สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย
โดยพิจารณาความปลอดภัยด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

SUBSTATION GROUNDING SYSTEM DESIGN
BASED ON ENGINEERING SAFETY AND ECONOMICS

T117949

พลฉัตร กัลยา

POLCHAT KALYA

วพ. พ438 ก 2554
เลขหมู่ 2554
เลขทะเบียน 117949
วัน,เดือน,ปี 22 ส.ค. 2554
b. 12349057
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2554

KMITL-2011-EN-M-020-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUBSTATION GROUNDING SYSTEM DESIGN
BASED ON ENGINEERING SAFETY AND ECONOMICS

POLCHAT KALYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRIACL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

KMITL-2011-EN-M-020-102

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกส... ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาความปลอดภัยด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์
นักศึกษา	นายพลฉัตร กัลยา
รหัสประจำตัว	51060203
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอแนวทางในการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยที่ปลอดภัยทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์โดยสามารถทำให้สร้างความปลอดภัยให้แก่บุคคลภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยพร้อมกับประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง อีกทั้งยังได้นำเสนอการพัฒนาซอฟท์แวร์โปรแกรมในการออกแบบระบบต่อลงดินโดยอ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้คำแนะนำเกี่ยวกับการติดตั้งระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยให้เกิดความปลอดภัย ผสานกับการประยุกต์งานวิจัยของ Xiaobin เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริด ที่พบว่าดินส่วนมากพบเป็นดินแบบไม่สม่ำเสมอ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยวิธีดินสองชั้นโดยเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยโครงสร้างดินชั้นเดียวพบว่าการคำนวณด้วยโครงสร้างดินสองชั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า ซึ่งซอฟท์แวร์โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินถูกสร้างขึ้นและพัฒนาบนโปรแกรม Visual Basic เวอร์ชัน 6.0 นอกจากนั้นซอฟท์แวร์โปรแกรมการออกแบบนี้สามารถแสดงผลลัพธ์และค่าที่ใช้ในการออกแบบพิมพ์เป็นข้อมูลรายงานได้ โดยมีลักษณะการใช้งานง่ายและเหมาะสมกับผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Substation grounding system design based on engineering safety and economics.
Student	Mr. Polchat Kalya
Student ID.	51060203
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn

ABSTRACT

This thesis presents guidelines for a grounding system design for substation according to engineering safety and economics. This can make the security within the area of substations with inexpensive overhead construction. It also presents the software program development in the grounding system design by using the IEEE Std.80-2000 with the purpose to provide instructions for installing the following grounding systems for the safety in substations. The results of Xiaobin are used to determine the grounding resistance. Actually, the soil is nonuniform. To design the grounding system of substations, two soil layers model is compared with the uniform soil model. The results show that the first model is better than the second model. The software program has been developed on Visual Basic (Version 6.0). It can display and print out the report data and is easy to use and suitable for the user.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ รศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้โอกาส และให้ความช่วยเหลือทั้งคำปรึกษาชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหางานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ กรรมการสอบหัวข้อและโครงวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนการชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่กองออกแบบสถานีไฟฟ้าทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พลฉัตร กัลยา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. II

กิตติกรรมประกาศ... III

สารบัญ.. IV

สารบัญตาราง... VI

สารบัญรูป.. VII

บทที่ 1 บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา... 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.. 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา... 2

1.4 ขอบเขตการศึกษา... 2

1.5 ขั้นตอนการศึกษา.. 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ... 3

บทที่ 2 ระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย... 4

2.1 นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดิน.. 4

2.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน... 8

2.2.1 ดิน.. 8

2.2.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.. 9

2.3 ขนาดและวัสดุของสายตัวนำต่อลงดิน... 11

2.3.1 คุณสมบัติของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน... 11

2.3.2 ขนาดของสายตัวนำ.. 11

2.3.3 โลหะที่ใช้เป็นลวดตัวนำในระบบต่อลงดิน... 12

2.4 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้... 15

2.4.1 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์.. 15

2.4.2 กระแสและช่วงเวลาที่เกิดการผิดพร่อง.. 15

2.4.3 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส................................... 17

2.4.4 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน................................ 19

2.5 การปูวัสดุบนผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย... 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 กระแสกริดสูงสุด........ 23
2.7 แรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว........ 25
2.7.1 แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage)........26
2.7.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage)........28
2.8 GPR........28

บทที่ 3 การหาความต้านทานระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น.......29
3.1 ความต้านทานกราวด์กริด........ 30
3.1.1 สมการ Sverak........30
3.1.2 สมการ Xiaobin........31
3.2 ความต้านทานแท่งกราวด์รอด........ 32
3.3 ความต้านทานระบบต่อลงดิน........34
3.4 กรณีศึกษา........35
3.4.1 สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่........ 35
3.4.2 สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) จังหวัดบุรีรัมย์........38
3.4.3 สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก........41
3.5 สรุปผลการทดลอง........ 44

บทที่ 4 การออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย........45
4.1 วัตถุประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดิน........ 45
4.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน........45
4.3 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน........48
4.4 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดิน........ 50
4.4.1 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งกราวด์รอด........51
4.4.2 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีแท่งกราวด์รอด........58
4.4.3 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแท่งกราวด์รอด........64
4.4.4 กราวด์กริดรูปทรงตัวแอลและมีแท่งกราวด์รอด........70
4.5 โปรแกรม Visual Basic........76
4.5.1 ภาพรวมของVisual Basic........76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.2 หลักการโปรแกรมเชิงภาพ Visual Basic......................................76

4.5.3 ความต้องการของระบบคอมพิวเตอร์ก่อนการติดตั้งโปรแกรม.....................78

4.5.4 ข้อดีของโปรแกรมVisual Basic......................................78

4.6 แนะนำโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน......................................78

4.6.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน..........78

4.6.2 ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน.........79

บทที่ 5 ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย......................................89

5.1 ราคาค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบต่อลงดิน......................................89

5.2 ผลการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย..........................89

5.2.2 ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลองออกแบบ......................................89

5.2.3 ผลลัพธ์จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดิน......................................91

5.3 การออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค..............99

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ......................................107

บรรณานุกรม......................................112

ภาคผนวก......................................114

ภาคผนวก ก. โปรแกรม CDEGS ที่ใช้ในการหาความต้านทานจำเพาะของดินชนิดสองชั้น......115

ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่......................................127

ประวัติผู้เขียน......................................133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน...8
2.2 ค่าคงที่ของวัสดุ...14
2.3 ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างๆของมนุษย์.........................15
2.4 ปริมาณกระแสที่เพศชายและเพศหญิงสามารถทนได้....................16
2.5 ผลทางกายภาพของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์............. 16
2.6 ค่าความต้านทานจำเพาะของหินประเภทต่างๆ..........................21
3.1 ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่..........35
3.2 ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) จังหวัดบุรีรัมย์........ 38
3.3 ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก...............41
3.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน................................ 44
4.1 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน..............................48
4.2 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับตัวอย่างการคำนวณ......................................50
5.1 ราคาค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบต่อลงดิน.....................................89
5.2 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอด..91
5.3 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร...92
5.4 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร.....................................92
5.5 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอด..94
5.6 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร.....................................94
5.7 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร.....................................95
5.8 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงตัวแอลที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอด..96
5.9 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงตัวแอลที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ
50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร.....................................97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.10 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงตัวแอลที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร....97

5.11 ข้อมูลในการออกแบบ....99

5.12 ค่าความต้านดินที่สถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ จังหวัดลำพูน....100

6.1 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส....108

6.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า....109

6.3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล....109

ก.1 ความต้านทานดินที่ภาคสนาม อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย....121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของกระแสผิดพร่อง และค่าของ I_F, I_f, และ D_f ในช่วงเวลาการเกิดความผิดพร่อง t_f 7

2.2 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 9

2.3 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบเวนเนอร์ 10

2.4 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส 17

2.5 วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส 17

2.6 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว 19

2.7 วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว 19

2.8 การปูวัสดุบนผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย 20

2.9 ค่า G ของสาย Overhead Ground Wire 24

2.10 ค่า B ของสาย Overhead Ground Wire 25

3.1 แท่งกราวด์รอดในดินสองชั้น 32

3.2 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP 36

3.3 กราวด์กริดสถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด 37

3.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดและผลการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT 37

3.5 กราวด์กริดสถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) 39

3.6 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP 40

3.7 การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT 40

3.8 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP 42

3.9 กราวด์กริดสถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ 42

3.10 การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT 43

4.1 แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน 47

4.2 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งกราวด์รอด 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.3 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีแท่งกราวด์รอดยาว 7.5 เมตร มีรัศมี 0.005 เมตร จำนวน 20 แท่ง เชื่อมต่ออยู่ด้วย........59

4.4 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแท่งกราวด์รอดยาว 10 เมตร มีรัศมี 0.005 เมตร จำนวน 38 แท่ง เชื่อมต่ออยู่ด้วย........65

4.5 กราวด์กริดรูปทรงตัวแอลและมีแท่งกราวด์รอดยาว 7.5 เมตร และมีรัศมี 0.005 เมตร จำนวน 24 แท่ง เชื่อมต่ออยู่ด้วย........70

4.6 การเขียนโปรแกรมแบบธรรมดากับแบบ Even-Driven........77

4.7 วินโดว์แรกสู่การออกแบบระบบต่อลงดิน........79

4.8 วินโดว์การคำนวณหาขนาดกระแสผิดพร่อง........80

4.9 วินโดว์รายงานการคำนวณหาขนาดกระแสผิดพร่อง........80

4.10 วินโดว์การคำนวณหาขนาดสายตัวนำ........81

4.11 วินโดว์รายงานการคำนวณหาขนาดของสายตัวนำ........82

4.12 วินโดว์การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน........83

4.13 วินโดว์รายงานการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน........83

4.14 วินโดว์การคำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด........84

4.15 วินโดว์การคำนวณหาค่า GPR........85

4.16 วินโดว์การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด........86

4.17 วินโดว์รายงานการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด........86

4.18 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริง........87

4.19 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริง........88

5.1 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ 10,000 ตารางเมตร........90

5.2 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดพื้นที่ 10,000 ตารางเมตร........90

5.3 กราวด์กริดรูปทรงตัวแอลมีขนาดพื้นที่ 10,000 ตารางเมตร........91

5.4 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส........93

5.5 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า........96

5.6 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล........98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.7 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP......100

5.8 วินโดว์ผลการคำนวณหาขนาดสายตัวนำ......101

5.9 วินโดว์รายงานการคำนวณหาขนาดสายตัวนำ......101

5.10 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด......102

5.11 วินโดว์การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน......103

5.12 วินโดว์รายงานการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน......103

5.13 วินโดว์การคำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด......104

5.14 วินโดว์การคำนวณหาค่า GPR......104

5.15 วินโดว์การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า......105

5.16 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริง......106

6.1 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส......107

6.2 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า......108

6.3 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล......108

ก.1 หน้าจอ CDEGS......116

ก.2 การกำหนด ID การใช้งานโมดูล RESAP......117

ก.3 Toolbox การใช้งานโมดูล RESAP......117

ก.4 การป้อนข้อมูลโมดูล RESAP......118

ก.5 การเลือกแบบจำลองและการตั้งค่าโมดูล REASP......119

ก.6 การเลือกรูปแบบการ report และ plot โมดูล RESAP......120

ก.7 ผลค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้นของโมดูล RESAP......121

ก.8 กราฟค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้นของโมดูล RESAP......122

ก.9 ดินสองชั้นในแนวนอน......122

ก.10 การกำหนด ID การใช้งานโมดูล MALT......123

ก.11 Toolbox การใช้งานโมดูล MALT......123

ก.12 หน้าจอโมดูล MALT......124

ก.13 หน้าจอของการ PLOT/REPORT/PRINT โมดูล MALT......124

ก.14 ตัวอย่าง Report จากโมดูล MALT......125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก.15 แสดงศักย์ไฟฟ้าบนผิวดินด้วย 2D..126

ก.16 แสดงศักย์ไฟฟ้าบนผิวดินด้วย 3D Perspective 126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย มีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องชีวิตของผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่สถานีให้ได้รับความปลอดภัยจากภาวะที่เกิดความผิดพร่อง เพราะในขณะที่เกิดภาวะความผิดพร่อง กระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริดจะมีขนาดสูงมากทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองข้างในขณะที่มนุษย์เดินอยู่ในสถานีไฟฟ้า (Step Voltage) หรือเกิดขึ้นระหว่างเท้าและแขนในขณะที่มนุษย์สัมผัสกับอุปกรณ์ (Touch Voltage) จึงมีกระแสไหลเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ถ้ากระแสที่ไหลเข้าสู่ร่างกายนี้มีค่ามากกว่ากระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ก็จะทำให้เกิดช็อกหรือเสียชีวิตได้ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดีจึงควรออกแบบไม่ให้แรงดันทั้งสองดังกล่าวมีค่าเกินกว่าที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เป็นอันตราย [1, 16]

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ถูกพัฒนา ค้นคว้ามาตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานที่นิยมและเป็นมาตรฐานสากลมาตรฐานหนึ่งคือ มาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 [16] กล่าวถึงการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่สถานีไฟฟ้า และการคำนวณด้วยโครงสร้างดินสองชั้นเพื่อหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยโครงสร้างดินชั้นเดียวพบว่าการคำนวณด้วยโครงสร้างดินสองชั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า [15,19] อีกทั้งได้มีการพัฒนาคิดค้นทฤษฎีการคำนวณด้วยโครงสร้างดินสองชั้นเพื่อหาความต้านทานกราวด์กริดที่มีความใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS [14, 18] โดยที่การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงการประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีที่กำหนดในมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 [1, 16] ผสานกับทฤษฎีการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้น [18] และนำเสนอแนวทางในการออกแบบระบบต่อลงดินที่มีความปลอดภัยด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถทำให้สร้างความปลอดภัยให้แก่บุคคลภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยพร้อมกับประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังได้นำมาพัฒนาเป็นซอฟท์แวร์บนโปรแกรม Visual Basic เวอร์ชัน 6.0 [8, 9, 10, 11, 12] เพื่อช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความรวดเร็วง่ายต่อการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทำการศึกษาถึงหลักการออกแบบระบบต่อลงดินและผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ จำนวนและความยาวแท่งกราวด์รอด ว่ามีผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมช แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง โดยอาศัยซอฟท์แวร์โปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินที่พัฒนาขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยการใช้ค่ากระแสผิดพร่องสูงสุดเท่ากับ 31.5 กิโลแอมแปร์ และระยะเวลากระแสไฟฟ้าผิดพร่องเท่ากับ 0.6 วินาที ซึ่งเป็นข้อมูลการออกแบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำ เพิ่มจำนวนและความยาวแท่งกราวด์รอดจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และการใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในการคำนวณหาความต้านทานของกราวด์กริดจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาเฉพาะกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปทรงตัวแอล
2. กราวด์กริดที่ทำการศึกษานี้จะมีช่องตะแกรงหรือเมชเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น
3. เมื่อเกิดภาวะผิดพร่อง (Fault) การศึกษานี้จะพิจารณาในสภาวะคงตัว
4. ไม่พิจารณาผลของดินที่ตำแหน่งไกลออกไปจากพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาเฉพาะภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยเท่านั้น
5. ไม่พิจารณาตำแหน่งการติดตั้งแท่งกราวด์รอดเป็นบริเวณเฉพาะภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย โดยแท่งกราวด์รอดจะติดตั้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งใดๆทั่วพื้นที่กราวด์กริด
6. ราคาค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบต่อลงดินเป็นราคากลางปี 2554 สำหรับงานก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ระบบ 115/22 กิโลโวลต์ ชนิดติดตั้งภายนอก ของกองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
7. การพิจารณาค่าใช้จ่ายของระบบต่อลงดินจะพิจารณาเฉพาะค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ของมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินในทางปฏิบัติ

2. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ งานวิจัยของ Xiaobin เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าความต้านทานกราวด์กริดที่พิจารณาดินเป็นดินสองชั้น (Two-layers Soil)

3. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ ของโปรแกรม Visual Basic เวอร์ชัน 6.0 เพื่อเขียนโปรแกรม

4. ศึกษาการใช้โปรแกรม CDEGS เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของดินกรณีดินสองชั้น (Two-layers Soil)

5. สร้างซอฟท์แวร์โปรแกรมสามารถออกแบบระบบต่อลงดิน ภายหลังจากศึกษาหลักการต่างๆเป็นอย่างดีแล้ว โดยพัฒนาโปรแกรม Visual Basic เวอร์ชัน 6.0

6. ศึกษาถึงขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน

7. ทดลองทำการออกแบบระบบต่อลงดิน

8. ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินพร้อมกับแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างตัวนำ จำนวนและความยาวแท่งกราวด์รอด

9. สรุปผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจถึงผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าย่อยและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ จำนวนและความยาวแท่งกราวด์รอด

2. การคำนวณค่าความต้านทานกราวด์กริดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงจะส่งผลให้การออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยมีความถูกต้อง

3. สามารถใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นกราวด์กริด (Ground grid) และส่วนที่เป็นแท่งกราวด์รอด(Ground rod) โดยส่วนที่เป็นกราวด์กริดประกอบด้วยสายตัวนำขนานและตัดตั้งฉากกันใต้ดินเกิดเป็นตารางย่อยๆ รวมกันเป็นตาข่ายครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยจุดที่ตัดกันมีวิธีการที่นิยมติดตั้งในปัจจุบันคือ การหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความร้อนสูง (Exothermic welding) ดังนั้นการใช้สายตัวนำจำนวนเท่าใดเป็นสิ่งสำคัญ เพราะใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งค่าวัสดุ ค่าแรง และเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง แต่ถ้าใช้น้อยเกินไปจะเกิดความไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ สัตว์และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อย ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นด้วย

2.1 นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดิน

ในการศึกษาหลักการ และทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจความหมาย การนิยาม คำศัพท์เฉพาะ เพื่อให้ผู้ศึกษามีมาตรฐานความเข้าใจที่ตรงกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการศึกษาและการวิจัยที่แพร่หลาย และไปในทางทิศเดียวกัน ดังนี้ [1, 9, 16]

2.1.1 กราวด์กริด (Ground grid) หมายถึง ระบบแท่งรากสายดินในแนวนอนที่ประกอบด้วยตัวนำเปลือยหลายๆเส้นต่อรวมกันและฝังใต้ดินเพื่อเป็นจุดต่อลงดินร่วมสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างที่เป็นโลหะในตำแหน่งที่กำหนดให้

2.1.2 ระบบต่อลงดิน (Grounding system) หมายถึง ระบบ ตัวนำไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งถูกใช้สำหรับนำกระแสลัดวงจรที่ถูกนำมาเชื่อมต่อเป็นระบบเดียวกันในพื้นที่ที่พิจารณาให้ต้องมีการสร้างระบบต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

2.1.3 ตะแกรงต่อลงดิน (Ground mat or earth mat) หมายถึง แผ่นโลหะ หรือระบบของตัวนำที่มีระยะห่างใกล้กันมากๆที่ฝังไว้ตื้นๆเหนือกราวด์กริด หรือที่ใดก็ได้บนผิวดิน ซึ่งเป็นการป้องกันเสริมเพื่อลดอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสในบริเวณปฏิบัติงานที่วิกฤติ หรือในพื้นที่ที่บุคลากรใช้บ่อย ตะแกรงเหล็กต่อลงดินที่วางอยู่บนผิวดินหรืออยู่เหนือผิวดิน หรือลวดตาข่ายที่อยู่วัสดุที่ปูบนผิวดินสามารถเรียกได้ว่าเป็นตะแกรงต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็น...ที่...นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ความต้านทานเริ่มต้นของร่างกายมนุษย์ (Initial resistance of the human body) หมายถึง ค่าความต้านทานที่จำกัดกระแสยอดในขณะที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

2.1.5 เกรเดียนต์ศักย์ไฟฟ้า (Gradient potential) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบตามระยะทาง

2.1.6 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าบนผิวดินที่มีระยะห่างกันหนึ่งเมตรของก้าวมนุษย์โดยไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดินเลย

2.1.7 แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดที่เป็นไปได้ภายในเมชของกราวด์กริด

2.1.8 แรงดันไฟฟ้าส่งผ่าน (Transfer voltage) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสัมผัสที่มาจากที่อื่นเข้ายังสถานีไฟฟ้าย่อย หรือออกจากสถานีฟ้าออกไปข้างนอกโดยเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่จุดที่ยืน

2.1.9 แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าระบบต่อลงดิน (GPR) และศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่คนยืนอยู่ และมือสัมผัสไปที่โครงสร้างหรืออุปกรณ์ที่ต่อลงดินไว้

2.1.10 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Metal-to-metal touch voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างโลหะกับโครงสร้างภายในสถานีไฟฟ้าที่อาจมีมือสู่มือหรือมือสู่เท้าไปสัมผัสเป็นสะพาน

2.1.11 ศักย์ไฟฟ้าระบบต่อลงดิน (Ground Potential Rise-GPR หรือ Earth Potential Rise-EPR) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าย่อยที่เป็นไปได้เมื่อเทียบกับดินที่อยู่ห่างออกไป ค่า GPR สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับความต้านทานระบบต่อลงดิน

2.1.12 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential line or contour) หมายถึง เส้นทางของจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันที่อยู่บนเส้นนั้น

2.1.15 กระแสลงดิน (Ground current) หมายถึง กระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกในดิน

2.1.14 ออฟเซ็ต ดีซี (dc offset) หมายถึง ค่าแตกต่างระหว่างคลื่นกระแสที่สมมาตร (Symmetrical current wave) และคลื่นกระแสที่แท้จริง (Actual current wave) ในระหว่างที่ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในภาวะชั่วครู่ กระแสผิดพร่องที่แท้จริง (Actual fault current) สามารถแบ่งออกเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ส่วน คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับสมมาตร (Symmetrical alternating component) และองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง [Undirectional (dc) component] องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเป็นขั้วใดขั้วหนึ่ง แต่จะไม่เปลี่ยนขั้วไฟฟ้า และจะลดลงที่อัตราการลดลงบางอัตราที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า

2.1.15 ตัวประกอบการลดลง (Decrement factor) หมายถึง แฟคเตอร์เพื่อใช้ปรับค่ากระแสลัดวงจรลงดินแบบสมมาตรเป็นแบบไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการคำนวณระบบต่อลงดินให้เกิดความปลอดภัย

2.1.16 ตัวประกอบแบ่งกระแสผิดพร่อง (Fault current division factor) หมายถึง แฟคเตอร์ที่ใช้แทนอัตราส่วนของกระแสลัดวงจรแบบสมมาตรกับกระแสบางส่วนที่ไหลระหว่างกราวด์กริดกับดินที่อยู่รอบๆ

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \tag{2.2}$$

เมื่อ S_f คือ ตัวประกอบแบ่งกระแสผิดพร่อง

I_g คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าสมมาตรที่กราวด์กริด (Grid current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)

I_0 คือ กระแสผิดพร่องลำดับศูนย์ (The zero-sequence fault current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)

2.1.17 กระแสผิดพร่องไม่สมมาตรประสิทธิผล (Effective Asymmetrical Fault Current) หมายถึง ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของคลื่นกระแสไม่สมมาตรในช่วงเวลาเกิดความผิดพร่อง (Fault)

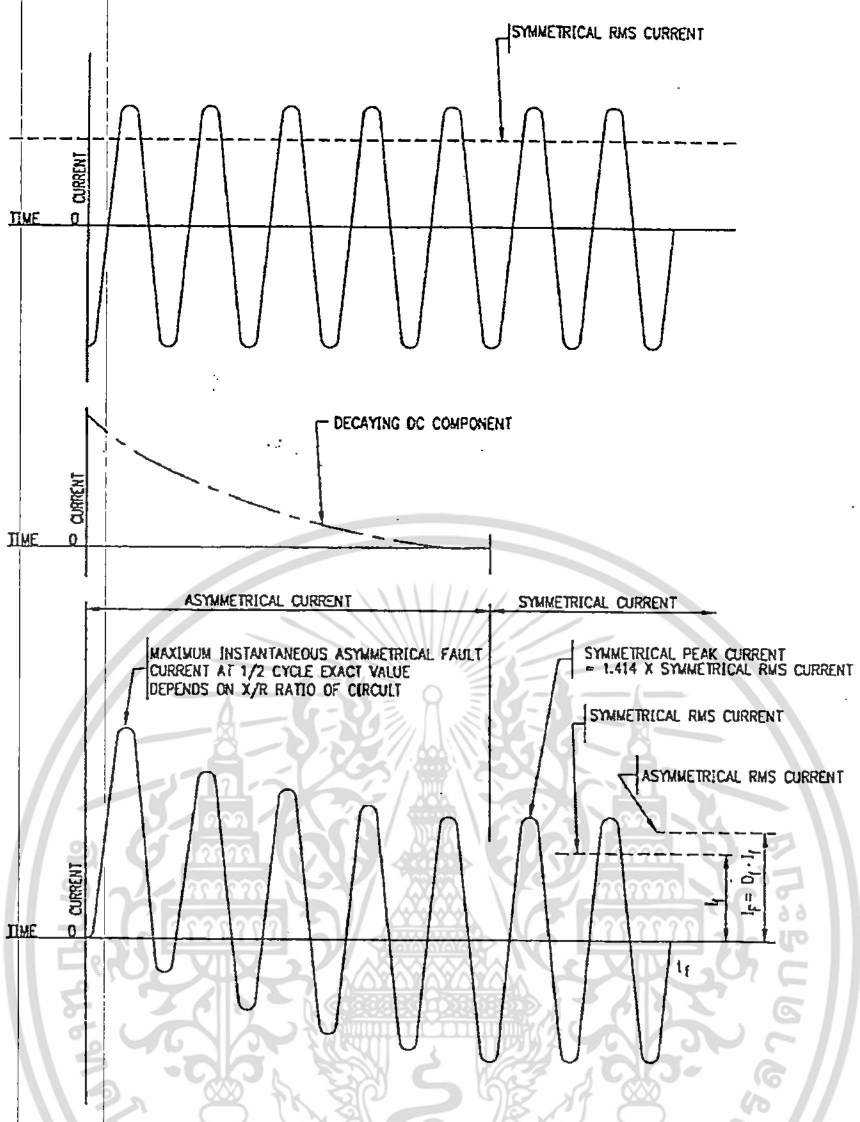
$$I_F = D_f \times I_f \tag{2.1}$$

เมื่อ I_F คือ กระแสผิดพร่องไม่สมมาตรประสิทธิผล ในหน่วย แอมแปร์ (A)

I_f คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสผิดพร่องลงดินแบบสมมาตร ในหน่วย แอมแปร์ (A)

D_f คือ ตัวประกอบการลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของกระแสผิดพร่อง และค่าของ I_F, I_f, และ D_f ในช่วงเวลาการเกิดความผิดพร่อง t_f

2.1.18 กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หมายถึง ค่าออกแบบของกระแสสูงสุดที่ไหลจากกราวด์กริดสู่ดิน

$$I_G = D_f \times I_g \tag{2.3}$$

เมื่อ I_G คือ กระแสกราวด์กริดสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)

D_f คือ ตัวประกอบการลดลง

I_g คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าสมมาตรที่กราวด์กริด (Grid current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.19 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้อุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ที่มีก๊าซเป็นฉนวน (Gas-Insulated Substation) หมายถึง สถานีไฟฟ้าย่อยประเภทหนึ่งแต่มีขนาดกะทัดรัด อุปกรณ์ทั้งหมด เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน สวิตช์ต่อลงดิน บัสบาร์ เหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ภายในเปลือกหุ้ม (Enclosure) ที่ถูกต่อลงกราวด์ และภายในเปลือกหุ้มจะใช้ก๊าซเป็นฉนวน

2.1.20 วัสดุปูผิวดิน (Surface material) หมายถึง วัสดุที่ใช้ปูผิวดิน ซึ่งไม่จำกัดว่าจะเป็น หิน หินบด (Crushed rock) แอสฟัลท์ (Asphalt) หรือวัสดุที่มนุษย์ทำขึ้น ซึ่งวัสดุปูผิวดินจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่อาจจะมีส่วนสำคัญต่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์จากเท้าทั้งสองข้างที่จะทำให้ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

2.1.21 อัตราส่วน X/R (X/R ratio) หมายถึง อัตราส่วนของรีแอคแตนซ์ต่อความต้านทานของระบบ เป็นตัวบ่งบอกถึงอัตราการลดลงของ dc offset เมื่ออัตราส่วน X/R มีค่าสูง จะทำให้มีค่าคงที่ของเวลาสูงและอัตราการลดลงช้าลง

2.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

2.2.1 ดิน

ดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดินมาก เพราะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้ต้องใช้ตัวนำกราวด์กริดมากน้อยเพียงใด และมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานระบบต่อลงดินและแรงดันไฟฟ้าต่างๆที่เกิดเมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้น ดังนั้นก่อนออกแบบระบบต่อลงดิน จึงต้องมีการวัดค่าความต้านทานดินเพื่อนำไปหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพื่อใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินต่อไป

การพิจารณาคุณสมบัติของดินว่าดีหรือไม่นั้น จะพิจารณาจากค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity, ρ) มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร (Ω-m) โดยค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของดิน ความลึกของดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นภายในดิน อุณหภูมิ ฯลฯ ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ เป็นดังตารางที่ 2.1 [11]

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

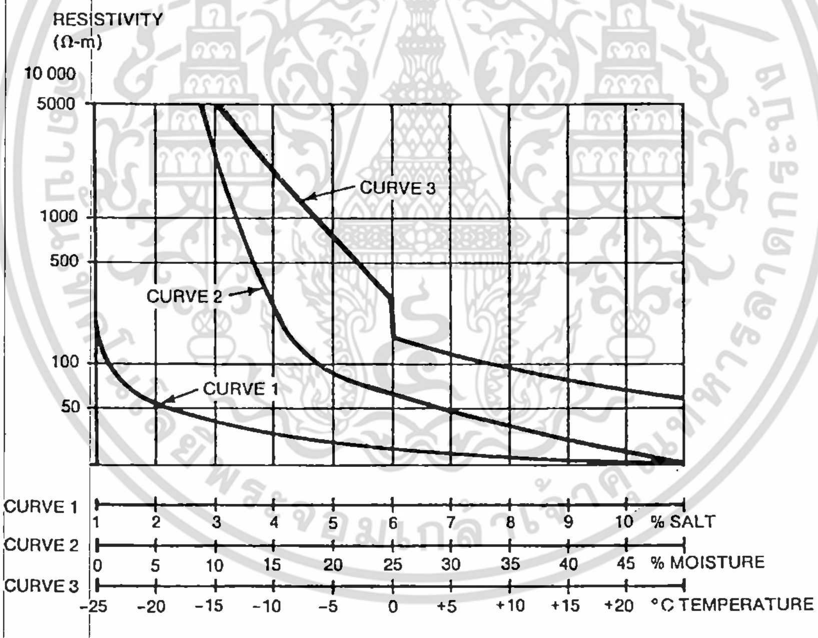
ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน (Ω-m)
ดินผสมวัชพืชเปียก (Wet Organic Soil)	10
ดินชื้น (Moist Soil)	100
ดินแห้ง (Dry Soil)	1,000
ทราย (Sand)	500-1,000
หินแข็ง (Bed Rock)	10,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นภายในดินจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของเนื้อดิน ความหนาแน่นของดินและความหลากหลายของอนุภาคของเนื้อดิน ซึ่งถ้าภายในดินมีความชื้นน้อยกว่า 15% จะทำให้ค่า ความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นดังเส้นกราฟเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงผลของความชื้นภายในดินที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน และถ้าภายในดินมีความชื้นมากกว่า 22% ของน้ำหนักดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

อุณหภูมิของดินนั้นอาจไม่ต้องนำมาพิจารณาถ้าอุณหภูมิของดินมีค่ามากกว่า 0 °C แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า 0 °C น้ำภายในดินจะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ค่าความต้านทานภายในดินเพิ่มขึ้นรวดเร็วมากดังเส้นกราฟที่ 3 ของรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 15.2% ของน้ำหนักดิน

สารเคมีภายในดินโดยทั่วไปมักเป็นสารประกอบของเกลือ กรด หรือโลหะ ซึ่งจะช่วยให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำลงได้ดังเส้นกราฟที่ 1 ของรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงผลของสารเคมีภายในดินที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 30% ของน้ำหนักดิน [11]



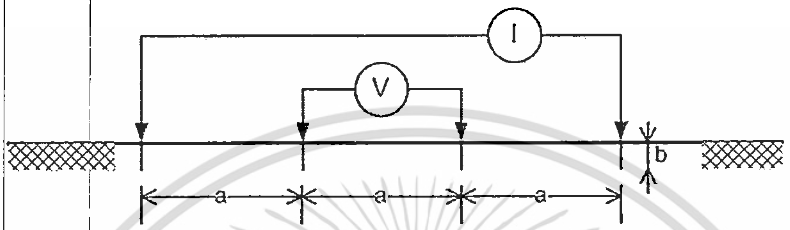
รูปที่ 2.2 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

2.2.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินซึ่งได้แสดงไว้ในมาตรฐาน IEEE Std. 81 [17] จะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยคือ Wenner method หรือแบบ 4 จุด (Four point method) เพราะสามารถทำได้ในสภาพภูมิประเทศมีชั้นดินที่แข็งและไม่เจอปัญหาการสัมผัสกันระหว่างดินกับผิวของโพรบไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการวัดจะประกอบโพรบ 4 แท่ง ปักลงบนพื้นดินในแนวเส้นตรง และให้ระยะห่างของแต่ละโพรบเท่าๆกัน ดังรูปที่ 2.3 ความลึกของโพรบแต่ละแท่งไม่ควรเกิน 5% ของระยะห่างของโพรบแต่ละแท่ง เพื่อให้ตำแหน่งที่โพรบปักอยู่เหมือนแหล่งจ่ายกระแสและแรงดันที่เป็นจุด (Point source) และความลึกของโพรบจะได้ไม่มีผลต่อสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน การวัดที่ระยะห่างของโพรบใดๆ ก็คือการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ความลึกที่มีค่าเท่ากับระยะห่างของโพรบนั้น [1]



รูปที่ 2.3 การวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบเวนเนอร์

ค่าที่ได้จากการวัดจะเป็นค่าความต้านทานของดิน (Soil resistance) ที่ระยะห่างของโพรบนั้น ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างโพรบคู่ในกับกระแสที่ไหลระหว่างโพรบคู่นอก การวัดจะต้องเพิ่มระยะห่างของโพรบไปจนเกือบครอบคลุมพื้นที่ภายในขอบเขตของสถานีไฟฟ้าย่อย และสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho = 4\pi aR \qquad (2.4)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)
R คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ ในหน่วย โอห์ม (Ω)
a คือ ระยะห่างระหว่างโพรบคู่หนึ่ง ในหน่วย เมตร (m)

กรณีที่โครงสร้างของดินเป็นดินชั้นเดียวหรือเป็นดินชนิดที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous soil) หรือดินชั้นเดียว (Uniform soil) ที่ระยะห่างโพรบใดๆ ค่า ρ ที่วัดได้จะต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าโครงสร้างของดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-homogeneous soil) ค่า ρ ที่วัดได้จะเปลี่ยนไปตามระยะห่างของโพรบ

ในกรณีที่เป็นดินสองชั้น จะประกอบด้วยพารามิเตอร์สามตัว คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) และความลึกของดินชั้นบน (h) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่างจะแทนด้วยสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection factor, K) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{2.5}$$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Grounding and Soil structure analysis) ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

2.3 ขนาดและวัสดุของสายตัวนำต่อลงดิน

2.3.1 คุณสมบัติของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

สายตัวนำเป็นอุปกรณ์หลักที่นำมาใช้ประกอบเป็นระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยทำหน้าที่นำกระแสผิดพร่องที่เกิดขึ้นกระจายลงสู่ดิน ดังนั้นสายตัวนำที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. มีค่าความนำจำเพาะเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์สูงเมื่อกระแสลัดวงจรไหลผ่าน
2. ต้องไม่หลอมละลายและทนต่อแรงทางกลที่เกิดจากขนาดกระแสลัดวงจรและช่วงเวลาการไหล
3. มีความแข็งแรงทางกลและทนทานและการผุกร่อนตลอดอายุการใช้งาน
4. สามารถรักษาสภาพไว้ได้เมื่ออยู่ในสาวะที่มีการผุกร่อนหรือถูกกระแทกจากแรงภายนอก

2.3.2 ขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำระบบต่อลงดินจะขึ้นอยู่กับ

1. ขนาดกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน
2. ช่วงเวลาตัดกระแส
3. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิแวดล้อม
4. อุณหภูมิที่ยอมรับได้

ซึ่งมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{mm} = I \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{T_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \tag{2.6}$$

เมื่อ	A_{mm}	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด ในหน่วย ตารางมิลลิเมตร (mm^2)
	I	คือ กระแสลัดวงจรลงดินเป็นค่า rms ในหน่วย กิโลแอมแปร์ (kA)
	T_m	คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย ในหน่วย องศาเซลเซียส (°C)
	T_a	คือ อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ในหน่วย องศาเซลเซียส (°C)
	T_r	คือ อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ ในหน่วย องศาเซลเซียส (°C)
	α_0	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0 °C
	α_r	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ T_r °C
	ρ_r	คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ ที่อุณหภูมิ T_r ($\mu\Omega/cm^3$) ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)
	t_c	คือ ช่วงเวลาที่กระแสลัดวงจรไหล ในหน่วย วินาที (s)
	TCAP	คือ ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (J /cm^3/°C)
	K_0	มีค่าเท่ากับ $1/\alpha_0$ หรือ $1/\alpha_r$-T_r

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำระบบต่อลงดินที่คำนวณได้นั้นจะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต่อลงดินนั้นสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2.2 [1, 16]

2.3.3 โลหะที่ใช้เป็นลวดตัวนำในระบบต่อลงดิน [1, 12]

2.3.3.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี มีค่าความนำจำเพาะสูงและไม่มีปัญหาในเรื่องของการผุกร่อนเพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบเมื่อนำมาฝังในดิน โดยทำการเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

2.3.3.2 เหล็กกล้าหุ้มทองแดง (Copper-Clad Steel)

เหล็กกล้าหุ้มทองแดงนั้นนิยมใช้เป็นแท่งหลักดินเนื่องจากทนต่อการตอกลงใต้ดิน และเพื่อหลีกเลี่ยงการลักขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินออกไปขาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.3 อะลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบธรรมดา เนื่องจากมีข้อเสียคือ

1. อะลูมิเนียมจะมีการผุกร่อนเมื่อมีการฝังลงในดิน และจะไม่สามารถใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้เมื่อเกิดการผุกร่อน
2. เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการผุกร่อนที่ผิวของอลูมิเนียม

ทั้งนี้เพราะว่าอะลูมิเนียมประพฤติตัวเป็นขั้วบวกเมื่อทำการฝังดินโดยเทียบกับโลหะอื่นฝังอยู่ภายในบริเวณเดียวกัน โดยส่วนมากแล้วอะลูมิเนียมจะใช้เป็นเปลือกหุ้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS (Gas Insulated Substation)

2.3.3.4 เหล็ก (Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินและใช้เป็นแท่งกราวด์รอด แต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาถึงการป้องกันการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวของเหล็กหรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็ก เพื่อให้ประพฤติตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดิน ในระบบต่อลงดินถึงแม้จะทำการเลือกใช้ ทองแดง หรือเหล็กชุบทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดินเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการผุกร่อนที่ผิวตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน แต่ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากการผุกร่อนของโลหะที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดิน เพราะว่าทองแดงและเหล็กนั้นจะประพฤติตัวเสมือน Galvanize Cell โดยที่ดินทำหน้าที่เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า โดยที่เหล็กจะประพฤติตัวเสมือนขั้วบวก และทองแดงจะประพฤติตัวเสมือนขั้วลบ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาการผุกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินได้ดังนี้

1. ทำการเคลือบผิววัสดุที่ประพฤติตัวเป็นขั้วบวกเมื่อฝังลงในดินโดยการพันเทปพลาสติก หรือใช้ Asphalt ผสมเคลือบที่ผิวของวัสดุ
2. กำหนดการวางแนวท่อในบริเวณที่มีการฝังระบบต่อลงดินนั้นใหม่ เพื่อให้ตัวนำที่เป็นทองแดงใดๆที่ข้ามแนวของท่อน้ำหรือวัตถุอื่นๆที่เป็นโลหะที่ไม่ได้เคลือบอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเคลือบโลหะชนิดใดชนิดหนึ่งที่อยู่ใกล้กันด้วยฉนวน โดยปกติแล้วเราจะเคลือบฉนวนท่อ
3. ใช้คุณสมบัติของขั้วลบในการป้องกันการผุกร่อน (Cathodic protection) โดยใช้อาโนดหรือป้อนด้วยกระแสไฟฟ้า
4. หลีกเลี่ยงการใช้ท่อเหล็ก โดยเลือกใช้ท่อพลาสติกแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของวัสดุ

Description	α_r at 20 °C (1/°C)	K at 0 °C (0°C)	Fusing Temperature T_m (°C)	ρ_r at 20 °C (μΩ/cm^3)	TCAP (J /cm^3/°C)
Copper, annealed soft-drawn (100% conductivity)	0.00393	234	1,083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)	0.00381	242	1,084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire (40% conductivity)	0.00378	245	1,084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire (30% conductivity)	0.00378	245	1,084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod (20% conductivity)	0.00378	245	1,084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade (61% conductivity)	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy (53.5% conductivity)	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy (52.5% conductivity)	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire (20.3% conductivity)	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020 (10.8% conductivity)	0.00160	605	1,510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod (9.8% conductivity)	0.00160	605	1,400	17.5	4.44
Zinc-coated steel rod (8.6% conductivity)	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304 (2.4% conductivity)	0.00130	749	1,400	72.00	4.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

2.4.1 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์

โดยโอกาสที่มนุษย์จะได้รับอันตรายมี 2 สาเหตุ คือจากการสัมผัสโครงสร้างโลหะของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินและจากการเดินอยู่ภายในหรือใกล้เคียงกับสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งจะมีกระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์จากมือสู่เท้าในกรณีแรกหรือจากเท้าสู่เท้าในกรณีที่สอง สำหรับไฟฟ้ากระแสตรงและความถี่กำลัง (Power frequency) ร่างกายมนุษย์สามารถแทนด้วยความต้านทาน ดังนั้นความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปพิจารณาถึงขีดจำกัดของกระแสหรือแรงดันที่มนุษย์สามารถทนได้ดัง ตารางที่ 2.3 [11] แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทานเฉลี่ยของร่างกายมนุษย์มีค่าประมาณ 1,000 Ω

ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างๆของมนุษย์

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

2.4.2 กระแส และช่วงเวลาที่เกิดการผิดพร่อง

กระแสผิดพร่องอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ การเสื่อมสภาพของฉนวนป้องกัน หรือปรากฏการณ์ธรรมชาติต่าง ๆ ฯลฯ โดยจะคำนึงถึงการผิดพร่องที่มีความรุนแรงที่สุด เมื่อมีการผิดพร่องขึ้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดินในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และถ้ามีมนุษย์ไปสัมผัสกับอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหรือเดินอยู่ภายใน จะเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ผู้นั้น ซึ่งช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้องกันว่าสามารถตัดกระแสผิดพร่องได้เร็วเท่าไร ซึ่งโอกาสที่จะเกิดอันตรายก็จะมีน้อยลงเท่านั้น

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ในแต่ละคนจะทนได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของร่างกายของผู้นั้น แต่สามารถประมาณได้ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 [1, 9, 11] โดยตารางที่ 2.4 จะเปรียบเทียบปริมาณกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ระหว่างเพศหญิงและเพศชาย ส่วนตารางที่ 2.5 จะแสดงผลทางกายภาพของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกระแสที่เพศชายและเพศหญิงสามารถทนได้
เมื่อความต้านทานร่างกายมนุษย์เท่ากับ 1,000 โอห์ม

ปริมาณกระแส	ชาย	หญิง
ขนาดของกระแสที่รู้สึกได้ (mA)	1.1	1.6
ขนาดของกระแสที่สามารถช่วยตัวเองให้หลุดได้ (mA)	0.7	1.05

ตารางที่ 2.5 ผลทางกายภาพของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์

ขนาดของกระแส ที่ความถี่ 50-60 Hz	ผลที่เกิดขึ้นกับร่างกาย เมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 วินาที
1 mA	ร่างกายสามารถรู้สึกได้
1-6 mA	ร่างกายรู้สึกได้ แต่ไม่ทำให้เกิดอันตรายใดๆ
10-20 mA	เกิดอาการเกร็งจนไม่สามารถสลัดให้หลุดได้
50 mA	รู้สึกปวด อาจเกิดอาการหน้ามืด เป็นลมไม่มีเรี่ยวแรง แต่ระบบหายใจยังคงทำงานปกติ
100-300 mA	เกิดอาการ Ventricular Frabilation ซึ่งทำให้หัวใจหยุดการสูบฉีดโลหิต และอาจถึงตายภายในเวลาไม่กี่นาที
6 A	กล้ามเนื้อหัวใจเกิดอาการเกร็งตัว ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดอาการ Ventricular Frabrilation ถ้าหากช่วยโดยการผายปอดได้ทันอาจรอดตายได้แต่จะเกิดการเผาไหม้ตามร่างกาย

การคำนวณหาขีดจำกัดสูงสุดของกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้จะพิจารณาขณะที่กระแสไหลผ่านร่างกายในช่วงเวลา 0.03 - 3 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายถึงขั้นหัวใจทำงานผิดปกติ โดยมีความน่าจะเป็นถึง 99.5 % สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้

สำหรับมนุษย์หนัก 50 กิโลกรัม

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สำหรับมนุษย์หนัก 70 กิโลกรัม

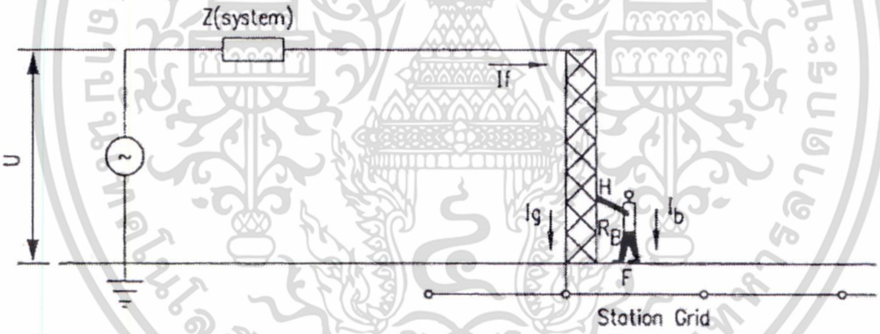
$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \tag{2.8}$$

เมื่อ I_B คือ กระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ในหน่วย แอมแปร์ (A)

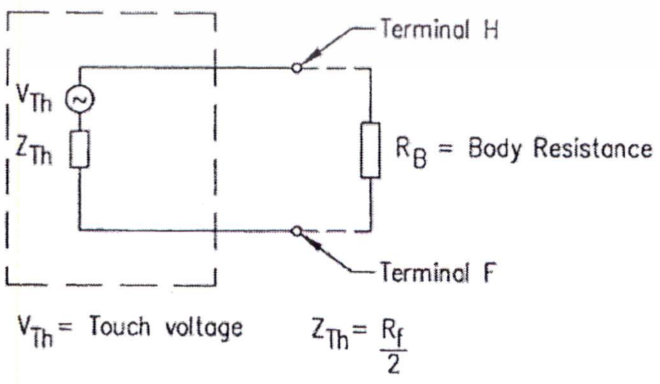
t คือ ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์ ในหน่วย วินาที (s)

2.4.3 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

มนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเมื่อทำการสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินไว้กับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดังในรูปที่ 2.4 โดยค่าความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่มือสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ (H) กับตำแหน่งที่มนุษย์ยืน (F) ทำให้เกิดกระแสไหลจากมือข้างที่สัมผัสไปยังเท้าทั้งสองที่สัมผัสกับพื้นเพื่อใช้เป็นเส้นทางให้สำหรับไหลลงดินของกระแส จากรูปที่ 2.4 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสได้ ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้ผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
117949

ดังนั้นจะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่ได้รับแรงดันสัมผัสซึ่งก็คือค่ากระแสที่ไหลในวงจรสมมูลนี้ ดังแสดงในสมการที่ (2.9)

$$I_b = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ (2.9) นี้ จะพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดได้เมื่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าเท่ากับกระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ซึ่งทำให้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ดังสมการที่ (2.10)

$$E_{touch} = \left(R_B + \frac{R_f}{2}\right) I_B \tag{2.10}$$

สำหรับค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่ง นั้นสามารถแสดงได้ดังในสมการที่ (2.11)

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \tag{2.11}$$

เมื่อ R_f คือ ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่ง ในหน่วย โอห์ม (Ω)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

b คือ รัศมีของเท้า ที่แทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมรัศมี 0.80 เมตร

จากสมการที่ (2.11) เมื่อแผ่นโลหะวงกลมที่แทนเท้ารัศมี 0.08 เมตร จะทำให้ได้ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่งโดยประมาณ ดังสมการที่ (2.12)

$$R_f \approx 3\rho \tag{2.12}$$

ดังนั้นจากสมการค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้ ดังสมการที่ (2.13)

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5\rho)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{2.13}$$

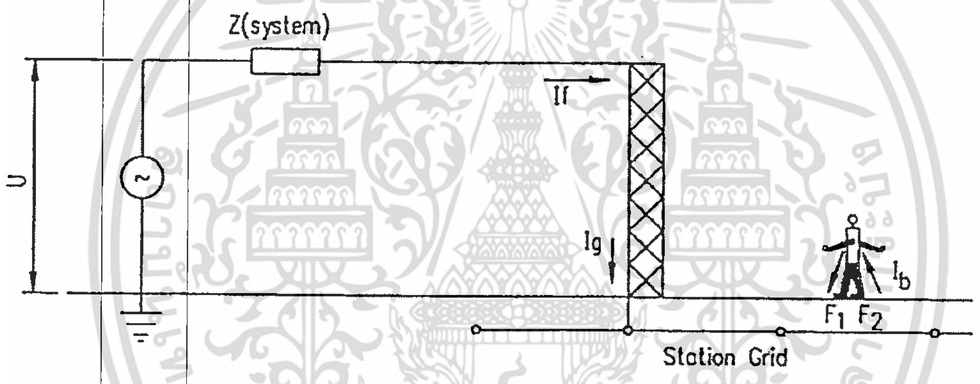
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม สามารถทนได้ ดังสมการที่ (2.14)

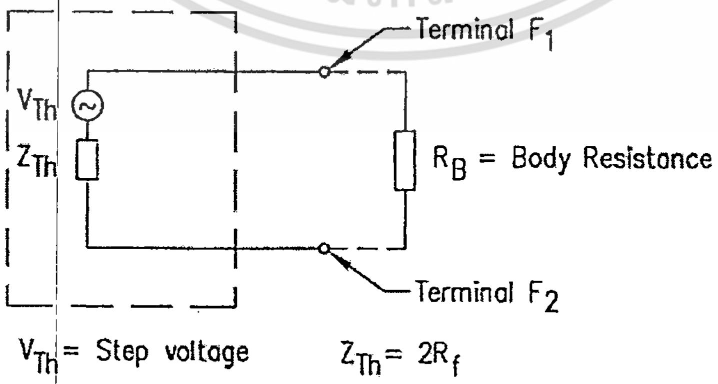
$$E_{touch70} = (1{,}000 + 1.5\rho)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{2.14}$$

2.4.4 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน

ค่าแรงดันช่วงก้าวเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้าสองเท้า ซึ่งผลของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดกระแสไหลผ่านร่างกายจากเท้าข้างหนึ่ง (F_1) ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง (F_2) เพื่อใช้เป็นทางให้กระแสไหลลงดินได้ ดังรูปที่ 2.6 โดยจะสามารถเขียนวงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสได้ ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่ได้รับแรงดันช่วงก้าวซึ่งก็คือค่ากระแสที่ไหลในวงจรสมมูลนี้ ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$I_b = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.14) นี้ จะพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดได้เมื่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกาย มีค่าเท่ากับกระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ซึ่งทำให้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ดังสมการที่ (2.16)

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B \tag{2.16}$$

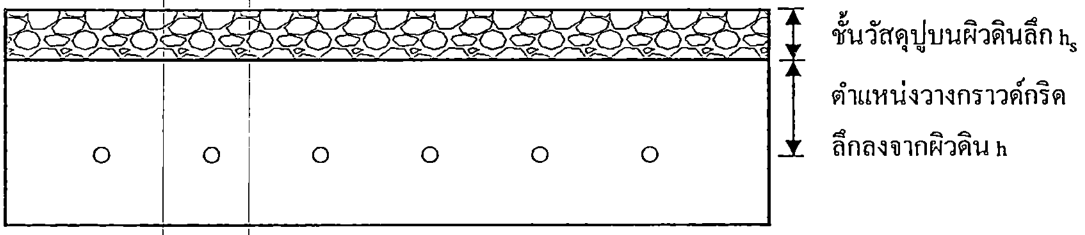
เนื่องจากค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่งโดยประมาณจากสมการที่ (2.12) ดังนั้นจากสมการค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ดังสมการที่ (2.17)

$$E_{step50} = (1{,}000 + 6\rho)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{2.17}$$

และจากสมการค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ ดังสมการที่ (2.18)

$$E_{step70} = (1{,}000 + 6\rho)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{2.18}$$

2.5 การปูวัสดุบนผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 2.8 การปูวัสดุบนผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปูวัสดุบนผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยนี้ จะใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดิน เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มความต้านทานที่เท้าของมนุษย์ซึ่งปฏิบัติงานอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถจำกัดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายขณะเกิดกระแสผิดพร่องได้ อีกทั้งช่วยให้สามารถลดจำนวนลวดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินให้น้อยลงได้ ดังนั้นสามารถแสดงลักษณะการปูวัสดุบนพื้นผิวภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยได้ดังรูปที่ 2.8

โดยส่วนมากวัสดุที่ใช้ปูผิวดินในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น มักจะใช้หินกรวดที่ความหนาระหว่าง 8-15 เซนติเมตร แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดในสภาพเปียกจะมีค่าเท่ากับ 3,000 โอห์ม-เมตร หินกรวดที่ใช้ปูผิวดินจะมีค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.6 [11]

ตารางที่ 2.6 ค่าความต้านทานจำเพาะของหินประเภทต่างๆ

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

สำหรับผลของการปูวัสดุที่ผิวดินนี้จะทำให้ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่งที่หาได้จากสมการที่ (2.11) เปลี่ยนไปซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2.19)

$$R_f = \left(\frac{\rho}{4b}\right)\cdot C_s \qquad (2.19)$$

โดยที่ C_s คือ แฟคเตอร์ลดที่เกิดเนื่องจากการปูวัสดุบนผิวดิน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \tag{2.20}$$

เมื่อ C_s คือ แฟคเตอร์ลดที่เกิดเนื่องจากการปูวัสดุบนผิวดิน

H_s คือ ความลึกของวัสดุปูผิวดิน ในหน่วย เมตร (m)

ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

จากผลของการปูวัสดุบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีผลต่อค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินนี้ จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมการที่ (2.13) และ (2.14) ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดสำหรับมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัมเมื่อมีการปูวัสดุบนผิวดินได้ดังในสมการที่ (2.21) และ (2.22) ตามลำดับ

$$E_{touch50} = \left(1{,}000 + 1.5\rho_s C_s\right)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{2.21}$$

$$E_{touch70} = \left(1{,}000 + 1.5\rho_s C_s\right)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{2.22}$$

สมการที่ (2.17) และ (2.18) ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดสำหรับมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัมเมื่อมีการปูวัสดุบนผิวดินได้ดังในสมการที่ (2.23) และ (2.24) ตามลำดับ

$$E_{step50} = \left(1{,}000 + 6\rho_s C_s\right)\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \tag{2.23}$$

$$E_{step70} = \left(1{,}000 + 6\rho_s C_s\right)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{2.24}$$

จากสมการที่ (2.21) ถึง (2.24) ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินในกรณีที่มีการปูวัสดุบนผิวดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กระแสกริดสูงสุด

กระแสกริด คือกระแสสูงสุดที่ไหลจากกราวด์กริดลงสู่ดิน กระแสกริดนี้จะมีค่าน้อยกว่ากระแสลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากมีกระแสลัดวงจรบางส่วนไหลผ่านสายดินขึงอากาศและสายศูนย์ของสายส่งและสายจำหน่ายที่ต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อยนั่นเอง โดยสามารถคำนวณกระแสสูงสุดได้จากสมการที่ (2.25) ดังนี้

$$I_G = D_f \times I_g \tag{2.25}$$

เมื่อ I_G คือ กระแสกริดสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)

I_g คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระสมมาตรที่กราวด์กริด (Grid current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)

D_f คือ ตัวประกอบการลดลง

โดยที่

$$I_g = S_f \times I_f \tag{2.26}$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}\left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}}\right)} \tag{2.27}$$

$$T_a = \frac{X}{2\pi R} \tag{2.28}$$

เมื่อ I_f คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสผิดพร่องสมมาตรสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)

S_f คือ ตัวประกอบแบ่งกระแสผิดพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสามารถคำนวณค่ากระแสกริดสูงสุดได้โดยใช้วิธีของ Thaper [11] ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าโดยพิจารณาค่ากระแสสูงสุดจากค่าความต้านทานโครงตาข่าย ผลของสาย Overhead Ground Wire ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance) และระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Tower Span) ดังนี้

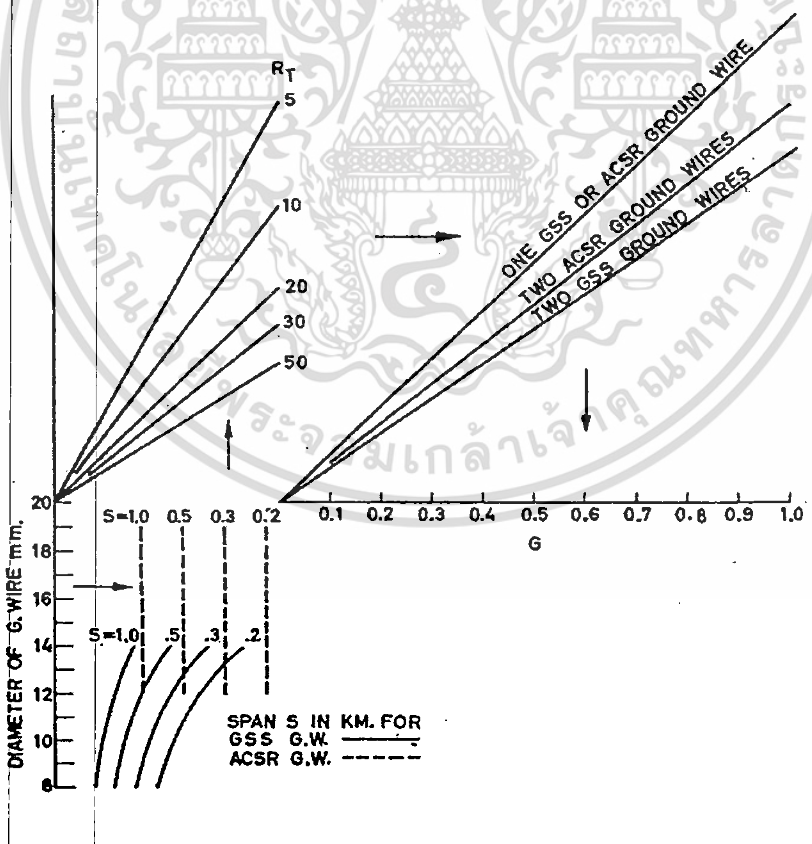
$$I_G = \left(\frac{Z}{R_g + Z}\right) I_f \tag{2.29}$$

โดยที่

$Z = \frac{1}{Y'}$

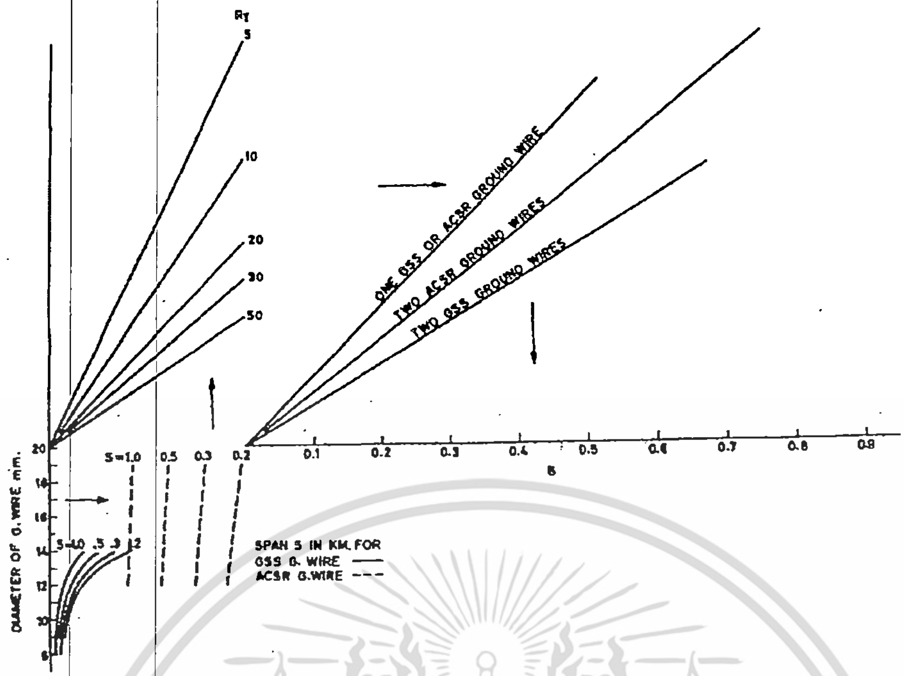
Y' คือ Admittance of Ladder Network ที่ประกอบด้วย Overhead Ground Wire และ Tower Footing

$Y' = G + jB$



รูปที่ 2.9 ค่า G ของสาย Overhead Ground Wire

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ค่า B ของสาย Overhead Ground Wire

สำหรับค่า G และ B สามารถดูได้จากกราฟในรูป 2.9 และ 2.10 ซึ่งค่า G และ B ขึ้นอยู่กับ

1. ชนิดของสาย Overhead Ground Wire (ในที่นี้พิจารณาเฉพาะชนิด GSS และ ACSS)
2. เส้นผ่านศูนย์กลางของสาย Overhead Ground Wire
3. ระยะห่างระหว่างเสาส่ง
4. ค่าความต้านทานของเสาส่ง
5. จำนวนของสาย Overhead Ground Wire

2.7 แรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่พิจารณานี้ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงภายในสถานีไฟฟ้าย่อยเนื่องจากการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่มากเกินค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ทำนองเดียวกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวต้องมีค่าไม่เกินค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แต่สมการเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวมีข้อจำกัด โดยที่ความลึกของกราวด์กริดควรอยู่ในช่วง 0.25-2.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage)

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช สามารถหาได้จากสมการที่ (2.30) ดังนี้

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m} \tag{2.30}$$

เมื่อ I_G คือ กระแสกริดสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)

L_m คือ ความยาวประสิทธิผลของตัวนำในระบบต่อลงดิน

โดยที่

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\left[\ln\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d}\right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln\left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)}\right]\right] \tag{2.31}$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \tag{2.32}$$

$= 1$ ถ้ากราวด์กริดมีแท่งกราวด์รอดรอบๆ หรือกราวด์กริดมีแท่งกราวด์รอดที่มุม รวมทั้งกราวด์กริดที่มีแท่งกราวด์รอดรอบๆ และกระจายทั่วกราวด์กริด

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \text{(ความลึกอ้างอิงของกราวด์กริด } h_0 = 1 \text{ m)} \tag{2.33}$$

เมื่อ D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน ในหน่วย เมตร (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

h คือ ความลึกของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \tag{2.34}$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \tag{2.35}$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \tag{2.36}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$n_b = 1$ ถ้ากราวด์ริกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_c = 1$ ถ้ากราวด์ริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$n_d = 1$ ถ้ากราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปตัวแอล (L)

สำหรับกรณีอื่น

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \tag{2.37}$$

$$n_c = \left(\frac{L_x L_y}{A}\right)^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \tag{2.38}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \tag{2.39}$$

เมื่อ L_c คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน ในหน่วย เมตร (m)

L_p คือ เส้นรอบรูปของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

A คือ พื้นที่ของกราวด์กริด ในหน่วย ตารางเมตร (m^2)

L_x คือ ความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง x ในหน่วย เมตร (m)

L_y คือ ความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง y ในหน่วย เมตร (m)

D_m คือ ระยะห่างสูงสุดระหว่างจุดสองจุดใดๆบนกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

สำหรับกราวด์กริดที่ไม่มีแท่งกราวด์รอดหรือมีแท่งกราวด์รอดจำนวนน้อย (ไม่มีที่มุม หรือที่เส้นรอบกราวด์กริด)

$$L_m = L_c + L_R \tag{2.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกราวด์กริดที่มีแท่งกราวด์รอดที่มุม ที่เส้นรอบกราวด์กริด หรือกระจายทั่วพื้นกราวด์กริด

$$L_m = L_c + \left[1.55 + 1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}\right)\right]L_R \tag{2.41}$$

เมื่อ L_R คือ ความยาวรวมของแท่งกราวด์รอดทุกแท่ง ในหน่วย เมตร (m)

L_p คือ ความยาวของแท่งกราวด์รอดแต่ละแท่ง ในหน่วย เมตร (m)

2.7.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage)

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว สามารถหาได้จากสมการที่ (2.42) ดังนี้

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \tag{2.42}$$

โดยที่

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D}\left(1 - 0.5^{n-2}\right)\right] \tag{2.43}$$

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R \tag{2.44}$$

การหาค่า K_i จะเหมือนกับการใช้ในการหาแรงดันไฟฟ้าเมช คือสมการที่ (2.34)

2.8 GPR

GPR (Ground Potential Rise) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน และค่ากระแสกริด ดังสมการที่ (2.45)

$$GPR = I_G \times R_T \tag{2.45}$$

เมื่อ R_T คือ ความต้านทานระบบต่อลงดิน ในหน่วย โอห์ม (Ω)

I_G คือ กระแสกริดสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การหาความต้านทานระบบต่อลงดินของสถานีไฟย่อย กรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น

ความต้านทานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ถือเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญมากในการออกแบบระบบการต่อลงดินเพื่อให้มีความปลอดภัยต่อบุคคลและความมั่นคงของระบบ กล่าวคือ เมื่อเกิดความผิดพร่องหรือเกิดการลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้า ระบบกราวด์กริดจะถูกออกแบบให้สำหรับช่วยกระจายกระแสไฟฟ้าที่ผิดพร่องลงสู่ดิน กระแสผิดพร่องที่ไหลในกราวด์กริดจะทำให้แรงดันที่กราวด์กริดเพิ่มขึ้นและดินที่อยู่รอบๆ กราวด์กริดที่ห่างออกไปจะมีแรงดันเกิดขึ้นด้วย ซึ่งความปลอดภัยของบุคลในพื้นที่สถานีไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ดังนั้นการที่จะลดอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าทั้งสองได้นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องลดแรงดันไฟฟ้าที่กระจายบนพื้นของสถานีไฟฟ้าและกำหนดทางเดินของกระแสไฟฟ้าผิดพร่องให้ไหลลงดินในช่องทางที่กำหนดไว้

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่มีค่าต่ำจะช่วยนำกระแสผิดพร่องได้ดี ซึ่งการจะทราบว่าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีค่าความต้านทานจริงเท่าใดจะต้องทำการวัดจากระบบต่อลงดินหลังจากทำการก่อสร้างเสร็จแล้ว

ในบทนี้แสดงการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 115/22 เควี แบบกลางแจ้ง (Conventional Substation) จำนวน 3 แห่ง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะพิจารณาดินเป็นดินสองชั้น (Two-layers) ซึ่งจะต้องหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความหนาของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง โดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Grounding and Soil structure analysis [14]) โมดูล RESAP ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) ประเทศแคนาดาในการหาค่าดังกล่าว

สำหรับการคำนวณหาความต้านทานของกราวด์กริดนั้น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำสมการของ Sverak ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 มาเปรียบเทียบกับสมการของ Xiaobin ที่ถูกพัฒนาและตีพิมพ์ในเอกสารการประชุมนานาชาติเมื่อปี ค.ศ.2008 ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นการเก็บข้อมูลและทดสอบในภาคสนามที่สถานีไฟฟ้านั้น จากนั้นนำผลการทดลองจากสมการทั้งสองมาเปรียบเทียบกับผลกับการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CDEGS โมดูล MALT พบว่าสมการของ Xiaobin นั้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า จึงได้นำสมการของ Xiaobin เพื่อไปพัฒนาใช้งานต่อ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ความต้านทานกราวด์กริด

3.1.1 สมการ Sverak [15, 16]

เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริด ดังนี้

$$R_g = \rho_a \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h_b \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \tag{3.1}$$

โดยที่

$$\rho_a = \frac{\rho_1}{\left[1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \left(e^{\frac{1}{K(h+2h_b)}} \right) \right]} \quad \text{เมื่อ} \ \rho_2 < \rho_1 \tag{3.2}$$

$$\rho_a = \frac{\rho_2}{\left[1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \left(e^{\frac{-1}{K(h+2h_b)}} \right) \right]} \quad \text{เมื่อ} \ \rho_2 > \rho_1 \tag{3.3}$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{3.4}$$

เมื่อ R_g คือ ความต้านทานกราวด์กริด ในหน่วย โอห์ม (Ω)

L_c คือ ความยาวของตัวนำ ในหน่วย เมตร (m)

A คือ พื้นที่กราวด์กริด ในหน่วย ตารางเมตร (m^2)

ρ_a คือ ความต้านทานจำเพาะปรากฏ ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

ρ_2 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

h คือ ความลึกของดินชั้นบน ในหน่วย เมตร (m)

h_b คือ ค่าลึกของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

K คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สมการ Xiaobin [18]

เป็นสมการวิธีใหม่ที่ใช้คำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้แบบโครงสร้างเป็นดินสองชั้น มีสมการดังนี้

$$R_g = \frac{\rho_2}{4\sqrt{\frac{\pi}{A}}} \qquad \text{เมื่อ } \rho_2 < \rho_1 \text{ , } h < h_b \qquad (3.5)$$

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A+4h\sqrt{\pi A}\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

$$\text{เมื่อ } \rho_2 < \rho_1 \text{ , } h \geq h_b \qquad (3.6)$$

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.55e^{-15\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.1e^{-0.25\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}+0.2e^{\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A+4h\sqrt{\pi A}\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.55e^{-15\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.1e^{-0.25\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}+0.2e^{\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

$$\text{เมื่อ } \rho_2 \geq \rho_1 \qquad (3.7)$$

เมื่อ R_g คือ ความต้านทานกราวด์กริด ในหน่วย โอห์ม (Ω)

A คือ พื้นที่กราวด์กริด ในหน่วย ตารางเมตร (m^2)

ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

ρ_2 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

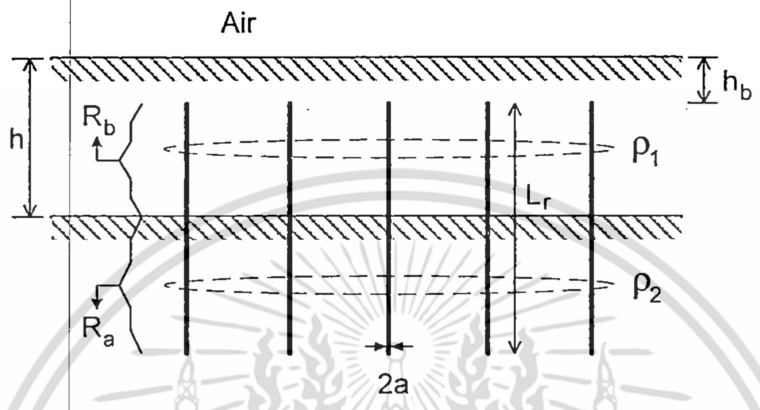
h คือ ความลึกของดินชั้นบน ในหน่วย เมตร (m)

h_b คือ ความลึกของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ความต้านทานแท่งกราวด์รอด [15, 19]

ในการหาความต้านทานแท่งกราวด์รอด พารามิเตอร์สำหรับคำนวณหาความต้านทานแท่งกราวด์รอดในแบบจำลองของดินสองชั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยความต้านทานแท่งกราวด์รอดหาได้จากสมการที่ (3.8) ดังนี้



รูปที่ 3.1 แท่งกราวด์รอดในดินสองชั้น

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \tag{3.8}$$

โดยที่

$$R_a = \frac{\rho_2 g_0 F_0}{(L_r + h_b - h) n_r} \tag{3.9}$$

$$R_b = \frac{\rho_1 g_0 F_0}{(h - h_b) n_r} + \frac{\rho_1 \varphi_0}{h} \tag{3.10}$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (3.9) และ (3.10) หาได้ดังนี้

$$g_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{2L_r}{a}\right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4\ln 2)h_b}{L_r}}\right] \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_0 = F\Big|_{L_r \to \frac{L_r}{1-0.9K}} \quad (3.12)$$

$$F = 1 + \left(n_r + \frac{1}{\sqrt{n_r}}\right)\frac{R_s}{R_r} \quad (3.13)$$

$$\frac{R_s}{R_r} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{r1}\left[\left(\frac{1}{2}\right)^3 + \left(\frac{L_r}{L_r + \left(\frac{r1}{2}\right)}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}}}{\ln\left(\frac{4L_r}{a}\right) - 1} \quad (3.14)$$

$$r1 = \frac{A}{2\pi L_r} \quad (3.15)$$

และ

$$\varphi_0 = \frac{\frac{1}{2\pi}\left(\ln\frac{1}{1-K}\right)}{\sqrt{\left(\frac{n_r}{F_0} - 1\right)^2 + 1}} \quad (3.16)$$

เมื่อ R_t คือ ความต้านทานกราวด์รอด ในหน่วย โอห์ม (Ω)

R_a คือ ความต้านทานกราวด์รอดในเนื้อดินชั้นล่าง ในหน่วย โอห์ม (Ω)

R_b คือ ความต้านทานกราวด์รอดในเนื้อดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม (Ω)

ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

ρ_2 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ในหน่วย โอห์ม-เมตร (Ω-m)

h คือ ความลึกของดินชั้นบน ในหน่วย เมตร (m)

h_b คือ ความลึกของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

n_r คือ จำนวนแท่งกราวด์รอด

L_r คือ ความยาวแท่งกราวด์รอด ในหน่วย เมตร (m)

a คือ รัศมีของแท่งกราวด์รอด ในหน่วย เมตร (m)

K คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายรูปที่ 3.1 ได้ว่า เมื่อแท่งกราวด์รอดมีการจัดวางเป็นแนวตั้งและมีส่วนของแท่งกราวด์รอดอยู่ระหว่างเนื้อดินชั้นบนกับดินชั้นล่าง ค่าความต้านทานจะแบ่งการคำนวณออกเป็นสองส่วนโดยกำหนดค่าที่ตำแหน่งบริเวณเนื้อดินชั้นบนและดินชั้นล่างเท่ากับ R_b และ R_a ตามลำดับ กำหนดจำนวนแท่งกราวด์รอดมีทั้งหมดเท่ากับ n_r แท่ง แต่ละแท่งมีรัศมีเท่ากับ a เมตร และมีความยาวเท่ากับ L_r เมตร

ผลรวมของความต้านทานที่ตำแหน่งเนื้อดินชั้นบนและชั้นล่างจะเท่ากับ R_t ดังแสดงในสมการที่ (3.8) แต่ทั้งนี้เมื่อแท่งกราวด์รอดติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งในเนื้อดินชั้นบนทั้งหมดตลอดส่วนความยาว ค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รอดจะหาได้จากสมการที่ (3.17) ดังนี้

$$R_t = R_b \qquad (3.17)$$

และเมื่อแท่งกราวด์รอดติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งในเนื้อดินชั้นล่างทั้งหมดตลอดส่วนความยาว จะหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รอดได้จากสมการที่ (3.18) ดังนี้

$$R_t = R_a \qquad (3.18)$$

3.3 ความต้านทานระบบต่อลงดิน [15, 19]

ค่าความต้านทานการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าได้จากการรวมความต้านทานกราวด์กริดและความต้านทานแท่งกราวด์รอด เมื่อผลรวมความต้านทานกราวด์กริดและแท่งกราวด์รอดของระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าประกอบด้วยกราวด์กริดและแท่งกราวด์รอดที่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นความต้านทานรวมทั้งหมดจะได้จากสมการที่ (3.19) ดังนี้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_t}\right)^3}} \qquad (3.19)$$

เมื่อ R_T คือ ความต้านทานระบบต่อลงดิน ในหน่วย โอห์ม (Ω)

R_g คือ ความต้านทานกราวด์กริด ในหน่วย โอห์ม (Ω)

R_t คือ ความต้านทานกราวด์รอด ในหน่วย โอห์ม (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กรณีศึกษา

ในส่วนนี้ จะนำสามตัวอย่างกรณีศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ สถานีไฟฟ้านางรอง(ชั่วคราว) จังหวัดบุรีรัมย์ และสถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก โดยค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบน ρ_1 ที่มีความลึก h และค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นล่าง ρ_2 เป็นค่าที่หาได้จากการวัดความต้านทานจำเพาะของดินโดยใช้วิธี Wenner four-pin method และนำค่าที่วัดได้นั้นไปเป็นข้อมูลสำหรับคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ทั้งสามที่คำนวณได้ ไปคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน โดยเปรียบเทียบกันระหว่างสมการของ Sverak, สมการของ Xiaobin และการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT

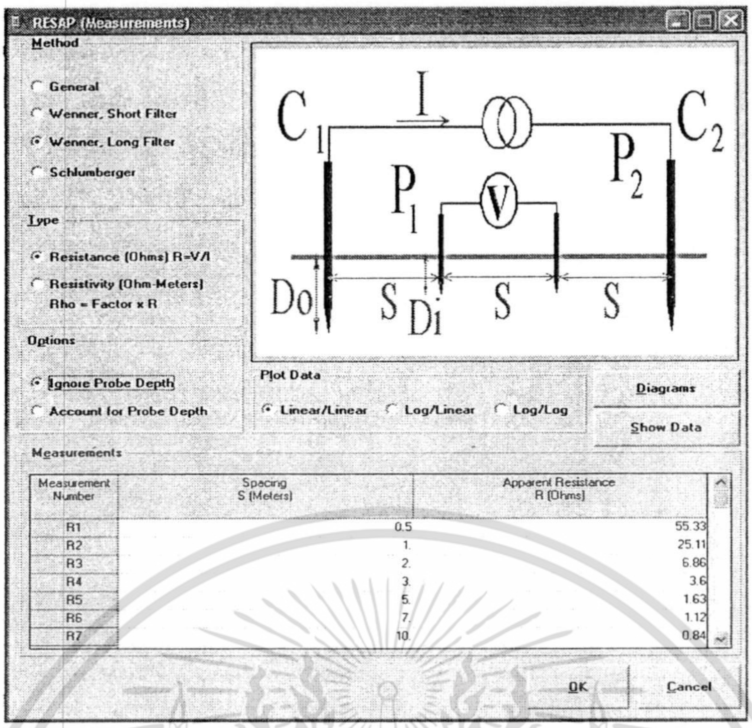
3.4.1 สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่

ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้ [4]

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่

		ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)						
ระยะห่างของโพรบ (m)		0.5	1	2	3	5	7	10
POINT 1	PX	76.10	19.90	5.56	2.55	1.41	1.01	0.76
	PY	66.50	19.00	6.18	3.52	1.43	1.11	0.89
POINT 2	PX	44.80	19.70	7.05	2.76	1.46	1.07	0.93
	PY	39.50	31.10	5.37	3.07	1.21	0.89	0.72
POINT 3	PX	54.10	26.40	6.78	3.66	1.86	1.26	0.96
	PY	90.30	36.80	6.50	3.90	2.04	1.30	0.87
POINT 4	PX	37.00	27.00	8.00	4.20	1.72	1.11	0.85
	PY	34.30	21.00	9.46	5.12	1.92	1.24	0.77
ผลรวมค่าความต้านทาน		442.6	200.9	54.9	28.78	13.05	8.99	6.75
$\sum R / N$		55.325	25.113	6.863	3.598	1.63125	1.124	0.844

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Layer Number	<--- LAYER CHARACTERISTICS --> Resistivity (ohm-m)	Thickness (Meters)	Reflection Coefficient (p.u.)	Resistivity Contrast Ratio
1	infinite	infinite	0.0	1.0
2	188.1530	0.9619396	-1.0000	0.18815E-17
3	48.99177	infinite	-0.58682	0.26038

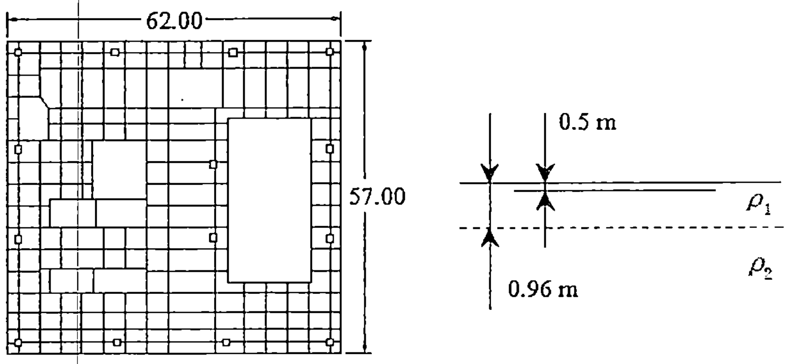
รูปที่ 3.2 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP

การวัดหาค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดมีการเก็บข้อมูลจำนวน 4 ตำแหน่งแบบสุ่ม โดยวัดในแนวแกน X และ Y ตามแนวเขตที่ดิน จากนั้นนำผลความต้านทานของดินจากตารางที่ 3.1 มาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยกำหนดแบบจำลองโครงสร้างเป็นดินสองชั้นจากโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP แสดงได้ดังรูปที่ 3.2

จากคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP พบว่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบน ρ_1 มีค่าเท่ากับ 188 โอห์ม-เมตร และความต้านทานจำเพาะดินชั้นล่าง ρ_2 มีค่าเท่ากับ 49 โอห์ม-เมตร โดยดินชั้นบนมีความลึกเท่ากับ 0.962 เมตร

รูปแบบกราวด์กริดสถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดมีการจัดวางรูปแบบดังรูปที่ 3.3 โดยเส้นประหมายถึงขอบเขตระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่าง มีพื้นที่เท่ากับ 3,534 ตารางเมตรและตัวนำมีความยาวตัวนำรวมทั้งหมด 1,814.2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราวด์กริดสถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด

เมื่อกำหนดให้แท่งกราวด์รอดที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดมีความยาวเท่ากับ 3 เมตร มีจำนวนทั้งหมด 30 แท่ง แต่ละแท่งมีรัศมีเท่ากับ 0.00794 เมตร การจัดวางเป็นแนวตั้งและมีตำแหน่งอยู่บริเวณส่วนของดินชั้นบนและชั้นล่าง เมื่อคำนวณหาค่าความต้านทานแท่งกราวด์รอดจากสมการที่ (3.8) ได้เท่ากับ 0.774 โอห์ม

เนื่องจากค่า $\rho_1 > \rho_2$ คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏโดยใช้สมการที่ (3.2) ได้เท่ากับ 71.03 โอห์ม-เมตร และคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการของ Sverak มีค่าเท่ากับ 0.5638 โอห์ม ดังนั้นหาสามารถหาค่าความต้านทานรวมหรือความต้านทานระบบต่อลงดินได้โดยใช้สมการที่ (3.19) เท่ากับ 0.5056 โอห์ม

ผลการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการของ Xiaobin โดยใช้สมการที่ (3.6) มีค่าเท่ากับ 0.4789 โอห์ม ดังนั้นหาสามารถหาค่าความต้านทานรวมหรือความต้านทานต่อลงดินได้โดยใช้สมการที่ (3.19) เท่ากับ 0.4462 โอห์ม

```
CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE
===============================

Original Electrical Current Flowing In Electrode..:   31500.      amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)..:   1.0000
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode..:   31500.      amperes
Number of Conductors in Electrode.................:   185
Resistance of Electrode System....................:  0.40103      ohms

SUBDIVISION
===========
Grand Total of Conductors After Subdivision.:    967

Total Current Flowing In Main Electrode......:   31500.      amperes
Average Current Density of Conductor Segments:   16.543      amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode........:   1904.2      meters

EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS
============================

Main Electrode Potential Rise (GPR).....:   12632.      volts
(based on two representative points)
```

รูปที่ 3.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน โดยการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT มีค่าเท่ากับ 0.4010 โอห์ม

พบว่าการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยสมการของ Sverak มีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 26.09 % และการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยสมการของ Xiaobin มีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 11.26 % ดังนั้นการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดด้วยสมการของ Xiaobin จะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS

3.4.2 สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) จังหวัดบุรีรัมย์

ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง(ชั่วคราว) แสดงได้ดังตารางที่ 3.2 [5] โดยการวัดหาค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) นั้น มีการเก็บข้อมูลแบบสุ่ม จำนวน 4 ตำแหน่ง โดยวัดทั้งแกน X และ Y ตามแนวเขตที่ดิน จากนั้นนำผลความต้านทานดินจากตาราง ที่ 3.2 มาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยกำหนดแบบจำลองโครงสร้างเป็นดินสองชั้นจากโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP

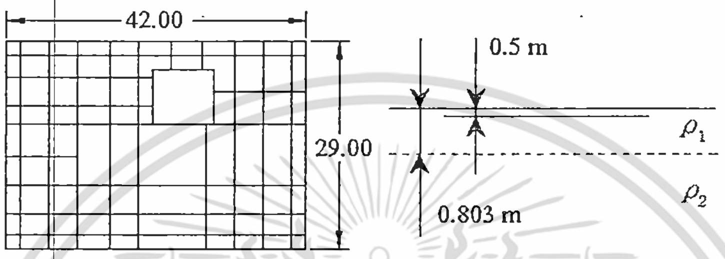
ตารางที่ 3.2 ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) จังหวัดบุรีรัมย์

		ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)								
ระยะห่างของโพรบ (m)		0.5	1	2	3	5	7	10	14	20
POINT 1	PX	6.02	2.00	0.95	1.07	0.87	0.65	0.41	0.47	0.37
	PY	5.27	2.20	1.36	10.90	0.88	0.86	0.70	0.35	0.20
POINT 2	PX	7.05	5.79	3.42	2.61	1.84	0.97	0.36	0.22	0.20
	PY	8.59	6.19	2.47	1.46	0.98	0.71	0.31	0.21	0.14
POINT 3	PX	5.88	3.27	1.95	1.38	0.98	0.93	0.64	0.43	0.19
	PY	5.30	2.41	1.56	1.35	1.05	0.87	0.54	0.31	0.32
POINT 4	PX	4.77	2.32	1.14	0.99	0.76	0.69	0.60	0.48	0.29
	PY	7.43	2.41	1.51	1.18	0.78	0.60	0.31	0.22	0.16
ผลรวมค่าความต้านทาน		50.310	26.590	14.360	20.940	8.140	6.280	3.870	2.690	1.870
$\sum R / N$		6.289	3.324	1.795	2.618	1.018	0.785	0.484	0.336	0.234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS พบว่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบน ρ_1 มีค่าเท่ากับ 18.75 โอห์ม-เมตร และความต้านทานจำเพาะดินชั้นล่าง ρ_2 มีค่าเท่ากับ 32.10 โอห์ม-เมตร โดยดินชั้นบนมีความลึกเท่ากับ 0.803 เมตร

รูปแบบกราวด์กริดสถานีไฟฟ้านางรอง(ชั่วคราว) มีการจัดวางรูปแบบดังรูปที่ 3.5 โดยเส้นประหมายถึงขอบเขตระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่าง มีพื้นที่เท่ากับ 1,218 ตารางเมตรและมีความยาวตัวนำรวมทั้งหมด 697 เมตร



รูปที่ 3.5 กราวด์กริดสถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว)

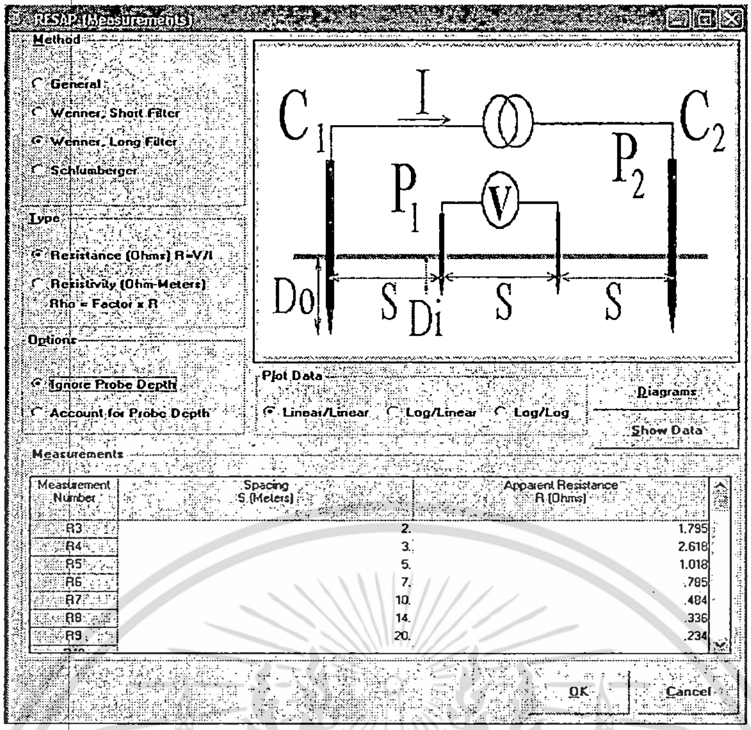
เมื่อกำหนดให้แท่งกราวด์รอดที่ใช้ในสถานีไฟฟ้านางรอง(ชั่วคราว) มีความยาวเท่ากับ 3 เมตร จำนวน 12 แท่ง แต่ละแท่งมีรัศมีเท่ากับ 0.00794 เมตร การจัดวางเป็นแนวตั้งและมีการตำแหน่งอยู่บริเวณส่วนของดินชั้นบนและชั้นล่าง เมื่อคำนวณหาค่าความต้านทานแท่งกราวด์รอดจากสมการที่ (3.8) ได้เท่ากับ 1.112 โอห์ม

เนื่องจากค่า $\rho_1 < \rho_2$ คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏโดยใช้สมการที่ (3.3) ได้เท่ากับ 19.743 และคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการของ Sverak มีค่าเท่ากับ 0.2737 โอห์ม ดังนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานรวมหรือความต้านทานระบบต่อลงดินได้โดยใช้สมการที่ (3.19) เท่ากับ 0.2724 โอห์ม

ผลการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการของ Xiaobin โดยใช้สมการที่ (3.7) มีค่าเท่ากับ 0.3716 โอห์ม ดังนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานรวมหรือความต้านทานระบบต่อลงดินได้โดยใช้สมการที่ (3.19) เท่ากับ 0.3671 โอห์ม

คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน โดยการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT มีค่าเท่ากับ 0.3631 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Layer Number	<--- LAYER CHARACTERISTICS --> Resistivity (ohm-m)	Thickness (Meters)	Reflection Coefficient (p.u.)	Resistivity Contrast Ratio
1	infinite	infinite	0.0	1.0
2	18.75040	0.8034624	-1.0000	0.18750E-18
3	32.09683	infinite	0.26248	1.7118

รูปที่ 3.6 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง(ชั่วคราว) ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP

```
CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE
===============================

Original Electrical Current Flowing In Electrode..:   31500.      amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)..:   1.0000
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode..:   31500.      amperes
Number of Conductors in Electrode.................:    39
Resistance of Electrode System....................:  0.36310      ohms

SUBDIVISION
===========
Grand Total of Conductors After Subdivision.:    276

Total Current Flowing In Main Electrode......:   31500.      amperes
Average Current Density of Conductor Segments:   42.974      amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode........:   733.00      meters

EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS
============================

Main Electrode Potential Rise (GPR).....:   11438.      volts
(based on two representative points)
```

รูปที่ 3.7 การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก

ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ แสดงได้ดังตารางที่ 3.3 ดังนี้ [6]

ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก

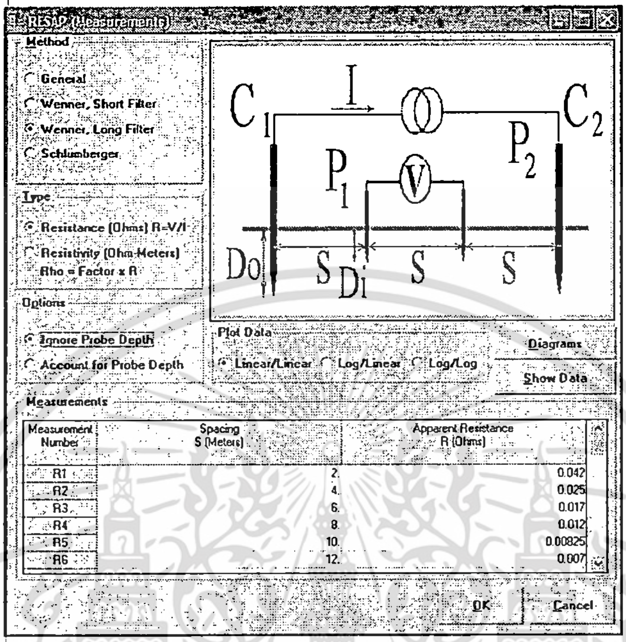
ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)							
ระยะห่างของโพรบ (m)		2	4	6	8	10	12
POINT 1	PX	0.030	0.023	0.013	0.018	0.007	0.007
	PY	0.046	0.030	0.022	0.017	0.011	0.015
POINT 2	PX	0.065	0.021	0.020	0.010	0.007	0.005
	PY	0.057	0.028	0.019	0.009	0.005	0.003
POINT 3	PX	0.043	0.025	0.012	0.011	0.006	0.004
	PY	0.061	0.031	0.017	0.016	0.010	0.007
POINT 4	PX	0.028	0.019	0.015	0.011	0.009	0.004
	PY	0.035	0.025	0.018	0.019	0.010	0.012
POINT 5	PX	0.025	0.018	0.014	0.008	0.010	0.011
	PY	0.043	0.035	0.025	0.011	0.009	0.003
POINT 6	PX	0.040	0.028	0.017	0.008	0.008	0.006
	PY	0.035	0.021	0.015	0.011	0.007	0.007
ผลรวมค่าความต้านทาน		0.508	0.304	0.207	0.149	0.099	0.084
$\sum R / N$		0.042	0.025	0.017	0.012	0.00825	0.007

การวัดหาค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ มีการเก็บข้อมูลจำนวน 6 ตำแหน่งแบบสุ่ม โดยวัดทั้งแกน X และ Y ตามแนวเขตที่ดิน จากนั้นนำผลความต้านทานดินจากตารางที่ 3.3 มาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยกำหนดแบบจำลองโครงสร้างเป็นดินสองชั้นจากโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP

จากคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS พบว่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบน ρ_1 มีค่าเท่ากับ 0.509 โอห์ม-เมตร และความต้านทานจำเพาะดินชั้นล่าง ρ_2 มีค่าเท่ากับ 0.595 โอห์ม-เมตร โดยดินชั้นบนมีความลึกเท่ากับ 0.202 เมตร

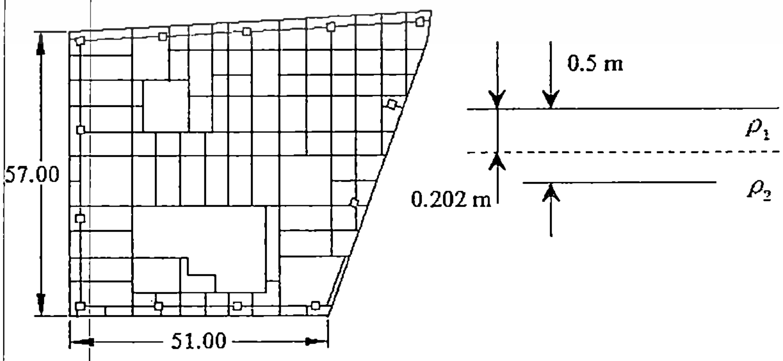
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบกราวด์กริดสถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ มีการจัดวางรูปแบบดังรูปที่ 3.9 โดยเส้นประหมายถึงขอบเขตระหว่างดินชั้นบนและดินชั้นล่าง มีพื้นที่เท่ากับ 3,632 ตารางเมตรและมีความยาวตัวนำรวมทั้งหมด 1,491.5 เมตร



Layer Number	<--- LAYER CHARACTERISTICS ---> Resistivity (ohm-m)	Thickness (Meters)	Reflection Coefficient (p.u.)	Resistivity Contrast Ratio
1	infinite	infinite	0.0	1.0
2	0.5086559	0.2017310	-1.0000	0.50866E-20
3	0.5950858	infinite	0.78306E-01	1.1699

รูปที่ 3.8 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP



รูปที่ 3.9 กราวด์กริดสถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ห้ามมิให้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดแท่งกราวด์รอดที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ มีความยาวเท่ากับ 3 เมตร จำนวน 35 แท่ง แต่ละแท่งมีรัศมีเท่ากับ 0.00794 เมตร การจัดวางเป็นแนวตั้งและมีตำแหน่งอยู่บริเวณเนื้อดินชั้นล่าง ดังนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานแท่งกราวด์รอดจากสมการที่ (3.8) ได้เท่ากับ 0.00575 โอห์ม

เนื่องจากค่า $\rho_1 < \rho_2$ คำนวณค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏโดยใช้สมการที่ (3.3) ได้เท่ากับ 0.509 และคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการของ Sverak มีค่าเท่ากับ 0.00405 โอห์ม ดังนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานรวมหรือความต้านทานระบบต่อลงดินได้โดยใช้สมการที่ (3.19) เท่ากับ 0.00366 โอห์ม

```
CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE
===============================

Original Electrical Current Flowing In Electrode..:   31500.     amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)..:   1.0000
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode..:   31500.     amperes
Number of Conductors in Electrode.................:   159
Resistance of Electrode System....................:  0.41414E-02 ohms


SUBDIVISION
===========
Grand Total of Conductors After Subdivision.:   681

Total Current Flowing In Main Electrode......:   31500.      amperes
Average Current Density of Conductor Segments:   18.513      amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode........:   1701.5      meters


EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS
============================

Main Electrode Potential Rise (GPR).....:   130.45     volts
(based on two representative points)
```

รูปที่ 3.10 การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT

ผลการคำนวณหาความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการของ Xiaobin โดยใช้สมการที่ (3.7) มีค่าเท่ากับ 0.00435 โอห์ม ดังนั้นหาสามารถหาค่าความต้านทานรวมหรือความต้านทานต่อลงดินได้โดยใช้สมการที่ (3.19) เท่ากับ 0.00386 โอห์ม เมื่อคำนวณหาค่าความต้านทานต่อลงดินจากการคำนวณหาความต้านทานการต่อลงดินด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล MALT มีค่าเท่ากับ 0.00414 โอห์ม

พบว่าการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยสมการของ Sverak มีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 11.53 % และการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยสมการของ Xiaobin มีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.85 % ดังนั้นการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์ด้วยสมการของ Xiaobin จะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS มากกว่า

เอกสารนี้ถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองสรุปได้คือ ค่าความคลาดเคลื่อนโดยการคำนวณด้วยสมการ Sverak ตามมาตรฐาน IEEE80-2000 มีค่ามากกว่าการคำนวณด้วยสมการของ Xiaobin ดังนั้นสมการวิธีใหม่นี้เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้คำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าระบบ 115/22 เควี ชนิดติดตั้งภายนอกได้

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

กรณีที่	สถานีไฟฟ้า	ตัวแปร	CDEGS Two Layers	Two Layers	
				Sverak IEEE80-2000	Xiaobin
1	ดอยสะเก็ด	R_T(Ohm)	0.4010	0.5056	0.4462
		Error (%)	-	26.09	11.26
2	นางรอง (ชั่วคราว)	R_T(Ohm)	0.3631	0.2724	0.3671
		Error (%)	-	24.99	1.11
3	วัดโบสถ์	R_T (Ohm)	0.00414	0.00366	0.00386
		Error (%)	-	11.53	6.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย

4.1 วัตถุประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้มนุษย์ที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยได้รับอันตรายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเมื่อมีกระแสปริมาณสูงไหลลงสู่ดินซึ่งทำให้เกิดเกรเดียนต์ของแรงดันไฟฟ้าที่สูง นอกจากนี้จะเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าให้สามารถไหลลงดินได้สะดวก ทั้งในภาวะที่เกิดกระแสผิดพร่องปริมาณสูง หรือการลัดวงจรลงดินในระบบให้สามารถไหลลงดินได้โดยไม่สร้างผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยปกติกระแสผิดพร่องลงดินจะมีค่าสูง ในการออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงนิยมทำเป็นแบบตาข่าย เพื่อให้กระแสผิดพร่องลงดินไหลผ่านได้อย่างรวดเร็วและมีค่าความต้านทานที่ต่ำ

4.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย จะยึดตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 และมีหลักการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งแสดงได้ดังแผนภาพตามรูปที่ 4.1 ส่วนขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

คือการหาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณในขั้นตอนอื่นๆต่อไป เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่จะมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งโดยมากสามารถหาข้อมูลได้จากแบบก่อสร้างของสถานีไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ

การหาขนาดสายตัวนำจะใช้กระแสลัดวงจรลงดินสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นและใช้ช่วงเวลาการตัดกระแสที่เป็นช่วงเวลาสูงสุด การหาขนาดสายตัวนำได้แสดงไว้ในบทที่ 2

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

เป็นขั้นตอนคำนวณเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ของระบบต่อลงดินในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่จะทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำ รวมทั้งลักษณะรูปทรงของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

เพื่อใช้ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่คำนวณได้ไปคำนวณในขั้นตอนอื่นๆต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

ในการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงประเภทการลัดวงจรที่ทำให้กระแสลัดวงจรลงดินสูงสุด ตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร Decrement factor และการขยายระบบในอนาคต

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

ถ้า $GPR<E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $GPR>E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องคำนึงถึงลักษณะรูปร่างของกราวด์กริด หรือของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ถ้า $E_m<E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 10

ถ้า $E_m>E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ถ้า $E_s<E_{step}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $E_s>E_{step}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 ปรับปรุงการออกแบบ

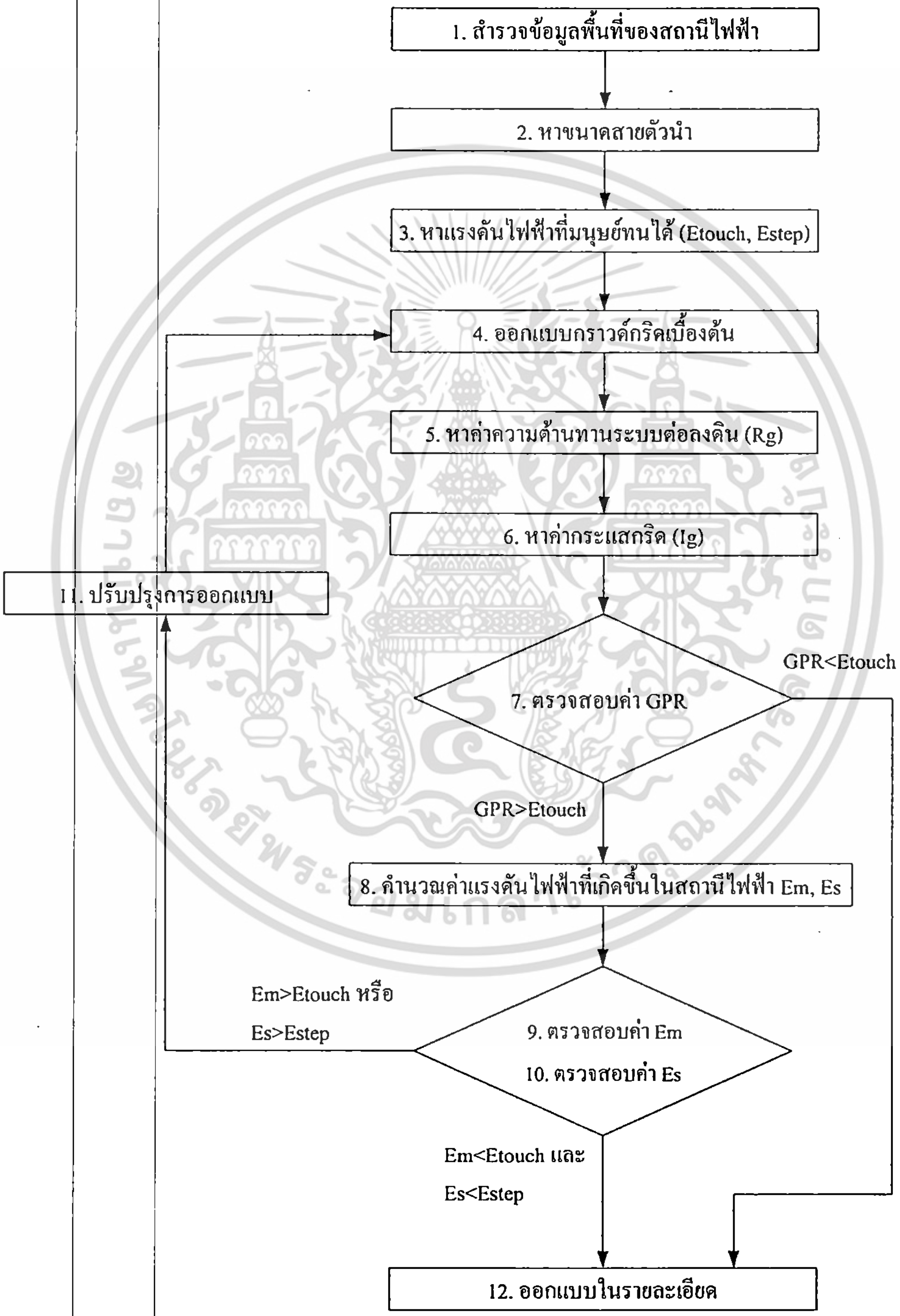
เมื่อมาถึงขั้นตอนที่ 11 ได้แสดงว่าผู้ออกแบบยังออกแบบระบบต่อลงดินที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ลดระยะห่างของกราวด์กริด ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำด้วย
2. เพิ่มกราวด์รอด เพื่อเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำ
3. ลดกระแสลัดวงจร เพื่อลดกระแสกริด
4. ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสลัดวงจร เพื่อให้มนุษย์ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น
5. ใช้วัสดุปูผิวดินที่มีค่าความต้านจำเพาะมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด

กล่าวคือการออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่า การออกแบบระบบต่อลงดินที่ได้ดำเนินการมานั้นปลอดภัย จากนี้จะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือกราวด์กริด การเชื่อมต่อตัวนำเข้าไปยังตู้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือลานไกไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดินซึ่งต้องควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบในด้านการคำนวณนั้นมีสัญลักษณ์ตัวแปรหลายตัวมากที่เกี่ยวกับการคำนวณที่ผู้ออกแบบจำเป็นจะต้องทราบและมีความเข้าใจ สามารถแยกแยะได้ว่าตัวแปรสัญลักษณ์ต่างๆ คืออะไร เพื่อง่ายต่อความเข้าใจและคำนวณ ซึ่งตัวแปรต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.1 [1, 16]

ตารางที่ 4.1 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน

สัญลักษณ์	ความหมายภาษาอังกฤษ	คำอธิบายภาษาไทย	หน่วย
ρ	Soil resistivity	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	Ω-m
ρ_1 , ρ_2	Soil resistivity	ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 1 และ 2	Ω-m
ρ_s	Surface layer resistivity	ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวดินชั้นบน	Ω-m
$3I_0$	Symmetrical current in substation for conductor sizing	กระแสไฟฟ้าผิดพร่องที่ไหลในแท่งตัวนำไฟฟ้า	A
A	Total area enclosed by ground grid	พื้นที่ของระบบต่อลงดิน	m^2
C_s	Surface layer derating factor	แฟคเตอร์ปรับลดลงของวัสดุที่ใช้โรยผิวดินชั้นบนสุด	-
d	Diameter of grid conductor	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้าที่นำมาใช้ระบบต่อลงดิน	m
D	Spacing between parallel conductors	ระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่นำมาวางขนานกัน	m
D_f	Decrement factor for determining I_G	แฟคเตอร์ปรับเพิ่มสำหรับกระแสไฟฟ้ากริดสูงสุด I_G	-
D_m	Maximum distance between any two points on the grid	ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดภายในกริกที่มีค่ามากที่สุด	m
E_m	Mesh voltage at the center of the corner mesh for this simplified method	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างตะแกรงของเมชกริด 1ช่องตะแกรง พิจารณาที่จุดศูนย์กลางของตะแกรง	V
E_s	Step voltage between a point above the out corner of the grid and a point m diagonally outside the grid for the simplified method	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ตกคร่อมระหว่างเท้าทั้งสองข้าง เมื่อเท้าแยกออกจากกันเป็นระยะห่าง 1 เมตร	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมายภาษาอังกฤษ	คำอธิบายภาษาไทย	หน่วย
$E_{step50,70}$	Tolerable step voltage for human with 50 , 70 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์พอทนได้ โดยพิจารณาน้ำหนักร่างกายที่ 50,70 กิโลกรัม	V
$E_{touch50,70}$	Tolerable touch voltage for human with 50 , 70 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์พอทนได้ โดยพิจารณาน้ำหนักร่างกายที่ 50,70 กิโลกรัม	V
h	Depth of ground grid conductors	ความลึกของกริดที่ฝังลงดิน เริ่มวัดจากรอยต่อของดินชั้นที่ ρ_s ลงสู่ดินชั้นล่าง	m
h_s	Surface layer thickness	ความหนาของวัสดุที่นำมาโรยผิวดินชั้นบน	m
I_G	Maximum grid current that flows between ground grid and surrounding earth (include dc offset)	กระแสที่ไหลผ่านกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งของกระแสลัดวงจรลงดินหรืออาจจะมีขนาดเท่ากับกระแสลัดวงจรลงดิน	A
I_g	Symmetrical grid current	กระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกในดิน	A
K	Reflection factor between different resistivities	แฟคเตอร์การสะท้อน เนื่องจากค่าความต้านทานของดิน 2 ชั้นที่มีค่าต่างกัน	-
K_h	Corrective weighting factor that emphasizes the effect of grid depth simplified method	แฟคเตอร์น้ำหนักที่ถูกต้อง เป็นผลกระทบความลึกของตะแกรงต่อลงดิน	-
L_c	Total length of grid conductor, m	ความยาวทั้งหมดของตัวนำกริด	m
L_M	Effective length of $L_C + L_R$ for mesh voltage, m	ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งรอด สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชโวลท์เตจ	m
L_R	Total length of ground rods	ความยาวทั้งหมดของกราวด์รอด	m
L_r	Length of ground rod at each location	ความยาวของกราวด์รอดแต่ละแท่ง	m
L_S	Effective length of $L_c + L_R$ for step voltage	ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งรอด สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวโวลท์เตจ	m
L_T	Total effective length of grounding system conductor, including grid and ground rods, m	ค่าความยาวของตัวทั้งหมดที่ใช้ในระบบต่อลงดิน	m
L_x	Maximum length of grid conductor in x direction	ตัวนำในแกน x ที่มีความยาวมากที่สุด	m
L_y	Maximum length of grid conductors in y direction	ตัวนำในแกน y ที่มีความยาวมากที่สุด	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมายภาษาอังกฤษ	คำอธิบายภาษาไทย	หน่วย
n	Geometric factor composed of factors n_a, n_b, n_c, and n_d	จำนวนของตัวนำที่วางขนานกันอยู่ภายในดิน จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของตะแกรงต่อลงดิน	-
n_R	Number of rods placed in area A	จำนวนแท่งกราวด์รอดทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่	-
R_g	Resistance of grounding system	ความต้านทานของระบบต่อลงดิน	Ω
S_f	Fault current division factor (split factor)	แฟคเตอร์การแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ผิดพร่อง	-
t_c	Duration of fault current for sizing ground conductor	ระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าผิดพร่องที่ไหลผ่านแท่งตัวนำไฟฟ้า	s
t_f	Duration of fault current for determining decrement factor	ระยะเวลากระแสไฟฟ้าผิดพร่องสำหรับการหาแฟคเตอร์การลดลง	s
t_s	Duration of shock for determining allowable body current	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าผิดพร่องไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มีได้	s

4.4 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดิน

ตัวอย่างการคำนวณจะแสดงการคำนวณ ประยุกต์ใช้สมการ ตารางและกราฟ สำหรับตัวอย่างการคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดินมีวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้สมการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การออกแบบที่ปลอดภัย
2. เพื่อแสดงให้เห็นสิ่งที่แตกต่างระหว่างผลลัพธ์ซึ่งนำมาใช้แก้ปัญหาการออกแบบ
3. เพื่อแสดงให้เห็นเงื่อนไขของการออกแบบ

สำหรับตัวอย่างการคำนวณ จะใช้ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อนำไปใช้ออกแบบ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับตัวอย่างการคำนวณ

ปัจจัย	ค่าคงที่และประเภท	หน่วย
Fault duration, t_f	= 0.5	s
Positive sequence equivalent system impedance, Z_1 (115 kV side)	= 4.0 + j10.0	Ω
Zero sequence equivalent system impedance, Z_0 (115 kV side)	= 10.0 + j40.0	Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

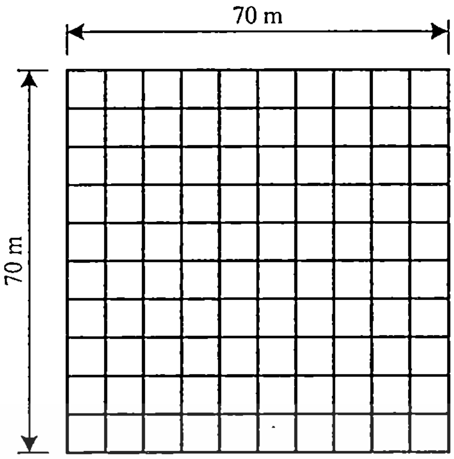
	ปัจจัย	ค่าคงที่และประเภท	หน่วย
Current division factor, S_f	= 0.6	s
Line-to-line Voltage at worst-fault location	= 115,000	V
Soil resistivity, ρ (Uniform Soil)	= 400	Ω-m
Soil resistivity, ρ_1 ρ_2 (Two-layers Soil)	= 300, 100	Ω-m
Crushed rock resistivity(wet), ρ_s	= 2,500	Ω-m
Thickness of crushed rock surfacing, h_s	= 0.102	m
Thickness of top layer, h	= 2	m
Depth of grid burial, h_b	= 0.5	m
Transformer impedance, (Z_1 and Z_0);(13kV) (Z=9% at 15 MVA, 115/13kV)	= 0.0034+j1.014	Ω
Grid conductor	Copper-clad steel wire 30%	-
Grid shape	Square grid	-

ตัวอย่างที่จะยกต่อไปนี้มีข้อตกลงในเบื้องต้นซึ่งจะต้องทำความเข้าใจต่อผู้อ่าน กล่าวคือ ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (Crushed Rock Resistivity) จะสมมติให้มีค่าความต้านทานบนพื้นฐานของการวัดตัวอย่างของหินกรวดจริง ค่าอิมพีแดนซ์ผิดพร่องสมมูล และแฟคเตอร์การแบ่งกระแส S_f ถูกกำหนดให้เป็นกรณีที่รุนแรงที่สุด ทั้งด้านของประเภทความผิดพร่องและตำแหน่งการเกิดภาวะผิดพร่อง โดยที่ตัวอย่างของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างการคำนวณสมมติให้เป็นสถานีไฟฟ้าแบบล้าสมัยที่มีมากกว่า 25 ปี ดังนั้นจะไม่มีปัจจัยใดๆที่จะช่วยความปลอดภัยเข้าไปในระบบของสถานีไฟฟ้าย่อย เช่นไม่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อใช้ในการขจัดความผิดพร่องและไม่มีการปิดซ้ำอัตโนมัติ (Automatic Reclosing Scheme) ใดๆทั้งสิ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เกิดความผิดพร่อง t_f (Fault duration) และระยะเวลาของบุคคลที่ถูกไฟดูด t_s (Shock duration) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากัน

4.4.1 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งกราวด์รอด

ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบนี้จะกล่าวทีละขั้นตอนตามแผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งกราวด์รอด

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

แม้ว่ากราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยจะถูกสร้างในพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 63 เมตร และยาว 84 เมตร (5,292 ตารางเมตร) แต่สำหรับการเริ่มการออกแบบ จะสมมติให้พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 70 เมตร × 70 เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอดเชื่อมกับกราวด์กริด ซึ่งพื้นที่จะมีขนาด 4,900 ตารางเมตร และสมมติให้ดินมีค่าความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนและดินชั้นล่างเท่ากับ 400 โอห์ม-เมตร และ 200 โอห์ม-เมตร ตามลำดับ โดยดินชั้นบนมีความลึกเท่ากับ 2 เมตร

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ

ในกรณีนี้จะไม่คิดค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้า และ Symmetrical ground fault current, $I_f = 3I_0$ จากสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \tag{4.1}$$

สำหรับบัสแรงดันไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ แทนสมการจะได้

$$3I_0 = \frac{3(115{,}000/\sqrt{3})}{3 \cdot 0 + (4.0 + 4.0 + 10.0) + j(10.0 + 10.0 + 4.0)}$$

ดังนั้นขนาดของ $3I_0$

$$|3I_0| = 3{,}180 \text{ A และ X/R Ratio} = 3.33$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับบัสแรงดันไฟฟ้า 13 กิโลโวลต์ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ผิดพร่องสมมูลของบัส 115 กิโลโวลต์ จะถูกนำมาถ่ายโอนมายังด้านบัสแรงดัน 13 กิโลโวลต์ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าต่อแบบ Delta-Wye ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกเท่านั้นที่ถูกถ่ายโอน

$$Z_1 = \left(\frac{13}{115}\right)^2 (4.0 + j10.0) + 0.034 + j1.014 = 0.085 + j1.142$$

$$Z_0 = 0.034 + j1.014$$

$$3I_0 = \frac{3(13{,}000/\sqrt{3})}{3 \cdot 0 + (0.085 + 0.085 + 0.034) + j(1.142 + 1.142 + 1.014)}$$

ดังนั้นขนาดของ $3I_0$

$|3I_0|$ = 6,814 A และ X/R Ratio = 16.2

ค่า 6,814 แอมแปร์ ของบัสแรงดันไฟฟ้า 13 กิโลโวลต์ จะถูกนำมาใช้สำหรับหาขนาดของสายตัวนำจากสูตรหาขนาดสายตัวนำ

$$A_{mm} = I \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{T_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (4.2)$$

$$A_{mm} = 6.814 \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3.85 \times 10^{-4}}{0.05 \times 0.00378 \times 5.862}\right) \ln\left(\frac{245 + 700}{245 + 40}\right)}} = 33.4 \text{ mm}^2$$

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

ความหนาของหินกรวดโรยผิวดิน h_s = 0.102 m (1 in)

ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดโรยผิวดิน ρ_s = 3,000 Ω-m

ความต้านทานจำเพาะของดิน ρ = 400 Ω-m

แฟคเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างระหว่างชั้นหินกรวดกับชั้นดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะกระจายสม่ำเสมอ ค่า K คำนวณจากสมการที่ (4.3) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \tag{4.3}$$

$$K = \frac{400 - 2{,}500}{400 + 2{,}500} = -\,0.72$$

ค่า C_s สามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.4) ดังนี้

$$C_s = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \tag{4.4}$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \times \left(1 - \frac{400}{2{,}500}\right)}{(2 \times 0.102) + 0.09} = 0.74$$

สมมติให้บุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยมีน้ำหนักอย่างน้อยประมาณ 70 กิโลกรัม ดังนั้นจะใช้สมการ (2.22) และ (2.24) เพื่อหาเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

$$E_{touch70} = \left(1{,}000 + 1.5\rho_s C_s\right)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{4.5}$$

$$E_{touch70} = \left(1{,}000 + (1.5 \times 2{,}500 \times 0.74)\right)\frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 832.2 \text{ V}$$

$$E_{step70} = \left(1{,}000 + 6\rho_s C_s\right)\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \tag{4.6}$$

$$E_{step70} = \left(1{,}000 + 6 \times 2500 \times 0.74)\right)\frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 2{,}686 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

สมมติให้พื้นที่เป็นกราวด์กริดที่มีระยะห่างของสายตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกันมีค่าเท่ากัน และมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 70 เมตร × 70 เมตร ดังรูปที่ 4.2 โดยที่สายตัวนำไฟฟ้ามีระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = 7 เมตร ความลึกที่ใช้ฝังกราวด์กริดจากระดับผิวดิน h = 0.5 เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอดต่อเชื่อมกราวด์กริดแต่อย่างใด และมีความยาวรวมของสายตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำกราวด์กริดรวม $L_T = 2 \times 11 \times 70 = 1{,}540$ เมตร

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

เนื่องจากกรณีนี้ไม่มีแท่งกราวด์รอดเชื่อมต่อกับกราวด์กริด ดังนั้นการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินจะเท่ากับความต้านทานกราวด์กริด

พื้นที่กราวด์กริด	A	$= 4{,}900$	m^2
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน	ρ_1	$= 400$	Ω-m
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง	ρ_2	$= 200$	Ω-m
ความลึกของดินชั้นบน	h	$= 2$	m
ความลึกของกราวด์กริด	h_b	$= 0.5$	m

ในกรณีนี้ ค่า $\rho_2 < \rho_1$ (200 < 400) และ $h > h_b$ (2 > 0.5) จึงใช้สมการที่ (3.6) ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A+4h\sqrt{\pi A}\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)} \tag{4.7}$$

$R_g = 1.462\ \Omega$

ดังนั้นค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน $R_T = 1.462\ \Omega$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

สมการหาค่า I_G จะใช้สมการ (4.9) ในการหาค่า และกำหนดให้ $D_f = 1$ และให้แฟคเตอร์การแบ่งกระแสไฟฟ้าผิดพร่อง $S_f = 0.6$

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \tag{4.8}$$

และ

$$I_G = D_f \times I_g \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่บัส 13 กิโลโวลต์ มีค่ากระแสไฟฟ้าผิดพร่องเท่ากับ 6,814 แอมแปร์ ซึ่งมีค่ามากกว่า บัส 115 กิโลโวลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,180 แอมแปร์ เนื่องจากขดลวดหม้อแปลงด้านบัส 13 กิโลโวลต์ เป็นแบบ Wye-grounded คือแหล่งจ่าย Local ของกระแสผิดพร่อง และมันจะไม่ทำให้เกิด GPR ดังนั้น กระแสกริดสูงสุดคือ

$$I_G = D_f \times S_f \times 3 \times I_0 \tag{4.10}$$

$$I_G = 1 \times 0.6 \times 3 \times 3{,}180 = 1{,}908 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

ตอนนี้ไม่จำเป็นที่ต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ I_G และ R_G ต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \times R_G \tag{4.11}$$

$$GPR = 1{,}908 \times 1.462 = 2{,}790 \text{ V},$$

ทำการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า GPR = 2,790 โวลต์ มีค่ามากกว่า E_{touch} = 838.2 โวลต์ มากกว่า ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึงค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า E_{touch} จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

โดยทำการคำนวณดังนี้

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\left[\ln\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d}\right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln\left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)}\right]\right] \tag{4.12}$$

โดยที่

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \tag{4.13}$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times 11)^{2/11}} = 0.57$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$K_h = \sqrt{1+\frac{h}{h_0}} \tag{4.14}$$

$$K_h = \sqrt{1+\frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

แทนค่า K_m

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\left[\ln\frac{7^2}{16\times0.5\times0.01}+\frac{(7+(2\times0.5))^2}{8\times7\times0.01}-\frac{0.5}{4\times0.01}\right]+\frac{0.57}{1.225}\cdot\ln\left[\frac{8}{\pi((2\times11)-1)}\right]\right]$$

$K_m = 0.89$

แฟคเตอร์ K_i จะใช้สมการที่ (4.15) มาคำนวณ ดังนี้

$$K_i = 0.644+0.148\cdot n \tag{4.15}$$

เมื่อ $$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \tag{4.16}$$

$$n_a = \frac{2\cdot L_c}{L_p} \tag{4.17}$$

$$n_a = \frac{2\times1,540}{280} = 11$$

$n_b = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_c = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_d = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ดังนั้น

$$n = 11\times1\times1\times1 = 11$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น ค่า K_i มีค่าเป็น

$$K_i = 0.644 + (0.148 \times 11) = 2.272$$

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ E_m ดังนั้น E_m จะมีค่าเป็น

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m} \qquad (4.18)$$

$$E_m = \frac{400 \times 0.89 \times 2.272 \times 1{,}908}{1{,}540} = 1{,}002.1 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

จากการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) พบว่ามีค่ามากกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ (E_{touch}) (1,002.1 V > 832.2 V) ดังนั้นกราวด์กริดที่ออกแบบนี้ยังไม่ปลอดภัย และกราวด์กริดจะต้องออกแบบใหม่เพื่อให้มีความปลอดภัยมากขึ้น จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนที่ 1 เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยอีกครั้ง

4.4.2 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีแท่งกราวด์รอด

จากตัวอย่างที่ผ่านมาจะเห็นว่าขั้นตอนที่ 10 ไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวยังไม่ผ่าน โดยทั่วไปแล้วการปรับเปลี่ยนในส่วนประกอบโครงสร้างของกราวด์กริดให้สามารถผ่านเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ มีข้อสำคัญ 2 ข้อคือ

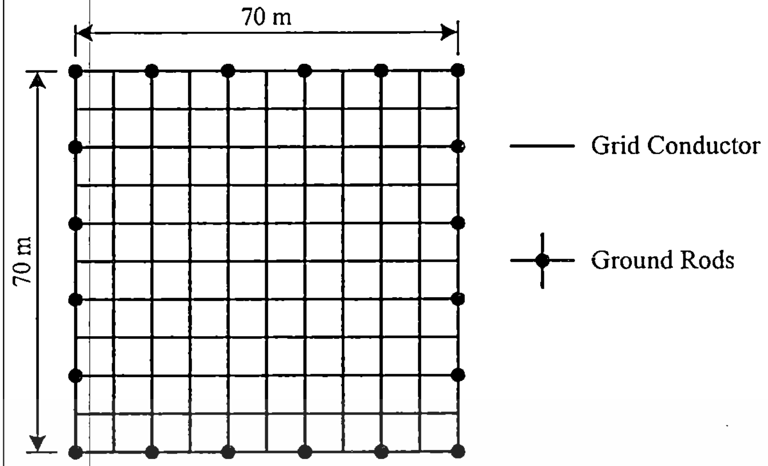
1. ลดค่า GPR ให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ หรือค่าแรงดันไฟฟ้าเมชที่ได้จากการคำนวณครั้งใหม่ต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

2. ลดค่ากระแสผิดพร่องที่มีอยู่ในระบบ

โดยทั่วไปการลดค่ากระแสผิดพร่องที่มีอยู่ในระบบเป็นเรื่องที่ยากมากหรืออาจเป็นไปไม่ได้เลยในทางปฏิบัติ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและตำแหน่งกราวด์กริดจะสามารถทำได้ง่ายกว่า ซึ่งการปรับเปลี่ยนโครงสร้างกราวด์กริดนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น ลดระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกัน (Grid Conductor Spacing) ฝังกราวด์กริดให้ลึกมากขึ้น (Grid Depth) เพิ่มแท่งกราวด์รอด (Ground Rod) กับกราวด์กริด

ในตัวอย่างนี้จะใช้กราวด์กริดที่มีลักษณะเหมือนกับตัวอย่างที่ผ่านมา แต่จะเพิ่มแท่งกราวด์รอดโดยเชื่อมกับกราวด์กริดทั้งสี่ด้านดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีแท่งกราวด์รอดยาว 7.5 เมตร มีรัศมี 0.005 เมตร จำนวน 20 แท่ง เชื่อมต่ออยู่ด้วย

ในการคำนวณออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้จะเริ่มที่ขั้นตอนที่ 5 เนื่องจากขั้นตอนที่ 1-4 ได้อธิบายไปแล้วในตัวอย่างที่ผ่านมา ดังนั้นจะนำค่าที่ได้มาใช้เลย

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

พื้นที่กราวด์กริด	$A = 4{,}900$	m^2
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน	$\rho_1 = 400$	Ω-m
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง	$\rho_2 = 200$	Ω-m
ความลึกของดินชั้นบน	$h = 2$	m
ความลึกของกราวด์กริด	$h_b = 0.5$	m

ในกรณีนี้ ค่า $\rho_2 < \rho_1$ (200 < 400) และ $h > h_b$ (2 > 0.5) จึงใช้สมการที่ (3.6) ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A+4h\sqrt{\pi A}\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

$R_g = 1.46\ \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้สมการที่ (3.8) ในการหาค่าความต้านทานกราวด์รอด

แท่งกราวด์รอดยาว $L = 7.5\ m$

มีรัศมี $a = 0.005\ m$

จำนวนกราวด์รอด $n = 20$ แท่ง

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}}$$

เมื่อ R_a และ R_b คำนวณได้เท่ากับ 2.8 โอห์ม และ 21.8 โอห์ม ตามลำดับ

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{2.8} + \frac{1}{21.8}} = 2.49\ \Omega$$

ดังนั้นหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินจากสมการที่ (3.19) โดยคำนวณดังนี้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_t}\right)^3}}$$

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{1.46}\right)^3 + \left(\frac{1}{2.49}\right)^3}}$$

$$R_T = 1.375\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

$$I_G = D_f \times S_f \times 3 \times I_0$$

$$I_G = 1 \times 0.6 \times 3 \times 3{,}180$$

$$I_G = 1{,}908\ A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

ตอนนี้ไม่จำเป็นที่ต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ I_G และ R_G ต่อแรงดันสัมผัสไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \times R_G$$

$$GPR = 1{,}908 \times 1.375 = 2{,}624 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า GPR = 2,624 โวลต์ มีค่ามากกว่า E_{touch} = 838.2 โวลต์ มากกว่า ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึงค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า E_{touch} จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

โดยทำการคำนวณดังนี้

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

เนื่องจากกราวด์กริดมีแท่งกราวด์รอดเชื่อมต่ออยู่ด้วย ดังนั้น

$$K_{ii} = 1$$

และ

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

$$K_h = \sqrt{1+\frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า K_m

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\left[\ln\frac{7^2}{16\times0.5\times0.01}+\frac{(7+(2\times0.5))^2}{8\times7\times0.01}-\frac{0.5}{4\times0.01}\right]+\frac{1}{1.225}\cdot\ln\left[\frac{8}{\pi((2\times11)-1)}\right]\right]$$

$K_m = 0.77$

แฟคเตอร์ K_i จะใช้สมการที่ (4.15) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644+0.148\cdot n$$

เมื่อ $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$

$$n_a = \frac{2\cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2\times1{,}540}{280} = 11$$

$n_b = 1$ สำหรับกราวด์ริกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_c = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_d = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ดังนั้น

$n = 11\times1\times1\times1 = 11$

เพราะฉะนั้น ค่า K_i มีค่าเป็น

$K_i = 0.644 + (0.148\times11) = 2.272$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ E_m ดังนั้น E_m จะมีค่าเป็น

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

และ

$$L_m = L_C + \left[1.55 + 1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}\right)\right] \cdot L_R$$

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m = L_C + \left[1.55 + 1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}\right)\right] \cdot L_R}$$

$$E_m = \frac{400 \times 0.77 \times 2.272 \times 1{,}908}{1{,}540 + \left[1.55 + 1.22\left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}}\right)\right] \times 150} = 747.4\text{V}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า E_m กับ E_{touch} ในขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า E_m มีค่าน้อยกว่า E_{touch} (747.4 V < 838.2 V) ดังนั้นให้ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว E_s ต่อไป

การหาค่า E_s จำเป็นที่จะต้องรู้ค่า Ls Ks และ Ki เพื่อมาแทน ในสมการ E_s แต่ค่า K_i ยังคงมีค่าเท่ากับ 2.272

จากสมการที่ (2.43)

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

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7}\left(1 - 0.5^{11-2}\right)\right]$$

$$K_s = 0.406$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.44)

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R$$

แทนในสมการที่ (2.42) จะได้

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s = 0.75L_c + 0.85L_R}$$

$$E_s = \frac{400 \times 0.406 \times 2.272 \times 1{,}908}{L_s = (0.75 \times 1{,}540) + (0.85 \times 150)} = 548.9\text{V}$$

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ($E_{touch70}$) (747.4 V < 838.2 V) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ถ้าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ (E_{step70}) (548.9 V < 2,686.6 V) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 12

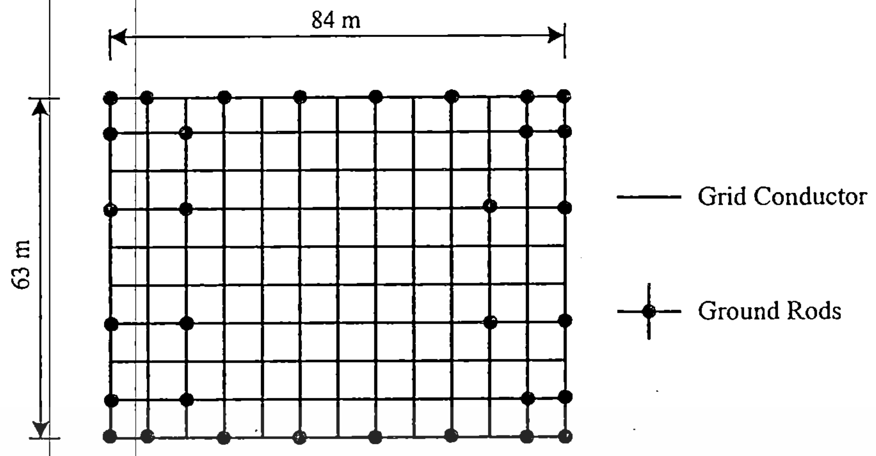
ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด

การออกแบบกราวด์กริดที่ได้ทำมานั้นมีความปลอดภัยเพียงพอต่อบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยแล้ว ดังนั้นขั้นตอนนี้จะเป็นงานลากสายดินจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในลานไกไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในตู้คอนโทรล โดยในแต่ละกลุ่มของอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจจะต่อสายดินมารวมกันไว้ที่บัสดิน (Ground Bus) แล้วจึงค่อยต่อเชื่อมไปยังกราวด์กริดที่ฝังใต้ผิวดิน ซึ่งจะต้องทำควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

4.4.3 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแท่งกราวด์รอด

กำหนดให้กราวด์กริดสำหรับตัวอย่างนี้ มีระยะห่างระหว่างสายตัวนำไฟฟ้า D = 7 เมตร มีขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็น 63 เมตร × 84 เมตร มีจำนวนสายตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน y รวม 13 เส้น มีจำนวนสายตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน x รวม 10 แท่ง เมื่อรวมความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบซึ่งถูกใช้ทำกราวด์กริดจะมีค่าเท่ากับ (13 × 63) + (10 × 84) = 1,659 เมตร และสมมติให้กราวด์กริดนี้มีการเชื่อมต่อกราวด์รอด จำนวน 38 แท่ง และมีรัศมี 0.005 เมตร โดยแต่ละแท่งยาว 10 เมตร ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีแท่งกราวด์รอดยาว 10 เมตร มีรัศมี 0.005 เมตร จำนวน 38 แท่ง เชื่อมต่ออยู่ด้วย

การคำนวณออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้จะเริ่มที่ขั้นตอนที่ 5 เนื่องจากขั้นตอนที่ 1-4 ได้อธิบายไปแล้วในตัวอย่างที่ผ่านมา ดังนั้นจะนำค่าที่ได้มาใช้เลย

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

พื้นที่กราวด์กริด	$A = 5{,}292$	m^2
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน	$\rho_1 = 400$	Ω-m
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง	$\rho_2 = 200$	Ω-m
ความลึกของดินชั้นบน	$h = 2$	m
ความลึกของกราวด์กริด	$h_b = 0.5$	m

ในกรณีนี้ ค่า $\rho_2 < \rho_1$ (200 < 400) และ $h > h_b$ (2 > 0.5) จึงใช้สมการที่ (3.6) ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A+4h\sqrt{\pi A}\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

$R_g = 1.40\ \Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้สมการที่ (3.8) ในการหาค่าความต้านทานกราวด์รอด

แท่งกราวด์รอดยาว $L = 10 \text{ m}$

มีรัศมี $a = 0.005 \text{ m}$

จำนวนกราวด์รอด $n = 38$ แท่ง

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}}$$

เมื่อ R_a และ R_b คำนวณได้เท่ากับ 1.5 โอห์ม และ 16.5 โอห์ม ตามลำดับ

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{1.5} + \frac{1}{16.5}} = 1.37\ \Omega$$

ดังนั้นหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินจากสมการที่ (3.19) โดยคำนวณดังนี้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_t}\right)^3}}$$

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{1.40}\right)^3 + \left(\frac{1}{1.37}\right)^3}}$$

$$R_T = 1.10\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

$$I_G = D_f \times S_f \times 3 \times I_0$$

$$I_G = 1 \times 0.6 \times 3 \times 3{,}180$$

$$I_G = 1{,}908 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

ตอนนี้ไม่จำเป็นที่ต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ I_G และ R_G ต่อแรงดันสัมผัสไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \times R_G$$

$$GPR = 1{,}908 \times 1.10$$

$$GPR = 2{,}099 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า GPR = 2,099 โวลต์ มีค่ามากกว่า E_{touch} = 838.2 โวลต์ มากกว่า ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึงค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า E_{touch} จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

โดยทำการคำนวณดังนี้

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

เนื่องจากกราวด์กริดมีแท่งกราวด์รอดเชื่อมต่ออยู่ด้วย ดังนั้น

$$K_{ii} = 1$$

และ

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

$$K_h = \sqrt{1+\frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า K_m

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\left[\ln\frac{7^2}{16\times0.5\times0.01}+\frac{(7+(2\times0.5))^2}{8\times7\times0.01}-\frac{0.5}{4\times0.01}\right]+\frac{1}{1.225}\cdot\ln\left[\frac{8}{\pi((2\times11)-1)}\right]\right]$$

$K_m = 0.77$

แฟคเตอร์ K_i จะใช้สมการที่ (4.15) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644 + 0.148\cdot n$$

เมื่อ $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$

$$n_a = \frac{2\cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2\times1{,}540}{280} = 11$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\cdot\sqrt{A}}}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{294}{4\times\sqrt{5{,}292}}} = 1.005$$

$n_c = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$n_d = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ดังนั้น

$n = 11.29\times1.005\times1\times1 = 11.35$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น ค่า K_i มีค่าเป็น

$$K_i = 0.644+(0.148\times 11.35) = 2.324$$

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ E_m ดังนั้น E_m จะมีค่าเป็น

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

และ

$$L_m = L_C + \left[1.55+1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2+L_y^2}}\right)\right]\cdot L_R$$

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m = L_C + \left[1.55+1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2+L_y^2}}\right)\right]\cdot L_R}$$

$$E_m = \frac{400\times 0.77\times 2.272\times 1{,}908}{1{,}540+\left[1.55+1.22\left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2+70^2}}\right)\right]\times 150} = 747.4\text{V}$$

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ($E_{touch70}$) (747.4 V < 838.2 V)

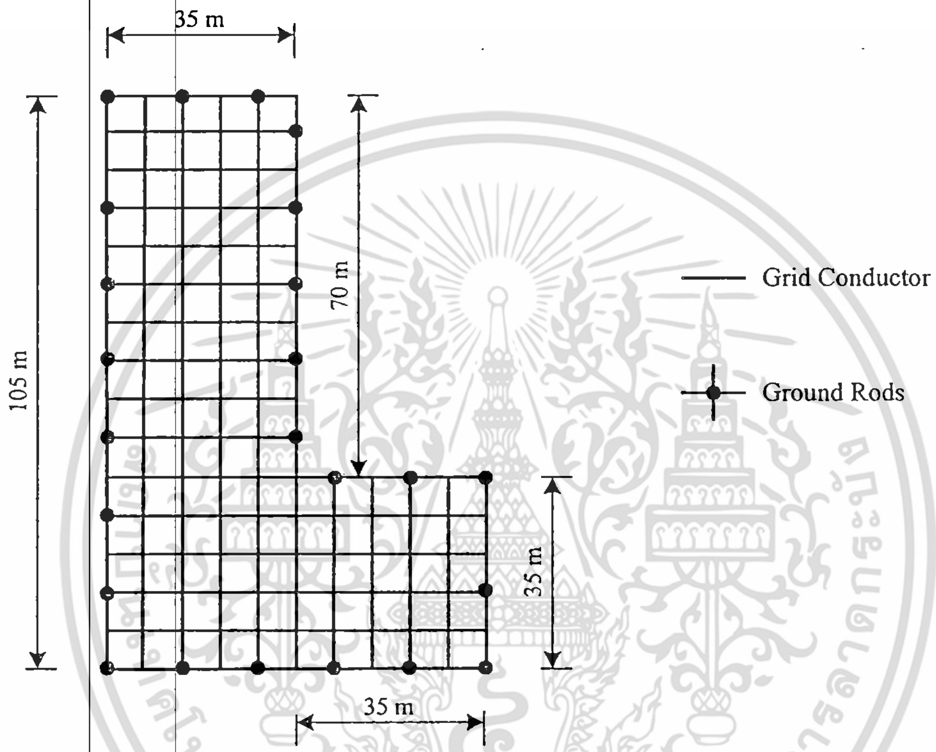
เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะพบว่า การเพิ่มกราวด์รอด ที่มีความยาวรวม L_R = 230 เมตร มาทำการเชื่อมกับกราวด์กริดและเพิ่มปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวราบที่ใช้ทำกราวด์กริดอีกรวม 119 เมตร จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชมีค่าลดลงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 4.3.2

การหาค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ไม่จำเป็นต้องหาก็ได้ เพราะโดยมากแล้วถ้าค่าของแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ผ่าน แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ก็ผ่านเหมือนกัน เพราะค่าแรงเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_{step}) สูงมาก ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่คำนวณได้จริงมักจะผ่าน ดังนั้นสิ่งที่เราจับจ้อง (Concentrate) จะอยู่ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ที่ใช้เปรียบเทียบค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ($E_{touch70}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 กราวด์กริดรูปทรงตัวแอลและมีแท่งกราวด์รอด

กำหนดให้กราวด์กริดสำหรับตัวอย่างนี้ มีระยะห่างระหว่างสายตัวนำไฟฟ้า D = 7 เมตร มีจำนวนสายตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน y จำนวนสายตัวนำไฟฟ้าในแนว x และขนาดพื้นที่กราวด์กริดเป็นดังรูปที่ 4.4 เมื่อรวมความยาวของสายตัวนำไฟฟ้าในแนวราบซึ่งถูกใช้ทำกราวด์กริดจะมีค่าเท่ากับ (35×10)+(70×6)+(35×5)+(105×6) = 1,575 เมตร และสมมติให้ กราวด์กริดนี้มีการเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดจำนวน 24 แท่ง และมีรัศมี 0.005 เมตร โดยแต่ละแท่งยาว 7.5 เมตร



รูปที่ 4.5 กราวด์กริดรูปทรงตัวแอลและมีแท่งกราวด์รอดยาว 7.5 เมตร และมีรัศมี 0.005 เมตร จำนวน 24 แท่ง เชื่อมต่ออยู่ด้วย

ในการคำนวณออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้จะเริ่มที่ขั้นตอนที่ 5 เนื่องจากขั้นตอนที่ 1-4 ได้อธิบายไปแล้วในตัวอย่างที่ผ่านมา ดังนั้นจะนำค่าที่ได้มาใช้เลย

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

พื้นที่กราวด์กริด	$A = 4{,}900$	m^2
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน	$\rho_1 = 400$	Ω-m
ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง	$\rho_2 = 200$	Ω-m
ความลึกของดินชั้นบน	$h = 2$	m
ความลึกของกราวด์กริด	$h_b = 0.5$	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้ ค่า $\rho_2 < \rho_1$ (200 < 400) และ $h > h_b$ (2 > 0.5) จึงใช้สมการที่ (3.6) ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A + 4h\sqrt{\pi A}\left(23.16\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}+31.9\right)-78\right)\times\left(1+1.95e^{-20\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}-0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

$R_g = 1.46\ \Omega$

และใช้สมการที่ (3.8) ในการหาค่าความต้านทานกราวด์รอด

แท่งกราวด์รอดยาว $L = 7.5$ m

มีรัศมี $a = 0.005$ m

จำนวนกราวด์รอด $n = 24$ แท่ง

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a}+\frac{1}{R_b}}$$

เมื่อ R_a และ R_b คำนวณได้เท่ากับ 2.48 โอห์ม และ 19.21 โอห์ม ตามลำดับ

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{2.48}+\frac{1}{19.21}} = 2.19\ \Omega$$

ดังนั้นหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินจากสมการที่ (3.19) โดยคำนวณดังนี้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g}\right)^3+\left(\frac{1}{R_t}\right)^3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{1.46}\right)^3 + \left(\frac{1}{2.19}\right)^3}} = 1.34\ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

$$I_G = D_f \times S_f \times 3 \times I_0$$

$$I_G = 1 \times 0.6 \times 3 \times 3{,}189 = 1{,}908\ \text{A}$$

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

ตอนนี้ไม่จำเป็นที่ต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ I_G และ R_G ต่อแรงดันสัมผัสไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \times R_G$$

$$GPR = 1{,}908 \times 1.34 = 2{,}557\ \text{V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่า ค่า GPR = 2,557 โวลต์ มีค่ามากกว่า E_{touch} = 838.2 โวลต์ ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึงค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า E_{touch} จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

โดยทำการคำนวณดังนี้

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

เนื่องจากกราวด์กริดมีแท่งกราวด์รอดเชื่อมต่ออยู่ด้วย ดังนั้น

$$K_{ii} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

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

$$K_h = \sqrt{1+\frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

แทนค่า K_m

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\left[\ln\frac{7^2}{16\times0.5\times0.01}+\frac{(7+(2\times0.5))^2}{8\times7\times0.01}-\frac{0.5}{4\times0.01}\right]+\frac{1}{1.225}\cdot\ln\left[\frac{8}{\pi((2\div11)-1)}\right]\right]$$

$K_m = 0.77$

แฟคเตอร์ K_i จะใช้สมการที่ (4.15) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644+0.148\cdot n$$

เมื่อ $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$

$$n_a = \frac{2\cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2\times1,575}{350} = 9$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\cdot\sqrt{A}}}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{350}{4\times\sqrt{4,900}}} = 1.12$$

$$n_c = \left(\frac{L_x L_y}{A}\right)^{\frac{0.7A}{L_x L_y}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_c = \left(\frac{70\times105}{4,900}\right)^{\frac{0.7\times4,900}{70\times105}} = 1.21$$

$n_d = 1$ สำหรับกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ดังนั้น

$$n = 9\times1.12\times1.21\times1 = 12.2$$

เพราะฉะนั้น ค่า K_i มีค่าเป็น

$$Ki = 0.644\times(0.148\times12.2)$$

$$Ki = 2.45$$

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ E_m ดังนั้น E_m จะมีค่าเป็น

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

และ

$$L_m = L_C + \left[1.55+1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2+L_y^2}}\right)\right]\cdot L_R$$

$$E_m = \frac{\rho\cdot K_m\cdot K_i\cdot I_G}{L_m = L_C + \left[1.55+1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2+L_y^2}}\right)\right]\cdot L_R}$$

$$E_m = \frac{400\times0.76\times2.45\times1,908}{1,540+\left[1.55+1.22\left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2+105^2}}\right)\right]\times180} = 761.1V$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า E_m กับ E_{touch} ในขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า E_m มีค่าน้อยกว่า E_{touch} (761.1 V < 838.2 V) ดังนั้นให้ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว E_s ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า E_s จำเป็นที่จะต้องรู้ค่า Ls Ks และ Ki เพื่อมาแทน ในสมการ E_s แต่ค่า K_i ยังคงมีค่าเท่ากับ 2.272

จากสมการที่ (2.43)

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

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2\times 0.5} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7}\left(1-0.5^{12.2-2}\right)\right] = 0.41$$

จากสมการที่ (2.44)

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R$$

แทนในสมการที่ (2.42) จะได้

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s = 0.75L_c + 0.85L_R}$$

$$E_s = \frac{400\times 0.41\times 2.245\times 1{,}908}{L_s = (0.75\times 1{,}575) + (0.85\times 180)} = 574.6V$$

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ($E_{touch70}$) (747.4 V < 838.2 V) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ถ้าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ (E_{step70}) (548.9 V < 2,686.6 V) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 12

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด

การออกแบบกราวด์กริดที่ได้ทำมานั้นมีความปลอดภัยเพียงพอต่อบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยแล้ว ดังนั้นขั้นตอนนี้จะเป็นงานลากสายดินจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในลานไกไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในตู้คอนโทรล โดยในแต่ละกลุ่มของอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจจะต่อสายดินมารวมกันไว้ที่บัสดิน (Ground Bus) แล้วจึงค่อยต่อเชื่อมไปยังกราวด์กริดที่ฝังใต้ผิวดิน ซึ่งจะต้องทำควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

4.5 โปรแกรม Visual Basic [8, 10, 11, 13]

Visual Basic เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ (Programming Language) ที่พัฒนาโดยบริษัทไมโครซอฟท์ ซึ่งเป็นบริษัทที่สร้างระบบปฏิบัติการ Windows ที่เราใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยตัวภาษาเองมีรากฐานมาจากภาษา Basic ซึ่งย่อมาจาก Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code ถ้าแปลให้ได้ความหมายก็คือ "ชุดคำสั่งหรือภาษาคอมพิวเตอร์สำหรับผู้เริ่มต้น" ภาษา Basic มีจุดเด่นคือผู้ที่ไม่มีพื้นฐานเรื่องการเขียนโปรแกรมเลยก็สามารถเรียนรู้และนำไปใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการเรียนภาษาคอมพิวเตอร์อื่นๆ เช่น ภาษซี (C), ปาสคาล (Pascal), ฟอร์แทน (Fortan) หรือ แอสแซมบลี (Assembler)

4.5.1 ภาพรวมของ Visual Basic

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

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

4.5.2 หลักการโปรแกรมเชิงภาพของ Visual Basic

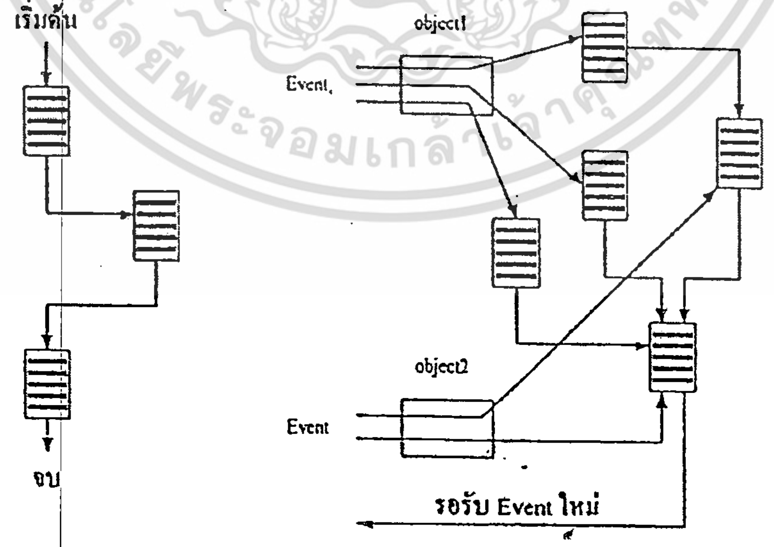
สำหรับ Visual Basic การพัฒนาและเขียนโปรแกรมจะเป็นไปในรูปแบบหนึ่งซึ่งแตกต่างจากการเขียนโปรแกรมแบบเดิม กล่าวคือ ต้องออกแบบหน้าจอ ระบุตำแหน่งการแสดงผล คิดหาขั้นตอนการทำงานและอื่นๆ จากนั้นจึงทำการเขียนโปรแกรม โปรแกรมที่ได้จะอธิบายภาพและการมองเห็นโดยเริ่มจากออกแบบวินโดวส์ย่อย หรือใน Visual Basic เรียกว่า ฟอร์ม โดยในฟอร์มจะประกอบด้วยสิ่งต่างๆ ที่เราจะทำงานด้วย หรือเรียกว่าเป็น Object เช่น ข้อความ ช่องรับข้อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Scrollbar หรือ ปุ่ม (Button) เมื่อกำหนดสิ่งเหล่านี้ครบถ้วนแล้วจึงระบุว่าองค์ประกอบแต่ละอย่างทำงานอย่างไร โดยเขียนโปรแกรมย่อยๆปะเข้าไปใน Object เหล่านี้ที่ต้องทำแบบนี้เพราะว่าการทำงานใน Windows เป็นแบบที่เรียกว่า Even-Driven คือ ขึ้นกับเหตุการณ์

ส่วนการเขียนโปรแกรมแบบเดิม คือ เขียนสั่งงานตามลำดับจะยุ่งยากมากหรือบางกรณีอาจทำไม่ได้เลย เพราะในขณะใดขณะหนึ่งนั้น ในระบบไม่ใช่จะมีเพียงแอพพลิเคชั่นของเราเท่านั้นที่ดำเนินการอยู่ Windows จะจัดการกับแอพพลิเคชั่นที่ทำงานในขณะนั้นทั้งหมดไปพร้อมๆกัน (เนื่องจากระบบเป็นแบบ Multitasking หรือดำเนินการหลายงานได้ในเวลาเดียวกัน) ในขณะที่ผู้ใช้อาจพิมพ์ข้อมูลเข้าไปหรืออาจใช้เมาส์เลื่อนไปคลิกตรงนั้นตรงนี้ได้โดยอิสระ ทำให้ยากที่จะเขียนโปรแกรมธรรมดาที่คอยดักเส้นทางการทำงานในการรับค่าว่าจะเกิดอะไรขึ้นตรงไหนได้ จึงต้องใช้รูปแบบการโปรแกรมในลักษณะ Even-Driven ดังกล่าว ซึ่ง Object แต่ละตัวก็จะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับมันได้หลายอย่าง ถ้าเราสนใจเฉพาะเหตุการณ์ก็สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงานให้คอยดักหรือทำงานตามเฉพาะเหตุการณ์นั้นๆ ได้ เช่น ถ้าสิ่งที่เราสนใจเป็นปุ่มควบคุม และเราต้องการให้ทำงานเมื่อ คลิก หรือดับเบิ้ลคลิก ก็ระบุว่า หากมีการคลิกที่ปุ่มควบคุมนี้ โปรแกรมจะต้องทำอย่างไร หรือถ้ามีการดับเบิ้ลคลิกจะต้องทำอย่างไร ส่วนเหตุการณ์อื่นๆ ที่ไม่ได้ระบุไว้ก็ไม่มีผลต่อ Object นั้น

ดังนั้นหลักการในการออกแบบใน Visual Basic ก็คือเริ่มจากออกแบบจอภาพและเขียนโปรแกรมแต่ละ Even ของ Object ต่างๆ ให้ทำงานตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยทุก Object จะมีคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ของตัวเอง



รูปที่ 4.6 การเขียนโปรแกรมแบบธรรมดากับแบบ Even-Driven

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ความต้องการของระบบคอมพิวเตอร์ก่อนการติดตั้งโปรแกรม

โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการระบบปฏิบัติการ Windows 95/98 หรือ Windows NT, Windows XP หรือ Windows 7 ซึ่งทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติอย่างน้อยดังนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มี CPU.486 DX/66 MHz เป็นอย่างต่ำขึ้นไปแต่ถ้าจะให้ทำงานได้ดีควรจะเป็น CPU. รุ่น Pentium ขึ้นไป
2. ไดร์ฟ CD-ROM
3. จอภาพและการ์ดจอที่สนับสนุนการทำงานของ Windows

4.5.4 ข้อดีของโปรแกรม Visual Basic

1. ง่ายต่อการเรียนรู้ เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น ทั้งในเรื่องไวยากรณ์ของภาษาเองและเครื่องมือการใช้งาน ดังชื่อที่บอกอยู่แล้วว่า basic ซึ่งเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
2. ความนิยมของตัวภาษา โดยอาจกล่าวได้ว่าภาษา basic นั้นเป็นภาษาที่คนเรียนรู้และใช้งานมากที่สุดในประวัติศาสตร์ของคอมพิวเตอร์
3. การพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพในด้านของตัวภาษาและความเร็วของการประมวลผล และในเรื่องของความสามารถใหม่ๆ เช่น การติดต่อกับระบบฐานข้อมูล การเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายอินเตอร์เน็ต
4. ผู้พัฒนาสำคัญของ Visual Basic คือบริษัทไมโครซอฟท์ซึ่งจัดว่าเป็นยักษ์ใหญ่ของวงการคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน เราจึงสามารถมั่นใจได้ว่า Visual basic จะยังมีการพัฒนาปรับปรุงและคงอยู่ไปอีกนาน

4.6 แนะนำโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

4.6.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

ความสามารถของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้สามารถที่จะออกแบบระบบต่อลงดินดังลักษณะต่อไปนี้

1. โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสามารถออกแบบพื้นที่ที่มีลักษณะต่างๆกันได้ 3 ประเภท คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า และพื้นที่รูปตัวแอล
2. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรได้
3. เรียกดูค่าคงที่ของวัสดุนำไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณได้
4. พิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล (Hard Copy) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

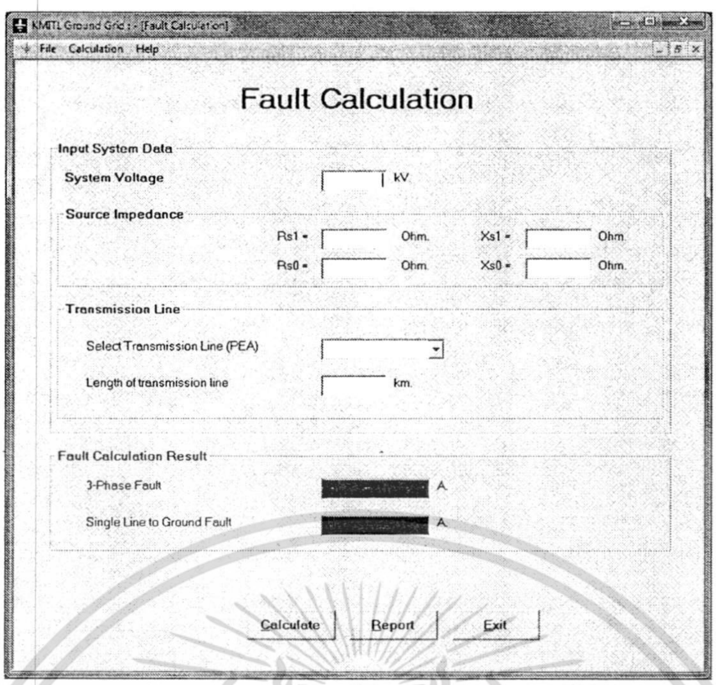
โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้ เมื่อทำการเรียกโปรแกรมจะพบวินโดว์แรกเป็นวินโดว์ต้อนรับสู่การออกแบบระบบต่อลงดินดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 วินโดว์แรกสู่การออกแบบระบบต่อลงดิน

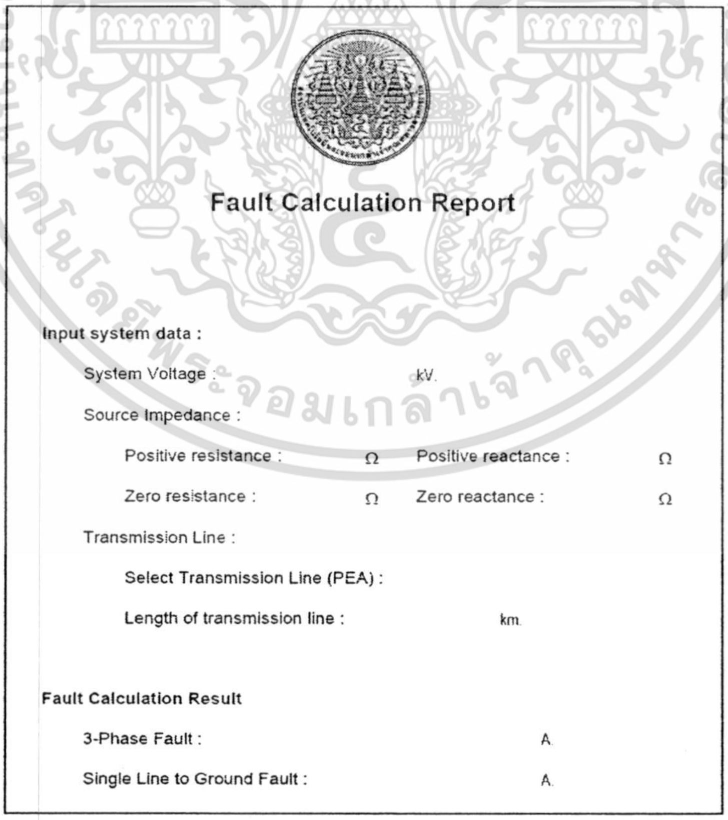
4.6.2.1 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาขนาดสายตัวนำ

1. คลิก Calculation เลือก Fault Calculation เพื่อหาขนาดของกระแสผิดพร่อง หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาขนาดกระแสผิดพร่อง แสดงดังรูปที่ 4.8 เลือก Input System Data ให้ทำการป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาขนาดของกระแสผิดพร่อง
2. ป้อนค่าแรงดันของระบบไฟฟ้าที่กำลังพิจารณา (System Voltage)
3. ป้อนค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดัน (Source Impedance)
4. เลือกชนิดสายส่ง (Select Transmission Line) ระบบการจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)
5. ป้อนค่าความยาวสายส่ง (Length of transmission line)
6. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงขนาดของกระแสผิดพร่องที่ได้จากการคำนวณ (Fault Calculation Result)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วินโดว์การคำนวณหาขนาดกระแสผิดพร่อง

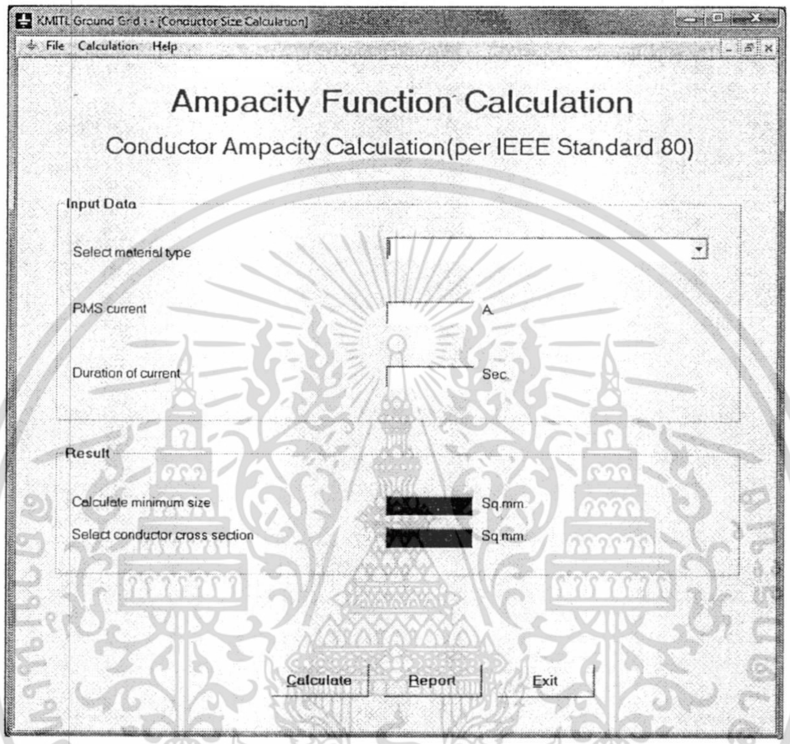


รูปที่ 4.9 วินโดว์รายงานการคำนวณหาขนาดกระแสผิดพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. คลิก Report เพื่อพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.9

8. คลิก Calculation เลือก Conductor Size Calculation เพื่อหาขนาดสายตัวนำ หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาขนาดสายตัวนำ แสดงดังรูปที่ 4.10 เลือก Input Data ให้ทำการป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาขนาดสายตัวนำ



รูปที่ 4.10 วินโดว์การคำนวณหาขนาดสายตัวนำ

9. เลือกชนิดของตัวนำที่ใช้ในการออกแบบ (Select Material Type)

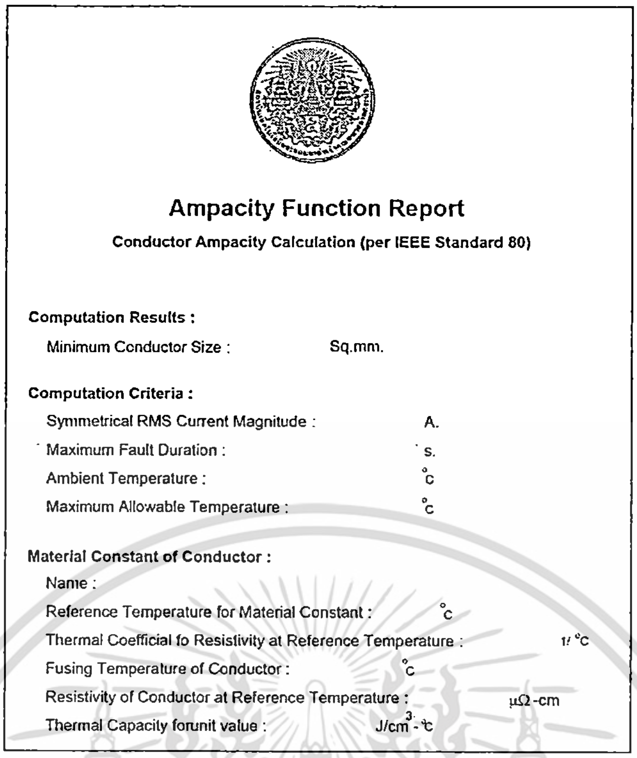
10. ป้อนค่ากระแสผิดพร่องและเวลาการเกิดความผิดพร่อง (RMS current, Duration of current)

11. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงขนาดของสายตัวนำที่ได้จากการคำนวณ (Calculate minimum size, Select conductor cross section)

12. คลิก Report เพื่อพิมพ์ผลลัพธ์ และเก็บเป็นข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.11

13. คลิก Exit เมื่อต้องการออกจากวินโดว์การคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ampacity Function Report

Conductor Ampacity Calculation (per IEEE Standard 80)

Computation Results :

Minimum Conductor Size : Sq.mm.

Computation Criteria :

Symmetrical RMS Current Magnitude : A.
Maximum Fault Duration : s.
Ambient Temperature : °c
Maximum Allowable Temperature : °c

Material Constant of Conductor :

Name :
Reference Temperature for Material Constant : °c
Thermal Coefficial fo Resistivity at Reference Temperature : 1/ °c
Fusing Temperature of Conductor : °c
Resistivity of Conductor at Reference Temperature : μΩ-cm
Thermal Capacity forunit value : J/cm³ - °c

รูปที่ 4.11 วินโดว์รายงานการคำนวณหาขนาดของสายตัวนำ

4.6.2.2 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

1. คลิก Calculation เลือก Grounding Resistance Calculation เพื่อหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน แสดงดังรูปที่ 4.12 ให้ทำการป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

2. ป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน, ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง และความลึกของดินชั้นบน (Soil Input) ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS

3. ป้อนค่าการจัดวางตำแหน่งความลึกจากผิวดินที่ฝังและขนาดพื้นที่ของกราวด์กริดที่ทำการออกแบบ (Ground grid characteristic)

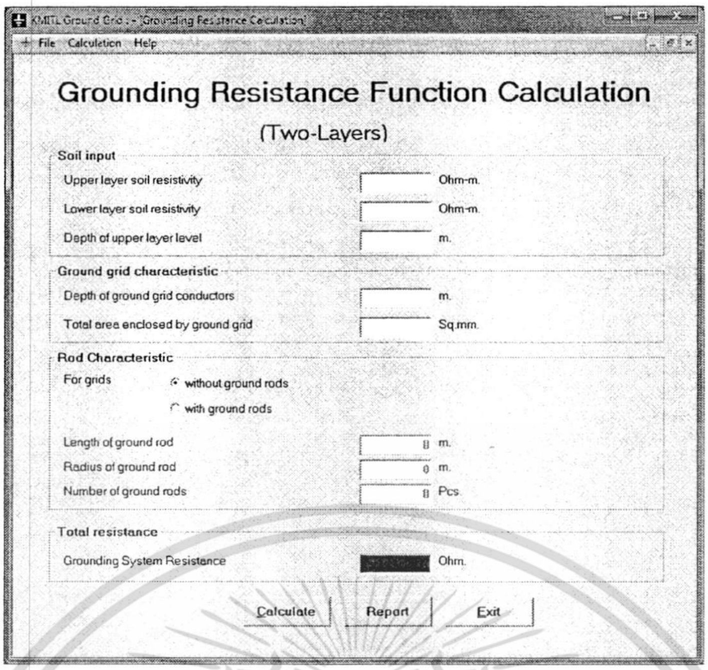
4. ป้อนค่าความยาว จำนวน และรัศมีของกราวด์รอดที่ทำการออกแบบ (Rod characteristic)

5. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่ได้จากการคำนวณ(Grounding System Resistance)

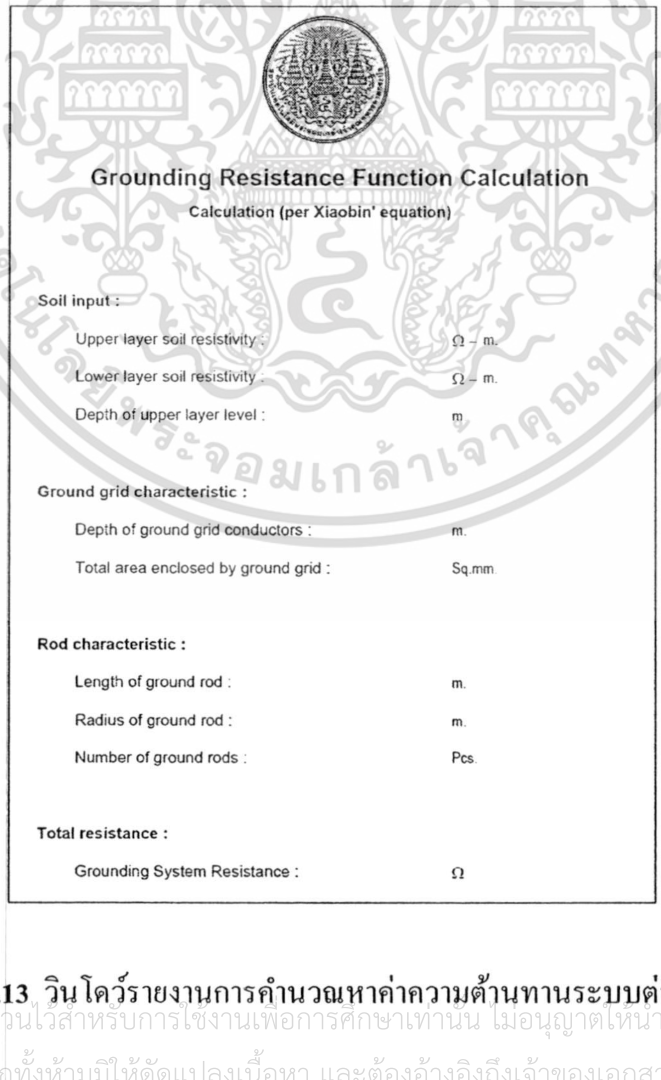
6. คลิก Report เพื่อพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.13

7. คลิก Exit เมื่อต้องการออกจากวินโดว์การคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วินโดว์การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน



รูปที่ 4.13 วินโดว์รายงานการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.3 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

1. คลิก Calculation เลือก Grid Current Calculation เพื่อหาค่ากระแสกริดสูงสุด หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาค่ากระแสกริดสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.14 ให้ทำการป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด (Input Data)

2. ป้อนค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (Single Line to Ground Fault)

3. ป้อนค่าตัวประกอบแบ่งกระแสผิดพร่อง (Fault current divisionfactor)

4. ป้อนค่าระยะเวลาการไหลของกระแสลัดวงจรลงดิน (Duration of fault current)

5. ป้อนค่าอัตราส่วน X/R (X/R ratio) และค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า (System frequency)

6. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่ากระแสกริดสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ(Max Grid Current)

7. คลิก Exit เมื่อต้องการออกจากวินโดว์การคำนวณ

รูปที่ 4.14 วินโดว์การคำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

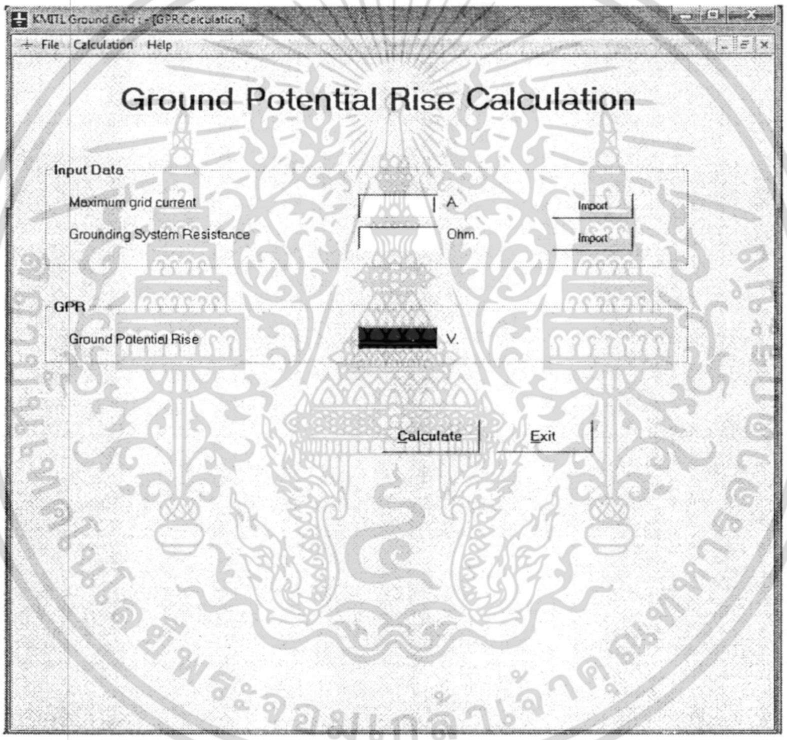
4.6.2.4 การป้อนข้อมูลและคำนวณหา GPR

1. คลิก Calculation เลือก GPR Calculation เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.15 ให้ทำการป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น (Input Data)

2. ป้อนค่ากระแสกริดสูงสุดและค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน (Maximum grid current, Grounding system calculation)

3. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ที่ได้จากการคำนวณ (GPR)

4. คลิก Exit เมื่อต้องการออกจากวินโดว์การคำนวณ

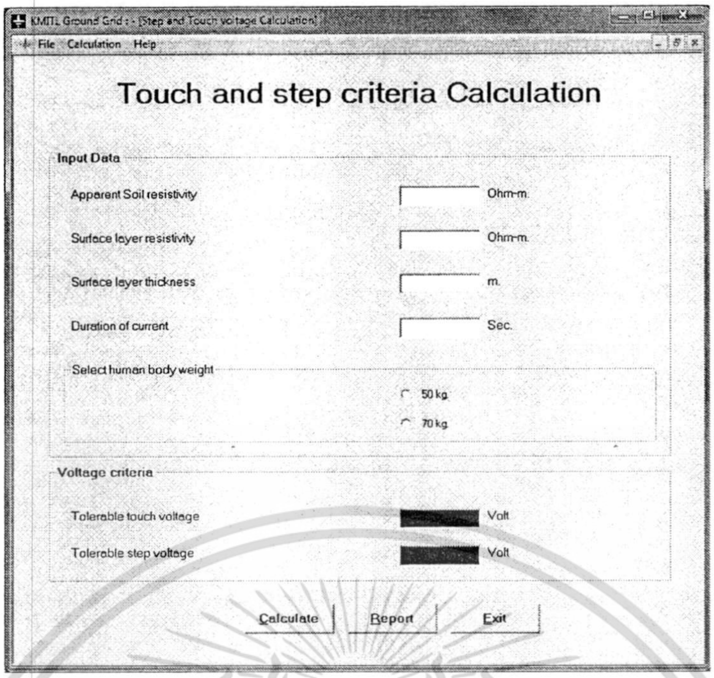


รูปที่ 4.15 วินโดว์การคำนวณหาค่า GPR

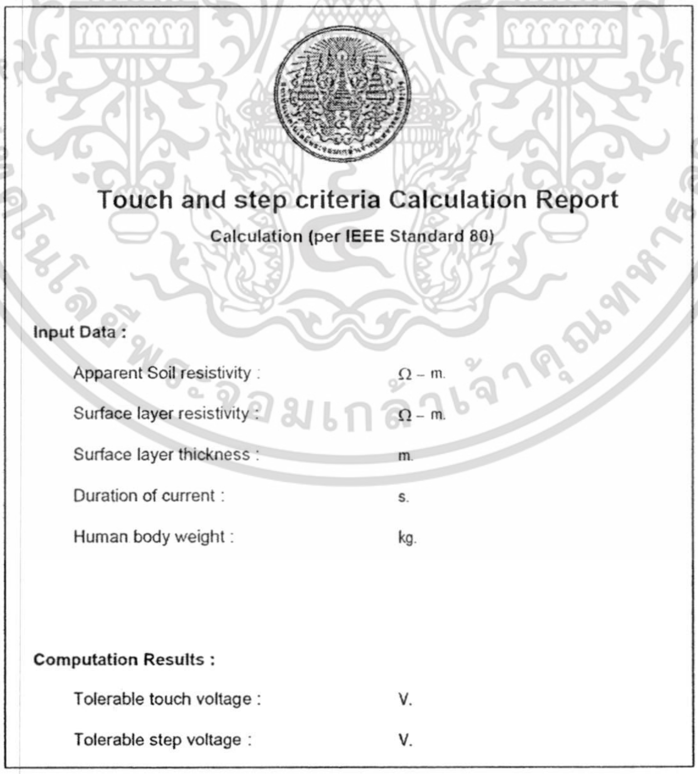
4.6.2.5 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

1. คลิก Calculation เลือก Touch and Step Voltage Calculation เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.16 ให้ทำการป้อนข้อมูล (Input Data)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 วินโดว์การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด



รูปที่ 4.17 วินโดว์รายงานการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบดินชั้นเดียว, ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน และความหนาของวัสดุปูผิวดิน

3. ป้อนค่าระยะเวลาการไหลของกระแสลัดวงจรลงดิน (Duration of fault current)

4. เลือกน้ำหนักเฉลี่ยสำหรับมนุษย์ (50 กิโลกรัม หรือ 70 กิโลกรัม)

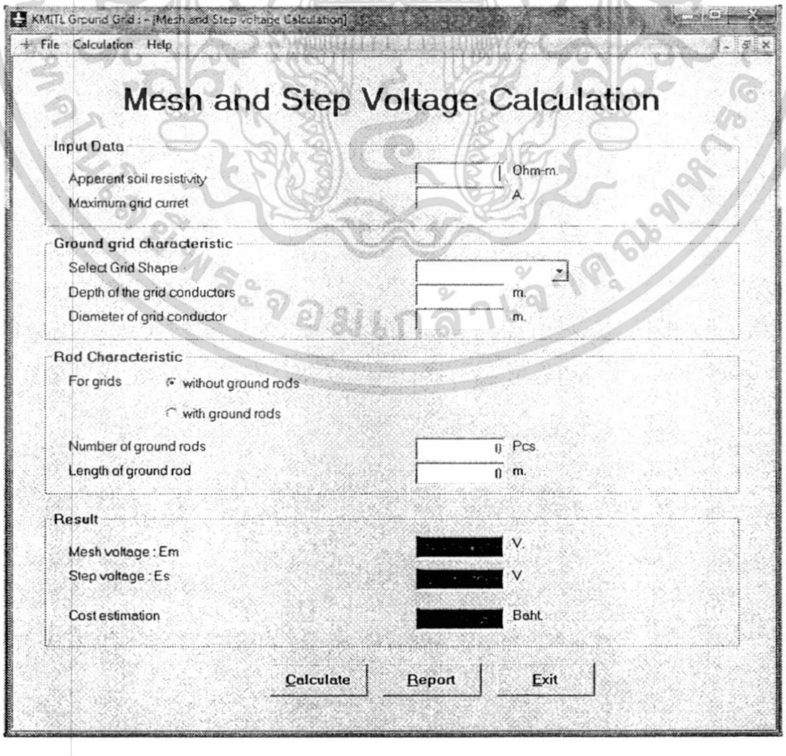
5. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด ที่ได้จากการคำนวณ (Tolerable touch voltage, Tolerable step voltage)

6. คลิก Report เพื่อพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.17

7. คลิก Exit เมื่อต้องการออกจากวินโดว์การคำนวณ

4.6.2.6 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

1. คลิก Calculation เลือก Maximum mesh and step voltage Calculation เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริงในสถานีไฟฟ้า หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว แสดงดังรูปที่ 4.18 ให้ทำการป้อนข้อมูล (Input Data)



รูปที่ 4.18 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบดินชั้นเดียวและค่ากระแสกริดสูงสุด

3. เลือกลักษณะรูปร่างกราวด์กริด (Select Grid Shaped)

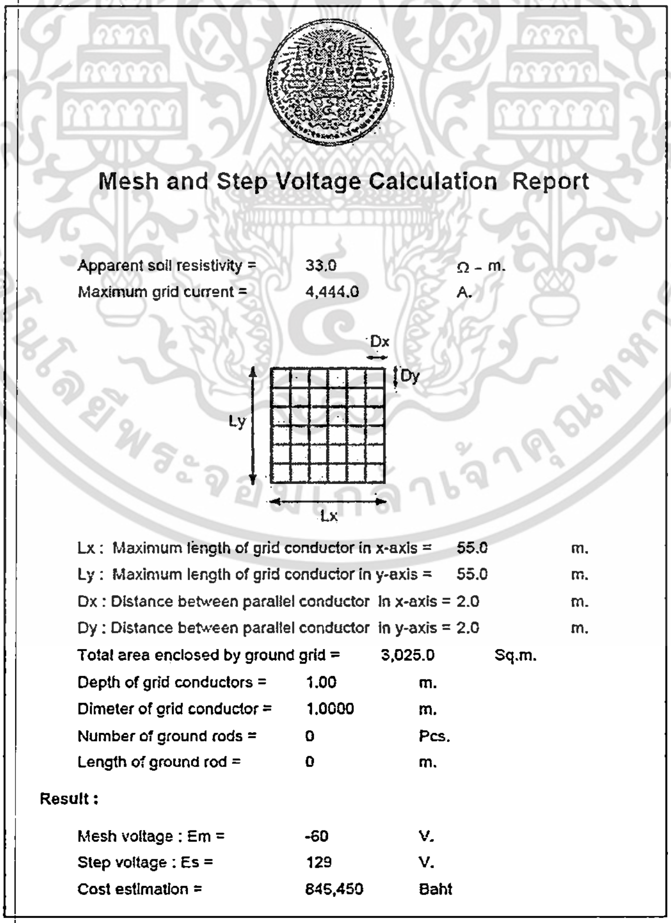
4. ป้อนค่าการจัดวางตำแหน่งความลึกจากผิวดินที่ฝังและเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำที่ทำการออกแบบ (Ground grid characteristic)

5. เลือกการติดตั้งกราวด์รอด, ป้อนค่าความยาวและจำนวน (Rod characteristic)

6. คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมช, แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นและประมาณการราคาค่าก่อสร้างระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ (Mesh voltage, Step voltage, Cost estimation)

7. คลิก Report เพื่อพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.19

8. คลิก Exit เมื่อต้องการออกจากวินโดว์การคำนวณ



Mesh and Step Voltage Calculation Report

Apparent soil resistivity = 33.0 Ω - m.
Maximum grid current = 4,444.0 A.

Dx
Dy
Ly
Lx

Lx : Maximum length of grid conductor in x-axis = 55.0 m.
Ly : Maximum length of grid conductor in y-axis = 55.0 m.
Dx : Distance between parallel conductor in x-axis = 2.0 m.
Dy : Distance between parallel conductor in y-axis = 2.0 m.
Total area enclosed by ground grid = 3,025.0 Sq.m.
Depth of grid conductors = 1.00 m.
Dimeter of grid conductor = 1.0000 m.
Number of ground rods = 0 Pcs.
Length of ground rod = 0 m.

Result :

Mesh voltage : Em = -60 V.
Step voltage : Es = 129 V.
Cost estimation = 845,450 Baht

รูปที่ 4.19 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

5.1 ราคาค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบต่อลงดิน

ราคาค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบต่อลงดินเป็นราคากลางปี 2554 สำหรับงานก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย ระบบ 115/22 กิโลโวลต์ แบบติดตั้งภายนอก ของกองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีรายละเอียดดังนี้ [2]

ตารางที่ 5.1 ราคาค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งระบบต่อลงดิน

รายการ	ค่าอุปกรณ์ (บาท/เมตร)	ค่าติดตั้ง (บาท/เมตร)
Copper, commercial hard-drawn	320	70
Ground rod, copper cover steel, dia. 16 mm., 6 m. long	1,130	930
Ground rod, copper cover steel, dia. 16 mm., 3 m. long	320	70

5.2 ผลการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำ(D) จำนวนและความยาวแท่งกราวด์รอด เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดิน

5.2.1 ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลองออกแบบ

ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินมีดังต่อไปนี้

5.2.1.1. รูปแบบของกราวด์กริด จะทดลองทำการออกแบบ 3 รูปทรงคือ

1. รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส
2. รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. รูปทรงตัวแอล

5.2.1.2. ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยจะกำหนดให้เท่ากับ 10,000 ตารางเมตร

5.2.1.3. ระยะเวลาที่เกิดกระแสลัดวงจร (t_f) และระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (t_s) กำหนดให้เท่ากับ 0.6 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1.4. น้ำหนักเฉลี่ยของมนุษย์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัย กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 50 กิโลกรัม

5.2.1.5. ชนิดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินกำหนดให้ใช้ตัวนำทองแดงชนิด Commercial hard drawn

5.2.1.6. อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม (T_a) เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส

5.2.1.7. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ทำการทดลองออกแบบที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร

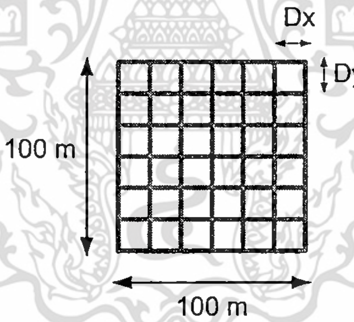
5.2.1.8. ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน (ρ_S) กำหนดให้เท่ากับ 3,000 โอห์ม-เมตร

5.2.1.9. ความหนาของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน (h_S) หนา 0.1 เมตร

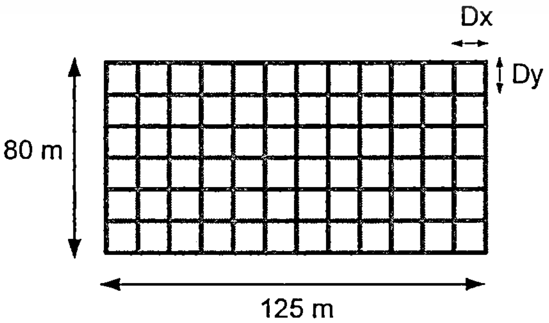
5.2.1.10. ความลึกที่ใช้ฝังกราวด์ริก (h_b) กำหนดให้ใช้เท่ากับ 0.5 เมตร

5.2.1.11. ขนาดตัวนำที่เลือกใช้ในระบบต่อลงดิน (A^2_{mm}) กำหนดให้เท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร

5.2.1.12. กระแสลัดผิดพร่องสูงสุด กำหนดให้เท่ากับ 20,000 แอมแปร์

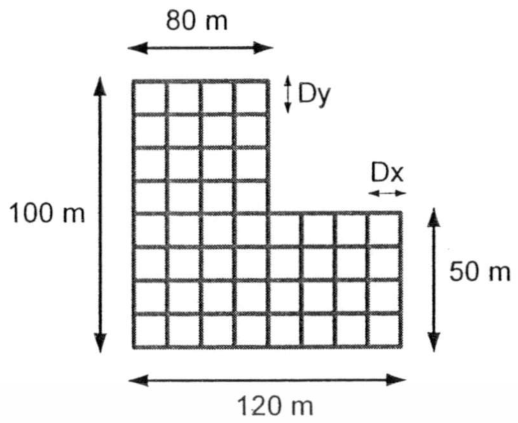


รูปที่ 5.1 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ 10,000 ตารางเมตร



รูปที่ 5.2 กราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดพื้นที่ 10,000 ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราวด์กริดรูปทรงตัวแอลมีขนาดพื้นที่ 10,000 ตารางเมตร

5.2.2 ผลลัพธ์จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดิน

การทดลองออกแบบระบบต่อลงดินตามข้อมูลเบื้องต้นที่กำหนดไว้ในข้อที่ 5.2.1 จะได้ผลการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอด

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Cost (Baht)
50	10	10	618	990	2,023	524	not safe	858,000
	9	9	618	919	2,023	519	not safe	944,667
	8	8	618	844	2,023	516	not safe	1,053,000
	7	7	618	766	2,023	515	not safe	1,192,286
	6	6	618	681	2,023	517	not safe	1,378,000
	5	5	618	589	2,023	524	safe	1,638,000
	4	4	618	487	2,023	540	safe	2,028,000
	3	3	618	370	2,023	573	safe	2,678,000
	2	2	618	230	2,023	648	safe	3,978,000
	1	1	618	58	2,023	874	safe	7,878,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส
ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Rods (No.)	Cost (Baht)
50	10	10	618	617	2,023	405	safe	190	1,116,400
	9	9	618	617	2,023	427	safe	153	1,152,747
	8	8	618	617	2,023	456	safe	105	1,195,800
	7	7	618	617	2,023	492	safe	41	1,248,046
	6	6	618	577	2,023	516	safe	1	1,379,360
	5	5	618	589	2,023	524	safe	0	1,638,000
	4	4	618	487	2,023	540	safe	0	2,028,000
	3	3	618	370	2,023	573	safe	0	2,678,000
	2	2	618	230	2,023	648	safe	0	3,978,000
	1	1	618	58	2,023	874	safe	0	7,878,000

ตารางที่ 5.4 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส
ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Rods (3 m)	Cost (Baht)
50	10	10	618	617	2,023	407	safe	93	1,049,580
	9	9	618	617	2,023	429	safe	75	1,099,167
	8	8	618	616	2,023	456	safe	52	1,160,120
	7	7	618	616	2,023	492	safe	21	1,235,546
	6	6	618	576	2,023	516	safe	1	1,380,060
	5	5	618	589	2,023	524	safe	0	1,638,000
	4	4	618	487	2,023	540	safe	0	2,028,000
	3	3	618	370	2,023	573	safe	0	2,678,000
	2	2	618	230	2,023	648	safe	0	3,978,000
	1	1	618	58	2,023	874	safe	0	7,878,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

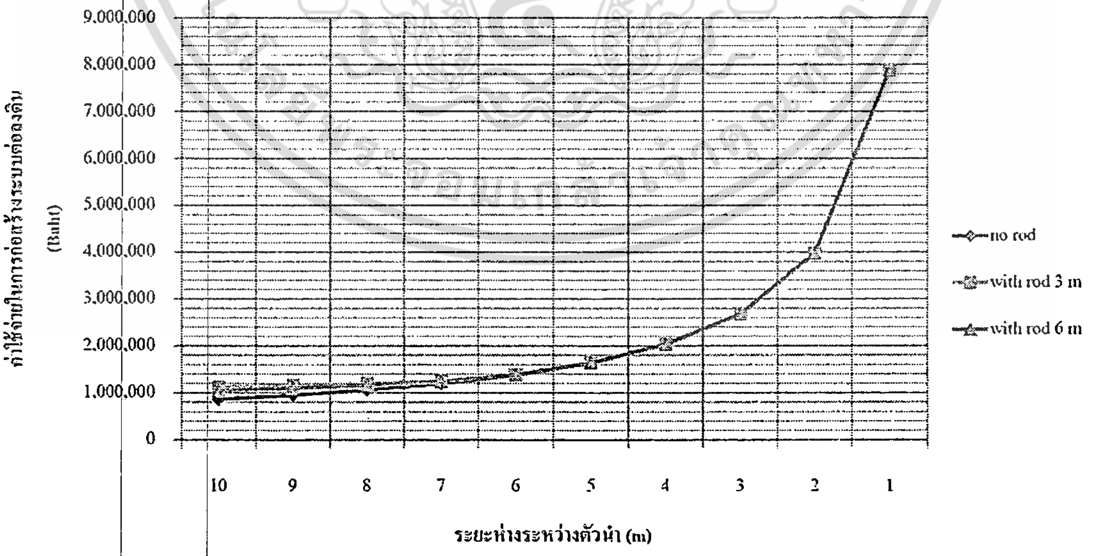
จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินในตารางที่ 5.3, 5.4 และ5.5 เป็นการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินมีค่ามากขึ้น และพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยที่

1. กรณีไม่มีแท่งกราวด์รอด พบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,638,000.- บาท

2. กรณีเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร พบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร จำนวน 190 แท่ง ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,116,400.- บาท

3. กรณีเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร พบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 93 แท่ง ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,049,580.- บาท

4. พบว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 93 แท่ง นั้น สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายมากได้ที่สุด โดยเมื่อเทียบค่าใช้จ่ายกับกรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร และไม่มีกราวด์รอด คิดเป็นเงินเท่ากับ 588,420.- บาท (1,638,000-1,049,580)



รูปที่ 5.4 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอด

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Cost (Baht)
50	10	10	618	982	2,023	519	not safe	859,950
	9	9	618	912	2,023	514	not safe	946,617
	8	8	618	838	2,023	511	not safe	1,054,950
	7	7	618	760	2,023	510	not safe	1,194,236
	6	6	618	676	2,023	512	not safe	1,379,950
	5	5	618	585	2,023	518	safe	1,639,950
	4	4	618	484	2,023	534	safe	2,029,950
	3	3	618	368	2,023	567	safe	2,679,950
	2	2	618	229	2,023	640	safe	3,979,950
	1	1	618	59	2,023	863	safe	7,879,950

ตารางที่ 5.6 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Rods (No.)	Cost (Baht)
50	10	10	618	617	2,023	404	safe	185	1,111,550
	9	9	618	617	2,023	426	safe	148	1,147,897
	8	8	618	617	2,023	454	safe	100	1,190,950
	7	7	618	617	2,023	490	safe	36	1,243,196
	6	6	618	572	2,023	511	safe	1	1,381,310
	5	5	618	585	2,023	518	safe	0	1,639,950
	4	4	618	484	2,023	534	safe	0	2,029,950
	3	3	618	368	2,023	567	safe	0	2,679,950
	2	2	618	229	2,023	640	safe	0	3,979,950
	1	1	618	59	2,023	863	safe	0	7,879,950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Rods (No.)	Cost (Baht)
50	10	10	618	617	2,023	405	safe	91	1,047,410
	9	9	618	617	2,023	427	safe	73	1,096,997
	8	8	618	617	2,023	455	safe	49	1,155,890
	7	7	618	616	2,023	490	safe	18	1,231,316
	6	6	618	572	2,023	511	safe	1	1,382,010
	5	5	618	585	2,023	518	safe	0	1,639,950
	4	4	618	484	2,023	534	safe	0	2,029,950
	3	3	618	368	2,023	567	safe	0	2,679,950
	2	2	618	229	2,023	640	safe	0	3,979,950
	1	1	618	59	2,023	863	safe	0	7,879,950

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินในตารางที่ 5.6, 5.7 และ5.8 เป็นการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินมีค่ามากขึ้น และพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยที่

1. กรณีไม่มีแท่งกราวด์รอด พบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,639,950.- บาท

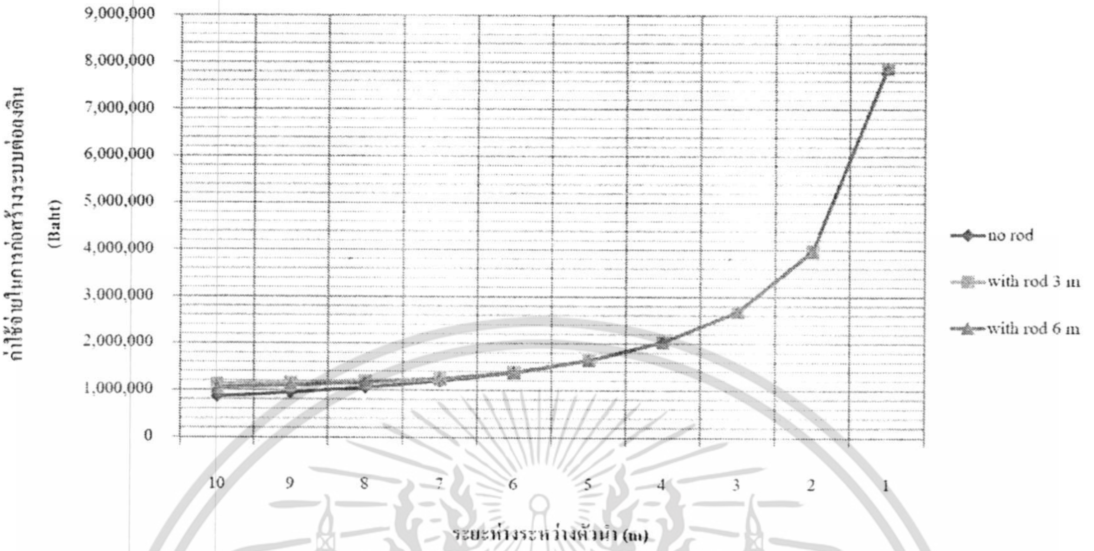
2. กรณีเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร จำนวน 185 แท่ง ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,111,550.- บาท

3. กรณีเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 91 แท่ง ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,047,410.- บาท

4. พบว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 91 แท่ง นั้น สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด โดยเมื่อเทียบค่าใช้จ่ายกับกรณีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร และไม่มีกราวด์รอด คิดเป็นเงินเท่ากับ 592,540.- บาท (1,639,950-1,047,410)



รูปที่ 5.5 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตารางที่ 5.8 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และไม่มีแท่งกราวด์รอด

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Cost (Baht)
50	10	10	618	1,020	2,023	545	not safe	865,800
	9	9	618	948	2,023	541	not safe	952,467
	8	8	618	872	2,023	539	not safe	1,060,800
	7	7	618	791	2,023	538	not safe	1,200,086
	6	6	618	704	2,023	541	not safe	1,385,800
	5	5	618	609	2,023	550	safe	1,645,800
	4	4	618	503	2,023	567	safe	2,035,800
	3	3	618	381	2,023	603	safe	2,685,800
	2	2	618	235	2,023	684	safe	3,985,800
	1	1	618	53	2,023	924	safe	7,885,800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 ผลการออกแบบกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล
ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Rods (No.)	Cost (Baht)
50	10	10	618	617	2,023	412	safe	211	1,152,760
	9	9	618	617	2,023	435	safe	175	1,190,467
	8	8	618	617	2,023	465	safe	127	1,233,520
	7	7	618	617	2,023	503	safe	64	1,287,126
	6	6	618	596	2,023	541	safe	1	1,387,160
	5	5	618	609	2,023	550	safe	0	1,645,800
	4	4	618	503	2,023	567	safe	0	2,035,800
	3	3	618	381	2,023	603	safe	0	2,685,800
	2	2	618	235	2,023	684	safe	0	3,985,800
	1	1	618	53	2,023	924	safe	0	7,885,800

ตารางที่ 5.10 ผลการออกแบบกราวด์กริดริกรูปทรงตัวแอล
ที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 50 โอห์ม-เมตร และมีแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร

ρ (Ω-m)	D_x (m)	D_y (m)	$E_{touch50}$ (V)	E_m (V)	E_{step50} (V)	E_s (V)	Design result	Rods (No.)	Cost (Baht)
50	10	10	218	617	2,023	413	safe	104	1,080,040
	9	9	218	617	2,023	437	safe	86	1,129,627
	8	8	218	617	2,023	465	safe	63	1,190,580
	7	7	218	616	2,023	503	safe	32	1,266,006
	6	6	218	595	2,023	540	safe	1	1,387,860
	5	5	218	609	2,023	550	safe	0	1,645,800
	4	4	218	503	2,023	567	safe	0	2,035,800
	3	3	218	381	2,023	603	safe	0	2,685,800
	2	2	218	235	2,023	684	safe	0	3,985,800
	1	1	218	53	2,023	924	safe	0	7,885,800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

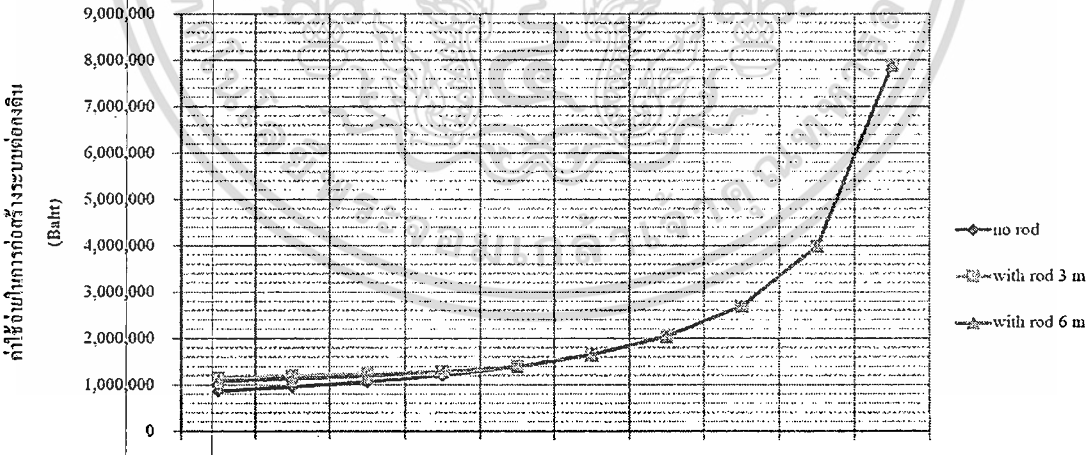
จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินในตารางที่ 5.9, 5.10 และ5.11 เป็นการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในรูปทรงตัวแอล พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินมีค่ามากขึ้น และพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยที่

1. กรณีไม่มีแท่งกราวด์รอด ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,645,800.- บาท

2. กรณีเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 3 เมตร จำนวน 211 แท่ง ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,152,760.- บาท

3. กรณีเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตรที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 104 แท่ง ทำให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยพร้อมกับมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินน้อยที่สุดเท่ากับ 1,080,040.- บาท

4. กรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 104 แท่ง นั้นสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร และไม่มีกราวด์รอด คิดเป็นเงินเท่ากับ 565,760.- บาท (1,645,800-1,080,040)



รูปที่ 5.6 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การออกแบบสถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ จังหวัดลำพูน ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ที่ได้พัฒนาขึ้นกำหนดให้ข้อมูลในการออกแบบมีค่าดังนี้ [3]

ตารางที่ 5.11 ข้อมูลในการออกแบบ

ปัจจัย	ค่าคงที่และประเภท	หน่วย
Fault duration, t_f	= 0.6	s
Current division factor, S_f	= 0.6	-
Line-to-line Voltage at worst-fault location	= 115,000	V
Crushed rock resistivity(wet), ρ_s	= 3,000	Ω-m
Thickness of crushed rock surfacing, h_s	= 0.1	m
Maximum fault current	= 31,500	A
Depth of grid burial, h_b	= 0.5	m
Grid conductor	Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)	-
Grid shape	Square grid	-
X/R ratio	= 20	-

โดยที่ระยะเวลาที่เกิดความผิดพร่อง t_f (Fault duration) และระยะเวลาของบุคคลที่ถูกไฟดูด t_s (Shock duration) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากัน

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

กราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าขนาด 98 เมตร × 69.75 เมตร ดังนั้นกราวด์กริดมีขนาดพื้นที่ 6,835.5 ตารางเมตร และทำการวัดหาค่าความต้านทานดิน แสดงได้ดังตารางที่ 5.2 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ค่าความต้านดินที่สถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ จังหวัดลำพูน

		ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)					
ระยะห่างของโพรบ (m)		**0.5**	**1**	**2**	**4**	**6**	**8**
POINT 1	**PX**	18.30	5.16	1.76	0.78	0.72	0.46
	PY	16.15	2.70	2.38	1.29	0.80	0.51
POINT 2	**PX**	6.94	3.55	51.40	1.05	0.64	0.43
	PY	5.65	3.69	2.17	1.24	0.69	0.49
POINT 3	**PX**	19.39	7.12	4.37	1.74	1.72	0.55
	PY	5.12	4.83	3.33	1.72	0.95	0.59
ผลรวมค่าความต้านทาน		71.55	27.05	65.41	7.82	5.520	3.03
$\sum R / N$		11.925	4.508	10.902	32.756	34.683	25.384

นำค่าที่วัดได้จากตารางที่ 5.2 ไปเป็นข้อมูลสำหรับคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP ดังนี้

```
        <--- LAYER CHARACTERISTICS -->   Reflection    Resistivity
 Layer   Resistivity      Thickness      Coefficient    Contrast
Number    (ohm-m)          (Meters)         (p.u.)        Ratio
====== ============== ============== ============ ============
   1      infinite         infinite         0.0           1.0
   2      252.1914       0.2548186       -1.0000      0.25219E-17
   3      182.7228         infinite       -0.15973     0.72454
```

รูปที่ 5.7 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่สถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ ด้วยโปรแกรม CDEGS โมดูล RESAP

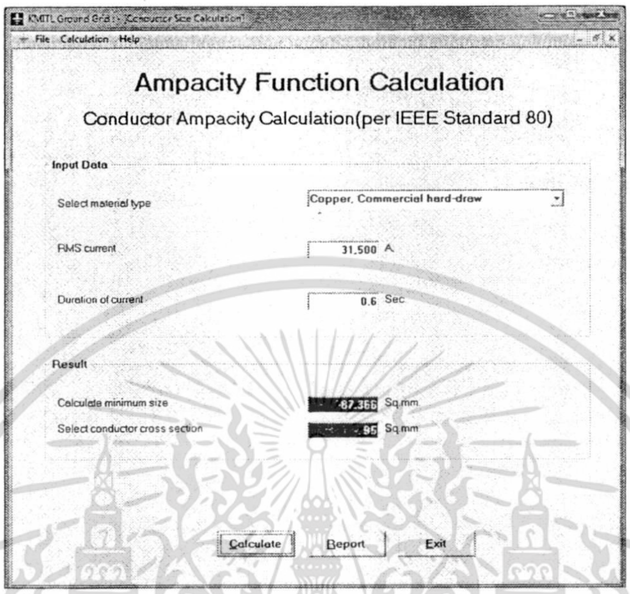
คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดดินสองชั้น โดยดินชั้นบนมีค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ $\rho_1 = 252.19$ โอห์ม-เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง $\rho_2 = 182.72$ โอห์ม-เมตร และค่าความลึกของดินชั้นบน $h = 0.255$ เมตร

คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดดินชั้นเดียวได้เท่ากับ $\rho = 49.268$ โอห์ม-เมตร

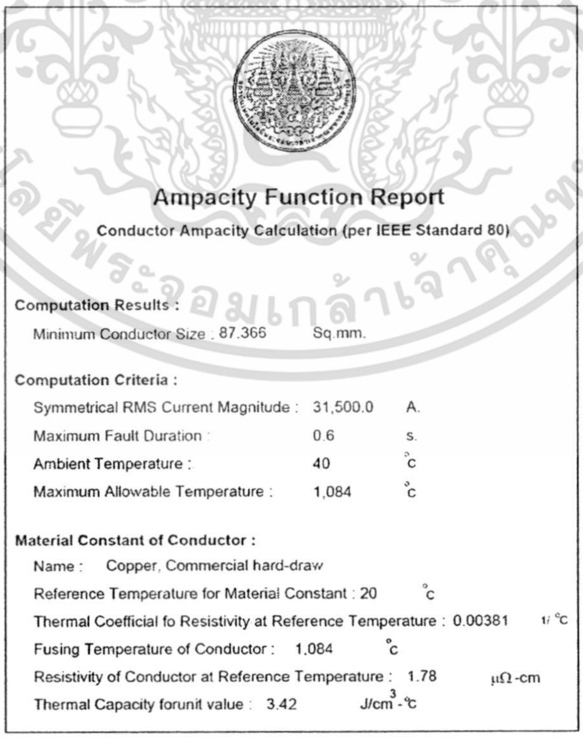
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ

ในกรณีนี้จะใช้ค่า Maximum fault current ที่กำหนดโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดเท่ากับ 31,500 แอมแปร์



รูปที่ 5.8 วินโดว์การคำนวณหาขนาดสายตัวนำ



Ampacity Function Report

Conductor Ampacity Calculation (per IEEE Standard 80)

Computation Results :

Minimum Conductor Size : 87.366 Sq.mm.

Computation Criteria :

Symmetrical RMS Current Magnitude : 31,500.0 A.

Maximum Fault Duration : 0.6 s.

Ambient Temperature : 40 °c

Maximum Allowable Temperature : 1,084 °c

Material Constant of Conductor :

Name : Copper, Commercial hard-draw

Reference Temperature for Material Constant : 20 °c

Thermal Coefficial fo Resistivity at Reference Temperature : 0.00381 1/ °c

Fusing Temperature of Conductor : 1,084 °c

Resistivity of Conductor at Reference Temperature : 1.78 μΩ-cm

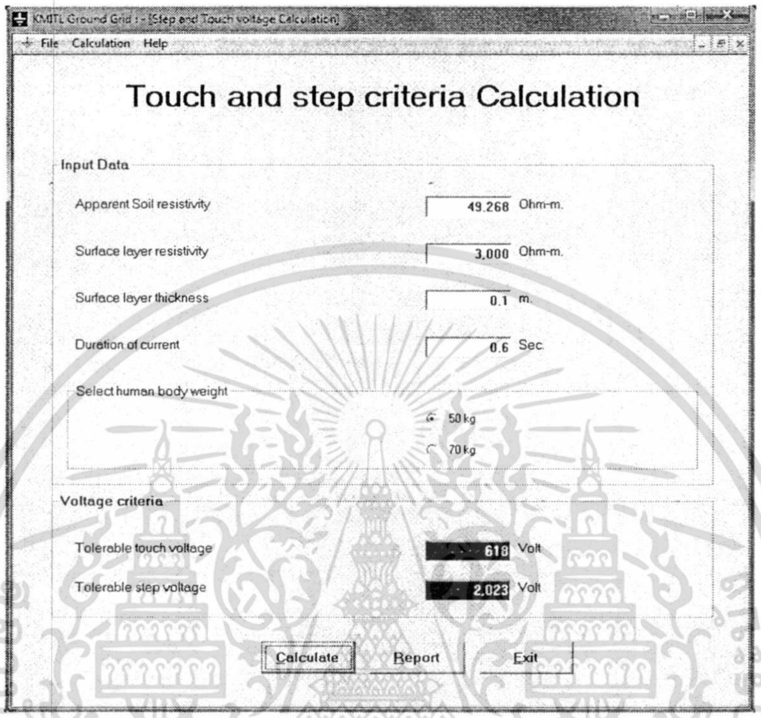
Thermal Capacity forunit value : 3.42 J/cm^3-°c

รูปที่ 5.9 วินโดว์รายงานการคำนวณหาขนาดสายตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาขนาดสายตัวนำได้เท่ากับ 87.366 ตารางมิลลิเมตร และเนื่องจากขนาดที่ได้จากการคำนวณไม่มีการใช้งาน ดังนั้นจะเลือกใช้สายขนาด 95 ตารางมิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้



รูปที่ 5.10 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้สำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม โดยหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดได้เท่ากับ 618 โวลต์ และ 2,023 โวลต์ ตามลำดับ

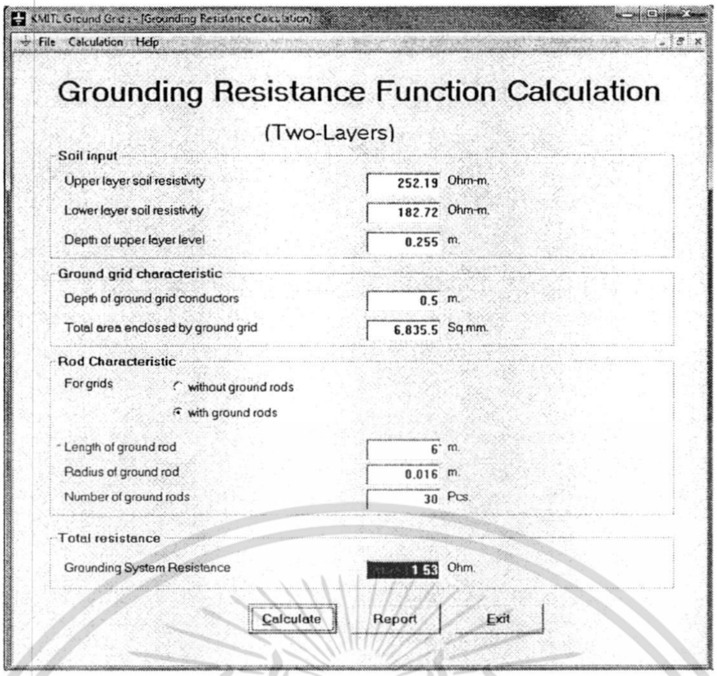
ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

ออกแบบกราวด์กริดโดยให้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตร × 5 เมตร ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางระหว่าง 10 เมตร กับ 1 เมตร และติดตั้งแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร จำนวน 30 แท่ง

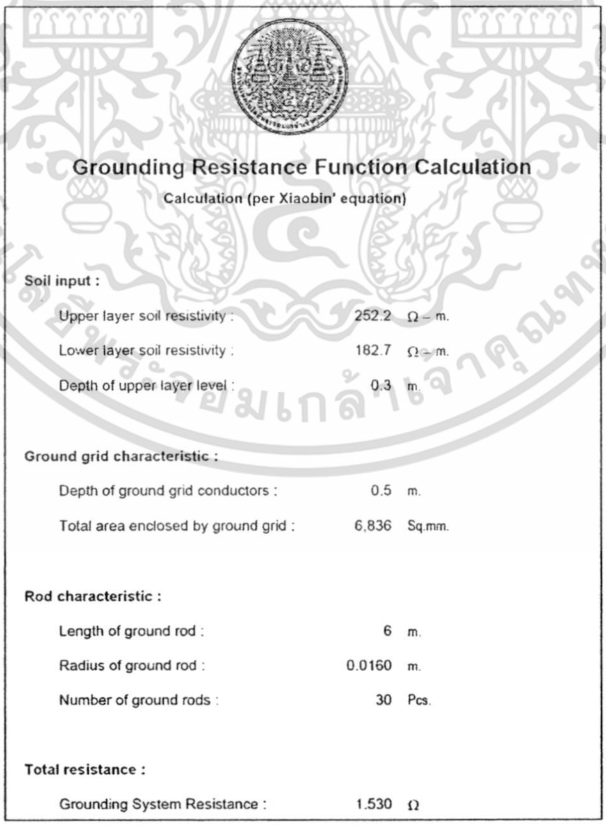
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน ได้เท่ากับ R_T= 1.53 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



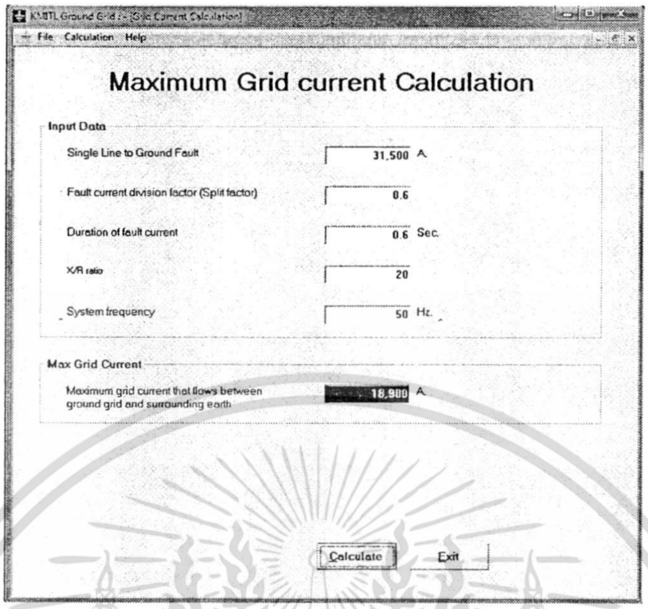
รูปที่ 5.11 วินโดว์การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน



รูปที่ 5.12 วินโดว์รายงานการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

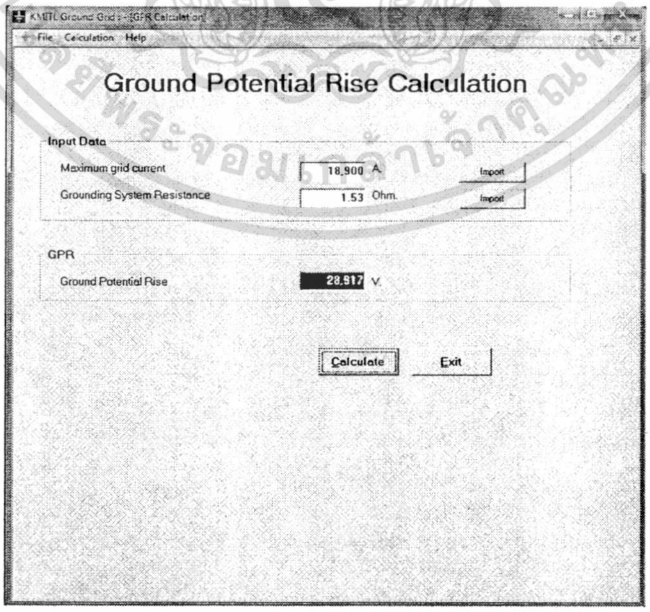
ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด



รูปที่ 5.13 วินโดว์การคำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด

คำนวณหาค่ากระแสกริดได้เท่ากับ I_G = 18,900 แอมแปร์

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

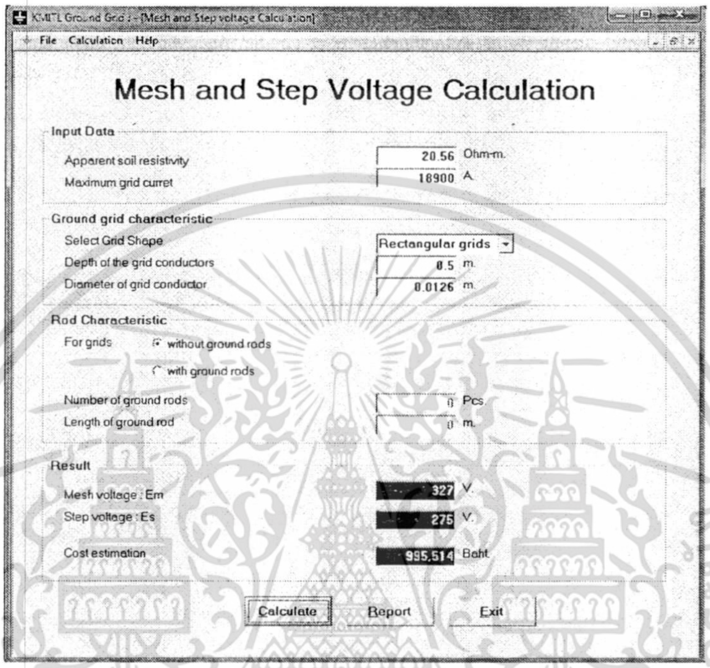


รูปที่ 5.14 วินโดว์การคำนวณหาค่า GPR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริด (GPR) 28,917 โวลต์ กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (618 V) เห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่า จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมชของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 5.15 วินโดว์การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า ได้เท่ากับ 542 โวลต์ และ 567 โวลต์ ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมชที่เกิดขึ้น(542 V) มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (618 V) แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยแต่จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

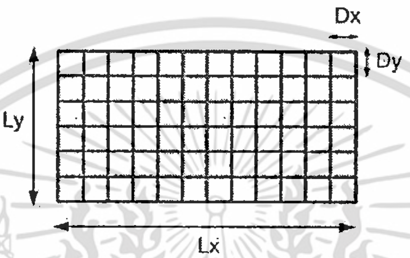
ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้น(576 V) มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ (2,023 V) แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mesh and Step Voltage Calculation Report

Apparent soil resistivity = 49.3 Ω – m.

Maximum grid current = 18,900.0 A.



Lx : Maximum length of grid conductor in x-axis =	98.0	m.
Ly : Maximum length of grid conductor in y-axis =	69.8	m.
Dx : Distance between parallel conductor in x-axis =	5.0	m.
Dy : Distance between parallel conductor in y-axis =	5.0	m.
Total area enclosed by ground grid =	6,835.5	Sq.m.
Depth of grid conductors =	0.50	m.
Dimeter of grid conductor =	0.0126	m.
Number of ground rods =	30	Pcs.
Length of ground rod =	6.0	m.

Result :

Mesh voltage : Em =	542	V.
Step voltage : Es =	567	V.
Cost estimation =	1,193,561	Baht

รูปที่ 5.16 วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นจริง

โดยที่โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งได้เท่ากับ 1,193,561.- บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

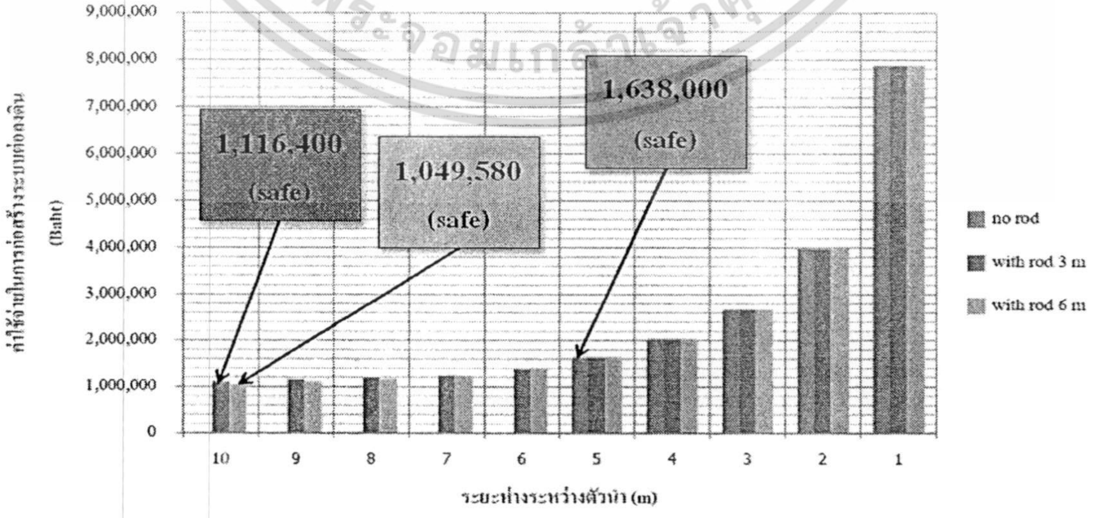
บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ถึงการใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในการคำนวณหาความต้านทานของกราวด์กริดในสถานีฟ้าย่อยโดยการคำนวณด้วยสมการของ Xiaobin พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หาได้จากโปรแกรม CDEGS จึงได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยโปรแกรมที่กล่าวถึงนี้ได้รับการพัฒนาจากภาษา Visual Basic เวอร์ชัน 6 ซึ่งถือว่าเป็นภาษาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการบน Windows

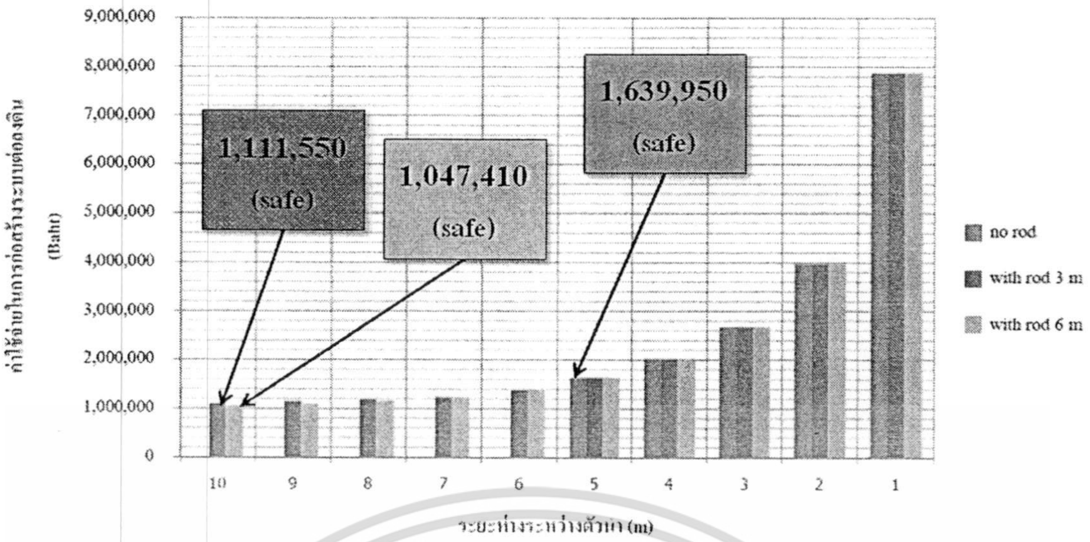
เมื่อนำโปรแกรมการออกแบบที่ถูกสร้างขึ้นนำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน พบว่าโปรแกรมสามารถออกแบบระบบต่อลงดินได้ในความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 และสามารถ แสดงผลลัพธ์และค่าที่ใช้ในการออกแบบพิมพ์เป็นข้อมูลรายงาน ได้ อีกทั้งโปรแกรมยังมีลักษณะการใช้งานง่ายและเหมาะสมกับผู้ใช้งาน

การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ จำนวนและความยาวแท่งกราวด์รอดว่ามีผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวพร้อมกับพิจารณาค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินสามารถสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบคือ เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินเพื่อทำให้ระบบต่อลงดินมีความปลอดภัย จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณตัวนำที่ใช้อยู่ในระบบต่อลงดิน ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดกับกราวด์กริดจะช่วยให้สามารถเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำโดยที่การออกแบบระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่ายได้

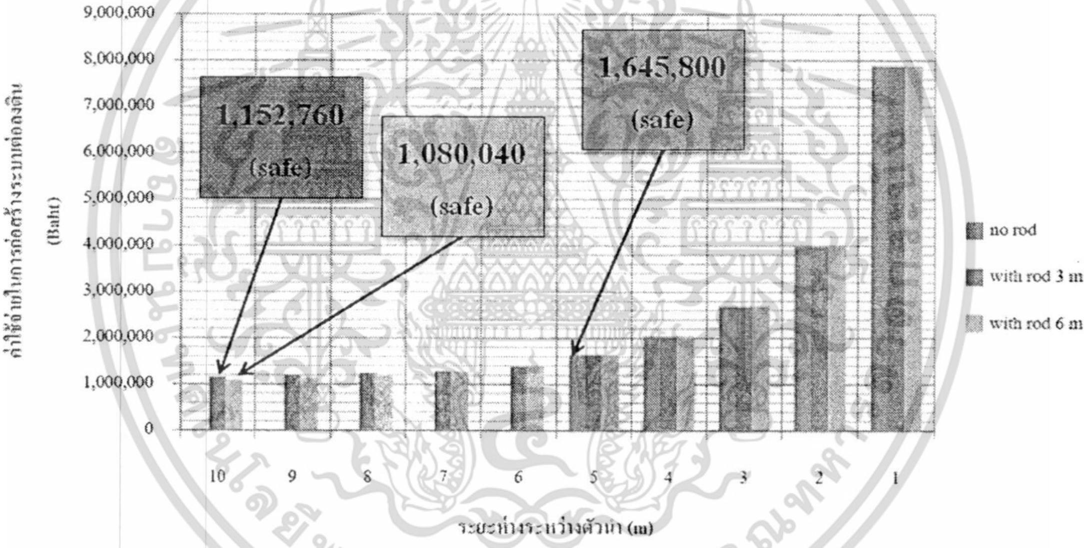


รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่ผืนผ้า



รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

	ไม่มีแท่งกราวด์รอด	**มีแท่งกราวด์รอด 3 เมตร (190 แท่ง)**	**มีแท่งกราวด์รอด 6 เมตร (93 แท่ง)**
ค่าใช้จ่าย (บาท)	1,638,000	1,116,400	1,049,580
ผลต่าง (บาท)	-	521,600	588,420
ผลต่าง (%)	-	31.84	35.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

	ไม่มีแท่งกราวด์รอด	มีแท่งกราวด์รอด 3 เมตร (185 แท่ง)	มีแท่งกราวด์รอด 6 เมตร (91 แท่ง)
ค่าใช้จ่าย (บาท)	1,639,950	1,111,550	1,047,410
ผลต่าง (บาท)	-	528,400	592,540
ผลต่าง (%)	-	32.22	36.13

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกราวด์กริดรูปทรงตัวแอล

	ไม่มีแท่งกราวด์รอด	มีแท่งกราวด์รอด 3 เมตร (211 แท่ง)	มีแท่งกราวด์รอด 6 เมตร (104 แท่ง)
ค่าใช้จ่าย (บาท)	1,645,800	1,152,760	1,080,040
ผลต่าง (บาท)	-	493,040	565,760
ผลต่าง (%)	-	29.96	34.38

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินที่แสดงรูปที่ 6.1 6.2 และ 6.3 ตารางที่ 6.1 6.2 และ 6.3 เป็นการออกแบบระบบต่อลงดินในรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปทรงตัวแอล โดยกำหนดให้มีพื้นที่ในการพิจารณาเท่ากัน พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ ที่ใช้ในระบบต่อลงดินมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินมีค่ามากขึ้น และพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยกรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 10 เมตร และเชื่อมต่อแท่งกราวด์รอดยาว 6 เมตร นั้นสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ซอฟท์แวร์โปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานจำเพาะของดินตั้งแต่สองชั้นขึ้นไปได้ จึงจำเป็นที่ต้องใช้โปรแกรม CDEGS ช่วยในการคำนวณหา ดังนั้นจะต้องพัฒนาความสามารถในการออกแบบระบบต่อลงดินของซอฟท์แวร์โปรแกรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ให้สามารถพิจารณาชั้นดินตั้งแต่สองชั้นขึ้นไปจนถึงชั้นดินที่มีโครงสร้างดินหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแบ่งชั้นดินตามค่าความต้านทานจำเพาะ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าการออกแบบระบบต่อลงดินเมื่อวิเคราะห์ดินเพียงชั้นเดียว

2. งานวิจัยได้ศึกษาโครงสร้างชั้นดินกรณีดินสองชั้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินเท่านั้น ซึ่งการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยอาจใช้พารามิเตอร์ของดินสองชั้นนำไปคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในสถานีไฟฟ้าย่อย เช่น แรงดันไฟฟ้าเมช และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว เป็นต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงการออกแบบที่ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

3. งานวิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Visual Basic ได้กำหนดให้พื้นที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปทรงตัวแอล เท่านั้น โดยกระจายศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากันทุกจุด แต่ยังขาดความเป็นอิสระในการออกแบบ เช่น การกำหนดรูปแบบพื้นที่และจำนวนตะแกรง แต่ถ้าการออกแบบสามารถกำหนดรูปแบบของพื้นที่และตะแกรงได้อย่างอิสระ และลดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะจุดที่ความต่างศักย์สูงได้ โดยการพิจารณาจากแผนผังแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบอาจใช้วิธีการเพิ่มแท่งกราวด์รอดเฉพาะจุดเพื่อลดความต่างศักย์หรือใช้วิธี Optimal design เพื่อลดการใช้สายตัวนำ

4. จากการสันนิฐานการออกแบบการใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินจะได้ค่าใกล้เคียงกับที่หาได้จากโปรแกรม CDEGS โดยผู้ที่ต้องการศึกษาสามารถนำโปรแกรม Visual Basic ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยเพิ่มในส่วนรายละเอียดและเพิ่มเงื่อนไขในการวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบการออกแบบด้วยวิธีที่ต่างกัน ซึ่งมีจุดประสงค์เดียวกันคือการลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบและเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

5. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ยกตัวอย่างกรณีศึกษาการหาความต้านทานระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามแห่ง โดยค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้จากภาคสนามเป็นการวัดที่ดินเดิมก่อนจะมีการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยจริงเพื่อนำไปออกแบบระบบต่อลงดินให้ถูกต้องตามความปลอดภัยทางวิศวกรรมและประมาณค่าใช้จ่ายกำหนดเป็นราคากลางในการประกวดราคา แต่เมื่อจะทำการก่อสร้างจริงที่ดินเป็นที่ลุ่มอาจทำให้เกิดน้ำท่วมได้ จึงจำเป็นที่จะต้องถมให้สูงขึ้นด้วยดินที่มีความต้านทานจำเพาะที่ต่างออกไปจากของเดิม และเมื่อทำการถมดินด้วยดินที่มีความต้านทานจำเพาะใหม่จะต้องทำการวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยอีกครั้งว่าระบบต่อลงดินที่ได้ออกแบบไปนั้นเป็นอย่างไร

ดังนั้นการเปรียบเทียบการสันนิฐานการออกแบบการใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินกับค่าที่เกิดขึ้นจริงนั้น ผู้ที่ต้องการศึกษาจะต้องทำการวัดภาคสนามที่สถานีไฟฟ้าย่อยที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งจะทำให้การสันนิฐานนั้นมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่หาได้จากโปรแกรม CDEGS เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ยกตัวอย่างการออกแบบระบบต่อลงดินสถานีย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่สถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ จังหวัดลำพูน โดยได้กำหนดค่าความลึกในการฝังกราวด์กริด h = 0.5 เมตร นั้น ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่กำหนดในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยตามโครงการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้เกิดความง่ายในทางปฏิบัติ เพราะถ้าหากทำการฝังกราวด์กริดลึกมากเกินไปจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขุดดินและเสียเวลาดำเนินการมากขึ้นด้วย ทั้งนี้การออกแบบระบบต่อลงดินสถานีย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและภาคเอกชนบางแห่งจะออกแบบให้ความลึกในการฝังกราวด์กริดเปลี่ยนแปลงไปจากที่กำหนดไว้เบื้องต้นเนื่องจากการออกแบบระบบต่อลงดินที่กำหนดความลึกในการฝังกราวด์กริด h = 0.5 เมตร อาจไม่สามารถออกแบบให้มีความปลอดภัยทางวิศวกรรมได้ ดังนั้นผู้ที่ต้องการศึกษาสามารถนำกรณีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการฝังกราวด์กริดไปวิเคราะห์ว่ามีผลกระทบต่อการออกแบบที่ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างไร

7. ขั้นตอนสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 4 มีทั้งหมด 12 ขั้นตอน โดยการออกแบบระบบต่อลงดินอาจศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า (E_m, E_s) ให้อยู่ในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (V_{touch}, V_{step}) ซึ่งการหาค่ากำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า (E_m, E_s) นั้น อาจกำหนดเป็นร้อยละของค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (V_{touch}, V_{step}) เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบด้วยกระบวนการดังกล่าวจะเป็นการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีฟ้าย่อยที่ปลอดภัยก่อนที่จะทำการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริด ซึ่งเป็นวิธีที่อาจทำให้สามารถลดขั้นตอนการออกแบบให้สั้นลงและลดเวลาในการคำนวณได้

8. การคำนวณราคาเพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยใช้ราคาสายตัวนำชนิด Copper, commercial hard-drawn ขนาด 95 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งเป็นราคากลางในการประกวดราคาสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปี 2554 ดังนั้นการออกแบบด้วยตัวนำชนิดอื่นจะคำนวณค่าใช้จ่ายได้แตกต่างออกไป ผู้ที่ต้องการศึกษาอาจใช้ตัวนำที่มีราคาถูกกว่าใช้ในการออกแบบให้มีความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย ทั้งนี้ต้องวิเคราะห์ถึงความทานทานต่อการกัดกร่อนของชนิดวัสดุตัวนำด้วย อีกทั้งราคาค่าใช้จ่ายอุปกรณ์และค่าติดตั้งในอนาคตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอาจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าครองชีพ สภาพเศรษฐกิจ เป็นต้น จึงต้องมีการปรับปรุงราคาให้ตรงหรือใกล้เคียงกับสภาพที่ทำการวิเคราะห์มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“โครงการวิจัยรูปแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าและการต่อลงดินระบบจำหน่ายแรงสูงและแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.”** 2548.

[2] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“ราคากลางสถานีไฟฟ้าปี 2554 ค่าอุปกรณ์และค่าติดตั้งสถานีไฟฟ้า 115/22, 115/33 เควี (AIS, GIS).”** 2554.

[3] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“Substation Design and Standard Specification.”** 2547.

[4] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“Soil Resistivity Test Report สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ด.”** 2549.

[5] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“Soil Resistivity Test Report สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว).”** 2552.

[6] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“Soil Resistivity Test Report สถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์.”** 2548.

[7] กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **“Soil Resistivity Test Report สถานีไฟฟ้านิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ.”** 2549.

[8] จีรพัฒน์ นวอนุรักษ์. **“การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.

[9] จิระพันธ์ ปั้นประไพ. **“การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้โปรแกรม MATLAB.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.

[10] ฉัททวุฒิ พืชผล และพิชิต สันติกุลานนท์. 2544. **คู่มือเรียน Visual basic 6.** พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โปรวิชัน.

[11] ชาญชัย เลาห์พงศ์ไพศาล. **“การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.

[12] ธิติ เอื้อมงคล. **“การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.

[13] สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร. **คู่มือการสร้างแอพพลิเคชันด้วย Visual Basic 6.0 ฉบับสมบูรณ์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: อินโฟเพรส. 2542.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Engineering Guide a Simple Substation Grounding Grid Analysis, Safe Engineering Services & Technologies, Ltd, 2004.

[15] Cheng-Nan Chang and Chien-Hsing Lee, "Computation of Ground Resistances and Assessment of Ground Grid Safety at 161/23.9-kV Indoor-Type Substation", **IEEE Transactions on Power Delivery.**, Vol. 21, No. 3, July 2006. pp.1250-1260.

[16] IEEE Standard 80-2000, **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.**, The Institute of Electrical and Electronics Engineer, New York, 2000.

[17] IEEE Standard 81-1983, **IEEE guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.**, The Institute of Electrical and Electronics Engineer, New York, 1983.

[18] Xiaobin Cao, Guangning Wu, Weiming Zhou, Ruifang Li, "New Method for Calculating Ground Resistance of Grounding Grids Buried in Horizon Two-Layer Soil" **International Conference on High Voltage Engineering and Application.**, November 2008. pp.241-244.

[19] Y. L. Chow, M. M. Sherbiny, and M. M. A. Salama, "Resistance formulas of grounding system in two-layer earth," **IEEE Transactions on Power Delivery.**, vol. 11, no. 3, April 1996. pp. 1330–1336.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรม CDEGS ที่ใช้ในการหาความต้านทานจำเพาะของดินชนิดสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil structure analysis) เป็นลิกขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologes Limited,(SES) ประเทศแคนาดา

1. ส่วนประกอบของโปรแกรม

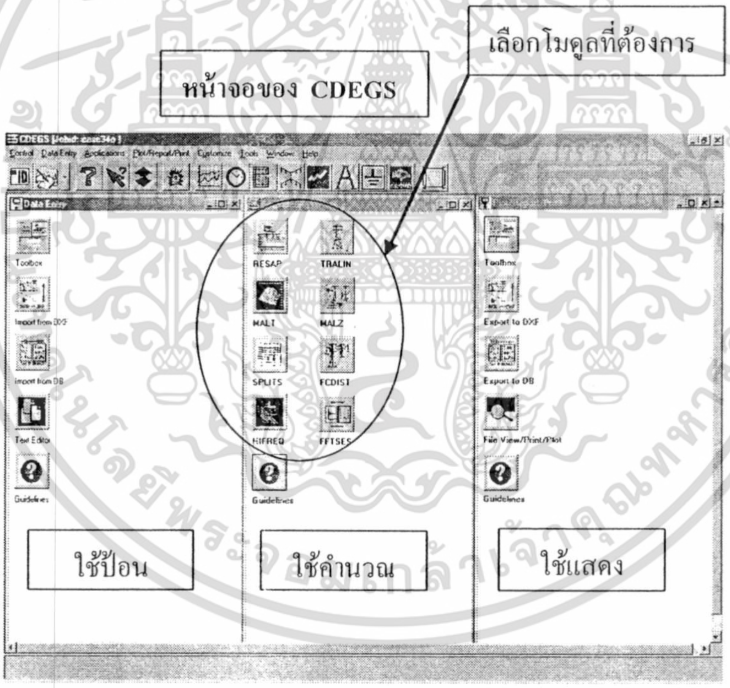
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้โปรแกรม CDEGS ประกอบด้วย 2 โมดูลย่อย ดังนี้

1.1 RESAP (Analysis of Earth Resistivity Measurement)

เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับหาพารามิเตอร์โครงสร้างดินที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในภาคสนาม

1.2 MALT (Low Frequency Analysis of Buried Conductor Networks)

เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน เช่น หาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน กระแสที่ไหลออกจากดิน แรงดันไฟฟ้าบนผิวดินแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว



รูปที่ ก.1 หน้าจอ CDEGS

2. โมดูล RESAP

2.1 วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์

RESAP จะประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยการลดผลต่างกำลังสองของค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณได้ (least-square minimization process) โดยจะมีให้เลือกวิธีการคำนวณ 2 วิธีด้วยกันคือ

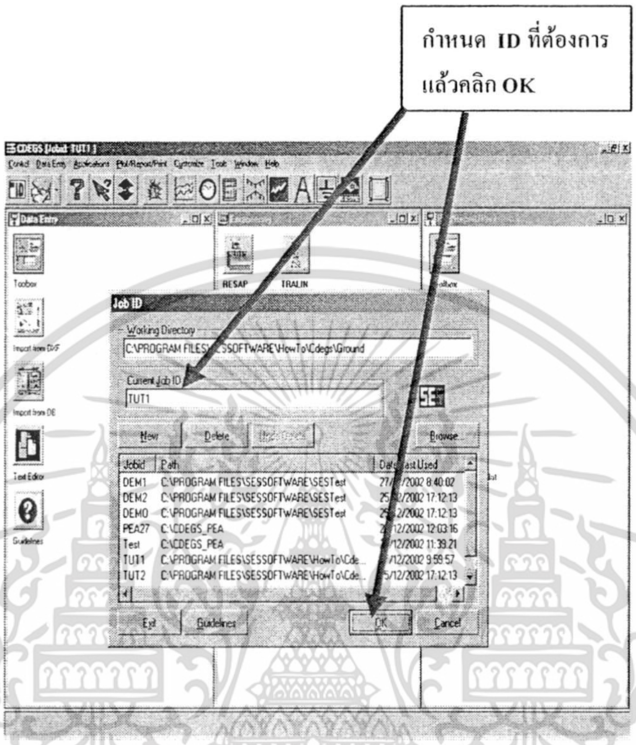
ไม่...กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 Levenberg-Marquardt (LM method)

2.1.2 Steepest Descent method

2.2 การใช้ RESAP

2.2.1 เปิดใช้งานโดย Start/Program/SES



รูปที่ ก.2 การกำหนด ID การใช้งานโมดูล RESAP

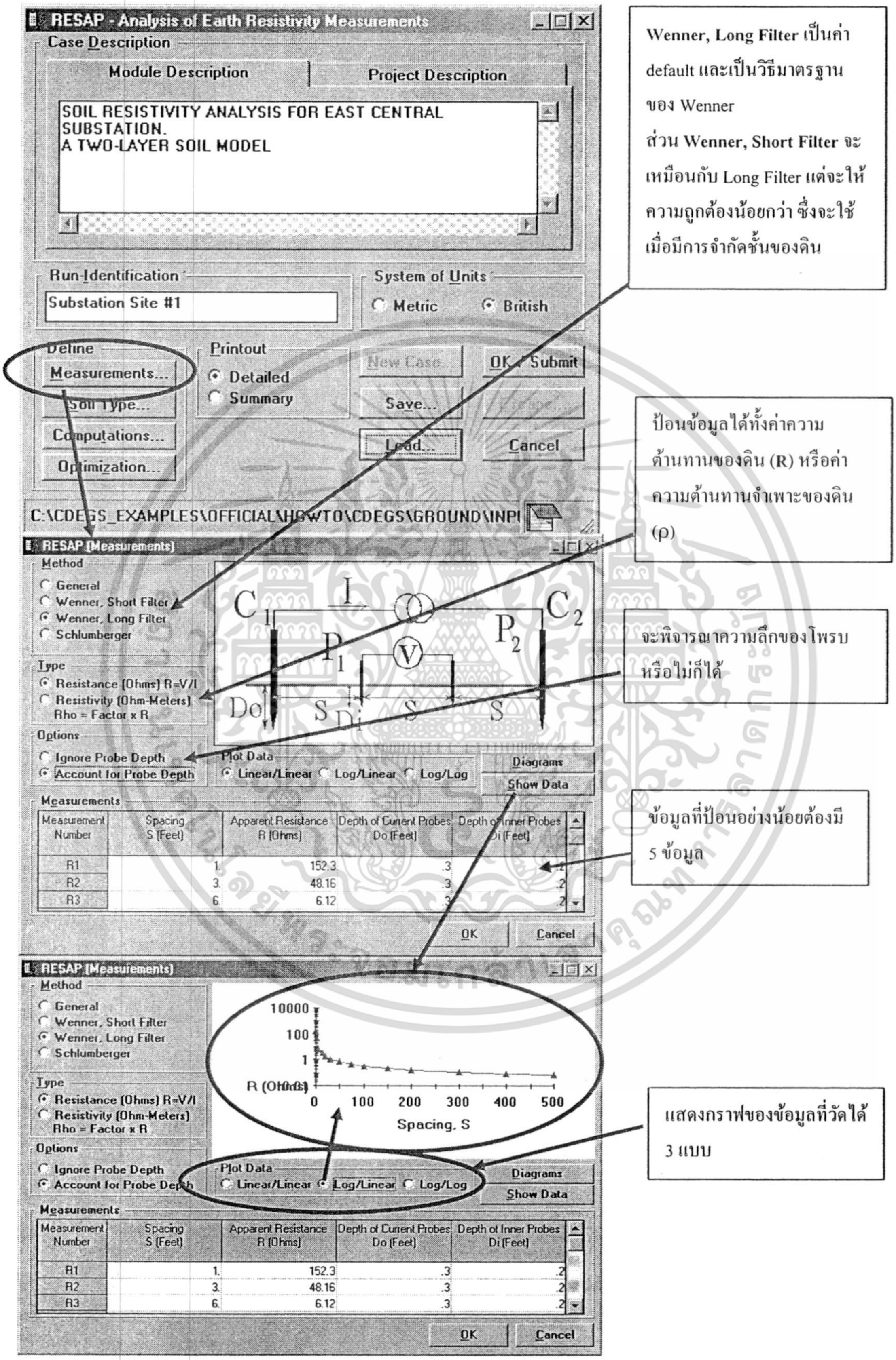
2.2.2 คลิก Toolbox ด้าน Data Entry เพื่อป้อนข้อมูล หน้าจอจะแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ก.3 Toolbox การใช้งาน โมดูล RESAP

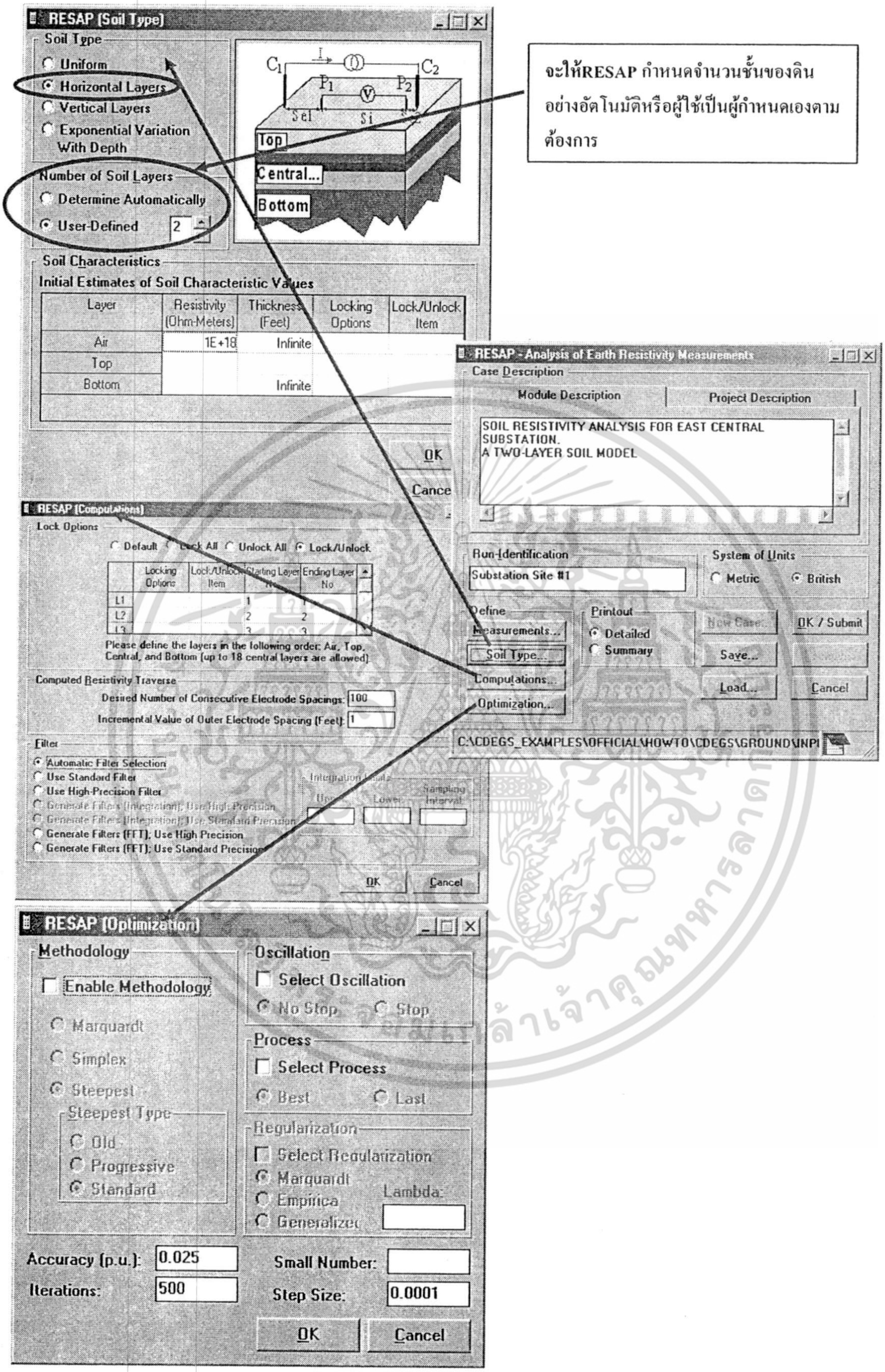
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 คลิก RESAP ใน Toolbox จะได้หน้าจอดังนี้



รูปที่ ก.4 การป้อนข้อมูลโมดูล REASP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 การเลือกแบบจำลองและการตั้งค่าโมดูล REASP

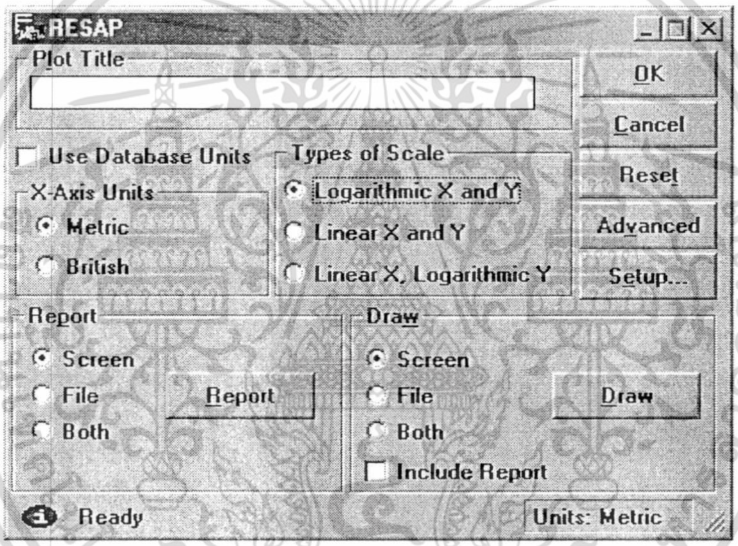
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 คลิด OK/Submit ถ้ามีไฟล์เดิม โมดูลจะถามว่าต้องการทับ input file เดิม (*.WTB, *.INP และ *.F05) หรือไม่ ถ้าตองการก็ คลิด Yes ข้อมูลพร้อมที่จพส่งไปยัง SICL เพื่อสร้างเป็น RESAP input file

2.2.5 คลิก Submit All (SICL) ที่อยู่ใน Toolbox ในข้อ 2 จะเป็นการสร้างไฟล์ RS_**.F05 ซึ่งพร้อมที่จะนำไปเข้ากระบวนการ Engineering

2.2.6 คลิก RESAP ด้าน Engineering เป็นกระบวนการการคำนวณตามวิธีที่กำหนดไว้ ถ้ามี output file เดิม โมดูลจะถามว่าต้องการทับไฟล์เดิม (*.F09 และ *.F21) หรือไม่ ถ้าต้องการก็ คลิก Yes

2.2.7 เมื่อเสร็จแล้ว คลิก Toolbox ด้าน PLOT/REPORT/PRINT จะได้หน้าจอดังนี้



รูปที่ ก.6 การเลือกรูปแบบการ report และ plot โมดูล RESAP

2.3 PLOT/REPORT/PRINT

การ plot สามารถเลือกเสกลได้ 3 แบบ คือ

2.3.1 เสกลล็อก (Logarthmic X and Y)

2.3.2 เสกลแบบเชิงเส้น (Linear X and Y)

2.3.3 เสกลแบบเชิงเส้นในแกน X และเสกลล็อกในแกน Y (Linear X Logarthmic Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวอย่างการรันโมดูลกรณีกำหนดให้เป็นดินสองชั้น

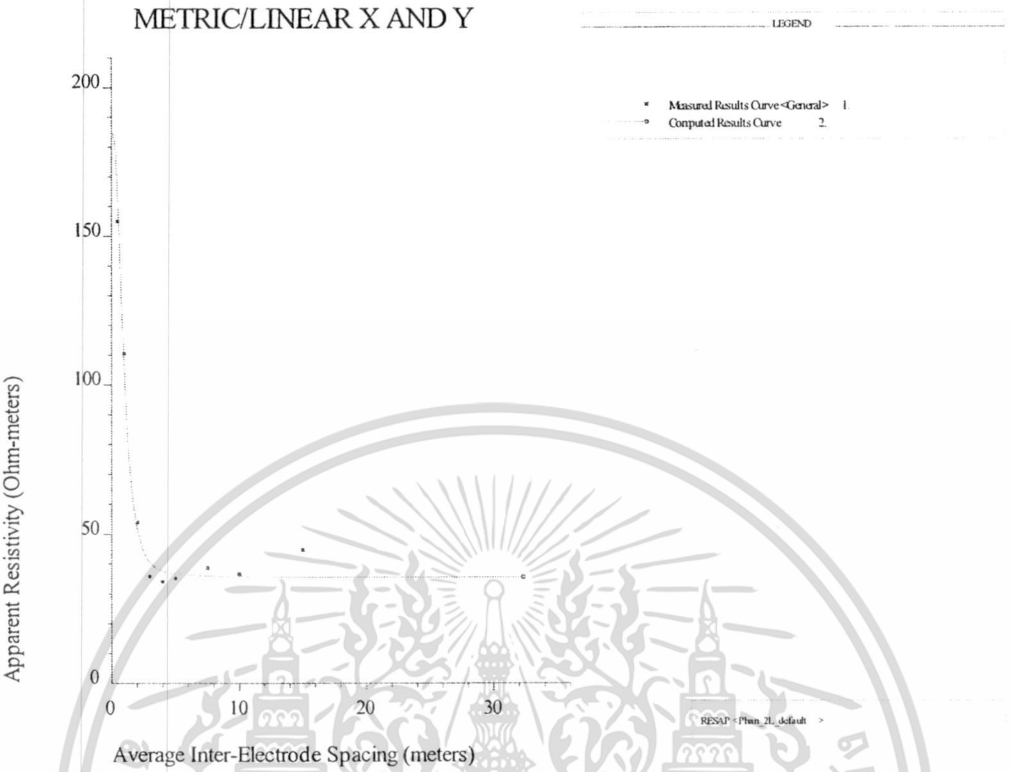
ตารางที่ ก.1 ความต้านทานดินที่ภาคสนาม อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย

		ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)								
ระยะห่างของโพรบ(m)		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10	15
ตำแหน่งวัด										
1		37.5	18.9	4.59	2.05	1.42	1.16	0.794	0.68	0.435
2		70	14.4	4.3	1.76	1.362	1.2	0.96	0.48	0.515
3		40.5	19.5	4	1.9	1.29	1	0.71	0.59	-
4		-	-	-	-	-	-	-	-	-
5		-	-	-	-	-	-	-	-	-
6		-	-	-	-	-	-	-	-	-
R (Ω) (AVERAGE)	ΣR/N	49.33	17.60	4.30	1.90	1.36	1.12	0.82	0.58	0.48
ρ (Ω-m) (AVERAGE)	2πaR	154.99	110.58	53.99	35.88	34.11	35.19	38.70	36.65	44.77

```
=========<R E S I S T I V I T Y ( SYSTEM INFORMATION SUMMARY )>=========

Run ID.......................................: Phan_2L_default
System of Units ...........................: Meters
Soil Type Selected..........................: Multi-Layer Horizontal
RMS error between measured and calculated...:  9.41757   in percent
resistivities (Note RMS=SQRT(average(Di**2)).


      <— LAYER CHARACTERISTICS —>                    Reflection     Resistivity
 Layer         Resistivity         Thickness         Coefficient    Contrast
 Number        (ohm-m)             (Meters)          (p.u.)         Ratio
 ======        ==============      ==============   ===========    ===========
   1           infinite            infinite          0.0            1.0
   2           184.7921            0.6569766         -1.0000        0.18479E-17
   3           35.53453            infinite          -0.67744       0.19229
```

รูปที่ ก.7 ผลค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้นของโมดูล RESAP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

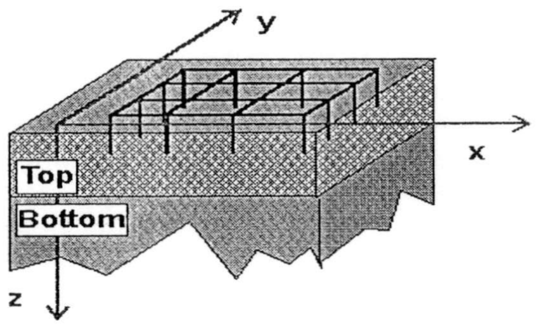


รูปที่ ก.8 กราฟค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้นของโมดูล RESAP

3. โมดูล MALT

3.1 แบบจำลองของดินใน MALT

แบบจำลองของดินใน MALT มีอยู่หลายแบบให้ผู้ใช้สามารถเลือกให้เหมาะสมกับโครงสร้างของดินที่แท้จริง โดยบางแบบจำลองอาจจะได้จากการแปลความหมายจากค่าที่วัดได้โดยใช้โมดูล RESAP วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้แบบจำลองดินสองชั้นในแนวนอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ก.9 ดินสองชั้นในแนวนอน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การใช้ MALT

3.2.1 Start/Program/SES Software/CDEGS

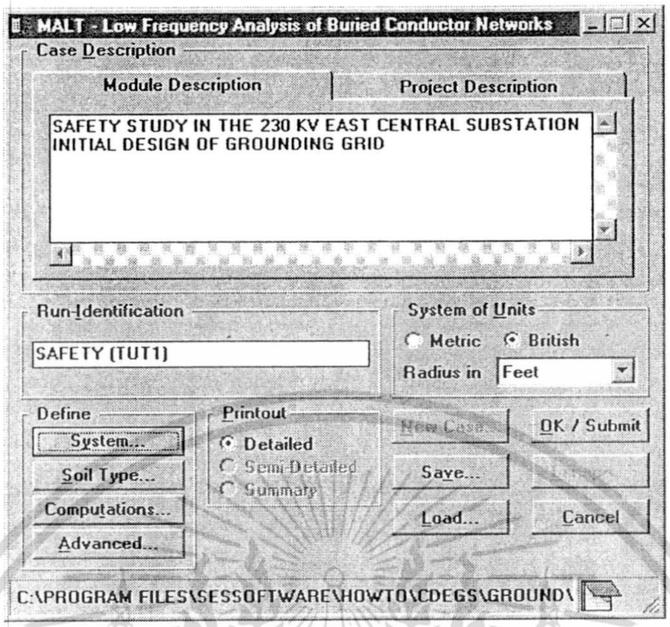
รูปที่ ก.10 การกำหนด ID การใช้งานโมดูล MALT

3.2.2 คลิก Toolbox ด้าน Data Entry เพื่อป้อนข้อมูล หน้าจอจะแสดงดังนี้

รูปที่ ก.11 Toolbox การใช้งานโมดูล MALT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 คลิก MALT ที่อยู่ใน Toolbox หน้าจอ MALT

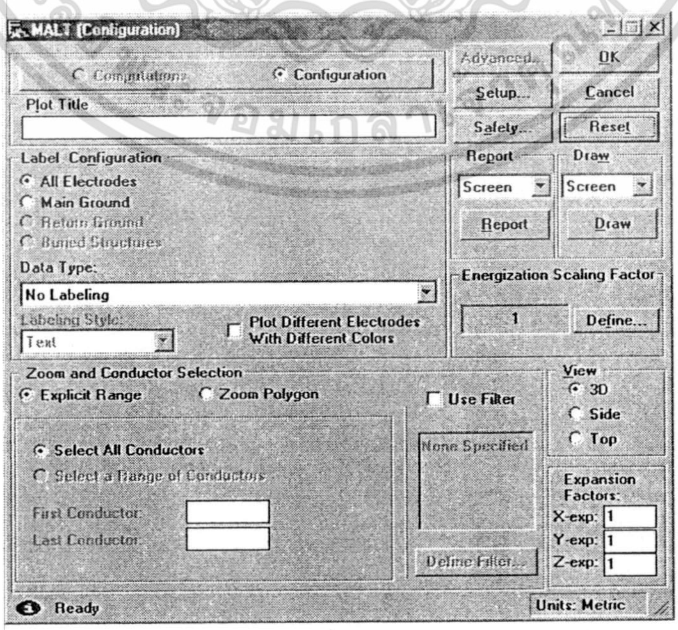


รูปที่ ก.12 หน้าจอ โมดูล MALT

3.2.4 คลิก OK/Submit

3.2.5 คลิก MALT ด้าน Engineering เป็นกระบวนการคำนวณ

3.2.6 เมื่อเสร็จแล้ว คลิก Toolbox ด้าน PLOT/REPORT/PRINT จะได้หน้าจอดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ก.13 หน้าจอของการ PLOT/REPORT/PRINT โมดูล MALT

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

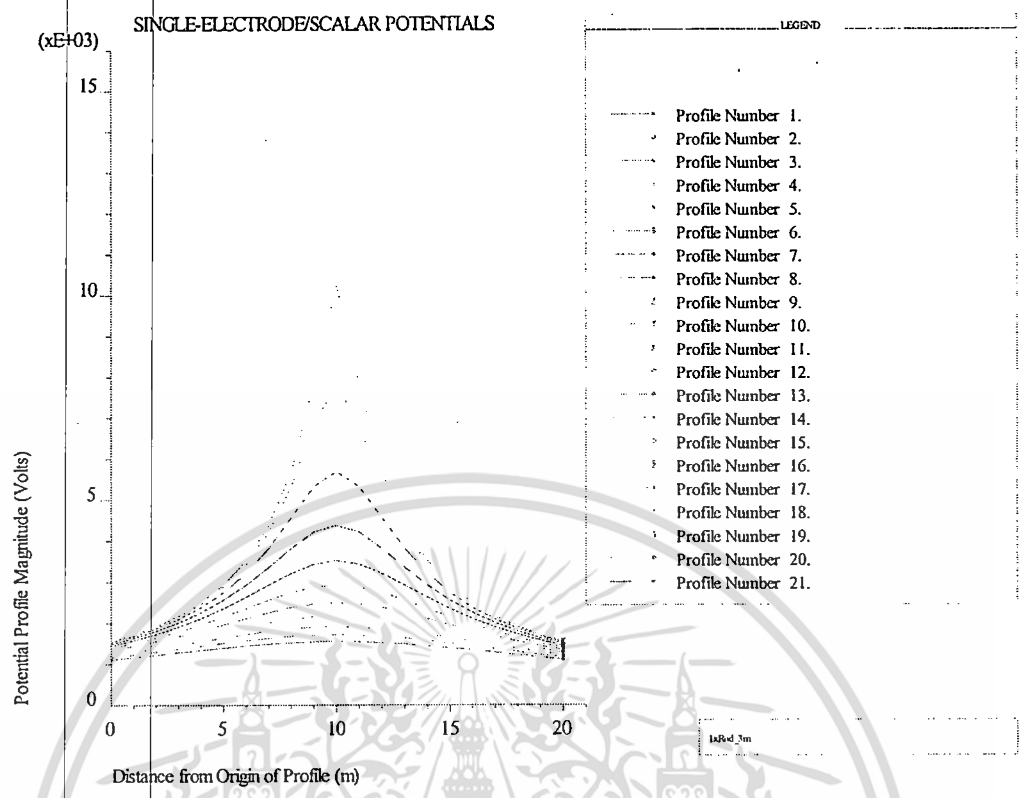
3.3 ตัวอย่างการแสดงผล

การแสดงผลที่เป็นรายงานโดยย่อสามารถสั่งให้แสดงหรือพิมพ์ได้โดยคลิกปุ่ม Report ในรูปที่ ก.14 หรือวาดกราฟของศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดได้จากการคลิกปุ่ม Draw ในรูปที่ ก.14 เช่นเดียวกัน

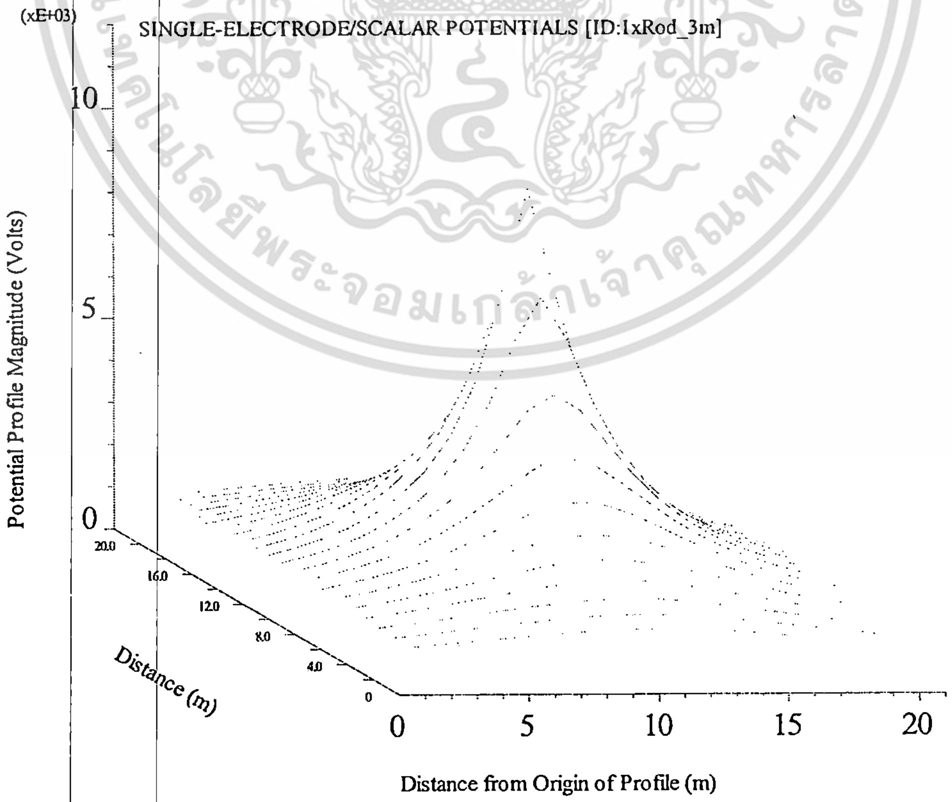
```
===========< G R O U N D I N G   ( SYSTEM INFORMATION SUMMARY ) >===========

Run ID...........................................: 1xRod_3m
System of Units ................................: Metric
Earth Potential Calculations................: Single Electrode Case
Mutual Resistance Calculations..............: NO
Main Ground Resistance and GPR Calculations.: Representative Point Method
Type of Electrodes Considered...............: Main Electrode ONLY
Soil Type Selected...........................: Uniform or Two-Layer Horizontal
SPLITS/FCDIST Scaling Factor................:  1.0000

          EARTH PARAMETERS FOR HORIZONTALLY-LAYERED SOIL
          -----------------------------------------------

    TOP LAYER RESISTIVITY    =  100.00     ohm-meters
    BOTTOM LAYER RESISTIVITY =  100.00     ohm-meters
    REFLECTION COEFFICIENT   =  0.000000  per unit
    TOP LAYER HEIGHT         =  10000.    METERS

CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE
===============================

Original Electrical Current Flowing In Electrode..:  1000.0   amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)..:  1.0000
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode..:  1000.0   amperes
Number of Conductors in Electrode.................:   1
Resistance of Electrode System....................:  31.405   ohms

SUBDIVISION
===========
Grand Total of Conductors After Subdivision.:    3

Total Current Flowing In Main Electrode......:  1000.0   amperes
Average Current Density of Conductor Segments:.  333.33   amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode........:  3.0000   meters


EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS
============================

Main Electrode Potential Rise (GPR).....:  31405.   volts
(based on two representative points)


End of Report #1
```

รูปที่ ก.14 ตัวอย่าง Report จากโมดูล MALT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.15 แสดงศักย์ไฟฟ้าบนผิวดินด้วย 2D



รูปที่ ก.16 แสดงศักย์ไฟฟ้าบนผิวดินด้วย 3D Perspective

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งต้องมีการอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. พลฉัตร กัลยา. "การพัฒนาโปรแกรม Visual Basic สำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย." **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33**, เล่มที่ 1, ธันวาคม 2553, หน้า 33-36.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Call for Papers

33rd Electrical Engineering Conference : EECON 33

การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33

1 – 3 ธันวาคม 2553 ณ โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จังหวัดเชียงใหม่

50 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
40 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
20 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

กำหนดการ

- Submission Deadline : 9 กรกฎาคม 2553
- Author Notification : 25 สิงหาคม 2553
- Camera Ready Due : 24 กันยายน 2553
- Author Registration : 24 กันยายน 2553
- Early Bird Registration : 8 ตุลาคม 2553

http://www.kmitl.ac.th/engineer/eecon33

111 Years Engineering Innovation

111 ปี นวัตกรรมเพื่อการสร้างสรรค์

คณะกรรมการ

- General Supervisor :
  - รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ (KMITL)
  - รศ.ดร.อริสม ฤกษบุตร (MUT)
  - อ.ธนวิชย์ จุลิกพิทย์ (CMU)
- General Chair :
  - รศ.ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ (KMITL)
  - ดร.ธีรยศ เวียงทอง (MUT)
  - รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ (CMU)
- Local Chair :
  - ผศ.กัมปนาท รสมนต์ธนินิศ (CMU)
- Local Arrangement :
  - ผศ.ธราดล โกมลมิศร์ (CMU)
- Technical Program Chair :
  - ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว (KMITL)
  - ดร.สมมาตร แสงเงิน (MUT)
  - อ.ยศนัย ศรีอุทัยศิริวงศ์ (CMU)
- Publicity Chair :
  - อ.ชัยวิทย์ จงวนิชสกุล (KMITL)
  - อ.นราดล โชติวรรณพร (MUT)
  - ดร.พีระพล จิราพงศ์ (CMU)
- Proceeding Chair :
  - ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ (KMITL)
  - ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย (KMITL)
  - ผศ.ดร.สัมพันธ์ หาญพิชัย (MUT)
  - อ.จีรศักดิ์ วิลาสเดชานนท์ (CMU)
- Web Chair :
  - อ.ธนัญชัย ศรีภาค (KMITL)
  - อ.พิเชษฐ์ วิสารทพงศ์ (MUT)
- Treasurer :
  - อ.ศุนีย์ ศุภชัย (MUT)
- Secretary :
  - ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว (KMITL)
  - ดร.สุราคำ สิทธิ์จงสถาพร (MUT)

ประเภทบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง *(PW - Electrical Power System)*
- ไฟฟ้าสื่อสาร *(CM - Communication)*
- ระบบควบคุมและการวัดคุม *(CP - Control System and Instrument Technology)*
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ *(CT - Computer and Information Technology)*
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า *(GM - General Engineering and Science)*
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง *(PE - Power Electronics)*
- อิเล็กทรอนิกส์ *(EL - Electronics)*
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล *(DS - Digital Signal Processing)*
- โฟโตนิกส์ *(PH - Photonics)*
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ *(BE - Biomedical Engineering)*

ความเป็นมา

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference : EECON) เป็นการประชุมทางวิชาการระดับประเทศในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทย เริ่มจัดการประชุมครั้งแรกในปี พ.ศ.2521 โดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันอุดมศึกษาต่างๆ ภายในประเทศทั้งในส่วนภูมิภาค และกรุงเทพมหานคร ผลัดเปลี่ยนหมุนเวียนกันเป็นเจ้าภาพและ สถาบันอื่นๆ ร่วมเป็นคณะกรรมการ

การจัดการประชุมครั้งนี้นับเป็นครั้งที่ 33 (EECON-33) มีเจ้าภาพร่วมสามมหาวิทยาลัย และเพื่อเป็นการร่วมเฉลิมฉลองวาระการครบรอบ 50 ปี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 40 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ 20 ปี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จึงเป็นที่มาของการใช้ชื่อธีมของงานว่า ***111 ปี นวัตกรรมเพื่อการสร้างสรรค์***

วัตถุประสงค์

- เพื่อเผยแพร่วิชาการในหมู่วิชาการของสถาบันการศึกษาต่างๆและวิศวกรรวมทั้งผู้สนใจในภาคเอกชนและรัฐบาล
- เพื่อเปิดโอกาสให้คณาจารย์นักวิจัย นักวิชาการนิสิต นักศึกษา ตลอดจนบุคลากรจากหน่วยงานต่างๆ ทั้งในภาครัฐและเอกชนรวมถึงวิศวกรและผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมได้มีโอกาสเผยแพร่งานผลงานวิจัย และ ได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็นและประสบการณ์
- เพื่อเป็นการกระตุ้นและส่งเสริมให้มีการสร้างงานวิจัยที่ตอบสนองต่อความต้องการของประเทศได้อย่างแท้จริง
- เพื่อกระตุ้นให้เกิดงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาที่เกี่ยวข้องมากขึ้น

การส่งบทความ

บทความจัดทำเป็นภาษาไทย หรือ ภาษาอังกฤษความยาวไม่เกิน 4 หน้ากระดาษ A4 ผู้ที่สนใจส่งบทความเข้าร่วมประชุม สามารถดาวน์โหลดแบบฟอร์มพร้อมทั้งเอกสารต่างๆได้ที่เว็บไซต์การจัดประชุม http://www.kmitl.ac.th/engineer/eecon33

THAILAND SECTION

KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาโปรแกรม Visual Basic สำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย

Development of Visual Basic Program for Substation Ground Grid Design

พลฉัตร กัลยา[1] และ สมชาติ จิริวิภาคร[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซ.ฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2329-8330 E-mail: polchat_k@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาโปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดสำหรับสถานีย่อยเมื่อพิจารณาดินเป็นแบบสองชั้น โดยอ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000[1] ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้คำแนะนำเกี่ยวกับการติดตั้งระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยให้เกิดความปลอดภัย ซึ่งโปรแกรมการออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นและพัฒนาบนโปรแกรม Visual Basic จากข้อมูลของดินพบว่าดินส่วนมากที่พบเป็นดินแบบไม่สม่ำเสมอ การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยวิธีดินสองชั้นจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง โดยสมการของ Xiaobin[2] ถูกใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานการต่อลงดินของกราวด์กริด นอกจากนั้นบทความฉบับนี้ แสดงผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบพิมพ์เป็นข้อมูลรายงานได้ โดยโปรแกรมมีลักษณะการใช้งานง่ายและเหมาะสมกับผู้ใช้งาน

คำสำคัญ: สถานีไฟฟ้าย่อย, ดินสองชั้น, กราวด์กริด

Abstract

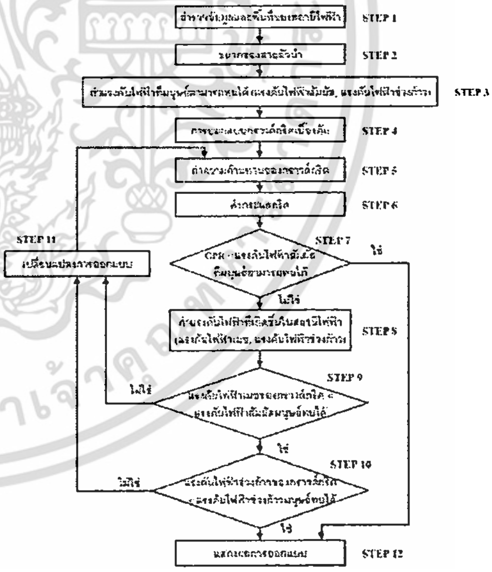
This article presents the development of computer software for substation ground grid design by using two-layer soil methods. The ground grid was designed according to IEEE std.80-2000[1], which advices about a safe method to install substation grounding system. This program was created and developed by Visual Basic program [2]. Normally, most of soil was nonuniform. Using two-layer soil, parameters for substation ground grid design should provide a better result than a substation ground grid design by using the uniform soil parameter. For computing the ground resistance, a method is based on two-layer soil of Xiaobin's equations [2]. In addition to the article, it also able to print out the report as well. The program is easy to use and appropriated with all users.

Keywords: substation, two-layer, ground grid

1. คำนำ

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย ต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยจากกระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริดหรือพื้นที่ที่อยู่บริเวณรอบๆทั้งสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดความผิดพร่อง ในสภาวะ ที่เกิดความผิดพร่องกระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริดจะมีขนาดสูงมากทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองข้างในขณะ ที่มนุษย์เดินอยู่ในสถานีไฟฟ้า หรือเกิดขึ้นระหว่างเท้าและแขนในขณะ ที่มนุษย์สัมผัสอุปกรณ์เพราะ มีกระ แสไหลผ่านเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ถ้ากระแสที่ไหลเข้าสู่ร่างกายนี้มีค่ามากกว่ากระแสที่มนุษย์ทนได้ก็จะทำให้เกิดช็อกหรือเสียชีวิตได้ การออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดีจึงควรออกแบบให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินของกราวด์กริดมีค่าต่ำ

มาตรฐาน IEEE 80-2000 กล่าวถึงการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นบทความฉบับนี้จะ ทำการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและ มีขั้นตอนการออกแบบ 12 ขั้นตอน



รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบกราวด์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการพัฒนาด้วยโปรแกรม Visual Basic มาเป็นเครื่องมือเพื่อให้ได้ซอฟท์แวร์สำหรับการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ ใช้งานง่ายเหมาะกับการนำไปใช้ออกแบบได้จริงในทางปฏิบัติ

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

วิธีที่นิยมใช้ในการวัดคือ Wenner method หรือ การวัดแบบสี่จุด โดยมีระยะห่างระหว่างโพรบเท่ากัน

2.2 ขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำที่ต่อลงดินมีค่าขึ้นอยู่กับ ขนาดของกระแสผิดพร่องที่ไหลผ่านตัวนำ ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพร่องหรือช่วงเวลาตัดกระแส คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบและอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้

2.3 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้

2.3.1 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ (Touch Voltage) เป็นความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของระบบต่อลงดินที่คนไปแตะหรือสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าที่ผิวจุดที่คนยืนอยู่นั้นทำให้เกิดกระแสไหลในร่างกาย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 50 และ 70 กิโลกรัมหาได้จากสมการดังนี้

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 C_S \rho_S)\frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \qquad (1)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 C_S \rho_S)\frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \qquad (2)$$

2.3.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ (Step Voltage) เป็นความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าบนผิวดินระหว่างจุดสองจุดห่างกันหนึ่งเมตรเท่ากับก้าวหนึ่งของคน ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเท้าโดยไม่ได้สัมผัสวัตถุที่ต่อลงดินส่งผลให้กระแสไหลในร่างกาย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 50 และ 70 กิโลกรัมหาได้จากสมการดังนี้

$$E_{step50} = (1000 + 6 C_S \rho_S)\frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \qquad (3)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 C_S \rho_S)\frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \qquad (4)$$

โดยที่

- C_S คือแฟคเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูผิวดิน
- ρ_S คือค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน, Ω-m.
- t_S คือค่าระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านคน, s.
- I_B คือขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย, A.

2.4 ความต้านทานระบบต่อลงดิน

2.4.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏ [1], [3]

ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ใช้แบบจำลองโครงสร้างเป็นดินสองชั้นจะมีค่าพารามิเตอร์แทนความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและดินชั้นล่างด้วย ρ_1 และ ρ_2 ตามลำดับ และเพื่อให้เกิดความง่ายในการคำนวณจึงประยุกต์แบบโครงสร้างดินสองชั้นให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นดินชั้นเดียว โดยความต้านทานจำเพาะปรากฏ หาได้จากสมการที่ (5) และ (6) ดังนี้

$$\rho_a = \frac{\rho_1}{\left[1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right)\left(e^{\frac{1}{K(h+2h_p)}}\right)\right]} \quad \text{เมื่อ} \quad \rho_2 < \rho_1 \qquad (5)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_2}{\left[1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right)\left(e^{\frac{4}{K(h+2h_p)}}\right)\right]} \quad \text{เมื่อ} \quad \rho_2 > \rho_1 \qquad (6)$$

เมื่อ
$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \qquad (7)$$

โดยที่ K คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน

2.4.2 สมการ Xiaobin

สมการวิธีใหม่ที่ใช้คำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า โดยใช้แบบโครงสร้างเป็นดินสองชั้นมีสมการดังนี้

$$R_g = \frac{\rho_2}{4\sqrt{\frac{\pi}{A}}} \quad \text{เมื่อ } \rho_2 < \rho_1,\ h < h_p \qquad (8)$$

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(2.316\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 3.19\right) - 7.8\right) \times \left(1 + 1.95e^{-2.0\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A + 4h\sqrt{\pi A}\left(2.316\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 3.19\right) - 7.8\right) \times \left(1 + 1.95e^{-2.0\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.3e^{-0.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

เมื่อ $\rho_2 < \rho_1,\ h \geq h_p$ (9)

$$R_g = \frac{\rho_2\sqrt{\pi A} + h\rho_1\pi\left(2.316\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 3.19\right) - 7.8\right) \times \left(1 + 1.55e^{-1.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.1e^{-0.25\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0.2e^{\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}{4A + 4h\sqrt{\pi A}\left(2.316\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 3.19\right) - 7.8\right) \times \left(1 + 1.55e^{-1.5\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.1e^{-0.25\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0.2e^{\frac{h\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}}\right)}$$

เมื่อ $\rho_2 \geq \rho_1$ (10)

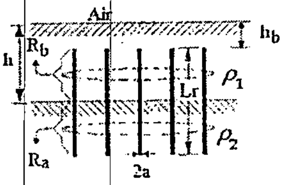
โดยที่

- A คือพื้นที่ของกราวด์กริด, m²
- h คือความลึกของดินชั้นบน, m.
- h_p คือความลึกของกริด, m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ความต้านทานแท่งกราวด์รอด [3], [5]

ในการหาความต้านทานแท่งกราวด์รอด แสดงพารามิเตอร์สำหรับคำนวณหาความต้านทานแท่งกราวด์รอดในแบบจำลองของดินสองชั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยหาได้จากสมการที่ (11) ดังนี้



รูปที่ 2 แท่งกราวด์รอดในดินสองชั้น

$$R_r = \frac{1}{\frac{1}{R_a}+\frac{1}{R_b}} \quad (11)$$

เมื่อ

$$R_a = \frac{\rho_2 g_0 F_0}{(L_r + h_b - h)n_r} \quad (12)$$

$$R_b = \frac{\rho_1 g_0 F_0}{(h - h_b)n_r} + \frac{\rho_1 \phi_0}{h} \quad (13)$$

2.4.4 ผลรวมความต้านทานกราวด์กริดและแท่งกราวด์รอด

เมื่อระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าประกอบไปด้วยกราวด์กริดและแท่งกราวด์รอดที่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นความต้านทานรวมทั้งหมด [3], [5] สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (14) ดังนี้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_g}\right)^2+\left(\frac{1}{R_r}\right)^2}} \quad (14)$$

2.4.5 การคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดิน

การคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าแรงดัน 115/22 เควี ชนิดติดตั้งภายนอกจำนวน 3 แห่ง ของระบบการจ่ายไฟการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยสมการของ Sverak ตามมาตรฐาน IEEE80-2000 และสมการของ Xiaobin ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม CDEGS [4] ซึ่งเป็นค่าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ในการออกแบบ

Case	Substation	Parameter	CDEGS Two Layers	Two Layers Sverak IEEE80-2000	Two Layers Xiaobin	CDEGS ρ_1 (Ohm-m)	CDEGS ρ_2 (Ohm-m)	CDEGS h (m)	CDEGS h_b (m)
1	DoiSaKet	RT(Ohm)	0.4010	0.5056	0.4462	188	49	0.962	0.5
		Error(%)	-	26.09	11.26				
		GPR(Volt)	12,632	15,925	14,055				
3	Nangrong	RT(Ohm)	0.3631	0.2724	0.3671	18.25	32.10	0.903	0.5
		Error(%)	-	24.97	1.11				
		GPR(Volt)	11,438	8,579	11,565				
2	Watbot	RT(Ohm)	0.00414	0.00366	0.00386	0.522	0.566	0.202	0.5
		Error(%)	-	11.53	6.85				
		GPR(Volt)	130	115	122				

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าความต้านทานกราวด์กริด

เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่มีความแตกต่างกันพบว่าที่สถานีไฟฟ้าดอยสะเก็ดมีค่า $\rho_1 > \rho_2$ สถานีไฟฟ้านางรอง (ชั่วคราว) และสถานีไฟฟ้าวัดโบสถ์มีค่า $\rho_1 < \rho_2$

ผลการทดลองสรุปได้คือ ในการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินด้วยสมการ Sverak ตามมาตรฐาน IEEE80-2000 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าการคำนวณด้วยสมการของ Xiaobin ดังนั้นจึงได้นำสมการนี้ไปประยุกต์ใช้คำนวณหาความต้านทานกราวด์กริด

2.5 ค่ากระแสกริดสูงสุด

แฟคเตอร์ส่วนลด (Decrement Factor, D_f) หมายถึง แฟคเตอร์เพื่อใช้ในการคูณกระแสกริดเฉลี่ย (I_g) เพื่อ หากระแสผิดพร่องที่รวมกระแสตรง (I_G) ด้วย

$$I_G = D_f \times I_g \quad (15)$$

และสามารถหาค่ากระแสกริดเฉลี่ยได้จากสมการดังนี้

$$I_g = S_f \times I_f \quad (16)$$

โดยที่ I_f คือกระแสผิดพร่องลงดิน, A.

S_f คือแฟคเตอร์แบ่งกระแส (Division Factor)

2.6 การตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

ค่าแรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise, *GPR*) หาได้จากผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน ดังสมการ

$$GPR = I_g \times R_T \quad (17)$$

2.7 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

2.7.1 แรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ของกราวด์กริด

$$E_m = \frac{\rho_e K_m K_i I_G}{L_M} \quad (18)$$

2.7.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ของกราวด์กริด

$$E_s = \frac{\rho_e K_s K_i I_G}{L_s} \quad (19)$$

2.8 การเปลี่ยนแปลงการออกแบบ

ถ้าการออกแบบยังไม่เกิดความปลอดภัย ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆเพื่อเพิ่มแรงดันที่คนสามารถทนได้และลดแรงดันของกราวด์กริดลง โดยลดระยะห่างระหว่างกริด, เพิ่มความลึกของการฝังกราวด์กริด, ลดกระแสผิดพร่อง, ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสผิดพร่อง และเพิ่มความหนาของวัสดุปูผิวดิน

3. การคำนวณและการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น

ตัวอย่างการออกแบบสถานีไฟฟ้าเลิงนกทา จ.อำนาจเจริญ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ที่ได้พัฒนาขึ้นกำหนดให้ข้อมูลในการออกแบบมีค่าดังนี้

ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพร่อง t_f = 0.6 s. ,กระแสผิดพร่องสูงสุด I_f= 31,500 A. , กระแสแบ่งไหล S_f= 0.6 , แฟคเตอร์ส่วนลด D_f= 1,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

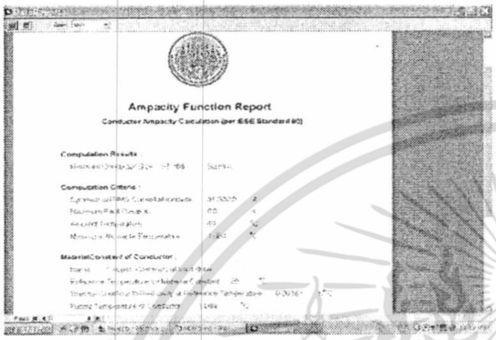
ความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน ρ_s = 3,000 Ω-m. ความหนาของวัสดุปูผิวดิน h_s = 0.1 m. และความลึกของกริด h = 0.5 m.

ขั้นตอนที่ 1 : สำรวจข้อมูลและพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

กราวด์กริดของสถานีไฟฟ้ามีขนาด 72 m. x 72 m. ดังนั้นกราวด์กริดมีขนาดพื้นที่ 5,184 m² ใช้โปรแกรม CDEGS คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ρ_1 = 180 Ω-m. และค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ρ_2 = 50 Ω-m. โดยค่าความลึกของดินชั้นบน h = 1.10 m.

ขั้นตอนที่ 2 : หาขนาดของสายตัวนำ

หาขนาดสายตัวนำได้เท่ากับ 87.366 m² และเนื่องจากขนาดที่ได้จากการคำนวณไม่มีการใช้งาน ดังนั้นจะเลือกใช้สายขนาด 95 m²



รูปที่ 3 หน้าจอผลการคำนวณหาขนาดสายตัวนำ

ขั้นตอนที่ 3 : หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้สำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม โดยหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและและหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวได้เท่ากับ 620 V และ 2,029 V ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 : ออกแบบกราวด์กริดโดยให้ระยะห่างระหว่างกริดเท่ากับ 3 m. x 3 m. และปักกราวด์รอดยาว 6 m. จำนวน 50 แท่ง

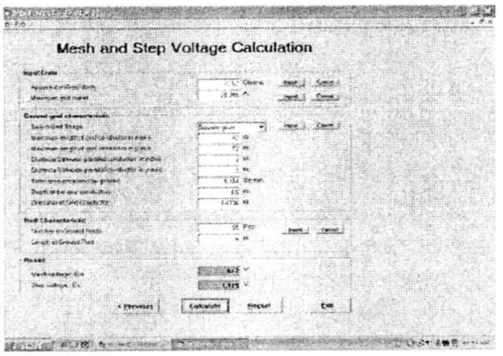
ขั้นตอนที่ 5 : การหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดินจากสมการที่ (14) ได้เท่ากับ R_g = 0.279 Ω

ขั้นตอนที่ 6 : การหาค่ากระแสกริด จากสมการที่ (15) และ (16) ได้เท่ากับ 20,349 A.

ขั้นตอนที่ 7 : ตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริด (GPR) จากสมการที่ (17) ได้เท่ากับ 5,677 V กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (620 V) เห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่า จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมชของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 : การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าจากสมการที่ (18) และ (19) ได้เท่ากับ 617 V และ 1,119 V ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 9 : การตรวจสอบ แรงดันไฟฟ้าเมชของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยแต่จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ต่อไป



รูปที่ 4 หน้าจอผลการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 10 : การตรวจสอบ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและ สามารถนำไปใช้งานได้

4. บทสรุป

จากการออกแบบพบว่าการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ได้จากการคำนวณความต้านทานกราวด์กริดด้วยสมการ Xiaobin จะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณด้วยโปรแกรม CDEGS และส่งผลให้การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ การคำนวณหาค่ากระแสกราวด์กริด และการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามีความถูกต้องสามารถพัฒนาเป็นโปรแกรมใช้งานได้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.

[2] Xiaobin Cao, Guangning Wu, Weiming Zhou, Ruifang Li, "New Method for Calculating Ground Resistance of Grounding Grids Buried in Horizon Two-Layer Soil" International Conference on High Voltage Engineering and Application, November 9-13, 2008

[3] Cheng-Nan Chang and Chien-Hsing Lee," Computation of Ground Resistances and Assessment of Ground Grid Safety at 161/23.9-kV Indoor-Type Substation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006.

[4] Engineering Guide a Simple Substation Grounding Grid Analysis, Safe Engineering Services & Technologies, Ltd, 2004.

[5] Y. L. Chow, M. M. Sherbiny, and M. M. A. Salama, "Resistance formulas of grounding system in two-layer earth," IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 2, pp. 1330–1336, Apr. 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล พลณัตร กัลยา

วัน เดือน ปีเกิด 5 พฤษภาคม 2523 ที่จังหวัดอุบลราชธานี

ที่อยู่ 2 ซอยชยางกูร 10.1 ถนนชยางกูร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2546 - พ.ศ. 2547 วิศวกรไฟฟ้า บริษัท ซิโนไทย เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด(มหาชน)

พ.ศ. 2547 - พ.ศ. 2548 วิศวกรระดับ 4 แผนกออกแบบระบบควบคุมและป้องกัน กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

พ.ศ. 2548 - ปัจจุบัน วิศวกรระดับ 5 แผนกออกแบบสถานีไฟฟ้า 1 กองออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้