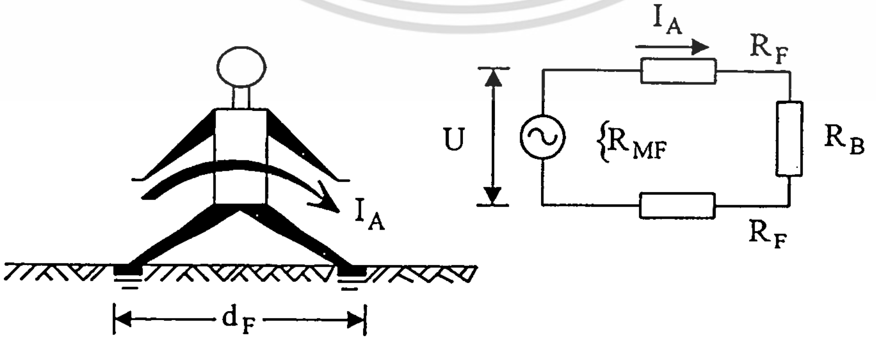
มนุษย์ที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินหรือในการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นกระแสสลับหรือกระแสตรงที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์จะให้ผลเป็น Non-inductive Resistance ซึ่งการวัดความต้านทานระหว่างอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์จะได้ค่าที่ไม่ค่อยจะแน่นอนขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ IEEE Std. 80-1986 ได้กำหนดค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ จากมือถึงเท้าทั้งคู่และจากมือถึงมือ หรือจากเท้าถึงเท้าอีกข้างหนึ่งเท่ากับ 1000 โอห์ม

$$R_B = 1000 \text{ โอห์ม} \qquad \text{.....................(2.5)}$$

อันตรายที่จะเกิดต่อมนุษย์เมื่อมีกระแสลัดวงจรไหลลงระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะไม่ว่าจะเกิดเนื่องจากศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าว ศักดาไฟฟ้าสัมผัส ศักดาไฟฟ้าเมช หรือศักดาไฟฟ้าทรานเฟอร์ คือการไหลของกระแสผ่านร่างกายจากเท้า-เท้าลงดิน และการไหลของกระแสผ่านจากมือ - เท้าลงดิน องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาเพื่อให้ขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีขีดจำกัดจนไม่เป็นอันตรายถึงชีวิตก็คือ ความต้านทานของร่างกายและความต้านทานของพื้นดินที่เท้ายืนอยู่ ผลของการโรยหินกรวดบนพื้นสถานีไฟฟ้าย่อย และความลึกของการฝังระบบต่อลงดินที่มีต่อความต้านทานของเท้ากับดิน

2.5 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

สภาวะการเกิดอุบัติเหตุหรือการช็อคภายในหรือบริเวณรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อย สามารถเขียนเป็นวงจรจำลองได้ 2 อย่าง คือวงจรแสดงกระแสไหลระหว่างเท้าถึงเท้า และวงจรแสดงกระแสไหลระหว่างมือถึงเท้า แสดงดังรูปที่ 4ก และ 4ข



รูปที่ 4ก. แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างเท้าถึงเท้าเนื่องจากศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_F = 1 เมตร

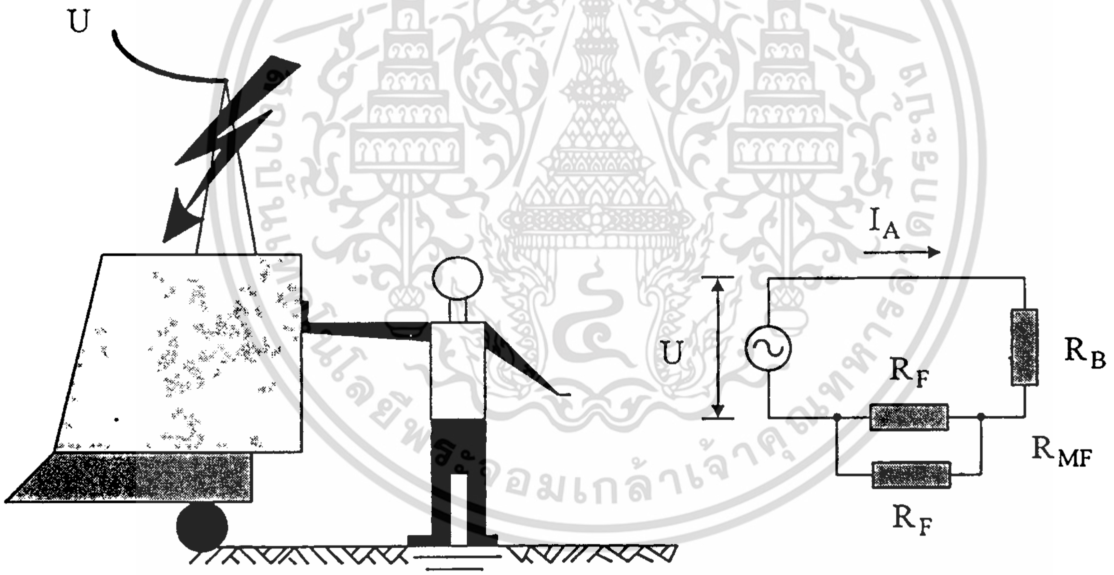
$R_T = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$

$I_A = \frac{U}{R_T}$

R_B = 1000 โอห์ม

เมื่อ I_A = The current of accidental circuit

R_T = The total resistance of accidental circuit



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

รูปที่ 4ข. แสดงภาพจำลองกระแสไหลระหว่างมือถึงเท้าเนื่องจากศักดาไฟฟ้าสัมผัส

รูปที่ 4 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานรวมของร่างกาย ของวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุสามารถเขียนได้ดังสมการ

ความต้านทานรวมเนื่องจากกระแสไหลระหว่าง เท้า-เท้า

$$R_{TS} \quad = \quad R_B + 2(R_F - R_{MF}) \text{ โอห์ม} \qquad \text{....................(2.6)}$$

ความต้านทานรวมเนื่องจากกระแสไหลระหว่างมือ-เท้า

$$R_{TP} \quad = \quad R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF}) \text{ โอห์ม} \qquad \text{....................(2.7)}$$

เมื่อ R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์

R_F = ความต้านทานที่ไหลผ่านเท้าแต่ละข้างกับดินหรือผิวหน้าดิน

R_{MF} = ความต้านทานร่วม (Mutual) ระหว่างเท้าทั้งสองข้าง (ปกติมีค่าน้อยมากจึงไม่พิจารณาผลอันนี้)

R_T จะขึ้นอยู่กับ R_B และ R_F (footing resistance) โดยทั่วไปเท้าของมนุษย์จะมีลักษณะคล้ายกับแผ่นจานโลหะตัวนำ(Conducting metallic Disk) และจะมีความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างเท้าทั้งสอง (Mutual Resistance) ดังสมการ

$$R_F \quad = \quad \frac{\rho}{4b} \qquad \text{....................(2.8)}$$

$$R_{MF} \quad = \quad \frac{\rho}{2\pi d_F} \qquad \text{....................(2.9)}$$

เมื่อ ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

R_F = ค่าความต้านทานที่เท้าแต่ละข้างกับดิน

R_{MF} = ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างเท้าทั้งสอง

b = รัศมีสมมูลย์ของเท้า (เมตร)

d_F = ระยะห่างระหว่างเท้า (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานของเท้าทั้งสองข้างเมื่อเป็นแบบอนุกรมและขนานคือ

$$R_{2FS} = 2(R_F - R_{MF}) \qquad \text{.....................(2.10)}$$

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_F + R_{MF}) \qquad \text{.....................(2.11)}$$

เมื่อ R_{2FS} = ความต้านทานใต้เท้าทั้งสองเมื่อเป็นแบบอนุกรม

R_{2FP} = ความต้านทานใต้เท้าทั้งสองเมื่อเป็นแบบขนาน

จากสมการที่(2.10) และ(2.11) ซึ่งอาจจะคิดโดยประมาณว่ารัศมีมีทางแผ่นโลหะกลมที่สมมุติแทนเท้าของคนเราแต่ละข้างมีค่าเท่ากับ 0.083 เมตร และไม่คิดค่าความต้านทานร่วม (Mutual resistance) เนื่องจากมีค่าน้อยดังนั้นค่าความต้านทานของพื้นดินใต้เท้าทั้งสองข้างในแบบอนุกรมและแบบขนานสามารถเขียนในรูปของสภาพความต้านทานจำเพาะ ρ ได้ ดังสมการ

$$R_{2FS} = 6\,\rho \qquad \text{.....................(2.12)}$$

$$R_{2FP} = 1.5\,\rho \qquad \text{.....................(2.13)}$$

ดังนั้นจึงทำให้ค่าของ R_{TS} และ R_{TP} ได้ดังสมการ

$$R_{TS} = R_B + 2R_F = R_B + 6\,\rho \qquad \text{...................(2.14)}$$

$$R_{TP} = R_B + \frac{1}{2}R_F = R_B + 1.5\,\rho \qquad \text{...................(2.15)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การโรยหินกรวดบนพื้นผิวดิน

ผลของพื้นผิวที่ชั้นบนเป็นหิน (Effect of a Thin Surface Layer of Crush Rock)

เนื่องจากความต้านของร่างกายมนุษย์ต่ำเกินไป (R_B = 1000 โอห์ม) ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายได้มาก การลดกระแสนี้ทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานระหว่างเท้าของผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยกับพื้นดินให้สูงขึ้น ในทางปฏิบัติจะโรยหินกรวดหนาประมาณ 0.08-0.15 เมตร บนพื้นผิวดินเพื่อลดการระเหยความชื้นภายในดิน และนอกจากนี้จะทำให้ลดจำนวนตัวนำในระบบต่อลงดินให้น้อยลงได้ ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดคิดเฉลี่ยประมาณ 3000 โอห์ม-เมตร

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) เราพิจารณาดินที่มีความต้านทานจำเพาะเป็นแบบ uniform แต่โดยทั่วไปพื้นของสถานีไฟฟ้าย่อยมักจะเป็น 2 ชั้น (Two Layer) คือ ชั้นล่างจะเป็นดิน ชั้นบนจะเป็นหินกรวด ซึ่งจะมีค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน เพราะฉนั้นการหาค่า R_F และ R_{MF} จึงแตกต่างกัน HEPPE R,J. ได้วิเคราะห์ไว้ว่าในกรณีที่มีผลจากการโรยหินกรวดจะได้ดังสมการ

$$R_F = \frac{\rho_s}{4b} F(X_1) \qquad \text{.....................(3.1)}$$

$$R_{MF} = \frac{\rho_s}{2\pi d_F} F(X_2) \qquad \text{.....................(3.2)}$$

ซึ่งค่า $F(X)$ จะเป็น function ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของเท้า และสัมพันธ์กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และหินกรวดที่โรยชั้นบนด้วย

$$F(X) = 1 + 2\sum_{n=1}^{\alpha} Q \qquad \text{.....................(3.3)}$$

$$Q = \frac{K^n}{\sqrt{1+(2nX)^2}} \qquad \text{.....................(3.4)}$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \qquad \text{.....................(3.5)}$$

เมื่อ ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (Crush Rock Resistivity) (โอห์ม - เมตร)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity) (โอห์ม - เมตร)

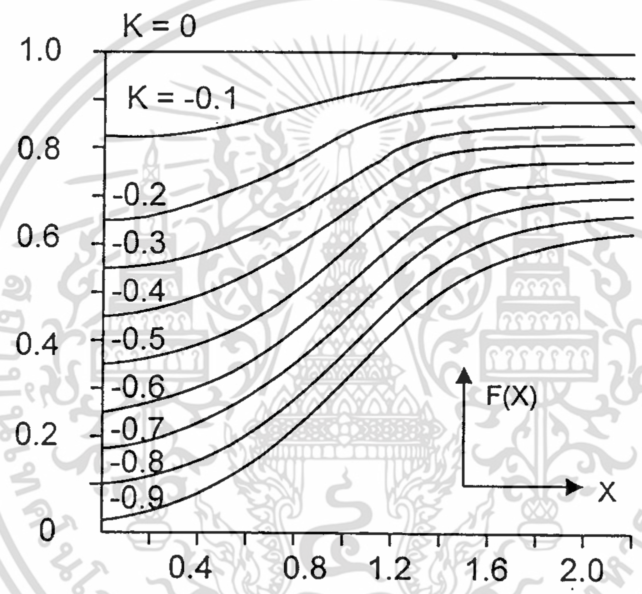
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$X = X_1 = \frac{h_s}{b}$ สำหรับ R_F

$$X \quad = X_2 = \frac{h_s}{d_F} \text{ สำหรับ } R_{MF}$$

เมื่อ h_s = ความหนาของหินกรวดที่โรยบนผิวดิน (เมตร)

ค่าของ $F(X)$ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า K ซึ่งจะวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยดูได้จากรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงค่า Function F(X) Versus X and Reflection Factor K.

จากสมการที่ (2.12)และ (2.13) การกำหนดค่า R_{2FS} และ R_{2FP} เราตัดค่า mutual resistance ออกเพื่อให้สมการง่ายขึ้น สำหรับหินที่มีพื้น 2 ชั้น (Two Layer) และให้ b มีค่าโดยประมาณ 0.083 เมตร จะได้สมการดังนี้

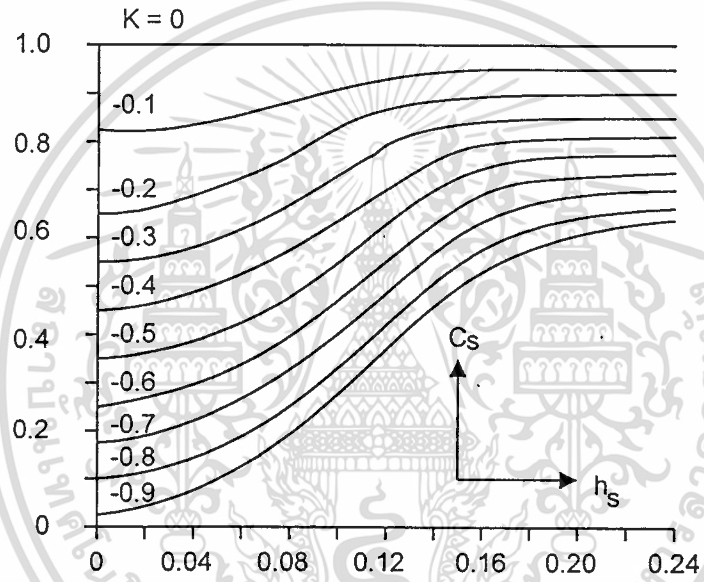
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{2FS} = 6C_s(h_s, K)\rho_s \qquad (3.6)$$

$$R_{2FP} = 1.5C_S(h_s, K)\rho_s \qquad (3.7)$$

เมื่อ C_s = Reduction factor เนื่องจากการโรยหินกรวด และจะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับความต้านทานจำเพาะของหินกรวด

C_s = จะมีความสัมพันธ์กับค่า K และความหนาของชั้นหินกรวด h_s ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงค่า Reduction Factor (C_s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานรวมของร่างกายและเท้าถึงดิน ในกรณีคิดผลของการโรยหินกรวด สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$R_{TS} = R_B + 6C_s \rho_s$ ความต้านทานรวมระหว่างเท้า ....(3.8)

$R_{TP} = R_B + 1.5C_s \rho_s$ ความต้านทานรวมระหว่างมือกับเท้า ....(3.9)

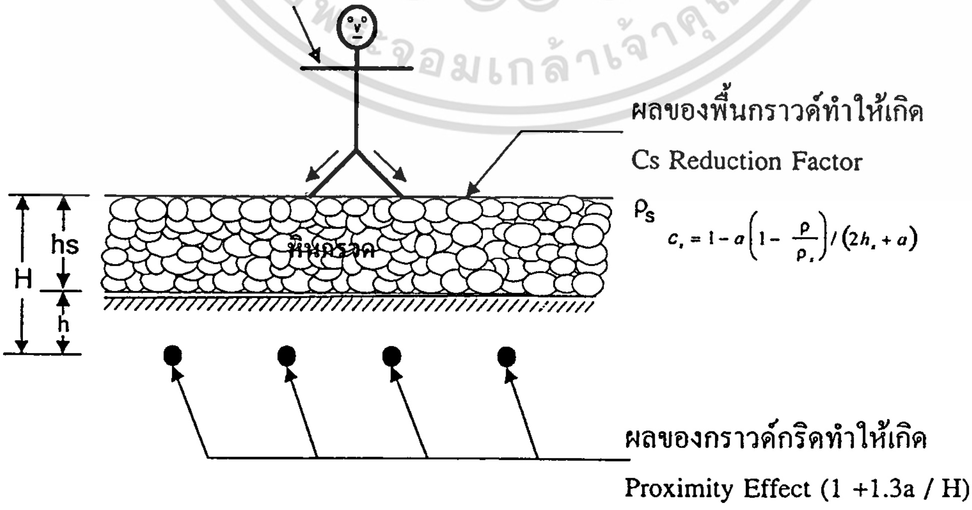
โดยค่า C_s จะประมาณค่าได้ดังนี้

$$C_s = 1 - a\left[\frac{1-\frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + a}\right]$$ สำหรับความลึกของหินกรวด ....(3.10)

$0 \le h_s \le 0.3048$ เมตร

$$C_s = 1 - a\left[\frac{1-\frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s - a}\right]$$ สำหรับความลึกของหินกรวด ....(3.11)

$h_s > 0.3048$ เมตร



รูปที่ 7 แสดงชั้นหินกรวดบนสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C_s = Reduction factor เนื่องจากการโรยหินกรวด

h_s = ความหนาของหินกรวด (เมตร)

a = 0.106 เมตร ซึ่งได้มาจากการแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม รัศมี a แทนที่จะแทนด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี 0.083 เมตร

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม - เมตร)

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (โอห์ม - เมตร)

ความต้านทานรวมของร่างกายและเท้าถึงดิน ในสมการที่ (3.8) และ (3.9) คิดผลของการโรยหินกรวดเข้าไปแล้วแต่ไม่ได้คิดผลเนื่องจากมีระบบกราวด์กริดฝังอยู่ใต้ดิน กราวด์กริดที่อยู่ในดินซึ่งมีศักดาไฟฟ้าสูงกว่าศักดาไฟฟ้า ณ จุดที่ยืนอยู่ ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายลงในดินได้ยากขึ้นนั่นคือ การฝังกราวด์กริดลึกลงไปในดิน (Grid proximity, P) จะทำให้ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือ

$$P = 1+1.3\left[\frac{a}{(h+h_s)}\right] \quad ; a = 0.106 \qquad \text{.................(3.12)}$$

ดังนั้น $$R_{TS} = R_B + 6C_s\rho_s\left[1+\frac{1.3a}{H}\right]$$ สำหรับความต้านทานระหว่างเท้า ....(3.13)

$$R_{TP} = R_B + 1.5C_s\rho_s\left[1+\frac{1.3a}{H}\right]$$ สำหรับความต้านทานระหว่างมือกับเท้า ....(3.14)

เมื่อ H = $h+h_s$

H = ความลึกของกราวด์กริดใต้ระดับผิวบนสุด (เมตร)

h = ความลึกของกริดจากผิวดิน (เมตร)

h_s = ความหนาของหินกรวด (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เกณฑ์ความปลอดภัยของแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

(Step and Touch Voltage Criteria)

การพิจารณาถึงขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ โดยไม่ทำให้เป็นอันตรายถึงชีวิต และความต้านทานของร่างกายเท้าถึงดินในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย ค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ได้จากสมการ ดังนี้

$$E_{step} = (R_B + R_{2FS})I_B \qquad \text{.................(3.15)}$$

$$E_{touch} = (R_B + R_{2FP})I_B \qquad \text{.................(3.16)}$$

โดย R_B = 1000 โอห์ม จะได้ว่า

สำหรับน้ำหนัก 50 ก.ก.

$$E_{step50} = \left[R_B + 6C_s(h_s,K)\rho_s\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)\right]\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad \text{.................(3.17)}$$

$$E_{touch50} = \left[R_B + 1.5C_s(h_s,K)\rho_s\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)\right]\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \qquad \text{.................(3.18)}$$

สำหรับน้ำหนัก 70 ก.ก.

$$E_{step70} = \left[R_B + 6C_s(h_s,K)\rho_s\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)\right]\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \qquad \text{..................(3.19)}$$

$$E_{touch70} = \left[R_B + 1.5C_s(h_s,K)\rho_s\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)\right]\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \qquad \text{................(3.20)}$$

ระบบต่อลงดิน หรือกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดีต้องให้ศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ในสถานีไฟฟ้าย่อยต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤติของศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าวในสมการที่ (3.17) หรือ (3.19) และศักดาไฟฟ้าสัมผัสในสมการที่ (3.18) หรือ (3.20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อย คือ ศักดาไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage)

3.2 การพิจารณาศักดาไฟฟ้าเมชและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อย

ศักดาไฟฟ้าเมช (E_m) และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว(E_m)ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อยสามารถคำนวณได้โดยตรงจากระบบกราวด์ ดังนั้นการออกแบบกราวด์จะปลอดภัยได้เมื่อ $E_s < E_{step}$ และ $E_m < E_{touch}$ การคำนวณ E_m และ E_s สามารถคำนวณได้ดังนี้ (โดยสมมติว่าเมชแต่ละเมชเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส แต่กริดไม่จำเป็นต้องเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L} \quad \text{.................(3.21)}$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L} \quad \text{.................(3.22)}$$

K_m = mesh voltage factor

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[ln\left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(d+2h^2}{8Dd} - \frac{h}{4d}\right) + \frac{k_{ii}}{k_h} ln\frac{8}{\pi(2n-1)}\right] \quad \text{......(3.23)}$$

K_{ii} = 1 สำหรับกริดที่มีแท่งตัวนำอยู่รอบ ๆ หรืออยู่ตามมุมของกริด หรือมีแท่งตัวนำอยู่รอบ ๆ และภายในกริด

K_{ii} = $\frac{1}{(2n)^{2/n}}$ สำหรับกริดที่ไม่มีแท่งตัวนำหรือมีน้อยภายในกริด โดยไม่มีที่ส่วนรอบ ๆ และตามมุมของกริด

K_i = $\sqrt{1+\frac{h}{h_o}}$ โดย h_o = 1 เมตร (ความลึกอ้างอิงของกริด)

K_i = Current Irregularity corrective factor เป็นแฟคเตอร์ที่คิดผลของกระแสต่อความยาวตัวนำที่ไหลจากระยะกริดลงดินที่มีค่าไม่เท่ากัน กระแสที่ตัวนำรอบนอกไหลลงดินมากกว่าตัวนำที่อยู่ภายใน และบริเวณมุมมีกระแสไหลออกจากกริดลงดินมากที่สุด

$$K_i = 0.656 + 0.172\, n \quad \text{....................(3.24)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีระบบต่อลงดินประกอบด้วยตัวนำต่อเป็นสี่เหลี่ยม โดยไม่มีตัวนำภายในเลย $n = 2$ จะได้ K_i มีค่าเท่ากับ 1

K_s = Step Voltage factor

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h}+\frac{1}{D+h}+\frac{1}{D}(1-0.5^{n-2})\right] \text{ สำหรับ } 0.25 < h < 2.5 \text{ เมตร} \quad ....(3.25)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h}+\frac{1}{D+h}+\frac{1}{D}W\right] \quad \text{สำหรับ} h < 0.25 \text{ เมตร} \quad ....(3.26)$$

$$w = \frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}+...+\frac{1}{n-1} \quad ....(3.27)$$

$$w \approx \frac{1}{2(n-1)}+ln(n-1)-0.423 \quad \text{สำหรับ } n \geq 6 \quad ....(3.28)$$

สังเกตได้ว่า K_s นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความลึกกริด ซึ่งเป็นความจริงที่ว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความลึกของกริดเพิ่มขึ้น

เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม - เมตร)

n = จำนวนของตัวนำที่ใช้ทำกริดที่วางขนานกันในแต่ละทิศทาง

n = $\sqrt{n_A.n_B}$ สำหรับการคำนวณ E_m

n = ค่าสูงสุดของ n_A หรือ n_B สำหรับการคำนวณ E_s

n_A, n_B = จำนวนตัวนำด้าน A และด้าน B ของกราวด์กริด

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ทำกริดวางขนานกัน (เมตร)

h = ความลึกของกราวด์กริดใต้ผิวดิน (เมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด (เมตร)

L = ความยาวของตัวนำของกริด

L = $L_c + L_r$ สำหรับกราวด์กริดที่ไม่มีหรือมีกราวด์ร็อดเพียงเล็กน้อยอยู่กลางๆ กริด(เมตร)

L = $L_c + 1.15L_r$ สำหรับกราวด์กริดที่มีกราวด์ร็อดส่วนมากอยู่รอบๆ กราวด์กริด(เมตร)

L_c = ความยาวของตัวนำรวมที่ใช้ทำกราวด์กริด (เมตร)

L_r = ความยาวรวมของกราวด์ร็อด (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขีดจำกัดในการใช้สมการ E_m และ E_s

1. $n \leq 25$
2. $0.25 < h < 2.5$
3. $D > 2.5$
4. $d < 0.25\ h$
5. กว้าง : ยาวของเมช > 1 : 2.5

3.3 การประมาณค่าความยาวของตัวนำที่ใช้อย่างน้อยที่สุด

ในการออกแบบระบบต่อลงดินที่ดี ควรจะต้องให้มีความปลอดภัยต่อชีวิตมนุษย์ที่มีภารกิจในสถานีไฟฟ้าย่อยให้มากที่สุดเมื่อเกิดกระแสไหลลงดินและควรคำนึงถึงการใช้ตัวนำให้มีความยาวที่เหมาะสมและมีจำนวนน้อยที่สุด

อนึ่งเกณฑ์ความปลอดภัยของมนุษย์ที่สามารถรับได้โดยไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต คือ ศักดาไฟฟ้าเมชของสถานีไฟฟ้าย่อยต้องมีค่าน้อยกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด เขียนเป็นสมการได้ว่า

$E_m < E_{touch50}$ สำหรับคนหนัก 50 ก.ก.

$$K_m K_i \rho \frac{I_G}{L} < \left[(R_B + 1.5C_s,(h_s,K)\rho_s)\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)\right]\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{..................(3.29)}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$L > \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_s}}{(116+0.174C\rho_s)(1+\frac{1.3a}{H})} \quad \text{..................(3.30)}$$

และเช่นเดียวกับ

$E_m < E_{TOUCH70}$ สำหรับคนหนัก 70 ก.ก.

$$K_m K_i \rho \frac{I_G}{L} < \left[(R_B + 1.5C\rho_s)(1+\frac{1.3a}{H})\right]\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{.................(3.31)}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$L > \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_s}}{(157+0.235C\rho_s)(1+\frac{1.3a}{H})} \quad \text{..................(3.32)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การหาความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Ground Resistance)

ในทางอุดมคติค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินควรจะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจะกำหนดให้มีค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินไม่เกิน 1 โอห์ม การเริ่มทำระบบต่อลงดินอาจจะทราบเพียงข้อมูลของพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยที่จะสร้างและค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดเท่านั้น ซึ่งก็ยังไม่ทราบว่ากริดจะมีเมชกว้างใหญ่เพียงใด ดังนั้นการหาความต้านทานรวมของระบบต่อลงดิน ขั้นตอนแรกจะต้องทราบขนาดและการวางรูปแบบของระบบเสียก่อน การประมาณค่าความต้านทานได้จากทดลอง โดยวางแผ่นโลหะทรงกลมภายในสถานีไฟฟ้าย่อย จะได้สมการว่า

$$R_g = \frac{\rho}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} \qquad \text{.................(3.33)}$$

กรณีที่คิดระบบกริดต่อลงดินประกอบด้วยตัวนำความยาว L และถ้า L มีค่าสูงมากทำให้ความต้านทานของระบบเท่ากับของแผ่นโลหะกลม โดยกริดต่อลงดินฝังลึกน้อยกว่า 0.25 เมตร จะทำให้ความต้านทานของระบบต่อลงดินมีความถูกต้องพอสมควร จะได้สมการดังนี้

$$R_g = \frac{\rho}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \qquad \text{.................(3.34)}$$

ต่อมาได้มีการพัฒนาสมการในการหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินโดยวิธีหา SVERAK'S approximation ใช้กับระบบต่อลงดินที่มีพื้นที่รูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรากฏอยู่ในมาตรฐาน IEEE 80 - 1986 ซึ่งกริดที่ต่อลงดินจะฝังลึกระหว่าง 0.25 - 2.5 เมตร ความต้านทานของระบบจะได้จากสมการ

$$R_g = \rho\left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}}\right)\right] \qquad \text{..................(3.35)}$$

ในกรณีที่พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยมีรูปทรงอื่น ๆ เช่น รูปทรงตัวแอล, รูปทรงตัวที และรูปทรงสามเหลี่ยม Thapar ได้เสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}}(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}})\right] \times 1.52\left[2\ln(Lp\sqrt{2/A}) - 1\right]\sqrt{A}/Lp \quad .....(3.36)$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (โอห์ม)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม - เมตร)

A = พื้นที่ซึ่งถูกครอบคลุมโดยกริด (ตารางเมตร)

L_p = ความยาวของเส้นรอบรูปของกริด (เมตร)

L = ความยาวของตัวนำทั้งหมดของระบบต่อลงดิน (เมตร)

3.5 การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ความต้านทานจำเพาะของดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีผลต่อการกระจายของกระแสลัดวงจรลงสู่ดินกล่าวคือ ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกระแสลัดวงจรจะสามารถกระจายลงสู่ดินได้มาก ในทางตรงข้ามถ้าความต้านทานจำเพาะาของดินมีค่ามากจะทำให้กระแสลัดวงจรไหลสู่ลงดินได้ปริมาณน้อยทำให้ศักดาไฟฟ้าจุดต่าง ๆ ที่พื้นดินมีค่าสูง ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละพื้นที่จะมีค่าต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นของดิน อุณหภูมิ สารเคมีที่มีอยู่ในดิน เป็นต้น สำหรับตารางข้างล่างนี้แสดงถึงค่าเฉลี่ยโดยประมาณของดินและหินชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 1

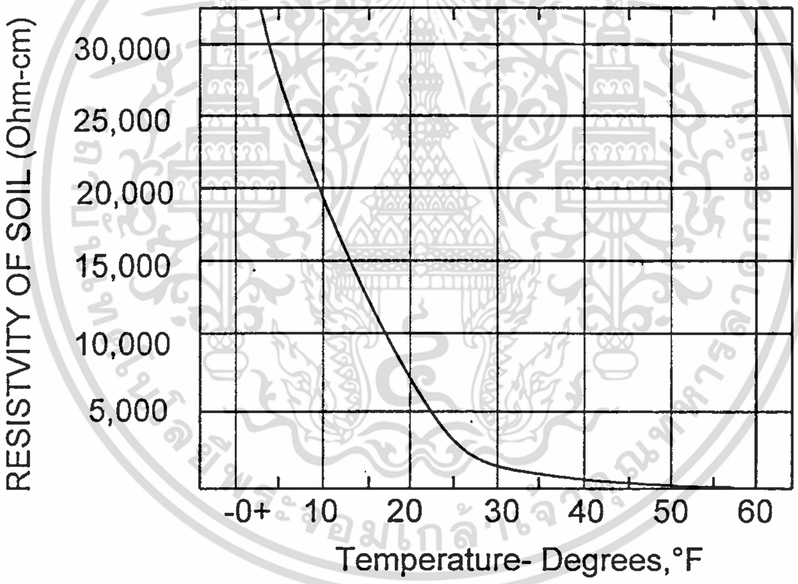
ชนิดของดิน (Type of Soil)	ความต้านทานจำเพาะ (Resistivity in ohm-meters)
ดินมีวัชพืชเปียกชื้น (wet organic soil)	10
ดินทั่วไปมีความชื้น (moist soil)	10^2
ดินทั่วไปแห้ง (dry soil)	10^3
หิน (Bed rock)	10^4
ทราย (sand)	500-1000

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยของ Soil Resistivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปสำหรับการคำนวณและการออกแบบมักจะถือว่าพื้นดินเป็นเนื้อเดียวกันตลอด กล่าวคือ ความต้านทานจำเพาะของดินจะมีค่าเดียวกันตลอดพื้นดิน ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของพื้นดินส่วนใหญ่มักมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่ก็มีบางพื้นที่ที่มีสภาพพื้นดินที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกันตลอด

ผลของของเหลวในดิน ส่วนผสมของของเหลวในดินมีความสำคัญมาก การเปลี่ยนแปลงของของเหลวในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%) จะมีค่ามาก ซึ่งจะเป็นจุดที่ชี้ให้เห็นถึงค่าความแตกต่างของการต่อแท่งกราวด์ ที่มีขนาดที่แตกต่างกันไป โดยปกติแล้วส่วนประกอบของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของสถานที่ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10% ในช่วงฤดูแล้ง และประมาณ 35% ในช่วงฤดูฝนซึ่งผลของของเหลวทั้งหมดจะมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 16-18%

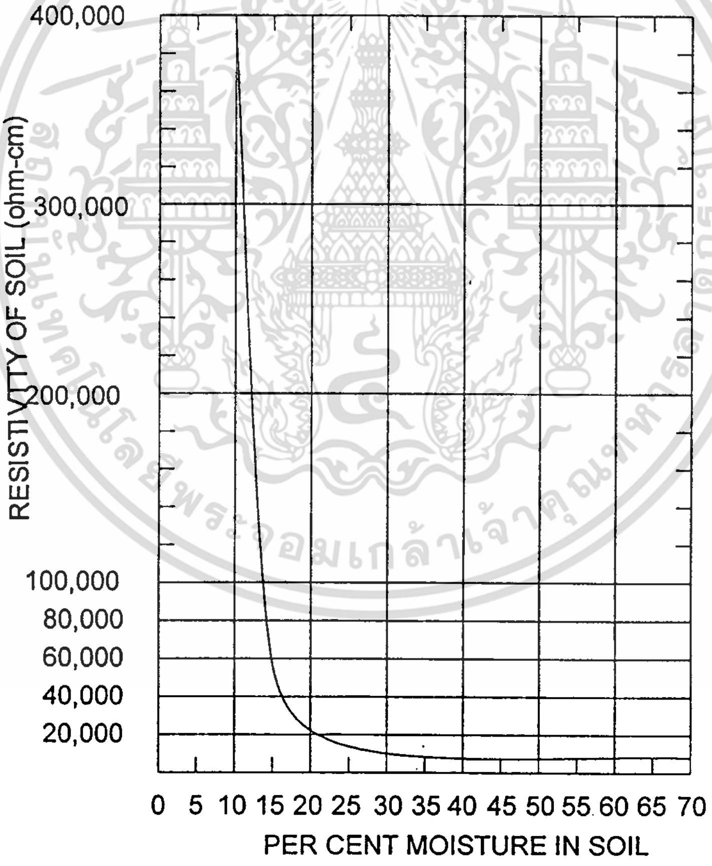


รูปที่ 8 กราฟแสดงการแปรเปลี่ยนของค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อมีความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้น เมื่อความชื้นเพิ่มความต้านทานของดินก็จะลดลง ดังรูปที่ 8 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ดินที่เป็นสื่อไฟฟ้าที่ดีที่สุด คือ ดินเหนียว และ ดินซึ่งมีปุ๋ยอินทรีย์และปริมาณความชื้นจะช่วยให้ค่าความต้านทานของดินลดลง แท่งกราวด์จะต้องไม่วางแช่ไว้ในน้ำโดยตรง เพราะน้ำมีความต้านทานสูงมาก ควรจะฝังอยู่ในชั้นดินที่ชื้น โดยทั่วไปดินที่ใช้ในการเพาะปลูกได้ดีมักจะมีสภาพนำไฟฟ้าดีด้วย และบริเวณรอบ ๆ ตำแหน่งที่จะฝังแท่งกราวด์นั้นควรจะมีความชื้นอยู่เสมอ เช่น ปลูกหญ้าคลุมให้ทึบ หรือทำเป็นแอ่งเก็บน้ำฝนเพื่อให้เกิดความชื้น

ผลของอุณหภูมิ ในสภาวะปกติ อุณหภูมิมีผลน้อยมากต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงจากจุดเยือกแข็งต่ำกว่า 32 องศาฟาเรนไฮต์ ความต้านทานจำเพาะของดินจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 8



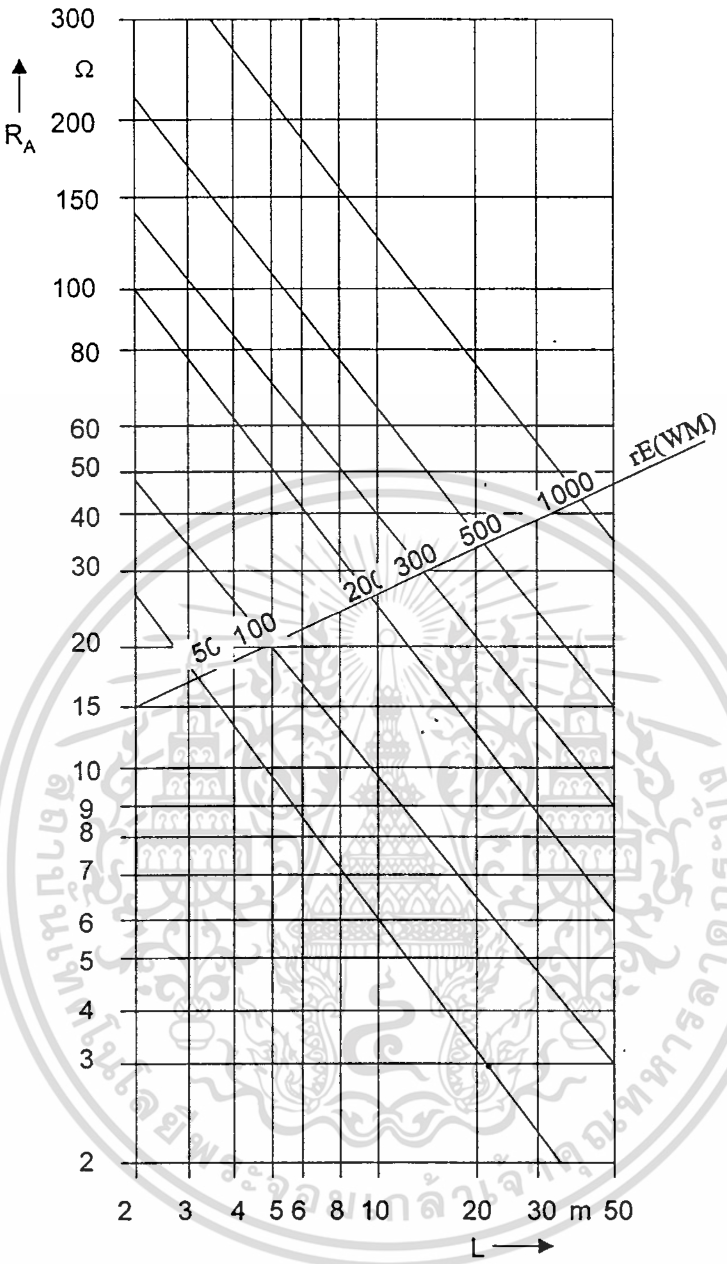
รูปที่ 9 กราฟแสดงการแปรเปลี่ยนของค่าความต้านทานจำเพาะของดินกับอุณหภูมิเมื่อมีความชื้นในดิน 18.6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อได้เปรียบของความลึกของแท่งกราวด์ จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากในการปฏิบัติการณ์ทางไฟฟ้าการปักแท่งกราวด์ (Ground rod) สามารถปักได้ตามความยาวที่ต้องการว่าจะให้ยาวเพียงใดในระดับของของเหลวในดิน ซึ่งผลลัพธ์ของของเหลวอาจไม่เป็นไปตามความคาดหมายคือทำให้ค่าความต้านทานสูง แต่ก็จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามฤดู ซึ่งลักษณะของค่าความต้านทานยังขึ้นอยู่กับแท่งกราวด์ชนิดต่าง ๆ ด้วย

- แท่งกราวด์แบบแท่ง ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งตันไม่มีรูตรงกลางจะมีค่าความต้านทานแผ่กระจาย(R_a)ของแท่งกราวด์แบบเส้นที่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(ρ) และความยาวของแท่งกราวด์ (L) ดังแสดงในรูปที่ 9

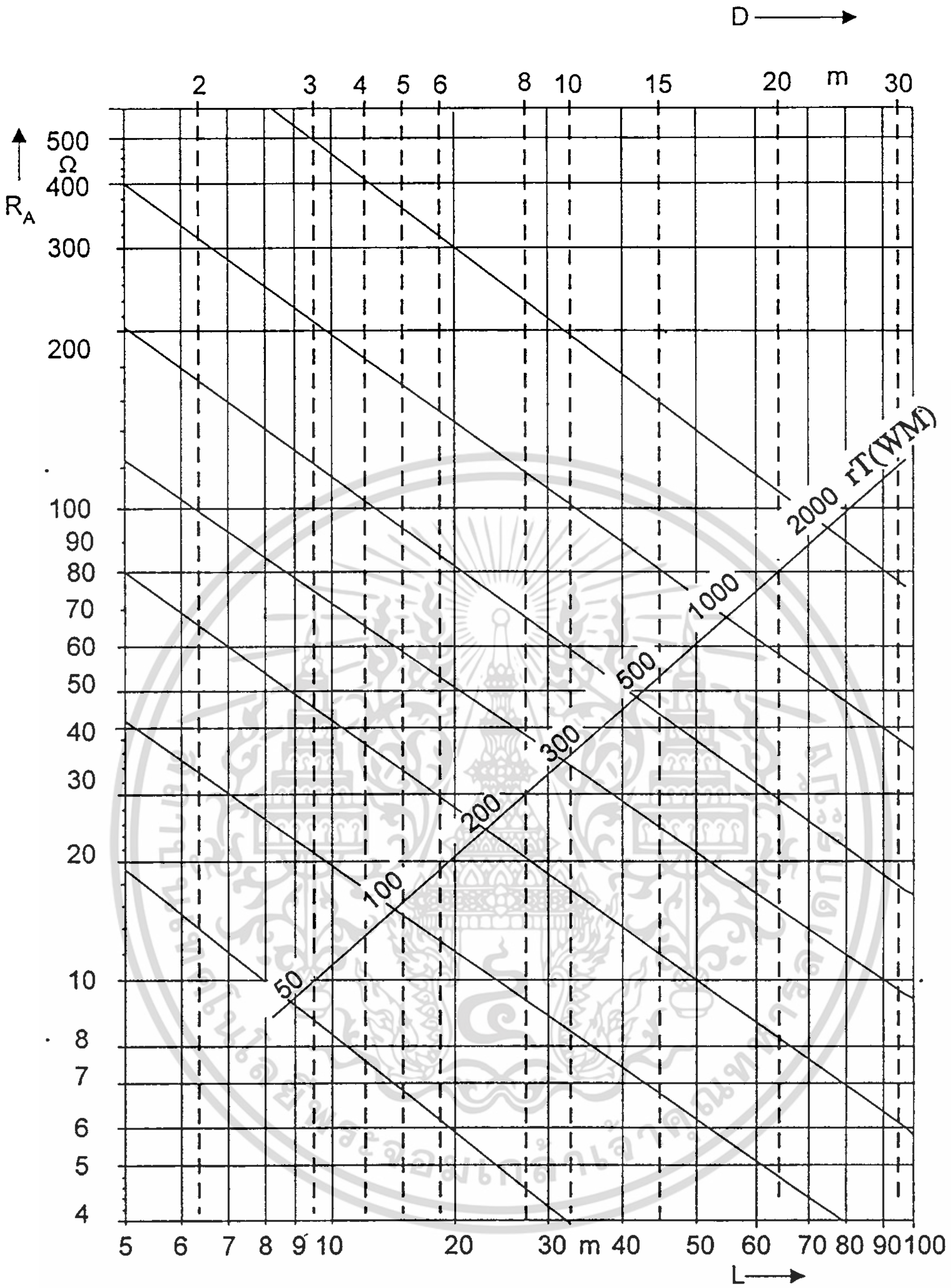
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงค่าความต้านทานแผ่กระจายของดิน R_a เมื่อใช้แท่งกราวด์แบบแท่ง ขึ้นอยู่กับความลึกของแท่งกราวด์ (L) และค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) คงตัว

- แท่งกราวด์แบบเส้นเป็นแท่งกราวด์ที่มีลักษณะเป็นเส้นแบน หรือเส้นลวดฝังอยู่ใต้พื้นดิน ดังนั้นค่าความต้านทาน (R_a) ของแท่งกราวด์แบบเส้นนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) และความยาวของแท่งกราวด์ (L) ดังแสดงในรูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงค่าความต้านทานแผ่กระจายของแท่งกราวด์แบบเส้น

- แท่งกราวด์แบบแฉก เป็นการใช้แท่งกราวด์แบบเส้น หรือแบบท่อเชื่อมติดกันเป็นแฉก โดยที่มุมระหว่างแฉกอย่างน้อย 60 องศา เพื่อจะได้มีผลของค่าความต้านทานแผ่กระจายของดินลดลงไปได้ ค่าความต้านทานแผ่กระจายของดินนั้นจะขึ้นอยู่กับผลรวมของความยาวของแท่งกราวด์แต่ละแฉก (L_m) ซึ่งความยาวของแต่ละแฉกอย่างน้อย 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 เมื่อ d เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งกราวด์แบบท่อ หรืออาจจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของแท่งกราวด์แบบเส้นแบน

...หรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบกราวด์นั้น การทดสอบหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนี้จะเป็นองค์ประกอบสำคัญในการกำหนดค่าความต้านทานของระบบกราวด์ว่าจะต้องใช้ตัวนำมากหรือน้อย ค่าที่ได้จึงจะทำให้ระบบปลอดภัยจากศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์

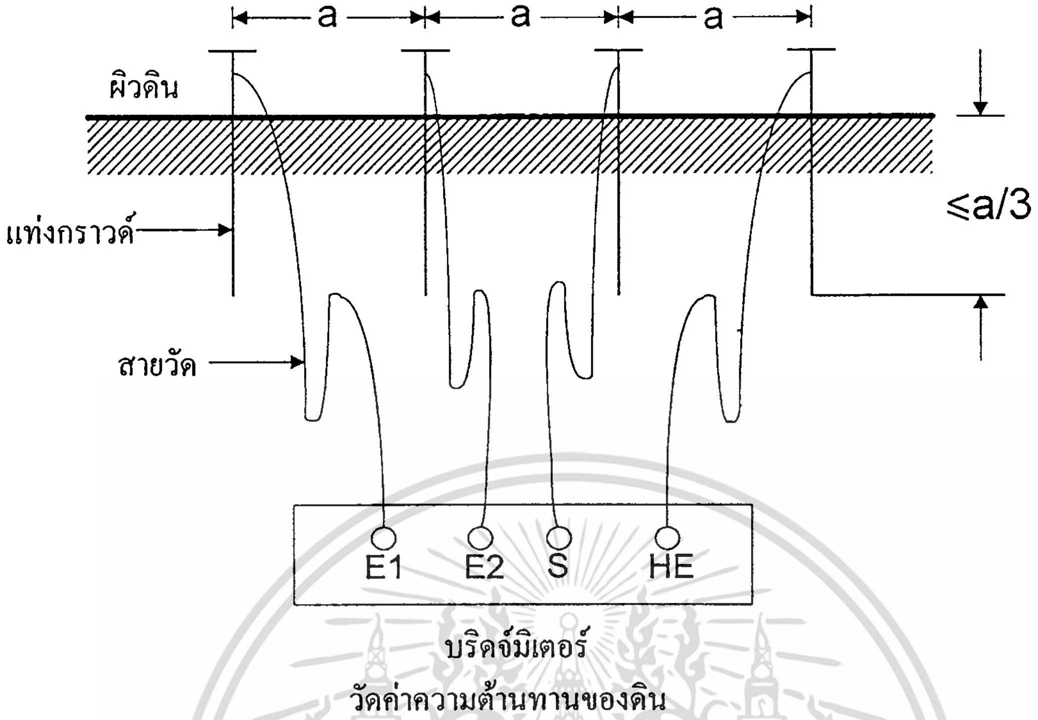
อย่างไรก็ตามความต้านทานดินที่การเปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการลัดวงจรลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยพิจารณาได้จากศักดาไฟฟ้าเกรเดียนท์ไม่มีผลต่อความต้านทานดิน ยกเว้นจะมีค่าสูงมากจนทำให้เกิดอาร์คจากผิวของอิเลคโตรดมีขนาดใหญ่ขึ้น ความต้านทานดินก็ลดลงในขณะนั้น ส่วนขนาดกระแส และระยะเวลาที่ไม่มีผลทำให้ความต้านทานดินเปลี่ยนคือไม่เกิน 200 A/m^2 ในเวลา 1 วินาที

การวัดความต้านทานดินเพื่อหาความต้านทานจำเพาะของดินมีด้วยกันหลายแบบ คือ วิธีวัดแบบ 3 จุด (driven rod three point method) และวิธีการวัดแบบ 4 จุด (driven rod or four point method)ซึ่งจะให้อิเลคโตรดมีระยะห่างเท่ากันจำนวน 4 จุด ไปปักไว้บนพื้นดินที่ต้องการและวัดหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยปักให้อยู่ในแนวเดียวกัน มีระยะห่าง a ระหว่างแท่งกราวด์ทั้ง 4 เท่ากัน และปักลงที่ความลึกไม่เกิด $a/3$ แท่งกราวด์ทั้ง 4 จะต่อเข้ากับบริดจ์มิเตอร์วัดค่าความต้านทานของดิน ซึ่งมีจุดต่อสาย 4 จุดเช่นเดียวกัน และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าในตัวที่มีความถี่ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 90-100 Hz สายวัดที่ใช้เชื่อมต่อถึงกันระหว่างกราวด์กับจุดต่อของตัวบริดจ์มิเตอร์ ปกติจะถูกม้วนเก็บเป็นขดไว้ เพราะฉะนั้นเวลาใช้จะต้องคายออกให้เป็นเส้นทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำใดๆขึ้นที่สายวัดได้ดังแสดงในรูปที่12 การวัดแบบ 3 จุด ควรทำการวัดอย่างน้อย 3-4 แห่ง ภายในบริเวณ ส่วนการวัดแบบ 4 จุด ควรวัดอย่างน้อย 3-4 ทิศทาง เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่เหมาะสม

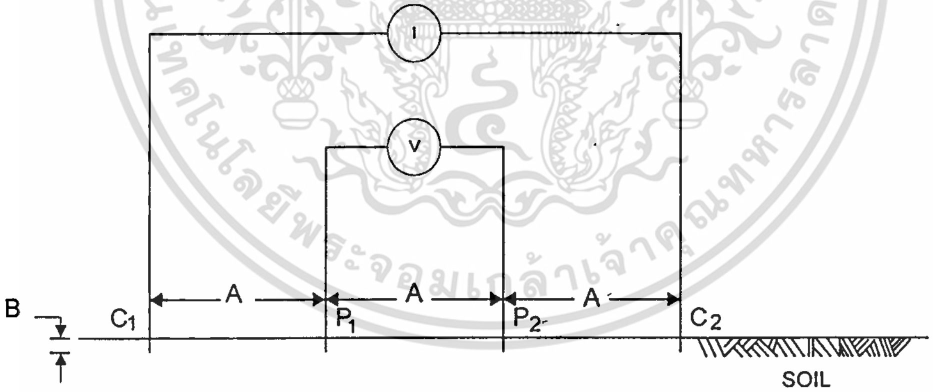
แท่งกราวด์ที่อยู่ด้านนอกสุดทั้งสองจะถูกจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ I จากบริดจ์มิเตอร์ไหลลงสู่ใต้ดินและทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างแท่งกราวด์ด้านในทั้งสอง ซึ่งภายในตัวบริดจ์มิเตอร์จะแสดงสัดส่วนของ $\frac{V}{I}$ ซึ่งเท่ากับค่าความต้านทาน R และค่าความต้านทานจำเพาะของดินปรากฏจากการวัด ρ ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของดินที่วัดได้

การวัดแบบ Wenner นี้เป็นการจัดวางอิเลคโตรด4แท่งระยะห่างเท่า ๆ กัน จะทำให้มีความถูกต้องมากกว่า ลงทุนต่ำ โดยไม่ต้องใช้กราวด์ร็อดแท่งยาว ๆ และสะดวกต่อการปฏิบัติงานเพื่อให้ระยะห่างของอิเลคโตรดแบบเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของดินที่ได้จากการวัดแรงดันและกระแสก็จะเปลี่ยนแปลงไปโดยในขณะที่ระยะห่างของอิเลตโตรดใกล้ ๆ กัน กระแสส่วนมากไหลในดินก็จะไหลใกล้ๆผิวดินเมื่อระยะเพิ่มขึ้นกระแสที่ไหลในดินก็จะกระจายการไหลให้ลึกขึ้นเมื่อคิดกลับจากค่าความต้านทานของดินก็จะได้เป็นค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏโดยใช้สมการที่ 3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 แสดงลักษณะของการปักแท่งกราวด์ในการวัดค่าความต้านทานของดินของ Wenner



รูปที่ 13 แสดงการวัดความต้านทานของดินแบบ 4 จุด

ค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดแบบ 3 จุด หรือ 4 จุด สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดแบบ 3 จุด $\rho = \dfrac{2\pi R}{\ln\dfrac{8B}{d} - 1}$ ....(3.37)

วัดแบบ 4 จุด $\rho = \dfrac{4\pi AR}{1 + \dfrac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \dfrac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}}$ ....(3.38)

หรือ $\rho = 2\pi AR$ เมื่อ $(B < \lambda / 20)$

ในกรณีที่ $B << A$ จะได้ว่า

$\rho = 2\pi AR$ ....(3.39)

เมื่อ ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะ (Soil resistivity) (โอห์ม - เมตร)

R = ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

A = ระยะห่างระหว่างอิเลคโตรดข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (เมตร)

B = ความลึกของ อิเลคโตรด (เมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของกราวด์ร็อด (เมตร)

วิธีการแก้ไขให้ค่าความต้านทานดีขึ้น

- การใช้สารประกอบเกลือเข้าช่วย วิธีนี้จะใช้ในกรณีที่จะเป็นจริง ๆ เมื่อไม่สามารถที่จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบสายดินลดลงไปอยู่ในค่าที่ต้องการซึ่งทำได้โดยใช้สารประกอบเกลือมีเกลือแกง หรือ พวกแมกนีเซียมซัลเฟต โดยฝังลงใกล้ ๆ บริเวณหลักดินเพื่อให้เกิดความชื้นของดินสูงขึ้น แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือจะต้องการเติมสารประกอบเกลือลงดินบ่อย ๆ และนอกจากนั้นเกลือจะทำให้หลักดินเกิดสนิมและผุกร่อนได้เร็วกว่าปกติ

- ปักแท่งกราวด์ให้ลึกสามารถใช้ข้อต่อของแท่งกราวด์ เพื่อต่อแท่งกราวด์เข้าด้วยกันจะทำให้ได้แท่งกราวด์ที่มีความยาวมาก ทำให้ค่าความต้านทานน้อยลง

- ปักแท่งกราวด์หลาย ๆ ตัว โดยใช้แท่งกราวด์ตั้งแต่ 2 แท่งขึ้นไป

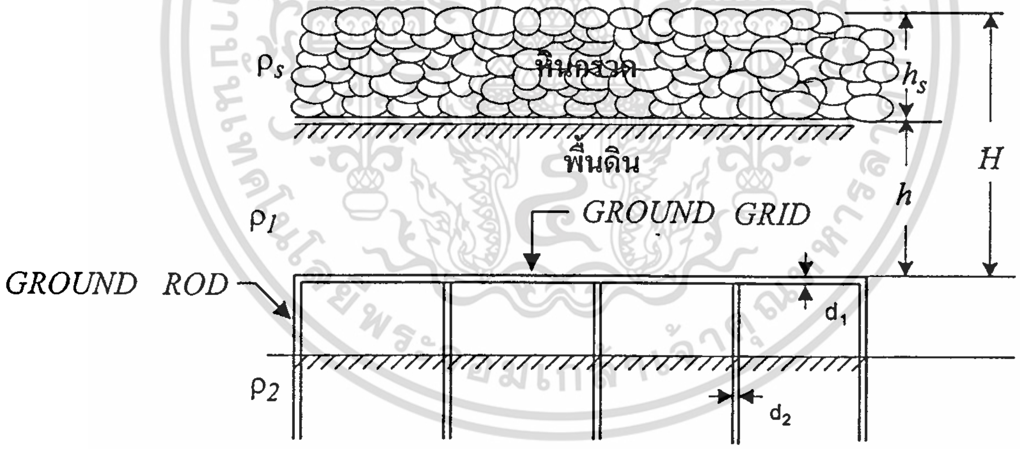
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อกราวด์ร็อดร่วมกับกราวด์กริด

โดยส่วนมากแล้วการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย มักจะเริ่มต้นด้วยการทำเป็นกราวด์กริดที่มีระยะห่างของเส้นตัวนำกริดเท่ากัน แต่เนื่องจากศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดหรือศักดาไฟฟ้าเมชมักจะเกิดขึ้นที่เมชที่อยู่มุมของระบบกราวด์กริด (coner mesh) การลดศักดาไฟฟ้าดังกล่าวสามารถที่จะทำได้โดยการเพิ่มเส้นตัวนำกริด หรือให้ระยะห่างของเส้นตัวนำกริดแคบลง นอกจากนั้นการนำเอากราวด์ร็อดมาต่อร่วมกับกราวด์กริด ก็สามารถที่จะช่วยลดศักดาไฟฟ้าดังกล่าวนั้นได้ ซึ่งอาจจะให้ค่าใช้จ่ายน้อยกว่า แทนที่จะเพิ่มเส้นตัวนำกริดก็เป็นได้

การหาค่าความต้านทานของกราวด์ร็อดแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ดินเป็นดินชั้นเดียว และดินสองชั้น ซึ่งในกรณีดินเป็นดินสองชั้นนั้น ก็จะแบ่งเป็น 2 กรณีเช่นกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของกราวด์ร็อดว่าอยู่ในดินชั้นใดบ้าง

นอกจากนั้นการที่จะหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์ประกอบด้วยกราวด์กริด และกราวด์ร็อดนั้น ค่าความต้านทานอีกค่าหนึ่งที่จะต้องใช้คือ ค่าความต้านทานร่วม (Mutual resistance) ระหว่างกราวด์กริดกับกราวด์ร็อด



รูปที่ 14 แสดงการต่อกราวด์ร็อดร่วมกับกราวด์กริด

ρ_s	=	ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด $(\Omega - m)$
ρ_1	=	ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ซึ่งฝังกราวด์กริดลึก $h \langle H$
ρ_2	=	ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง $(\Omega - m)$
H	=	ความลึกของกราวด์กริดใต้ระดับผิวบนสุด (m)
h_s	=	ความหนาของหินกรวด (m)
h	=	ความลึกของกราวด์กริดจากผิวดิน (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นปัญหาที่จะต้องพิจารณาก็คือ การหาค่าความต้านทานของกราวด์ร็อดทั้งหมดที่ต่อร่วมกับกราวด์กริด เพื่อจะได้นำความต้านทานนั้นไปใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์ที่ประกอบด้วยกราวด์กริดและกราวด์ร็อด

กราวด์ร็อดมักจะถูกปักลงในตำแหน่งที่สายตัวนำกริดวางพาดขวางกัน ดังรูปที่ 14 ในกรณีที่ปักทุก ๆ ตำแหน่งปม (node) ของกราวด์กริด ก็จะเรียกว่า Solid square และในกรณีที่ปักเฉพาะตำแหน่งที่อยู่รอบ ๆ เส้นรอบรูปของกราวด์กริด ก็จะเรียกว่า Hollow square ค่าความต้านทานของกราวด์ร็อดจะประกอบด้วยค่าความต้านทานของ 3 ส่วนรวมกันก็คือ ค่าความต้านทานของสายตัวนำที่ต่อไปถึงกราวด์ร็อด ค่าความต้านทานสัมผัส (contact resistance) ระหว่างกราวด์ร็อดกับดินและค่าความต้านทานของดินรอบ ๆ กราวด์ร็อด ดังรูป ปกติแล้วค่าความต้านทานของสายตัวนำจะมีค่าต่ำ ส่วนต่าความต้านทานสัมผัสก็จะค่อยน้อยมาก ดังนั้นค่าความต้านทาน ของกราวด์ร็อดก็จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของดินรอบ ๆ เป็นสำคัญ ซึ่งก็คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั่นเอง

3.6 การหาขนาดของตัวนำกริด

การเลือกตัวนำกริดนั้นต้องอาศัยการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้คือ ต้องมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี ทนอุณหภูมิสูง แข็งแรงทนทาน เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เพื่อไม่ให้เกิดความต่างศักย์สูงเมื่อกระแสลัดวงจรไหลผ่าน ต้องไม่หลอมละลายเมื่อมีกระแสลัดวงจรไหลเป็นระยะเวลาหนึ่ง วัสดุที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ เช่น ทองแดง, โลหะชุบทองแดง, อลูมิเนียม, เหล็กอาบสังกะสี แต่ที่นิยมใช้กันมาก คือทองแดง เพราะว่าทองแดงมีค่าความนำจำเพาะสูง ทนต่อความชื้น ทนความเป็นกรดด่าง และทนต่อการผุกร่อนใต้ดินได้ดี เนื่องจากทองแดงจะเปรียบเสมือนขั้ว คาโทด (Cathonic) เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นแต่ทองแดงมีราคาแพง ดังนั้นบางสถานการณ์จะใช้โลหะชุบทองแดง (Copper - Clad Steel) แทนทองแดงและยังใช้โลหะชุบทองแดงเป็นกราวด์ร็อดได้ด้วยสำหรับอลูมิเนียมนั้นไม่นิยมใช้เนื่องจากอลูมิเนียมไม่แข็งแรงผุกร่อนได้ง่ายทั้งในกรดและด่าง เกิดสนิมง่ายทำให้สภาพการนำไฟฟ้าเลวลง ส่วนเหล็กอาบสังกะสี (Galvanize Steel) มีผู้ใช้น้อย เพราะว่าสังกะสีที่เคลือบจะเสื่อมสภาพหลุดออกได้เร็วกว่าปกติ เมื่อได้รับความชื้นและกรดด่าง มีอายุการใช้งานสั้นและมีสภาพการนำไฟฟ้าน้อยกว่าทองแดงถึง 6 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่จะใช้หาขนาดตัวนำกริด มีดังนี้

$$A_{mm^2} = I\sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP}}{ln\left[1+\left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a}\right)\right]}} \qquad ......(3.40)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกริด (mm^2)

I = กระแสลัดวงจรลงดินเป็นค่า rms (KA)

T_m = อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (^oc)

T_a = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (^oc)

T_r = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงที่ของวัสดุ (^oc)

α_o = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0^oc

α_r = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานอุณหภูมิ T_r ^oc

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

t_c = เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (วินาที)

$TCAP$ = แฟคเตอร์ทางความจุความร้อน $(J / cm^3 / ^oc)$

K_o = $\frac{1}{\alpha_o}$ หรือ $\frac{1}{\alpha_r} - T_r$

ซึ่งค่าคงที่ของวัสดุชนิดต่าง ๆ จะแสดงในตารางค่าคงที่ของวัสดุตามมาตรฐาน ANSI / IEEE Std. 80-1986 และ t_c ที่ใช้ในการคำนวณ จะเป็นเวลาการตัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกันสำรอง (Backup protection) โดยสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็กอาจใช้ 3 วินาที หรือมากกว่านี้ แต่ถ้าเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดใหญ่ที่มีระบบป้องกันมากแล้วอาจจะใช้ 1 วินาที หรืออาจจะมากกว่านี้ก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามอาจจะใช้ค่าเดียวกันกับ T_m ที่ใช้ในการคำนวณหาเกณฑ์กำหนดของศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวส่วนกระแสลัดวงจรลงดินนั้นจะเป็น Symmetrical current ซึ่งอาจจะมีเพื่อไว้สำหรับอนาคตก็ได้ ส่วนกรณีที่ต้องการใช้วัสดุชนิดอื่นที่นอกเหนือในตารางค่าคงที่ของวัสดุนั้น $TCAP$ สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่าความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่นได้ดังนี้

$$TCAP = 4.184\ S_H S_W \qquad ......(3.41)$$

เมื่อ S_H = ค่าความร้อนจำเพาะ $(Cal / gram/^oc)$

S_W = ค่าความหนาแน่น $(gram/cm^3)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติในกรณีที่ความหนาแน่นของกระแสไม่เกิน 200 A/m^3 จะไม่ทำให้คุณสมบัตินำไฟฟ้าของดินเปลี่ยนแปลงสำหรับช่วงเวลา 1 วินาที ในทางปฏิบัติประมาณ 66% เลือกใช้ตัวนำทองแดงขนาด No. 4/0 AWG และประมาณ 16% เลือกตัวนำขนาด 500 MCM (ประมาณ 250 mm^2) สำหรับทองแดงแบบ hard - drawn 97% ความนำ α_r ที่ $20^o c$ = 0.00381, K_o = 242, T_m = $1084^o c$, ρ_r ที่ $20^o c$ = 1774 $\mu\Omega / cm$ TCAP = 3.422 ช่วงเวลา t_c ที่ใช้ ถ้าเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดใหญ่ใช้ 2 - 3 วินาที กรณีของสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็กอาจใช้ t_c เท่ากับ 4 วินาที โดยคิดผลการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2

Description	Material Conductivity (%)	α_r Factor @20°C	K $1/\alpha_0$ @0°C	Fusing Temperature (°C)	p_r @20°C (μΩ/cm)	TCAP Factor Effective Value ($J/cm^3/°C$)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100	0.00393	234	1083	1.7241	3.442
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97	0.00381	242	1048	1.7774	3.442
Copper-Clad Steel Core Wire	40	0.00378	245	1048/1300	4.379	3.846
Copper-Clad Steel Core Wire	30	0.00378	245	1048/1300	5.862	3.846
Commercial EC Aluminum Wire	61	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminum Alloy Wire 5005	53.5	0.00353	263	660	3.226	2.598
Aluminum Alloy Wire 6201	52.5	0.00347	268	660	3.284	2.598
Aluminum Steel Core Wire	20.3	0.0036	258	660/1300	8.4805	2.67
Zinc-Coated Steel Core Wire	8.5	0.0032	293	419/1300	20.1	3.931
Stainless Steel No.304	2.4	0.0013	749	1400	72	4.032

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การคำนวณค่ากระแสกริดสูงสุด

เนื่องจากในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีสายส่งเข้ามาอย่างน้อย 1 ชุด หรือมากกว่านั้น ดังนั้นในขณะเกิดการลัดวงจรลงดินจะทำให้มีกระแสบางส่วนไหลลงดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และกระแสอีกบางส่วนจะไหลผ่านสาย Overhead Ground Wire เพื่อความถูกต้องในการหาศักดาไฟฟ้าเกิดขึ้นบนกราวด์ที่ได้จากการคูณกันระหว่างค่าความต้านทานของระบบกราวด์กับกระแสที่ไหลผ่านกราวด์ ซึ่งการที่นำเอากระแสลัดวงจรลงดินที่คำนวณได้ อาจจะทำให้มีค่ามากกว่าความเป็นจริง เนื่องจากในกรณีระบบที่ต่อกันภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นอาจจะทำให้กระแสที่ไหลในกริดกับพื้นดินรอบ ๆ นั้นมีค่าต่ำกว่ากระแสลัดวงจรลงดินที่คำนวณได้ ดังนั้นเพื่อที่จะหากระแสกริดที่แท้จริงจึงต้องมีแฟคเตอร์ลดกระแสลัดวงจรลงดิน ซึ่งแฟคเตอร์นี้เรียกว่า Current Division Factor ซึ่งอาจจะทำให้กระแสกริดมีค่าเท่ากับ 50% ของกระแสลัดวงจรลงดิน

กระแสกริดเป็นกระแสที่ไหลระหว่างกริดและดินรอบ ๆ กระแสกริดนี้ควรมีค่าน้อยกว่ากระแสลัดวงจรเสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด มีส่วนใดที่เป็นกระแสไหลลงกริด และลงดินไป การหาค่ากระแสกริดสูงสุดทำได้ดังนี้

กระแสกริดสูงสุด

$$I_G = C_P D_f I_g \qquad \text{..................(3.42)}$$

เมื่อ I_G = กระแสกริดสูงสุด

C_P = Corective projection Factor ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มของกระแสลัดวงจร เนื่องจากการขยายระบบในอนาคต (ถ้าไม่มีการขยายระบบ $C_P = 1$)

D_f = Decrement Factor : $D_f = 1$ ถ้าช่วงเวลาที่เกิดลัดวงจร $T_f \geq 0.5$ วินาที

S_f = Current Division Factor ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ลดทอนขนาดของกระแสลัดวงจรเนื่องจากระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่ออยู่กับกราวด์ของระบบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย D_f จะหาได้จาก

$$D_f = \sqrt{1+T_a(1-e^{-T_f/T_a})/T_f} \quad \text{.................(3.43)}$$

เมื่อ T_f = ช่วงเวลาของกระแสลัดวงจรลงดิน (วินาที)

T_a = Subtransient Time Constant (วินาที)

ซึ่ง T_a จะใช้อัตราส่วน X/R ของระบบที่ตำแหน่งลัดวงจรลงดินแทน X''/R'' และตารางที่ 3 จะแสดงค่า decrement factor ในกรณีความถี่ 60 H_Z และมีอัตราส่วน X/R เท่ากับ 20

ตารางที่ 3

T_f	Cycles (60 Hz)	D_f
0.008	1/2	1.65
0.10	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 หรือมากกว่า	30 หรือมากกว่า	1.00

ตารางที่ 3 แสดงค่า Decrement Factor

Symmetrical Grid Current

$$I_g = S_f I_f \quad \text{.................(3.44)}$$

เมื่อ I_g = กระแสที่ไหลในกริด (แอมแปร์)

I_f = กระแสลัดวงจรลงดิน (แอมแปร์)

S_f = แฟคเตอร์ลดทอนขนาดของกระแสลัดวงจร จะมีค่าประมาณ 0.5-1 หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.42 ก็จะได้ว่า

$$I_G = D_f S_f \cdot I_f \qquad \text{................(3.45)}$$

ค่า D_f พิจารณาได้จากตารางที่ 3

Thapar และคณะ ได้เสนอวิธีการหาค่ากระแสกริดที่ใช้ในการคำนวณศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว และศักดาไฟฟ้าสัมผัส เป็นค่าที่เหมาะสมกว่าที่จะใช้ค่ากระแสลัดวงจร เพื่อความประหยัดในการออกแบบ โดยทำการศึกษาหากระแสกริดโดยคำนึงถึงค่าความต้านทาน กราวด์กริด, พารามิเตอร์ของสาย Overhead Ground Wire, ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance) ระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Tower Span) ดังนี้

$$y' = G + jB \qquad \text{................(3.46)}$$

เมื่อ y'= Admittance of Ladder Network ที่ประกอบด้วย Overhead Ground wrire & Tower footing

$$Z = \frac{1}{y'} \qquad \text{................(3.47)}$$

$$I_G = \left[\frac{Z}{R_G + Z}\right] I_f \qquad \text{................(3.48)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การใช้แผ่นพลาสติกใส่เพื่อเพิ่มความต้านทานที่เท้าของมนุษย์

ในสถานีไฟฟ้าย่อยสามารถใช้แผ่นพลาสติกรองด้านล่างของชั้นหินกรวดหรือทางเดินคอนกรีตซีเมนต์ได้ เพื่อวัตถุประสงค์ให้ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ มีความต้านทานของเท้ามนุษย์กับพื้นดินให้มีค่าสูงขึ้น (แนวทางใหม่ ขั้นตอนที่ 3)

ระดับแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสขึ้นอยู่กับความต้านทานของวงจรอุบัติเหตุซึ่งเป็นเหตุจากกระแสไหลผ่านร่างกาย ในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีการปูหินกรวดเหนือบนพื้นดินมีความหนา 0.08-0.15 เมตร เพื่อเป็นการเพิ่มความต้านทานที่เท้าของมนุษย์ในพื้นที่สถานี สถานีไฟฟ้าย่อยบางแห่งที่มีทางเดินเท้าเป็นคอนกรีตซีเมนต์ ระหว่างและหลังฝนตก ทางเท้าเปียก ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีตจะมีค่าต่ำคือ 30 โอห์ม-เมตร ผลก็จะทำให้ความต้านทานที่เท้าต่ำลงด้วย แรงดันสัมผัสจะลดลง แต่แรงดันช่วงก้าวอาจจะมีค่าสูงกว่าระดับที่ยอมรับได้

การออกแบบเพื่อความปลอดภัยของระบบกราวด์จะมีความต้านทานสูงที่ยอมรับได้ การเพิ่มความต้านทานที่เท้าให้สูงขึ้นนั้นมีหลักการอย่างง่ายซึ่งสามารถนำมาใช้หาความต้านทานของเท้าที่สูงขึ้นได้คือ ใช้แผ่นพลาสติก เช่น โพลีเอทีลีน, เพอร์มาลอน, พีวีซี, นีโอพรีน โดยใส่ไว้ต่ำกว่าชั้นของหินกรวดหรือใต้ทางเดินคอนกรีตในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งจะทำให้ได้ความต้านทานของเท้าสูงขึ้นความต่างศักย์พื้นผิวดินขณะที่ใช้หรือไม่ใช้แผ่นพลาสติกได้ถูกประเมินด้วยโมเดลของการศึกษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการวางแผ่นพลาสติก อาจจะทำให้แรงดันสัมผัสเพิ่มขึ้นหรือลดลงบางเหตุการณ์ก็แย่ การเพิ่มขึ้นของแรงดันสัมผัสจะน้อยมาก และไม่เป็นผลให้ความต้านทานของเท้าเพิ่มขึ้น

ความต้านทานของเท้ากับแผ่นพลาสติกนั้น โดยเท้ามนุษย์ถูกนำมาใช้แทนโดยใช้ตัวนำแผ่นโลหะที่นำไฟฟ้ารัศมี 3 ซม. ปกติจะไม่คิดความต้านทานของรองเท้าและถุงเท้า ในรูปที่ 15 ก แสดงแผ่นโลหะที่ใช้แทนเท้าบนผิวของพื้นเรียบเสมอ แผ่นพลาสติกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง D ถูกทำให้กระจายในแนวราบที่ลึกลงไปความสูง h จากผิวของดิน ถ้ากระแสไหลผ่านแผ่นโลหะก็จะไหลผ่านดินด้วย หลังจากที่เอาแผ่นพลาสติกออกและเกิดการกระจายในเชิงรัศมีในดินหรือแผ่นพลาสติก ที่ปลายแผ่นพลาสติกกระแสสามารถไหลผ่านในทิศทางแนวตั้งด้วย

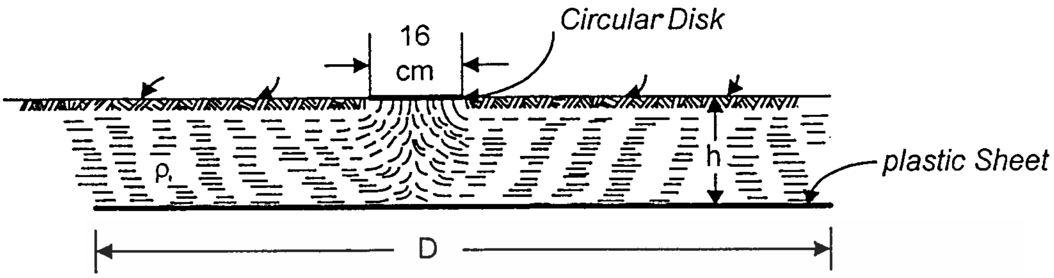
ได้นำคณิตศาสตร์มาใช้หาค่าความต้านทานของดินเหนือแผ่นพลาสติกในรูปของกระแสที่ไหลจากอิเลคโทรด จะทำให้ง่ายขึ้นเมื่อรูปแบบอิเลคโทรดเป็นทรงกระบอกแนวตั้งมีรัศมี r และความสูง h ถูกวางไว้ ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 15 ข ความต้านทานของกราวด์ ของตัวนำทรงกระบอกจะแสดงด้วยสมการ

$$R = \frac{\rho 1}{2\pi h} \ln \frac{D}{2r}$$

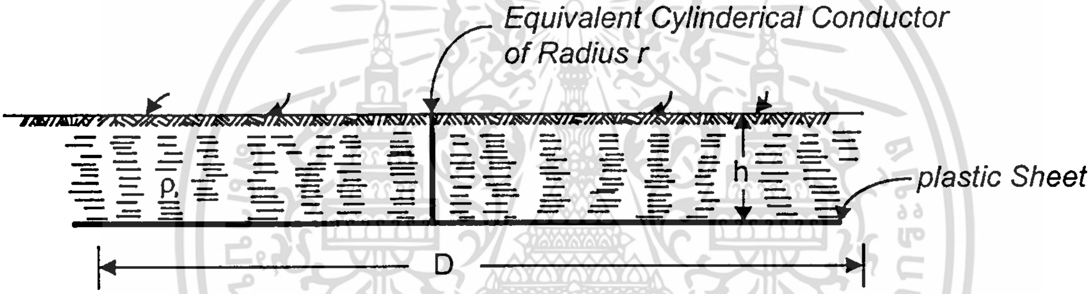
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $4\ cm < h < 20\ cm$

และ $D > 6h$



รูปที่ 15 ก แสดงแผ่นโลหะที่ใช้แทนเท้าบนผิวของพื้นเรียบ



รูปที่ 15 ข. แสดงอิเล็กโทรดรูปทรงกระบอกวางไว้จุดกึ่งกลางของพลาสติก

ตารางที่ 4

No.	h (cm)	r_{eq} (cm)
1	4	4.4
2	8	2.8
3	12	2.04
4	20	1.48

ตารางที่ 4 แสดงถึงรัศมีสมมูลย์ของตัวนำรูปทรงกระบอก

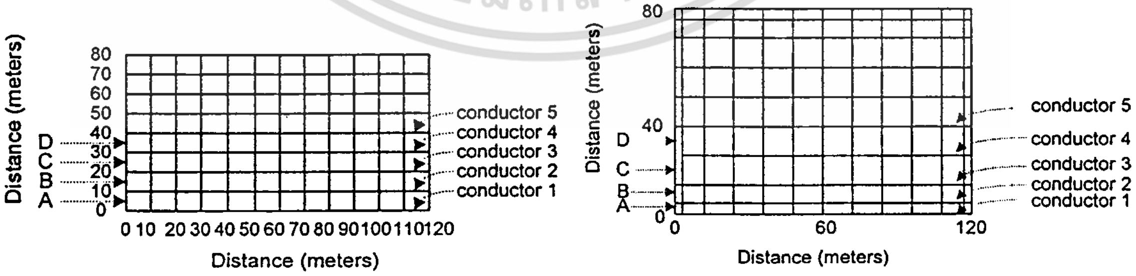
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกวัสดุเพื่อทำแผ่นพลาสติก ควรจะต้องเป็นแผ่นพลาสติกที่มีความทนต่ออุณหภูมิ, ออกซิเจน, ความชื้น, ผลทางเคมี และแบคทีเรียที่เติบโตในดินและอื่น ๆ แผ่นพลาสติกที่ใช้คลุมดินในสถานีไฟฟ้าย่อยควรมีอายุการใช้งานนานพอสมควร ความหนาหรือคุณภาพของแผ่นพลาสติกควรจะมีความแข็งแรงทนต่อการแตก และแรงฉีกขาดอีกทั้งไม่ควรเลือกแผ่นพลาสติกที่มีความหนาน้อยกว่า 6 มิล (0.15 มม.)

3.9 แนวทางใหม่ของการลดจำนวนตัวนำกริด

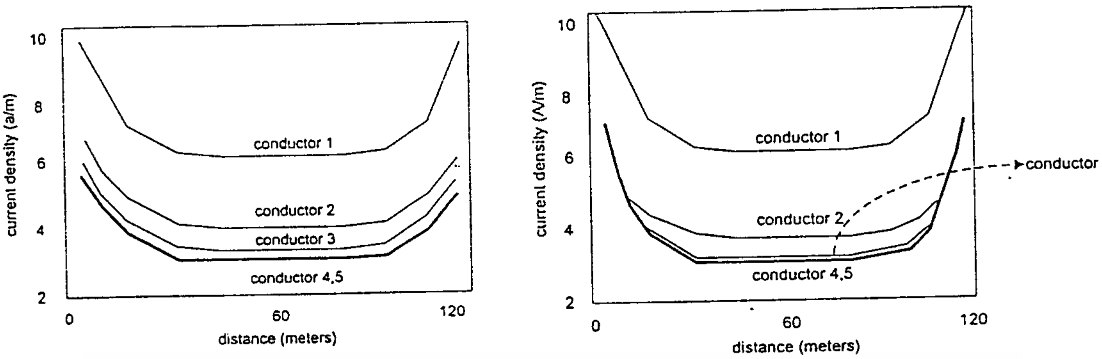
การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปแล้วจะมีระยะห่างของตะแกรงกริดห่างเท่ากันเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสโดยให้ความต้านทานของดินมีค่าน้อย ๆ อย่างไรก็ตามระยะตะแกรงกริดที่เท่ากันก็ยังมีอันตรายซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบเหมือนกันเพราะว่าการป้องกันและผลของกระแสที่อยู่รอบของเส้นรอบนอกตัวนำตะแกรงกริดเป็นผลให้แรงดันสัมผัสที่อยู่ตรงมุมของกริด มีค่ามากกว่าตรงกลางกริด ดังนั้นแนวทางใหม่ที่นำเสนอนี้เป็นการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่มีระยะตะแกรงกริดไม่สมมาตรซึ่งวิธีการนี้สามารถทำให้ความหนาแน่นของกระแสในตัวนำแผ่กระจายในชั้นของดินได้มากและเป็นการลดความต่างศักย์ที่พื้นผิวดินด้วยอีกทั้งยังประหยัดวัสดุที่นำมาทำตะแกรงกริดอย่างน้อย 30 %

ในการพิจารณาเปรียบเทียบ ข้อแตกต่างระหว่างระยะตะแกรงกริดที่เท่ากัน กับระยะตะแกรงกริดที่ไม่สมมาตร ดังรูปที่ (16-19) รูปที่ 16 แสดงให้เห็นพื้นที่ตะแกรงกริดและจำนวนตัวนำที่ฝังเหมือนกัน รูปที่ 17 แสดงให้เห็นถึงการแผ่กระจายของกระแสที่ตัวนำ รูปที่ (18-19) แสดงให้เห็นถึงการเกิดความต่างศักย์ ดังนั้นระบบต่อลงดินที่มีระยะห่างของตะแกรงกริดเป็นวิธีการที่ประหยัดวัสดุได้จึงนำเอาแนวทางใหม่นี้มาพิจารณาลดจำนวนตัวนำ

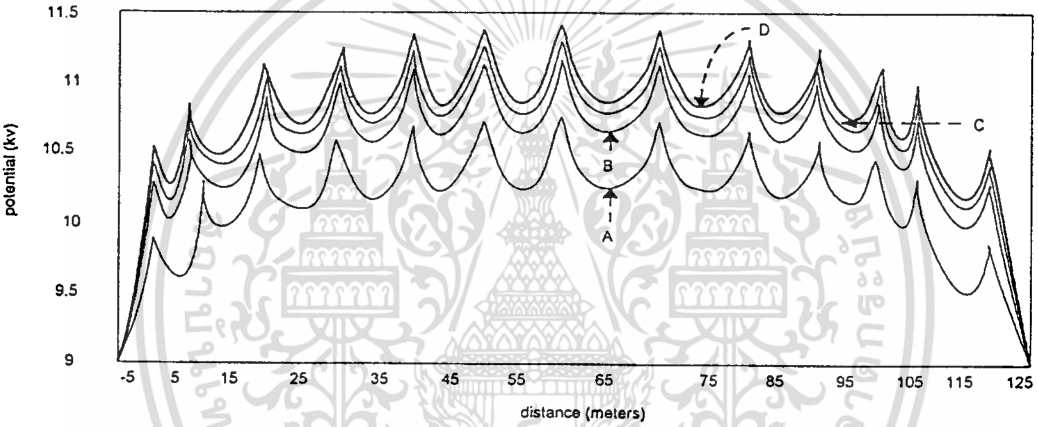


รูปที่ 16 แสดงพื้นที่ตะแกรงกริดที่มีระยะสมมาตร และไม่สมมาตร

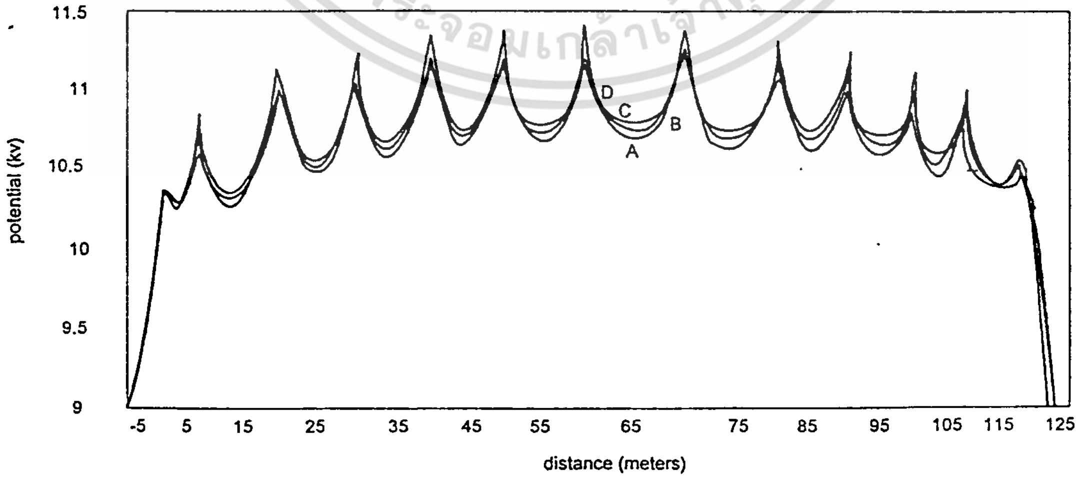
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 แสดงถึงการแผ่กระจายของกระแสที่ตัวนำ



รูปที่ 18 แสดงให้เห็นถึงการเกิดความต่างศักย์ของระยะกริดที่สมมาตร

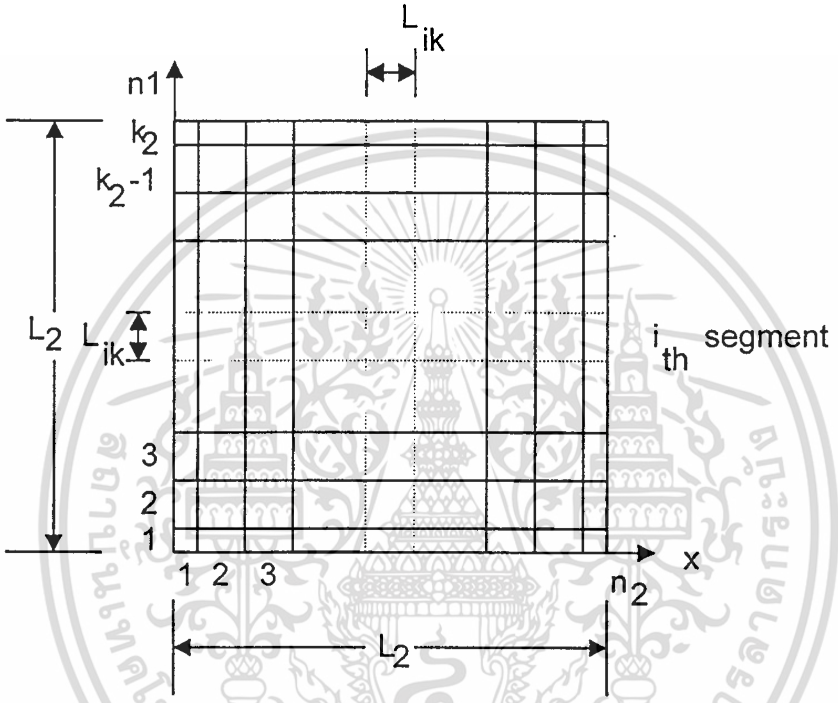


รูปที่ 19 แสดงให้เห็นถึงการเกิดความต่างศักย์ของระยะกริดที่ไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.1 สูตรของการหาระยะห่างตะแกรงกริดที่ไม่สมมาตร

ระยะห่างของระแกรงกริดที่ไม่สมมาตรนี้ไม่สามารถจะทำให้ความต่างศักย์ที่พื้นผิวดินลดลงได้ แต่พิสูจน์ได้ว่ามีความปลอดภัยและออกแบบให้ประหยัดได้ดี อย่างไรก็ตามปัญหาของช่องว่างที่ไม่สม่ำเสมอของระยะตัวนำกริด ในส่วนนี้ก็จะเป็นการกำหนดสูตรเพื่อใช้หาระยะของตัวนำ



รูปที่ 20 ระยะของกราวด์กริดที่ไม่สมมาตร

$(k_1 = n_2 - 1; k_2 = n_2 - 1)$

ในรูปที่ 20 L_1 และ L_2 เป็นด้านความยาวของตะแกรงกริด; n_1คือจำนวนตัวนำที่ขนานกับแกน x, และ n_2 คือจำนวนตัวนำที่ขนานกับแกน y, k_1 และ k_2 เป็นผลรวมแต่ละส่วนของตัวนำ โดย k_1 คือ จำนวนส่วนของตัวนำที่ขนานกับแกน x (k_1=n_2-1)ส่วน k_2 คือ จำนวนส่วนของตัวนำในทิศทางอื่น (k_2=n_1-1), i คือส่วนที่เรียงลำดับ; L_{ik} คือความยาวของแต่ละส่วน

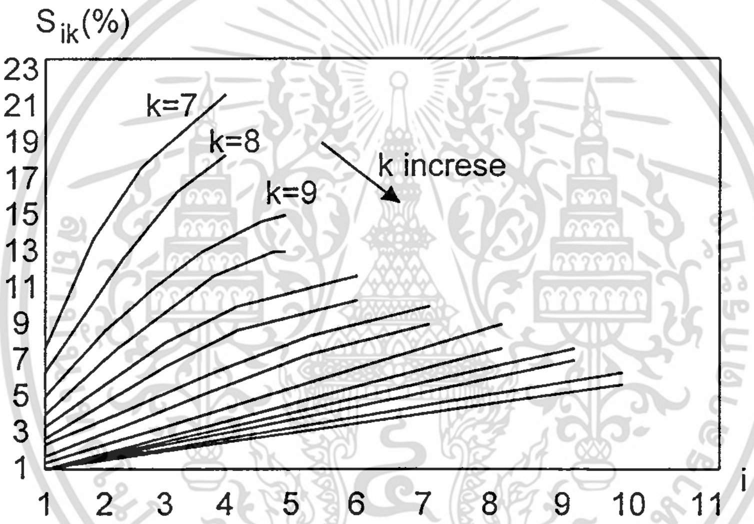
ถ้าตัวนำถูกแบ่งเป็น k ส่วนและ L_{ik} เป็นความยาวของแต่ละส่วน เปอร์เซ็นต์ของความยาวรวมของตัวนำ L จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

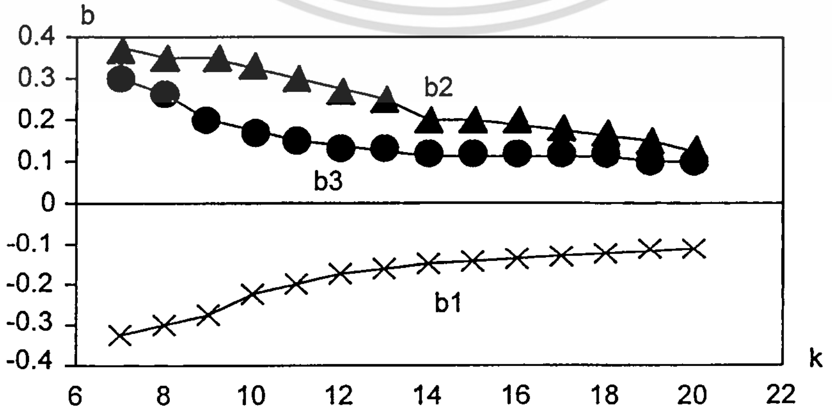
$$Sik = \frac{Lik}{L} \times 100\% \qquad \text{.................................(3.50)}$$

โดยที่ $i \le \begin{cases} \frac{k}{2} & \text{เมื่อ k เป็นเลขคู่} \\ \frac{k+1}{2} & \text{เมื่อ k เป็นเลขคี่} \end{cases}$

เมื่อ $L = L_1$ หรือ L_2; และ $k = k_1$ หรือ k_2 ขึ้นอยู่กับตัวนำที่ขนานกับด้าน x และด้าน y



รูปที่ 21.แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S_{ik} และ i กับ k



รูปที่ 22. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง b กับ k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5

k	b_1	b_2	b_3
7	-0.312	0.369	0.287
8	-0.281	0.339	0.254
9	-0.237	0.322	0.254
10	-0.211	0.312	0.191
11	-0.185	0.304	0.165
12	-0.175	0.255	0.162
13	-0.162	0.234	0.151
14	-0.161	0.199	0.150
15	-0.158	0.167	0.149
16	-0.146	0.157	0.139
17	-0.136	0.146	0.131
18	-0.132	0.133	0.127
19	-0.126	0.127	0.121
20	-0.119	0.122	0.117

ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง b กับ k

S_{ik}- i คือ ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของจำนวนส่วน k เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$S_{ik} = b_{1}e^{-b_2 i} + b3 \qquad \text{............(3.51)}$$

สัมประสิทธิ์ b_1, b_2 และ b_3 ขึ้นอยู่กับค่า k ในตารางที่ 5

3.9.2 วิธีการออกแบบระยะห่างของตะแกรงกริดที่ไม่สมมาตร สามารถหาได้โดยง่ายดังวิธีการต่อไปนี้ (แนวทางใหม่อยู่ในขั้นที่ 4)

1. คำนวนหาค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด E_{touch}
2. คำนวณหาผลรวมของความยาวตัวนำ *l* ของระยะกริดที่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l คือผลรวมทางความยาวตัวนำกริด

η คือ empirical coefficient เท่ากับ 1.7

ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

I_S คือกระแสที่ลัดวงจร (แอมแปร์)

3. คำนวณหาจำนวนตัวนำ

3.1 เมื่อพื้นที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสระยะกริดสมมาตร

$$n = \frac{l}{\sqrt{A}} \qquad \text{......................(3.53)}$$

3.2 เมื่อพื้นที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าระยะกริดสมมาตร

$$n_1 = \frac{l + L_1 - L_2}{2L_1}; n_2 = \frac{l + L_2 - L_1}{2L_2} \qquad \text{......................(3.54)}$$

$$n = n_1 + n_2$$

n_1 และ n_2 คือจำนวนตัวนำที่ขนานในทิศทางแกน x และ y

L_1 และ L_2 คือความยาวของกริดแต่ละด้าน

4. คำนวณหา percentage เพื่อประหยัดวัสดุในการทำกราวด์กริดของระยะกริดที่ไม่สมมาตร

$$\lambda = \frac{\alpha \frac{\beta}{100}}{1 + \alpha \frac{\beta}{100}} \times 100\ \% \qquad \text{......................(3.55)}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ α, β จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวนำ (n)

$$= \begin{cases} 121.1e^{-0.4n} + 1.4864 & 8 \le n \le 20 \\ 121.2e^{-0.3n} + 1.2664 & 20 \le n \le 30 \\ 121.2e^{-0.4n} + 1.1400 & n > 30 \end{cases} \qquad \text{............(3.56)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = -92.6e^{-0.07n} + 66.337 \qquad \text{.....................(3.57)}$$

5. คำนวณหาจำนวนตัวนำเมื่อระยะกริดไม่สมมาตร

5.1 พื้นที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส

$$n' = n(1-\lambda) \qquad \text{.....................(3.58)}$$

5.2 พื้นที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$n'_1 = n_1(1-\lambda), n'_2 = n_2(1-\lambda) \qquad \text{.....................(3.59)}$$

$$n' = n'_1 + n'_2$$

6. คำนวณหาระยะกริดที่ไม่สมมาตร

$$L_{ik} = \frac{S_{ik} \times L}{100} \qquad \text{.....................(3.60)}$$

$$S_{ik} = b_1 e^{-b_2 i} + b_3 \qquad \text{.....................(3.61)}$$

L_{ik} คือ ระยะกริดในแต่ละ segment

S_{ik} คือ เปอร์เซ็นต์ระยะกริดในแต่ละ segment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ขั้นตอนการคำนวณการออกแบบ

ข้อกำหนดการออกแบบระบบต่อลงดิน

1. $t_f t_f$ อยู่ในช่วงเวลา 0.25-1.0 วินาที
   (EGAT กำหนด = t_f = t_s = 1 วินาที)
2. I_G คำนวณจากวงจรที่เกี่ยวข้องปกติแล้ว $I_G \leq I_f$ เสมอ เพราะว่ามีกระแสลัดวงจรบางส่วนไหลออกจากระบบกราวด์ไปทางสาย Overhead Ground Wire ของ Tower (EGAT กำหนด $I_f = 3I_O$, 20 KA สำหรับระบบ 115 KV และ 40 KA สำหรับระบบ 230 KV)
3. p ของดินปกติจะวัดใช้วิธี wenner (Four point method) ปกติ EGAT จะเป็นผู้กำหนดค่า p หลังจากได้พิจารณา Test report แล้ว
4. ความหนาของหินกรวดประมาณ 0.08 – 0.15 เมตร (EGAT กำหนด h_s = 0.15 เมตร
5. ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดประมาณ 1000-5000 โอห์ม เมตร (EGAT กำหนด p_3 = 3000 โอห์ม-เมตร)
6. ความลึกของตะแกรงกริดประมาณ 0.5 – 1.5 เมตร (EGAT กำหนด h = 0.5 เมตร) ขนาดตัวนำที่ใช้ทำกริด และกราวด์ร็อดประมาณ AWG 2/0 – 500 MCM หรือ 67-250 mm^2 (EGAT กำหนด Bare Copper Cable NO.4/0 AWG 19 stands) (107.2 mm^2) ทำเป็นกริด และใช้ Copper covered หรือ copper clad steel ยาว 10 ฟุต (3 m) ขนาด $\phi\ 5/8''$ (198 mm^2) ทำเป็นร็อด

4.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจข้อมูลพื้นที่ (Field Data)

- กำหนดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (ตารางเมตร) : A
- คำนวณหาค่า Soil Resistivity (โอห์ม-เมตร) : p (เฉลี่ย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดของตัวนำ (Conductor size)

$$A(mm^2) = I\sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP}}{ln\left[1+\left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a}\right)\right]}}$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกริด (Conductor cross section ; mm^2)

I = กระแสลัดวงจรลงดิน (Fault current ; KA, r.m.s)

T_m = อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (Maximum allowable temperature :°C)

T_a = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature :°C)

T_r = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงที่ของวัสดุ (Reference temperature of material constant : °C)

α_o = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0°C (Thermal coefficient of resistivity at 0°C)

α_r = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ T_r°C (Thermal coefficient of resistivity at t_r°C)

ρ_r = ความต้านทานจำเพาะของความต้านทานที่อุณหภูมิ T_r°C (The resistivity of the ground conductor at t_r°C: $\mu\Omega/cm^3$)

t_o = เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (Time of current flow : sec)

TCAP = แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน :°C (Thermal capacity factor ; $J/cm^3/°C$)

$$TCAP = 4.184\ S_H . S_W$$

เมื่อ S_H = ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat : cal/g/°C)

S_W = ค่าความหนาแน่น (Specific weight : g/cm^3)

ขั้นตอนที่ 3 หา Step และ Touch voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{step50} = \left(1000 + 6C_s P\rho_s\right)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch50} = \left(1000 + 1.5C_s P\rho_s\right)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity : ohm - m)

ρ_S = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (Crush rock resistivity : ohm-m)

P = Proximity effect factor = $1 + 1.3\left[\frac{a}{h+h_S}\right]$

a = Equivalent redius of a foot = 0.106 m

h = ความลึกที่ฝังตัวนำ (Depth of burial conductor : m)

h_s = ความหนาของชั้นหินกรวด (Surface layer thickness:m)

C_s = Reduction factor

$$= 1 - a\left[\frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{(2hs + a)}\right]$$

t_s = ระยะเวลาที่ clear fault

ขั้นตอนที่ 4 Initial Design

กำหนดค่าเริ่มต้น ดังต่อไปนี้

- ระยะห่างของการวางตัวนำขนานกัน (Spacing between parallel conductor,D : m)
- ความยาวของตัวนำ (Conductor length, L_c : m)
- ความยาวของ Ground Rod (Length of ground rod, L_r : m)
- จำนวนของ Ground Rod (Number of ground rod, N_r)
- จำนวนของตัวนำในทิศแกน X (Number of parallel conductors in X-axis direction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวนของตัวนำในทิศแกน Y (Number of parallel conductors in Y-axis direction)

ขั้นตอนที่ 5 Grid Resistance

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

เมื่อ ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity : ohm-m)

A = พื้นที่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

h = ความลึกที่ฝัง grid (Depth of burial grid conductor : m)

L = ความยาวทั้งหมดของตัวนำ (Total length of ground conductor : m)

$= L_C + (N_r L_r)$

ขั้นตอนที่ 6 Grid Current

$$I_G = S_f I_f 1000$$

เมื่อ I_f = กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น (Ampere)

S_f = สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของกระแส (Current division factor)

= (total impedance)/(grid resistance)

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า GPR (Grid Potential Rise)

$$GPR = I_G \cdot R_G$$

ถ้า $GPR < E_{touch\ 50}$ ไปยัง step 12

ถ้า $GPR > E_{touch\ 50}$ ไปยัง step 8

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่า Mesh voltage และ Step voltage

mesh voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณจาก $E_m = \frac{\rho \cdot K_m K_i I_G}{L}$

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

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

$$L = L_c + (N_r . L_r)$$

Step voltage

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

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

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่า Mesh voltage

ถ้า $E_m < E_{touch\ 50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 10

ถ้า $E_m > E_{touch\ 50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่า Step voltage

ถ้า $E_s < E_{step50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

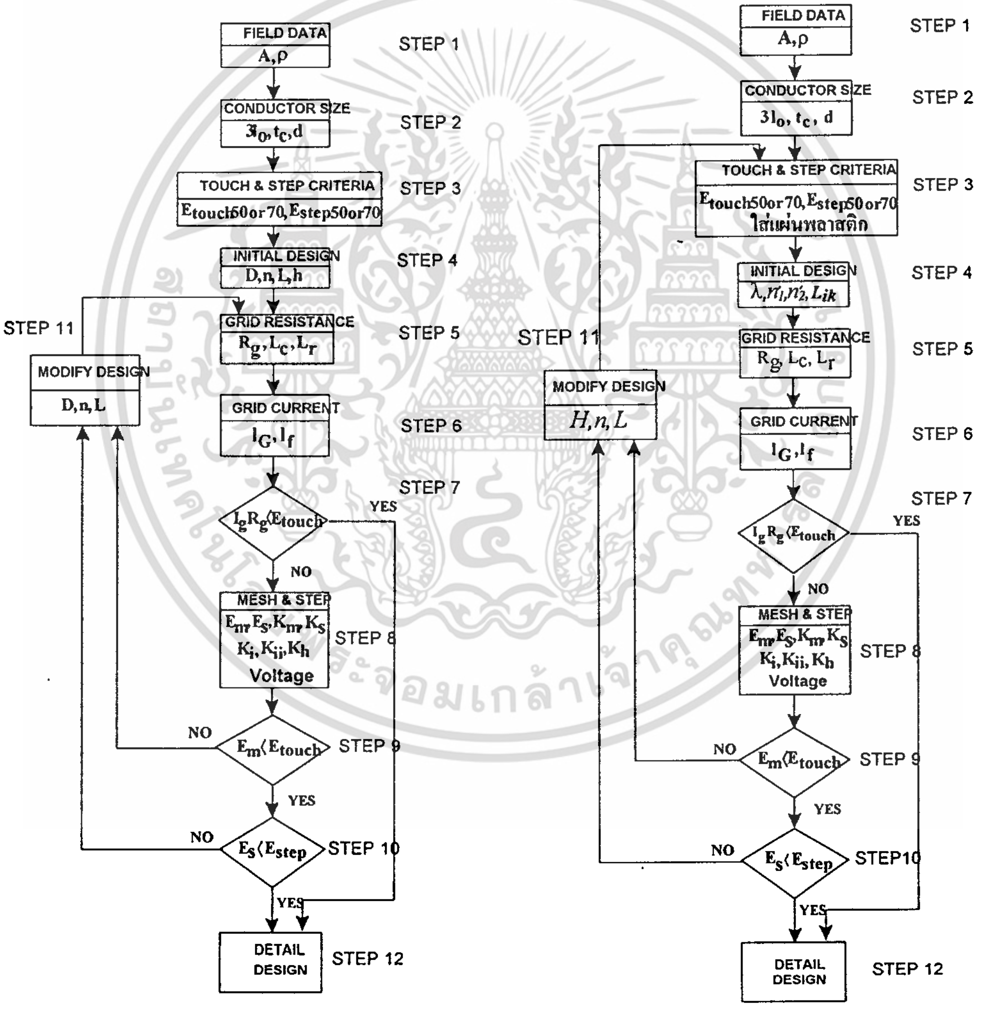
ถ้า $E_s > E_{step50}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 Modify Design

ขั้นตอนนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าข้อมูลที่กำหนดไว้ในตอนต้น เนื่องมาจากข้อมูลดังกล่าวคำนวณแล้วไม่ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ตัวแปรที่จะเปลี่ยนแปลงมี D, n, L โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- D จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านแนวราบ (แกน x) และแนวดิ่ง (แกน y) โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งสองด้านจะต้องใกล้เคียงกัน
- n จะเพิ่มทั้งสองด้านทีละ 1 ก็ต่อเมื่อ D ใกล้เคียง 1
- เมื่อเปลี่ยน D, n, L จะเปลี่ยนด้วย $(L = D_x N_y + D_y N_x)$
- การออกแบบ Ground Grid หากไม่ปลอดภัยจะมีการ เพิ่ม Ground Rod เข้าไปด้วย
- ถ้าไม่ปลอดภัยก็ให้มีการแบ่งกริดให้ถี่ขึ้น โดยยังไม่มีการเพิ่ม Ground Rod ซึ่งถ้ายังไม่ปลอดภัยอีกก็ให้เพิ่ม Ground Rod



รูปที่ 23 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบวิธีการเดิมกับแนวทางใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตัวอย่างในการคำนวณและการออกแบบ

ข้อมูลสำหรับการคำนวณระบบกราวด์

- พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (A) = 75x120 = 9000 m^2
- ความต้านทานจำเพาะของหิน (ρ_S) = 4000 ohm-m
- ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) = 17 ohm-m
- ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (I_f) = 50 KA
- เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (t_c) = 0.5 sec
- อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (T_m) = 700 °C
- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_a) = 40 °C
- สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน (α_r) = 0.00393
- ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง (ρ_r) = 1.7241 $\mu\Omega/cm^3$
- TCAP (Thermal Coefficient factor) = 3.442 $J/cm^3/°C$
- K_o (Thermal coefficient) $= \dfrac{1}{\alpha_r} - T_r = 234$
- พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ : mm^2

คำนวณหาขนาดของสายกราวด์

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

$$A = 50\sqrt{\frac{(0.5)(0.00393)(1.7241)(10^4)}{(3.422)ln\left[1+\dfrac{(700-40)}{(234+40)}\right]}}$$

$$A = 142.06 \ mm^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าศักดาช่วงก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส

- ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_S) = 4000 ohm-m
- ความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) = 0.1 m
- ความลึกของตัวนำตะแกรงกริด (h) = 0.5 m
- ระยะเวลาของกระแสลัดวงจร (T_s) = 0.5 sec
- a (Equivalent radius of a foot) = 0.106 m
- P (Proximity effect factor) $= 1+1.3\left[\frac{a}{h+h_S}\right]$
- C_s (Reduction factor) $= 1\text{-}a\left[\frac{(1-\frac{\rho}{\rho_S})}{(2h_S+a)}\right]$

$$= 1-0.106\left[\frac{1-(17/4000)}{(2\times 0.1+0.106)}\right]$$

$$= 0.6551$$

Touch voltage

$$E_{touch\ 50} = (1000+1.5C_S.P.\rho_S)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$=\left[1000+(1.5\times 0.655)\times(1.2297\times 4000)\right]\frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{touch\ 50} = 957.11 \quad volts$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step voltage

$$E_{step\ 50} = \left(1000 + 6 \cdot C_S \cdot P \cdot \rho_S\right)\frac{0.116}{\sqrt{t_S}}$$

$$= \left[1000 + \left(6 \times 0.6551 \times 1.2297 \times 4000\right)\right]\frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{step\ 50} = 3336.23 \quad volts$$

รายละเอียดของการปักกราวด์กริด

- พื้นที่ของกราวด์กริด (A)	=	9000	m^2
- ระยะห่างระหว่างตัวนำ (D)	=	10	m
- ความลึกของตัวนำกริด (h)	=	0.5	m
- จำนวนแท่งกราวด์ (N_r)	=	55	pcs
- ความยาวของกราวด์ร็อด ($L_r = N_r x 3.048$)	=	55 x 3.048	m
- ความยาวของตัวนำกริด (L_c)	=	2350	m
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน x (N_x)	=	9	
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน y (N_y)	=	13	

การคำนวณหาค่าความต้านทานของกราวด์กริด

ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ประกอบด้วยกราวน์กริดและกราวด์ร็อด

$$L = L_c + 1.15\ L_r$$

$$= 2350 + 1.15\ (55 \times 3.048)$$

$$= 2542.79\ m$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 17\left[\frac{1}{2542.79} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 9000}}\left(1 + \frac{1}{1 + 0.50\sqrt{20/9000}}\right)\right]$$

$R_g = 0.0860$ ohms

การคำนวณหาค่า Grid Potential rise

เมื่อกระแสกริด (I_G) = 50000 A

$GPR = I_G R_G$

$= 50\ KA \times 0.0860$

$= 4300$ V

$I_G R_G (4300) > E_{touch\ 50}\ (957.118)$

การคำนวณหาค่า Mesh voltage และ Step voltage

mesh voltage

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

เมื่อ $I_G = 50000\ A$

$N_A = 9,\ N_B = 13$

$N = \sqrt{N_A . N_B} = 11,\ K_{ii} = 1$

$h = 0.5\ m$

$h_o = 1\ m$

$D = 10\ m$

$K_h = \sqrt{1 + h/ho} = 1.2247$

$d = 0.0134\ m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_i = 0.656 + 0.172\ N$$

$$= 0.656 + (0.172 \times 11) = 2.548$$

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

$$= \frac{1}{2\pi}\left[ln\left(\frac{10^2}{16 \times 0.5 \times 0.0134} + \frac{(10 + 2 \times 0.5)^2}{8 \times 10 \times 0.0134} - \frac{0.5}{4 \times 0.0134}\right) + \frac{1}{1.2247} ln \frac{8}{\pi(2 \times 11 - 1)}\right]$$

$$K_m = 0.8309$$

$$E_m = \frac{(17)(0.8309)(2.548)(50000)}{2542.79}$$

$$E_m = 707.71 \quad volts$$

$$E_m (707.7v) \langle E_{touch50} (957.1v)$$

Step voltage

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

เมื่อ $I_G = 50000 \quad A$

$L = 2542.79 \cdot m$

$N = MAX\ [N_A, N_B] = 13$

$K_i = 0.656 + (0.172 \times 13) = 2.892$

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

$$= 0.3804$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_s = \frac{(17)(0.3804)(2.892)(50000)}{2542.79}$$

$$E_s = 367.74 \quad volts$$

$$E_s(367.74) < E_{step50}(3336.23)$$

การตรวจสอบ Mesh voltage และ Step voltage

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า

$$E_m\ (707.71v) < E_{touch\ 50}\ (957.11v)$$

$$E_s\ (367.4v) < E_{step\ 50}\ (3336.23v)$$

สรุปว่า การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

4.3 ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบการต่อลงดิน

สถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115/22 KV. มาตรฐานการคำนวณและการออกแบบ (IEEE Guide for Safety is Substation Grounding : IEEE 80-1986)

ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

- ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity)	=	1.015	ohm-m
- ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต (Concrete Resistivity)	=	51.6	ohm-m
- กระแสฟอล์ตสูงสุด (Maximum r.m.s. fault current)	=	25.0	KA
- ระยะเวลาที่เกิดฟอล์ต (Fault duration time)	=	1.0	sec.
- ขนาดของกราวด์ร็อด (Ground rod size)	=	$\phi \frac{5''}{8} \times 3\ m$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Point	Measured Values (ohm-m)			
	B(m)	15	25	35
	A(m)	3	3	7
P1	P1 X	0.05	0.01	0.03
	P1 Y	0.04	0.02	0.05
P2	P2 X	0.02	0.01	0.02
	P2 Y	0.03	0.04	0.06
R(Average)	$\sum$ R/N	0.035	0.02	1.04
ρ(Average)	2πAR	0.6597	0.6283	1.759
ρ(Average) = (0.6597+0.6283+1.759)/3 = 1.015 ohm-m				

ตารางที่ 6 ตารางทดสอบการหาค่าความต้านทานของดิน

การคำนวณหาขนาดกราวด์กริด (Calulation for ground wire size)

$$A_{mm^2} = I\sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{ln\left[1+\left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a}\right)\right]}}$$

พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ (A)

- กระแสลัดวงจรลงดิน (I) = 25 KA
- ระยะเวลาที่เกิดฟอล์ต (T_c) = 1 Sec
- อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_a) = 40 °C
- สัมประสิทธิ์ของความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิอ้างอิง (α_r) = 0.00381
- ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง (ρ_r) = 1.7774 μΩ / cm^3
- แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน(TCAP) = 3.422

-Thermal Coefficient (K_o) = 242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = 25\sqrt{\frac{\frac{1\times 0.00381\times 1.7774\times 10^{4}}{3.422}}{ln\left[1+(\frac{1084-40}{242+40})\right]}}$$

$$= 89.38 \quad mm^2$$

(เลือกขนาดตัวนำกริด 95 mm^2)

การคำนวณหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว (Calculation Touch Voltage and Step Voltage)

Touch Voltage

$$E_{touch50} = \left(1000+1.5C_s\rho_s\right)\frac{0.116}{\sqrt{T_s}}$$

เมื่อ ระยะเวลาของกระแสฟอล์ต = 1 sec

ความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต (ρ_S) = 51.6 ohm-m

ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ_S) = 1.015 ohm-m

Reflection Factor (K) $= \frac{\rho-\rho_s}{\rho+\rho_s}$

$$= \frac{1.015-51.60}{1.105+51.60}$$

$$= -0.961$$

Reduction Factor C_s = 0.750

K = -0.961

h_s = 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{touch50} = \left(1000 + (1.5 \times 0.75 \times 51.60)\right)\frac{0.116}{\sqrt{1}}$$

$$= (1058.05)\frac{0.116}{1}$$

$$= 122.734 \text{ Volts}$$

<u>Step Voltage</u>

$$E_{step50} = \left(1000 + 6C_s\rho_s\right)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$= \left(1000 + (6 \times 0.75 \times 51.6)\right)\frac{0.116}{\sqrt{1}}$$

$$= (1232.2)\frac{0.116}{1}$$

$$= 142.935 \text{ Volts}$$

<u>ข้อมูลเบื้องต้น</u> (Initial Data)

- พื้นที่ของกราวด์กริด (Ground Grid Equivalent area) 34×60 = 2040.00 m^2
- ความลึกของตัวนำ (h) = 0.50 m
- ระยะห่างระหว่างตัวนำ (D) = 5.00 m
- จำนวนแท่งกราวด์ (N_r) = 48 *rods*
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน X (N_x) = 10
- จำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน Y (N_y) = 7
- ความยาวของตัวนำกริด $[L_c = (34 \times 10) + (60 \times 7)]$ = 760 m
- ความหนาของพื้นคอนกรีต (h_s) = 0.20 m
- ความยาวของตัวนำร็อด $[L_r = N_r \times 2.43]$ = 116.64 m.

การคำนวณหาความต้านทานของกราวด์ (Calculation of Grounding Resistance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ L = ผลรวมทั้งหมดของความยาวตัวนำ

= ความยาวของตัวนำกริด (L_c) + ความยาวของตัวนำร็อด (L_r)

= 760+116.64 = 876.6 m

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน

จะได้ว่า

$$R_g = 1.015\left[\frac{1}{876.64}+\frac{1}{\sqrt{20\times 2040}}\left(1+\frac{1}{1+0.50\sqrt{\frac{20}{2040}}}\right)\right]$$

$$= 1.015\left[\frac{1}{876.64}+\frac{1}{201.99}\left(1+\frac{1}{1+0.50\times 0.099}\right)\right]$$

$$= 1.015\left[0.001140+0.005\left(1+\frac{1}{1+0.495}\right)\right]$$

$$= 1.015[0.001140+0.005(1+0.952)]$$

$$= 1.015[0.001140+0.005(1.952)]$$

$$= 1.015[0.001140+0.0096]$$

$$= 1.015\times 0.0108$$

Rg = 0.0110 Ohm

การคำนวณหากระแสกริด (Calculation of Grid Current)

$$I_G = S_f I_f 1000$$

เมื่อ Current Division Factor (S_f) = 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maximum Fault Current (I_f) = $25\ KA$

$$I_G = 0.6 \times 25 \times 1000$$
$$= 15 \quad KA$$

การตรวจสอบค่า GPR (Grid Potential Rise)

$$GPR = I_G R_G$$
$$= 15 \times 1000 \times 0.011$$
$$= 167.2$$
$$I_G R_G (167.2V) > E_{touch50}(122.734V)$$

การคำนวณค่า Mesh Voltage และ Step Voltage

Mesh Voltage

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

K_m = Spacing for Mesh Voltage

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

$$= \frac{1}{2\pi}\left[ln\left(102.365 + \frac{16}{0.26376} - 11.374\right) + 0.8165\, ln\left(\frac{8}{49.4273}\right)\right]$$

$$= 0.15915\left[ln(151.65) + 0.8165\, ln(0.16185)\right]$$
$$= 0.15915\left[5.022 + 0.8165(-1.821)\right]$$
$$= 0.15915\left[3.535\right]$$
$$K_m = 0.5626$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $n = \sqrt{n_A \times n_B} = \sqrt{10 \times 7} = 8.367$

n_A = จำนวนตัวนำที่วางขนานกันในแนวแกน X

n_B = จำนวนตัวนำที่วางขนานกันในแนวแกน Y

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำ = 3 m

$K_{ii} = 1$

$K_i = 0.656 + (0.172 \times n) = 0.656 + (0.172 \times 8.367) = 2.095$

$K_h = \sqrt{1+h} = \sqrt{1+0.5} = 1.224745$

h = ความลึกของตัวนำกริด (0.5 m)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำกริด (0.0110 m)

$L = L_c + 1.15L_r = 60 + [1.15 \times 117] = 894.14$

ดังนั้น

$$E_m = \frac{1 \times 0.5626 \times 2.095 \times 15 \times 1000}{894.14}$$

$$E_m = 20.069 \quad olts$$

$$E_m (20.069V) < E_{touch50}(122.73V)$$

Step Voltage

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

เมื่อ K_s = Spacing for Step Voltage

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

$$= 0.31818[1 + 0.286 + 0.33333(0.98788)]$$

$$= 0.31818[1.615]$$

$$K_s = 0.51386$$

$$L = L_c + 1.15L_r = 60 + [1.15 \times 117] = 894.136$$

$$K_i = 0.656 + (0.172 \times 10) = 2.376$$

n = จำนวนตัวนำที่วางขนานกันมากที่สุดในแต่ละด้าน max. (n_x, n_y)

$n = 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$E_s = \frac{1 \times 0.51386618 \times 2.376 \times 15 \times 1000}{894.14}$$

$$= 20.790 \text{ Volts}$$

$$E_s(20.790V) < E_{step50}(142.94V)$$

การตรวจสอบ Mesh Voltage และ Step Voltage

<u>จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า</u>

$$E_m(20.069V) < E_{touch50}(122.73V)$$

$$E_s(20.790V) < E_{step50}(142.94V)$$

<u>สรุปได้ว่า</u> การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

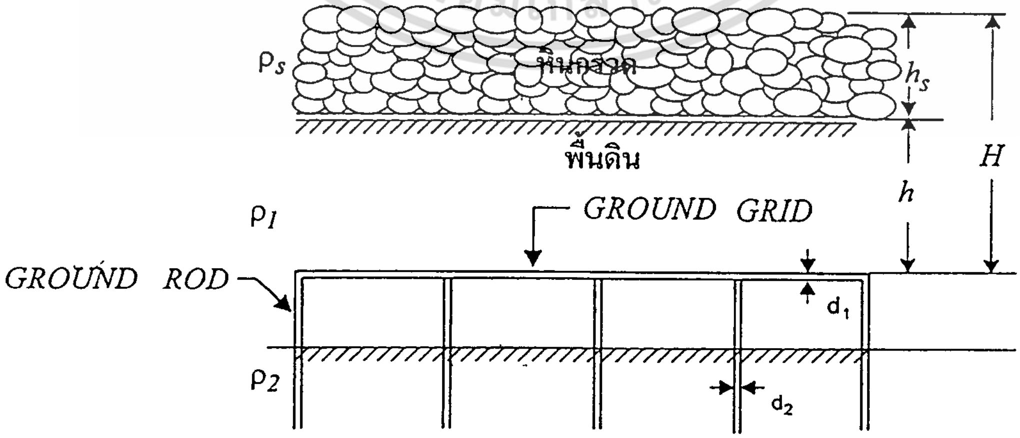
บทที่ 5

ผลของการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แนวทางตาม ANSI/IEEE Std.80-1986 [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกันโดยทั่วไป สำหรับการออกแบบโดยใช้แผ่นพลาสติกใส่เพิ่มเข้าไปเหนือตะแกรงกริดเป็นบางจุดนั้น ก็ได้มีวิธีการคำนวณให้เห็นกรณีที่ไม่ใส่กับใส่แผ่นพลาสติก พร้อมทั้งโปรแกรมการออกแบบอีกด้วย อีกทั้งวิธีการใหม่ซึ่งสามารถลดจำนวนตัวนำและประหยัดวัสดุตัวนำกริดได้ถึง 30-40% ได้แสดงตัวอย่างให้เห็นการคำนวณดังต่อไปนี้

ตัวอย่างสถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 115 KV

ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด	(ρ_s)	=	3000 Ω-m
ความต้านทานจำเพาะของดิน	(ρ)	=	11.7 Ω
ความลึกของกราวด์กริดใต้ระดับผิวบนสุด	(H)	=	0.65 m
ความลึกของกริด	(h)	=	0.5 m
ความหนาของชั้นหินกรวด	(h_s)	=	0.15 m
เส้นผ่านศูนย์กลางของกราวด์กริด	(d_1)		
เส้นผ่านศูนย์กลางของกราวด์ร็อด	(d_2)		



รูปที่ 24 ลักษณะการฝังกราวด์กริดและกราวด์ร็อด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ในกรณีที่คิดผลของการโรยหินกรวด+คิดผลเนื่องจากมีระบบกราวด์ฝังอยู่ในดิน

<u>ขั้นตอนการคำนวณ</u>

1. หาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย mm^2 : (A)

หาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 70 เมตร, ยาว 76 เมตร

พื้นที่ = กว้าง×ยาว (ตารางเมตร)

= 70×76 (ตารางเมตร)

= 5320 ตารางเมตร

2. หาความต้านทานจำเพาะของดินโดยเฉลี่ย Ω:(ρ)

ข้อมูลทั้งหมดได้จาก Test of Record ด้านหลังการคำนวณ

3. หาขนาดของตัวนำ (mm^2) : (A)

ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน	(I_f)	=	50 KA
อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย	(T_m)	=	700 °C
เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร	(T_c)	=	0.6 sec
อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	(T_a)	=	40 °C
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ	T_r (α_r)	=	0.00393
ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ	(ρ_r)	=	1.7241 ($\mu\Omega / cm^3$)
แฟคเตอร์ทางความจุความร้อน (TCAP)		=	3.422 $J/cm^3/°C$
K_o		=	234

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

$$A = 50\sqrt{\frac{(0.6)(0.00393)(1.7241)(10^4)}{(3.422)\ln[1+(700-40)/(234+40)]}}$$

$$A = 156.62387 mm^2$$

4. หาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ความลึกของกริด (h) = 0.5 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) = 0.15 m

ความต้านทานของหินกรวด (ρ_s) = 3000 Ω-m

Proximity Effect (P)

$$= 1+\frac{1.3a}{H}$$

$$= 1+\frac{1.3(0.106)}{0.5+0.15}$$

$$= 1.212$$

แฟคเตอร์ลดเนื่องจากการโรยหินกรวด (C)

$$C_S = 1-a\left[\frac{1-\rho/\rho_s}{2h_s+a}\right]$$

$$C_S = 1-0.106\left[\frac{(1-(117/3000))}{(2(0.15)+0.106)}\right]$$

$$C_S = 0.7399$$

กรณีที่คิดผลของการโรยหินกรวด+คิดผลเนื่องจากมีระบบกราวด์กริดฝังอยู่ในดิน

$$R_{TS} = R_B + 6C\rho_S\left(1+\frac{1..3a}{H}\right)$$

$$R_{TS} = 1000+\left[(6\times0.7399\times3000)\left(1+\frac{1.3\times0.106}{0.65}\right)\right]$$

$$R_{TS} = 17141.65\Omega$$

$$R_{TP} = R_B + 1.5C\rho_S\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)$$

$$R_{TP} = 1000+\left[(1.5\times0.7399\times3000)\left(1+\frac{1.3\times0.106}{0.65}\right)\right]$$

$$R_{TP} = 5035.41\Omega$$

เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (T) = 0.6 sec

$$E_{touch50} = \left[R_B + 1.5C\rho_S\left(1+\frac{1.3a}{H}\right)\right]\frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

$$E_{touch50} = (1000+[(1.5)(0.7399)(1.212)(3000)])\frac{0.116}{\sqrt{0.6}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{touch50} = 754.1085V$$

$$E_{step50} = \left[R_B 6C\rho_s \left(1 + \frac{1.3a}{H} \right) \right] \frac{0.116}{\sqrt{0.6}}$$

$$E_{step50} = \left(1000 + [(6)(0.7399)(1.212)(3000)]\right) \frac{0.116}{\sqrt{0.6}}$$

$$E_{step50} = 2567.1679V$$

5. หาความต้านทานของกราวด์กริด

ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (D)	= 16 m
ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ใช้ทำกราวด์กริด (L)	= 1918 m
ความยาวของกราวด์ร็อด (L_r)	= 3 m
จำนวนของกราวด์ร็อด (N_r)	= 57 pcs
จำนวนตัวนำที่ขนานกันในแนวแกนX (N_A)	= 5 pcs
จำนวนตัวนำที่ขนานกันในแนวแกนY (N_B)	= 5 pcs
ความลึกของกราวด์กริด (h)	= 0.5 m
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (d)	= 0.011 m.

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20 / A}} \right) \right]$$

$$R_G = 11.7 \left[\frac{1}{1918} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 5320}} \left(1 + \frac{1}{1 + \left(0.5\sqrt{20 / 5320}\right)} \right) \right]$$

$$R_G = 0.07677\Omega$$

6. Check Grid Potential Rise

$$I_G = 50000A$$

$$I_G R_G = (5000)(0.07677) = 3838.5V > E_{touch50}(754.1085V)$$

7. Check Mesh & Step Voltage

$$I_G = 50000A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_h = (\sqrt{1+(h+h_o)}) \quad \text{เมื่อ} \quad h = h_o$$

$$K_h = \sqrt{1+(0.5/1)}$$

$$K_h = 1.224$$

K_{ii} = 1.0 สำหรับมีกราวด์รีอดอยู่ที่มุมของกริด

$$N_m for E_m = \sqrt{(N_A N_B)} \quad = 5 \quad (N_A = 5, N_B = 5)$$

$$N_s for E_s = MAX(N_A, N_B) \quad = 5$$

$$L = L_c + 1.15(N_r L_r)$$

$$L = 1747 + 1.15(57 \times 3)$$

$$L = 1943.65$$

$$K_i for E_m = 0.656 + 0.172 N_m = 1.516$$

$$K_i for E_s = 0.656 + 0.172 N_s = 1.516$$

$$K_i = \frac{1}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{16^2}{(16)(0.5)(0.011)} + \frac{(16+(2)(0.5))^2}{(8)(16)(0.011)} - \frac{0.5}{(4)(0.011)}\right) + \frac{1}{1.224}\ln\frac{8}{\pi((2)(5)-1)}\right]$$

$$K_m = 1.11556$$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{16+0.5} + \frac{1}{16}(1-0.5^{5-2})\right]$$

$$K_s = 0.35501$$

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

$$E_m = \frac{(11.7)(1.11556)(1.516)(50000)}{1943.65}$$

$$E_m = 509.0142V$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_s = \frac{(11.7)(0.35501)(1.516)(50000)}{1943.65}$$

$$E_s = 161.9860V$$

8. Check Mesh & Step Voltage

$E_m(509.0142V) < E_{touch50}(754.1085V)$

$E_s(161.9860V < E_{touch50}(2567.1679V)$

9. Detailed Design

จากการคำนวณที่ผ่านมาได้ผลรับตามเงื่อนไข ของ Flow Chart บล็อกที่ 9,10 แสดงว่าการออกแบบนี้ปลอดภัย

5.2 ในกรณีใส่แผ่นพลาสติกเพิ่ม

ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_S) = 3000 $\Omega - m$

ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) =11.7 Ω

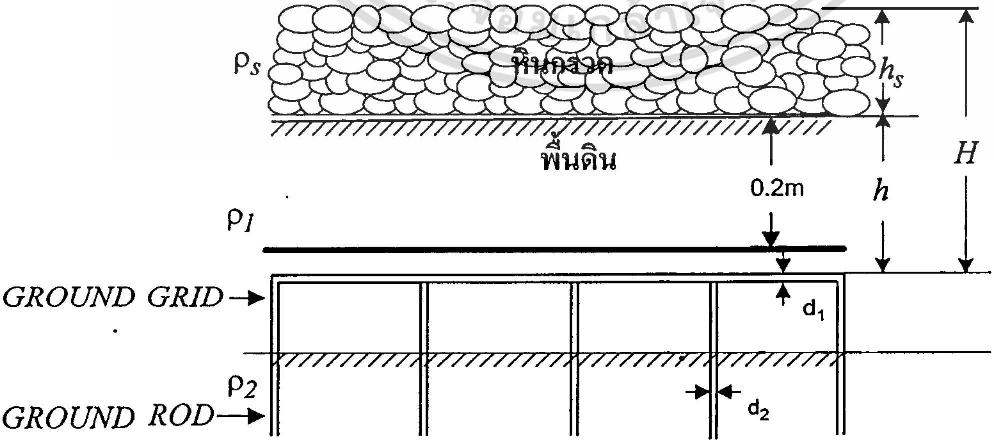
ความลึกของกราวด์กริดใต้ระดับผิวบนสุด *(H)* = 0.6 m

ความลึกของกริด *(h)* = 0.5 m

ความหนาของชั้นหินกรวด (h_S) = 0.1 m

ความลึกของแผ่นพลาสติก = 0.2 m

ความหนาของแผ่นพลาสติกควรมากกว่า 0.15 mm



รูปที่ 25 ลักษณะการฝังแผ่นพลาสติก,กราวด์กริดและกราวด์ร็อด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ขั้นตอนการคำนวณ</u>

1. หาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย mm^2 : (A)

พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 70 เมตร,ยาว 76 เมตร

พื้นที่ = กว้าง×ยาว (ตารางเมตร)

= 70×76 (ตารางเมตร)

= 5320 ตารางเมตร

2. หาความต้านทานจำเพาะของดินโดยเฉลี่ย (Ω):(ρ)

$$(11.0 + 12.47 + 12.71 + 11.68 + 10.64)/5 = 11.770034\Omega$$

ข้อมูลทั้งหมดได้จาก Test of Record ด้านหลังการคำนวณ

3. หาขนาดของตัวนำ (mm^2) : (A)

ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (I_f)	= 50 KA
อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (Tm)	= 700 °C
เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร (Tc)	= 0.6 sec
อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Ta)	= 40 °C
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ Tr (α_r)	= 0.00393
ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ Tr (ρ_r)	= 1.7241 $\mu\Omega / cm^3$
แฟคเตอร์ทางความจุความร้อน (TCAP)	= 3.422J/cm^3/°C
K_o	= 234

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

$$A = 50\sqrt{\frac{(0.6)(0.00393)(1.7241)(10^4)}{(3.422)\ln[1+(700-40)/(234+40)]}}$$

$$A = 155.62387mm^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ความหนาของชั้นหินกรวด (h_S)	= 0.10 m
ความต้านทานของหินกรวด (ρ_S)	= 3000 $\Omega - m$
รัศมีของสมมูลย์ของเท้า (b)	= 0.08 m
ระยะห่างระหว่างเท้า (d_f)	= 1 m

$$X = X_1 = \frac{h_s}{b} = \frac{0.1}{0.08} = 1.25$$

$$X = X_2 = \frac{h_s}{d_f} = \frac{0.1}{1} = 0.1$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$K = \frac{11.7 - 3000}{11.7 + 3000}$$

$$K = -0.99$$

จากกราฟ Function F (X) Versus X and Reflection Factor K

$$X_1 = 1.25 \therefore F(X_1) = 0.57$$

$$X_2 = 0.1 \therefore F(X_2) = 0.07$$

$$R_f = \frac{\rho_S}{b} F(X_1) = \frac{3000}{(4)(0.08)}(0.57) = 5343.75\Omega$$

$$R_{mf} = \frac{\rho_2}{2\pi d_f} F(X_2) = \frac{3000}{2\pi\,(1)}(0.07) = 33.4225\Omega$$

$$R_{2F} = 2(R_f - R_{Mf})$$

$$R_{2F} = 2(5343.75 - 33.4225)$$

$$R_{2F} = 10620.6549\Omega$$

$$R_{2F} = \frac{1}{2}(R_f + R_{Mf})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{2F} = 2670.1637\Omega$

5. หาค่าความต้านทานของแผ่นพลาสติก

ความลึกของกริด (h)	= 0.5 m
ความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ)	= 11.7 $\Omega - m$
ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน (D)	= 16 m
Function of h (r)	= 0.0148

$$R = \frac{\rho}{2\pi h}\ln\frac{D}{2r}$$

$$R = \frac{11.7}{2\pi\,(0.2)}\ln\frac{16}{2(0.0148)}$$

$$R = 58.5874\Omega$$

$$R_T = R_f + R$$

$$R_T = 5343.75 + 58.5874$$

$$R_T = 5402.3374\Omega$$

<u>กรณีเมื่อเพิ่มแผ่นพลาสติก</u>

$$R_{2FS} = 2(R_f - R_{Mf})$$

$$R = 2(25402.3374 - 33.4225)$$

$$R = 10737.8298\Omega$$

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_f + R_{Mf})$$

$$R = \frac{1}{2}(5402.3374 + 33.4225)$$

$$R = 2717.8799\Omega$$

$$E_{touch50} = (R_B + R_{TP})I_c$$

$$E_{touch50} = (1000 + 2717.8799)\frac{0.116}{\sqrt{0.6}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{touch50} = 556.7724V$$
$$E_{step50} = (R_B + R_{TS})I_c$$
$$E_{step50} = (1000 + 10737.8298)\frac{0.116}{\sqrt{0.6}}$$
$$E_{step50} = 1757.8029V$$

6. หาความต้านทานของกราวด์กริด

ความยาวของแผ่นพลาสติก (D)	= 16 m
ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ใช้ทำกราวด์กริด (L_c)	= 1747 m
ความยาวของกราวด์ร็อด (L_r)	= 3 m
จำนวนของกราวด์ร็อด (N_r)	= 57 pcs
จำนวนตัวนำที่ขนานกันในแนวแกน X (N_A)	= 5 pcs
จำนวนตัวนำที่ขนานกันในแนวแกน Y (N_B)	= 5 pcs
ความลึกของกราวด์กริด (h)	= 0.5 m
เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (d)	= 0.011 m.

$$R_G = \rho\left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}}\right)\right]$$

$$R_G = 11.7\left[\frac{1}{1918} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 5320}}\left(1 + \frac{1}{1 + \left(0.5\sqrt{20/5320}\right)}\right)\right]$$

$$R_G = 0.07681\Omega$$

7. Check Grid Potential Rise

$$I_G = 50000A$$
$$I_G R_G = (50000)(0.07677) = 383.5V > E_{touch50}(556.7726V)$$

8. Check Mesh & Step Voltage

$$I_G = 50000A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_h = \left(\sqrt{1+(h+h_0)}\right)$ เมื่อ $h = h_o$

$K_h = \sqrt{1+(0.5/1)}$

$K_h = 1.224$

$N_m forE_m = \sqrt{(N_A N_B)} = 5 \quad (N_A = 5, N_B = 5)$

$N_s forE_s = MAX(N_A, N_B) = 5$

$L = L_c + 1.15(N_r L_r)$

$L = 1.747 + 1.15(57 \times 3)$

$L = 1943.65$

$K_i forE_m = 0.656 + 0.172N_m = 1.516$

$K_i forE_s = 0.656 + 0.172N_s = 1.516$

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[ln\left(\frac{16^2}{(16)(0.5)(0.011)} + \frac{(16+(2)(0.5))^2}{(8)(16)(0.011)} - \frac{0.5}{(4)(0.011)}\right) + \frac{1}{1.224}ln\frac{8}{\pi(2N_m - 1)}\right]$$

$K_m = 1.1155$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{16+0.5} + \frac{1}{16}(1-0.5^{5-2})\right]$$

$K_s = 0.35501$

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

$$E_m = \frac{(11.7)(1.11556)(1.516)(50000)}{1943.65}$$

$E_m = 509.0142V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L}$$
$$E_s = \frac{(11.7)(0.35501)(1.516)(50000)}{1943.65}$$
$$E_s = 161.9860V$$

9. Check Mesh & Step Voltage

$$E_m(509.0142V) < E_{touch50}(556.7726V)$$
$$E_s(161.9860V) < E_{step50}(1757.7726V)$$

10. Detailed Design

จากการคำนวณ ในกรณีที่ใส่แผ่นพลาสติกพบว่า ได้ผลรับตามเงื่อนไขการออกแบบระบบกราวด์กริด แสดงว่าการออกแบบนี้ปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7

Test Record

SOIL RESISTIVITY TEST			Date : 24/08/94 Weather : Temperature : $25°c$
	PHANAT NIKHOM		
ITEM	A(m)	R(ohm)	ρ$(ohm-m)$
1	0.50	4.10	12.88
2	1.00	2.30	14.45
3	2.00	1.20	15.08
4	5.00	0.40	12.57
5	10.00	0.10	6.28
6	15.00	0.05	4.17
7	0.50	5.88	18.47
8	1.00	2.97	18.66
9	2.00	1.20	15.08
10	5.00	0.36	11.30
11	10.00	0.12	7.54
12	15.00	0.04	3.77
13	05.0	5.88	18.47
14	1.00	2.50	15.71
15	2.00	1.15	14.45
16	5.00	0.37	11.62
17	10.00	0.15	9.42
18	15.00	0.07	6.60
19	0.50	5.70	17.09
20	1.00	2.58	16.21
21	2.00	0.16	12.06
22	5.00	0.28	8.80
23	10.00	0.15	9.42
24	15.00	0.06	5.65
25	0.50	4.15	13.04
26	1.00	2.00	12.57
27	2.00	0.87	10.98
28	5.00	0.42	13.19
29	10.00	0.15	9.42
30	15.00	0.05	4.17
TOTAL Average			11.70034

ตารางที่ 7 แสดงการทดสอบหาค่าความต้านทานของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ส่วนของโปรแกรมการออกแบบต่อลงดิน

5.3.1 Microsoft Windows เบื้องต้น

Windows เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ทำงานภายใต้ระบบ Dos โดยทำตัวเหมือนระบบปฏิบัติการที่มีความสามารถเหนือกว่า Dos ในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่

1 สามารถทำงานได้หลายโปรแกรมพร้อม ๆ กัน (Multi-tasking)
2 มีการแสดงผลเป็นแบบกราฟฟิก
3 เพิ่มขีดความสามารถให้ผู้ใช้ใช้ประโยชน์จากความสามารถของเครื่อง ได้อย่างเต็มที่ไม่ว่าในเรื่องของ CPU การจัดการหน่วยความจำ การแสดงผลบนจอภาพ เสียง เป็นต้น
4 ผู้ใช้สามารถเรียนรู้การใช้งานโปรแกรมบน Windows 95 ได้ง่าย เพราะโปรแกรมที่รันบน Windows 95 แต่ละตัวจะมีลักษณะและการใช้งานที่เหมือนกัน
5 สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้มากมาย
6 สามารถโอนย้ายข้อมูลระหว่างโปรแกรมได้ง่าย

5.3.2 ส่วนประกอบของ Windows

ส่วนประกอบของ Windows มีดังนี้

1 คอนโทรลเมนู (Control Menu) จะอยู่ทางมุมด้านซ้ายของแต่ละหน้าต่างคอนโทรลเมนูจะเป็นเมนูที่เก็บออพชั่นของการย่อขยายเปิดปิด และเคลื่อนย้ายหน้าต่าง ผู้ใช้สามารถใช้เมาส์คลิกเพื่อเลือกออพชั่นตามต้องการได้
2 ไตเติลบาร์ (Title Bar) ส่วนนี้ทำหน้าที่แสดงชื่อของแอพพลิเคชั่นหรือชื่อไฟล์ ถ้าหากว่าเปิดหน้าต่างขึ้นพร้อมกันหลาย ๆ หน้าต่าง แอพพลิเคชั่นที่ทำงาน (Active) ไตเติลบาร์ของหน้าต่างนั้นจะมีสี หรือความเข้มแตกต่างไปจากไตเติลบาร์หน้าต่างอื่น ๆ
3 หน้าต่างไตเติล (Window Title) เป็นรายชื่อที่ปรากฏที่ไตเติลบาร์ ชื่อที่แสดงจะขึ้นอยู่กับชนิดของหน้าต่างที่ปรากฏอยู่ในขณะนั้น หน้าต่างไตเติลสามารถเป็นได้ ทั้งชื่อของแอพพลิเคชั่น ชื่อเอกสาร ชื่อกรุ๊ป ชื่อไดเรกทอรี หรือชื่อไฟล์ และหากว่าเอกสารใดที่เปิดขึ้นมาแล้วยังไม่ได้ทำการเซฟก็จะปรากฏข้อความว่า (Untitled) อยู่บนหน้าต่างไตเติล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 เมนูบาร์ (Menu Bar) ส่วนนี้จะแสดงรายการเมนูของโปรแกรม ในแต่ละเมนูจะมีรายการคำสั่งที่ผู้ใช้จะสามารถเลือกใช้กับระบบ Windows 95 ได้

5 สกอลล์บอกซ์ (Scrool Box) เป็นแท่งสี่เหลี่ยมในหกอลล์บาร์ เพื่อไว้ใช้เลื่อนบรรทัดขึ้นลงในหน้าต่าง

6 ปุ่มย่อขยาย (Maximize and Minimize Buttom) ปุ่มนี้จะอยู่ทางด้านขวาบนของหน้าต่าง ปุ่มขยายจะมีสัญญลักษณ์เป็นหัวลูกศรชี้ขึ้น เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้หน้าต่าง ๆ จะทำการขยายเต็มพื้นที่เดสก์ท็อป สำหรับปุ่มย่อจะมีสัญญลักษณ์เป็นลูกศรชี้ลง เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้ หน้าต่างจะทำการลดขนาดหน้าต่างเป็นไอคอน

7 ขอบหน้าต่าง (Windows Barder) คือ ขอบบนสุดของหน้าต่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะทำให้ขอบแต่ละด้านของหน้าต่างมีขนาดยาวขึ้นหรือสั้นก็ได้

8 มุมหน้าต่าง (Windows Corner) คือมุมทั้งสี่ของหน้าต่าง ซึ่งสามารถที่จะใช้ย่อยหรือขยายของด้านสองด้านที่อยู่ติดกับมุมของหน้าต่างได้พร้อมกัน

9 เคอร์เซอร์เลือก (Selection Cursor) จะมีลักษณะเป็นตัว I-beam ผู้ใช้สามารถใช้เมาส์พอยน์เตอร์กำหนดจุดของเคอร์เซอร์เลือกได้ เคอร์เซอร์เลือกนี้ จะปรากฏอยู่ในโหมดอิดิตของแอพพลิเคชั่นเท่านั้น

10 เมาส์พอยน์เตอร์ (Mouse Pointer) ถ้าผู้ใช้มีการติดตั้งเมาส์ใช้กับ Windows ด้วย เมื่อรัน Windows เมาส์พอยน์เตอร์จะแสดงขึ้นมาที่เดสก์ท็อป ลักษณะของเมาส์พอยน์เตอร์จะเป็นหัวลูกศรสีขาว หางลูกศรเอนไปทางด้านขวาล่าง และ เมื่อผู้ใช้ทำการขยับเมาส์ ตำแหน่งของเมาส์พอยน์เตอร์บนจอภาพก็จะขยับตามไปด้วยในทิศทางเดียวกัน

5.3.3 ชนิดของหน้าต่าง

หน้าต่างใน Windows มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1 **หน้าต่างแอพพลิเคชั่น** ที่รันภายใต้ Windows อย่างน้อยที่สุดจะต้องมีหน้าต่างเป็นของตนเองหน้าต่างหนึ่ง แอพพลิเคชั่นหลาย ๆ ตัวก็มีหน้าต่างย่อยในหน้าต่างแอพพลิเคชั่นหลักอีก

2 **หน้าต่างกรุ๊ป** เป็นหน้าต่างที่เก็บไอคอนโปรแกรม หน้าต่างกรุ๊ปถ้าเปรียบกับระบบไฟล์ของ Dos เพือให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ก็คือ ไดเรกทอรีนั่นเอง หน้าต่างกรุ๊ปนี้จะสังเกตได้ง่ายตรงที่หน้าต่างนี้จะไม่มีเมนูบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ชนิดของไอคอน

ไอคอน คือ สัญญลักษณ์ภาพขนาดเล็ก ซึ่งใช้แทนความหมายของแอพพลิเคชั่นไฟล์หรือไดเรกทอรี ไอคอนจะมีอยู่ 4 ชนิด สามารถแบ่งชนิดได้ดังนี้

1 แอพพลิเคชั่นไอคอน จะแทนถึงแอพพลิเคชั่นที่กำลังรันอยู่เป็นแบล็คกราวด์ โดยถูกลดรูปจากหน้าต่างเป็นไอคอน

2 กรุ๊ปไอคอน จะแทนถึงหน้าต่างกรุ๊ปที่เก็บไอคอนโปรแกรม แล้วถูกลดรูปมาเป็นไอคอน

3 โปรแกรมไอเท็มไอคอน (ไอคอนโปรแกรม) โปรแกรมไอเท็มไอคอนนี้เป็นตัวแทนของแอพพลิเคชั่นไอคอนที่ผู้ใช้จะเริ่มรัน ผู้ใช้สามารถทำการเคลื่อนย้าย หรือก๊อปปี้โปรแกรมไอเท็มไอคอนจากหน้าต่างกรุ๊ปหนึ่งไปยังอีกกรุ๊ปหนึ่งได้

4 ด็อกคิวเมนต์ไอคอน จะแทนถึงไอคอนที่เก็บข้อมูลของแอพพลิเคชั่นแล้วถูกลดรูปมาเป็นไอคอน ด็อกคิวเมนต์ไอคอนจะอยู่ภายในหน้าต่างของแอพพลิเคชั่น

5.3.5 การใช้เมาส์

การใช้เมาส์จะมีฟังก์ชั่นใช้งานอยู่เพียง 4 แบบ คือ

1 การคลิกทำได้โดย กดปุ่มเมาส์หนึ่งครั้ง ผลที่ได้คือ จะเลื่อนไปโฟกัสที่ออบเจ็กต์ที่ถูกคลิก

2 ดับเบิลคลิก ทำได้โดย กดปุ่มเมาส์เร็ว ๆ สองครั้ง ผลที่ได้คือ เอ็กซิคิว คำสั่งที่ออบเจ็กต์นั้น

3 การลาก ทำได้โดย กดปุ่มเมาส์ที่ออพเจคต์ค้างไว้แล้วเลื่อนไปมาผลที่ได้คือ เลื่อนออบเจ็กต์ตามทิศทางของเมาส์

4 การลากแล้ววาง (drag and drop) ทำได้โดย ลากออบเจ็กต์แล้วปล่อยปุ่มเมาส์ ผลที่ได้ คือลากออบเจ็กต์จากที่หนึ่งไปวางยังอีกออบเจ็กต์หนึ่งเพื่อให้เกิดการกระทำ

หมายเหตุ

- คำว่า "Windows" หมายถึง ระบบ Microsoft Windows ทั้งหมด
- คำว่า "หน้าต่าง" หมายถึง กรอบสี่เหลี่ยมของโปรแกรมบน Windows ที่ประกอบด้วยเมนู เป็นไตเติลบาร์ เป็นต้น
- คำว่า"แอคทีฟ"(active) หมายถึง โปรแกรมกำลังทำงานในหน้าต่างแรก(เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ทำงานในโฟร์กราวด์) ทุกแอพพลิเคชั่นที่เปิดขึ้นมาใน Windows จะ

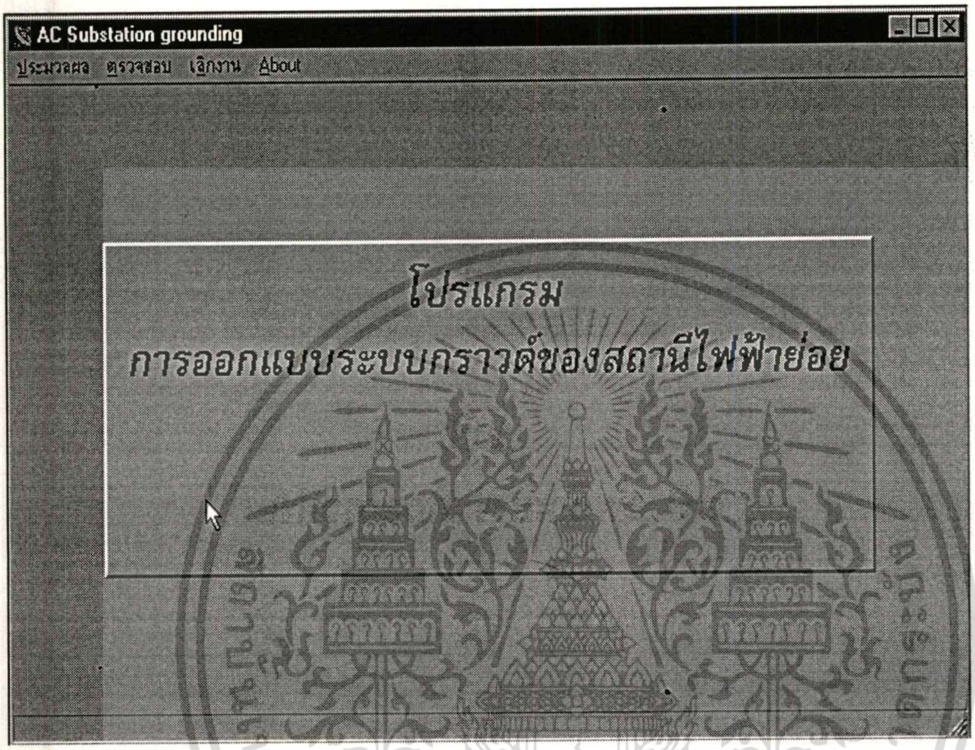
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเพียงแอพพลิเคชั่นเดียวเท่านั้นที่ทำงานในโฟว์กราวด์นอกนั้นจะทำงานในแบล็คกราวด์ทั้งหมดสิ่งที่สีของ ไตเติลบาร์ที่มีสีหรือความเข้มกว่า ไตเติลบาร์ของแพพลิเคชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 แสดงหน้าต่างการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

เริ่มต้น Computer-Aided Design for Substation Grounding



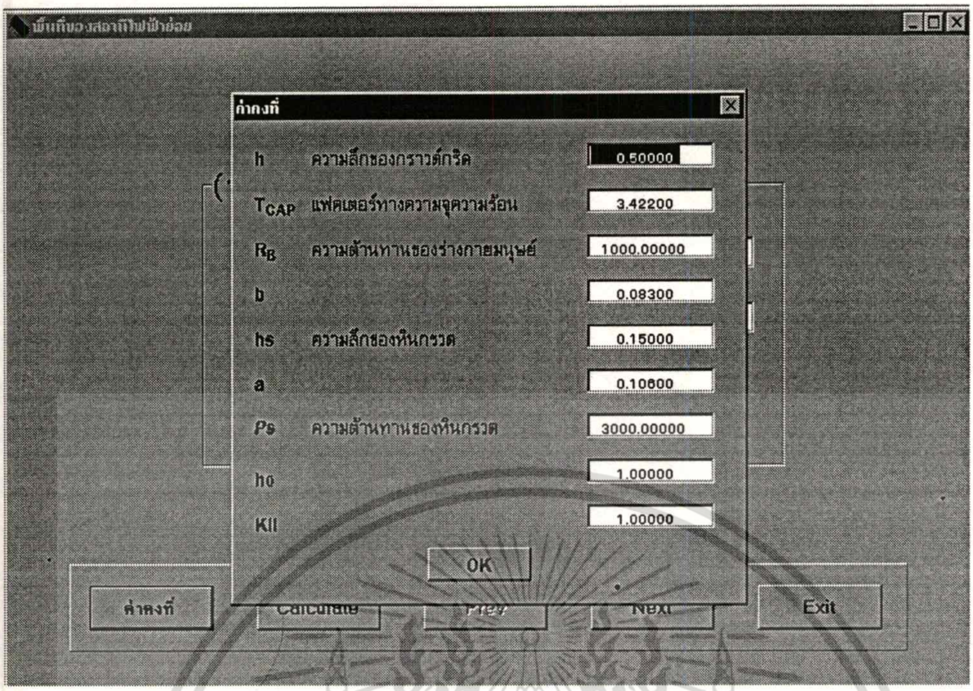
<u>รูปที่ 26</u> แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม

ประกอบด้วย

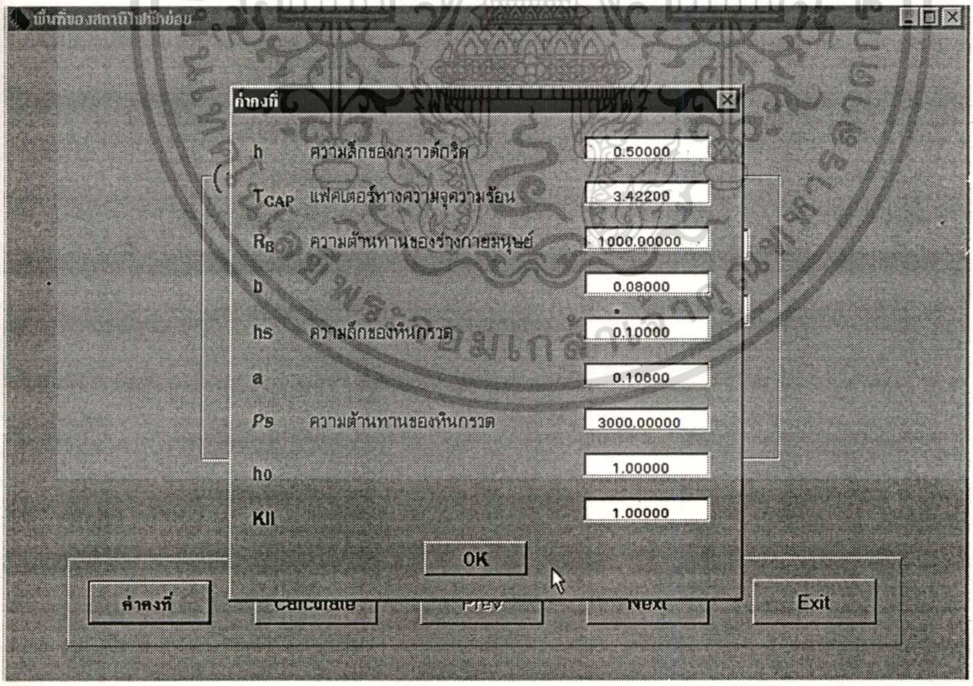
- **ไตเติลบาร์** AC Substation Grounding
- **ปุ่มประมวลผล** คือปุ่มที่ต้องการเข้าสู่โปรแกรม AC Substation
- **ปุ่มตรวจสอบ** คือปุ่มที่ต้องการตรวจสอบโปรแกรม
- **เลิกงาน** คือปุ่มที่ต้องการออกจากโปรแกรม
- **About** คือปุ่มที่จะแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรม

<u>หมายเหตุ</u> ทุกปุ่มจะใช้เมาส์เป็นตัวคลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



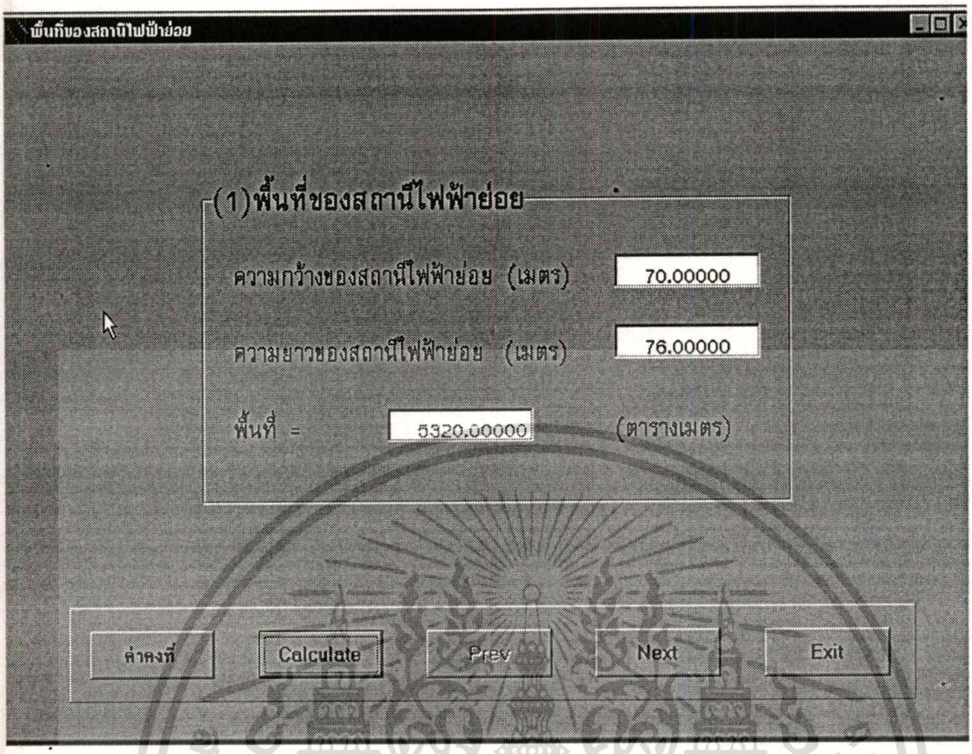
<u>รูปที่ 27</u> แสดงหน้าต่างค่าคงที่ต่าง ๆ ในกรณีคิดผลของการโรยหินกรวด



<u>รูปที่ 28</u> แสดงหน้าต่างค่าคงที่ต่าง ๆ ในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก

เป็นการแสดงค่าคงที่ของโปรแกรม สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อต้องการใช้ค่าอื่น ที่นอก เหนือจากตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 29</u> **แสดงหน้าต่างการคำนวณหาพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย**

ประกอบด้วย

- **ไตเติลบาร์** ประมวลผลข้อมูล
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** คือความกว้าง และความยาวของสถานีไฟฟ้าย่อย
- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตรซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการ ประมวลผลเมื่อ ใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่อง พื้นที่ มีหน่วยเป็นตารางเมตร
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณ และ กลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2)ความต้านทานจำเพาะของดิน

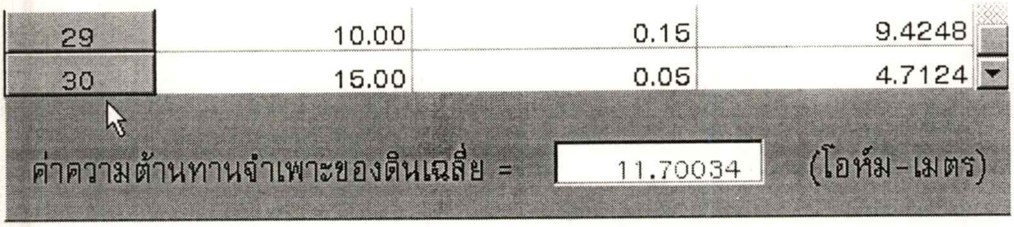
เลือกสูตรคำนวณ

○ สูตรที่ 1 ◉ สูตรที่ 2

ความลึกของอิเล็คโทรด (เมตร) .

ITEM	ระยะห่าง	ความต้านทาน	ความต้านทานจำเพาะ
1	0.50	4.10	12.8805
2	1.00	2.30	14.4513
3	2.00	1.20	15.0796
4	5.00	0.40	12.5664
5	10.00	0.10	6.2832
6	15.00	0.05	4.7124
7	0.50	5.88	18.4726
8	1.00	2.97	18.6611
9	2.00	1.20	15.0796
10	5.00	0.36	11.3097
11	10.00	0.12	7.5398
12	15.00	0.04	3.7699
13	0.50	5.88	18.4726
14	1.00	2.50	15.7080
15	2.00	1.15	14.4513
16	5.00	0.37	11.6239
17	10.00	0.15	9.4248
18	15.00	0.07	6.5973
19	0.50	5.70	17.9071
20	1.00	2.58	16.2106
21	2.00	0.96	12.0637
22	5.00	0.28	8.7965
23	10.00	0.15	9.4248
24	15.00	0.06	5.6549
25	0.50	4.15	13.0376
26	1.00	2.00	12.5664
27	2.00	0.87	10.9327
28	5.00	0.42	13.1947

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

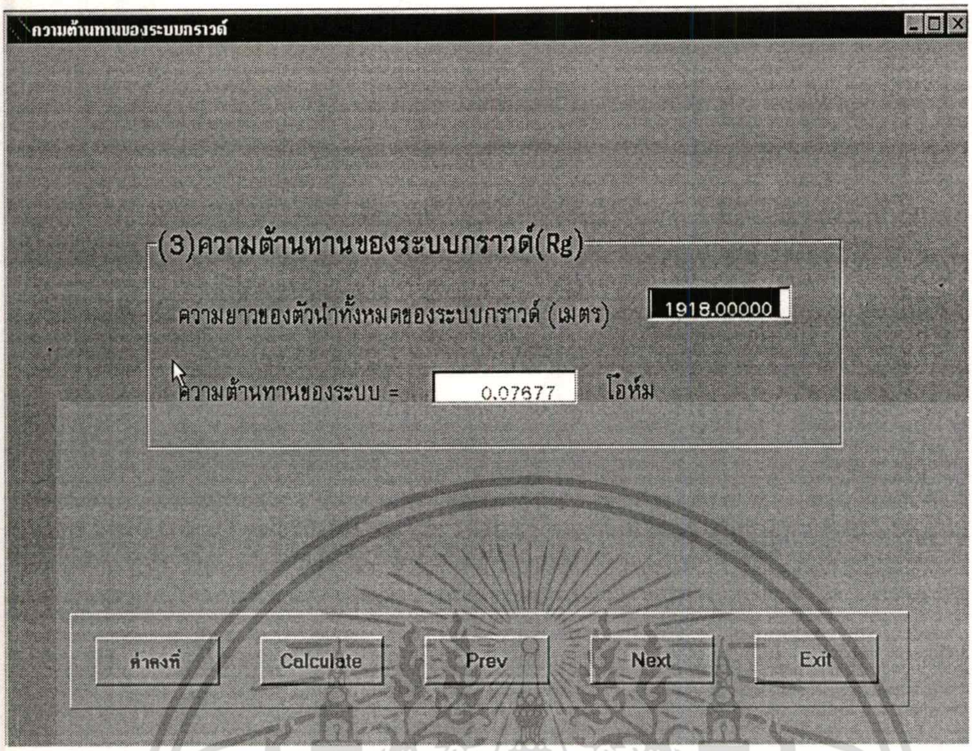


<u>รูปที่ 30</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของดิน

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ ความต้านทานจำเพาะของดิน
- สูตรการคำนวณ มีอยู่ 2 สูตรให้เลือก
- เลือกสูตรการคำนวณ คือการเลือกสูตรมาใช้ในการคำนวณซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าจะเลือกใช้กรณีใด
- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม คือช่องค่าความต้านทานที่วัดได้, ระยะห่างระหว่างอิเล็คโทรดข้างเคียงที่อยู่ติดกัน และความลึกของอิเล็คโทรด
- ค่าคงที่ คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตร ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการ ประมวลผล เมื่อ ใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่องค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณ และ กลับไปที่หน้าต่างหลักของ โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

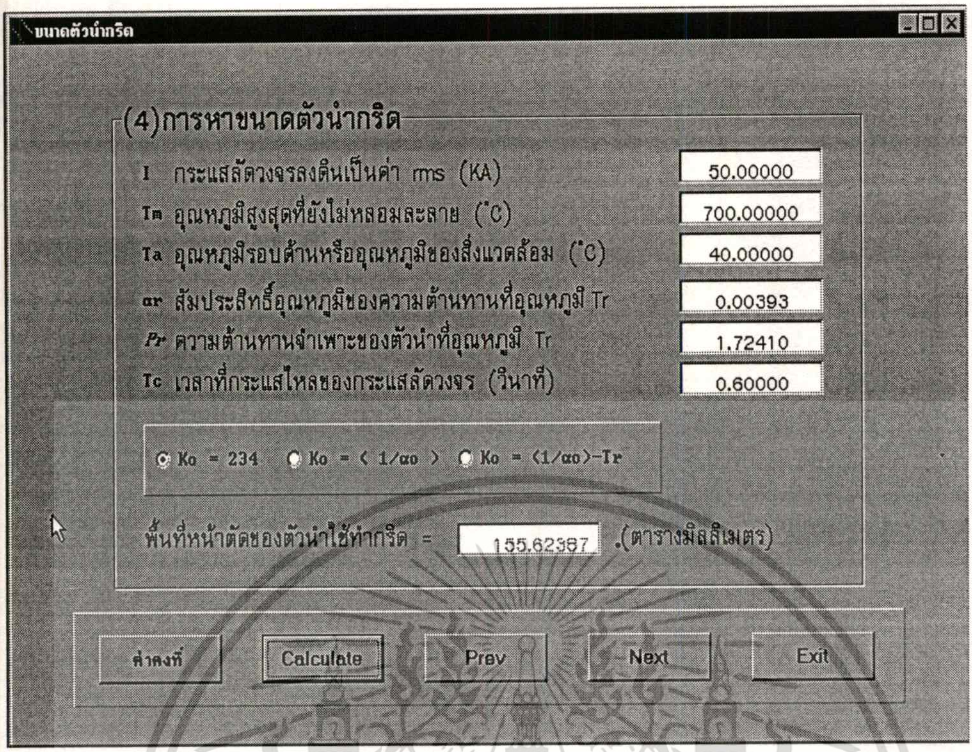


<u>รูปที่ 31</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานของระบบกราวด์

ประกอบด้วย

- **ไตเติลบาร์** ความต้านทานของระบบกราวด์
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** คือช่องความยาวของตัวนำทั้งหมด
- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตรซึ่งสามารถ เปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไป ที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการ ประมวลผล เมื่อ ใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่องความต้านทานของระบบกราวด์มีหน่วยเป็นโอห์ม
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



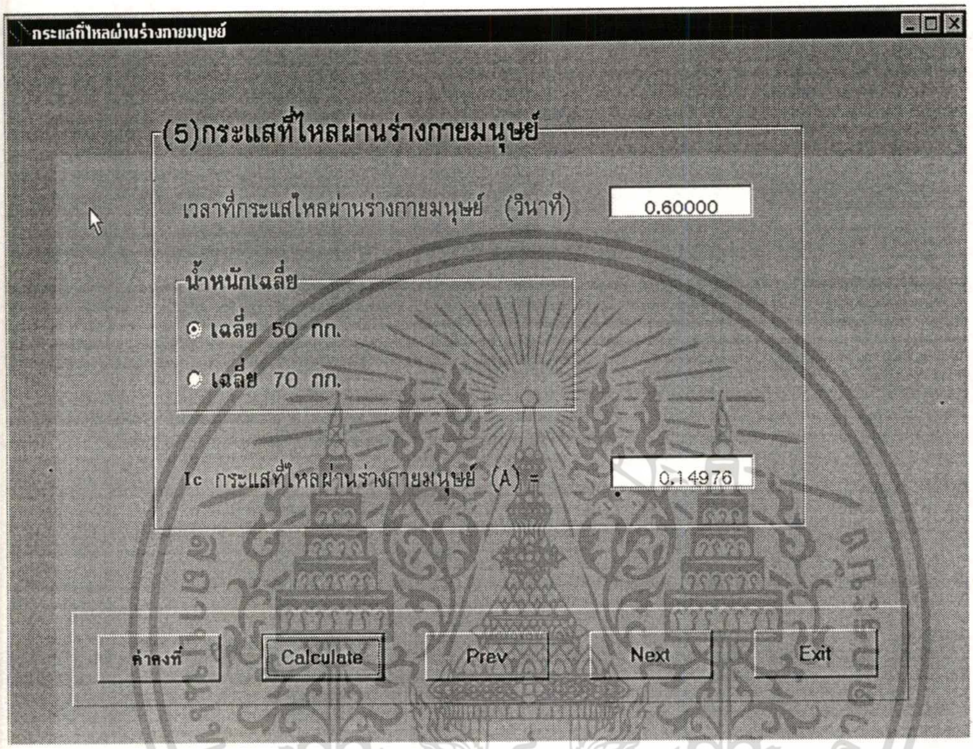
<u>รูปที่ 32</u> **แสดงหน้าต่างการคำนวณหาขนาดของตัวนำกริด**

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ ขนาดตัวนำกริด
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
    1. กระแสลัดวงจรลงดินเป็นค่า rms : (KA)
    2. อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย : (^{o}C)
    3. อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (^{o}C)
    4. สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ Tr
    5. ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ Tr
    6. เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร : (sec)
    7. ค่าคงที่ Ko สามารถเลือกใช้ได้ 3 กรณีแล้วแต่ผู้ออกแบบ
- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตร ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการประมวลผล เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่องขนาดของตัวนำกริด มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ... เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง ... ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม



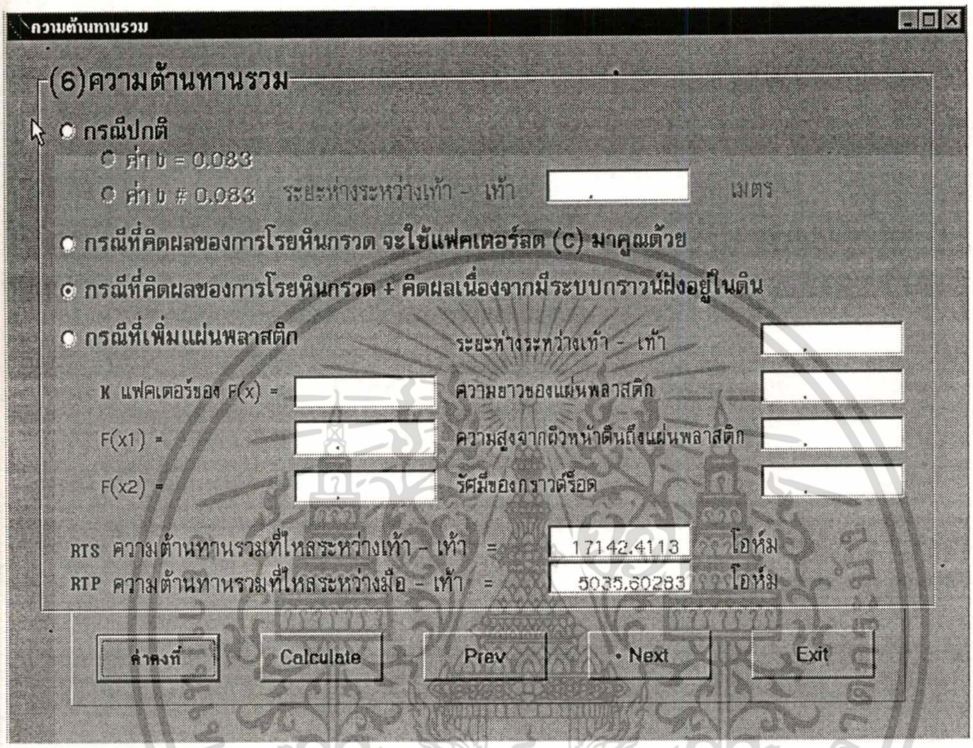
<u>รูปที่ 33</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ กระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
  1. เวลาที่กระแสลัดวงจรไหลผ่านร่างกายมนุษย์ : (วินาที)
  2. เลือกใช้น้ำหนักเฉลี่ย 50 กก. และ 70 กก. แล้วแต่ผู้ออกแบบ
- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตร ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการประมวลผล เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่องกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา

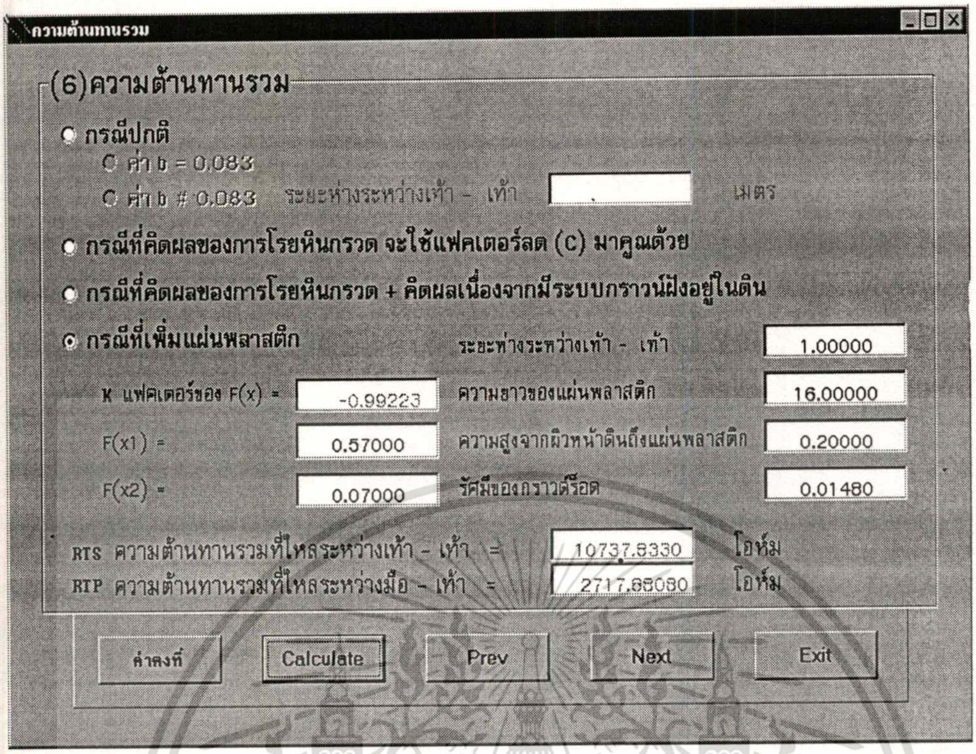
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม



<u>รูปที่ 34</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาค่าความต้านทานรวม ในกรณีคิดผลของการโรยหินกรวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35 แสดงหน้าต่างการคำนวณหาค่าความต้านทานรวม ในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก

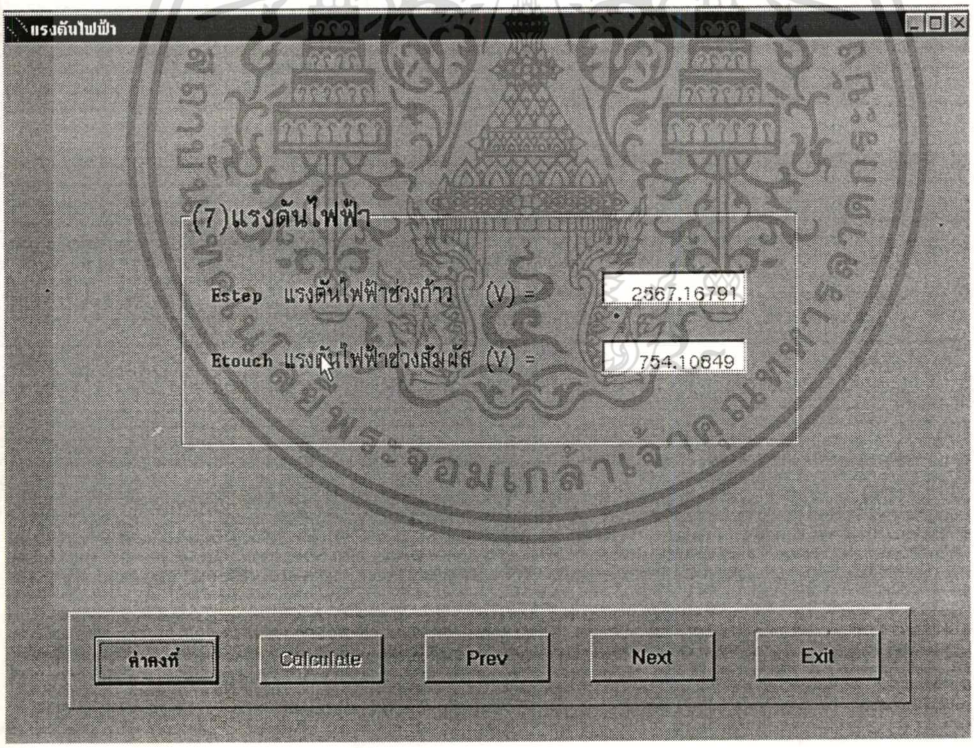
ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ ความต้านทานรวม
- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม
  1. ในกรณีปกติ คือไม่คิดผลของการ โรยหินกรวด
     - 1.1 ค่ารัศมีของแผ่นโลหะกลม (b) สามารถเลือกใช้ค่า (b) เท่ากับ 0.083 หรือ ค่า (b) ไม่เท่ากับ 0.083
  2. ในกรณีที่คิดผลของการ โรยหินกรวด จะใช้แฟคเตอร์ลด มาคูณด้วย
  3. ในกรณีที่คิดผลของการ โรยหินกรวดและ คิดผลเนื่องจากมีระบบกราวด์กริดฝังอยู่ในดิน
  4. กรณีที่เพิ่มแผ่นพลาสติก
     - 4.1 K แฟคเตอร์ของ F(X)
     - 4.2 F(X1)
     - 4.3 F(X2)
     - 4.4 ระยะห่างระหว่างเท้า-เท้า
     - 4.5 ความยาวของแผ่นพลาสติก
     - 4.6 ความสูงจากผิวหน้าดินถึงแผ่นพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำการแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

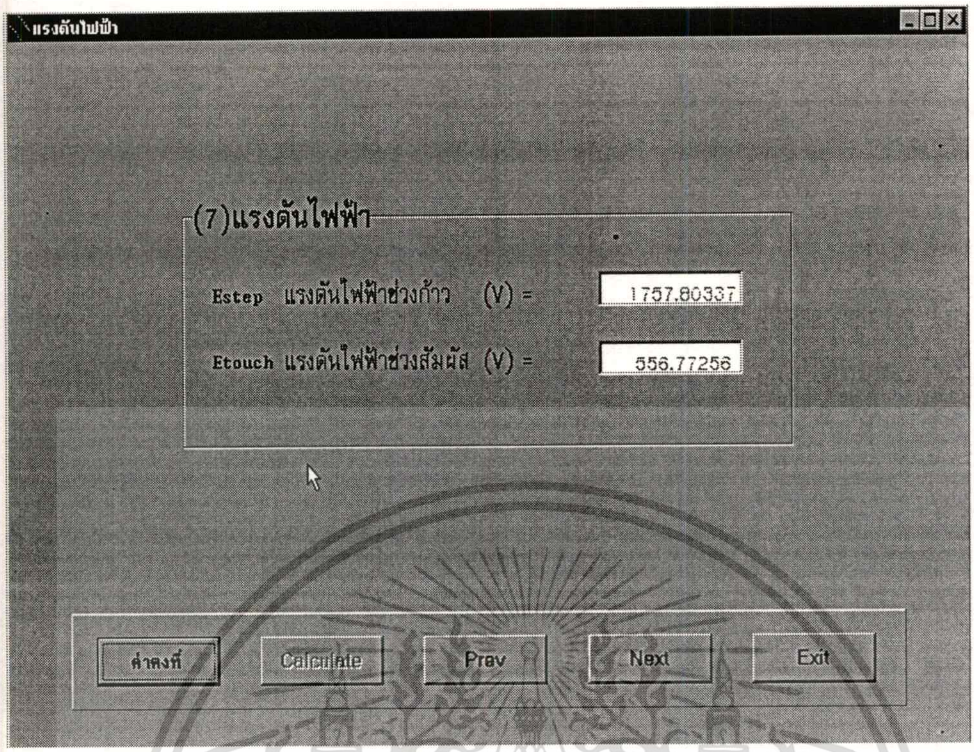
4.7 รัศมีของกราวด์ร็อด

- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตร ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการประมวลผล เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่องความต้านทานรวมที่ไหลระหว่างเท้า-เท้า และ ความต้านทานรวมที่ไหลระหว่างเท้า-มือ มีหน่วยเป็นโอห์ม
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม



<u>รูปที่ 36</u> แสดงหน้าต่างแรงดันไฟฟ้าในกรณีคิดผลของการโรยหินกรวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

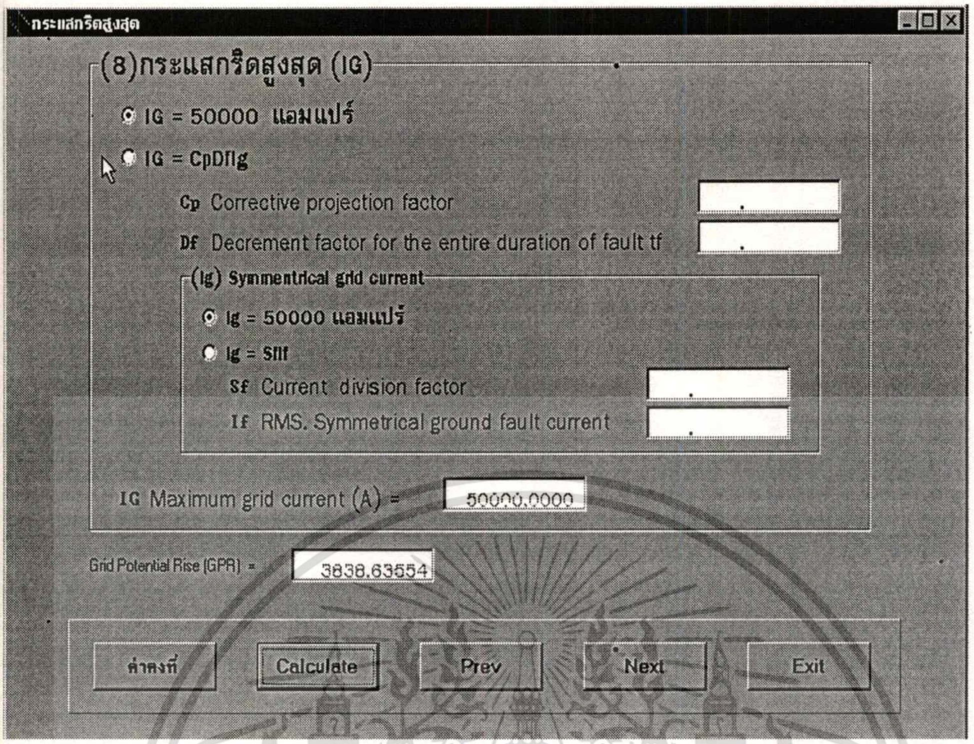


รูปที่ 37 แสดงหน้าต่างแรงดันไฟฟ้าในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก

ประกอบด้วย

- **ไตเติลบาร์** แรงดันไฟฟ้า
- **แสดงผล** แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และ แรงดันไฟฟ้าช่วงสัมผัสผลลัพธ์นี้เป็นผลต่อเนื่องที่ได้จากการคำนวณของการหาค่าความต้านทานรวมที่เท้า
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่โปรแกรมหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

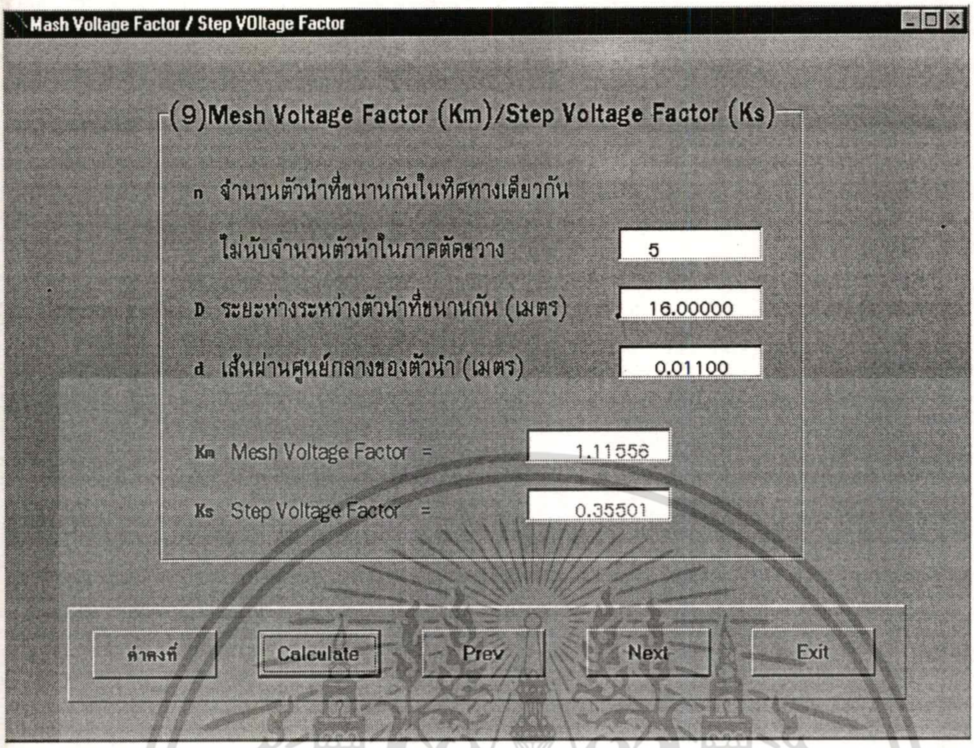


<u>รูปที่ 38</u> แสดงหน้าต่างกระแสกริดสูงสุด

ประกอบด้วย

- **ไตเติลบาร์** กระแสกริดสูงสุด
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
    1. C_p Corrective projection factor
    2. D_f Decrement factor for the entire duration of fault t_f
    3. S_f Current division factor
    4. I_f RMS. Symmetrical ground fault current
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

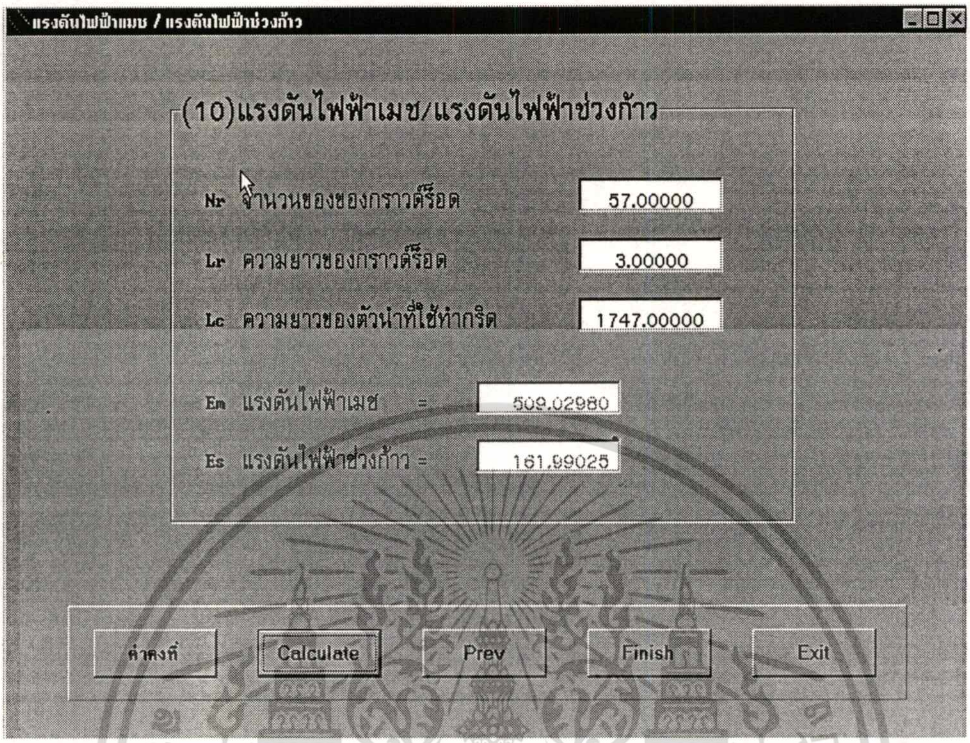


<u>รูปที่ 39</u> แสดงหน้าต่างการหาค่าแฟคเตอร์

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ Mesh Voltage / Step Voltage Factor
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
    1. จำนวนตัวนำที่ขนานกันในทิศทางเดียวกันไม่นับจำนวนในภาคตัดขวาง
    2. ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน
    3. เส้นผ่านศูย์กลางของตัวนำ
- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตร ซึ่งสามารถ เปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการประมวลผล เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่อง Mesh Voltage factor และ Step Voltage factor
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป
- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 40</u> แสดงหน้าต่างการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ประกอบด้วย

- **ไตเติลบาร์** แรงดันไฟฟ้าเมช/แรงดัน ไฟฟ้าช่วงก้าว
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
    1. จำนวนของกราวด์ร็อด
    2. ความยาวของกราวด์ร็อด
    3. ความยาวของตัวนำที่ใช้ทำกริด
- **ค่าคงที่** คือปุ่มที่แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการคำนวณทุก ๆ สูตร ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงค่าให้ใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มค่าคงที่
- **Calculate** คือปุ่มที่ใช้ในการประมวลผล เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate ผลลัพธ์จะปรากฏที่ช่องแรงดันไฟฟ้าเมช และ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว
- **Prev** คือปุ่มย้อนการทำงานกลับไปที่หน้าต่างที่ผ่านมา
- **Next** คือปุ่มที่จะเข้าไปที่ การคำนวณในหน้าต่างถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Exit** คือปุ่มออกจากการทำงานของการคำนวณและกลับไปที่หน้าต่างหลักของโปรแกรม

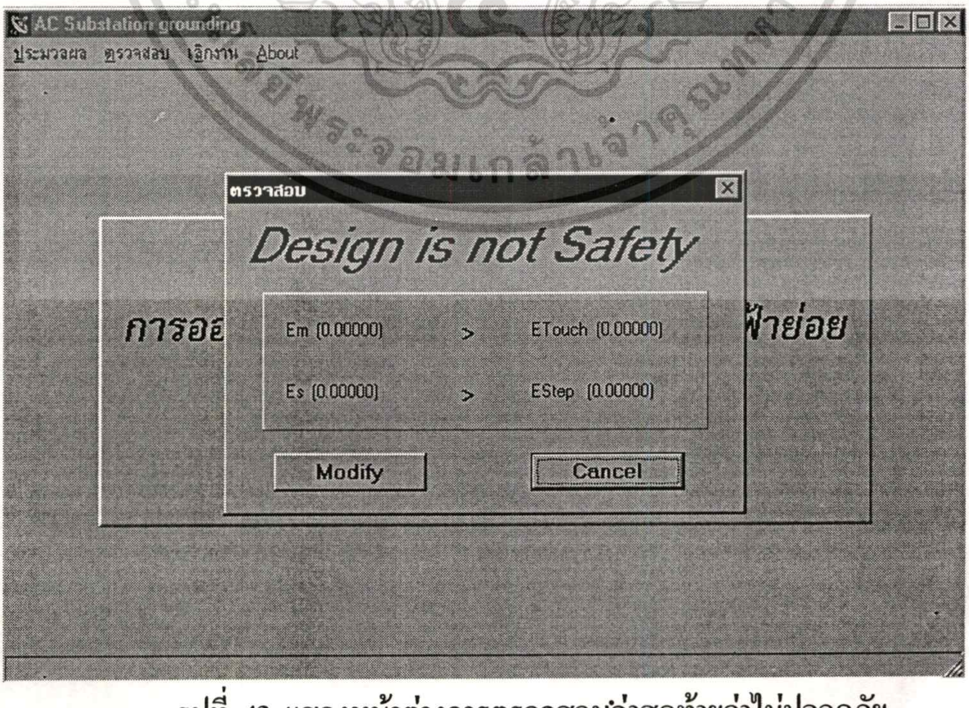
<u>รูปที่ 41</u> แสดงหน้าต่างการตรวจสอบค่าสุดท้ายว่าปลอดภัย

(ในกรณีคิดผลของการโรยหินกรวด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

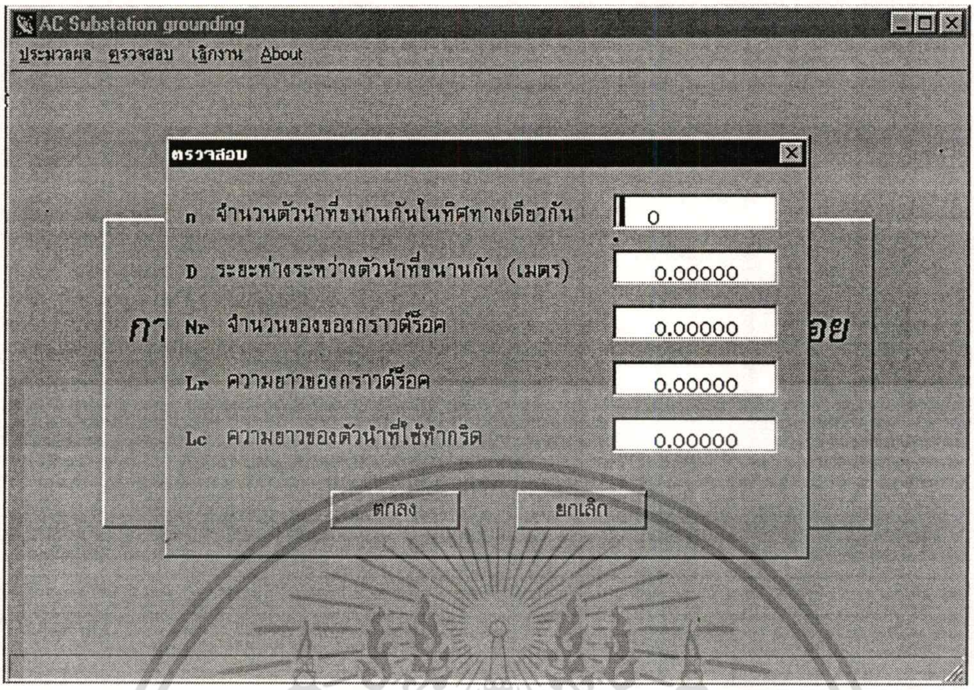
รูปที่ 42 แสดงหน้าต่างการตรวจสอบค่าสุดท้ายว่าปลอดภัย
(ในกรณีเพิ่มแผ่นพลาสติก)

หน้าต่างนี้จะเป็นตัวตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ ถ้าหากว่าการออกแบบที่ผ่านมาไม่ถูกต้อง หน้าต่างนี้จะปรากฏข้อความ "Design is not Safety" ดังรูปที่ 43



รูปที่ 43 แสดงหน้าต่างการตรวจสอบค่าสุดท้ายว่าไม่ปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

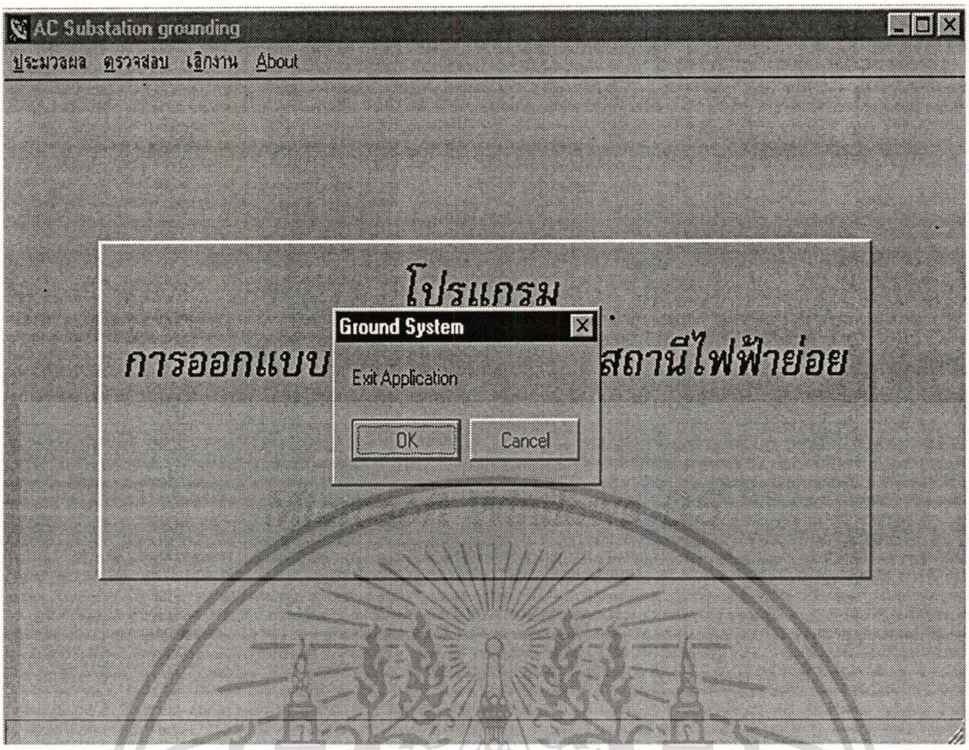


<u>รูปที่ 44</u> แสดงหน้าต่างให้ใส่ค่าที่ต้องการเปลี่ยนแปลง
(ในกรณีผลลัพธ์ที่ได้ไม่ปลอดภัย)

เมื่อการออกแบบข้างต้นไม่มีความปลอดภัยจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ เหล่านี้คือ

1. จำนวนตัวนำที่ขนานกันในทิศทางเดียวกัน
2. ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน
3. จำนวนของกราวด์ร็อด
4. ความยาวของตัวนำที่ใช้ทำกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 45</u> แสดงหน้าต่างการออกจากโปรแกรม

ถ้าต้องการออกจากโปรแกรมใช้เมาส์คลิกไปที่ ปุ่มเลิกงาน หน้านี้แสดงหน้าย่อย คือ Ground System เมื่อต้องการออกจากโปรแกรมให้ใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม OK เป็นการเลิกใช้งานอย่างถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ตัวอย่างการคำนวณและออกแบบ ระบบการต่อลงดิน

substation grounding grid ขนาด 220 KV

มาตราฐานการคำนวณและออกแบบ (IEEE Guide for Safety is Substation Grounding ; IEEE 80-1986)

ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

พื้นที่กราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย	$107 \times 72m$	=	$7704\ m^2$
ความต้านทานจำเพาะของดิน	(ρ)	=	$500\ \Omega - m$
ความต้านทานจำเพาะของหิน	(ρ_S)	=	$3000\ \Omega - m$
ความหนาของชั้นหินกรวด	(h_S)	=	$0.1\ m$
ความลึกของกราวด์กริด	(h)	=	$0.5\ m$

การคำนวณหาขนาดกราวด์กริด

$$A_{mm}2 = I\sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP}}{ln\left[1+\left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a}\right)\right]}}$$

ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (I_f)	$= 5280\ A$
ระยะเวลาที่เกิดกระแสลัดวงจร (t_f)	$= 0.6\ sec$
อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย (T_m)	$= 700\ °C$
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_a)	$= 40\ °C$
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน (α_r)	= 0.00378
ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง (ρ_r)	$= 5.862\ \mu\Omega / cm^3$
Thermal coefficeient	= 245
แฟกเตอร์ความจุทางความร้อน (TCAP)	$= 3.846\ J / cm^3 / °c$

$$A = 5.28\sqrt{\frac{\frac{0.6 \times 0.00378 \times 5.862 \times 10^4}{3.846}}{ln[1+(700-40)/(245+40)]}}$$

$$= 34.34 mm^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$= 35\ mm^2$

หาค่า Reduction Factor (C_S)

จาก Reflection Factor (k) $= \dfrac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$

$$= \frac{500-3000}{500+3000}$$

$$= -\frac{2500}{3500}$$

$$= -0.7$$

เมื่อค่า $k = -0.71,\ C_s = 0.665$

การคำนวณหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสและช่วงก้าว

Touch voltage (70 ก.ก)

$$E_{touch70} = \left[1000 + 1.5(C_s)\rho_s\right]\frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$= [1000 + 1.5(0.665)3000]\frac{0.157}{\sqrt{0.6}}$$

$$E_{touch70} = 810V$$

Step voltage (70 ก.ก)

$$E_{step70} = \left[1000 + 6(C_s)\rho_s\right]\frac{0.157}{\sqrt{t_f}}$$

$$= [1000 + 6(0.665)3000]\frac{0.157}{\sqrt{0.6}}$$

$$E_{step70} = 2630.31V$$

ข้อมูลเบื้องต้น (Initial data)

พื้นที่ของกราวด์กริด $107 \times 72m$ = $7704\ m^2$

ความลึกของตัวนำกริด (h) = $0.5\ m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของชั้นหินกรวด (h_S) = 0.1 m

หาความความยาวของกราวด์กริด

$$l = \frac{\eta \rho I_f}{E_{touch70}}; \qquad \eta = 1.7$$

$$= \frac{1.7 \times 500 \times 5280}{810}$$

$$l = 5540m$$

หาจำนวนตัวนำที่วางขนานในแนวแกน x (N_1)และแกน y (N_2)

$$n_1 = \frac{l + L_1 - L_2}{2L_1} = \frac{5540 + 107 - 72}{2 \times 107} = 26$$

$$n_2 = \frac{l + L_2 - L_1}{2L_2} = \frac{5540 + 72 - 107}{2 \times 72} = 38$$

$$n = n_1 + n_2 = 26 + 38 = 64$$

การคำนวณหาความต้านทานของกราวด์

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

$L =$ ความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริด

$\rho =$ ความต้านทานจำเพาะของดิน

$A =$ พื้นที่ของกราวด์กริด

จะได้ว่า

$$R_g = 500\left[\frac{1}{5540} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 7704}}\left(1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{20 / 7704}}\right)\right]$$

$$= 0.09 + 2.505$$

$$R_g = 2.59\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหากระแสกริด

$$I_G = D_f . S_f . I_f$$

$$= 1 \times 0.6 \times 5280$$

$$= 3168 A$$

การตรวจสอบหาค่า GPR (Grid Potential Rise)

$$GPR = I_G R_g$$

$$= 3168 \times 2.59$$

$$= 8205.12V$$

$$I_G R_g (8205.12V) \rangle E_{touch70} (810V)$$

การคำนวณหาค่า Mesh voltage และ Step voltage

mesh voltage

$$Em = \frac{\rho KmKiI_G}{L}$$

เมื่อ $n = \sqrt{n_1 \times n_2} = \sqrt{26 \times 38} = 31.43$

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำ = 3 m

กริดไม่มีแท่งตัวนำ $K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} = \frac{1}{(2 \times 31.43)^{2/31.43}} = 1.28$

$$K_i = 0.656 + 0.172N$$

$$= 0.656 + (0.172 \times 31.4) = 6.056$$

$$K_h = \sqrt{1 + h/_{ho}} = 1.2247$$

h = ความลึกตัวนำกริด

d = เส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำกริด

$L = 5540m$

K_m = Spacing for mesh voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$K_m = \frac{1}{6.28}\left[ln\left(\frac{3^2}{16\times 0.5\times 0.00667} + \frac{(3+2\times 0.5)^2}{8\times 3\times 0.00667} - \frac{0.5}{4\times 0.00667}\right) + \frac{1.28}{1.2247} ln\left(\frac{8}{3.14(2\times 31.43-1)}\right)\right]$$

$$K_m = 0.159[ln(168.66+100-18.79)+1.045\, ln(0.041)]$$

$$= 0.159[ln(249.87)+1.045(-3.194)]$$

$$= 0.159[5.52-3.33]$$

$$K_m = 0.348$$

$$E_m = \frac{500\times 0.348\times 6.056\times 3168}{5540}$$

$$E_m = 602.93$$

$$E_m \quad (602.93V) < E_{touch70}(810V)$$

Step voltage

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_g}{L}$$

เมื่อ $N = MAX[N_A, N_B] = 38$

$K_i = 0.656 + (0.172\times N)$

$= 0.656 + (0.172\times 38) = 7.192$

$L = 5540$ m

K_s = Spacing for step voltage

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

$$K_s = \frac{1}{3.14}\left[\frac{1}{2+0.5} + \frac{1}{(3+0.5)} + \frac{1}{3}\left(1-0.5^{38-2}\right)\right]$$

$$= 0.318 \quad [1+0.285+0.33(1)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.318 \times 1.615$$

$$K_s = 0.513$$

ดังนั้น

$$E_s = \frac{500 \times 0.513 \times 7.192 \times 3162}{5540}$$

$$E_s = 1054.90V$$

$$E_s(1054.90V) < E_{step70}(2630.31V)$$

สรุปผลการคำนวณและออกแบบจะได้ว่า

$$E_m(602.93) < E_{touch70}(810V)$$

$$E_s(1054.90V) < E_{step70}(2630.31V)$$

การออกแบบระบบต่อลงดินนี้เกิดความปลอดภัย

5.6 การคำนวณและออกแบบ ระบบการต่อลงดินของ
substation grounding grid ขนาด *220 KV*
เมื่อต้องการใส่แผ่นพลาสติก เพื่อเพิ่มความต้านทานที่เท้า

ก่อนใส่แผ่นพลาสติก

ความหนาของชั้นหินกรวด $(h_S) = 0.1\ m.$

ความลึกตัวนำกริด $(h) = 0.5\ m.$

ความต้านทานจำเพาะของดิน $(\rho) = 500\ \Omega.m$

ความต้านทานจำเพาะของหิน $(\rho_S) = 3000\ \Omega.m$

เมื่อใส่แผ่นพลาสติก

ความหนาของชั้นหินกรวด $(h_S) = 0.08\ m$

ความลึกตัวนำกริด $(h) = 0.5\ m.$

ความต้านทานจำเพาะของดิน $(\rho) = 500\ \Omega.m.$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานจำเพาะของหิน(ρ_S) = $3000\ \Omega.m.$

ความลึกแผ่นพลาสติก = $0.2\ m.$

หา R_{2FS} และ R_{2FP} ก่อนใส่แผ่นพลาสติก

$$X = X_1 = \frac{h_s}{b} = \frac{0.08}{0.08} = 1$$

$$X = X_2 = \frac{h_s}{d_{foot}} = \frac{0.08}{1} = 0.08$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} = \frac{500 - 3000}{500 + 3000} = -0.71$$

จากกราฟ Function $F(X)$ Versus X And Reflection Factor K.

$$X_1 = 1, \therefore F(X_1) = 0.53$$

$$X_2 = 0.08, \therefore F(X_2) = 0.18$$

หา $R_{foot} = \frac{\rho_s}{4b} F(X_1) = \frac{3000}{4 \times 0.08} \times 0.53 = 4968.75\Omega$

หา $R_{Mfoot} = \frac{\rho_s}{2\pi d_{foot}} F(X_2) = \frac{3000}{6.28 \times 1} \times 0.18 = 85.98\Omega$

จะได้ $R_{2FS} = 2\left(R_{foot} - R_{Mfoot}\right)$

$$= 2(4968.75 - 85.98)$$

$$R_{2FS} = 9765.54\Omega$$

จะได้ $R_{2FP} = \frac{1}{2}\left(R_{foot} + R_{Mfoot}\right)$

$$= \frac{1}{2}(4968.75 + 85.98)$$

$$R_{2FP} = 2527.36\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใส่แผ่นพลาสติก

$D = 2.8 m.$

$\rho = 500 \Omega . m$

ความลึกของแผ่นพลาสติก = $0.2\ m.$

$r = 0.0148 m$

$$R_{pl} = \frac{\rho}{2\pi h} ln \frac{D}{2r}$$

$$= \frac{500}{6.28 \times 0.2} ln \frac{2.8}{2 \times 0.0148} = 1811 \Omega$$

$$R_{pl} = 1811 \Omega$$

$$R_{foot} \text{รวม} = R_{pl+R_{foot}} = 1811 + 4968.75 \Omega$$

$$= 6779.75 \Omega$$

เมื่อใส่แผ่นพลาสติก

หา R_{2FS} และ R_{2FP}

จะได้ว่า $R_{2FS} = 2(R_{foot} - R_{Mfoot})$

$$= 2(6779.75 - 85.98)$$

$$R_{2FS} = 13387.54 \Omega$$

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_{foot} + R_{Mfoot})$$

$$= \frac{1}{2}(6779.75 + 85.98)$$

$$R_{2FP} = 3432.86 \Omega$$

หา $E_{Step70} = [R_B + R_{2FS}] I_B$

$$= [1000 + 13387.54] \frac{0.157}{\sqrt{0.6}}$$

$$= 14387.54 \times 0.2028$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{Step70} = 2917.79v$$

หา
$$E_{touch70} = \left[R_B + R_{2FP}\right]I_B$$
$$= [1000 + 3432.86]\frac{0.157}{\sqrt{0.6}}$$
$$= 4432.86 \times 0.2028$$
$$E_{touch70} = 898.98v$$

สรุปได้ว่า เมื่อใส่แผ่นพลาสติกแล้ว

$$E_{m(602.93v)} \langle E_{touch70}(898.98v)$$

$$E_S(1054.90V) < E_{step70}(2917.79V)$$

5.7 แนวทางใหม่ลดจำนวนตัวนำตะแกรงกริด

ขั้นตอนที่ 4 เป็นแนวทางใหม่เพื่อลดจำนวนตัวนำกริด

จากการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ตาม ANSI/IEEE Std. 80-1986 [1] แล้ว และได้ทำการใส่แผ่นพลาสติกเพิ่มเติมลงไปในตะแกรงกริดตรงตำแหน่งที่สำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อย เช่น ทางเดิน ที่ตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานที่เท้าของผู้ปฏิบัติการในสถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้ระบบเกิดความปลอดภัยเพิ่มขึ้น

แนวทางใหม่ที่ทำการศึกษานี้ เป็นวิธีการลดจำนวนตัวนำกริดโดยระยะห่างระหว่างกริดไม่สมมาตร ซึ่งทำให้ลดวัสดุตัวนำกริดได้ประมาณ 40% และยังมีความปลอดภัยเหมือนเดิม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) มาคำนวณหาความยาวของตัวนำกริด

$$E_{touch70} = 810V$$

2. หาความยาวของตัวนำกริดที่มีระยะเท่ากัน (equally spaced grid)

$$L = \frac{\eta\rho If}{E_{touch}} = \frac{1.7 \times 500 \times 5280}{810} = 5540m$$

η คือ Empirical Coefficient = 1.7

3. หาจำนวนตัวนำที่ขนานกับด้าน X และ Y

เอกสารนี้มีไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_1 = \frac{l + L_1 - L_2}{2L_1} = \frac{5540 + 107 - 72}{2 + 107} = 26$$

$$n_2 = \frac{l + L_2 - L_1}{2L_2} = \frac{5540 + 72 - 107}{2 + 72} = 38$$

$$n = n_1 + n_2 = 26 + 38 = 64$$

4. หา percentage λ ของวัสดุที่ทำกราวด์กริด

$$\alpha = 121.2e^{-0.4n} + 1.1 = 121.2e^{-0.4\times 64} + 1.1 = 1.14$$

$$\beta = -92.6e^{-0.07n} + 66.337 = -92.6e^{-0.07+64} + 66.337 = 65$$

$$\lambda = \frac{\alpha \frac{\beta}{100}}{1 + \alpha \frac{\beta}{100}} = 100\%$$

$$= \frac{1.14 \times 0.65}{1 + 1.14 \times 0.65} \times 100\%$$

$$\lambda = 43\%$$

5. หาจำนวนตัวนำกริดระยะไม่สมมาตรเมื่อกราวด์กริดมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$n'_1 = n_1(1 - 0.43) = 26(1 - 0.43) = 14$$

$$n'_2 = n_2(1 - 0.43) = 38(1 - 0.43) = 21$$

$$n' = n'_1 + n'_2 = 35$$

6. หาระยะตัวนำที่ขนานกับด้าน X และ Y ตามลำดับระยะตัวนำในทิศทางแนวแกน X

$$k_1 = n'_2 - 1 = 20$$

โดย $i \le \begin{cases} \frac{k}{2} & \text{เมื่อ k เป็นเลขคู่} \\ \frac{k+1}{2} & \text{เมื่อ k เป็นเลขคี่} \end{cases}$

จาก $Sik = \frac{Lik}{L} \times 100$

และ $Sik = b_1 e^{-b_2 i} + b_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ k_1=k=20; จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง b และ k จะได้ว่าเมื่อ k=20 ดังนั้น b_1=-0.119,b_2=0.112,b_3=0.117

$$S_1k_1 = -0.119e^{-0.112\times1} = 1.06\%$$

$$L_{1k1} = S_{1k1} \times L_1 = \frac{1.06}{100} \times 107 = 1.13m$$

$$S_{2k1} = -0.119e^{-0.112\times2} + 0.117 = 2.1\%$$

$$L_{2k1} = S_{2k1} \times L_1 = \frac{2.1}{100} \times 107 = 2.44m$$

$$S_{3k1} = -0.119^{0.112\times3} + 0.117 = 3.19\%$$

$$L_{3k1} = S_{3k1} \times L_1 = \frac{3.19}{100} \times 107 = 3.41m$$

$$S_{4k1} = -0.119^{-0.112\times4} + 0.117 = 4.09\%$$

$$L_{4k1} = S_{4k1} \times L_1 = \frac{4.09}{100} \times 107 = 4.4m$$

$$S_{5k1} = -0.119^{-0.112\times5} + 0.117 = 4.9\%$$

$$L_{5k1} = S_{5k1} \times L_1 = \frac{4.9}{100} \times 107 = 5.3m$$

$$S_{6k1} = -0.119^{-0.112\times6} + 0.117 = 5.6\%$$

$$L_{6k1} = S_{6k1} \times L_1 = \frac{5.6}{100} \times 107 = 6.1m$$

$$S_{7k1} = -0.119^{-0.112\times7} + 0.117 = 6.2\%$$

$$L_{7k1} = S_{7k1} \times L_1 = \frac{6.2}{100} \times 107 = 6.7m$$

$$S_{8k1} = -0.119e^{-0.112\times8} + 0.117 = 6.8\%$$

$$L_{8k1} = S_{8k1} \times L_1 = \frac{6.8}{100} \times 107 = 7.4m$$

$$S_{9k1} = -0.119e^{-0.112\times9} + 0.117 = 7.3\%$$

$$L_{9k1} = S_{9k1} \times L_1 = \frac{7.3}{100} \times 107 = 7.9m$$

$$S_{10k1} = -0.119^{-0.112\times10} + 0.117 = 7.8\%$$

$$L_{10k1} = S_{10k1} \times L_1 = \frac{7.8}{100} \times 107 = 8.4m$$

ระยะตะแกรงกริดที่เหลือจะสมมาตรกันระยะตัวนำในทิศทางแนวแกน Y

$$k_2 = n'_1 - 1 = 13$$

เมื่อ $k_2 = k$ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง b และ k จะได้ว่า k = 13 ดังนั้น b_1=-0.162, b_2=0.234,b_3=0.151

$$S_{1k2} = -0.162e^{0.234\times1} + 0.151 = 2.27\%$$

$$L_{1k2} = S_{1k2} \times L_2 = \frac{2.27}{100} \times 72 = 1.64m$$

$$S_{2k2} = -0.162e^{-0.234\times2} + 0.151 = 5\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{2k2} = S_{2k2} \times L_2 = \frac{5}{100} \times 72 = 3.6m$$

$$S_{3k2} = -0.162e^{0.234\times 3} + 0.151 = 7\%$$

$$L_{3k2} = S_{3k2} \times L \;\; = \frac{7}{100} \times 72 = 5.1m$$

$$S_{4k2} = -0.162e^{-0.234\times 4} + 0.151 = 8.7\%$$

$$L_{4k2} = S_{4k2} \times L_2 = \frac{8.7}{100} 72 = 6.3m$$

$$S_{5k2} = -0.162e^{-0.234\times 5} + 0.151 = 10\%$$

$$L_{5k2} = S_{5k2} \times L_2 = \frac{10}{100} \times 72 = 7.2m$$

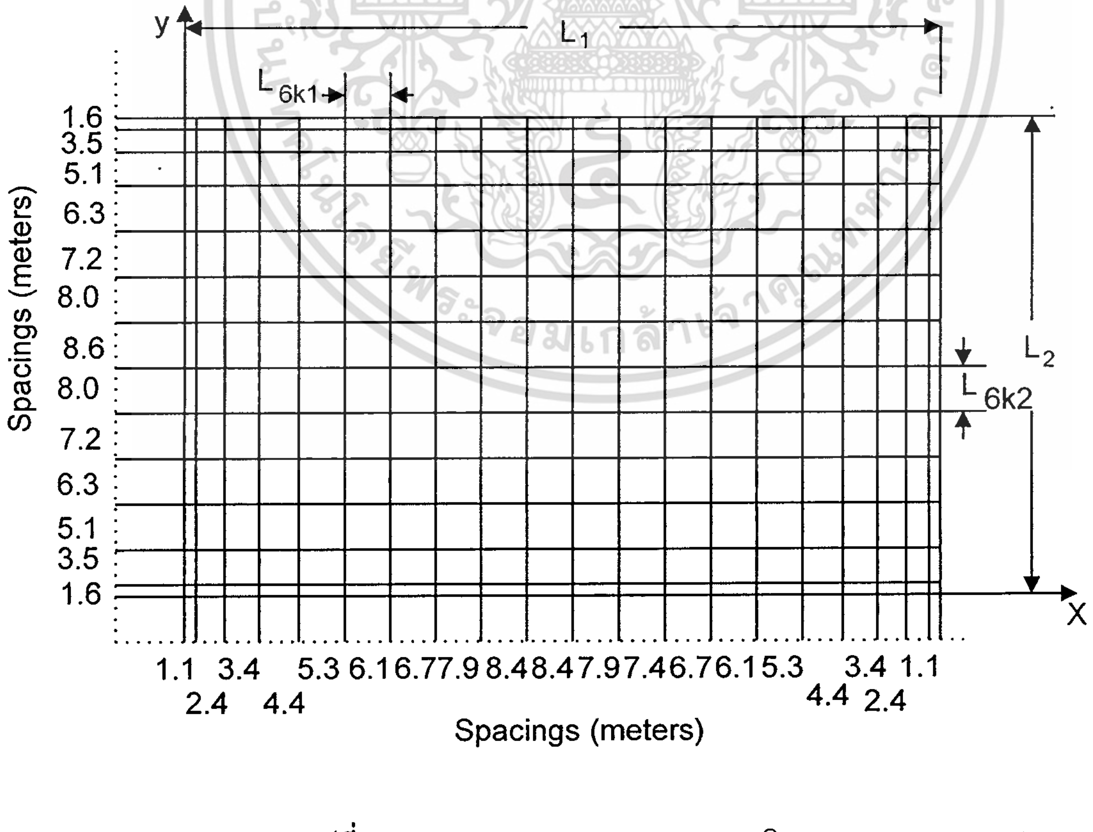
$$S_{6k2} = -0.162e^{-0.234\times 6} + 0.151 = 11.1\%$$

$$L_{6k2} = S_{6k2} \times L_2 = \frac{11.1}{100} \times 72 = 8m$$

$$S_{7k2} = -0.162e^{-0.234\times 7} + 0.151 = 11.95\%$$

$$L_{7k2} = S_{7k2} \times L_2 = \frac{12}{100} \times 72 = 8.6m$$

ระยะตะแกรงกริดที่เหลือจะสมมาตรกัน



รูปที่ 46 แสดงผลการออกแบบตะแกรงกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 รูปแบบทั่วไปของโปรแกรม

- **ไตเติ้ลบาร์** 1. **ปุ่มป้อนข้อมูล** ปุ่มนี้จะเป็นหน้าแรกของโปรแกรมการคำนวณ ผู้ใช้ต้องเติมค่าต่าง ๆ ลงไป

2. **ปุ่มคำนวณค่าศักดาไฟฟ้า** ถ้ากดที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าที่ 2 ของโปรแกรม

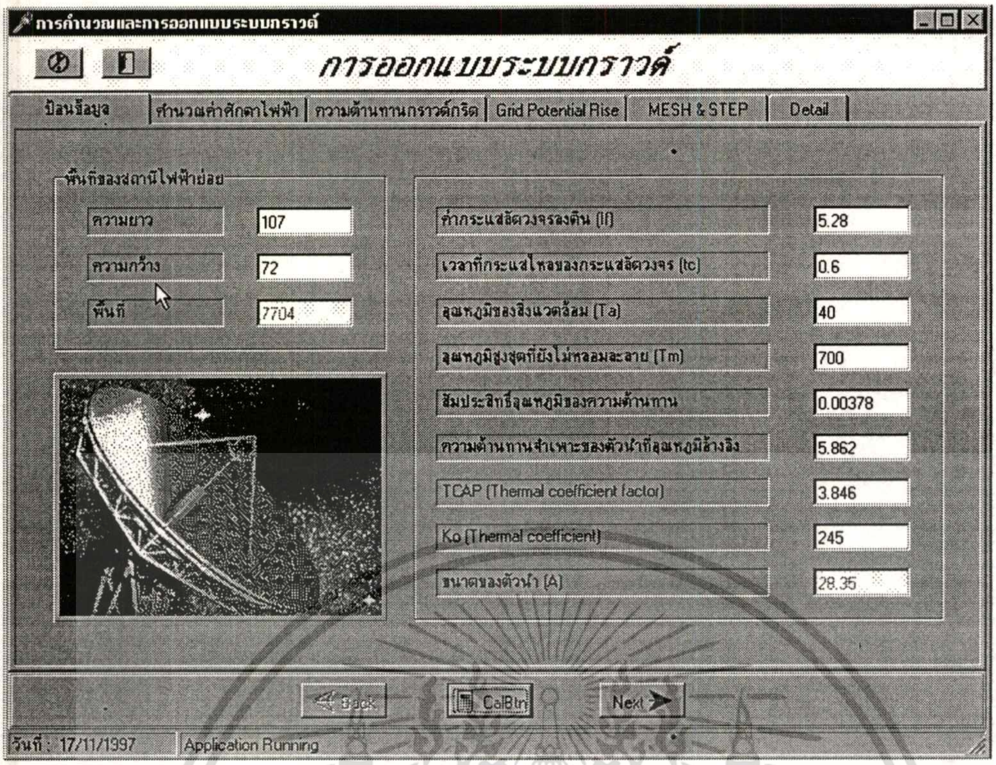
3. **ปุ่มความต้านทานกราวด์กริด** ถ้ากดที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าที่ 3 ของโปรแกรม

4. **ปุ่ม Grid Potential Rise**ถ้ากดที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าที่ 4 ของโปรแกรม

5. **ปุ่ม Mesh & Step** ถ้ากดที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าที่ 5 ของโปร - แกรม

6. **ปุ่ม Detail** ถ้ากดที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าที่ 6 ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่47</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาพื้นที่และขนาดของตัวนำ

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1.ความกว้างและความยาวของพื้นที่ ที่ใช้ในการคำนวณ

  2.ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน

  3.เวลาที่กระแสไหลของกระแสลัดวงจร

  4.อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

  5.อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย

  6.สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน

  7.ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง

  8.TCAP (Thermal coefficient factor)

  9.Ko (Thermal coefficient)

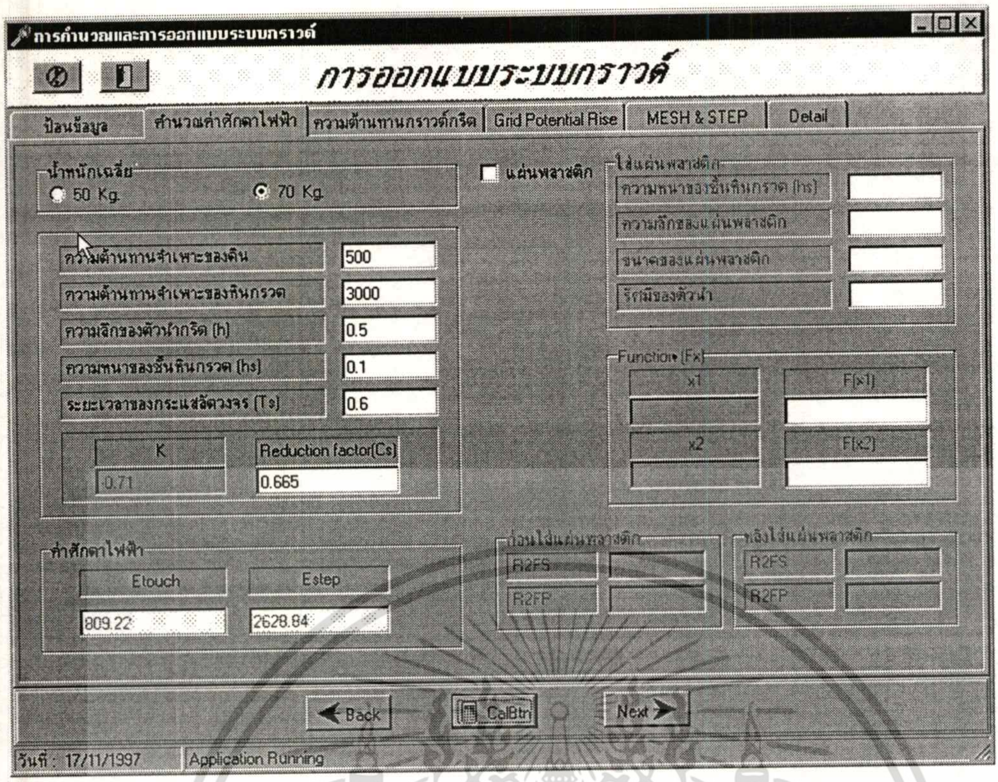
- **ช่องผลลัพธ์** 1. พื้นที่ (ตารางเมตร)

  2. ขนาดของตัวนำ (ตารางมิลลิเมตร)

- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผลลัพธ์

- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

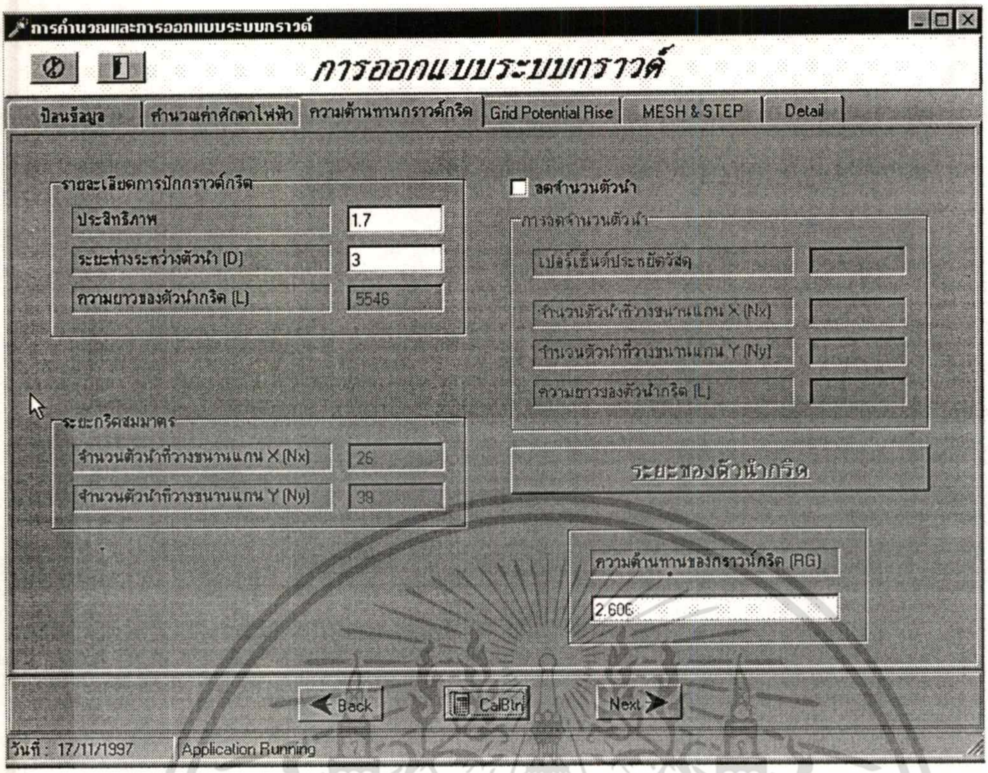


<u>รูปที่ 48</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาศักดาไฟฟ้า ในกรณีไม่ใส่แผ่นพลาสติก

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. น้ำหนักเฉลี่ย ประเภท 50 Kg. และ 70 Kg.
  2. แผ่นพลาสติก
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. ความต้านทานจำเพาะของดิน
  2. ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด
  3. ความลึกของตัวนำกริด
  4. ความหนาของชั้นหินกรวด
  5. ระยะเวลาของกระแสลัดวงจร
  6. ค่า Reduction (Cs)
- **ช่องผลลัพธ์** 1. ค่าศักดาไฟฟ้า ประกอบด้วย ค่า **Etouch** และ **Estep**
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

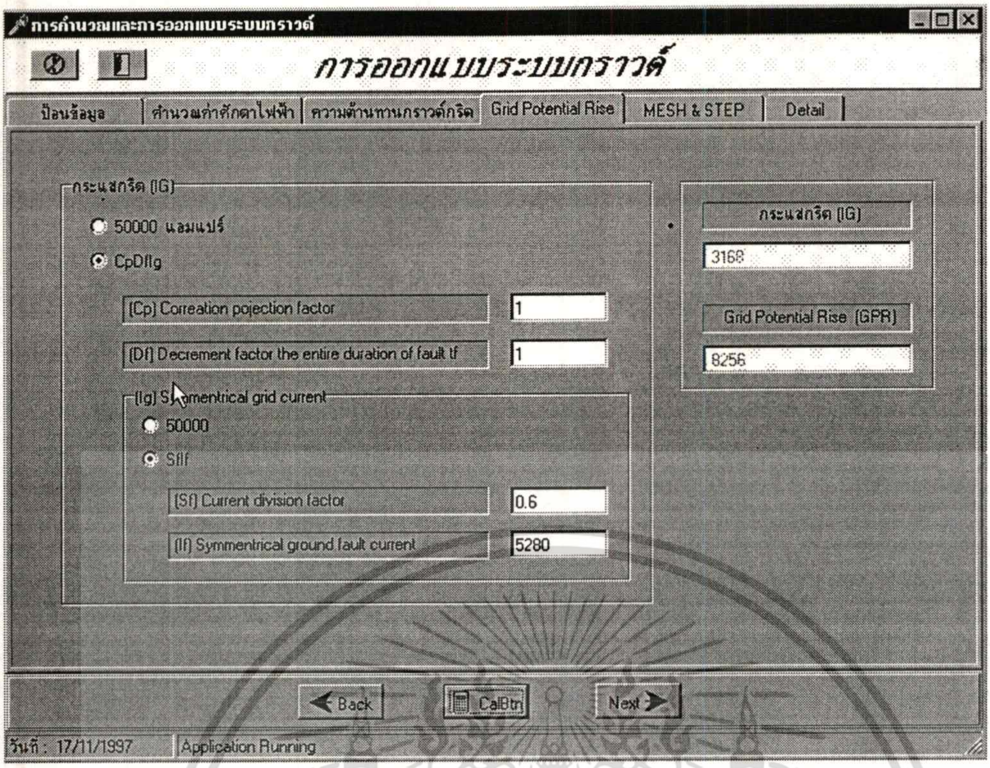


<u>รูปที่ 49</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริด

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. ลดจำนวนตัวนำ และ ไม่เลือก ลดจำนวนตัวนำ
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. ประสิทธิภาพ
  2. ระยะห่างระหว่างตัวนำ
  3. ความยาวของตัวนำกริด
  4. ความยาวของตัวนำกริด
- **ช่องผลลัพธ์** 1. จำนวนตัวนำที่วางขนานแกน X
  2. จำนวนตัวนำที่วางขนานแกน Y
  3. ความต้านทานของกราวด์กริด
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 50</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหา **Grid Potential Rise**

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. กระแสกริด ประกอบด้วย **5000 A.** และ **CpDflg**

  2. Symmentrical grid current

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. Correation pojection factor

  2. Decrement factor the entire duration of fault if

  3. Current division factor

  4. Symmentrical ground fault current

- **ช่องผลลัพธ์** 1. กระแสกริด

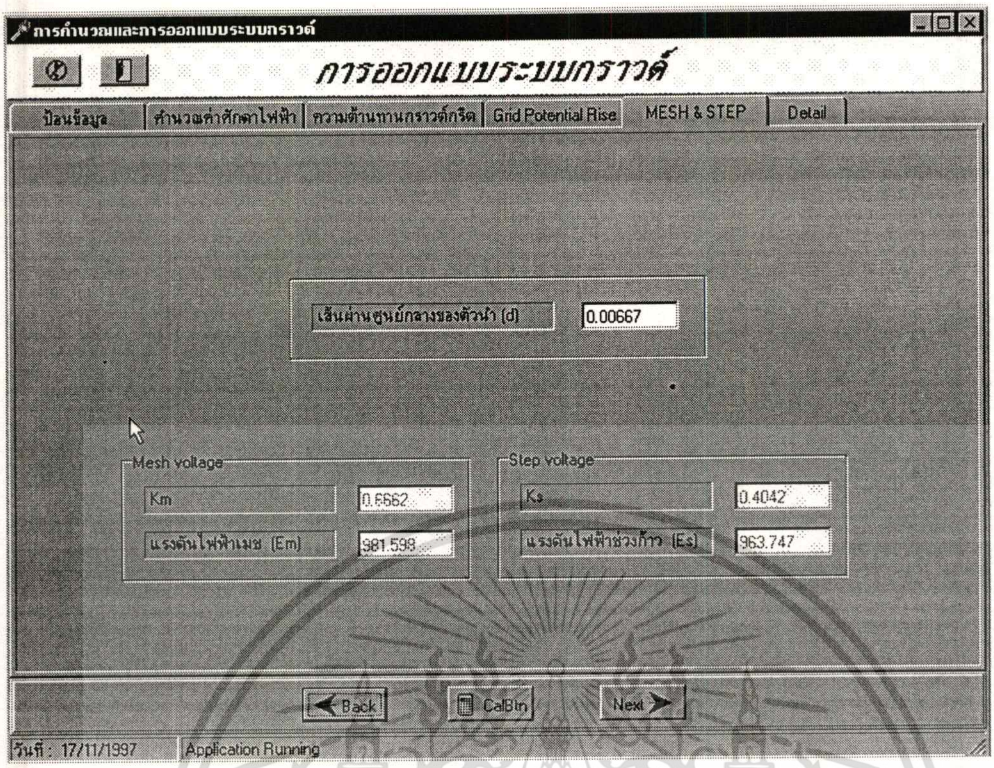
  2. Grid Potential Rise

- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ

- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์

- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

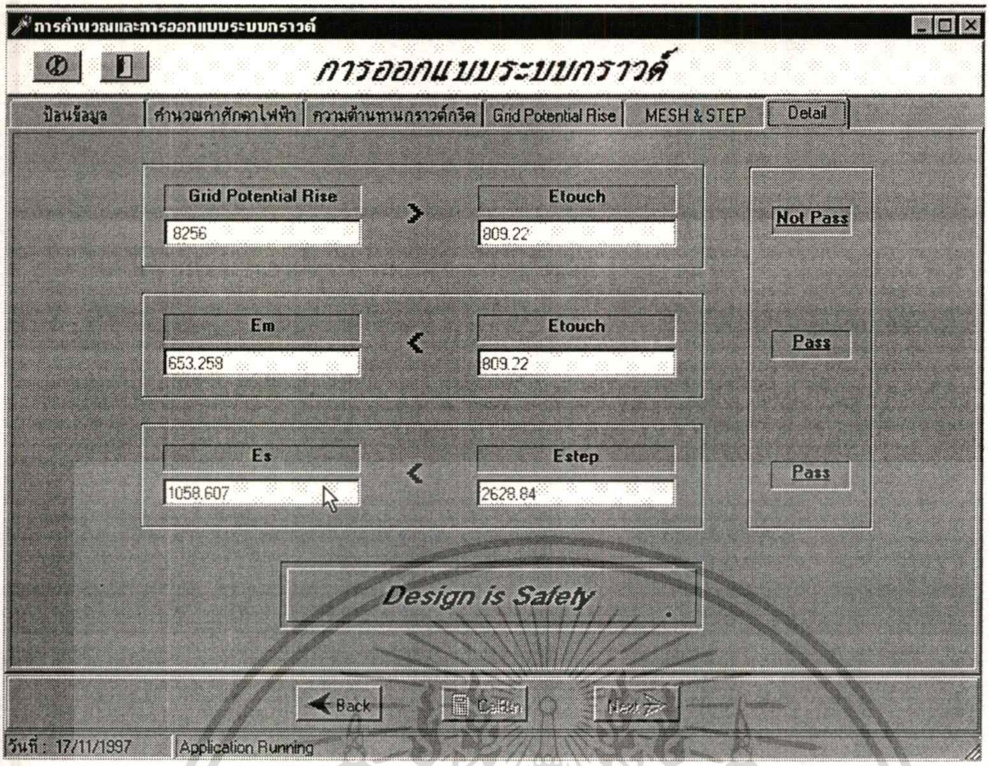


รูปที่ 51 แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Mesh & Step

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ
- **ช่องผลลัพธ์** 1. ค่า Km
  2. แรงดันไฟฟ้าเมช (Em)
  3. ค่า Ks
  4. แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Es)
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล -ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

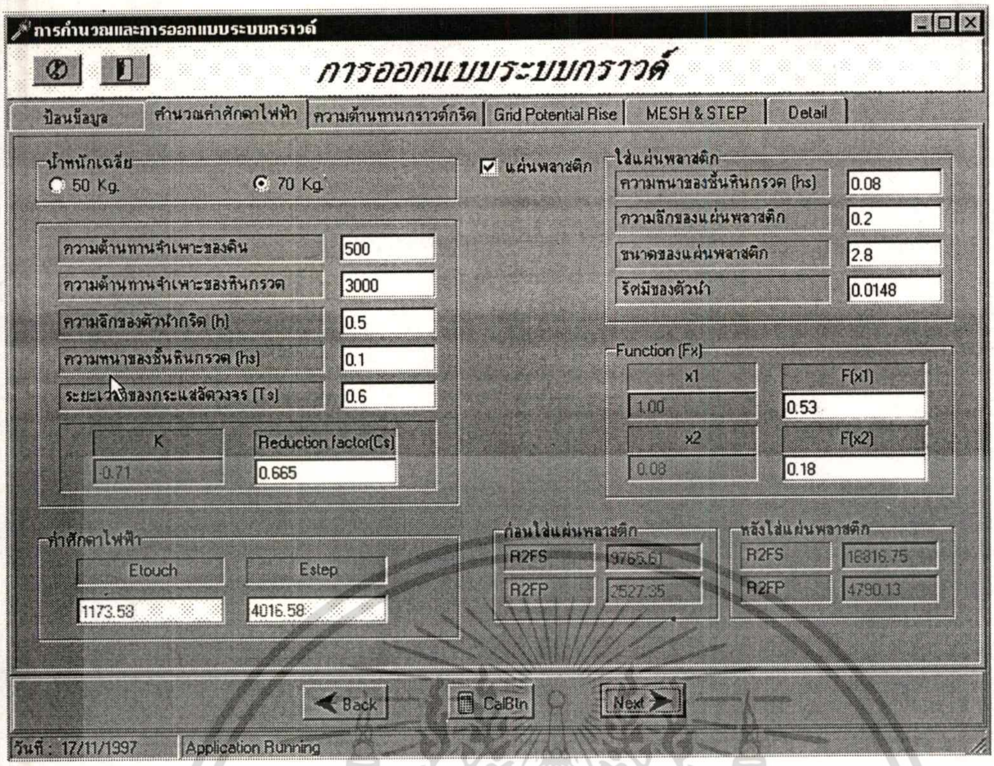


รูปที่ 52 แสดงหน้าต่างการเช็ค ค่าความปลอดภัย หรือ ไม่ปลอดภัย

ประกอบด้วย

- **ช่องการเช็คผลลัพธ์** 1. Grid Potential Rise, Etouch
  2. Em, Etouch
  3. Es, Estep
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้ จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<u>รูปที่ 53</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาศักดาไฟฟ้า ในกรณีใส่แผ่นพลาสติก

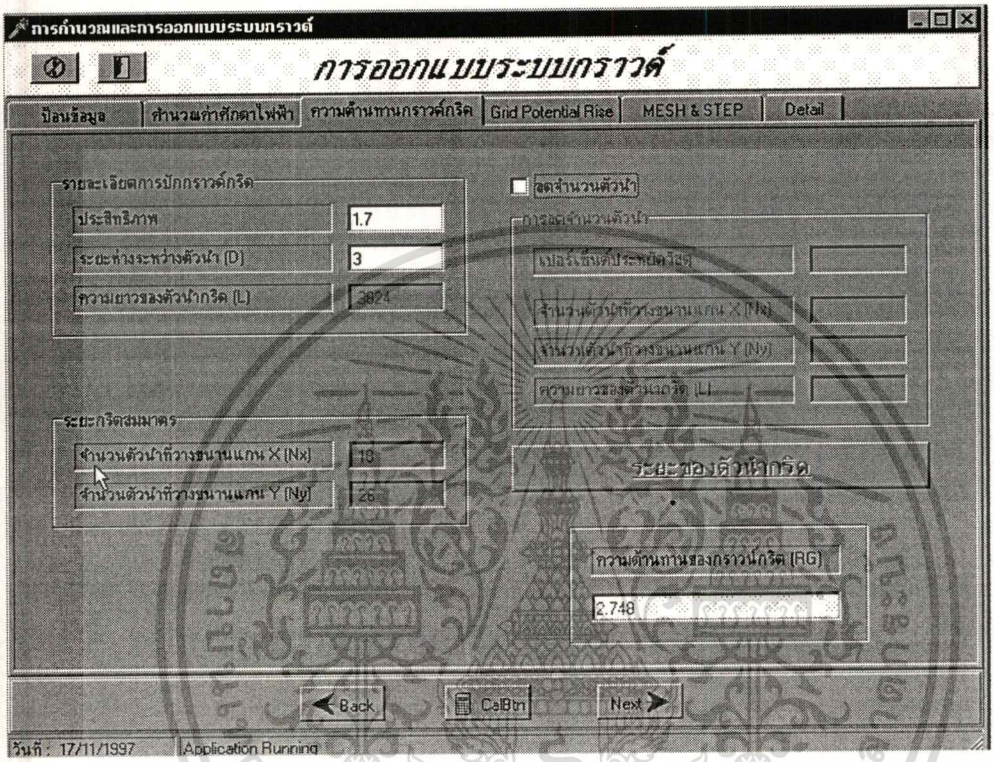
ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. น้ำหนักเฉลี่ย ประเภท 50 Kg. และ 70 Kg.
  2. แผ่นพลาสติก
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. ความต้านทานจำเพาะของดิน
  2. ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด
  3. ความลึกของตัวนำกริด
  4. ความหนาของชั้นหินกรวด
  5. ระยะเวลาของกระแสลัดวงจร
  6. ค่า Reduction (Cs)
  7. ความหนาของชั้นหินกรวด
  8. ความลึกของแผ่นพลาสติก
  9. ขนาดของแผ่นพลาสติก
  10. รัศมีของตัวนำ

- **ช่องผลลัพธ์** 1. ค่าศักดาไฟฟ้า ประกอบด้วย ค่า **Etouch** และ **Estep**
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็น ... ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ



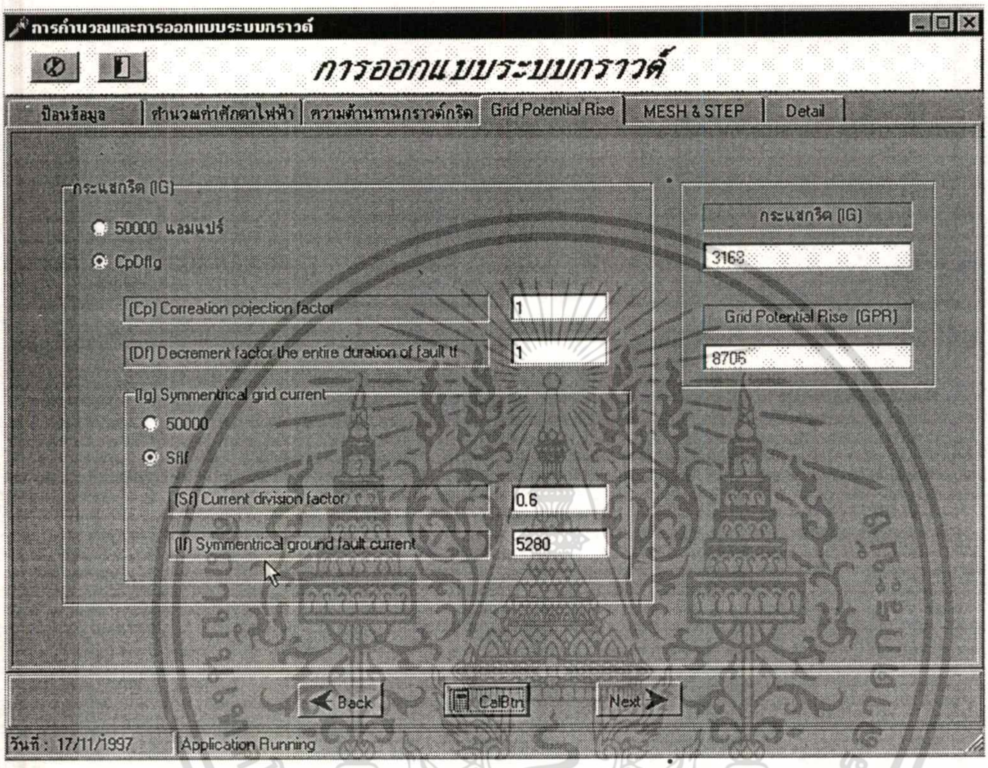
<u>รูปที่ 54</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริด

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. ลดจำนวนตัวนำ
  2. ไม่ลดจำนวนตัวนำ
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. ประสิทธิภาพ
  2. ระยะห่างระหว่างตัวนำ
- **ช่องผลลัพธ์** 1. จำนวนตัวนำที่วางขนานแกน X (Nx)
  2. จำนวนตัวนำที่วางขนานแกน Y (Ny)
  3. ความต้านทานของกราวด์กริด (RG)
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผลลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ



<u>รูปที่ 55</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหา **Grid Potential Rise**

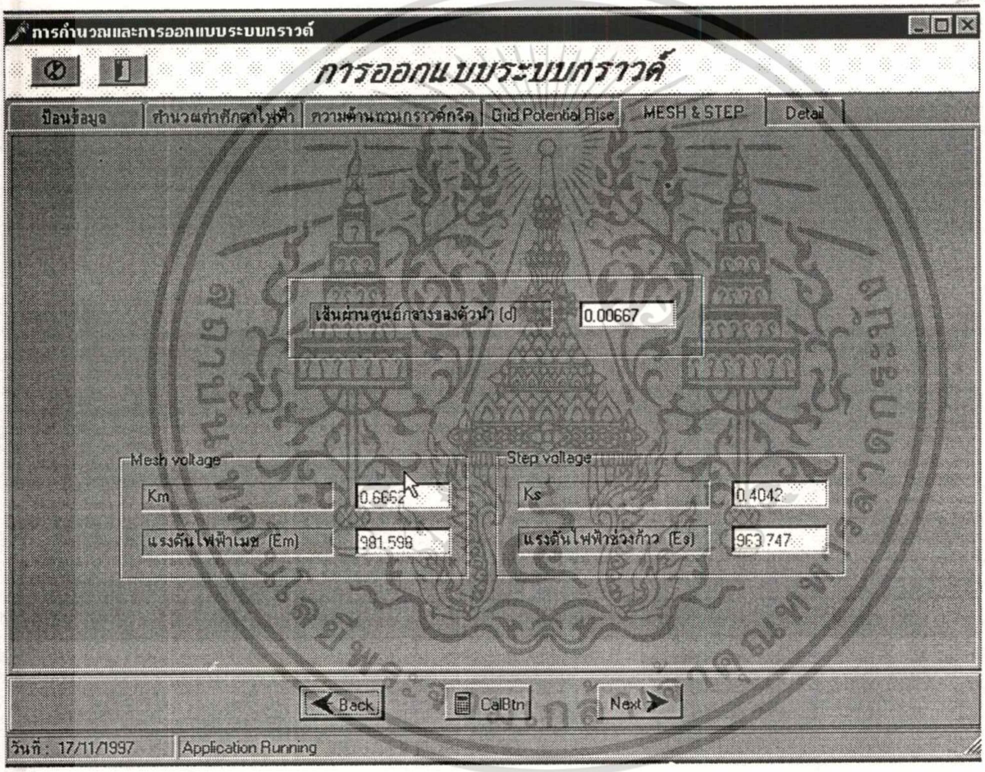
ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก**
  1. กระแสกริด ประกอบด้วย **5000 A.** และ **CpDflg**
  2. Symmentrical grid current
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
  1. Correation pojection factor
  2. Decrement factor the entire duration of fault if
  3. Current division factor
  4. Symmentrical ground fault current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ช่องผลลัพธ์** 1. กระแสกริด

  2. Grid Potential Rise
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ



<u>รูปที่ 56</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Mesh & Step

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ
- **ช่องผลลัพธ์** 1. ค่า Km

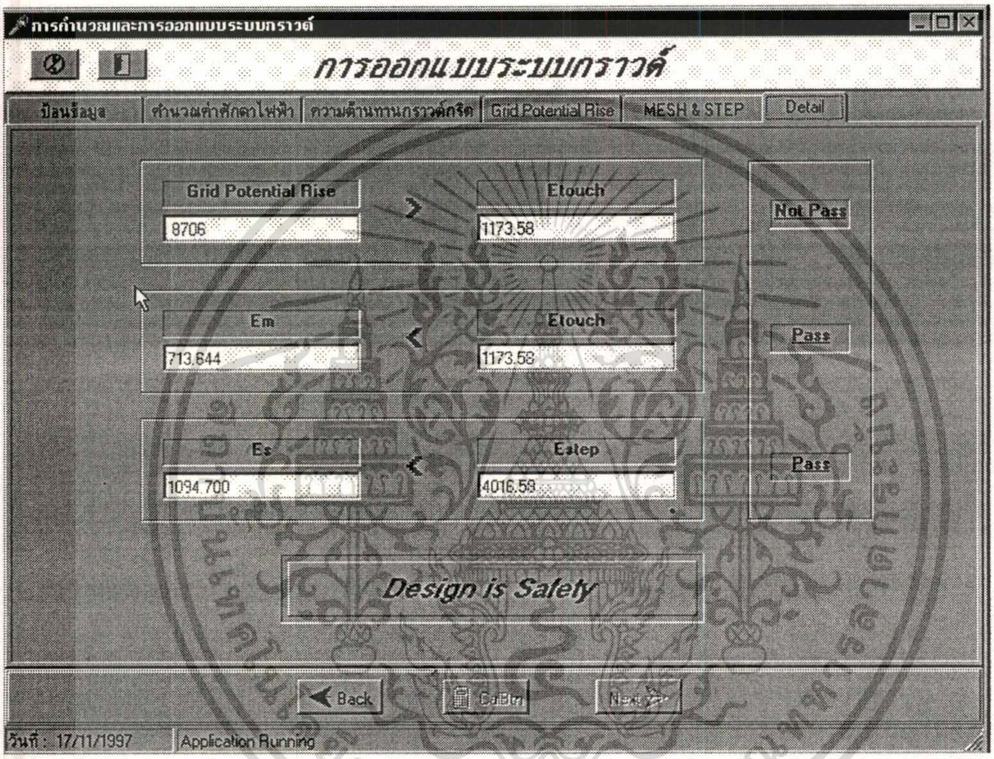
  2. แรงดันไฟฟ้าเมช (Em)

  3. ค่า Ks

  4. แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Es)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผลลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนีจะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ

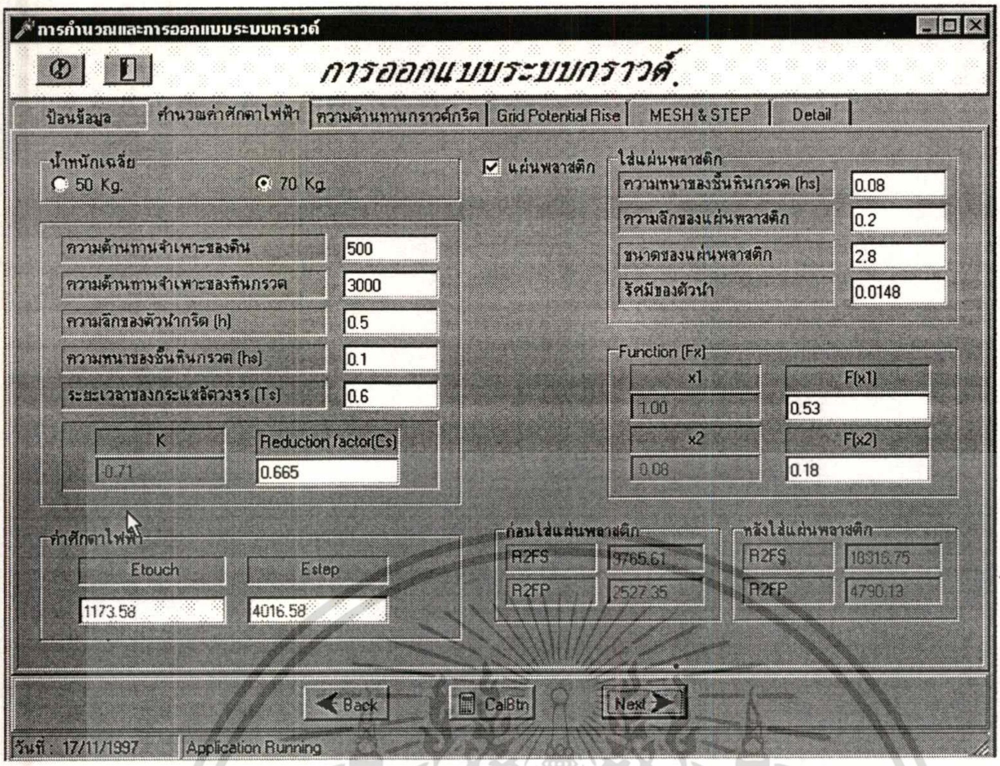


รูปที่ 57 แสดงหน้าต่างการเช็ค ค่าความปลอดภัย หรือ ไม่ปลอดภัย

ประกอบด้วย

- **ช่องการเช็คผลลัพธ์**
  1. Grid Potential Rise, Etouch
  2. Em, Etouch
  3. Es, Estep
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 58 แสดงหน้าต่างการคำนวณหาศักดาไฟฟ้า ในกรณีใส่แผ่นพลาสติก

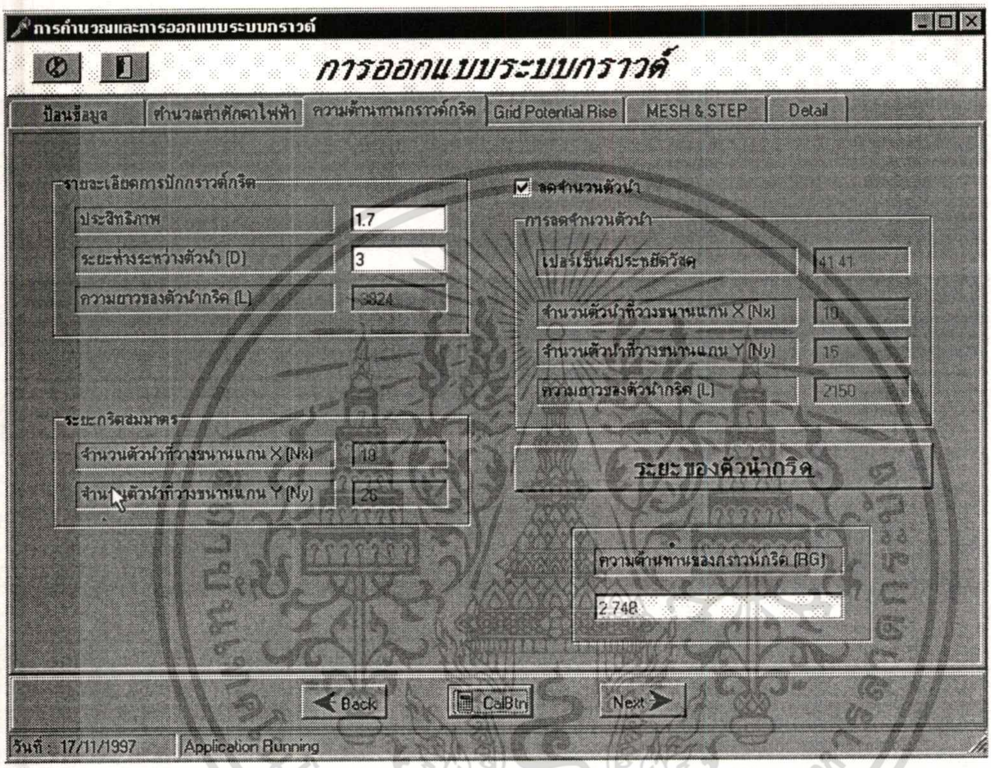
ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. น้ำหนักเฉลี่ย ประเภท 50 Kg. และ 70 Kg.
  2. แผ่นพลาสติก
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. ความต้านทานจำเพาะของดิน
  2. ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด
  3. ความลึกของตัวนำกริด
  4. ความหนาของชั้นหินกรวด
  5. ระยะเวลาของกระแสลัดวงจร
  6. ค่า Reduction (Cs)
  7. ความหนาของชั้นหินกรวด
  8. ความลึกของแผ่นพลาสติก
  9. ขนาดของแผ่นพลาสติก
  10. รัศมีของตัวนำ

- **ช่องผลลัพธ์** 1. ค่าศักดาไฟฟ้า ประกอบด้วย ค่า **Etouch** และ **Estep**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรม
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ



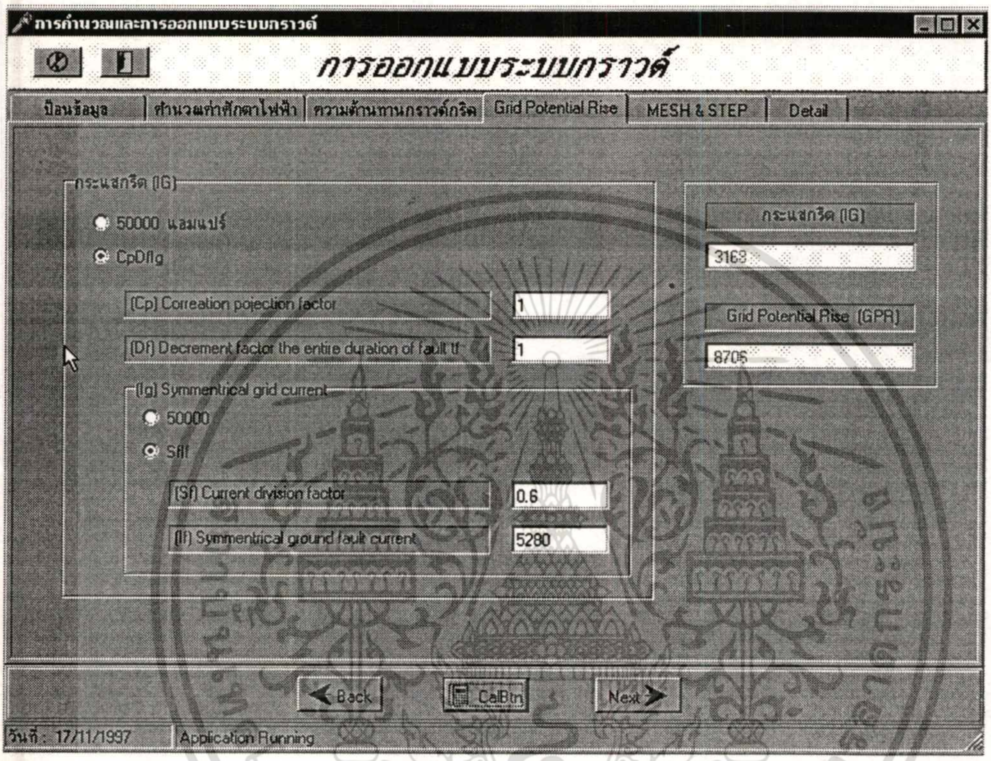
<u>รูปที่ 59</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริด

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. ลดจำนวนตัวนำ และ ไม่เลือก ลดจำนวนตัวนำ
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. ประสิทธิภาพ
  2. ระยะห่างระหว่างตัวนำ
  3. ความยาวของตัวนำกริด
  4. ความยาวของตัวนำกริด
- **ช่องผลลัพธ์** 1. จำนวนตัวนำที่วางขนานแกน X
  2. จำนวนตัวนำที่วางขนานแกน Y
  3. ความต้านทานของกราวด์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์



<u>รูปที่ 60</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Grid Potential Rise

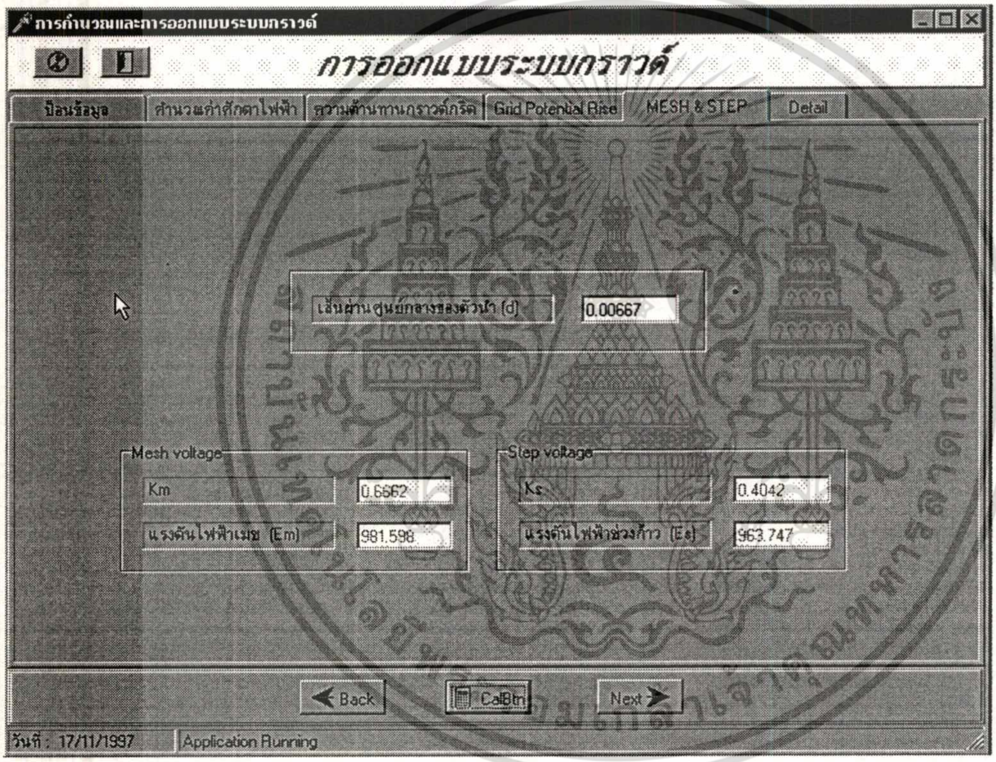
ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก** 1. กระแสกริด ประกอบด้วย **5000 A.** และ **CpDflg**
  2. Symmentrical grid current
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. Correation pojection factor
  2. Decrement factor the entire duration of fault if
  3. Current division factor
  4. Symmentrical ground fault current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ช่องผลลัพธ์** 1. กระแสกริด

  2. Grid Potential Rise
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ



<u>รูปที่ 61</u> แสดงหน้าต่างการคำนวณหา Mesh & Step

ประกอบด้วย

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม** 1. เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ
- **ช่องผลลัพธ์** 1. ค่า Km

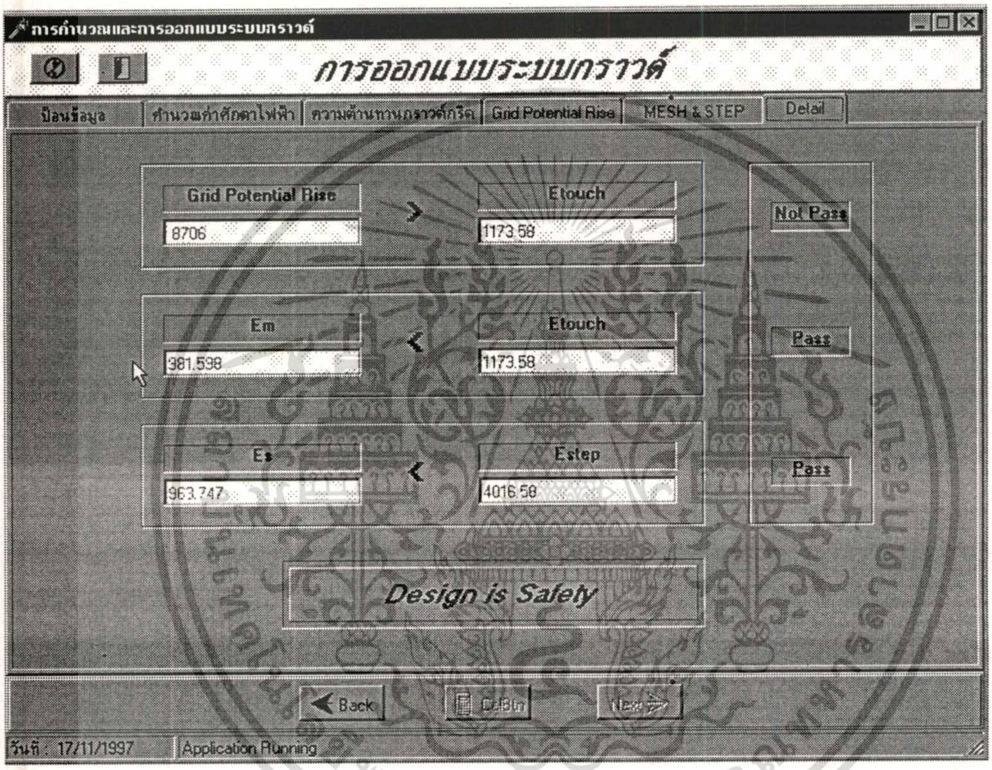
  2. แรงดันไฟฟ้าเมช (Em)

  3. ค่า Ks

  4. แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Es)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ
- **ปุ่ม Calculate** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่ม Calculate นี้จะปรากฏ **ผลลัพธ์** ขึ้นที่ช่องผล - ลัพธ์
- **ปุ่ม Next** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมการคำนวณ

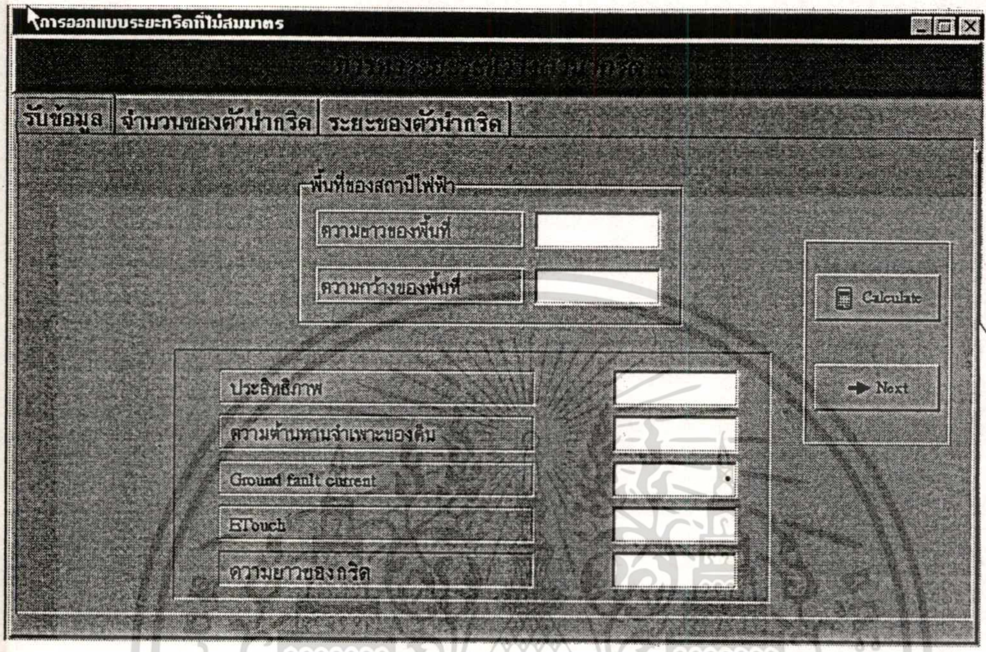


<u>รูปที่ 62</u> แสดงหน้าต่างการเช็ค ค่าความปลอดภัย หรือ ไม่ปลอดภัย

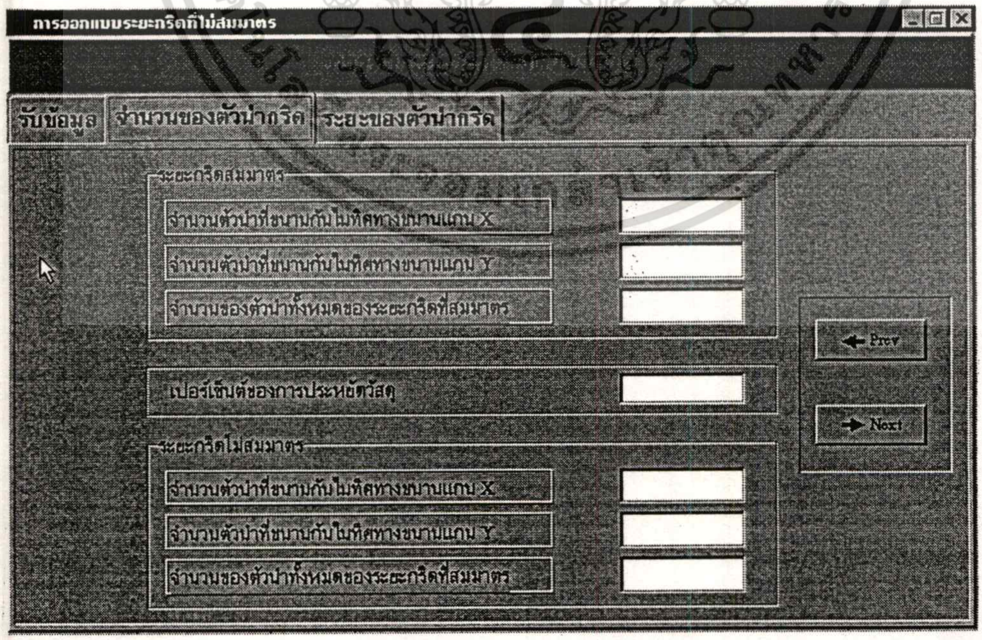
ประกอบด้วย

- **ช่องการเช็คผลลัพธ์**
  1. Grid Potential Rise, Etouch
  2. Em, Etouch
  3. Es, Estep
- **ปุ่ม Back** เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปร - แกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

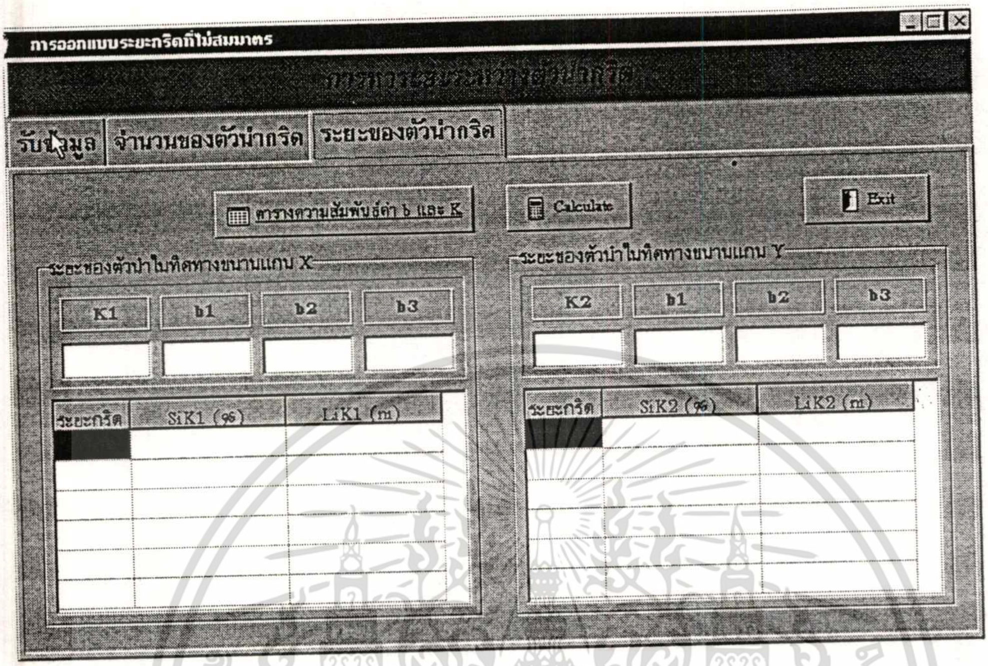


รูปที่ 63 แสดงหน้าต่างการหาระยะระหว่างตัวนำกริด

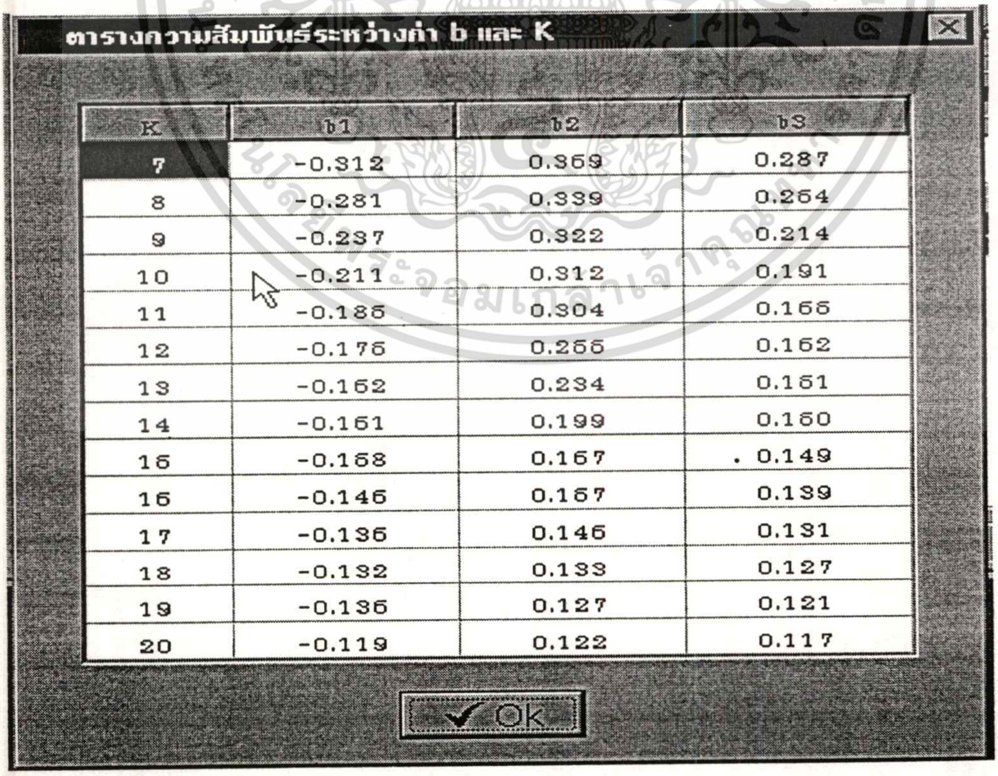


รูปที่ 64 แสดงหน้าต่างการหาระยะระหว่างตัวนำกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 65 แสดงหน้าต่างการหาระยะระหว่างตัวนำกริด


ตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่า b และ K

K	b1	b2	b3
7	-0.312	0.359	0.287
8	-0.281	0.339	0.254
9	-0.237	0.322	0.214
10	-0.211	0.312	0.191
11	-0.185	0.304	0.155
12	-0.175	0.255	0.152
13	-0.152	0.234	0.151
14	-0.151	0.199	0.150
15	-0.158	0.157	. 0.149
16	-0.145	0.157	0.139
17	-0.135	0.145	0.131
18	-0.132	0.133	0.127
19	-0.135	0.127	0.121
20	-0.119	0.122	0.117

Ok

รูปที่ 66 แสดงหน้าต่างความสัมพันธ์ระหว่างค่า b และ k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลของการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น โดยการใส่แผ่นพลาสติกเพิ่มเข้าไปเหนือตะแกรงกริดเป็นบางจุด โดยจะใส่ไว้ระหว่างร่องตาข่าย ณ ตำแหน่งที่คาดว่ามีอันตรายมาก เช่น ทางเดิน ตำแหน่งที่ตั้งอุปกรณ์ เป็นต้น ซึ่งมันเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้าให้สูงขึ้นได้ในบางจุดของสถานีไฟฟ้าย่อย ดังตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญในการวิจัย คือ ความหนาของชั้นหินกรวด ความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับสภาพของที่ตั้งสถานีไฟฟ้าย่อย, ระยะความลึกของแผ่นพลาสติก, ความลึกของการฝังตะแกรงกริด, ความยาวของตัวนำ, กราวด์ร็อด, ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน, จำนวนร่องตาข่าย การวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการออกแบบระบบต่อลงดินที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้นำไปใช้งานได้จริงเพราะมีการแสดงผลลัพธ์ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ อีกทั้งในกรณีที่ค่าของศักดาไฟฟ้าต่าง ๆ ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไข โปรแกรมก็ยังสามารถที่จะทำการออกแบบปรับปรุงได้ ตามตัวแปรที่สำคัญ ๆ ในเบื้องต้น การวิจัยระบบต่อลงดินโดยนำแผ่นพลาสติกใส่เพิ่มเข้าไปนั้นจะทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งจะได้ ค่าศักดาไฟฟ้าตามข้อกำหนดด้วย

อนึ่งแนวทางใหม่ของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งเป็นวิธีการที่เพิ่มเติมหลังจากใส่แผ่นพลาสติกแล้ว โดยเป็นวิธีการลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตร ซึ่งวิธีนี้สามารถลดจำนวนตัวนำได้ถึง 30-40 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการประหยัดและมีความปลอดภัยมากขึ้น ระยะตะแกรงกริดที่ไม่สมมาตรทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำแผ่กระจายในชั้นดินได้ดี และยังทำให้ลดศักดาไฟฟ้าที่พื้นผิวหน้าของดินด้วย อีกทั้งยังทำให้เกิดความปลอดภัยในชีวิตและอุปกรณ์ต่าง ๆ

บทสรุปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงให้เห็นถึงความคิดเพิ่มเติมทางการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตาม ANSI/IEEE Std.80-1986 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกันโดยทั่วไป โดยการใส่แผ่นพลาสติกเพื่อเพิ่มความต้านทานที่เท้าของผู้ปฏิบัติการ อีกทั้งวิธีลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตรแสดงให้เห็นทั้งวิธีคำนวณและการประมวลผลของโปรแกรมการประมวลผลจะมีความสะดวกและรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียอยู่หลายประการด้วยกัน เพราะโปรแกรมไม่สามารถทราบได้เลยว่า ข้อมูล ที่ผู้ใช้ป้อนเข้าสู่โปรแกรมถูกต้องหรือไม่ ดังนั้นเมื่อผู้ใช้ต้องการที่จะทำการประมวลต่าง ๆ ที่กำหนดด้วยโปรแกรมการประมวลผลแล้ว ผู้ใช้ต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ก่อนที่จะป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม แต่ถ้ากรณีที่ผู้ใช้ป้อนข้อมูลถูกต้องแล้วโปรแกรมจะทำการประมวลผลและแสดงค่าที่ถูกต้องต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] ANSI-IEEE Standard 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York 1986

[2] B. Thapar, and Z.A Alaywan, "Increasing of Ground Resistance of Human Foot in Substation Yards" IEEE Trans. on Power Delivery , vol. RWRD-4 1989, PP45-59

[3] L. Huang, and X. Chen "Study of unequally spaced grounding grids" IEEE Trans. on power delivery, vol. 10, 2, April 1995

[4] B. Thapar and Victor Gerez. "Ground Resistance of the foot in Substation yards" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, No. 1, 1993

[5] Y.L. chow and m. m. A Salama, "Simplified method for calculating the Substation Grounding Grid Resistance" IEEE Trans. on Power Delivery, vol 9, No.2 April 1994

[6] A.P. meliopoulos, F. Xia, E.B. Joy and G.J. Ckkinides "An advanced computer model for grounding system analysis" IEEE Transactions on Power delivery, vol. 8, No.1, January 1993

[7] F. Dawalibi and D. mukhedkar, "Influnce of Ground Rod on Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, No.-6, PP.2098, Nov/Dec 1979

[8] B. Thapar, V. Gerez and V Singh, "Effective ground resistance of the human fect in high voltage switchyards," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, No.1, January 1993.

[9] B. Thapar, V. Gerez and P.Emmanuel, "Ground Resistance of the human fect in Substation Yards," IEEE/PES Winter 1992 Mecting

[10] J.G. Sverak, "Simplified Analysis of Electrical Gradients Above a Grounding Grids, Part I : How Goods is The Present IEEE Method? IEEE Transactions on Power Apparatus, vol. PAS-103, PP.7-25, January 1984

[11] F. Dawalibi, W.Xiong and J. Ma, "Effects of Deteriorated and Contaminated Substation surface covering Layers on foot Resistance Calculation s" IEEE Transactions on power Delivery, vol.8, No. 1, January 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] B. Thapar , V. Gerez and H.Kejriwal, "Reduction Factor For The Ground Resistance of Foot in Substation yards" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, No. 1 January 1994

[13] C.X. CHEN and D.G. KASTEN, "An Expression for the Calculation of Grounding Resistance in Uniform Soil" Electric Power Systems Research, 9 (1985) 193-200.

[14] J. Lazzara, and N. Barbeito, "Simplified Two Layer Model Substation Ground Grid Design Methodology" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, No. 4, November 1990.

[15] ชำนาญ ห่อเกียรติ. 2532." การต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย" มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ. 21 น.

[16] "เอกสารการออกแบบระบบกราวด์" Sri-u-thong Company Limited.

[17] วิลาส เฉลยสัตย์. "เอกสารการออกแบบระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้าย่อย" แผนกออกแบบ การจ่ายใช้ให้ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่. การไฟฟ้านครหลวง

[18] สรายุธ พงษ์เพชร. 2532 "การออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย" วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

[19] บัณฑูร พิทักษ์วงษ์, ศุลี บรรจงจิตร "แนวทางใหม่ของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 20 13-14 พฤศจิกายน 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มาตรฐานการต่อลงดินและค่าความต้านทานของการต่อลงดิน

1. National Electrical Safety Code 1977 ถ้าในระบบมีจุดต่อลงดินเพียงจุดเดียว (Single grounded system) ความต้านทานของสายดินต้องมีค่าไม่เกิน 25 โอห์ม (ถ้าสามารถทำได้) และในกรณีของระบบที่มีจุดต่อลงดินหลายจุด (multiple grounded system) สายนิวตรอลจะต้องต่อลงดินที่ตำแหน่งหม้อแปลง และเพิ่มขึ้นอีกไม่น้อยกว่า 4 จุด

2. National Electrical Code 1975 ถ้าตอกแท่งหลักสายดิน 1 ท่อนแล้ววัดค่าความต้านทานของการต่อลงดินได้เกิน 25 โอห์ม ให้ตอกแท่งหลักสายดินเพิ่มอีก 1 ท่อน

3. VDE 0100/11-58 กำหนดให้สายนิวตรอลต้องต่อลงดินใกล้หม้อแปลงและเพิ่มจุดต่อลงดินในไลน์ซึ่งอย่างน้อยที่ตำแหน่งปลายของสายแยกที่ยาวกว่า 200 เมตร ค่าความต้านทานรวมของจุดต่อลงดินใกล้หม้อแปลงและภายในระยะ 200 เมตรที่ห่างจากปลายสายแยกไม่ควรเกิน 5 โอห์ม (แต่ละจุดอาจมีค่าความต้านทานเกินกว่า 5 โอห์มได้) เช่นนิวตรอลต่อลงดิน 4 จุดในระยะ 200 เมตร วัดค่าความต้านทานของแต่ละจุดได้ 60, 30, 15 และ 12 โอห์มตามลำดับ (แต่เมื่อวัดค่าความต้านทานรวมแล้วจะต้องไม่เกิน 5 โอห์ม) ในบางแห่ง เช่น บริเวณที่เต็มไปด้วยหิน (rocky ground) มาตรฐาน VDE ย่อมให้ค่าความต้านทานของสายดินของสายดินสูงถึง 800 โอห์ม แต่ทั้งนี้ค่าแรงดันสัมผัส (Contact voltage) ของสายดินจะต้องไม่เกิน 65 โวลท์

4. VDE 0675/9.57 ความต้านทานสายดินของล่อฟ้า (Lightning arrester) ที่มีพิกัดแรงดันเกิน 1 KV ควรมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม

5. Code of Practice, Protective Earthing ของการไฟฟ้าแห่ง รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย กำหนดค่าความต้านทานสายดินของระบบแรงสูงไว้ไม่เกิน 30 โอห์ม และระบบแรงต่ำไม่เกิน 10 โอห์ม (สำหรับระบบแรงต่ำที่มีจุดต่อลงดินหลายจุด)

สำหรับประเทศไทย เนื่องจากพื้นที่บางแห่งแห้งแล้ง บางแห่งเป็นหินและบางแห่งชุ่มชื้น การต่อลงดินในพื้นที่ที่เป็นหินและพื้นที่แห้งแล้ว ให้แต่ละจุดมีค่าความต้านทานไม่เกิน 5 โอห์ม นั้นทำได้ยาก ถึงแม้ในทางทฤษฎีจะสามารถทำได้ก็ตาม แต่ก็จะต้องลงทุนสูงและเสียเวลามาก ดังนั้นมาตรฐานของการไฟฟ้าบางแห่ง เช่น มาตรฐานของ กฟผ. ซึ่งเดิมกำหนดค่าความต้านทานทางสายดินแต่ละจุดจะต้องไม่เกิน 5 โอห์ม ก็ได้กำหนดใหม่ว่าควรมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม และในพื้นที่ที่ยากต่อการต่อลงดิน ค่าความต้านทานของสายดินแต่ละจุดยอมให้สูงสุด 25 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีลดค่าความต้านทานดิน

เมื่อฝังหรือตอกแท่งหลักสายดินตามวิธีการดังกล่าวมาแล้ว ให้ใช้เมกเกอร์วัดค่าความต้านทาน ณ จุดต่อลงดินซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 5 โอห์มหากว่าความต้านทานที่วัดได้เกินกว่าที่กำหนดดังกล่าวมาก จะต้องทำการแก้ไขด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

1. โดยวิธีเพิ่มจำนวนแท่งหลักดิน

การตอกแท่งหลักสายดิน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันหากสามารถตอกแท่งหลักสายดินได้ลึกถึงชั้นของดินที่มีความชื้นถาวร (permanent moisture) แล้วความต้านทานดินจะต่ำมาก ในบางแห่งการตอกแท่งหลักสายดินลงไปลึกเพียง 2 เมตร ก็ถึงชั้นของดินที่มีความชื้นถาวรได้ ดังนั้นการตอกแท่งหลักสายดินให้ลึกลงไปได้มากก็จะยิ่งเป็นผลดี

2. โดยการฝังตัวนำตามแนวระดับ

ในกรณีที่ชั้นหิน (Bed rock) อยู่ใกล้ผิวดิน ทำให้ไม่สามารถตอกแท่งหลักสายดินลงไปได้ลึกตามที่กำหนดหรือการตอกลงไปทำให้ได้ค่าความต้านทานดินที่สูงมาก วิธีการฝังตำนำตามแนวระดับ (Strip electrode) จะช่วยแก้ปัญหานี้และจะช่วยลดค่าความต้านทานดินให้ลดลงไปได้

วิธีนี้ทำได้โดยการขุดดินให้เป็นร่องลึกประมาณ 50 ซม. และฝังเหล็กแบนยาวไม่น้อยกว่า 10 เมตร (แต่ไม่เกินกว่า 25 เมตร) ในแต่ละแนวส่วนการวัดค่าความต้านทานดินต้องวัดในแนวตั้งฉากกับ Strip electrode เพื่อให้ความต้านทานดินต่ำพออาจจะฝัง strip electrode เพิ่มเป็นหลายแนวตามแนวรัศมีจากจุดทำกราวด์ วิธีนี้มีข้อเสียคือ เนื่องจาก strip electrode ฝังลึกไม่ถึงชั้นดินที่มีความชื้นถาวร ทำให้ค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลงได้มากตามฤดูกาล

3.โดยการใช้เกลือฝังรอบแท่งหลักสายดิน

วิธีนี้บางทีเรียกว่า Soil Treatment ทำได้โดยขุดหลุมลึกและกว้างประมาณ 30 ซม. เป็นรูปวงแหวนรอบแท่งหลักสายดิน โดยให้ห่างจากแท่งหลักสายดินประมาณ 30 ซม. เพื่อมิให้เกลือไปสัมผัสกับแท่งหลักสายดินโดยตรง โดยใช้เกลือผสมถ่านป่นลงไปประมาณ 20-40 กก. แล้วเอาดินกลบให้พูนสูงกว่าระดับเดิมเล็กน้อย เอาดินซึ่งมีหญ้าขึ้นวางทับอีกทีหนึ่ง แล้วใช้น้ำราดรอบบริเวณนั้นเพื่อให้เกลือละลายและทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น วิธีนี้จะสามารถลดความต้านทานดินลงได้ประมาณ 15-90 เปอร์เซ็นต์แต่ถ้าดินบริเวณใกล้แท่งหลักสายดินมีความต้านทานจำเพาะต่ำอยู่แล้วก็จะได้ผลน้อย ขณะทำ Soil treatment เสร็จใหม่ ๆ ค่าความต้านทานดินอาจจะสูงขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาทางเคมียังไม่ซึมซาบไปทั่วเนื้อดินและดินยังไม่อัดแน่น ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าการทำ Soil treatment ต้องใช้เวลารอพอสมควรจึงจะทำการวัดได้ อย่างน้อยประมาณ 3-4 ชั่วโมงค่าความต้านทานดินจึงจะลดลง

เนื่องจากการทำ Soil treatment เป็นวิธีการที่ไม่ถาวร เพราะเกลือที่ใช้จะเจือจางไปตามกาลเวลาทำให้ความต้านทานดินกลับสูงขึ้นมาได้อีกจึงต้องมีการทำ Soil treatment ใหม่ ๆ 2-3 ปี นอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้แท่งหลักสายดินยังจะเป็นสนิมเร็วกว่าปกติอีก ดังนั้นวิธีนี้ควรใช้ในบริเวณที่ดินมีค่าความต้านทานจำเพาะสูง

1. Standard Coefficient of Conversion

1.1 ความยาว

1 mil = 0.0254 mm. = 0.001 in.

1 mm. = 39.37 mils. = 0.03937 in

1 cm. = 0.3927 in. = 0.0328 ft.

1 inch = 25.4 mm. = 0.083 ft. = 0.0278 yd. = 2.54 cm.

1 feet = 0.305 m. = 0.333 yd.

1 yard = 3281 ft. = 1094 yd. = 0.6123 mile.

1 mile = 5280 ft. = 1760 yd = 1906 m = 1.609 km.

1.2 พื้นที่

1 MCM = 1000 CM (Circular Mile) = 0.5067 mm^2 = 1/1000 in^2

1 CM = 0.0005067 mm^2 = 0.0000007854 in^2 = 0.7854 sq.mi.

1 mm^2 = 1973 CM = 0.00155 in^2 = 1550 sq.mi.

1 in^2 = 1273240 CM = 645.1 mm^2 = 0.0067 ft^2

1 yd^2 = 1296 in^2 = 0.83613 m^2

1 m^2 = 1550 in^2 = 10.7 ft2 = 1.195 yd^2

1 km^2 = 0.001562 sq.mile

1 sq.mile = 27880000 ft^2 = 3098000 yd^2 = 2590000 m^2 = 2.59 km^2

3. Index of Design Parameters

Symbol	Description
3/0	Symmetrical fault current in substation for conductor sizing A
I_G	Maximum grid current that flows between ground grid and surrounding earth (including do offset) in A
ρ	Soil resistivity in Ω-m
ρ_S	Surface layer resistivity Ω-m
h_S	Surface layer thickness
C_P	Current projection factor for future system growth

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_S	Surface layer resistivity derating factor
t_C	Duration of fault current for sizing ground conductor is S
t_f	Duration of fault current for determining decrement factor in S
t_S	Duration of shock for determining allowable body current in S
h	Depth of ground grid conductors in m
d	Diameter of grid conductor in m
A	Total area enclosed by ground grid in m^2
D	Spacing between parallel conductors in m
D_f	Decrement factor for determining
n	Number of parallel conductors in one direction
K_m	Spacing factor for mesh voltage, simplified method
K_S	Spacing factor for step voltage, simplified method
K_i	Corrected factor for grid geometry, simplified method
K_{ii}	Corrective weighting factor that adjusts the effects of inner conductors on the corner mesh, simplified method
K_h	Corrective weighting factor that emphasizes the effects of grid depth, simplified method
L	Total length of grounding system conductor, including grid and gound prods in m
R_g	Resistance of grounding system in Ω
E_m	Mesh voltage at the center-of the corner mesh for simplified method in V
E_S	Step voltage between a point above the outer corner of the grid and a point lm diagonally outside the grid for simplified method in V
$E_{touch50}$	Tolerable touch voltage for human with 50 kg body weight in V
E	Tolerable touch voltage for human with 70 kg body weight in V
E_{step50}	Tolerable step voltage for human with 50 kg body weight in V
E_{step70}	Tolerable step voltage for human with 70 kg body weight in V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้านั้นมีอยู่มาก และได้มีการพัฒนาวิธีการให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีการตั้งข้อสมมุติฐานและเสนอวิธีการต่างกันออกไป บางงานวิจัยอาจจะเสนอเฉพาะวิธีการหาพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง บางงานวิจัยอาจจะเสนอวิธีการออกแบบอย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านั้นก็ยังมีขีดจำกัดในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งแต่ละงานวิจัยพอจะแยกได้ดังนี้

4.1 การหาค่าความต้านทานระบบกราวด์

ค่าความต้านทานระบบกราวด์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาระดับศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ (Ground Potential Rise - GPR) อันเนื่องมาจากมีกระแสลัดวงจรลงดิน เพื่อให้ทราบว่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์อยู่ในช่วงที่มนุษย์จะทนได้หรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าค่าความต้านทานระบบกราวด์มีค่าต่ำศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นก็จะมีค่าต่ำด้วยแต่ก็ไม่ได้ประกันว่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์หรือค่าความต้านทานของกราวด์จะเป็นตัวกำหนดถึงความปลอดภัยได้อย่างแน่นอน

สมการที่ใช้หาค่าความต้านทานกราวด์พื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือสมการของ Schwarz (1954) ซึ่งได้เสนอสมการหาค่าความต้านทานของกริด ค่าความต้านทาน กราวด์ร็อด และค่าความต้านทานรวมระหว่างกราวด์กริดกับกราวน์ร็อดเพื่อนำไปหาค่าความต้านทาน

กราวด์ทั้งหมดใช้ได้ดีกับกรณีที่ดินเป็นดินชั้นเดียว ซึ่ง Kerel (1981) ได้นำสมการที่ Schwarz เสนอไว้มาใช้เพื่อหาความยาวของตัวนำกริดทั้งหมดที่น้อยที่สุด ที่จะทำให้ได้ค่าความต้านทานของกราวด์ที่ต้องการโดยจะแบ่งการคำนวณออกเป็นลูป (Loop) และสมมุติให้ตัวนำกริดฝังอยู่ในดินชั้นเดียวที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าผิวดินและไม่คำนึงถึงกราวด์ร็อด

Chow และ Salama (1994) ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์ด้วยวิธีการที่เรียกว่าอิมเมจของกระแส (Current Image)โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานกราวด์จะ ขึ้นอยู่กับความลึกของกริด, ขนาดของกริด, จำนวนเมชและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ ที่ใช้ทำกริด โดยถือว่าดินที่ใช้เป็นดินชั้นเดียว การคำนวณค่าความต้านทานกราวด์ด้วยวิธีนี้ เมื่อ ทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำ จะมีผลต่อค่าความต้านทานกราวด์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thapar และ คณะ (1991) ได้เสนอวิธีการหาค่าความต้านทานกราวด์ของสถานีไฟฟ้ารูปทรงต่าง ๆ ที่นอกเหนือไปจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจตุรัส เช่น รูปทรงตัวแอล, ตัวทีและทรงสามเหลี่ยม โดยถือว่าดินที่ใช้เป็นแบบดินชั้นเดียว (Uniform Soil) สมการที่ใช้หาค่าความต้านทาน กราวด์ใช้ได้ดีกับการแบ่งเมชเป็นส่วนตัดตรงยาวประมาณ 5 เมตร โดยที่ไม่มีกราวด์ร็อดร่วมอยู่ด้วย สมการที่ใช้ในการหาความต้านทานตัวมันเองและความต้านทานร่วม (Self and Ground Resistance) อยู่บนพื้นฐานของศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละส่วน

4.2 การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ประโยชน์ของดินนั้นมีมากมายหลายอย่างด้วยกัน เช่นในการป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและฟ้าผ่าได้ ซึ่งในสภาวะที่ดินมีค่าความชื้นน้อย จะทำให้ดินนั้นมีค่าความต้านทานสูงแต่ถ้าหากดินมีความชื้นมาก ก็จะทำให้ค่าความต้านทานของดินมีค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งความชื้นในดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน คือ ถ้าเป็นดินที่มีลักษณะเป็นดินทรายจะมีความชื้นน้อยเพราะว่าดินชนิดนี้อุ้มน้ำได้ไม่ดี แต่ถ้าหากเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นมาก เพราะสามารถอุ้มน้ำได้ดีนอกจากนั้นค่าความชื้นของดินยังขึ้นอยู่กับฤดูกาลอีกด้วย คือ ถ้าเป็นฤดูแล้งดินจะมีความชื้นน้อยจึงทำให้ดินในฤดูฝนนี้มีความต้านทานต่ำ

ในการคำนวณเพื่อออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น ค่าที่สำคัญที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณคือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งโครงสร้างของดินนั้นอาจจะเป็นดินชั้นเดียว (Single-Layer) ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะอย่างสม่ำเสมอ หรืออาจจะมีค่าต่างกันเป็นชั้น ๆ เรียกว่าเป็นดินหลายชั้น (Multi-Layer) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วการกำหนดโครงสร้างของดินเป็นชั้นเดียวนั้นก็เพื่อให้การคำนวณง่ายแต่ก็อาจจะทำให้การออกแบบนั้นผิดพลาดไปได้ ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณนั้นถูกต้องยิ่งขึ้นอาจจะกำหนดให้ดินเป็นดินสองชั้น (Two-Layer) ก็ได้ จึงต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินที่เป็นดินสองชั้น ซึ่งจะประกอบด้วยค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ชั้นล่างและความลึกของดินชั้นบน

Blattner (1980) ได้เสนอวิธีการคาดการณ์ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานของกราวด์ร็อด ที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยวิธี Extrapolate จากค่าที่ได้จากการวัดโดยวิธีปักกราวด์ร็อด (Driven Rod Method) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏ (Apparent Resistivity) ค่าที่ได้จากการ Extrapolate จะถูกต้องที่สุดที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่อเมตรมีค่าเกือบคงที่และ อยู่ในช่วงไม่เกินสิบเท่าของความลึกสูงสุดที่วัดได้ แต่วิธีดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้

วิธีดังกล่าวความต้านทานจำเพาะของดินนั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่มีการนำมาศึกษาและนำมาใช้ในการออกแบบระบบกราวด์จะมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือวิธีปักกราวด์ร็อด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Driven Rod Method) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วิธีเปลี่ยนความลึก (Variation of Depth Method) และ วิธีวัดแบบ 4 จุด (Four-point Method) ซึ่งปกติแล้วจะใช้วิธีที่สองมากกว่าเนื่องจากสะดวกต่อการปฏิบัติงานและให้ความถูกต้องมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะใช้หลักการวางอิเลคโตรดแบบเวนเนอร์ (Wenner Method) ส่วนวิธีแรกนั้นจะต้องลงทุนสูงและใช้เวลาในการปฏิบัติงานนาน แต่ก็สามารถที่จะใช้กราวด์ร็อดนั้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบกราวด์ได้เลย ค่าที่วัดได้จากทั้งสองวิธีจะเป็นกระแสและแรงดัน ซึ่งก็คือค่าความต้านทานนั่นเอง แล้วนำเอาค่าความต้านทานนี้ไปแทนค่าเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่อไป Blattner (1982) ได้นำเอาวิธีการวัดทั้งสองมาเปรียบเทียบกันแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ โดยวิธีปักกราวด์ร็อดนั้นจะสมมุติให้การกระจายของกระแสที่ไหลออกจากกราวด์ร็อดไปสู่ดินนั้นมีลักษณะขนานกับผิวดินและสมการที่ใช้กับการวัดทั้งสองวิธีนั้นไม่ได้ไปในสมการ โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏของดินที่ใช้กับวิธีปักกราวด์ร็อดมีความยาวน้อยกว่า ความลึกของดินชั้นบนและสมการที่ใช้ในกรณีที่กราวด์ร็อดมีความยาวมากกว่าความลึกของดินชั้นบน

การกำหนดโครงสร้างของดินที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยผิดไปหรือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินผิดไป อาจจะทำให้การคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์ผิดไปด้วยถึงแม้วิธีการคำนวณที่นำมาใช้หาค่าความต้านทานของระบบกราวด์นั้นจะเป็นระบบที่ดีที่สุดแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงสมควรจะมีวิธีการที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้อย่างถูกต้อง Dawalibi และ Blattner (1984) ได้เสนอเทคนิคในการแปลความหมายของข้อมูลที่ได้จากการวัดแบบเวนเนอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินสองชั้น ซึ่งจะใช้วิธี Steepest-Descent Algorithm โดยวิธีการนี้จะกำหนดระยะห่างเริ่มต้นของอีเลคโตรดที่ 2.5 เมตร ต่อมา Meliopoulos และคณะ (1984) ได้เสนอวิธีการอีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ ทั้งสามของดินที่เป็นดินสองชั้น ที่ได้ข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีปักกราวด์ร็อด โดยจะใช้วิธี Weighted Least Square Estimation คือการทำให้ค่าผิดพลาดระหว่างค่าจริงที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้น้อยที่สุดและมีการชี้ถึงคุณภาพของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วย โดยจะกำหนดเป็นระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) และในปี 1986 Meliiopoulos และคณะก็ได้นำเอาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาพัฒนาและนำมาใช้กับวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วและได้ชี้ถึงแหล่งที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการประมาณค่าพารามิเตอร์ว่าจะประกอบด้วยข้อผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือวัดและจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามธรรมชาติ เช่น จากความชื้น อุณหภูมิและปริมาณของเกลือที่มีอยู่ในดิน เป็นต้น

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน IEEE - 81 ซึ่งจะอธิบายวิธีการวัดและการแปลความหมายจากข้อมูลที่ได้จากการวัด นอกจากนั้นยังกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในแต่ละวิธีกล่าวถึงแต่อย่างไรก็ตามเนื้อหาในมาตรฐานนี้ก็ไม่ได้ให้รายละเอียดมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การหาค่าความต้านทานที่เท้า (Footing Resistance)

เป็นค่าความต้านทานที่อยู่ใต้ฝ่าเท้าทั้งสองของมนุษย์ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการหาศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่ปลอดภัยสำหรับมนุษย์ ค่าความต้านทานที่เท้ามักถูกแทนแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี 8 เซนติเมตร และวางอยู่ในแนวระนาบบนผิวดิน ในสถานีไฟฟ้าย่อยมักโรยด้วยหินกรวดให้มีความหนา 8-20 เซนติเมตร เพื่อเป็นการทำให้ความต้านทานจำเพาะที่ใต้ฝ่าเท้าคนที่มีค่าสูงขึ้น

Thapar และคณะ (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่าความต้านทานที่เท้าตามมาตรฐาน IEEE-80 (1986) ยังมีข้อผิดพลาดและข้อจำกัดอยู่และได้เสนอสมการ, กราฟและแบบจำลองขึ้นใหม่เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานที่เท้าไว้ 2 วิธีคือ แบบจำลองแผ่นตัวนำวงกลมแบบจำลองแผ่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Thapar และ Ziad (1989) ได้เสนอวิธีการเพิ่มความต้านทานที่เท้าในบางจุดของสถานีไฟฟ้า เพื่อเป็นการลดความต้านทานกราวด์ โดยการใช้แผ่นพลาสติกที่ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน, เพอร์มาลอน, พีวีซี หรือนีโอพรีน ฝังใต้ชั้นหินกรวดโดยทำการทดสอบกับแผ่นพลาสติกทั้งที่เจาะรู การใช้แผ่นพลาสติกสามารถช่วยลดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสได้

Thapar และคณะ (1992) ได้เสนอสมการและแบบจำลองในการหาค่าความต้านทานที่เท้าเนื่องจากการสะสมของดินในชั้นหินกรวดที่อยู่ลึกลงไป เมื่อดินสะสมในช่องว่างระหว่างหินที่อยู่ต่ำลงไป จะมีชั้นของความต้านทานจำเพาะที่แตกต่างกันอยู่ 3 ชั้นคือ ชั้นของหินที่ไม่มีดินสะสม ชั้นของหินที่มีดินสะสม และชั้นของดินเพียงอย่างเดียว ในการหาค่าความต้านทานที่เท้าจึงต้องใช้แบบจำลองของความต้านทานจำเพาะที่ต่างกัน 3 ชั้นในการคำนวณ

การหาค่ากระแสกริด

กระแสกริดเป็นกระแสที่ไหลระหว่างกริดและดินรอบ ๆ กระแสกริดนี้ควรมีค่าน้อยกว่ากระแสลัดวงจรเสมอทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีส่วนใดที่เป็นกระแสไหลลงกริดและลงดินไป

Thapar และ Madan (1984) ได้เสนอวิธีการหาค่ากระแสกริดที่ใช้ในการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส เป็นค่าที่เหมาะสมกว่าที่จะใช้ค่ากระแสลัดวงจร เพื่อความประหยัดในการออกแบบโดยทำการศึกษากระแสกริด โดยคำนึงถึงค่าความต้านทานกราวด์กริด, พารามิเตอร์ของสาย Overhead Ground Wire, ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance), ระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Tower Span)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 งานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า

Machias และคณะ (1989) ได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า ระบบชำนาญงาน (Expert System) ในการออกแบบและทดสอบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้ลักษณะการ ถาม - ตอบ ข้อมูลและกราฟฟิคผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ระบบฐานข้อมูลและสูตรที่ใช้ในการคำนวณจะบรรจุอยู่ในฐานความรู้ โดยฐานความรู้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกประกอบด้วยกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการหาชนิดของตัวนำ, ชนิดของการเชื่อมต่อและความลึกในการตอกกราวด์ร็อด ส่วนที่สองประกอบด้วยกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการหาคุณลักษณะของกราวด์กริด,ตำแหน่งที่ตอกกราวด์ร็อด,การหาจำนวนเส้นกริดในแนวตั้งและแนวนอนและระยะห่างระหว่างเส้นกริดเพื่อคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์จะทนได้ส่วนที่สามประกอบกฎเกณฑ์ในการก่อสร้างและทดสอบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบชำนาญงาน (Expert System) ในการออกแบบและการก่อสร้างระบบกราวด์เพื่อความประหยัดและความปลอดภัยยิ่งขึ้น

Lazzara และ Barbeito (1990) ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยในแบบจำลองของดินสองชั้น (Non-Uniform Soil) ซึ่งสมการตามมาตรฐาน IEEE - 80 (1986) ตั้งสมมุติฐานว่าดินเป็นแบบดินชั้นเดียว แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าความต้านทานจำเพาะของดินมักเปลี่ยนแปลงตามความลึก โดยได้ทำการศึกษาที่ Florida Power Corporation เป็นเวลา 2 ปี โดยพื้นที่ทำการทดลองมีความต้านทานจำเพาะที่ผิวดินบนอยู่ในช่วง 1000-2000 โอห์ม-เมตร ได้ทำการศึกษาหาค่าความต้านทานระบบกราวด์, ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว รวมทั้งศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการคำนวณ

Meliopoulos และคณะ (1993) ได้เสนอวิธีการ และ คอมพิวเตอร์โมเดล ในการวิเคราะห์ระบบกราวด์ด้วยวิธีการที่เรียกว่า Method of Moment โดยวิเคราะห์ระบบกราวด์ที่ประกอบด้วยกราวด์กริด, กราวด์ร็อด, รั้ว, ท่อโลหะ, กราวด์อิเลคโทรดรูปทรงสี่เหลี่ยม, แผ่นโลหะเรียบ, ฯลฯ ที่ฝังอยู่ใต้ดินหรือวางอยู่บนผิวดิน โดยถือว่าดินเป็นแบบดินชั้นเดียว (Uniform Soil) หรือดินสองชั้น (Two-Layer Soil) แล้วทำการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัส, ศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว, กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนในขณะที่เกิดกระแสไหลผิดปกติ, ความต้านทานระบบกราวด์ และ โวล์ทเตจโพรไฟล์ (Voltage Profile)

Thapar และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมโยงระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย 2 สถานี ด้วยสายตัวนำที่ฝังอยู่ใต้ดิน เมื่อเกิดกระแสผิดปกติไหลลงดินที่ใดที่หนึ่งจะทำให้นำกระผ่านไปยังสถานีย่อยอีกแห่งหนึ่งโดยผ่านตัวนำที่ฝังดินอยู่ โดยได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานกราวด์ที่ประกอบด้วยกราวด์กริด 2 แห่ง, ค่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ (Ground Potential Rise) ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่ง และค่า Voltage Profile ตามแนวความยาวของตัวนำที่เชื่อมต่อภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กของอุปกรณ์ต่าง ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่ง Thapar และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาหาค่าความต้านทานของฐาน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รากคอนกรีตเสริมเหล็กของอุปกรณ์ที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าเช่น สวิทซ์, เบรคเกอร์, ฯลฯ โดยทำการแบ่งฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กออกเป็น 4 รูปแบบคือ

1. ฐานรากทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแผ่นเรียบ (Mat Foundation)
2. ฐานรากทรงสี่เหลี่ยมตัน (Direct Vertical Footing)
3. ฐานรากรูปทรงปิระมิด (Pyramidal Spread Footing)
4. ฐานรากทรงฐานยื่น (Spread Footing with Slab)

การหาความต้านทานของฐานรากเพื่อศึกษาว่าในขณะที่เกิดภาวะกระแสไหลผิดปกติหรือกระแสรั่วไหล ฐานรากเหล่านี้จะสามารถรับไว้ได้เพียงใด

การเพิ่มความต้านทานสัมผัสของมนุษย์โดยการโรยหินกรวดในสถานีไฟฟ้าด้วยความหนาประมาณ 8-15 ซม. เป็นการลดกระแสที่จะไหลผ่านร่างกายมนุษย์ไม่ให้มีค่ามากเกินไป ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของหินเป็นตัวกำหนดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่ปลอดภัยของมนุษย์ โดย Abledu และ Donald (1992) ได้นำเสนอวิธีการวัดค่าความต้านทานของหินกรวดที่เปียก ซึ่งเป็นค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำที่สุดและได้เสนอสมการและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะของหินและน้ำที่ใช้ในการรดหิน โดยน้ำที่ใช้ในการทดลองอาจเป็นน้ำฝนหรือน้ำประปาก็ได้ ในทางปฏิบัติแล้วน้ำฝนที่ใช้ในการรดหิน โดยน้ำที่ใช้ในการทดลองอาจเป็นน้ำฝนหรือน้ำประปาก็ได้ ในทางปฏิบัติแล้วน้ำฝนซึ่งมีความต้านทานจำเพาะประมาณ 100 โอห์ม - เมตร เป็นตัวทำให้หินมีสภาพเปียกมากที่สุด

Picken (1993) ได้ทำการทบทวนมาตรฐานในการออกแบบระบบกราวด์กริดคือ มาตรฐาน BS7354 (1990) มาตรฐาน IEEE-80 (1986) มาตรฐาน DIN VED 0141 (1989) และมาตรฐาน CENELEC (1993) แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ

มาตรฐาน BS7354 ได้มีการคิดผลของความต้านทานของรองเท้า ในขณะที่มาตรฐานอื่นไม่ได้นำมาพิจารณา มีผลทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้มีค่าสูงขึ้น แต่ทุกมาตรฐานจำเป็นต้องหาค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวมนุษย์จะทนได้ และต้องออกแบบให้ศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่มนุษย์จะทนได้ภายใต้ภาวะต่าง ๆ นอกจากนี้ได้แสดงความแตกต่างของมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อนำไปเป็นข้อพิจารณาในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การพิจารณาการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า

การออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อความปลอดภัยของมนุษย์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือยืนอยู่ในบริเวณสถานีไฟฟ้าที่มีการติดตั้งโครงสร้างหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่จะได้รับผลจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรลงดิน ซึ่งจะทำให้เกิดเกรเดียนท์ของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradient) สูง ที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ นอกจากนี้จะเป็นทางผ่านให้อุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินคายประจุลงดิน หรือเป็นทางผ่านการไหลกลับของกระแสหม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการติดขดลวดแบบวาย

โดยปกติแล้วกระแสลัดวงจรลงดินของสถานีไฟฟ้าจะมีค่าสูง ในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าจึงนิยมทำเป็นแบบกริด (Grid) เพื่อให้กระแสลัดวงจรลงดินไหลผ่านได้อย่างรวดเร็ว ถ้าความต้านทานระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้ามีค่าสูงเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดินทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าสูงจนเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ ศักดาไฟฟ้านี้เป็นศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ (Ground Potential Rise) และศักดาไฟฟ้าที่มนุษย์ได้รับโดยตรงประกอบด้วย ศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และ ศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) เพื่อลดอันตรายจากศักดาไฟฟ้าทั้งสองจึงต้องมีการควบคุมหรือแก้ไขไม่ให้ศักดาทั้งสองดังกล่าวมีค่าเกินกว่าที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เป็นอันตราย และต้องพยายามลดค่าความต้านทานของระบบกราวด์ให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งตามมาตรฐานจะกำหนดไว้ไม่ให้เกิน 1 โอห์ม สำหรับสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่และไม่ให้เกิน 5 โอห์ม สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเฉพาะค่าความต้านทานของระบบกราวด์เพียงอย่างเดียวไม่ได้ประกันว่าระบบกราวด์นั้นจะปลอดภัย สิ่งที่สำคัญคือต้องมีการพิจารณาศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับระบบกราวด์จะต้องมีค่าต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ และศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวจะต้องมีค่าต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้

ระบบกราวด์กริดทำเป็นลูป (Loop) ล้อมรอบบริเวณพื้นที่ทั้งหมดของสถานีไฟฟ้าและบางครั้งอาจจะออกนอกแนวรั้วก็ได้ซึ่งการล้อมรอบพื้นที่มากขึ้นจะเป็นการลดค่าความต้านทานของระบบกราวด์และศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์ ตัวนำกริดจะวางขนานกันและตัดขวางกันโดยให้ใกล้กับโครงสร้างหรือแนวการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อให้สะดวกในการต่อสายกราวด์และอุปกรณ์ให้สั้นที่สุด ตัวนำกริดจะต้องต่อถึงกันหมดอย่างมั่นคง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจุดที่ตัวนำวางขวางกัน เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสลัดวงจรลงดินไหลไปรวมกันเพียงจุดเดียว เช่น ที่ตำแหน่งของจุดนิวตรอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาปาซิเตอร์หรือหม้อแปลง เป็นต้น การเชื่อมต่อตัวนำกริดส่วนมากจะใช้วิธี Exothermic ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมตัวนำด้วยการให้ความร้อนสูงเฉียบพลันโดยจะให้ความสะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติงาน

ขนาดของตัวนำกริดที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีสภาพความนำสูง แข็งแรงทนทานต่อการผุกร่อน ทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นทางกลหรือถูกทำลายโดยง่าย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ตัวนำทองแดงมีคุณสมบัติครบถ้วน ขนาดตัวนำที่เล็กที่สุดที่ยอมให้ใช้งานตามมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานโดยทั่วไปจะใช้สายทองแดงขนาด 1/0 และ 2/0 AWG แต่ทางบริษัทผู้ผลิตได้ตั้งมาตรฐานสำหรับสายทองแดงที่ใช้ทำสายกราวด์คือ สายทองแดงขนาด 4/0 AWG เป็นสายขนาดเล็กที่สุดเป็นขนาดมาตรฐาน เพื่อความแข็งแรงทางกล (Mechanical Strength) แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดขนาดสายนั้นต้องพิจารณาถึงความทนทานต่อกระแสลัดวงจรลงดิน ช่วงเวลาการไหลของกระแสความร้อนที่จะเกิดขึ้นโดยไม่ทำให้สายหลอมละลาย ตัวนำกริดจะถูกฝังลึกจากผิวดินประมาณ 0.15 - 0.5 เมตร และมีระยะห่างของตัวนำประมาณ 3-15 เมตร ซึ่งในกรณีตัวนำกริดมีระยะห่างกันศักดาไฟฟ้าสัมผัสแรงสูงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดกึ่งกลางของระบบกราวด์กริดไปจนถึงเมชที่อยู่รอบนอก ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นจะอยู่กับขนาดของระบบกราวด์ ขนาดและความลึกของตัวนำและค่าความต้านทานจำเพาะของดิน แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบด้วยวิธีนี้อาจจะเป็นการสิ้นเปลืองในการใช้ตัวกริดเพิ่มขึ้นเพื่อจะลดศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด ดังนั้นในบริเวณเมชรอบ ๆ เส้นรอบรูปของระบบกราวด์กริดอาจจะให้ตัวนำกริดมีระยะชิดกันมากกว่าในบริเวณใกล้ ๆ จุดกึ่งกลางของระบบ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการติดตั้งระบบกราวด์ได้

การออกแบบกราวด์ได้มีการนำเอากราวด์ร็อดมาต่อกับกราวด์กริดเนื่องจากกราวด์ร็อดเป็นตัวนำ ให้กระแสไหลลงดินได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่โครงสร้างดินเป็นดินสองชั้นและดินชั้นบนมีค่าความต้านทานสูงกว่าดินชั้นล่าง การใช้กราวด์ร็อดสามารถลดความต้านทานของระบบกราวด์ได้ โดยกราวด์ร็อดมักจะได้รับการต่อกับกริดที่ตำแหน่งที่ตัวนำกริดตัดขวางกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณเส้นรอบรูปของระบบกราวด์กริดหรือตำแหน่งที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขนาดใหญ่เช่น หม้อแปลง โดยทั่วไปตามมาตรฐานที่ใช้ขนาดของกราวด์ร็อดที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว (16 มิลลิเมตร) และมีความยาว 8-10 ฟุต (2.44-3.05 เมตร)

ในบริเวณสถานีไฟฟ้าได้มีการโรยหินกรวด (Crushed Rock) ด้วยความหนาประมาณ 0.08-0.15 เมตร เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานสัมผัสของมนุษย์กับพื้นดินได้ ซึ่งเป็นการลดกระแสที่จะไหลผ่านร่างกายมนุษย์ไม่ให้มีค่ามากเกินไป ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดมีค่าประมาณ 1000-5000 โอห์ม-เมตร รั้วที่เป็นโลหะที่ล้อมรอบบริเวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าอาจเป็นจุดหนึ่งที่ก่อให้เกิดอันตรายกับมนุษย์ที่ไปสัมผัสได้ เสารั้วแต่ละต้นจึงควรจะได้รับการเชื่อมต่อกับระบบกราวด์กริดเพื่อป้องกันอันตราย ดังนั้นพื้นที่ของระบบกราวด์กริดจึงควรครอบคลุม โดยรอบของรั้วทั้งหมดโดยเส้นรอบรูปของระบบกราวด์กริดควรห่างจากแนวรั้วประมาณ0.15-0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายบัณฑูร พิทักษ์วงศ์ เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม 2502 ที่ตำบลมหาชัย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ ปีการศึกษา 2526 ผลงานทางวิชาการ "แนวทางใหม่ของการออกแบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20,13-14 พฤศจิกายน 2540 และเป็นอาจารย์สอนโรงเรียนเซนต์จอห์นโปลีเทคนิค ตั้งแต่ พ.ศ. 2523 - 2535 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยหัวหน้าสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์นทบวงมหาวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้