สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความต้านทานของตะแกรงในดินที่มีความสม่ำเสมอโดยใช้แบบจำลองในการทดสอบ

STUDYING OF GROUND GRID RESISTANCE IN UNIFORM SOIL BY USING SCALE MODEL TEST

T028859

นายสมชาติ จิริวิภากร

MR.SOMCHAT JIRIWIBHAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2540

ISBN 974-621-932-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 28859
วัน, เดือน, ปี 7 พ.ย. 2540

STUDYING OF GROUND GRID RESISTANCE IN UNIFORM SOIL BY USING SCALE MODEL TEST

SOMCHAT JIRIWIBHAKORN

A THESIS SUBMITED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

MASTER OF ENGINEERING (ELECTRICAL ENGINEERING)

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1997

ISBN 974-621-932-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความต้านทานของตะแกรงในดินที่มีความสม่ำเสมอ โดยใช้แบบจำลองในการทดสอบ
นักศึกษา	นายสมชาติ จิริวิภากร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ศุลี บรรจงจิตร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

การศึกษาระบบกราวน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีการสร้างแบบจำลองของระบบกราวน์ขึ้นและมีการย่อส่วนโดยอาศัยสเกลแฟคเตอร์เพื่อหาความต้านทานดินของตะแกรงในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในดินที่มีความสม่ำเสมอและระยะห่างของตัวนำในตะแกรงมีความสม่ำเสมอ โดยมีการเปลี่ยนแปลงความลึกของตะแกรง,ขนาดของตะแกรง,ขนาดตัวนำของตะแกรง,จำนวนเมชในแต่ละด้านของตะแกรง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีบทและแสดงผลการทดลองในรูปแบบกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังได้กล่าวแล้ว ซึ่งการประมาณค่าความต้านทานดินของตะแกรงในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีส่วนช่วยในการคำนวณหาขนาดและแผนผังของระบบกราวน์ในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Studying of Ground Grid Resistance in Uniform Soil By Using Scale Model Test
Student	Mr.Somchat Jiriwibhakorn
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Sulee Banjongjit
Level of Study	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Department	Electrical Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

ABSTRACT

One of the important steps in determining the size and basic layout of a grounding system for an ac substation is the estimation of ground resistance of the grounding grid. Scale model test is used to study grounding system in this thesis to find the ground resistance of grounding grid in the form of square shape by using scale factor. The ground grid resistance is varied by the depth of the grid, size of the grid, diameter of grid conductor, number of meshes on the side of the grid. Experimental results will be compared with theoretical results. This thesis will present graphical data of ground grid resistance for square and rectangular grid shape in uniform soil and uniform conductor spacing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ศุลี บรรจงจิตร ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สมชาติ จิริวิภากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VI

สารบัญภาพ..... VIII

บทที่

1. บทนำ.....1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....1

สมมติฐานของการศึกษา.....1

ขอบเขตของการศึกษา.....2

ขั้นตอนของการศึกษา.....2

ข้อตกลงเบื้องต้น.....3

ความจำกัดของการศึกษา.....3

วิธีดำเนินการวิจัย.....3

2. พื้นฐานของระบบกราวน์.....4

ปัญหาพื้นฐานของระบบกราวน์.....4

สาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุของระบบกราวน์.....5

องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย.....6

ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติ.....11

ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน.....13

การออกแบบระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อย.....14

3. ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid Resistance).....27

การพิจารณาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน.....27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

4. การจำลองระบบกราวน์โดยใช้สเกลแฟคเตอร์และรายละเอียดของชุดทดสอบ.....37

เฟรมที่จะใช้ในการทำโมเดลของระบบกราวน์.....38

สเกลแฟคเตอร์.....38

เครื่องมือในการทดสอบ.....39

5. ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง.....45

6. สรุปผลการทดลองและแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในอนาคต.....57

บรรณานุกรม.....59

ภาคผนวก.....60

ภาคผนวก ก. โปรแกรมออกแบบระบบกราวน์สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย.....61

ภาคผนวก ข. โปรแกรมยูนิตสำหรับการแสดงผลตัวอักษรบนจอภาพ.....91

ภาคผนวก ค. โปรแกรมยูนิตสำหรับการสร้างหน้าต่าง.....92

ประวัติผู้เขียน.....95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1. ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร่างกายมนุษย์....7
2. แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของดิน....12
3. แสดงค่า Decrement Factor สำหรับใช้ในการคำนวณผลการช็อค ทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสสลับที่ไม่สมมาตร....13
4. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส....30
5. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า....31
6. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยม จัตุรัสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.0825 เมตร....32
7. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยม จัตุรัสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.15 เมตร....32
8. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 15x15 เมตร....47
9. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 22.5x22.5 เมตร....48
10. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 30x30 เมตร....48
11. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 15x15 เมตร....49
12. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 22.5x22.5 เมตร....49
13. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 30x30 เมตร....50
14. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 15x15 เมตร....50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

15. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 22.5x22.5 เมตร.....51
16. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 30x30 เมตร.....51
17. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 15x15 เมตร.....52
18. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 22.5x22.5 เมตร.....52
19. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 30x30 เมตร.....53
20. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 15x15 เมตร.....53
21. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 22.5x22.5 เมตร.....54
22. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 30x30 เมตร.....54
23. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 15x15 เมตร.....55
24. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 22.5x22.5 เมตร.....55
25. แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน 30x30 เมตร.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

1. แสดง Ground Grid....4
2. แสดงโครงสร้างระบบกราวน์ของระบบไฟฟ้ากำลังแห่งหนึ่ง....5
3. วงจรสมมูลย์ของแรงดันสัมผัส....9
4. วงจรสมมูลย์ของแรงดันย่างก้าว....10
5. แสดงแรงดันลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน....15
6. แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบกราวน์....17
7. แสดงตำแหน่งที่เกิดแรงดันร่องตาข่ายและแรงดันย่างก้าวสูงสุด....20
8. แสดงการป้อนค่าพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย, ρ_1 และ ρ_2....21
9. แสดงช่วงเวลาที่เกิด Fault สำหรับตัวอย่างที่ 1....21
10. แสดงค่า S_f และ I_f สำหรับตัวอย่างที่ 1....22
11. แสดงผลการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์ตัวอย่างที่ 1....22
12. แสดงการป้อนค่าพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยและ ρ....23
13. แสดงช่วงเวลาที่เกิด Fault สำหรับตัวอย่างที่ 2....24
14. แสดงค่า S_f และ I_f สำหรับตัวอย่างที่ 2....24
15. แสดงผลการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์ตัวอย่างที่ 2....25
16. แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับ R_g สำหรับสูตร Sverak....28
17. แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับ R_g สำหรับสูตร Thapar....29
18. แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับ R_g สำหรับสูตร Salama....30
19. แสดงลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินวิธี Wenner....33
20. แสดงการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินวิธี Schlumberger....34
21. ก. แสดงลักษณะการปักแท่งขั้วไฟฟ้าของบริดจ์มิเตอร์วัดค่าความต้านทานแผ่กระจายของดิน R_g....35
ข. แสดงกราฟศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งสายดินกับแท่งสายดินช่วย....35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

22. แสดงชุดโมเดลในการทดสอบ.....39
23. แสดงการต่อของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า.....39
24. แสดงการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มี 4 ร่องตาข่าย.....45
25. แสดงการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มี 9 ร่องตาข่าย.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงความต้านทานของตะแกรงที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยมีการสร้างแบบจำลองและย่อส่วนอุปกรณ์เพื่อใช้ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเช่น ความลึกของตะแกรง, ขนาดของตะแกรง, ขนาดตัวนำของตะแกรง, จำนวนเมชในแต่ละด้านของตะแกรง ในดินที่มีความสม่ำเสมอและระยะห่างของตัวนำในตะแกรงมีความสม่ำเสมอด้วย และแสดงผลข้อมูลในรูปตารางเปรียบเทียบกับสูตรในทฤษฎี แบบจำลองในการทดสอบนั้นสามารถศึกษาและหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินได้เป็นอย่างดีและค่าใช้จ่ายในการศึกษาและหาคำตอบจากแบบจำลองที่ใช้ก็ไม่ได้แพงมาก

เนื่องจากการประมาณค่าความต้านทานของตะแกรงในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีส่วนช่วยในการคำนวณหาขนาดและแผนผัง (layout) ของระบบกราวน์ในสถานีไฟฟ้าย่อยนั่นเอง

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินในดินที่มีความสม่ำเสมอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยการใช้แบบจำลองในการทดสอบก็เพื่อศึกษาผลจากการทดสอบจากแบบจำลองโดยการย่อส่วนโดยใช้สเกลแฟคเตอร์เปรียบเทียบกับสูตรในทางทฤษฎี โดยแบบจำลองที่ใช้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังที่จะได้กล่าวในบทต่อ ๆ ไป

สมมติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกันอยู่ 4 ตัวแปรด้วยกันคือ ขนาดของพื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน, ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ในตะแกรงต่อลงดินและจำนวนร่องตาข่ายในตะแกรงต่อลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิน โดยสมมติว่าดินบริเวณที่ฝังตะแกรงต่อลงดินนั้นมีความสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil) มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินค่าหนึ่งและในการทดสอบนั้นจะใช้น้ำแทนดิน โดยน้ำที่ใช้ในการทดสอบนั้นวัดค่าความต้านทานจำเพาะได้เท่ากับ 15 โอห์ม-เมตรและ 10 โอห์ม-เมตร (โดยใช้สาร NaCl) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับสูตรในทางทฤษฎี

ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินนั้นจะพิจารณาเฉพาะตะแกรงที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสและขนาดของร่องตาข่ายในตะแกรงต่อลงดินทั้งหมดมีขนาดเท่ากัน โดยการทดสอบแบบจำลองนั้นจะสร้างโมเดลของตะแกรงต่อลงดินขึ้นมาโดยใช้เฟรมเป็น Bakelite และใช้ลวดทองแดงที่ขูดฉนวนเป็นตัวนำและจุดต่อเชื่อมของลวดนั้นบัดกรีด้วยตะกั่ว โดยโมเดลที่ได้สร้างขึ้นมานั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินอยู่ 4 ตัวแปรดังที่ได้กล่าวมาแล้วรวมทั้งหมด 27 โมเดล โดยไม่ได้รวมผลของแท่งหลักดิน (Ground Rod) ประกอบด้วย

ขั้นตอนของการศึกษา

ก่อนที่จะทำการทดสอบแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินนั้นในขั้นต้นต้องพิจารณาถึงขั้นตอนของการศึกษาการออกแบบระบบกราวน์โดยใช้ตะแกรงต่อลงดินก่อนซึ่งประกอบด้วย 12 ขั้นตอน หลังจากนั้นก็นำขั้นตอนและข้อมูลทั้งหมดมาเขียนโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์ซึ่งใช้ภาษา Turbo Pascal ขั้นตอนสุดท้ายจากการออกแบบโดยโปรแกรมจะได้รูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน, ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน, ขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน, ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดินและจำนวนร่องตาข่ายในตะแกรงต่อลงดิน หลังจากนั้นจะได้พิจารณาเฉพาะถึงรายละเอียดของความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินและได้จำลองตะแกรงต่อลงดิน 26 โมเดลเพื่อทำการทดสอบในชุดทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองกับสูตรในทางทฤษฎีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการศึกษาการทดสอบวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยใช้แบบจำลองในการทดสอบนั้นถือว่าน้ำที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีความสม่ำเสมอ (Homogeneous Water) มีค่าความต้านทานจำเพาะค่าหนึ่ง (ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ค่าที่ใช้เท่ากับ 15 และ 10 โอห์ม-เมตรตามลำดับ)

ความจำกัดของการศึกษา

ในการศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยใช้แบบจำลองในการทดสอบนั้นข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดของแท้งค์ที่จะใช้ในการทดสอบซึ่งขนาดของตะแกรงต่อลงดินใหญ่สุดก็ไม่ควรเกิน 0.2 เท่าของขนาดพื้นที่ของแท้งค์น้ำ แท้งค์น้ำที่ได้สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 1x1x1 เมตร ดังนั้นขนาดของตะแกรงต่อลงดินที่จำลองในการทดสอบนั้นควรจะมีขนาดเล็กกว่า 0.2 ตารางเมตรเพื่อให้ผลจากการทดสอบผิดพลาดน้อยเนื่องจากผลของ Boundary Effect ที่เกิดจากขนาดที่จำกัดของแท้งค์ที่ใช้ในการทดสอบ

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีที่ใช้ศึกษาค้นคว้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยเอกสารและการวิจัยทดลอง ในการทดสอบแบบจำลองนั้นข้อมูลที่ได้คือกระแสและแรงดันของโมเดลของตะแกรงต่อลงดินเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินต่าง ๆ โดยจะใช้สเกลแฟคเตอร์ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ใช้ในการย่อส่วนของตะแกรงต่อลงดินขนาดจริงลงมาทดสอบ ดังนั้นเมื่อทำการวัดและคำนวณค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินได้แล้วต้องใช้สเกลแฟคเตอร์คูณกลับเพื่อหาค่าจริงของค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินขนาดจริงที่ได้ย่อส่วนลงมาทดสอบ และเครื่องมือและวิธีการทดสอบตลอดจนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะได้กล่าวถึงในบทต่อ ๆ ไป

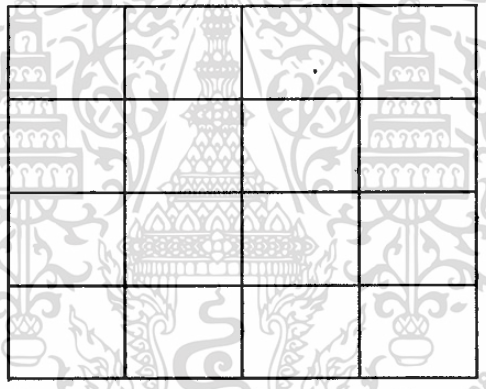
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
พื้นฐานของระบบกราวน์

1. ปัญหาพื้นฐานของระบบกราวน์

ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ระบบกราวน์ที่เรียกว่า Ground Grid ดังภาพที่ 1

ภาพที่ 1

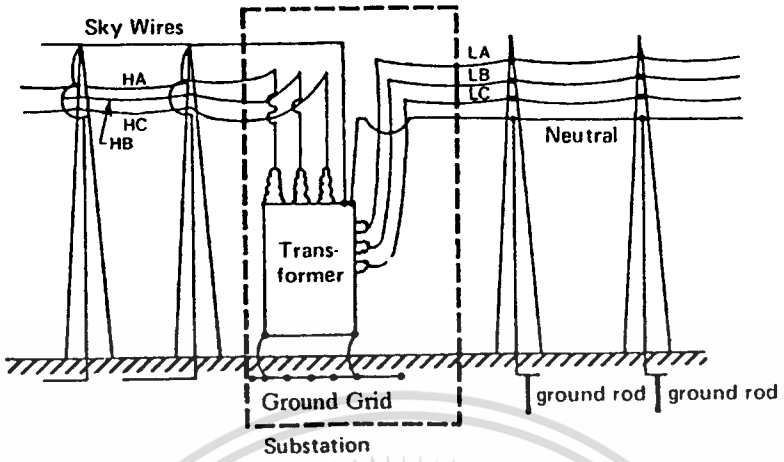


แสดง Ground Grid

ภาพที่ 1 เป็นการวางตัวนำ (ส่วนใหญ่เป็นทองแดงชนิดตีเกลียว) เป็นแบบตารางสี่เหลี่ยมต่อเชื่อมถึงกันหมด ประกอบด้วยตารางขนาดเล็ก ๆ เรียกว่า mesh ซึ่งในภาพที่ 1 ประกอบด้วย 16 mesh ภายในระบบกราวน์พวกโครงเหล็กต่าง ๆ เช่น Case ของอุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวก CT, PT, CB และของหม้อแปลงต้องต่อลงดินเชื่อมโยงกับระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2



แสดงโครงสร้างระบบกราวน์ของระบบไฟฟ้ากำลังแห่งหนึ่ง

ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างระบบกราวน์ของระบบไฟฟ้ากำลังแห่งหนึ่ง ภาพที่ 2 ประกอบด้วยหม้อแปลง, Transmission Line และ Distribution Line โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะต่อเชื่อมกับระบบกราวน์หรือ Ground Grid ของสถานีไฟฟ้าย่อย ส่วน Transmission Line และ Distribution Line ก็จะมีระบบกราวน์ต่างหาก

การออกแบบระบบกราวน์เพื่อก่อให้เกิดความปลอดภัยกับบุคคลที่ประกอบภารกิจภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งภายใต้ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า (Fault Condition) กระแสจะไหลลงสู่ดินเป็นสาเหตุของการเกิดเกรเดียนของศักดาไฟฟ้าขึ้นทั้งภายในและภายนอกสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ถ้าในการออกแบบไม่ดีพอเกรเดียนของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวเหนือตะแกรงต่อลงดินนั้น อาจมีค่าสูงเกินไปจนทำให้เกิดอันตรายต่อบุคคลภายในบริเวณนั้นได้ ค่าความต่างศักย์ที่เป็นอันตรายอาจจะเกิดขึ้นกับโครงของอุปกรณ์ซึ่งต่อลงดินกับพื้นดินในบริเวณใกล้เคียงภายใน และรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อย หรืออาจจะเกิดขึ้นระหว่างสองจุดใด ๆ บนพื้นผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งเท้าทั้งสองข้างของมนุษย์สัมผัสอยู่ ถ้าการออกแบบต่อลงดินได้ออกแบบอย่างถูกต้องก็สามารถที่จะป้องกันความต่างศักย์เหล่านี้ได้

2. สาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุของระบบกราวน์

ในอดีตที่ผ่านมาคนจำนวนมากมักจะคิดว่าวัตถุใด ๆ ก็ตามที่ได้มีการต่อลงดินจะสามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย ความคิดที่ผิดนี้ทำให้เกิดอุบัติเหตุเกิดขึ้นหลายครั้งในอดีต แต่ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาอันนี้ได้ถูกนำมาค้นหาสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งจากการอาศัยข้อมูลและความรู้ใหม่ ๆ จำนวนมากทำให้สามารถหาสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระแสผิดปกติ (Fault Current) ไหลลงสู่ดินในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบกราวน์และค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดิน

2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูง ทำให้การกระจายของกระแสลงสู่ดินมีค่าต่ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดเกรเดียนที่สูงในบางจุดหรือหลาย ๆ จุดในสถานีไฟฟ้าย่อย

3. มีส่วนของร่างกายของคนเป็นสะพานไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุด ที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ณ เวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งมีความต่างศักย์ที่มีค่าสูงคร่อมอยู่ระหว่างจุดสองจุดนั้น

4. ความต้านทานสัมผัส (Contact Resistance) หรือความต้านทานอนุกรม มีค่าน้อยหรืออาจไม่มีค่าที่จะจำกัดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายเพื่อทำให้เกิดความปลอดภัย ภายใต้สภาวะที่เกิดความผิดปกติ

5. ช่วงเวลาของการเกิดการผิดปกติ (Duration of Fault) และช่วงเวลาของการไหลของกระแสผ่านร่างกาย (Shock Duration) ทางจุดสัมผัสทั้งสองดังกล่าวนั้นเป็นเวลานาน ทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้ที่ระดับความเข้มของกระแสตามที่กำหนด

3. องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย

สำหรับองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยรวมทั้งขอบเขตความปลอดภัยนั้นจะกล่าวเป็นข้อ ๆ ดังนี้

3.1 ร่างกายมนุษย์ เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการวิเราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาตะแกรงต่อลงดินในแง่ความปลอดภัยนั้น จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส่วนที่สำคัญที่สุดของวงจรก็คือร่างกายของมนุษย์เรานั่นเอง ซึ่งโดยปกติมนุษย์จะมีความรู้สึกได้ที่ขนาดกระแส 1 มิลลิแอมป์ กระแสที่มีขนาด 10-25 มิลลิแอมป์จะทำให้มีผลทางการควบคุมของกล้ามเนื้อ และที่กระแส 100 มิลลิแอมป์จะทำให้การทำงานของหัวใจเริ่มผิดปกติ ถ้าสูงมากกว่าจะทำให้หัวใจหยุดเต้นหรือก่อให้เกิดการลุกไหม้ทางไฟฟ้าอย่างรุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1

ผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร่างกายมนุษย์

ระดับกระแสไฟฟ้า ช็อคโดยประมาณ	ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวใจ เช่น จากมือลงสู่พื้นดิน	วิธีรักษา
ต่ำกว่า 0.7 mA	ไม่มีผลต่อร่างกาย	
0.7-2 mA	เกิดความรู้สึกจักกระจี้	
2-8 mA	1. ผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท 2. มีการหดตัวของกล้ามเนื้อ 3. ถ้าถูกกระแสไฟขนาด 20 มิลลิแอมป์ โดยทันทีทันใดจะได้รับอันตรายจากการเกิดกล้ามเนื้อฉีก ถ้าน้อยกว่านี้จะไม่มีอันตราย	
20-50 mA	1. มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท 2. กล้ามเนื้อหน้าอกหดตัวอย่างรุนแรง 3. มีอากาศขับอยู่ในปอดมากผิดปกติ ทำให้ปอดทำงานได้ไม่เต็มที่ 4. ไม่สามารถปล่อยมือออกได้ 5. เกิดของเสียขึ้นในกระแสโลหิต มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางผิดปกติขึ้นในเซลของสมองและทำให้สิ้นชีวิตในเวลาเพียง 2-3 นาที	ถ้าช่วยปฐมพยาบาลด้วยการให้ลมหายใจโดยทางปากอย่างทันท่วงที อาจทำให้หัวใจกลับทำงานได้ดังเดิม
50-1,000 mA	1. มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท 2. หัวใจเริ่มเต้นในลักษณะไม่ประสานงานกัน ไม่เป็นจังหวะ	ใช้เครื่องที่ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจหยุดอาการกระตุก หรือหดตัว ปฐมพยาบาลด้วยการนวดหัวใจและการเป่าปาก
กระแสปริมาณที่สูงกว่าที่กล่าวมาแล้ว	1. กล้ามเนื้อไหม้อย่างรุนแรง 2. กล้ามเนื้อหัวใจไม่กระตุก 3. เกิดการรวมตัวของ Myoglobin มีลักษณะเป็นน้ำเมือกขึ้นทั่วไปในเนื้อ ซึ่งมีผลให้กล้ามเนื้อไม่ทำงาน	จำเป็นต้องได้รับการดูแลจากแพทย์อย่างดี ให้ดื่มโซเดียมไบคาร์บอเนต

ผลของกระแสที่มีผลต่อร่างกายแสดงไว้ในตารางที่ 1[1]. การพิจารณาในทางปฏิบัติจุดที่เริ่มการผิดปกติของหัวใจเป็นส่วนที่สำคัญในการศึกษาตะแกรงต่อลงดิน ดังนั้นตะแกรงต่อลงดินจะต้องถูกออกแบบให้มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสที่จุดนี้ (ตำแหน่งเริ่มทำให้การทำงานของหัวใจเริ่มผิดปกติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้การทดสอบในเรื่องนี้จะได้ทดลองกับสัตว์ซึ่งมีน้ำหนักและหัวใจมาเปรียบเทียบกับมนุษย์ แต่ผลนั้นก็เป็นสิ่งยอมรับสำหรับมนุษย์ ซึ่งจากการศึกษาแล้วประมาณ 99.5 เปอร์เซ็นต์สำหรับมนุษย์ที่มีร่างกายปกติ (50 กิโลกรัม) จะสามารถทนกระแสที่ผ่านหัวใจได้ตามสมการที่ 1 [2].

$$I_b = 0.116/\sqrt{T} \quad \text{.....(1)}$$

โดยที่ I_b = กระแสของร่างกายมากที่สุดที่ทนได้ (แอมแปร์)

T = ช่วงเวลาการไหลของกระแส (วินาที)

3.2 ขอบเขตความปลอดภัย ขอบเขตความปลอดภัยที่จะกล่าวต่อไปนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 ซึ่งแสดงความต้านทานสมมูลย์ของแต่ละชนิด ภาพที่ 3 แสดงการสัมผัสแบบแรงดันสัมผัส (Touch Voltage) กระแสจะไหลจากมือไปสู่ขาทั้งสองข้าง ส่วนภาพที่ 4 เป็นการสัมผัสแบบแรงดันย่างก้าว (Step Voltage) กระแสจะไหลจากเท้าข้างหนึ่งผ่านร่างกายสู่เท้าอีกข้างหนึ่ง แต่ละกรณีจะมีกระแสที่ไหลผ่านร่างกายซึ่งไหลโดยความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B โดยทั่ว ๆ ไป แรงดันสัมผัส (Touch Voltage) จะทำให้เกิดอันตรายมากกว่าแรงดันไฟฟ้าแบบย่างก้าว (Step Voltage) ค่าที่อันตรายของแรงดันสัมผัสจะเกิดขึ้นที่จุดหรือบริเวณกึ่งกลางของร่องตาข่าย (Mesh) ที่มุมด้านใดด้านหนึ่งของตะแกรงต่อลงดิน ในทางปฏิบัติจะมีการคำนวณหาค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบตะแกรงต่อลงดิน และส่วนใหญ่ในกรณีถ้าออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีความปลอดภัยแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าย่างก้าวก็จะมีความปลอดภัยตามไปด้วยยกเว้นในกรณีบริเวณนอกตะแกรงต่อลงดิน

. เนื่องจากร่างกายมนุษย์ของมนุษย์จะเปรียบเสมือนกับความต้านทานสายหนึ่ง (Branch) ในกรณีที่เกิดความผิดปกติทางระบบไฟฟ้า ดังนั้นความต้านทานนี้จะต้องถูกนำมาพิจารณาหากระแสที่ไหลผ่านในร่างกายด้วย โดยทั่วไปความต้านทานที่เกิดจากการสัมผัสของมือและเท้าจะมีค่าน้อยมากและสามารถตัดทิ้งได้ แต่อย่างไรก็ดีความต้านทานของเท้า (Foot Resistance) จะเป็นตัวสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณา ซึ่งได้เปรียบเท้าของมนุษย์เป็นอิเลคโตรดแบบแผ่นวงกลมที่มีรัศมี 8 เซนติเมตร วางบนพื้นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s และมีค่าความต้านทานประมาณ $3\rho_s$ ลักษณะของเท้าที่ขนานกันจะมีความต้านทานเท่ากับ $1.5\rho_s$ และลักษณะของเท้าที่อนุกรมกันจะมีความต้านทานเท่ากับ $6\rho_s$ ดังนั้นวงจรความต้านทานส่วนที่มีร่างกายคนเป็นส่วนประกอบสำหรับแรงดันสัมผัสตามสมการที่ (2) [2].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

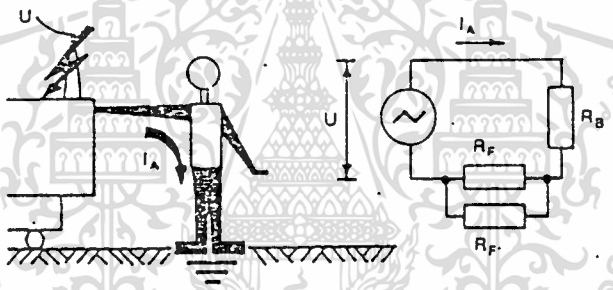
$$R = 1{,}000 + 1.5\rho_s \quad \text{.....(2)}$$

สำหรับแรงดันย่างก้าวตามสมการที่ (3) [2].

$$R = 1{,}000 + 6\rho_s \quad \text{.....(3)}$$

ซึ่งตัวประกอบ 1,000 นั้นคือค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Body Resistance) คิดที่น้ำหนักบุคคลเฉลี่ย 50 กิโลกรัม

ภาพที่ 3

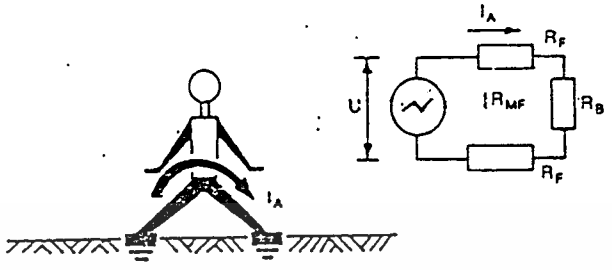


วงจรสมมูลย์ของแรงดันสัมผัส

แต่เนื่องจากค่าแรงดันทางไฟฟ้ามีความง่ายต่อการคำนวณและการวัดมากกว่ากระแสดังนั้นสามารถแสดงแรงดันทางไฟฟ้าได้โดยคูณกระแสของร่างกายมนุษย์ที่ทนได้ในสมการที่ (1) กับสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ ก็จะได้ค่าขอบเขตความปลอดภัยสำหรับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าย่างก้าวดังสมการที่ (4) [2].และ (5) [2].ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4



วงจรสมมูลย์ของแรงดันย่างก้าว

$$E_{touch} = (1{,}000 + 1.5\rho_s)0.116/\sqrt{T} \quad \text{.....(4)}$$

$$E_{step} = (1{,}000 + 6\rho_s)0.116/\sqrt{T} \quad \text{.....(5)}$$

ถ้าในกรณีพื้นดินในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยมีการลาดด้วยหินกรวดที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s และพื้นดินมีความสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil) มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ ρ ดังนั้นวงจรความต้านทานส่วนที่มีร่างกายคนเป็นส่วนประกอบสำหรับแรงดันสัมผัสจะได้ตามสมการที่ (6) [2].

$$R = 1{,}000 + 1.5\rho_s C_s \quad \text{.....(6)}$$

และวงจรความต้านทานส่วนที่มีร่างกายคนเป็นส่วนประกอบสำหรับแรงดันย่างก้าวจะได้ตามสมการที่ (7) [2].

$$R = 1{,}000 + 6\rho_s C_s \quad \text{.....(7)}$$

เมื่อ C_s = Reduction factor $= 1 - \dfrac{0.106[1 - \rho/\rho_s]}{2h_s + 0.106}$

h_s = ความหนาของชั้นหินกรวด (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงแรงดันทางไฟฟ้าได้โดยคูณกระแสของร่างกายมนุษย์ที่ทนได้ในสมการที่ (1) กับสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ ก็จะได้ค่าขอบเขตความปลอดภัยสำหรับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าย่างก้าวดังสมการที่ (8) [2] และ (9) [2] ตามลำดับ

$$E_{touch} = (1{,}000 + 1.5\rho_s C_s)0.116/\sqrt{T} \quad \text{.....(8)}$$

$$E_{step} = (1{,}000 + 6\rho_s C_s)0.116/\sqrt{T} \quad \text{.....(9)}$$

4. ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติ (Fault)

ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่าง ๆ บริเวณพื้นผิวดินจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 อย่างคือ

- ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity)
- กระแสผิดปกติที่ไหลลงสู่ดินที่อาจจะเกิดขึ้นได้ (Available Fault Current)
- รูปทรงทางเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Geometry)

4.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน ความต้านทานจำเพาะของดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีผลต่อการกระจายของกระแสผิดปกติลงสู่ดินบริเวณรอบตัวนำของตะแกรงต่อลงดินมาก โดยถ้าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าต่ำกระแสผิดปกติจะสามารถกระจายออกสู่พื้นดินภายในพื้นผิวดินมีค่าสูง ในทางกลับกันความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงกระแสผิดปกติก็จะกระจายออกสู่พื้นดินได้ต่ำ ทำให้ศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ที่พื้นผิวดินมีค่าสูง ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละพื้นที่หรือในพื้นที่บริเวณเดียวกันอาจมีค่าต่าง ๆ กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดิน, สภาพภูมิประเทศ, สภาพภูมิอากาศ, ความชื้นของดิน, สารเคมีที่อยู่ในดิน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2

แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ประเภทของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(ohm-meters)
ดินที่เปียกชื้น	10
ดินที่มีความชื้น	100
ดินที่มีความแห้ง	1,000
ดินที่อยู่ด้านล่างสุด	10,000

สำหรับค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นอยู่ในตารางที่ 2 [2]. โดยทั่ว ๆ ไปสำหรับการคำนวณและออกแบบมักจะถือว่าพื้นดินมีความสม่ำเสมอมีเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous or Uniform Soil) ซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าเดียวตลอดเนื้อดินนั้น เพราะคุณสมบัติของพื้นดินส่วนใหญ่มักมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในบางสภาพพื้นดินอาจจะมีลักษณะที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกันตลอด (Nonhomogeneous) การพิจารณาอาจต้องจัดให้มีโครงสร้างแบบพื้นดินหลายชั้น (Multilayer Soil) ซึ่งแต่ละชั้นก็จะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินค่าหนึ่ง ๆ

4.2 กระแสผิดปกติ (Fault Current) องค์ประกอบอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญคือกระแสผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการผิดปกติลงดิน (Ground Fault) ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะพิจารณาเฉพาะการเกิดผิดปกติแบบเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault) และแบบ 3 เฟส-ดิน (Three Phase to Ground Fault) ซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้เกิดกระแสผิดปกติลงดินสูงสุดโดยขึ้นกับจุดที่เกิดการผิดปกติลงดินด้วย เมื่อกระแสผิดปกตินี้มีค่าสูงจะพลอยทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นดินมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งกระแสผิดปกติโดยทั่ว ๆ ไปจะเป็นรูปคลื่นซายน์ (Sine Wave) ซึ่งมีระดับ DC Offset อยู่ด้วยซึ่งจะทำให้กระแสผิดปกติมีลักษณะกระแสสลับที่ไม่สมมาตร ดังนั้นกระแสผิดปกติที่คำนวณได้จะต้องนำมาคูณด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่งที่เรียกว่า Decrement Factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3

แสดงค่า Decrement Factor สำหรับใช้ในการคำนวณผลการ

ช็อคทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสสลับที่ไม่สมมาตร

ช่วงเวลาเกิดกระแสผิดปกติและการช็อค (sec.)	Decrement Factor
0.008	1.65
0.1	1.25
0.25	1.10
0.5 หรือมากกว่า	1.00

ตารางที่ 3 [2] แสดงค่า Decrement Factor เพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสสลับที่มีลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetrical AC Current) สำหรับช่วงเวลาในการเกิดกระแสผิดปกติจะพิจารณาจากค่า Clearing Time ของอุปกรณ์ป้องกันโดยขึ้นอยู่กับระบบ แต่โดยส่วนใหญ่มักจะพิจารณาจากค่าของอุปกรณ์ป้องกันหลัก (Main Protective Device)

4.3 รูปทรงเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Geometry) นอกจากองค์ประกอบที่กล่าวมาองค์ประกอบอีกอย่างหนึ่งซึ่งมีผลต่อศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ คือ รูปทรงเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งประกอบด้วย

- ความลึกในการวางตะแกรงต่อลงดิน
- ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำในตะแกรงต่อลงดิน
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในตะแกรงต่อลงดิน
- การกระจายกระแสลงสู่ดินของตะแกรงต่อลงดิน
- ตำแหน่งที่กระแสไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดิน
- อื่น ๆ

5. ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินได้ถูกพิจารณาอยู่ในแง่ของความสามารถในการกระจายของกระแสผิดปกติลงดิน ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีค่าต่ำไม่ได้เป็นสิ่งที่แสดงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยเสมอไปแต่ความต้านทานของตะแกรงต่อลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินที่สูงกว่าอาจจะมีความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยก็ได้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าต่ำกว่าขอบเขตของความปลอดภัย

6. การออกแบบระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบกราวน์หรือระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยมีไว้เพื่อให้กระแสลัดวงจรลงดิน (Ground Fault Current) ที่เกิดขึ้นไหลลงดินได้สะดวก ในขณะเกิดการลัดวงจรจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า หรือ แรงดันเกิดขึ้นในและบริเวณรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อย ถ้าผลของความต่างศักย์นี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ที่อยู่บริเวณนั้นสูงกว่าค่ากระแสที่มนุษย์ยอมรับได้ ผลอันนี้จะทำให้เกิดอาการช็อคหรือเสียชีวิตได้และผลของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ทำงานผิดพลาด

การออกแบบระบบต่อลงดินที่ดีหมายถึง การออกแบบระบบการต่อลงดินที่ทำให้แน่ใจได้ว่ามีความปลอดภัยสำหรับมนุษย์และอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device) ยังคงทำงานได้ถูกต้องทั้งในเวลาปกติและขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน การออกแบบระบบการต่อลงดินที่มีความต้านทานต่ำมาก ๆ อาจไม่ได้หมายถึงว่าจะมีความปลอดภัยสูงกว่าระบบการต่อลงดินที่มีความต้านทานสูงกว่าเสมอไป

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ถูกพัฒนาเรื่อย ๆ โดยไม่ได้ถูกกำหนดเป็นกฎเกณฑ์แนวทางในการทำระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย เช่น มาตรฐาน IEEE 80 และต่อมาได้มีการพัฒนาค้นคว้าวิจัยจึงได้มีการปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวออกมาเป็น ANSI / IEEE 80-1986 [1] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับกันโดยทั่วไป โดยจะเน้นการออกแบบระบบการต่อลงดินที่ปลอดภัยและประหยัด

6.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการต่อลงดิน มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าลงดินได้สะดวกในขณะปกติและเมื่อระบบเกิดกระแสลัดวงจร หรือเกิดแรงดันฟ้าผ่า โดยไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องมือต่าง ๆ ทำงานผิดพลาด

2. เพื่อให้รีเลย์ของอุปกรณ์ป้องกันที่สถานีไฟฟ้าสามารถรับรู้ถึงกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย

3. เพื่อให้แน่ใจว่าคนที่อยู่ใกล้เคียงกับระบบการต่อลงดินไม่ได้รับอันตรายหรือเกิดการช็อค

4. เพื่อให้มีความมั่นคงและความสม่ำเสมอในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 หลักการพิจารณาการออกแบบระบบต่อลงดิน พิจารณาการออกแบบระบบต่อลงดินตามเกณฑ์และมาตรฐานของ ANSI / IEEE Standard 80-1986. ดังนี้

1. พิจารณาข้อมูลคุณสมบัติของดิน

2. พิจารณาค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุดก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย

3. พิจารณาแรงดันย่างก้าวและแรงดันสัมผัส

4. พิจารณาความต้านทานของระบบกราวน์

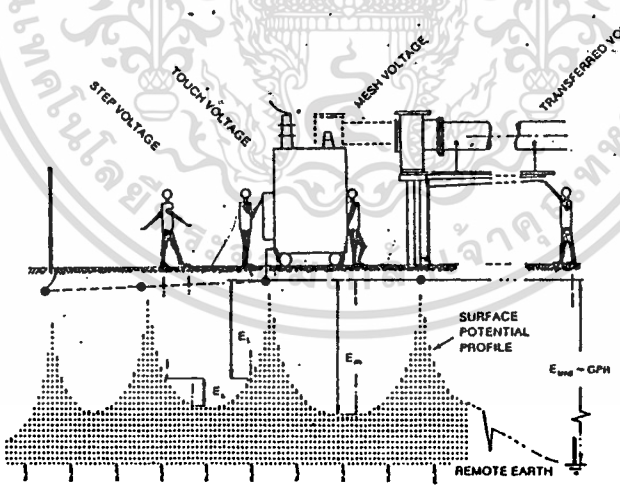
5. พิจารณาขนาดของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid)

6. พิจารณาจำนวนแท่งหลักดิน (Ground Rod) ที่ใช้ประกอบกับตะแกรงต่อลงดิน

7. พิจารณาการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นโลหะกับระบบต่อลงดินหรือระบบกราวน์ที่ได้ออกแบบและทำการติดตั้งแล้ว

6.3 นิยามแรงดันที่พบบ่อยในการออกแบบระบบกราวน์ ขณะเกิดการลัดวงจรจะทำให้เกิดความต่างศักย์เกิดขึ้นที่ผิวดินบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยดังภาพที่ 5 แรงดันที่ปรากฏในภาพที่ 5 ANSI / IEEE standard 80-1986 ได้นิยามดังนี้

ภาพที่ 5



แสดงแรงดันลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน

ในภาพที่ 5 ได้แสดงแรงดันต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน ดังนี้

1. แรงดันที่เพิ่มขึ้นของระบบกราวน์ (Ground Potential Rise : GPR) คือ แรงดันหรือความต่างศักย์สูงสุดที่เกิดขึ้นที่ระบบกราวน์ เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของดินที่อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่อย แรงดันนี้มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสที่ผ่านระบบกราวน์ลงดิน กับความต้านทานของระบบกราวน์

2. แรงดันย่างก้าว (Step Voltage) คือ แรงดันหรือความต่างศักย์ที่ผิวดินระหว่างจุดสองจุดที่มีระยะห่างกันหนึ่งเมตรหรือประมาณหนึ่งช่วงก้าวของคนโดยไม่มีส่วนอื่นของร่างกายสัมผัสกับอุปกรณ์หรือดิน

3. แรงดันสัมผัส (Touch Voltage) คือ แรงดันหรือความต่างศักย์ระหว่างระบบกราวน์กับจุดที่คนยืนอยู่ขณะมือไปสัมผัสกับโครงสร้างหรืออุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

4. แรงดันร่องตาข่าย (Mesh Voltage) คือ แรงดันสัมผัสสูงสุดที่เป็นไปได้ภายในร่องตาข่าย (Mesh) ของตะแกรงต่อลงดิน

5. แรงดันทรานสเฟอร์ (Transfered Voltage) คือ แรงดันหรือความต่างศักย์ที่มาจากที่อื่นเข้าและออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของแรงดันสัมผัสนั่นเอง

6.4 ขั้นตอนการออกแบบระบบกราวน์ การออกแบบระบบกราวน์จะมีขั้นตอนการออกแบบแสดงดังภาพที่ 6 ในการพิจารณาออกแบบระบบกราวน์ซึ่งประกอบด้วย 12 ขั้นตอน [3]. ดังจะอธิบายต่อไปนี้

ภาพที่ 6 แสดงขั้นตอนที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

1. ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลที่ป้อนเข้า (Input Data)

โดยทั่วไปเราจะทราบพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย Area(x,y) ส่วนค่าของความต้านทานจำเพาะของดินได้จากการทดสอบโดยวิธี Wenner Four Point Method ความต้านทานจำเพาะของหินได้จากค่ามาตรฐานของวัสดุที่นำมาโรยเช่น หินเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วจะมีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ 2,000-3,000 โอห์ม-เมตร

2. ขั้นตอนที่ 2 ขนาดของตัวนำ (Conductor Size)

ขนาดของตัวนำจะเริ่มใช้ที่ AWG. เบอร์ 2/0 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.266 มิลลิเมตร จนไปถึงขนาด AWG. เบอร์ 5/0 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12.7 มิลลิเมตร แต่โดยทั่วไปใช้ขนาด AWG. เบอร์ 4/0 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 11.684 มิลลิเมตร

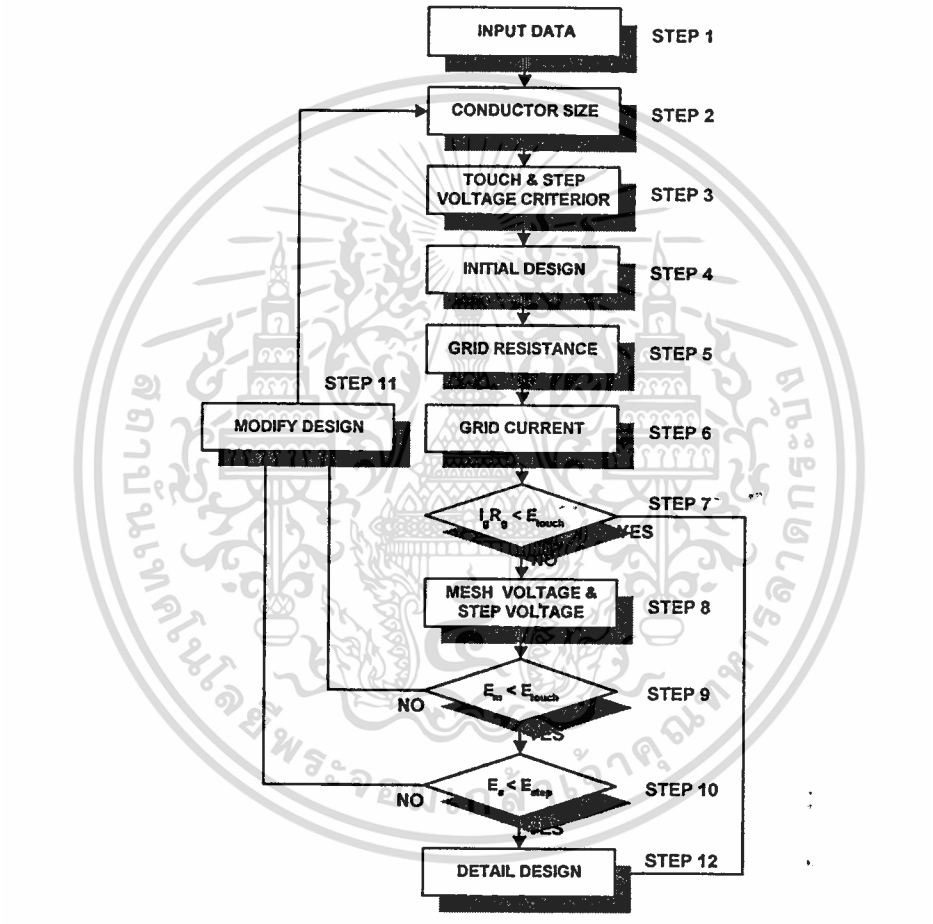
3. ขั้นตอนที่ 3 การพิจารณาแรงดันสัมผัสและแรงดันย่างก้าว (Touch and Step Voltage Criteria) แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าย่างก้าวจะเป็นตัวกำหนดมาตรฐานความปลอดภัย ในที่นี้จะกำหนดน้ำหนักของบุคคลที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 50 กิโลกรัมเป็นอย่างต่ำจะได้ขอบเขตของความปลอดภัยดังสมการที่ (4), (5), (8) และ (9) ดังกล่าวมาแล้วตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขั้นตอนที่ 4 การออกแบบเบื้องต้น (Initial Design)

การออกแบบเบื้องต้นเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุดเราเริ่มจากการหาค่าความยาวของตัวนำที่น้อยที่สุดแล้วจึงนำมาจัดรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินตามสมการที่ (10) [2].

แผนภูมิที่ 6



แสดงขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบกราวน์

$$L_{min} = K\rho I_g\sqrt{T}/(116 + 0.174\rho_s C_s) \quad \text{.....(10)}$$

เมื่อ L_{min} = ความยาวของตัวนำที่น้อยที่สุดที่จะนำไปทำเป็นตะแกรงต่อลงดิน (m)

I_g = กระแสที่ไหลผ่านตะแกรงต่อลงดินที่มากที่สุด (Max. Grid Current) (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = เวลาของการ Interrupt ของอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า (Sec)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (โอห์ม-เมตร)

C_s = Reduction Factor

K = แฟคเตอร์ตัวปรับค่า (Correction Factor) กรณีที่ดินไม่สม่ำเสมอ (Nonhomogeneous Soil) จะมีค่าประมาณ 1.2 ถึง 1.3 สำหรับดินที่สม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil) K ที่ใช้ในการคำนวณมีค่า 1

เมื่อได้ค่า L_{min} แล้วทำการกำหนดระยะของร่องตาข่ายโดยให้ระยะระหว่างร่องตาข่ายมีความยาวเท่ากัน ในกรณีที่ไม่มีหินกรวดโรยบนพื้นดินความยาวของตัวนำต่ำสุดในสมการที่ (10) นั้น พจน์ $\rho_s C_s$ จะเปลี่ยนเป็น ρ

5. ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance)

คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 โดยสูตรที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินคือสูตรของ Salama

6. ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสที่ไหลลงตะแกรงต่อลงดิน (Grid Current)

ในขั้นตอนนี้จะพิจารณากระแสที่มากที่สุดที่จะไหลผ่านตะแกรงต่อลงดินดังสมการที่ (11) [2].

$$I_g = D_f S_f I_f \quad \text{.....(11)}$$

เมื่อ I_g = กระแสที่ไหลผ่านตะแกรงต่อลงดินที่มากที่สุด (Max. Grid Current) (A)

D_f = แฟคเตอร์ตัวลด (Decrement Factor) แฟคเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่เกิด Fault พิจารณาค่าจากตารางที่ 3 แฟคเตอร์นี้แสดงถึงผลของกระแส DC ที่เกิดขึ้นช่วงแรก ๆ ของการเกิด Fault และลดลงอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมา

S_f = แฟคเตอร์ตัวแบ่งกระแส (Current Division Factor) โดยปกติมีค่าประมาณ 0.5-0.7 S_f ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัวเช่น

(1) ตำแหน่งที่เกิด Fault

(2) ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

(3) สายกราวน์บนสายส่ง, สายนิวทรอนที่เชื่อมต่อกับระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

I_f = กระแสลัดวงจรลงดิน (Ground Fault Current) (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่า Grid Potential Rise (GPR) (Volt)

ตรวจสอบค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นของตะแกรงต่อลงดิน ถ้าน้อยกว่าแรงดันสัมผัส แสดงว่าความยาวของตัวนำและรูปทรงของตะแกรงต่อลงดินอยู่ในขอบเขตความปลอดภัย แต่ถ้ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันสัมผัสต้องทำการตรวจสอบค่าของแรงดันร่องตาข่าย (Mesh Voltage) และแรงดันย่างก้าวสูงสุด (Max. Step Voltage) ต่อไป

8. ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่าแรงดันร่องตาข่าย (Mesh Voltage) และแรงดันย่างก้าวสูงสุด (Max. Step Voltage) คำนวณค่าแรงดันร่องตาข่ายและแรงดันย่างก้าวสูงสุดโดยวิธีอย่างง่ายโดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. จำนวน Mesh ในแต่ละด้านของตะแกรงต่อลงดิน (n) ≤ 25
2. ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน (h) โดยที่ $0.25 \leq h \leq 2.5$ เมตร
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (d) $< 0.25h$
4. ขนาดของร่องตาข่ายหนึ่ง ๆ (D) > 2.5 เมตร

โดยที่ Mesh Voltage (E_m) และ Max. Step Voltage (E_s) นิยามได้ตามสมการที่ (12) [2] และ (13) [2].

$$E_m = \rho K_m K_i I_g / L \quad \text{.....(12)}$$

$$E_s = \rho K_s K_i I_g / L \quad \text{.....(13)}$$

เมื่อ K_m = Spacing factor สำหรับคำนวณ mesh voltage

K_s = Spacing factor สำหรับคำนวณ max. step voltage

K_i = Corrected factor สำหรับรูปร่างทางเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน

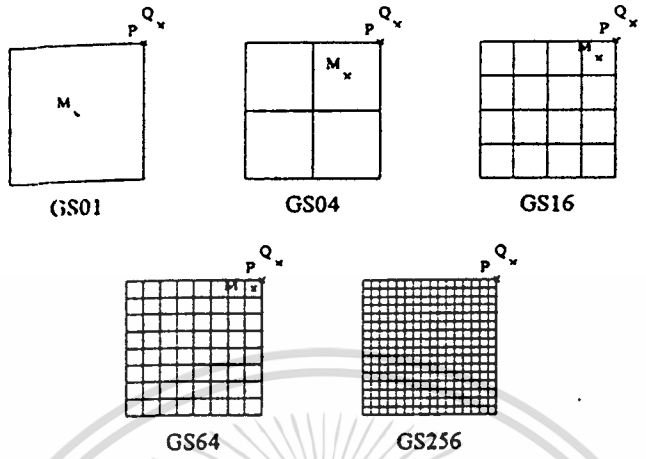
ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

I_g = Max. Grid Current (A)

L = ความยาวทั้งหมดที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 7



แสดงตำแหน่งที่เกิดแรงดันร่องตาข่ายและแรงดันย่างก้าวสูงสุด

ภาพที่ 7 แสดงตะแกรงต่อลงดินและจุดที่เกิด Mesh Voltage (จุด M ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของร่องตาข่ายที่มุมทั้ง 4 ของตะแกรงต่อลงดิน) และ Max. Step Voltage (ระหว่างจุด P และ Q ระยะห่าง 1 เมตร ตามแนวเส้นทะแยงมุมของตะแกรงต่อลงดิน)

9. ขั้นตอนที่ 9 เปรียบเทียบค่าแรงดันร่องตาข่าย (Mesh Voltage) กับแรงดันสัมผัส (Touch Voltage) ตรวจสอบค่าของแรงดันร่องตาข่าย ถ้าน้อยกว่าแรงดันสัมผัสแสดงว่าการออกแบบอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยแล้ว แต่ถ้ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันสัมผัสต้องปรับปรุงค่าขนาดของตัวนำ, ความลึกของการฝังตะแกรงต่อลงดิน, ความหนาของชั้นหินกรวด, ขนาดของตะแกรงต่อลงดินและจำนวนร่องตาข่ายใหม่ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ 11

10. ขั้นตอนที่ 10 เปรียบเทียบค่าแรงดันย่างก้าวสูงสุด (Max. Step Voltage) กับแรงดันย่างก้าว (Step Voltage) ตรวจสอบค่าของแรงดันย่างก้าวสูงสุด ถ้าน้อยกว่าแรงดันย่างก้าวแสดงว่าการออกแบบอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยแล้ว แต่ถ้ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันย่างก้าวต้องปรับปรุงค่าขนาดของตัวนำ, ความลึกของการฝังตะแกรงต่อลงดิน, ความหนาของชั้นหินกรวด, ขนาดของตะแกรงต่อลงดินและจำนวนร่องตาข่ายใหม่ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ 11

11. ขั้นตอนที่ 11 เป็นขั้นตอนการปรับปรุง (Modify) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบกราวน์ ได้แก่ ขนาดของตัวนำ, ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน, ความหนาของชั้นหินกรวด, ขนาดของตะแกรงและจำนวนร่องตาข่าย ทำได้โดยการเพิ่มขนาดของตัวนำ, เพิ่มความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน, เพิ่มความหนาของชั้นหินกรวด, เพิ่มขนาดของตะแกรงต่อลงดิน และเพิ่มจำนวนร่องตาข่ายในแต่ละด้านของตะแกรงต่อลงดิน

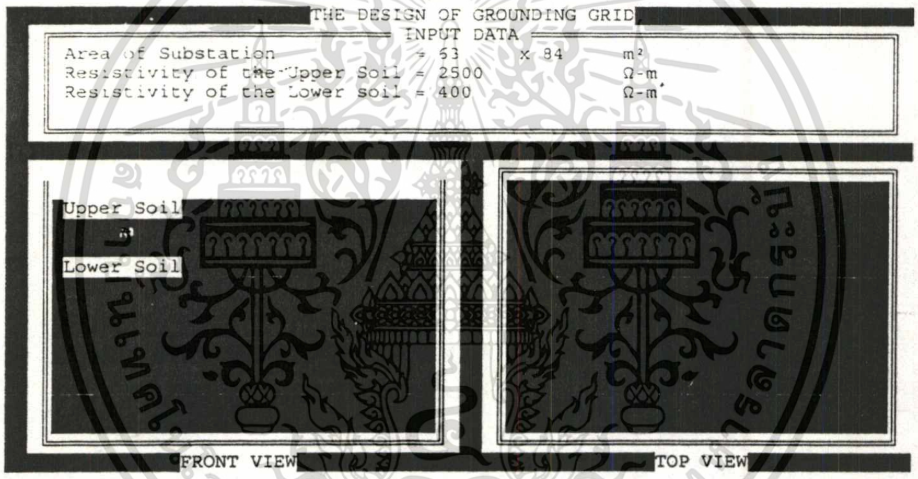
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ขั้นตอนที่ 12 การออกแบบรายละเอียด (Detail Design)

เมื่อได้รูปทรงของตะแกรงต่อลงดินแล้วนำไปจัดทำแบบรายละเอียดของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยที่อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกส่วนต้องต่อเชื่อมกับระบบต่อลงดินถึงกันหมด สำหรับตำแหน่งของหม้อแปลงกำลัง (Power Transformer), เสาล่อฟ้า (Lightning Arrester) และโครงสร้างโลหะควรเพิ่มแท่งหลักดิน (Ground Rod) ใกล้ ๆ อุปกรณ์ดังกล่าวด้วย.

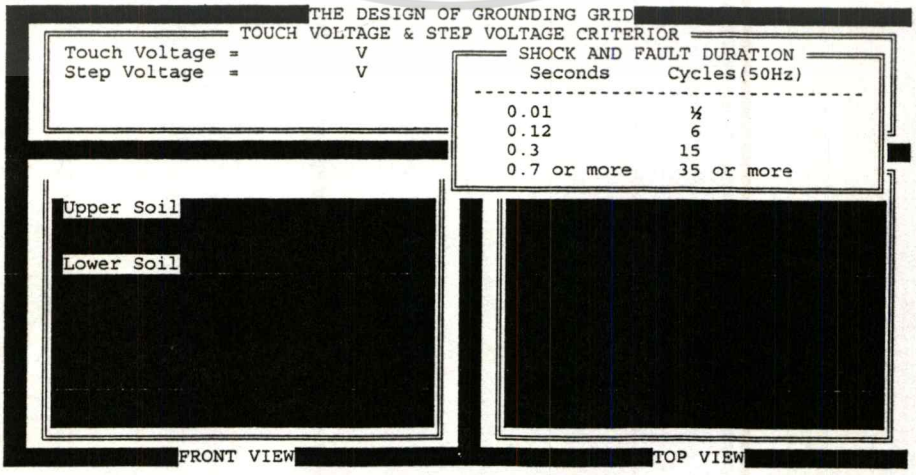
จากขั้นตอนการออกแบบระบบกราวน์ทั้ง 12 ขั้นตอนเมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาปาสคาลออกแบบระบบกราวน์ (ภาคผนวก ก. แสดงโปรแกรมภาษาปาสคาลที่ใช้ในการออกแบบระบบกราวน์) ดังตัวอย่างที่ 1 โดยการป้อนอินพุทดังภาพที่ 8 ถึง 10 และจะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 11

ภาพที่ 8



แสดงการป้อนค่าพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย, ρ_1 และ ρ_2

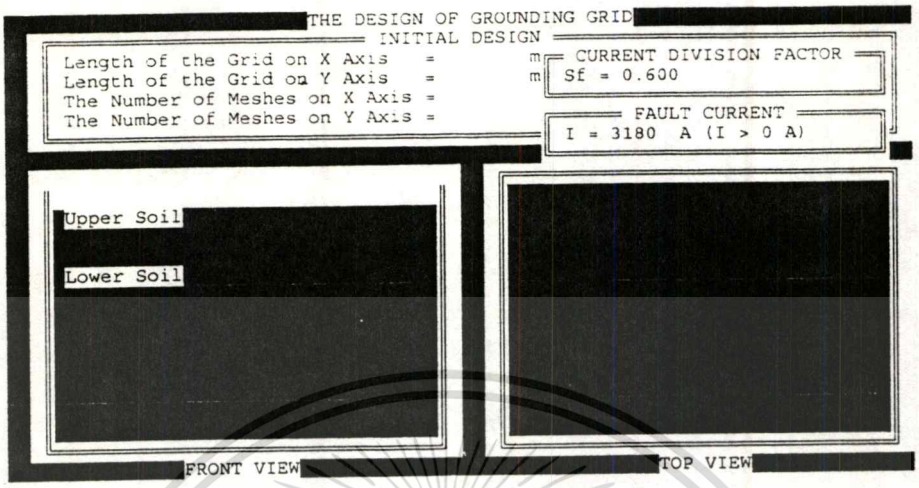
ภาพที่ 9



แสดงช่วงเวลาที่เกิด fault สำหรับตัวอย่างที่ 1

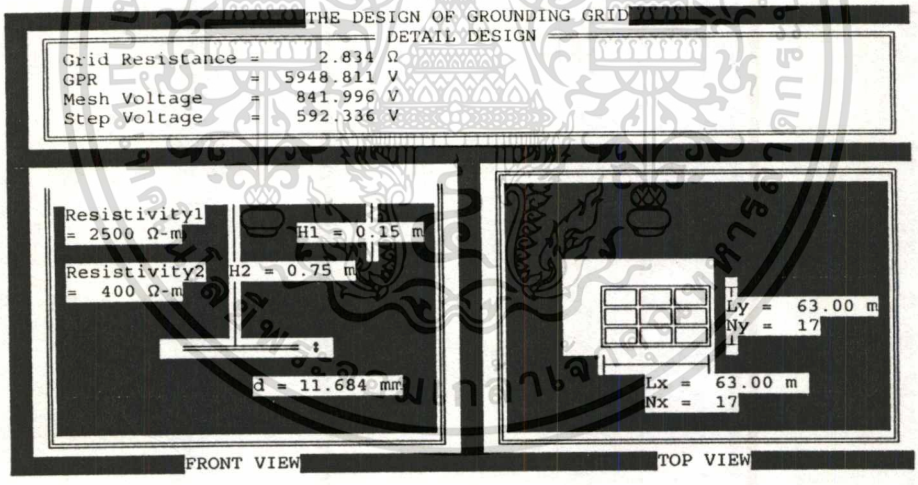
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 10



แสดงค่า S_f และ I_f สำหรับตัวอย่างที่ 1

ภาพที่ 11



แสดงผลการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์ตัวอย่างที่ 1

ภาพที่ 11 เป็นผลการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์โดยป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 8 ถึง 10 ซึ่งประกอบด้วย

1. พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย = 63*84 เมตร
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_1) = 2,500 โอห์ม-เมตร
3. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ_2) = 400 โอห์ม-เมตร
4. เวลาที่เกิดกระแสลัดวงจรหรือเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันทำงาน = 0.3 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ค่าแฟคเตอร์ตัวแบ่งกระแส (S_f) = 0.6

6. กระแสลัดวงจรลงดิน (I_f) = 3,180 แอมแปร์

โดยผลการรันโปรแกรมจะได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 11 ซึ่งประกอบด้วย

1. ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (R_g) = 2.834 โอห์ม

2. Grid Potential Rise (GPR) = 5,848.811 โวลท์

3. แรงดันร่องตาข่าย (E_m) = 841.996 โวลท์

4. แรงดันย่างก้าวสูงสุด (E_s) = 592.336 โวลท์

5. ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน = 63*63 เมตร

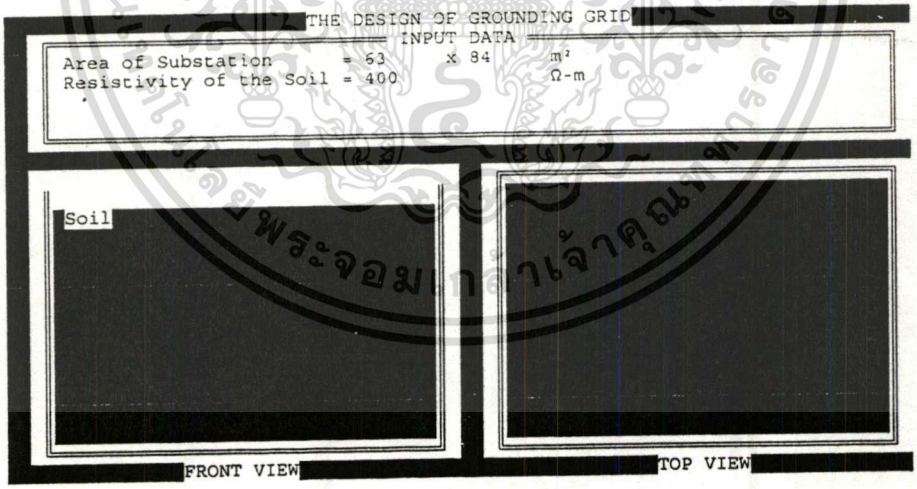
6. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (d) = 11.684 มิลลิเมตร

7. จำนวนร่องตาข่าย (N) ทางด้านแกน x และแกน y ของตะแกรงต่อลงดิน = 17 ร่องตาข่าย

8. ความหนาของชั้นหินกรวด (H_1) = 0.15 เมตร

9. ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน (H_2) = 0.75 เมตร

ภาพที่ 12

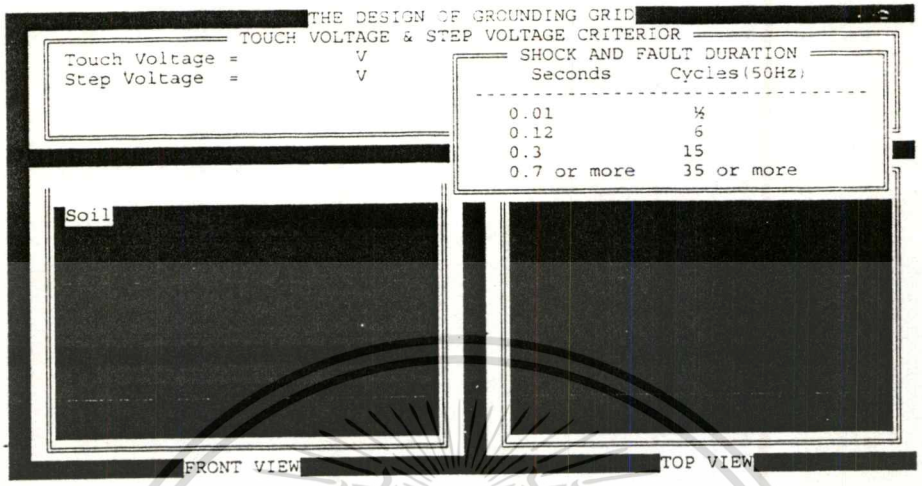


แสดงการป้อนค่าพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยและ ρ

ตัวอย่างที่ 2 โดยการป้อนอินพุทดังภาพที่ 12 ถึง 14 เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบระบบกราวน์จะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 15

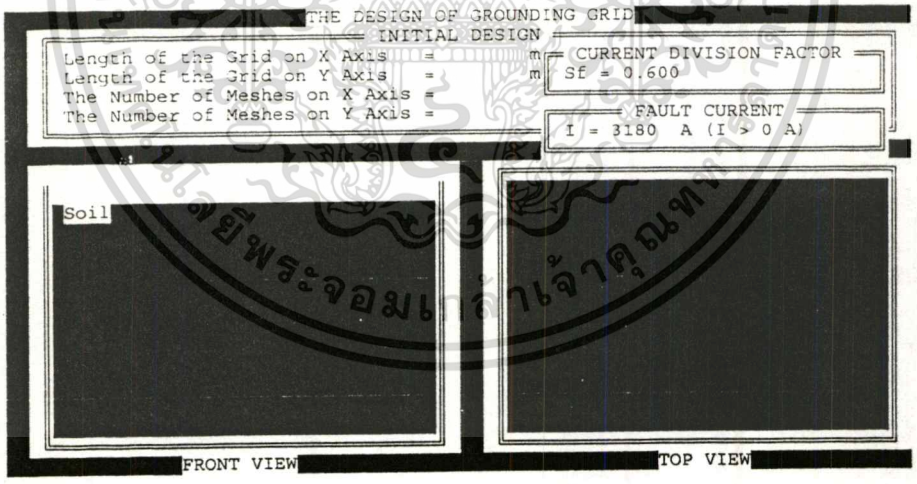
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 13



แสดงช่วงเวลาที่เกิด fault สำหรับตัวอย่างที่ 2

ภาพที่ 14



แสดงค่า S_f และ I_f สำหรับตัวอย่างที่ 2

ภาพที่ 15 เป็นผลการรันโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์โดยป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 12 ถึง 14 ซึ่งประกอบด้วย

1. พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย = 63*84 เมตร
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) = 400 โอห์ม-เมตร

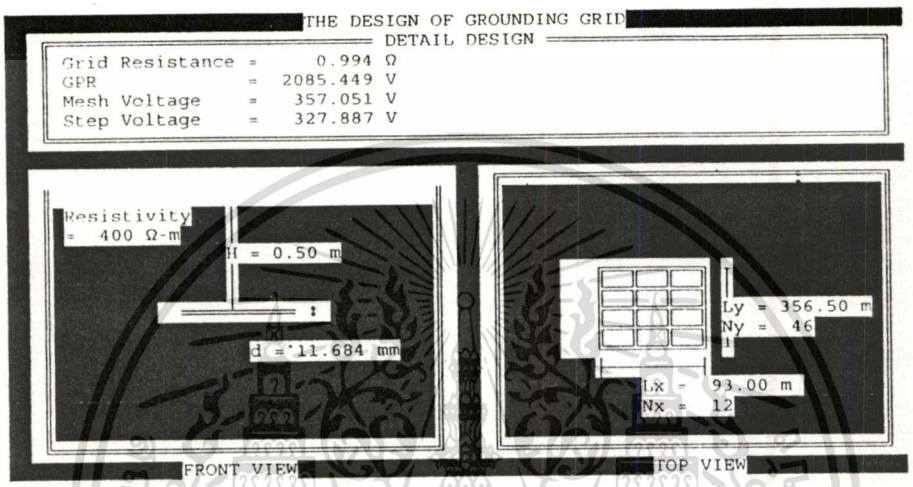
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เวลาที่เกิดกระแสลัดวงจรหรือเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันทำงาน = 0.3 วินาที

4. ค่าแฟคเตอร์ตัวแบ่งกระแส (S_f) = 0.6

5. กระแสลัดวงจรลงดิน (I_f) = 3,180 แอมแปร์

ภาพที่ 15



แสดงผลการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์ตัวอย่างที่ 2

โดยผลการรันโปรแกรมจะได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 15 ซึ่งประกอบด้วย

1. ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (R_g) = 0.994 โอห์ม
2. ค่า Ground Potential Rise (GPR) = 2,085.449 โวลท์
3. ค่าแรงดันร่องตาข่าย (E_m) = 357.051 โวลท์
4. ค่าแรงดันย่างก้าวสูงสุด (E_s) = 327.887 โวลท์
5. ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน = 93*356.50 เมตร
6. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (d) = 11.684 มิลลิเมตร
7. จำนวนร่องตาข่าย (N) ทางด้านแกน x และแกน y ของตะแกรงต่อลงดิน = 12 และ 46 ร่องตาข่าย ตามลำดับ
8. ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน = 0.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 15 ซึ่งเป็นผลการรันโปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์อีกตัวอย่างหนึ่งโดยไม่มีการใช้หินกรวดโรยบนพื้นดินซึ่งเปรียบเทียบผลการออกแบบกับตัวอย่างที่แล้วซึ่งอินพุทที่ป้อนให้กับโปรแกรมเหมือนกันจะเห็นได้ว่าหินกรวดที่ใช้นั้นทำให้เพิ่มค่าความต้านทานของเท้าทำให้เพิ่มขอบเขตความปลอดภัยให้กับมนุษย์และตะแกรงต่อลงดินที่ใช้ทำระบบกราวน์จะมีขนาดเล็กกว่าและความยาวของตัวนำที่ใช้น้อยกว่าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance)

1. การพิจารณาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินเป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณาออกแบบระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อยเนื่องจากเป็นทางผ่านของกระแสผิดปกติลงดินได้สะดวก ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินต่ำมาก ๆ ไม่ได้บอกถึงว่าระบบกราวน์ที่ได้ออกแบบไว้มีความปลอดภัยเสมอไปต้องขึ้นอีกกับปัจจัยอย่างอื่นด้วย แต่การประมาณค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจะมีส่วนช่วยในการคำนวณหาขนาดและแผนผังของระบบกราวน์ในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วย

ตามปกติทั่วไปรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยขึ้นอยู่กับรูปร่างพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยเช่น อาจมีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า, สามเหลี่ยม, คางหมู, ตัว L และตัว T เป็นต้น แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้พิจารณาเฉพาะรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่านั้น พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินประกอบด้วย

1. ขนาดของตะแกรงต่อลงดินในแนวแกน x และแกน y
2. จำนวนร่องตาข่ายในแนวแกน x และแนวแกน y
3. ความยาวของตัวนำในตะแกรงต่อลงดิน (L)
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (d) ในตะแกรงต่อลงดิน
5. ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน
6. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

สูตรที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินได้แก่สมการของ Sverak ซึ่งใช้สำหรับระบบกราวน์ที่มีพื้นที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรากฏอยู่ในมาตรฐาน ANSI / IEEE Standard 80-1986. คือสมการที่ (14) [2].

$$R_g = \rho(1/L + (1 + 1/(1 + h \sqrt{(20/A)})) / \sqrt{(20A)}) \quad \text{.....(14)}$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของระบบกราวน์ (โอห์ม)

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

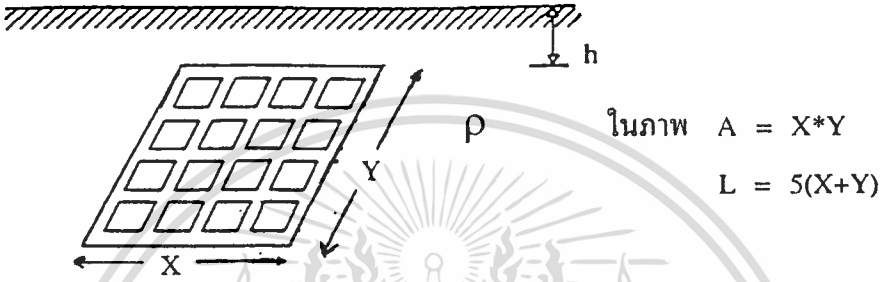
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย (ตารางเมตร)

h = ความลึกของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

L = ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ประกอบเป็นตะแกรงต่อลงดิน

ภาพที่ 16



แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับ R_g สำหรับสูตร Sverak

ภาพที่ 16 แสดงตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสูตรของ Sverak

สูตรการคำนวณของ Sverak เป็นแบบทั่วไป และให้ค่าที่ถูกต้องของค่าความต้านทานสำหรับตะแกรงที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมมุมฉาก สูตรการคำนวณนี้นำความลึกของการฝังตะแกรงมาคำนวณด้วย สำหรับรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินที่เป็นรูปร่างอื่น ๆ เช่น รูปสามเหลี่ยม, รูปสี่เหลี่ยมคางหมู, รูปตัว L และรูปตัว T เป็นต้น สูตรการคำนวณของ Thapar เป็นสมการที่เหมาะสมในการคำนวณดังสมการที่ (15) [4].

$$R_g = \rho\left(\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\left(1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}\right)} \right) / \sqrt{20A} \times 1.52\left(2\ln\left(\frac{L_p}{\sqrt{2A}}\right) - 1 \right)\sqrt{\frac{A}{L_p}} \quad \text{.....(15)}$$

โดยที่ L_p = ความยาวเส้นรอบรูปของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

L_t = ความยาวทั้งหมดของตัวนำที่ใช้ในตะแกรง (เมตร)

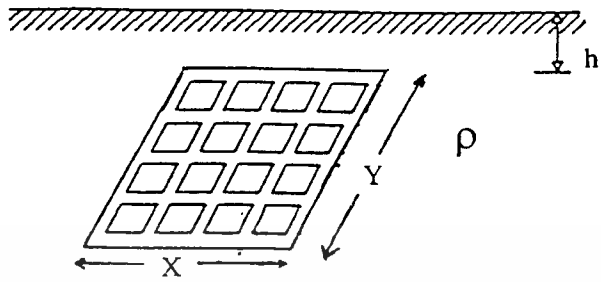
A = พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน (ตารางเมตร)

h = ความลึกของการฝังตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 17



ในภาพ $A = X*Y$

$L_p = 2(X+Y)$

$L_t = 5(X+Y)$

แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับ R_g สำหรับสูตร Thapar

ภาพที่ 17 แสดงตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสูตรของ Thapar

ทั้งสมการของ Sverak และ Thapar ใช้ได้ดีในดินแบบดินชั้นเดียวหรือดินที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil)

สำหรับอีกสมการที่เหมาะสมในการคำนวณหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินคือสูตรของ Salama ดังสมการที่ (16) [5].

$$R_g = \rho(\sqrt{(\pi/16A)} + \ln(0.165\Delta l/ed)/2\pi L)(1 - 2.256h/\sqrt{A}) \quad \text{.....(16)}$$

โดยที่ $\Delta l = (\Delta l_x \Delta l_y)^{1/2}$

Δl_x = ความยาวของหนึ่งร่องตาข่ายในแนวแกน x (เมตร)

Δl_y = ความยาวของหนึ่งร่องตาข่ายในแนวแกน y (เมตร)

L = ความยาวของตัวนำทั้งหมดในตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

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

N = จำนวนร่องตาข่าย

e = 2.71828

h = ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

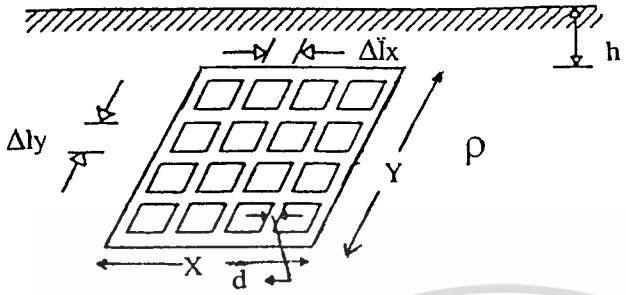
d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ในตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

A = พื้นที่ทั้งหมดของตะแกรงต่อลงดิน (ตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 18



ในภาพ A = X*Y

N = 16

แสดงตัวแปรที่เกี่ยวกับ R_s สำหรับสูตร Salama

ภาพที่ 18 แสดงตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสูตรของ Salama

ตารางที่ 4

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จำนวนร่องตาข่าย	ความยาวของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ความกว้างของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยสูตรของ Sverak (Ω)	ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยสูตรของ Thapar (Ω)
4	20	20	2.96	2.77
16	20	20	2.62	2.46
9	24	24	2.31	2.16
4	40	40	1.51	1.41
16	40	40	1.34	1.25
64	40	40	1.23	1.15
16	60	60	0.90	0.84
100	100	100	0.49	0.46
144	120	120	0.40	0.38
225	150	150	0.32	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยที่ดินมีความสม่ำเสมอมีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 100 โอห์ม-เมตร ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน 0.5 เมตร จะสังเกตได้ว่าเมื่อตะแกรงต่อลงดินมีขนาดใหญ่ขึ้นและความยาวของตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากสูตรของ Sverak และสูตรของ Thapar มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

ตารางที่ 5

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จำนวนร่องตาข่าย	ความยาวของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ความกว้างของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยสูตรของ Sverak (Ω)	ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยสูตรของ Thapar (Ω)
16	80	5	2.53	1.80
4	80	20	1.47	1.30
16	80	20	1.33	1.17
16	160	10	1.29	0.92
16	120	30	0.89	0.79
16	240	15	0.87	0.62
64	320	20	0.61	0.44
144	480	30	0.39	0.28

ตารางที่ 5 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยที่ดินมีความสม่ำเสมอมีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 100 โอห์ม-เมตร ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน 0.5 เมตร จะสังเกตเห็นว่าสูตรของ Thapar จะให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินต่ำกว่าสูตรของ Sverak เสมอ

สูตรของ Salama ในสมการที่ (16) นั้นจะใช้ในกรณีที่ดินมีความสม่ำเสมอและจะสังเกตได้ว่าในสมการนั้นค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำที่เราใช้ทำตะแกรงต่อลงดินด้วยในขณะที่สูตรของ Sverak และสูตรของ Thapar ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินนั้นจะไม่มีพารามิเตอร์ที่เป็นขนาดของตัวนำ (d) อยู่ในสมการ ดังนั้นสูตรของ Salama จึงมีความละเอียดอ่อนกว่า ดังตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส
และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.0825 เมตร

จำนวนร่องตาข่าย	ความยาวของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ความกว้างของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยสูตรของ Salama (Ω)
4	15	15	0.452
9	15	15	0.434
4	22.5	22.5	0.316
9	22.5	22.5	0.302
4	30	30	0.244
9	30	30	0.232

ตารางที่ 6 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยที่ดินมีความสม่ำเสมอมีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน 0.5 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 0.0825 เมตร

ตารางที่ 7

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส
และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.15 เมตร

จำนวนร่องตาข่าย	ความยาวของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ความกว้างของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)	ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินโดยสูตรของ Salama (Ω)
4	15	15	0.437
9	15	15	0.423
4	22.5	22.5	0.306
9	22.5	22.5	0.295
4	30	30	0.236
9	30	30	0.227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

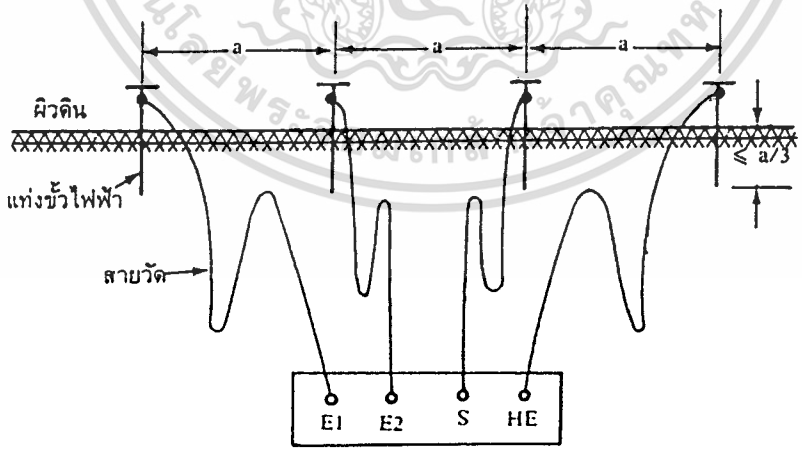
ตารางที่ 7 แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยที่ดินมีความสม่ำเสมอมีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน 0.5 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำเท่ากับ 0.15 เมตร

โดยทั่วไปในการคำนวณหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินนั้นจะสมมติว่าดินมีลักษณะสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil) มีค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ (โอห์ม-เมตร) และการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีอยู่ 3 วิธีคือ

1. วิธีการของ Wenner (Wenner's Method)

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Wenner นั้นเป็นวิธีการวัดที่ใช้แท่งขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 แท่งปักไว้บนพื้นดินที่ต้องการวัดหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยปักให้อยู่ในแนวกัน มีระยะห่างระหว่างแท่ง a เมตรทั้ง 4 เท่ากัน และปักลงที่ความลึกไม่เกิน a/3 ขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 แท่งจะต่อเข้ากับบริดจ์มิเตอร์วัดค่าความต้านทานของดิน ซึ่งมีขั้วต่อสาย 4 ขั้วเช่นกัน และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าในตัวที่มีความถี่ของแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 90 ถึง 110 Hz สายวัดที่ใช้เชื่อมต่อถึงกันระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้ากับขั้วต่อของบริดจ์มิเตอร์ปกติจะถูกม้วนเก็บเป็นขดไว้ เพราะฉะนั้นเวลาใช้จะต้องคายสายออกให้เป็นเส้นตรงทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำใด ๆ ขึ้นที่สายวัดดังภาพที่ 19 เพื่อให้ค่าที่วัดออกมามีความถูกต้อง

ภาพที่ 19



แสดงลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินวิธี Wenner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งขั้วไฟฟ้านอกสุดทั้งสองจะถูกจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ I จากบริดจ์มิเตอร์ไหลลงสู่ใต้ดิน และทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้าด้านในทั้งสอง U ซึ่งภายในตัวบริดจ์มิเตอร์จะแสดงผลจากสัดส่วนของ U/I ซึ่งเท่ากับค่าความต้านทาน R และค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ปรากฏจากการวัด ρ ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R ของดินที่วัดได้ดังสมการที่ (17) [6].

$$\rho = 2\pi aR \quad \text{.....(17)}$$

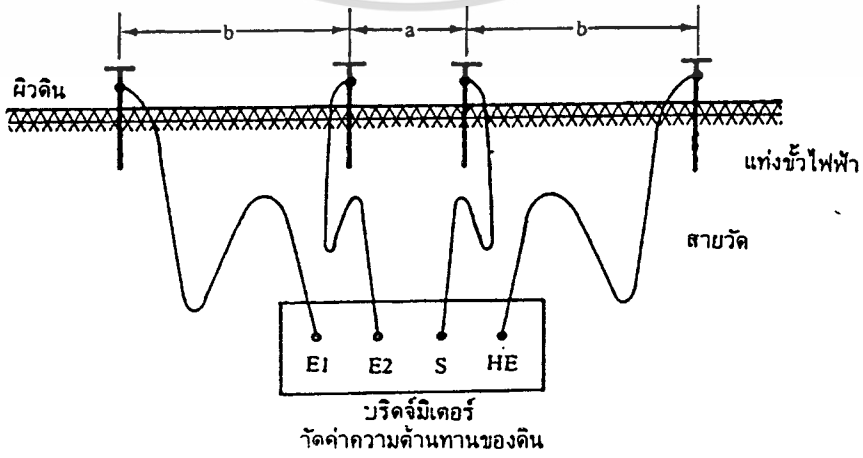
วิธีการของ Wenner นี้จะวัดค่าความต้านทานของดินจากผิวดินลงไปถึงความลึกเท่ากับระยะห่างของแท่งขั้วไฟฟ้า a และค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่หาได้ ρ ก็ไม่ใช่ผลลัพธ์จากค่าความต้านทานจำเพาะของดินในชั้นต่าง ๆ เฉลี่ย ถ้าลักษณะของดินมีลักษณะสม่ำเสมอค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากสมการที่ (17) ถือเป็นค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั่นเอง

2. วิธีการของ Schlumberger (Schlumberger's Method)

วิธีการของ Schlumberger แตกต่างไปจากวิธีของ Wenner คือระยะห่างของแท่งขั้วไฟฟ้าที่ปักอยู่ด้านในทั้งสองให้มีระยะห่าง a เมตร เช่น a = 1 เมตร และแท่งขั้วไฟฟ้าที่ปักอยู่ด้านนอกทั้งสองให้ห่างจากแท่งขั้วไฟฟ้าที่ปักอยู่ด้านในทั้งสองเท่ากับ b เมตรดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งตลอดของการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งให้ระยะห่าง a คงที่ไว้เสมอ และเปลี่ยนแปลงเฉพาะระยะห่าง b เท่านั้น ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้นำเข้าสมการที่ (18) [6]. เพื่อคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของดินที่ต้องการ

$$\rho = \pi bR(1+b/a) \quad \text{.....(18)}$$

ภาพที่ 20



แสดงการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินวิธี Schlumberger

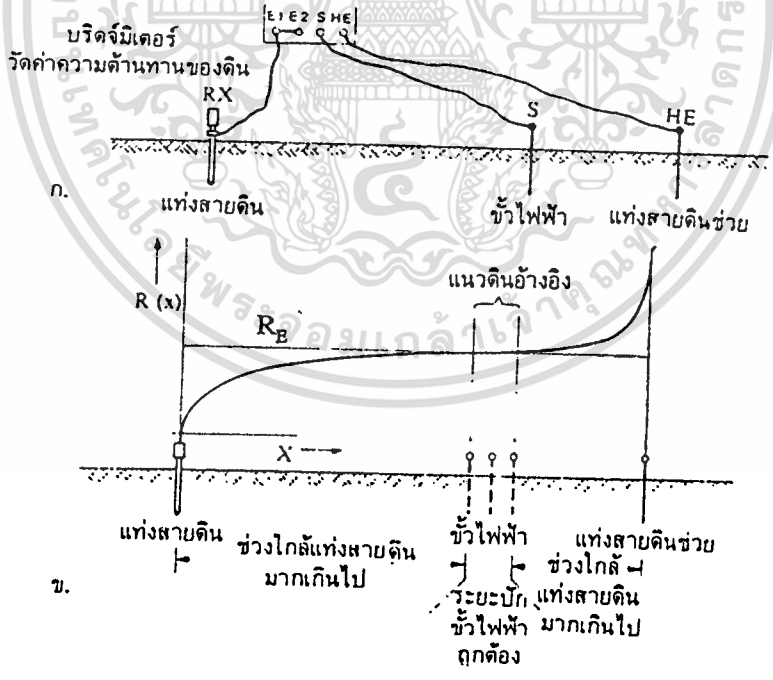
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 20 แสดงลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน วิธี Schlumberger วิธีการของ Schlumberger เหมาะสมกับการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในที่พื้นดินมีบริเวณน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่ต้องการปักแท่งขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านในทั้งสองมีจำกัด (ระยะห่าง a) ผลลัพธ์ของการวัดด้วยวิธีของ Schlumberger จะได้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินถึงที่ระดับความลึกเท่ากับระยะ b เมื่อ b > a แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้าด้านในทั้งสองจะมีค่าต่ำ ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานของดินนี้ถ้าระยะห่าง b มีค่ามากบริดจ์มิเตอร์จะต้องมีย่านวัด R ต่ำ ๆ จึงจะวัดได้

3. วิธีการใช้แท่งขั้วไฟฟ้า 3 แท่ง (Three Rod Method)

บริดจ์มิเตอร์วัดค่าความต้านทานของดินโดยใช้แท่งขั้วไฟฟ้าเพียง 3 แท่งนั้นเป็นที่นิยมมากในการวัดค่าความต้านทานแผ่กระจายของดิน R_a หรือ Z_e ของการต่อลงดินด้วยสายดินแบบแท่งและสายดินแบบเส้น การต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าและระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ภาพที่ 21



ก. แสดงลักษณะการปักแท่งขั้วไฟฟ้าของบริดจ์มิเตอร์
วัดค่าความต้านทานแผ่กระจายของดิน R_a

ข. แสดงกราฟศักย์ดาไฟฟ้าระหว่างแท่งสายดินกับแท่งสายดินช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวัดค่าความต้านทานของดินนั้นให้ต่อขั้วของบริดจ์มิเตอร์ E_1 และ E_2 รวมกันเข้ากับแท่งสายดินของระบบและปักแท่งขั้วไฟฟ้า HE ให้ทำหน้าที่เป็นแท่งสายดินช่วย เมื่อบริดจ์มิเตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ (ความถี่ไฟฟ้าแตกต่างจากความถี่ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและมีค่าไม่เกิน 150 Hz) ไหลผ่านแท่งดินทั้งสองลงสู่ดินทำให้ดินเกิดมีสนามกระแสไฟฟ้า เมื่อนำแท่งขั้วไฟฟ้า S ของบริดจ์มิเตอร์ไปปักไว้ระหว่างแท่งสายดินของระบบกับแท่งขั้วไฟฟ้า HE ซึ่งค่าความต้านทานแผ่กระจายของดินได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งสายดินของระบบกับแท่งขั้วไฟฟ้า S ต่อกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างแท่งสายดินของระบบกับแท่งสายดินช่วย HE ค่าความต้านทานแผ่กระจายที่ถูกต้องนั้นจะต้องให้แท่งขั้วไฟฟ้า S ไปปักอยู่ระหว่างแท่งสายดินของระบบกับแท่งสายดินช่วยที่ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าอีก (ตำแหน่งแนวดินอ้างอิง) หรือสามารถดูจากการแสดงผลค่าความต้านทานแผ่กระจายของดินของบริดจ์มิเตอร์มีค่าคงที่ซึ่งตำแหน่งของแท่งขั้วไฟฟ้า S จะต้องอยู่ห่างจากแท่งสายดินของระบบอย่างน้อย 20 เมตรจึงจะได้ผลลัพธ์ดังกล่าวดังแสดงในภาพที่ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การจำลองระบบกราวน์โดยใช้สเกลแฟคเตอร์และรายละเอียดของชุดทดสอบ

จุดประสงค์ในการจำลองระบบกราวน์มาทดสอบก็เนื่องจากขนาดจริงนั้นมีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นเพื่อการศึกษาจึงได้นำสเกลแฟคเตอร์มาใช้ในการย่อส่วนระบบกราวน์เพื่อใช้ในการทดสอบความต้านทานของระบบกราวน์ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 โดยจะจำลองระบบเป็นดินแบบสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil) เพื่อใช้ในการทดสอบ ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าในทางทฤษฎีด้วย

ในขณะที่มีการเพิ่มจำนวน, ขนาดและความซับซ้อนของสถานีไฟฟ้าย่อย AC จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาขั้นตอนการออกแบบที่ถูกต้องสำหรับการติดตั้งระบบกราวน์ที่ประหยัดและให้การป้องกันในระดับที่ต้องการ เทคนิคในการวิเคราะห์ด้วยข้อสมมติที่ง่ายได้ถูกใช้เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบระบบกราวน์ เทคนิคของการใช้สเกลโมเดลในถังอิเลคโตรไลติคเพื่อคำนวณค่าความต้านทานของระบบกราวน์ได้พัฒนาขึ้นมา ในการศึกษาโมเดลของระบบกราวน์ควรที่จะจำลองจากแบบจริงเท่าที่จะเป็นไปได้ซึ่งขนาดทางกายภาพของระบบกราวน์ประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, ขนาดของตะแกรงต่อลงดินและความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งจะถูกลดขนาดโดยใช้สเกลแฟคเตอร์ที่เหมือนกัน เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง โมเดลควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. สารที่ใช้เป็นตัวกลางในการทดสอบควรจะเป็นเนื้อเดียวกันสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานจำเพาะได้ ซึ่งสารที่มีคุณสมบัตินี้ได้แก่ น้ำ

2. สารที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวกลางในการทดสอบเพราะง่ายในการวัดศักดาไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนและแทนที่โมเดลของตะแกรงต่อลงดินได้ง่าย และยังสัมผัสกับลวดบาง ๆ ที่ใช้ทำโมเดลของตะแกรงต่อลงดินได้เหมาะสม

3. ขนาดของอิเลคโตรไลติคแท้งค์ควรจะใหญ่พอเพื่อลดผลของพื้นที่ที่จำกัด (Boundary Effects).

เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการด้านบน แท้งค์ขนาด 1×1×1 เมตร จะถูกใช้ในการทดสอบ น้ำจะถูกใช้สมมติแทนดินที่มีความสม่ำเสมอ และเราสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะของน้ำได้โดยใช้เกลือ NaCl และเพื่อที่จะลดผลของขนาดแท้งค์ที่จำกัดโมเดลของระบบกราวน์ควรจะน้อยกว่า 1/5 เท่าของขนาดแท้งค์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เฟรม (Frame) ที่จะใช้ในการทำโมเดลของระบบกราวน์

เฟรมที่ใช้ในการทดสอบทำด้วยแผ่น Backelite ซึ่งเจาะรูเล็ก ๆ ไว้เพื่อร้อยลวดทองแดงที่ขูดฉนวนในการทำโมเดลของตะแกรงต่อลงดินที่ประกอบด้วยร่องตาข่าย 1, 4 และ 9 ร่องตาข่าย เฟรมและโมเดลของตะแกรงต่อลงดินจะถูกวางบนแผ่นพลาสติกใสและสามารถปรับความลึกในการวางตะแกรงต่อลงดินได้โดยปรับเกลียวหมุน และเฟรมที่ใช้ในการทดสอบจะถูกวางไว้ที่กลางแท้งค์เพื่อให้การกระจายของกระแสได้สม่ำเสมอ

2. สเกลแฟคเตอร์ (Scale Factor)

ตัวจำกัดสูงสุดของสเกลแฟคเตอร์โดยปกติทั่วไปจะคำนวณจากขนาดของตัวนำที่ใช้ในการทำตะแกรงต่อลงดิน โดยปกติทั่วไปขนาดของตัวนำที่ใช้ในการทำตะแกรงต่อลงดินจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร ซึ่งถ้าขนาดของลวดที่จะใช้ในการทำโมเดลมีขนาด 0.1 มิลลิเมตรดังนั้นขนาดของสเกลแฟคเตอร์ที่ใช้ได้มีค่า 150 อย่างไรก็ตามขนาดของลวดที่ใช้ก็ไม่ได้สร้างความแตกต่างอย่างมากในการหาค่าความต้านทานของโมเดล แต่อย่างไรก็ตามสเกลแฟคเตอร์ 300 กับขนาดต่ำสุดของลวดที่ใช้ทำโมเดลเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตรสามารถใช้ได้โดยปราศจากค่า Error ที่มากนัก ดังนั้นสเกลแฟคเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้คือ 150-300 ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้ค่า 150

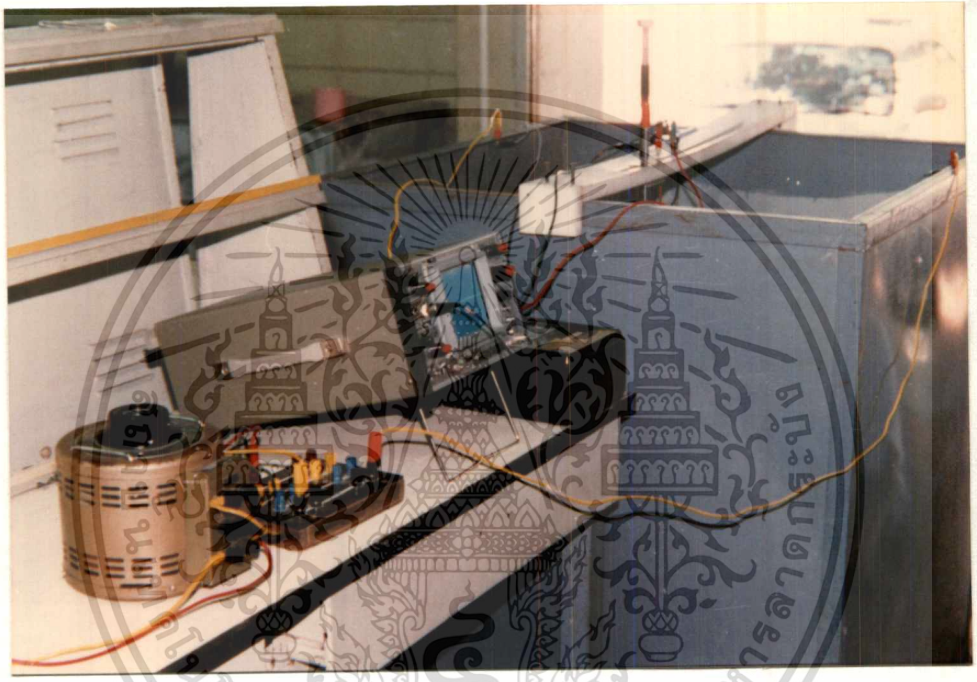
ขนาดของโมเดลที่จะใช้ในการทำตะแกรงต่อลงดินจะต้องมีขนาดน้อยกว่า 1/5 เท่าของขนาดของแท้งค์ที่ใช้ทดสอบ ดังนั้นขนาดสูงสุดของโมเดลที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินคือ 44.7×44.7 เซนติเมตร ซึ่งถ้าใช้สเกลแฟคเตอร์ 150 ดังนั้นขนาดจริงของตะแกรงต่อลงดินที่จะสามารถใช้ย่อทดสอบในแท้งค์ได้คือ 67×67 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องมือ (Instrumentation) ในการทดสอบ

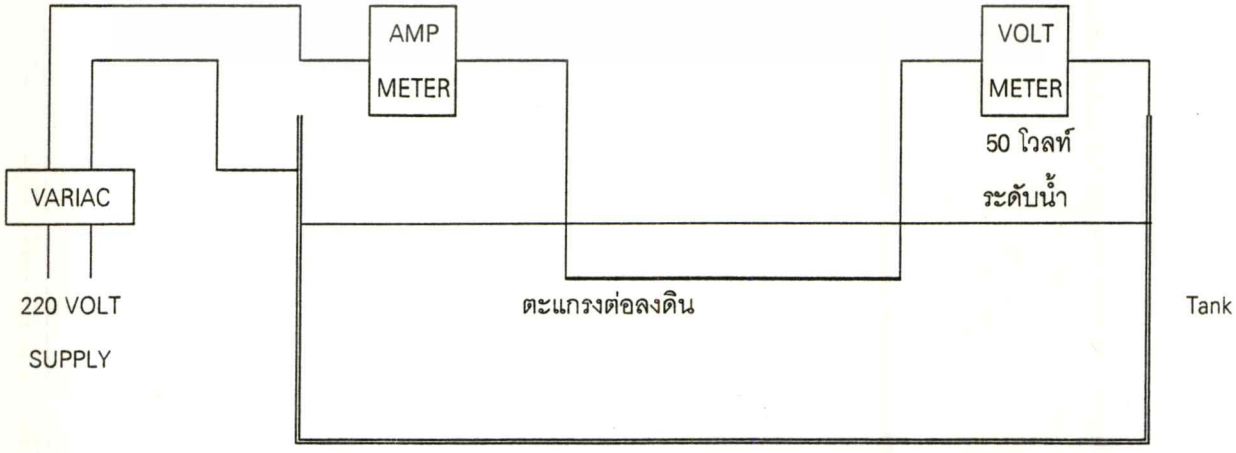
ภาพที่ 22 แสดงชุดโมเดลทั้งหมดในการทดสอบและภาพที่ 23 แสดงการต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 50 Hz จะใช้เป็นแหล่งจ่ายในการทดสอบ ภายในแท้งค์จะถูกบุด้วยแผ่น Aluminuim Foil เพื่อใช้เป็นตัวเก็บกระแสให้กลับมายังแหล่งจ่ายไฟง่ายขึ้น

ภาพที่ 22



แสดงชุดโมเดลในการทดสอบ

ภาพที่ 23



แสดงการต่อของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถูกต้องของโมเดล (Model) ในการทดสอบนั้นปัจจัยที่สำคัญในการทำให้การทดสอบผิดพลาดได้มีดังนี้

1. ขนาดที่จำกัดของแท้งค์ที่ใช้

2. รูปร่างของแท้งค์

ขนาดที่จำกัดของแท้งค์ถูกคาดว่าจะเป็นตัวทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดดังนั้นเพื่อประมาณค่า error ให้พิจารณาแท้งค์ที่ใช้เป็นรูปร่าง hemisphere ที่มีรัศมี R และโมเดลของตะแกรงที่กำลังศึกษาเป็นรูปร่างแผ่นตัวนำทรงกลมที่มีรัศมี r วางในแนวระนาบบนพื้นผิวน้ำตรงกลางแท้งค์ ความแม่น (Accuracy) ของโมเดล, A, สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (19) [7].

$$A = (R_p - R_t)/R_p \quad \text{.....(19)}$$

เมื่อ R_p = ความต้านทานของแผ่นตัวนำทรงกลม (โอห์ม)

$= \rho/4r$

R_t = ความต้านทานของแท้งค์ที่พิจารณารูปร่างเป็น hemisphere (โอห์ม)

$= \rho/2\pi R$

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวกลาง (โอห์ม-เมตร)

แท้งค์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 1×1×1 เมตร แต่ระดับน้ำที่เติมในแท้งค์เพื่อใช้ในการทดสอบมีความลึกประมาณ 60 เซนติเมตร ดังนั้นรัศมี hemisphere เฉลี่ยของแท้งค์, R, มีค่าประมาณ 60 เซนติเมตรและโมเดลของตะแกรงต่อลงดินใหญ่สุดที่ใช้ทดสอบมีขนาด 20×20 เซนติเมตร ดังนั้นรัศมีเฉลี่ยของแผ่นตัวนำทรงกลม, r, เท่ากับ 10 เซนติเมตร Accuracy (A) จะมีค่าเท่ากับ 0.894 (89.4 %)

อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. แท้งค์ ภาชนะที่ใช้ในการทดลองโดยการจำลองขนาดจริงลงมา มีขนาดดังนี้

ความยาว	1 เมตร
ความกว้าง	1 เมตร
ความลึก	1 เมตร

2. ของเหลว ในการจำลองจะใช้น้ำแทนดินด้วยเหตุผลดังนี้

1. น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่หาได้ง่ายที่สุดและมีราคาถูกที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. น้ำมีคุณสมบัติเป็นสารเอกพันธ์ (Homogeneous Substance)

3. การเปลี่ยนระดับความลึกของตะแกรงต่อลงดินทำได้ง่ายกว่าการใช้ดินจริง ๆ

4. สามารถมองเห็นผลที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองได้เพราะน้ำเป็นตัวกลางโปร่งใส

3. ตะแกรงที่ใช้ทำเป็นระบบกราวน์ในแบบจำลอง ตะแกรงที่ใช้ในการทดลองนี้ทำจากลวดทองแดงที่ขูดฉนวนและเฟรมเป็นแผ่น Backelite ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ ดังนี้

3.1 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.2 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.3 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.4 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.5 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.6 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.7 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.8 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.9 ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร, ความยาว 10 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.10 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.11 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.12 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.14 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.15 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.16 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.17 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.18 ขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร, ความยาว 15 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.19 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.20 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.21 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 0.55 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.22 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.23 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.24 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.00 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

3.25 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 1

3.26 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 4

3.27 ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร, ความยาว 20 เซนติเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 1.40 มิลลิเมตร และจำนวนร่องตาข่ายเท่ากับ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะแกรงที่ได้สร้างขึ้นมาทั้ง 27 โมเดลนั้นกำหนดขึ้นมาเองตามความเหมาะสม

4. เครื่องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ (ใช้ Conductivity Meter)

5. หม้อแปลง 1 เฟสที่สามารถปรับขนาดแรงดัน Output ได้ (Variac) ขนาด 5 แอมป์แปร์

6. แอมป์มิเตอร์ ความละเอียด 0-3 แอมป์แปร์ Class 0.5

7. โวลท์มิเตอร์ ความละเอียด 0-75 โวลท์ Class 0.5

8. Oscilloscope

9. สายไฟและกล่องต่อสาย

ในการแปลงค่าที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง (Model) ให้เป็นค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง (Real) มีสมการที่สำคัญอยู่ 5 สมการด้วยกันคือสมการที่ (20) ถึง (24) [8].

$$\mu_L = L_{Real}/L_{Model} \quad \text{.....(20)}$$

โดยที่ μ_L = สเกลแฟคเตอร์ของความยาว

L_{Real} = ความยาวในทางปฏิบัติจริง (เมตร)

L_{Model} = ความยาวที่เป็นแบบจำลอง (เมตร)

$$\mu_\rho = \rho_{Real}/\rho_{Model} \quad \text{.....(21)}$$

โดยที่ μ_ρ = สเกลแฟคเตอร์ของค่าความต้านทานจำเพาะ

- ρ_{Real} = ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในทางปฏิบัติจริง (โอห์ม-เมตร)

ρ_{Model} = ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำในแบบจำลอง (โอห์ม-เมตร)

$$\mu_I = I_{Real}/I_{Model} \quad \text{.....(22)}$$

โดยที่ μ_I = สเกลแฟคเตอร์ของค่ากระแส

I_{Real} = ค่ากระแสในทางปฏิบัติจริง (A)

I_{Model} = ค่ากระแสที่วัดได้จากแบบจำลอง (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{Real} = R_{Model} \cdot \mu_\rho / \mu_L \quad \text{.....(23)}$$

โดยที่ R_{Real} = ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินในทางปฏิบัติจริง (โอห์ม)

R_{Model} = ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่เป็นแบบจำลอง (โอห์ม)

$$V_{Real} = V_{Model} \cdot \mu_I \cdot \mu_\rho / \mu_L \quad \text{.....(24)}$$

โดยที่ V_{Real} = ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในทางปฏิบัติจริง (โวลท์)

V_{Model} = ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ในแบบจำลอง (โวลท์)

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาควบคู่ไปกับการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ

1. ค่า μ_L มีค่าเท่ากับ 150

2. ค่า μ_ρ มีค่าเท่ากับ 1 โดยค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ ($\rho_{Real} = \rho_{Model} = 15$ และ 10 โอห์ม-เมตร ตามลำดับ)

3. กำหนดให้ค่าของกระแสจริง (กระแส I_g) เท่ากับ 1 kA

ดังนั้น จะได้ว่า

1. $R_{Real} = R_{Model}/150$

2. $V_{Real} = V_{Model} \cdot \mu_I/150$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

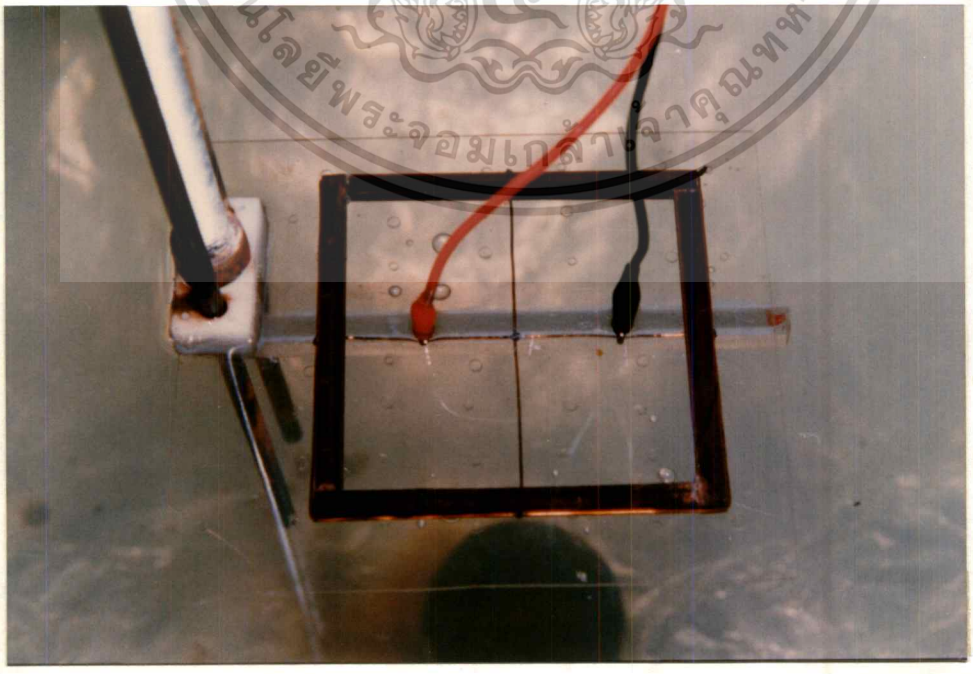
ในการทดสอบวัดค่าความต้านทานของระบบกราวน์ในดินที่มีความสม่ำเสมอโดยใช้น้ำที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ 15 โอห์ม-เมตร โดยน้ำที่ใช้นำไปหาค่าความต้านทานจำเพาะโดยใช้เครื่องมือ Conductivity Meter และได้จำลองแท้งค์น้ำในการทดสอบระบบกราวน์โดยใช้สเกลแฟคเตอร์ในการย่อส่วนต่าง ๆ ของโมเดลระบบกราวน์ลงมาเพื่อทดสอบ โดยการต่อวงจรดังภาพที่ 23 ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 และทำการทดลองตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. วางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1/3 เซนติเมตร (จาก $\mu_L = 150$ จะได้ว่าความลึกจริงของตะแกรงต่อลงดินในทางปฏิบัติเท่ากับ 50 เซนติเมตร) และทำการคงค่าแรงดัน V ที่วัดได้จากโวลท์มิเตอร์เท่ากับ 50 โวลท์

2. ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า I จากแอมป์มิเตอร์ และทำการหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่เป็นแบบจำลองได้จาก $R_{Model} = V/I$

3. นำค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากข้อ 2. หารด้วย μ_L ซึ่งมีค่าเท่ากับ 150 ก็จะได้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจริงในทางปฏิบัติ

ภาพที่ 24

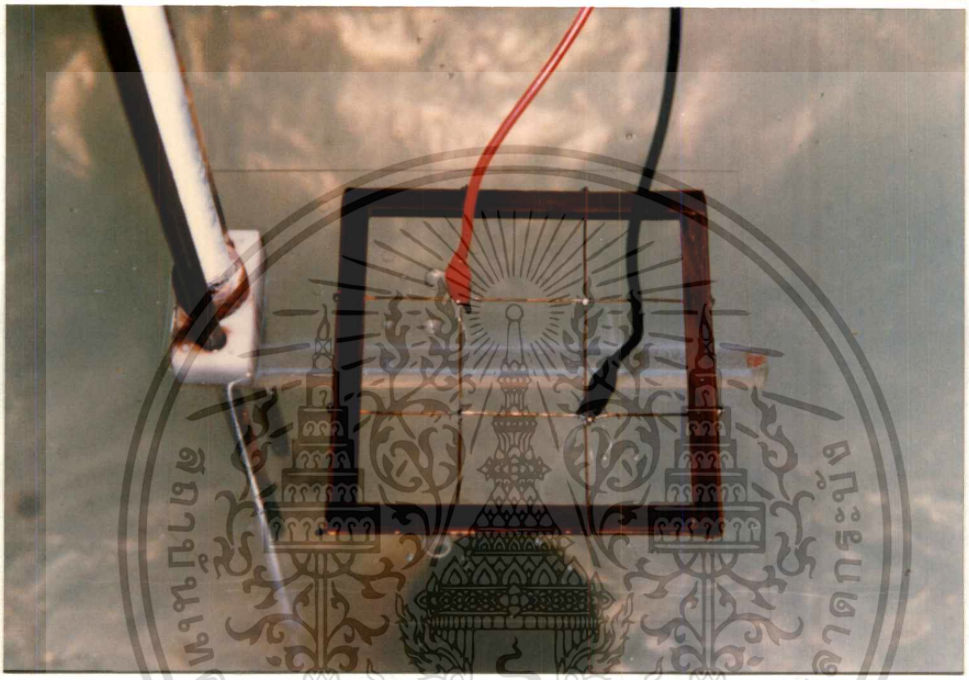


แสดงการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มี 4 ร่องตาข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 24 แสดงตัวอย่างอันหนึ่งในการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบที่ประกอบด้วย 4 ร่องตาข่าย

ภาพที่ 25



แสดงการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่มี 9 ร่องตาข่าย

ภาพที่ 25 แสดงตัวอย่างอันหนึ่งในการวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบที่ประกอบด้วย 9 ร่องตาข่าย

4. นำค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจริงเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ได้จากสูตรการคำนวณ โดยในสูตรการคำนวณขนาดของตะแกรงและขนาดของตัวนำที่ใช้ต้องคูณด้วย μ_L ซึ่งมีค่า 150 เพื่อให้ได้ขนาดของตะแกรงต่อลงดินขนาดจริงก่อนที่จะทำการแทนค่าในสูตรการคำนวณ

5. ทำการเปลี่ยนระดับความลึกของการฝังตะแกรงต่อลงดิน โดยวางแบบจำลองของตะแกรงต่อลงดินลงในน้ำที่ความลึก 2/3 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตรตามลำดับจากผิวน้ำ (ความลึกจริงในทางปฏิบัติจะเท่ากับ 1 เมตรและ 1.5 เมตรตามลำดับ) และคงค่าแรงดันที่วัดได้จากโวลท์มิเตอร์เท่ากับ 50 โวลท์อยู่ หลังจากนั้นกลับไปทำขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการเปลี่ยนขนาดของตะแกรง, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ และจำนวนร่องตาข่าย ของโมเดลอีก 26 โมเดลที่เหลือใหม่แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 ใหม่

7. ทำการเติมสาร NaCl ลงในแท้งค์น้ำและละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำที่ใช้ ทำการตักน้ำออกมาทดสอบวัดค่าโดยใช้ Conductivity Meter (แล้วจึงคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำ) ทำการเติมสาร NaCl เป็นระยะ ๆ และนำน้ำออกมาทดสอบอีกครั้งจนกระทั่งได้ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำประมาณ 10 โอห์ม-เมตร

8. เริ่มการทดลองใหม่กับโมเดลทั้ง 27 โมเดลในน้ำที่มีค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 10 โอห์ม-เมตร โดยเริ่มที่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 ใหม่

จากขั้นตอนการทดลองที่กล่าวไว้ข้างต้นได้ทำการทดสอบโมเดลของตะแกรงต่อลงดินทั้งหมด 27 แบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินมีดังต่อไปนี้

1. ขนาดของตะแกรงต่อลงดิน
2. ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน
3. ขนาดตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน
4. จำนวนร่องตาข่ายในตะแกรงต่อลงดิน
5. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Resistivity of Soil)

ผลการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 8-25 ตามลำดับ

ตารางที่ 8

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
15x15	82.5	1	0.668	0.626	0.498	0.520
15x15	82.5	4	0.585	0.548	0.452	0.500
15x15	82.5	9	0.543	0.509	0.434	0.470
15x15	150	1	0.668	0.626	0.476	0.510
15x15	150	4	0.585	0.548	0.437	0.490
15x15	150	9	0.542	0.509	0.423	0.450
15x15	210	1	0.668	0.626	0.464	0.490
15x15	210	4	0.585	0.548	0.429	0.470
15x15	210	9	0.542	0.509	0.416	0.440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
22.5x22.5	82.5	1	0.451	0.423	0.351	0.381
22.5x22.5	82.5	4	0.396	0.371	0.316	0.341
22.5x22.5	82.5	9	0.368	0.343	0.302	0.322
22.5x22.5	150	1	0.451	0.423	0.336	0.376
22.5x22.5	150	4	0.396	0.371	0.306	0.334
22.5x22.5	150	9	0.368	0.343	0.295	0.319
22.5x22.5	210	1	0.451	0.423	0.328	0.368
22.5x22.5	210	4	0.396	0.371	0.300	0.321
22.5x22.5	210	9	0.368	0.343	0.290	0.308

ตารางที่ 10

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
30x30	82.5	1	0.341	0.319	0.272	0.261
30x30	82.5	4	0.299	0.280	0.244	0.252
30x30	82.5	9	0.278	0.261	0.232	0.224
30x30	150	1	0.341	0.319	0.261	0.246
30x30	150	4	0.299	0.280	0.236	0.225
30x30	150	9	0.278	0.261	0.227	0.209
30x30	210	1	0.341	0.319	0.255	0.233
30x30	210	4	0.299	0.280	0.232	0.218
30x30	210	9	0.278	0.261	0.223	0.204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
15x15	82.5	1	0.646	0.605	0.458	0.478
15x15	82.5	4	0.563	0.527	0.415	0.442
15x15	82.5	9	0.521	0.488	0.399	0.416
15x15	150	1	0.646	0.605	0.437	0.464
15x15	150	4	0.563	0.527	0.402	0.435
15x15	150	9	0.521	0.488	0.388	0.407
15x15	210	1	0.646	0.605	0.426	0.455
15x15	210	4	0.563	0.527	0.394	0.421
15x15	210	9	0.521	0.488	0.382	0.398

ตารางที่ 12

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
22.5x22.5	82.5	1	0.440	0.412	0.333	0.361
22.5x22.5	82.5	4	0.385	0.360	0.300	0.324
22.5x22.5	82.5	9	0.357	0.334	0.286	0.309
22.5x22.5	150	1	0.440	0.412	0.319	0.349
22.5x22.5	150	4	0.385	0.360	0.290	0.311
22.5x22.5	150	9	0.357	0.334	0.279	0.292
22.5x22.5	210	1	0.440	0.412	0.310	0.328
22.5x22.5	210	4	0.385	0.360	0.285	0.304
22.5x22.5	210	9	0.357	0.334	0.275	0.284

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
30x30	82.5	1	0.334	0.313	0.262	0.274
30x30	82.5	4	0.292	0.274	0.234	0.239
30x30	82.5	9	0.272	0.254	0.223	0.233
30x30	150	1	0.334	0.313	0.251	0.235
30x30	150	4	0.292	0.274	0.227	0.222
30x30	150	9	0.272	0.254	0.218	0.212
30x30	210	1	0.334	0.313	0.245	0.228
30x30	210	4	0.292	0.274	0.223	0.211
30x30	210	9	0.272	0.254	0.215	0.201

ตารางที่ 14

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
15x15	82.5	1	0.628	0.589	0.417	0.433
15x15	82.5	4	0.545	0.510	0.378	0.410
15x15	82.5	9	0.503	0.471	0.363	0.389
15x15	150	1	0.628	0.589	0.399	0.429
15x15	150	4	0.545	0.510	0.366	0.407
15x15	150	9	0.503	0.471	0.354	0.375
15x15	210	1	0.628	0.589	0.388	0.418
15x15	210	4	0.545	0.510	0.359	0.382
15x15	210	9	0.503	0.471	0.348	0.367

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
22.5x22.5	82.5	1	0.431	0.403	0.314	0.344
22.5x22.5	82.5	4	0.375	0.351	0.283	0.312
22.5x22.5	82.5	9	0.347	0.325	0.270	0.302
22.5x22.5	150	1	0.431	0.403	0.301	0.338
22.5x22.5	150	4	0.375	0.351	0.274	0.303
22.5x22.5	150	9	0.347	0.325	0.264	0.287
22.5x22.5	210	1	0.431	0.403	0.293	0.324
22.5x22.5	210	4	0.375	0.351	0.269	0.286
22.5x22.5	210	9	0.347	0.325	0.260	0.272

ตารางที่ 16

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
30x30	82.5	1	0.328	0.307	0.251	0.266
30x30	82.5	4	0.287	0.268	0.225	0.233
30x30	82.5	9	0.266	0.249	0.214	0.216
30x30	150	1	0.328	0.307	0.241	0.235
30x30	150	4	0.287	0.268	0.218	0.201
30x30	150	9	0.266	0.249	0.209	0.195
30x30	210	1	0.328	0.307	0.235	0.226
30x30	210	4	0.287	0.268	0.214	0.192
30x30	210	9	0.266	0.249	0.206	0.184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
15x15	82.5	1	0.445	0.417	0.332	0.349
15x15	82.5	4	0.390	0.365	0.301	0.335
15x15	82.5	9	0.361	0.339	0.289	0.315
15x15	150	1	0.445	0.417	0.317	0.342
15x15	150	4	0.390	0.365	0.291	0.329
15x15	150	9	0.361	0.339	0.282	0.302
15x15	210	1	0.445	0.417	0.309	0.329
15x15	210	4	0.390	0.365	0.286	0.315
15x15	210	9	0.361	0.339	0.277	0.295

ตารางที่ 18

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
22.5x22.5	82.5	1	0.301	0.282	0.234	0.256
22.5x22.5	82.5	4	0.264	0.247	0.211	0.229
22.5x22.5	82.5	9	0.245	0.229	0.201	0.217
22.5x22.5	150	1	0.301	0.282	0.224	0.253
22.5x22.5	150	4	0.264	0.247	0.204	0.225
22.5x22.5	150	9	0.245	0.229	0.197	0.215
22.5x22.5	210	1	0.301	0.282	0.219	0.247
22.5x22.5	210	4	0.264	0.247	0.200	0.216
22.5x22.5	210	9	0.245	0.229	0.193	0.207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 0.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
30x30	82.5	1	0.227	0.213	0.181	0.176
30x30	82.5	4	0.199	0.187	0.163	0.170
30x30	82.5	9	0.185	0.174	0.155	0.151
30x30	150	1	0.227	0.213	0.174	0.166
30x30	150	4	0.199	0.187	0.157	0.152
30x30	150	9	0.185	0.174	0.151	0.141
30x30	210	1	0.227	0.213	0.170	0.157
30x30	210	4	0.199	0.187	0.155	0.147
30x30	210	9	0.185	0.174	0.149	0.138

ตารางที่ 20

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
15x15	82.5	1	0.431	0.403	0.305	0.321
15x15	82.5	4	0.375	0.351	0.277	0.297
15x15	82.5	9	0.347	0.325	0.266	0.279
15x15	150	1	0.431	0.403	0.291	0.311
15x15	150	4	0.375	0.351	0.268	0.301
15x15	150	9	0.347	0.325	0.259	0.274
15x15	210	1	0.431	0.403	0.284	0.308
15x15	210	4	0.375	0.351	0.263	0.285
15x15	210	9	0.347	0.325	0.255	0.268

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
22.5x22.5	82.5	1	0.293	0.275	0.222	0.242
22.5x22.5	82.5	4	0.257	0.240	0.200	0.215
22.5x22.5	82.5	9	0.238	0.223	0.191	0.208
22.5x22.5	150	1	0.293	0.275	0.213	0.234
22.5x22.5	150	4	0.257	0.240	0.193	0.208
22.5x22.5	150	9	0.238	0.223	0.186	0.196
22.5x22.5	210	1	0.293	0.275	0.207	0.220
22.5x22.5	210	4	0.257	0.240	0.190	0.204
22.5x22.5	210	9	0.238	0.223	0.183	0.191

ตารางที่ 22

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.0 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
30x30	82.5	1	0.223	0.209	0.175	0.190
30x30	82.5	4	0.195	0.183	0.156	0.161
30x30	82.5	9	0.181	0.169	0.149	0.157
30x30	150	1	0.223	0.209	0.167	0.159
30x30	150	4	0.195	0.183	0.151	0.150
30x30	150	9	0.181	0.169	0.145	0.143
30x30	210	1	0.223	0.209	0.163	0.154
30x30	210	4	0.195	0.183	0.149	0.143
30x30	210	9	0.181	0.169	0.143	0.136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 23

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
15x15	82.5	1	0.419	0.393	0.278	0.291
15x15	82.5	4	0.363	0.340	0.252	0.275
15x15	82.5	9	0.335	0.314	0.242	0.261
15x15	150	1	0.419	0.393	0.266	0.288
15x15	150	4	0.363	0.340	0.244	0.273
15x15	150	9	0.335	0.314	0.236	0.252
15x15	210	1	0.419	0.393	0.259	0.281
15x15	210	4	0.363	0.340	0.239	0.257
15x15	210	9	0.335	0.314	0.232	0.247

ตารางที่ 24

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
22.5x22.5	82.5	1	0.287	0.269	0.209	0.231
22.5x22.5	82.5	4	0.250	0.234	0.189	0.210
22.5x22.5	82.5	9	0.231	0.217	0.180	0.203
22.5x22.5	150	1	0.287	0.269	0.201	0.227
22.5x22.5	150	4	0.250	0.234	0.183	0.204
22.5x22.5	150	9	0.231	0.217	0.176	0.193
22.5x22.5	210	1	0.287	0.269	0.195	0.218
22.5x22.5	210	4	0.250	0.234	0.179	0.193
22.5x22.5	210	9	0.231	0.217	0.173	0.183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 25

แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ความลึก 1.5 เมตร

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

Grid Size (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)	จำนวนเมช	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Sverak	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Thapar	Ground Resistance (โอห์ม) สูตร Salama	Ground Resistance (โอห์ม) จากการทดสอบโมเดล
30x30	82.5	1	0.219	0.205	0.167	0.179
30x30	82.5	4	0.191	0.179	0.150	0.157
30x30	82.5	9	0.177	0.166	0.143	0.146
30x30	150	1	0.219	0.205	0.161	0.159
30x30	150	4	0.191	0.179	0.145	0.136
30x30	150	9	0.177	0.166	0.139	0.132
30x30	210	1	0.219	0.205	0.156	0.153
30x30	210	4	0.191	0.179	0.143	0.130
30x30	210	9	0.177	0.166	0.137	0.125

ตารางที่ 8 - 25 แสดงผลการทดลองในการทดสอบโมเดลของตะแกรงต่อลงดินเมื่อทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ซึ่งประกอบด้วยขนาดของตะแกรงต่อลงดิน, ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน, ขนาดตัวนำที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน, จำนวนร่องตาข่ายในตะแกรงต่อลงดินและค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ผลการทดลองในตารางดังกล่าวนี้ได้แสดงค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินของโมเดลที่ทดสอบโดยคำนวณเทียบกับขนาดจริงของตะแกรงต่อลงดินเพื่อเปรียบเทียบกับสูตรในทางทฤษฎีซึ่งประกอบด้วยสูตรของ Sverak, Thapar และ Salama จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบโมเดลกับสูตรของ Salama มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าสูตรของ Sverak และสูตรของ Thapar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการทดลองและแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

จะเห็นได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบโมเดลของตะแกรงต่อลงดินดังตารางที่ 8 ถึง 25 มีค่าใกล้เคียงกับสูตรในทางทฤษฎี (สูตรของ Salama) โดยมี %Error สูงสุดไม่เกิน 8% ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีความเหมาะสมเพียงพอที่จะใช้ในการย่อส่วนระบบกราวน์หรือตะแกรงต่อลงดินลงมาใช้ในการทดสอบได้ ซึ่งในการพัฒนาแบบจำลองต่อไปนั้นอาจนำแท่งหลักดิน (Ground Rod) ประกอบเข้ากับตะแกรงต่อลงดินเพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบกราวน์ให้ใกล้เคียงกับที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

บทสรุปของแบบจำลองที่ได้จากวิทยานิพนธ์มีดังต่อไปนี้

1. โมเดลของดินชั้นเดียว (Homogeneous or Uniform Soil) เพื่อศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยสามารถย่อส่วนตะแกรงต่อลงดินขนาดจริงลงมาศึกษาและทดลองวัดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินได้

2. ได้ทำการทดสอบโมเดลของระบบกราวน์และค่าความต้านทานของระบบกราวน์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณในสูตรของ Salama ดังนั้นในการคำนวณออกแบบระบบกราวน์นั้นค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) ควรใช้สูตรของ Salama ในสมการที่ (16) เพื่อการคำนวณและออกแบบค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) จะเหมาะสมที่สุด ส่วนสูตรของ Sverak และสูตรของ Thapar ให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) สูงเกินไปโดยเฉพาะสูตรของ Sverak จะได้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) สูงกว่าสูตรของ Thapar

การพิจารณาใช้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) ที่เหมาะสมในการออกแบบระบบกราวน์นั้นจะทำให้มีผลดีต่อการประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการติดตั้งระบบกราวน์ แต่ยังให้ความปลอดภัยอยู่ในระดับมาตรฐานตามกฎการออกแบบระบบกราวน์ [2]. สำหรับผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

3. โมเดลในการทดสอบนี้มีข้อดีตรงที่สามารถปรับค่า ρ ของสารที่ใช้ทำการทดสอบได้โดยการเติม NaCl ลงในน้ำที่ใช้ในการทดสอบ และจากข้อมูลในตารางที่ 8 ถึง 16 และข้อมูลใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17 ถึง 25 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำที่ใช้ในการทดสอบทำให้ทราบว่าสูตรของ Salama ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) ยังคงให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบจากแบบจำลองโดยมี %Error สูงสุดไม่เกิน 8 %

4. โมเดลของการศึกษาระบบกราวน์ที่ได้แสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกพิสูจน์แล้วว่าเป็นเครื่องมือที่ดีในการศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) ในดินชั้นเดียวหรือดินที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous or Uniform Soil)

5. โปรแกรมการออกแบบระบบกราวน์ดังที่ได้บรรยายไว้ในบทที่ 2 มีประโยชน์สำหรับใช้ในการออกแบบระบบกราวน์ของสถานีไฟฟ้าย่อย และผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการออกแบบสามารถนำตะแกรงต่อลงดินมาย่อส่วนเพื่อศึกษาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (ความต้านทานของระบบกราวน์) โดยอาศัยแบบจำลองการศึกษาระบบกราวน์ได้ก่อนนำไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1]. ศูนย์ฝึกอบรมทางวิชาการ. ระบบสายดินของสถานีไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

[2]. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. : ANSI / IEEE Standard 80, 1986.

[3]. สมชาติ จิริวิภากร , อนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช , ศุลี บรรจงจิตร. "การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์" วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า. ครั้งที่ 19 (7-8 พฤศจิกายน 2539) : PW25-29.

[4]. B. Thapar , V. Gerez , A. Balakrishnan , Donald A. Blank. "Evaluation of Ground Resistance of a Grounding Grid of any Shape." IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 6 No. 2 (April 1991) PP.640-647.

[5]. Y.L. Chow , M.M.A. Salama. "A Simplified Method for Calculating the Substation Grounding Resistance." IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 9 No. 2 (1994) PP.736-742.

[6]. วิบูล เขมรังสฤษฎ์. อุปกรณ์ส่งจ่ายไฟฟ้า การออกแบบและระบบป้องกัน เล่ม 2. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2535.

[7]. B. Thapar , S.L. Goyal. "Scale Model Studies of Grounding Grids in Non-Uniform Soils." IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. PWRD-2 (October 1987) : 1060-1066.

[8]. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. : March 11, 1983.

[9]. J.M. Nahman , V.B. Djordjevic. "Nonuniformity Correction Factors for Maximum Mesh and Step Voltages of Ground Grids and Combined Ground Electrodes." IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 10 No. 3 (July 1995) PP.1263-1269.

[10]. Ross Caldecott , Donald G. Kasten. "Scale Model Studies of Station Grounding Grids." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , Vol. PAS-102 No. 3 (March 1983) PP.558-566.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
program THE_DESIGN_OF_GROUNDING_GRID;
uses crt,screen,win;
const pi        = 3.141592654;
      e         = 2.718281828;
      ReturnKey = #13;
      EscKey    = #27;
      UpKey     = #72;
      LtKey     = #75;
      RtKey     = #77;
      DnKey     = #80;
var No,No1,No2_2,No2_3,Pattern,DeltaLmin,DeltaLgrid,Ratio,Smax,Td,h,i,j : integer;
    Counter,Counter2_1,Counter3_1,Counter3_2,Counter3_3,Counter3_4,Counter3_5 : integer;
    No2_1,No3_1,No3_2,No3_3,No3_4,No3_5 : array [0..5000] of integer;
    Key,Key1,Key2_1,Key2_2,Key2_3,Key3_1,Key3_2,Key3_3,Key3_4,Key3_5,ExitKey : char;
    Start,Exit,UpToDn,DnToUp,LtToRt,RtToLt : boolean;
    {DeltaLmin  = The increased portion of the length of the conductor
     DeltaLgrid = The increased portion of the length of the grid on x axis or y axis
     Ratio      = The ratio of the length of the grid on x axis and y axis or
                  the ratio of the length of the grid on y axis and x axis
     Smax       = Maximum spacing between parallel conductors
     Td         = Delay time}
    {--- STEP 1 : INPUT DATA ---}
    Lsubx,Lsuby,P1,P2 : real;
    {Lsubx      = Length of substation on x axis
     Lsuby      = Length of substation on y axis
     P1         = Resistivity of the upper soil
     P2         = Resistivity of the lower soil}
    {--- STEP 2 : CONDUCTOR SIZE ---}
    D,H1,H2 : real;
    Gauge : string;
    {D          = Diameter of the conductor
     H1         = Depth of the upper soil
     H2         = Depth of burial of the grid
     Gauge      = Size of the conductor}
    {--- STEP 3 : TOUCH VOLTAGE & STEP VOLTAGE CRITERION ---}
    T,C,P,Etouch,Estep : real;
    {T          = Shock and fault duration
     C          = Reduction factor
     P          = Grid proximity
     Etouch     = Touch voltage
     Estep      = Step voltage}
    {--- STEP 4 : INITIAL DESIGN ---}
    Lmin,Lgridx,Lgridy,Lcon,Scon : real;
    Nconx,Ncony,N:integer;
    {Lmin       = Minimum length of the conductor
     Lgridx     = Length of the grid on x axis
     Lgridy     = Length of the grid on y axis
     Lcon       = Total length of the conductor
     Scon       = Spacing between parallel conductors
     Nconx      = The number of the parallel conductors on x axis
     Ncony      = The number of the parallel conductors on y axis
     N          = The number of meshes}
    {--- STEP 5 : GRID RESISTANCE ---}
    Lmesh,Ltotal,Agrid,Rg1,K,Cf,Rg2,Rg : real;
    {Lmesh      = Length of a mesh
     Ltotal     = Total length of the conductor
     Agrid      = Area of the grid
     Rg1        = Resistance of the grid in the uniform soil
     K          = Reflection factor
     Cf         = Shape factor
     Rg2        = Correction term due to the second layer soil
     Rg         = Resistance of the grid}
    {--- STEP 6 : GRID CURRENT ---}
    Df,Sf,Ifault,Igrid : real;
    {Df         = Decrement factor
     Sf         = Current division factor
     Ifault     = Fault current
     Igrid      = Grid current}
    {--- STEP 7 : COMPARISON BETWEEN GPR AND Etouch ---}
    GPR : real;
    {GPR        = Grid potential rise}
    {--- STEP 8 : MESH VOLTAGE AND STEP VOLTAGE ---}
    x,Ncon,Ki,Kii,Kh,Km1,Km2,Km,Cm,Em,y,Ks,Cs,Es : real;
    {Ncon       = The number of parallel conductors in one direction
     Ki         = Correction factor which accounts for nonuniform current densities in electrode elements
     Km         = Electrode geometrical factor for mesh voltage
     Cm         = Nonuniformity correction factor for mesh voltage
     Em         = Mesh voltage
     Ks         = Electrode geometrical factor for step voltage
     Cs         = Nonuniformity correction factor for step voltage
     Es         = Step voltage}
procedure Menu;
begin
    CursorOff;
    textbackground(0);
    clrscr;
    SetHeadAttrHighDisplay;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SetBoxAttr(HighDisplay);
SetCharAttr(HighDisplay);
SetWinAttr(HighDisplay);
SetWinHeader('');
SetBoxStyle(Double);
WindowOpen(30,10,50,15);
textbackground(1);
gotoxy(2,1);
writeln('      START      ');
textbackground(0);
writeln('      PATTERN');
writeln('    CHANGE DATA');
write('      EXIT');
Start:=false;
Exit:=false;
No2_1[0]:=2;
No3_1[0]:=5;
No3_2[0]:=3;
No3_3[0]:=2;
No3_4[0]:=3;
No3_5[0]:=3;
No1:=1;
repeat
    textcolor(15);
    repeat
        UpToDn:=false;
        DnToUp:=false;
        Key1:=readkey;
        case Key1 of
            UpKey  : begin
                       if No1=1 then begin
                          UpToDn:=true;
                          No1:=4;
                          textbackground(0);
                          gotoxy(2,1);
                          write('      START      ');
                          textbackground(1);
                          gotoxy(2,4);
                          write('      EXIT       ');
                       end;
                       if No1=2 then begin
                          No1:=1;
                          textbackground(0);
                          gotoxy(2,2);
                          write('     PATTERN     ');
                          textbackground(1);
                          gotoxy(2,1);
                          write('      START      ');
                       end;
                       if No1=3 then begin
                          No1:=2;
                          textbackground(0);
                          gotoxy(2,3);
                          write('   CHANGE DATA   ');
                          textbackground(1);
                          gotoxy(2,2);
                          write('     PATTERN     ');
                       end;
                       if (No1=4) and (UpToDn=false) then begin
                          No1:=3;
                          textbackground(0);
                          gotoxy(2,4);
                          write('      EXIT       ');
                          textbackground(1);
                          gotoxy(2,3);
                          write('   CHANGE DATA   ');
                       end;
                     end;
            DnKey  : begin
                       if No1=4 then begin
                          DnToUp:=true;
                          No1:=1;
                          textbackground(0);
                          gotoxy(2,4);
                          write('      EXIT       ');
                          textbackground(1);
                          gotoxy(2,1);
                          write('      START      ');
                       end;
                       if No1=3 then begin
                          No1:=4;
                          textbackground(0);
                          gotoxy(2,3);
                          write('   CHANGE DATA   ');
                          textbackground(1);
                          gotoxy(2,4);
                          write('      EXIT       ');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    end;
                    if No1=2 then begin
                       No1:=3;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,2);
                       write('     PATTERN     ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,3);
                       write('  CHANGE DATA  ');
                    end;
                    if (No1=1) and (DnToUp=false) then begin
                       No1:=2;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,1);
                       write('     START     ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,2);
                       write('     PATTERN     ');
                    end;
                 end;
        EscKey : begin
                    No1:=0;
                    Exit:=true;
                 end
     end;
until (Key1=ReturnKey) or (Key1=EscKey);
case No1 of
    1 : Start:=true;
    2 : begin
          SetHeadAttr(HighDisplay);
          SetBoxAttr(HighDisplay);
          SetCharAttr(HighDisplay);
          SetWinAttr(HighDisplay);
          SetWinHeader(' PATTERN ');
          SetBoxStyle(Double);
          WindowOpen(9,7,72,18);
          for h:=0 to 2 do begin
             for i:=2 to 7 do begin
                gotoxy(3+20*h,i);
                write(chr(186));
                gotoxy(20+20*h,i);
                write(chr(186));
             end;
             gotoxy(3+20*h,8);
             write(chr(200));
             for j:=4 to 19 do begin
                gotoxy(j+20*h,8);
                write(chr(205));
             end;
             gotoxy(20+20*h,8);
             write(chr(188));
             for i:=3 to 7 do begin
                if h=0 then
                  textcolor(6)
                else begin
                   if i<5 then
                     textcolor(7)
                   else
                     textcolor(6);
                end;
                for j:=4 to 19 do begin
                   gotoxy(j+20*h,i);
                   write(chr(219));
                end;
             end;
             textcolor(14);
             if (h=0) or (h=1) then begin
                textbackground(6);
                gotoxy(9+20*h,5);
             end
             else begin
                textbackground(7);
                gotoxy(49,4);
             end;
             write(chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205));
             textcolor(15);
             textbackground(0);
             gotoxy(7+20*h,9);
             write('Pattern ',h+1);
          end;
          textcolor(1);
          gotoxy(2,1);
          write(chr(201));
          for i:=3 to 20 do begin
             gotoxy(i,1);
             write(chr(205));
          end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
gotoxy(21,1);
write(chr(187));
for i:=2 to 9 do begin
    gotoxy(2,i);
    write(chr(186));
    gotoxy(21,i);
    write(chr(186));
end;
gotoxy(2,10);
write(chr(200));
for i:=3 to 20 do begin
    gotoxy(i,10);
    write(chr(205));
end;
gotoxy(21,10);
write(chr(188));
Counter2_1:=Counter2_1+1;
No2_1[Counter2_1]:=1;
repeat
     LtToRt:=false;
     RtToLt:=false;
     Key2_1:=readkey;
     case Key2_1 of
          LtKey  : begin
                     if No2_1[Counter2_1]=1 then begin
                       LtToRt:=true;
                       No2_1[Counter2_1]:=3:
                       for h:=0 to 1 do begin
                         if h=0 then
                           textcolor(0)
                         else
                           textcolor(1);
                         gotoxy(2+40*h,1);
                         write(chr(201));
                         for i:=3 to 20 do begin
                           gotoxy(i+40*h,1);
                           write(chr(205));
                         end;
                         gotoxy(21+40*h,1);
                         write(chr(187));
                         for i:=2 to 9 do begin
                           gotoxy(2+40*h,i);
                           write(chr(186));
                           gotoxy(21+40*h,i);
                           write(chr(186));
                         end;
                         gotoxy(2+40*h,10);
                         write(chr(200));
                         for i:=3 to 20 do begin
                           gotoxy(i+40*h,10);
                           write(chr(205));
                         end;
                         gotoxy(21+40*h,10);
                         write(chr(188));
                       end;
                     end;
                     if No2_1[Counter2_1]=2 then begin
                       No2_1[Counter2_1]:=1;
                       for h:=0 to 1 do begin
                         if h=0 then
                           textcolor(0)
                         else
                           textcolor(1);
                         gotoxy(22-20*h,1);
                         write(chr(201));
                         for i:=23 to 40 do begin
                           gotoxy(i-20*h,1);
                           write(chr(205));
                         end;
                         gotoxy(41-20*h,1);
                         write(chr(187));
                         for i:=2 to 9 do begin
                           gotoxy(22-20*h,i);
                           write(chr(186));
                           gotoxy(41-20*h,i);
                           write(chr(186));
                         end;
                         gotoxy(22-20*h,10);
                         write(chr(200));
                         for i:=23 to 40 do begin
                           gotoxy(i-20*h,10);
                           write(chr(205));
                         end;
                         gotoxy(41-20*h,10);
                         write(chr(188));
                       end;
                     end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                if (No2_1[Counter2_1]=3) and (LtToRt=false) then begin
                   No2_1[Counter2_1]:=2;
                   for h:=0 to 1 do begin
                      if h=0 then
                         textcolor(0)
                      else
                         textcolor(1);
                      gotoxy(42-20*h,1);
                      write(chr(201));
                      for i:=43 to 60 do begin
                         gotoxy(i-20*h,1);
                         write(chr(205));
                      end;
                      gotoxy(61-20*h,1);
                      write(chr(187));
                      for i:=2 to 9 do begin
                         gotoxy(42-20*h,i);
                         write(chr(186));
                         gotoxy(61-20*h,i);
                         write(chr(186));
                      end;
                      gotoxy(42-20*h,10);
                      write(chr(200));
                      for i:=43 to 60 do begin
                         gotoxy(i-20*h,10);
                         write(chr(205));
                      end;
                      gotoxy(61-20*h,10);
                      write(chr(188));
                   end;
                end;
             end;
RtKey  : begin
                if No2_1[Counter2_1]=3 then begin
                   RtToLt:=true;
                   No2_1[Counter2_1]:=1;
                   for h:=0 to 1 do begin
                      if h=0 then
                         textcolor(0)
                      else
                         textcolor(1);
                      gotoxy(42-40*h,1);
                      write(chr(201));
                      for i:=43 to 60 do begin
                         gotoxy(i-40*h,1);
                         write(chr(205));
                      end;
                      gotoxy(61-40*h,1);
                      write(chr(187));
                      for i:=2 to 9 do begin
                         gotoxy(42-40*h,i);
                         write(chr(186));
                         gotoxy(61-40*h,i);
                         write(chr(186));
                      end;
                      gotoxy(42-40*h,10);
                      write(chr(200));
                      for i:=43 to 60 do begin
                         gotoxy(i-40*h,10);
                         write(chr(205));
                      end;
                      gotoxy(61-40*h,10);
                      write(chr(188));
                   end;
                end;
                if No2_1[Counter2_1]=2 then begin
                   No2_1[Counter2_1]:=3;
                   for h:=0 to 1 do begin
                      if h=0 then
                         textcolor(0)
                      else
                         textcolor(1);
                      gotoxy(22+20*h,1);
                      write(chr(201));
                      for i:=23 to 40 do begin
                         gotoxy(i+20*h,1);
                         write(chr(205));
                      end;
                      gotoxy(41+20*h,1);
                      write(chr(187));
                      for i:=2 to 9 do begin
                         gotoxy(22+20*h,i);
                         write(chr(186));
                         gotoxy(41+20*h,i);
                         write(chr(186));
                      end;
                      gotoxy(22+20*h,10);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                write(chr(200));
                                for i:=23 to 40 do begin
                                    gotoxy(i+20*h,10);
                                    write(chr(205));
                                end;
                                gotoxy(41+20*h,10);
                                write(chr(188));
                            end;
                        end;
                        if (No2_1[Counter2_1]=1) and (RtToLt=false) then begin
                            No2_1[Counter2_1]:=2;
                            for h:=0 to 1 do begin
                                if h=0 then
                                   textcolor(0)
                                else
                                    textcolor(1);
                                gotoxy(2+20*h,1);
                                write(chr(201));
                                for i:=3 to 20 do begin
                                    gotoxy(i+20*h,1);
                                    write(chr(205));
                                end;
                                gotoxy(21+20*h,1);
                                write(chr(187));
                                for i:=2 to 9 do begin
                                    gotoxy(2+20*h,i);
                                    write(chr(186));
                                    gotoxy(21+20*h,i);
                                    write(chr(186));
                                end;
                                gotoxy(2+20*h,10);
                                write(chr(200));
                                for i:=3 to 20 do begin
                                    gotoxy(i+20*h,10);
                                    write(chr(205));
                                end;
                                gotoxy(21+20*h,10);
                                write(chr(188));
                            end;
                        end;
                    end;
                EscKey : No2_1[Counter2_1]:=No2_1[Counter2_1-1];
            end;
        until (Key2_1=ReturnKey) or (Key2_1=EscKey);
        WindowClose;
        case No2_1[Counter2_1] of
            1 : Pattern:=1;
            2 : Pattern:=2;
            3 : Pattern:=3;
        end;
    end;
3 : begin
        SetHeadAttr(HighDisplay);
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' CHANGE DATA ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(29,10,52,16);
        textbackground(1);
        gotoxy(2,1);
        writeln('    ',chr(127),'Lminimum      ');
        textbackground(0);
        writeln('      ',chr(127),'Lx or ',chr(127),'Ly');
        writeln('   Lx/Ly or Ly/Lx');
        writeln('          D');
        write('     Delay Time');
        No2_2:=1;
        repeat
            repeat
                UpToDn:=false;
                DnToUp:=false;
                Key2_2:=readkey;
                case Key2_2 of
                    UpKey  : begin
                                 if No2_2=1 then begin
                                    UpToDn:=true;
                                    No2_2:=5;
                                    textbackground(0);
                                    gotoxy(2,1);
                                    write('    ',chr(127),'Lminimum      ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,5);
                                    write('     Delay Time     ');
                                end;
                                if No2_2=2 then begin
                                    No2_2:=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,2);
                        write('      ',chr(127),'Lx or ',chr(127),'Ly     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,1);
                        write('      ',chr(127),'Lminimum      ');
                     end;
                     if No2_2=3 then begin
                        No2_2:=2;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,3);
                        write('   Lx/Ly or Ly/Lx   ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,2);
                        write('      ',chr(127),'Lx or ',chr(127),'Ly     ');
                     end;
                     if No2_2=4 then begin
                        No2_2:=3;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,4);
                        write('         D         ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,3);
                        write('   Lx/Ly or Ly/Lx   ');
                     end;
                     if (No2_2=5) and (UpToDn=false) then begin
                        No2_2:=4;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,5);
                        write('    Delay Time     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,4);
                        write('         D         ');
                     end;
                  end;
            DnKey : begin
                     if No2_2=5 then begin
                        DnToUp:=true;
                        No2_2:=1;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,5);
                        write('    Delay Time     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,1);
                        write('      ',chr(127),'Lminimum      ');
                     end;
                     if No2_2=4 then begin
                        No2_2:=5;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,4);
                        write('         D         ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,5);
                        write('    Delay Time     ');
                     end;
                     if No2_2=3 then begin
                        No2_2:=4;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,3);
                        write('   Lx/Ly or Ly/Lx   ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,4);
                        write('         D         ');
                     end;
                     if No2_2=2 then begin
                        No2_2:=3;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,2);
                        write('      ',chr(127),'Lx or ',chr(127),'Ly     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,3);
                        write('   Lx/Ly or Ly/Lx   ');
                     end;
                     if (No2_2=1) and (DnToUp=false) then begin
                        No2_2:=2;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,1);
                        write('      ',chr(127),'Lminimum      ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,2);
                        write('      ',chr(127),'Lx or ',chr(127),'Ly     ');
                     end;
                  end;
            EscKey : No2_2:=0;
         end;
      until (Key2_2=ReturnKey) or (Key2_2=EscKey);
      case No2_2 of
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
1 : begin
      SetHeadAttr(HighDisplay);
      SetBoxAttr(HighDisplay);
      SetCharAttr(HighDisplay);
      SetWinAttr(HighDisplay);
      SetWinHeader('');
      SetBoxStyle(Double);
      WindowOpen(31,12,50,20);
      textbackground(1);
      gotoxy(2,1);
      writeln('      10 m    ');
      textbackground(0);
      writeln('       50 m');
      writeln('      100 m');
      writeln('      500 m');
      writeln('     1000 m');
      writeln('     5000 m');
      write('    10000 m');
      Counter3_1:=Counter3_1+1;
      No3_1[Counter3_1]:=1;
      repeat
        UpToDn:=false;
        DnToUp:=false;
        Key3_1:=readkey;
        case Key3_1 of
          UpKey  : begin
                     if No3_1[Counter3_1]=1 then begin
                       UpToDn:=true;
                       No3_1[Counter3_1]:=7;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,1);
                       write('      10 m    ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,7);
                       write('   10000 m    ');
                     end;
                     if No3_1[Counter3_1]=2 then begin
                       No3_1[Counter3_1]:=1;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,2);
                       write('      50 m    ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,1);
                       write('      10 m    ');
                     end;
                     if No3_1[Counter3_1]=3 then begin
                       No3_1[Counter3_1]:=2;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,3);
                       write('     100 m    ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,2);
                       write('      50 m    ');
                     end;
                     if No3_1[Counter3_1]=4 then begin
                       No3_1[Counter3_1]:=3;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,4);
                       write('     500 m    ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,3);
                       write('     100 m    ');
                     end;
                     if No3_1[Counter3_1]=5 then begin
                       No3_1[Counter3_1]:=4;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,5);
                       write('    1000 m    ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,4);
                       write('     500 m    ');
                     end;
                     if No3_1[Counter3_1]=6 then begin
                       No3_1[Counter3_1]:=5;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,6);
                       write('    5000 m    ');
                       textbackground(1);
                       gotoxy(2,5);
                       write('    1000 m    ');
                     end;
                     if (No3_1[Counter3_1]=7) and (UpToDn=false) then
begin
                       No3_1[Counter3_1]:=6;
                       textbackground(0);
                       gotoxy(2,7);
                       write('   10000 m    ');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,6);
                        write('     5000 m     ');
                      end;
                  end;
          DnKey  : begin
                      if No3_1[Counter3_1]=7 then begin
                        DnToUp:=true;
                        No3_1[Counter3_1]:=1;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,7);
                        write('    10000 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,1);
                        write('       10 m     ');
                      end;
                      if No3_1[Counter3_1]=6 then begin
                        No3_1[Counter3_1]:=7;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,6);
                        write('     5000 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,7);
                        write('    10000 m     ');
                      end;
                      if No3_1[Counter3_1]=5 then begin
                        No3_1[Counter3_1]:=6;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,5);
                        write('     1000 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,6);
                        write('     5000 m     ');
                      end;
                      if No3_1[Counter3_1]=4 then begin
                        No3_1[Counter3_1]:=5;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,4);
                        write('      500 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,5);
                        write('     1000 m     ');
                      end;
                      if No3_1[Counter3_1]=3 then begin
                        No3_1[Counter3_1]:=4;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,3);
                        write('      100 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,4);
                        write('      500 m     ');
                      end;
                      if No3_1[Counter3_1]=2 then begin
                        No3_1[Counter3_1]:=3;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,2);
                        write('       50 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,3);
                        write('      100 m     ');
                      end;
                      if (No3_1[Counter3_1]=1) and (DnToUp=false) then
begin
                        No3_1[Counter3_1]:=2;
                        textbackground(0);
                        gotoxy(2,1);
                        write('       10 m     ');
                        textbackground(1);
                        gotoxy(2,2);
                        write('       50 m     ');
                      end;
                  end;
          EscKey : No3_1[Counter3_1]:=No3_1[Counter3_1-1];
        end;
    until (Key3_1=ReturnKey) or (Key3_1=EscKey);
    WindowClose;
    case No3_1[Counter3_1] of
        1 : DeltaLmin:=10;
        2 : DeltaLmin:=50;
        3 : DeltaLmin:=100;
        4 : DeltaLmin:=500;
        5 : DeltaLmin:=1000;
        6 : DeltaLmin:=5000;
        7 : DeltaLmin:=10000;
    end;
end;
    2 : begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SetHeadAttr(HighDisplay);
SetBoxAttr(HighDisplay);
SetCharAttr(HighDisplay);
SetWinAttr(HighDisplay);
SetWinHeader('');
SetBoxStyle(Double);
WindowOpen(31,13,50,19);
textbackground(1);
gotoxy(2,1);
writeln('       1 m      ');
textbackground(0);
writeln('       5 m');
writeln('      10 m');
writeln('      50 m');
write('     100 m');
Counter3_2:=Counter3_2+1;
No3_2[Counter3_2]:=1;
repeat
    UpToDn:=false;
    DnToUp:=false;
    Key3_2:=readkey;
    case Key3_2 of
        UpKey  : begin
                   if No3_2[Counter3_2]=1 then begin
                     UpToDn:=true;
                     No3_2[Counter3_2]:=5;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,1);
                     write('       1 m      ');
                     textbackground(1);
                     gotoxy(2,5);
                     write('     100 m      ');
                   end;
                   if No3_2[Counter3_2]=2 then begin
                     No3_2[Counter3_2]:=1;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,2);
                     write('       5 m      ');
                     textbackground(1);
                     gotoxy(2,1);
                     write('       1 m      ');
                   end;
                   if No3_2[Counter3_2]=3 then begin
                     No3_2[Counter3_2]:=2;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,3);
                     write('      10 m      ');
                     textbackground(1);
                     gotoxy(2,2);
                     write('       5 m      ');
                   end;
                   if No3_2[Counter3_2]=4 then begin
                     No3_2[Counter3_2]:=3;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,4);
                     write('      50 m      ');
                     textbackground(1);
                     gotoxy(2,3);
                     write('      10 m      ');
                   end;
                   if (No3_2[Counter3_2]=5) and (UpToDn=false) then
begin
                     No3_2[Counter3_2]:=4;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,5);
                     write('     100 m      ');
                     textbackground(1);
                     gotoxy(2,4);
                     write('      50 m      ');
                   end;
                 end;
        DnKey  : begin
                   if No3_2[Counter3_2]=5 then begin
                     DnToUp:=true;
                     No3_2[Counter3_2]:=1;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,5);
                     write('     100 m      ');
                     textbackground(1);
                     gotoxy(2,1);
                     write('       1 m      ');
                   end;
                   if No3_2[Counter3_2]=4 then begin
                     No3_2[Counter3_2]:=5;
                     textbackground(0);
                     gotoxy(2,4);
                     write('      50 m      ');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,5);
                                    write('      100 m      ');
                                 end;
                                 if No3_2[Counter3_2]=3 then begin
                                    No3_2[Counter3_2]:=4;
                                    textbackground(0);
                                    gotoxy(2,3);
                                    write('      10 m       ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,4);
                                    write('      50 m       ');
                                 end;
                                 if No3_2[Counter3_2]=2 then begin
                                    No3_2[Counter3_2]:=3;
                                    textbackground(0);
                                    gotoxy(2,2);
                                    write('      5 m        ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,3);
                                    write('      10 m       ');
                                 end;
                                 if (No3_2[Counter3_2]=1) and (DnToUp=false) then
begin
                                    No3_2[Counter3_2]:=2;
                                    textbackground(0);
                                    gotoxy(2,1);
                                    write('      1 m        ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,2);
                                    write('      5 m        ');
                                 end;
                              end;
                        EscKey : No3_2[Counter3_2]:=No3_2[Counter3_2-1];
                     end;
                  until (Key3_2=ReturnKey) or (Key3_2=EscKey);
                  WindowClose;
                  case No3_2[Counter3_2] of
                     1 : DeltaLgrid:=1;
                     2 : DeltaLgrid:=5;
                     3 : DeltaLgrid:=10;
                     4 : DeltaLgrid:=50;
                     5 : DeltaLgrid:=100;
                  end;
               end;
            3 : begin
                  SetHeadAttr(HighDisplay);
                  SetBoxAttr(HighDisplay);
                  SetCharAttr(HighDisplay);
                  SetWinAttr(HighDisplay);
                  SetWinHeader('');
                  SetBoxStyle(Double);
                  WindowOpen(31,14,50,23);
                  textbackground(1);
                  gotoxy(2,1);
                  writeln('      2      ');
                  textbackground(0);
                  writeln('      4');
                  writeln('      6');
                  writeln('      8');
                  writeln('     10');
                  writeln('     12');
                  writeln('     14');
                  write('     16');
                  Counter3_3:=Counter3_3+1;
                  No3_3[Counter3_3]:=1;
                  repeat
                     UpToDn:=false;
                     DnToUp:=false;
                     Key3_3:=readkey;
                     case Key3_3 of
                        UpKey  : begin
                                    if No3_3[Counter3_3]=1 then begin
                                       UpToDn:=true;
                                       No3_3[Counter3_3]:=8;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,1);
                                       write('      2      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,8);
                                       write('      16     ');
                                    end;
                                    if No3_3[Counter3_3]=2 then begin
                                       No3_3[Counter3_3]:=1;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,2);
                                       write('      4      ');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                textbackground(1);
                gotoxy(2,1);
                write('        2       ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=3 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=2;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,3);
                write('        6       ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,2);
                write('        4       ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=4 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=3;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,4);
                write('        8       ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,3);
                write('        6       ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=5 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=4;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,5);
                write('        10      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,4);
                write('        8       ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=6 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=5;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,6);
                write('        12      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,5);
                write('        10      ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=7 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=6;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,7);
                write('        14      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,6);
                write('        12      ');
              end;
              if (No3_3[Counter3_3]=8) and (UpToDn=false) then
begin
                No3_3[Counter3_3]:=7;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,8);
                write('        16      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,7);
                write('        14      ');
              end;
            end;
      DnKey : begin
              if No3_3[Counter3_3]=8 then begin
                DnToUp:=true;
                No3_3[Counter3_3]:=1;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,8);
                write('        16      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,1);
                write('        2       ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=7 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=8;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,7);
                write('        14      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,8);
                write('        16      ');
              end;
              if No3_3[Counter3_3]=6 then begin
                No3_3[Counter3_3]:=7;
                textbackground(0);
                gotoxy(2,6);
                write('        12      ');
                textbackground(1);
                gotoxy(2,7);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    write('        14        ');
                end;
                if No3_3[Counter3_3]=5 then begin
                    No3_3[Counter3_3]:=6;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,5);
                    write('        10        ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,6);
                    write('        12        ');
                end;
                if No3_3[Counter3_3]=4 then begin
                    No3_3[Counter3_3]:=5;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,4);
                    write('        8         ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,5);
                    write('        10        ');
                end;
                if No3_3[Counter3_3]=3 then begin
                    No3_3[Counter3_3]:=4;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,3);
                    write('        6         ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,4);
                    write('        8         ');
                end;
                if No3_3[Counter3_3]=2 then begin
                    No3_3[Counter3_3]:=3;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,2);
                    write('        4         ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,3);
                    write('        6         ');
                end;
                if (No3_3[Counter3_3]=1) and (DnToUp=false) then
begin
                    No3_3[Counter3_3]:=2;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,1);
                    write('        2         ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,2);
                    write('        4         ');
                end;
            end;
        EscKey : No3_3[Counter3_3]:=No3_3[Counter3_3-1];
    end;
until (Key3_3=ReturnKey) or (Key3_3=EscKey);
WindowClose;
case No3_3[Counter3_3] of
    1 : Ratio:=2;
    2 : Ratio:=4;
    3 : Ratio:=6;
    4 : Ratio:=8;
    5 : Ratio:=10;
    6 : Ratio:=12;
    7 : Ratio:=14;
    8 : Ratio:=16;
end;
  end;
4 : begin
    SetHeadAttr(HighDisplay);
    SetBoxAttr(HighDisplay);
    SetCharAttr(HighDisplay);
    SetWinAttr(HighDisplay);
    SetWinHeader('');
    SetBoxStyle(Double);
    WindowOpen(31,15,50,20);
    textbackground(1);
    gotoxy(2,1);
    writeln('        5         ');
    textbackground(0);
    writeln('        10');
    writeln('        15');
    write('        20');
    Counter3_4:=Counter3_4+1;
    No3_4[Counter3_4]:=1;
    repeat
        UpToDn:=false;
        DnToUp:=false;
        Key3_4:=readkey;
        case Key3_4 of
            UpKey  : begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                    if No3_4[Counter3_4]=1 then begin
                                       UpToDn:=true;
                                       No3_4[Counter3_4]:=4;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,1);
                                       write('        5       ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,4);
                                       write('        20      ');
                                    end;
                                    if No3_4[Counter3_4]=2 then begin
                                       No3_4[Counter3_4]:=1;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,2);
                                       write('        10      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,1);
                                       write('        5       ');
                                    end;
                                    if No3_4[Counter3_4]=3 then begin
                                       No3_4[Counter3_4]:=2;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,3);
                                       write('        15      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,2);
                                       write('        10      ');
                                    end;
                                    if (No3_4[Counter3_4]=4) and (UpToDn=false) then
begin
                                       No3_4[Counter3_4]:=3;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,4);
                                       write('        20      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,3);
                                       write('        15      ');
                                    end;
                                 end;
                              DnKey  : begin
                                    if No3_4[Counter3_4]=4 then begin
                                       DnToUp:=true;
                                       No3_4[Counter3_4]:=1;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,4);
                                       write('        20      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,1);
                                       write('        5       ');
                                    end;
                                    if No3_4[Counter3_4]=3 then begin
                                       No3_4[Counter3_4]:=4;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,3);
                                       write('        15      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,4);
                                       write('        20      ');
                                    end;
                                    if No3_4[Counter3_4]=2 then begin
                                       No3_4[Counter3_4]:=3;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,2);
                                       write('        10      ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,3);
                                       write('        15      ');
                                    end;
                                    if (No3_4[Counter3_4]=1) and (DnToUp=false) then
begin
                                       No3_4[Counter3_4]:=2;
                                       textbackground(0);
                                       gotoxy(2,1);
                                       write('        5       ');
                                       textbackground(1);
                                       gotoxy(2,2);
                                       write('        10      ');
                                    end;
                                 end;
                              EscKey : No3_4[Counter3_4]:=No3_4[Counter3_4-1];
                           end;
                        until (Key3_4=ReturnKey) or (Key3_4=EscKey);
                        WindowClose;
                        case No3_4[Counter3_4] of
                           1 : Smax:=5;
                           2 : Smax:=10;
                           3 : Smax:=15;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                4 : Smax:=20;
            end;
        end;
    5 : begin
            SetHeadAttr(HighDisplay);
            SetBoxAttr(HighDisplay);
            SetCharAttr(HighDisplay);
            SetWinAttr(HighDisplay);
            SetWinHeader('');
            SetBoxStyle(Double);
            WindowOpen(31,16,50,22);
            textbackground(1);
            gotoxy(2,1);
            writeln('       0 S     ');
            textbackground(0);
            writeln('     500 S');
            writeln('    1000 S');
            writeln('    5000 S');
            write('   10000 S');
            Counter3_5:=Counter3_5+1;
            No3_5[Counter3_5]:=1;
            repeat
                UpToDn:=false;
                DnToUp:=false;
                Key3_5:=readkey;
                case Key3_5 of
                    UpKey  : begin
                                if No3_5[Counter3_5]=1 then begin
                                   UpToDn:=true;
                                   No3_5[Counter3_5]:=5;
                                   textbackground(0);
                                   gotoxy(2,1);
                                   write('       0 S     ');
                                   textbackground(1);
                                   gotoxy(2,5);
                                   write('   10000 S     ');
                                end;
                                if No3_5[Counter3_5]=2 then begin
                                   No3_5[Counter3_5]:=1;
                                   textbackground(0);
                                   gotoxy(2,2);
                                   write('     500 S     ');
                                   textbackground(1);
                                   gotoxy(2,1);
                                   write('       0 S     ');
                                end;
                                if No3_5[Counter3_5]=3 then begin
                                   No3_5[Counter3_5]:=2;
                                   textbackground(0);
                                   gotoxy(2,3);
                                   write('    1000 S     ');
                                   textbackground(1);
                                   gotoxy(2,2);
                                   write('     500 S     ');
                                end;
                                if No3_5[Counter3_5]=4 then begin
                                   No3_5[Counter3_5]:=3;
                                   textbackground(0);
                                   gotoxy(2,4);
                                   write('    5000 S     ');
                                   textbackground(1);
                                   gotoxy(2,3);
                                   write('    1000 S     ');
                                end;
                                if (No3_5[Counter3_5]=5) and (UpToDn=false) then
begin
                                   No3_5[Counter3_5]:=4;
                                   textbackground(0);
                                   gotoxy(2,5);
                                   write('   10000 S     ');
                                   textbackground(1);
                                   gotoxy(2,4);
                                   write('    5000 S     ');
                                end;
                            end;
                    DnKey  : begin
                                if No3_5[Counter3_5]=5 then begin
                                   DnToUp:=true;
                                   No3_5[Counter3_5]:=1;
                                   textbackground(0);
                                   gotoxy(2,5);
                                   write('   10000 S     ');
                                   textbackground(1);
                                   gotoxy(2,1);
                                   write('       0 S     ');
                                end;
                                if No3_5[Counter3_5]=4 then begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                                    No3_5[Counter3_5]:=5;
                                                    textbackground(0);
                                                    gotoxy(2,4);
                                                    write('     5000 S    ');
                                                    textbackground(1);
                                                    gotoxy(2,5);
                                                    write('    10000 S    ');
                                                end;
                                                if No3_5[Counter3_5]=3 then begin
                                                    No3_5[Counter3_5]:=4;
                                                    textbackground(0);
                                                    gotoxy(2,3);
                                                    write('     1000 S    ');
                                                    textbackground(1);
                                                    gotoxy(2,4);
                                                    write('     5000 S    ');
                                                end;
                                                if No3_5[Counter3_5]=2 then begin
                                                    No3_5[Counter3_5]:=3;
                                                    textbackground(0);
                                                    gotoxy(2,2);
                                                    write('      500 S    ');
                                                    textbackground(1);
                                                    gotoxy(2,3);
                                                    write('     1000 S    ');
                                                end;
                                                if (No3_5[Counter3_5]=1) and (DnToUp=false) then
begin
                                                    No3_5[Counter3_5]:=2;
                                                    textbackground(0);
                                                    gotoxy(2,1);
                                                    write('        0 S    ');
                                                    textbackground(1);
                                                    gotoxy(2,2);
                                                    write('      500 S    ');
                                                end;
                                            end;
                                        EscKey : No3_5[Counter3_5]:=No3_5[Counter3_5-1];
                                    end;
                                until (Key3_5=ReturnKey) or (Key3_5=EscKey);
                                WindowClose;
                                case No3_5[Counter3_5] of
                                    1 : Td:=0;
                                    2 : Td:=500;
                                    3 : Td:=1000;
                                    4 : Td:=5000;
                                    5 : Td:=10000;
                                end;
                            end;
                        end;
                    until Key2_2=EscKey;
                    WindowClose;
                end;
            4 : begin
                    SetHeadAttr(HighDisplay);
                    SetBoxAttr(HighDisplay);
                    SetCharAttr(HighDisplay);
                    SetWinAttr(HighDisplay);
                    SetWinHeader('');
                    SetBoxStyle(Double);
                    WindowOpen(32,15,48,18);
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,1);
                    writeln('     YES     ');
                    textbackground(0);
                    write('     NO');
                    No2_3:=1;
                    repeat
                        UpToDn:=false;
                        DnToUp:=false;
                        Key2_3:=readkey;
                        case Key2_3 of
                            UpKey  : begin
                                        if No2_3=1 then begin
                                            UpToDn:=true;
                                            No2_3:=2;
                                            textbackground(0);
                                            gotoxy(2,1);
                                            write('     YES     ');
                                            textbackground(1);
                                            gotoxy(2,2);
                                            write('     NO      ');
                                        end;
                                        if (No2_3=2) and (UpToDn=false) then begin
                                            No2_3:=1;
                                            textbackground(0);
                                            gotoxy(2,2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                                    write('     NO     ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,1);
                                    write('     YES    ');
                                end;
                            end;
                    DnKey  : begin
                                if No2_3=2 then begin
                                    DnToUp:=true;
                                    No2_3:=1;
                                    textbackground(0);
                                    gotoxy(2,2);
                                    write('     NO     ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,1);
                                    write('     YES    ');
                                end;
                                if (No2_3=1) and (DnToUp=false) then begin
                                    No2_3:=2;
                                    textbackground(0);
                                    gotoxy(2,1);
                                    write('     YES    ');
                                    textbackground(1);
                                    gotoxy(2,2);
                                    write('     NO     ');
                                end;
                            end;
                    EscKey : No2_3:=2;
                end;
            until (Key2_3=ReturnKey) or (Key2_3=EscKey);
            WindowClose;
            case No2_3 of
                1 : Exit:=true;
                2 : Exit:=false;
            end;
        end;
    end;
until (Start=true) or (Exit=true);
WindowClose;
end;
procedure Step1;
begin
    {--- ROW OF BORDER ---}
    CursorOn;
    textcolor(1);
    for i:=0 to 2 do begin
        for j:=3 to 78 do begin
            if (i=0) or (i=1) then
                gotoxy(j,7*i+1)
            else
                gotoxy(j,24);
            write(chr(219));
        end;
    end;
    {--- COLUMN OF BORDER ---}
    for i:=1 to 24 do begin
        for j:=0 to 1 do begin
            gotoxy(78*j+1,i);
            write(chr(219),chr(219));
        end;
        if (i>8) and (i<24) then begin
            gotoxy(40,i);
            write(chr(219),chr(219));
        end;
    end;
    textcolor(14);
    textbackground(1);
    gotoxy(27,1);
    write('THE DESIGN OF GROUNDING GRID');
    gotoxy(16,24);
    write('FRONT VIEW');
    gotoxy(57,24);
    write('TOP VIEW');
    {--- FRONT VIEW OF TANK ---}
    textcolor(15);
    textbackground(0);
    for i:=10 to 23 do begin
        gotoxy(4,i);
        write(chr(186));
        gotoxy(38,i);
        write(chr(186));
    end;
    gotoxy(4,23);
    write(chr(200));
    for j:=5 to 37 do begin
        gotoxy(j,23);
        write(chr(205));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    end;
    gotoxy(38,23);
    write(chr(188));
    for i:=11 to 22 do begin
        if Pattern=1 then
           textcolor(6);
        if Pattern=2 then begin
           if i<14 then begin
              textcolor(7);
           end
           else
              textcolor(6);
        end;
        if Pattern=3 then begin
            if i<16 then
               textcolor(7)
            else
               textcolor(6);
        end;
        for j:=5 to 37 do begin
           gotoxy(j,i);
           write(chr(219));
        end;
    end;
    textcolor(15);
    if Pattern=1 then begin
       textbackground(6);
       gotoxy(6,11);
       write('Soil');
    end
    else begin
         textbackground(7);
         gotoxy(6,11);
         write('Upper Soil');
         textbackground(6);
         if Pattern=2 then
            gotoxy(6,14)
         else
            gotoxy(6,16);
         write('Lower Soil');
    end;
    {--- TOP VIEW OF TANK ---}
    textcolor(15);
    textbackground(0);
    gotoxy(43,9);
    write(chr(201));
    for j:=44 to 76 do begin
        gotoxy(j,9);
        write(chr(205));
    end;
    gotoxy(77,9);
    write(chr(187));
    for i:=10 to 22 do begin
        gotoxy(43,i);
        write(chr(186));
        gotoxy(77,i);
        write(chr(186));
    end;
    gotoxy(43,23);
    write(chr(200));
    for j:=44 to 76 do begin
        gotoxy(j,23);
        write(chr(205));
    end;
    gotoxy(77,23);
    write(chr(188));
    if (Pattern=1) or (Pattern=2) then
       textcolor(6)
    else
       textcolor(7);
    for i:=10 to 22 do begin
       for j:=44 to 76 do begin
           gotoxy(j,i);
           write(chr(219));
       end;
    end;
    SetHeadAttr(HighDisplay);
    SetBoxAttr(HighDisplay);
    SetCharAttr(HighDisplay);
    SetWinAttr(HighDisplay);
    SetWinHeader(' INPUT DATA ');
    SetBoxStyle(Double);
    WindowOpen(4,2,77,7);
    if Pattern=1 then
       write (' Area of Substation  =      x      m',chr(253))
    else
       write(' Area of Substation  =      x      m',chr(253));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        textcolor(14);
        repeat
            if Pattern=1 then
              gotoxy(28,1)
            else
              gotoxy(34,1);
            read(Lsubx);
            if Lsubx<=0 then begin
              if Pattern=1 then
                gotoxy(28,1)
              else
                gotoxy(34,1);
              write('      ');
              write(#07);
            end;
        until Lsubx>0;
        repeat
            if Pattern=1 then
              gotoxy(37,1)
            else
              gotoxy(43,1);
            read(Lsuby);
            if Lsuby<=0 then begin
              if Pattern=1 then
                gotoxy(37,1)
              else
                gotoxy(43,1);
              write('      ');
              write(#07);
            end;
        until Lsuby>0;
        textcolor(15);
        if (Pattern=2) or (Pattern=3) then begin
          write(' Resistivity of the Upper Soil =          ',chr(234),'-m');
          textcolor(14);
          repeat
              gotoxy(34,2);
              read(P1);
              if P1<=0 then begin
                gotoxy(34,2);
                write('                ');
                write(#07);
              end;
          until P1>0;
        end;
        textcolor(15);
        if Pattern=1 then
          write(' Resistivity of the Soil =          ',chr(234),'-m')
        else
          write(' Resistivity of the Lower soil =          ',chr(234),'-m');
        textcolor(14);
        repeat
            if Pattern=1 then
              gotoxy(28,2)
            else
              gotoxy(34,3);
            read(P2);
            if ((Pattern=1) and (P2<=0)) or (((Pattern=2) or (Pattern=3)) and ((P2<=0) or (P2=P1))) then begin
              if Pattern=1 then
                gotoxy(28,2)
              else
                gotoxy(34,3);
              write('                ');
              write(#07);
            end;
        until ((Pattern=1) and (P2>0)) or (((Pattern=2) or (Pattern=3)) and ((P2>0) and (P2<>P1)));
        if Pattern=1 then
          P1:=P2;
        WindowClose;
        D:=9.266;
        Gauge:='2/0 A.W.G.';
        if (Pattern=1) or (Pattern=3) then begin
          if Pattern=1 then
            H1:=0
          else
            H1:=2;
          H2:=0.25;
        end;
        if Pattern=2 then begin
          H1:=0.1;
          H2:=0.5;
        end;
    end;
    procedure Step2;
    begin
        CursorOff;
        SetHeadAttr(HighDisplay);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' CONDUCTOR SIZE ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(4,2,77,7);
        writeln(' Diameter of the Conductor =        mm');
        write(' Gauge                = ');
        textcolor(14);
        gotoxy(30,1);
        write(D:6:3);
        gotoxy(30,2);
        write(Gauge);
        delay(Td);
        WindowClose;
end;
procedure Step3;
begin
        CursorOff;
        SetHeadAttr(HighDisplay);
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' TOUCH VOLTAGE & STEP VOLTAGE CRITERIOR ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(4,2,77,7);
        writeln(' Touch Voltage =          V');
        write(' Step Voltage  =          V');
        if Counter=1 then begin
           SetHeadAttr(HighDisplay);
           SetBoxAttr(HighDisplay);
           SetCharAttr(HighDisplay);
           SetWinAttr(HighDisplay);
           SetWinHeader(' SHOCK AND FAULT DURATION ');
           SetBoxStyle(Double);
           WindowOpen(39,3,76,10);
           writeln('      Seconds      Cycles(50Hz)');
           writeln(' ---------------------------');
           textbackground(1);
           gotoxy(2,3);
           writeln('    0.01            ',chr(171),'          ');
           textbackground(0);
           writeln('    0.12            6');
           writeln('    0.3             15');
           write('    0.7 or more     35 or more');
           No:=1;
           repeat
                UpToDn:=false;
                DnToUp:=false;
                Key:=readkey;
                case Key of
                     UpKey : begin
                               if No=1 then begin
                                  UpToDn:=true;
                                  No:=4;
                                  textbackground(0);
                                  gotoxy(2,3);
                                  write('    0.01            ',chr(171),'          ');
                                  textbackground(1);
                                  gotoxy(2,6);
                                  write('    0.7 or more     35 or more      ');
                               end;
                               if No=2 then begin
                                  No:=1;
                                  textbackground(0);
                                  gotoxy(2,4);
                                  write('    0.12            6               ');
                                  textbackground(1);
                                  gotoxy(2,3);
                                  write('    0.01            ',chr(171),'          ');
                               end;
                               if No=3 then begin
                                  No:=2;
                                  textbackground(0);
                                  gotoxy(2,5);
                                  write('    0.3             15              ');
                                  textbackground(1);
                                  gotoxy(2,4);
                                  write('    0.12            6               ');
                               end;
                               if (No=4) and (UpToDn=false) then begin
                                  No:=3;
                                  textbackground(0);
                                  gotoxy(2,6);
                                  write('    0.7 or more     35 or more      ');
                                  textbackground(1);
                                  gotoxy(2,5);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    write('  0.3          15          ');
                  end;
              end;
        DnKey : begin
                  if No=4 then begin
                    DnToUp:=true;
                    No:=1;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,6);
                    write('  0.7 or more   35 or more    ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,3);
                    write('  0.01          ',chr(171),'          ');
                  end;
                  if No=3 then begin
                    No:=4;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,5);
                    write('  0.3          15          ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,6);
                    write('  0.7 or more   35 or more    ');
                  end;
                  if No=2 then begin
                    No:=3;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,4);
                    write('  0.12         6           ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,5);
                    write('  0.3          15          ');
                  end;
                  if (No=1) and (DnToUp=false) then begin
                    No:=2;
                    textbackground(0);
                    gotoxy(2,3);
                    write('  0.01          ',chr(171),'          ');
                    textbackground(1);
                    gotoxy(2,4);
                    write('  0.12         6           ');
                  end;
              end;
    end;
until Key=ReturnKey;
case No of
    1 : begin
          T:=0.1;
          Df:=1.39;
        end;
    2 : begin
          T:=0.12;
          Df:=1.2;
        end;
    3 : begin
          T:=0.3;
          Df:=1.1;
        end;
    4 : begin
          CursorOn;
          SetHeadAttr(HighDisplay);
          SetBoxAttr(HighDisplay);
          SetCharAttr(HighDisplay);
          SetWinAttr(HighDisplay);
          SetWinHeader('');
          SetBoxStyle(Double);
          WindowOpen(41,10,74,12);
          repeat
            textcolor(15);
            write(' T =      S (0.7 ',chr(243),' T ',chr(243),' 1 S)');
            textcolor(14);
            gotoxy(6,1);
            read(T);
            if (T<0.7) or (T>1) then
              write(#07);
          until (T>=0.7) and (T<=1);
          WindowClose;
          CursorOff;
          Df:=1;
        end;
end;
WindowClose;
end;
C:=1-0.106*(1-P2/P1)/(2*H1+0.106);
if (Pattern=1) or (Pattern=2) then
  P:=1+0.1378/H2
else
  P:=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Etouch:=(1.5*C*P*P1+1000)*0.116/sqrt(T);
      Estep:=(6*C*P*P1+1000)*0.116/sqrt(T);
      textcolor(14);
      textbackground(0);
      gotoxy(18,1);
      write(Etouch:8:2);
      gotoxy(18,2);
      write(Estep:8:2);
      delay(Td);
      WindowClose;
  end;
  procedure Step4;
  begin
      CursorOff;
      SetHeadAttr(HighDisplay);
      SetBoxAttr(HighDisplay);
      SetCharAttr(HighDisplay);
      SetWinAttr(HighDisplay);
      SetWinHeader(' INITIAL DESIGN ');
      SetBoxStyle(Double);
      WindowOpen(4,2,77,7);
      writeln(' Length of the Grid on X Axis   =        m');
      writeln(' Length of the Grid on Y Axis   =        m');
      writeln(' The Number of Meshes on X Axis =');
      write(' The Number of Meshes on Y Axis =');
      if Counter=1 then begin
         CursorOn;
         SetHeadAttr(HighDisplay);
         SetBoxAttr(HighDisplay);
         SetCharAttr(HighDisplay);
         SetWinAttr(HighDisplay);
         SetWinHeader(' CURRENT DIVISION FACTOR ');
         SetBoxStyle(Double);
         WindowOpen(47,3,76,5);
         repeat
              textcolor(15);
              write(' Sf =       (0 < Sf ',chr(243),' 1)');
              textcolor(14);
              gotoxy(7,1);
              read(Sf);
              if (Sf<=0) or (Sf>1) then
                 write(#07);
         until (Sf>0) and (Sf<=1);
         textcolor(15);
         gotoxy(2,1);
         write('Sf = ');
         textcolor(14);
         write(Sf:5:3);
         SetHeadAttr(HighDisplay);
         SetBoxAttr(HighDisplay);
         SetCharAttr(HighDisplay);
         SetWinAttr(HighDisplay);
         SetWinHeader(' FAULT CURRENT ');
         SetBoxStyle(Double);
         WindowOpen(47,6,76,8);
         repeat
              textcolor(15);
              write(' I =       A (I > 0 A)');
              textcolor(14);
              gotoxy(6,1);
              read(Ifault);
              if Ifault<=0 then
                 write(#07);
         until Ifault>0;
         WindowClose;
         WindowClose;
         CursorOff;
      end;
      Igrid:=Df*Sf*Ifault;
      if ((Pattern=1) and (Counter<20)) or ((Pattern=2) and (Counter<23)) then
         Lmin:=1.3*P2*Igrid*sqrt(T)/(0.116*(1.5*C*P*P1+1000));
      if (Pattern=3) and (Counter<27) then
         Lmin:=1.3*P1*Igrid*sqrt(T)/(0.116*(1.5*C*P*P1+1000));
      if ((Pattern=1) and (Counter>18)) or ((Pattern=2) and (Counter>21)) or ((Pattern=3) and (Counter>25))
  then
         Lmin:=Lmin+DeltaLmin;
      {--- Size of the grid remains unchanged ---}
      if Lsubx<=Lsuby then
         Lgridx:=Lsubx
      else
         Lgridx:=Lsuby;
      Lgridy:=Lgridx;
      Nconx:=1;
      repeat
         Nconx:=Nconx+1;
         Nconv:=Nconx;
         N:=(Nconx-1)*(Nconv-1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Scon:=Lgridx/(Nconv-1);
        Lcon:=Nconx*Lgridx+Nconv*Lgridy;
    until (Lcon>=Lmin) or (N>576) or (Scon<=2.5);
    {--- Size of the grid is expanded to only one direction ---}
    if (Lcon<Lmin) or (N>576) or (Scon<=2.5) or (Scon>Smax) then begin
      if Lsubx<=Lsuby then begin
        Lgridx:=Lsubx;
        Nconv:=1;
        repeat
            Nconv:=Nconv+1;
            Nconx:=Nconv;
            repeat
                Nconx:=Nconx+1;
                N:=(Nconx-1)*(Nconv-1);
                Scon:=Lgridx/(Nconv-1);
                Lgridy:=Scon*(Nconx-1);
                Lcon:=Nconx*Lgridx+Nconv*Lgridy;
            until ((Lcon>=Lmin) and (N<=576) and (Scon>2.5) and (Scon<=Smax)) or (Lgridy/Lgridx>
Ratio);
        until (Nconv>=24) or (Scon<=2.5) or (Lgridy/Lgridx<=Ratio);
      end
      else begin
        Lgridy:=Lsuby;
        Nconx:=1;
        repeat
            Nconx:=Nconx+1;
            Nconv:=Nconx;
            repeat
                Nconv:=Nconv+1;
                N:=(Nconx-1)*(Nconv-1);
                Scon:=Lgridy/(Nconx-1);
                Lgridx:=Scon*(Nconv-1);
                Lcon:=Nconx*Lgridx+Nconv*Lgridy;
            until ((Lcon>=Lmin) and (N<=576) and (Scon>2.5) and (Scon<=Smax)) or (Lgridx/Lgridy>
Ratio);
        until (Nconx>=24) or (Scon<=2.5) or (Lgridx/Lgridy<=Ratio);
      end;
    end;
    {--- Size of the grid is expanded to both directions ---}
    if (Lcon<Lmin) or (N>576) or (Scon<=2.5) or (Scon>Smax) then begin
      if Lsubx<=Lsuby then begin
        Lgridx:=Lsubx;
        repeat
            Lgridx:=Lgridx+DeltaLgrid;
            Nconv:=1;
            repeat
                Nconv:=Nconv+1;
                Nconx:=Nconv-1;
                repeat
                    Nconx:=Nconx+1;
                    N:=(Nconx-1)*(Nconv-1);
                    Scon:=Lgridx/(Nconv-1);
                    Lgridy:=Scon*(Nconx-1);
                    Lcon:=Nconx*Lgridx+Nconv*Lgridy;
                until ((Lcon>=Lmin) and (N<=576) and (Scon>2.5) and (Scon<=Smax)) or (Lgridy/Lgridx>
Ratio);
            until (Nconv>=25) or (Scon<=2.5) or (Lgridy/Lgridx<=Ratio);
        until (Nconv<25) and (Scon>2.5);
      end
      else begin
        Lgridy:=Lsuby;
        repeat
            Lgridy:=Lgridy+DeltaLgrid;
            Nconx:=1;
            repeat
                Nconx:=Nconx+1;
                Nconv:=Nconx-1;
                repeat
                    Nconv:=Nconv+1;
                    N:=(Nconx-1)*(Nconv-1);
                    Scon:=Lgridy/(Nconx-1);
                    Lgridx:=Scon*(Nconv-1);
                    Lcon:=Nconx*Lgridx+Nconv*Lgridy;
                until ((Lcon>=Lmin) and (N<=576) and (Scon>2.5) and (Scon<=Smax)) or
(Lgridx/Lgridy>Ratio);
            until (Nconx>=25) or (Scon<=2.5) or (Lgridx/Lgridy<=Ratio);
        until (Nconx<25) or (Scon>2.5);
      end;
    end;
    textcolor(14);
    gotoxy(35,1);
    write(Lgridx:6:2);
    gotoxy(35,2);
    write(Lgridy:6:2);
    gotoxy(35,3);
    write((Nconv-1):3);
    gotoxy(35,4);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        write((Nconx-1):3);
        delay(Td);
        WindowClose;
    end;
    procedure Step5;
    begin
        CursorOff;
        SetHeadAttr(HighDisplay);
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' GRID RESISTANCE ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(4,2,77,7);
        Lmesh:=(Lgridx-D/1000*Ncony)/(Ncony-1);
        Ltotal:=2*Lmesh*(N+sqrt(N));
        Agrid:=Lgridx*Lgridy;
        if (Pattern=1) or (Pattern=2) then begin
           Rg1:=(P2/4*sqrt(pi/Agrid)+P2/(2*pi*Ltotal)*ln(165*Lmesh/(e*D)))*(1-2.256*(H2-H1)/sqrt(Agrid));
           Rg2:=0;
        end
        else begin
            Rg1:=(P1/4*sqrt(pi/Agrid)+P1/(2*pi*Ltotal)*ln(165*Lmesh/(e*D)))*(1-2.256*H2/sqrt(Agrid));
            K:=(P2-P1)/(P2+P1);
            if Lgridx=Lgridy then
              Cf:=0.9
            else
               Cf:=0.93;
            Rg2:=P1*ln(1-K)/(2*pi*(H1+Cf*sqrt(Agrid/(2*pi))*ln(1-K)*(K-1)/(2*K)));
        end;
        Rg:=Rg1-Rg2;
        write(' Grid Resistance =          ',chr(234));
        textcolor(14);
        gotoxy(20,1);
        write(Rg:6:3);
        delay(Td);
        WindowClose;
    end;
    procedure Step6;
    begin
        CursorOff;
        SetHeadAttr(HighDisplay);
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' GRID CURRENT ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(4,2,77,7);
        write(' Grid Current =          A');
        textcolor(14);
        gotoxy(17,1);
        write(Igrid:8:2);
        delay(Td);
        WindowClose;
    end;
    procedure Step7;
    begin
        CursorOff;
        SetHeadAttr(HighDisplay);
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' CHECK GPR ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(4,2,77,7);
        GPR:=Igrid*Rg;
        writeln('      GPR          Etouch');
        writeln(' ------------------------');
        if GPR<Etouch then begin
           write('            <   ',Etouch:8:2,' V');
           textcolor(10);
           gotoxy(4,3);
           write(GPR:8:2);
        end
        else begin
            if GPR=Etouch then
              write('            =   ',Etouch:8:2,' V')
            else
               write('            >   ',Etouch:8:2,' V');
            textcolor(4);
            gotoxy(4,3);
            write(GPR:8:2);
        end;
        delay(Td);
        WindowClose;
    end;
    procedure Step8;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
    CursorOff;
    SetHeadAttr(HighDisplay);
    SetBoxAttr(HighDisplay);
    SetCharAttr(HighDisplay);
    SetWinAttr(HighDisplay);
    SetWinHeader(' MESH VOLTAGE & STEP VOLTAGE ');
    SetBoxStyle(Double);
    WindowOpen(4,2,77,7);
    Ncon:=sqrt(Nconx*Ncony);
    Ki:=0.656+0.172*Ncon;
    Kii:=1/exp(2/Ncon*ln(2*Ncon));
    if (Pattern=1) or (Pattern=2) then begin
       Kh:=sqrt(1+(H2-H1));
       Km1:=1/(2*pi)*ln(1000*sqr(Scon)/(16*(H2-H1)*D)+1000*sqr(Scon+2*(H2-H1))/(8*Scon*D)-1000*(H2-
H1)/(4*D));
    end
    else begin
        Kh:=sqrt(1+H2);
        Km1:=1/(2*pi)*ln(1000*sqr(Scon)/(16*H2*D)+1000*sqr(Scon+2*H2)/(8*Scon*D)-1000*H2/(4*D));
        if H1<sqrt(Agrid) then
           x:=0.075*exp(2*ln(ln(sqrt(Agrid)/H1)/ln(10)))
        else
           x:=0;
        Cm:=exp(x*ln(P2/P1));
    end;
    Km2:=Kii/(2*pi*Kh)*ln(8/(pi*(2*Ncon-1)));
    Km:=Km1+Km2;
    if (Pattern=1) or (Pattern=2) then
       Em:=P2*Km*Ki*Igrid/Ltotal
    else
       Em:=Cm*P1*Km*Ki*Igrid/Ltotal;
    if Nconx>=Ncony then
       Ncon:=Nconx
    else
       Ncon:=Ncony;
    Ki:=0.656+0.172*Ncon;
    if (Pattern=1) or (Pattern=2) then
       Ks:=1/pi*(1/(2*(H2-H1))+1/(Scon+H2-H1)+(1-exp((Ncon-2)*ln(0.5)))/Scon)
    else begin
        Ks:=1/pi*(1/(2*H2)+1/(Scon+H2)+(1-exp((Ncon-2)*ln(0.5)))/Scon);
        if H1<sqrt(Agrid) then
           y:=exp(1/3*ln(2*H2/H1))*(0.3*ln(Ltotal/sqrt(Agrid))/ln(10)+0.1)
        else
           y:=0;
        Cs:=exp(y*ln(P2/P1));
    end;
    if (Pattern=1) or (Pattern=2) then
       Es:=P2*Ki*Ks*Igrid/Ltotal
    else
       Es:=Cs*P1*Ki*Ks*Igrid/Ltotal;
    writeln(' Mesh Voltage =          V');
    write(' Step Voltage =          V');
    textcolor(14);
    gotoxy(17,1);
    write(Em:8:2);
    gotoxy(17,2);
    write(Es:8:2);
    delay(Td);
    WindowClose;
end;
procedure Step9;
begin
    CursorOff;
    SetHeadAttr(HighDisplay);
    SetBoxAttr(HighDisplay);
    SetCharAttr(HighDisplay);
    SetWinAttr(HighDisplay);
    SetWinHeader(' CHECK MESH VOLTAGE ');
    SetBoxStyle(Double);
    WindowOpen(4,2,77,7);
    writeln('      Em            Etouch');
    writeln(' ----------------------');
    if Em<Etouch then begin
       write('           <    ',Etouch:8:2,' V');
       textcolor(10);
       gotoxy(4,3);
       write(Em:8:2);
    end
    else begin
        if Em=Etouch then
           write('           =    ',Etouch:8:2,' V')
        else
           write('           >    ',Etouch:8:2,' V');
        textcolor(4);
        gotoxy(4,3);
        write(Em:8:2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    end;
    delay(Td);
    WindowClose;
end;
procedure Step10;
begin
    CursorOff;
    SetHeadAttr(HighDisplay);
    SetBoxAttr(HighDisplay);
    SetCharAttr(HighDisplay);
    SetWinAttr(HighDisplay);
    SetWinHeader(' CHECK STEP VOLTAGE ');
    SetBoxStyle(Double);
    WindowOpen(4,2,77,7);
    writeln('      Es          Estep');
    writeln(' ------------------------');
    if Es<Estep then begin
      write('          <  ',Estep:8:2,' V');
      textcolor(10);
      gotoxy(4,3);
      write(Es:8:2);
    end
    else begin
        if Es=Estep then
          write('          =  ',Estep:8:2,' V')
        else
          write('          >  ',Estep:8:2,' V');
        textcolor(4);
        gotoxy(4,3);
        write(Es:8:2);
    end;
    delay(Td);
    WindowClose;
end;
procedure Step11;
begin
    {--- FRONT VIEW OF TANK ---}
    CursorOff;
    textcolor(14);
    if Lgridx<=Lgridy then begin
      if (Pattern=1) or (Pattern=2) then begin
        textbackground(6);
        if Pattern=1 then
          gotoxy(14,16)
        else
          gotoxy(14,18);
      end
      else begin
          textbackground(7);
          gotoxy(14,14);
      end;
      write('  ',chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(207),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),' ',chr
(18),' ');
    end
    else begin
        if (Pattern=1) or (Pattern=2) then begin
          textbackground(6);
          if Pattern=1 then
            gotoxy(14,16)
          else
            gotoxy(14,18);
        end
        else begin
            textbackground(7);
            gotoxy(14,14);
        end;
        write(chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(207));
        write(chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),chr(205),' ',chr(18));
    end;
    if (Pattern=2) or (Pattern=3) then begin
      for i:=11 to 15 do begin
        gotoxy(32,i);
        if Pattern=2 then begin
          textbackground(7);
          if (i=11) or (i=13) then
            write(chr(179));
        end
        else begin
            if (i<13) or (i>13) then
              write(chr(179));
        end;
      end;
    end;
    for i:=11 to 17 do begin
      gotoxy(20,i);
      if Pattern=1 then begin
        if (i<13) or ((i>13) and (i<16)) then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            write(chr(179));
        end;
        if Pattern=2 then begin
          if (i<14) or (i>14) then begin
            if i>14 then
              textbackground(6);
            write(chr(179));
          end;
        end;
        if Pattern=3 then begin
          if (i=11) or (i=13) then
            write(chr(179));
        end;
    end;
    textcolor(15);
    if (Pattern=2) or (Pattern=3) then begin
      if Pattern=2 then
        textbackground(7);
      gotoxy(6,11);
      write('Resistivity1');
      gotoxy(6,12);
      write('=       ',chr(234),'-m');
    end;
    if Pattern=1 then begin
      gotoxy(6,11);
      write('Resistivity');
      gotoxy(6,12);
    end
    else begin
        textbackground(6);
        if Pattern=2 then
          gotoxy(6,14)
        else
            gotoxy(6,16);
        write('Resistivity2');
        if Pattern=2 then
          gotoxy(6,15)
        else
            gotoxy(6,17);
    end;
    write('=       ',chr(234),'-m');
    if Pattern=1 then
      gotoxy(22,18);
    if Pattern=2 then
      gotoxy(22,20);
    if Pattern=3 then
      gotoxy(22,16);
    write('d =       mm');
    if (Pattern=2) or (Pattern=3) then begin
      textbackground(7);
      if Pattern=2 then
        gotoxy(26,12)
      else
          gotoxy(26,13);
      write('H1 =      m');
    end;
    if Pattern=1 then begin
      gotoxy(20,13);
      write('H =       m');
    end
    else begin
      if Pattern=2 then begin
        textbackground(6);
        gotoxy(20,14);
      end
      else
          gotoxy(20,12);
      write('H2 =      m');
    end;
    textcolor(14);
    if (Pattern=2) or (Pattern=3) then begin
      if Pattern=2 then
        textbackground(7);
      gotoxy(8,12);
      write(P1:4:0);
    end;
    if Pattern=1 then
      gotoxy(8,12)
    else begin
        textbackground(6);
        if Pattern=2 then
          gotoxy(8,15)
        else
            gotoxy(8,17);
    end;
    write(P2:4:0);
    if Pattern=1 then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
   gotoxy(26,18);
if Pattern=2 then
   gotoxy(26,20);
if Pattern=3 then
   gotoxy(26,16);
write(D:6:3);
if (Pattern=2) or (Pattern=3) then begin
   textbackground(7);
   if Pattern=2 then
      gotoxy(31,12)
   else
      gotoxy(31,13);
   write(H1:3:2);
end;
if Pattern=1 then
   gotoxy(24,13);
if Pattern=2 then begin
   textbackground(6);
   gotoxy(25,14);
end;
if Pattern=3 then
   gotoxy(25,12);
write(H2:3:2);
{--- TOP VIEW OF TANK ---}
for i:=14 to 18 do begin
    for j:=49 to 61 do begin
        gotoxy(j,i);
        write(' ');
    end;
end;
if Lgridx<=Lgridy then begin
   if Lgridx=Lgridy then begin
      gotoxy(52,15);
      write(chr(201),chr(205),chr(205),chr(203),chr(205),chr(205),chr(203),chr(205),chr(205),chr(187));
   end
   else begin
        gotoxy(52,14);
        write(chr(201),chr(205),chr(205),chr(203),chr(205),chr(205),chr(203),chr(205),chr(205),chr(187));
        gotoxy(52,15);
        write(chr(204),chr(205),chr(205),chr(206),chr(205),chr(205),chr(206),chr(205),chr(205),chr(185));
   end;
   for i:=16 to 17 do begin
       gotoxy(52,i);
       write(chr(204));
   end;
   gotoxy(52,18);
   write(chr(200));
end
else begin
     gotoxy(49,15);
     write(chr(201),chr(205),chr(205),chr(203),chr(205),chr(205),chr(203));
     write(chr(205),chr(205),chr(203),chr(205),chr(205),chr(187));
     for i:=16 to 17 do begin
         gotoxy(49,i);
         write(chr(204),chr(205),chr(205),chr(206));
     end;
     gotoxy(49,18);
     write(chr(200),chr(205),chr(205),chr(202));
end;
for i:=16 to 17 do begin
    gotoxy(53,i);
    write(chr(205),chr(205),chr(206),chr(205),chr(205),chr(206),chr(205),chr(205),chr(185));
end;
gotoxy(53,18);
write(chr(205),chr(205),chr(202),chr(205),chr(205),chr(202),chr(205),chr(205),chr(188));
if Lgridx<=Lgridy then begin
   gotoxy(52,19);
   write(chr(195));
end
else begin
     gotoxy(49,19);
     write(chr(195),chr(196),chr(196),chr(196));
end;
write(chr(196),chr(196),chr(196),chr(196),chr(196),chr(196),chr(196),chr(196),chr(180));
if Lgridx>=Lgridy then begin
   gotoxy(63,15);
   write(chr(194));
end
else begin
     gotoxy(63,14);
     write(chr(194));
     gotoxy(63,15);
     write(chr(179));
end;
gotoxy(63,18);
write(chr(193));
textcolor(15);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
gotoxy(56,20);
write('Lx =       m ');
gotoxy(63,16);
write('Ly =       m');
gotoxy(56,21);
write('Nx = ');
gotoxy(63,17);
write('Ny = ');
textcolor(14);
gotoxy(61,20);
write(Lgridx:6:2);
gotoxy(68,16);
write(Lgridy:6:2);
gotoxy(61,21);
write((Ncony-1):3);
gotoxy(68,17);
write((Nconx-1):3);
if (GPR>Etouch) and ((Em>Etouch) or (Es>Estep)) then begin
  if (((Pattern=1) or (Pattern=3)) and (Counter<6)) or ((Pattern=2) and (Counter<5)) then
    H2:=H2+0.25;
  if (((Pattern=1) or (Pattern=3)) and (Counter>5) and (Counter<18)) or
    ((Pattern=2) and (Counter>4) and (Counter<17)) then begin
    if D=12 then begin
      D:=12.7;
      Gauge:='5/0 B.W.G. or 7/0 S.W.G';
    end;
    if D=11.786 then begin
      D:=12;
      Gauge:='12 mm.G.';
    end;
    if D=11.684 then begin
      D:=11.786;
      Gauge:='6/0 S.W.G.';
    end;
    if D=11.532 then begin
      D:=11.684;
      Gauge:='4/0 A.W.G.';
    end;
    if D=10.973 then begin
      D:=11.532;
      Gauge:='4/0 B.W.G.';
    end;
    if D=10.795 then begin
      D:=10.973;
      Gauge:='5/0 S.W.G.';
    end;
    if D=10.404 then begin
      D:=10.795;
      Gauge:='3/0 B.W.G.';
    end;
    if D=10.16 then begin
      D:=10.404;
      Gauge:='3/0 A.W.G.';
    end;
    if D=10 then begin
      D:=10.16;
      Gauge:='4/0 S.W.G.';
    end;
    if D=9.652 then begin
      D:=10;
      Gauge:='10 mm.G.';
    end;
    if D=9.44 then begin
      D:=9.652;
      Gauge:='2/0 B.W.G.';
    end;
    if D=9.266 then begin
      D:=9.44;
      Gauge:='3/0 S.W.G.';
    end;
  end;
  if (((Pattern=1) or (Pattern=3)) and (Counter>17)) or ((Pattern=2) and (Counter>16)) then begin
    D:=11.684;
    Gauge:='4/0 A.W.G.';
    if (Pattern=1) or (Pattern=3) then
      H2:=0.5
    else
      H2:=0.75;
  end;
  if (Pattern=2) and (Counter>16) and (Counter<21) then
    H1:=H1+0.05;
  if (Pattern=3) and (Counter>17) and (Counter<25) then
    H1:=H1+1;
  if (Pattern=2) and (Counter>20) then
    H1:=0.15;
  if (Pattern=3) and (Counter>24) then
    H1:=3;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    end;
end;
procedure Step12;
begin
    if (GPR<Etouch) or ((Em<Etouch) and (Es<Estep)) then begin
        SetHeadAttr(HighDisplay);
        SetBoxAttr(HighDisplay);
        SetCharAttr(HighDisplay);
        SetWinAttr(HighDisplay);
        SetWinHeader(' DETAIL DESIGN ');
        SetBoxStyle(Double);
        WindowOpen(4,2,77,7);
        writeln(' Grid Resistance =          ',chr(234));
        writeln(' GPR             =          V');
        writeln(' Mesh Voltage    =          V');
        write(' Step Voltage    =          V');
        textcolor(14);
        gotoxy(20,1);
        write(Rg:9:3);
        gotoxy(20,2);
        write(GPR:9:3);
        gotoxy(20,3);
        write(Em:9:3);
        gotoxy(20,4);
        write(Es:9:3);
        repeat
            ExitKey:=readkey;
        until ExitKey=EscKey;
        WindowClose;
    end;
end;
begin
    DirectVideo:=true;
    CheckSnow:=true;
    Pattern:=2;
    Deltalmin:=1000;
    DeltaLgrid:=10;
    Ratio:=4;
    Smax:=15;
    Td:=1000;
    Counter2_1:=0;
    Counter3_1:=0;
    Counter3_2:=0;
    Counter3_3:=0;
    Counter3_4:=0;
    Counter3_5:=0;
    repeat
        Menu;
        if Start=true then begin
            Counter:=0;
            ExitKey:=#0;
            Step1;
            repeat
                Counter:=Counter+1;
                Step2;
                Step3;
                Step4;
                Step5;
                Step6;
                Step7;
                Step8;
                Step9;
                Step10;
                Step11;
                Step12;
                if keypressed then
                    ExitKey:=readkey;
            until (GPR<Etouch) or ((Em<Etouch) and (Es<Estep)) or (ExitKey=EscKey);
        end;
    until Exit=true;
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit Screen;
interface
uses crt,dos;
const NoDisplay     = $00;
      LowDisplay    = $07;
      HighDisplay   = $0F;
      UnderLineLow  = $01;
      UnderLineHigh = $09;
      ReverseLow    = $70;
      ReverseHigh   = $78;
      BlinkLow      = $87;
      BlinkHigh     = $8F;
      UndBlinkLow   = $81;
      UndBlinkHigh  = $89;
      RevBlinkLow   = $F0;
      RevBlinkHigh  = $F8;
      ColorSeg      = $B800;
      MonoSeg       = $B000;
var VideoSeg   : word;
    CrtType    : byte absolute $0040:$0049;
    CursorMode : word absolute $0040:$0060;
    Vport      : word absolute $0040:$0063;
procedure SetAttr (Attrib : byte);
procedure SetCursor (Top,Bottom : byte);
procedure CursorOn;
procedure CursorOff;
implementation
var Regs : registers;
procedure SetAttr (Attrib : byte);
begin
    TextAttr:=Attrib;
end;
procedure SetCursor (Top,Bottom : byte);
begin
    Regs.AH:=1;
    Regs.CH:=Top;
    Regs.CL:=Bottom;
    intr($10,Regs);
end;
procedure CursorOn;
begin
    Port[Vport]:=10;
    Port[Vport+1]:=Hi(CursorMode) and $DF;
    Port[Vport]:=11;
    Port[Vport+1]:=Lo(CursorMode);
end;
procedure CursorOff;
begin
    Port[Vport]:=10;
    Port[Vport+1]:=Hi(CursorMode) or $20;
    Port[Vport]:=11;
    Port[Vport+1]:=Lo(CursorMode);
end;
procedure IdentifyCrt;
begin
    case CrtType of
        0..3 : VideoSeg:=ColorSeg;
        7    : VideoSeg:=MonoSeg;
    end;
end;
begin
    IdentifyCrt;
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
unit Win;
interface
uses crt,screen;
const Single = 1;
      Double = 2;
      Mix1   = 3;
      Mix2   = 4;
      BoxStyle       : byte   = Single;
      AttrOfBox      : byte   = HighDisplay;
      AttrOfWindow   : byte   = HighDisplay;
      AttrOfHeader   : byte   = HighDisplay;
      AttrOfChar     : byte   = HighDisplay;
      HeaderOfWindow : string = '';
      TypeOfBox      : array[1..4,1..8] of char =
                     ((#196,#179,#179,#196,#218,#191,#192,#217),
                      (#205,#186,#186,#205,#201,#187,#200,#188),
                      (#205,#179,#179,#205,#213,#184,#212,#190),
                      (#196,#186,#186,#196,#214,#183,#211,#189));
var ErrorWindow : byte; {indicate window error type}
    {ErrorWindow = 0 : No error}
    {ErrorWindow = 1 : Window's frame not valid}
    {ErrorWindow = 2 : Not enough memory to open window}
procedure WindowBox  (X1,Y1,X2,Y2 : byte);
procedure WindowOpen (X1,Y1,X2,Y2 : byte);
procedure WindowClose;
procedure SetBoxStyle (Attrib : byte);
procedure SetBoxAttr  (Attrib : byte);
procedure SetWinAttr  (Attrib : byte);
procedure SetHeadAttr (Attrib : byte);
procedure SetCharAttr (Attrib : byte);
procedure SetWinHeader (St : string);
implementation
type ScreenLine  = array[1..80] of integer;
     ScreenArray = array[1..25] of ScreenLine;
     ScreenBlock = array[1..2000] of integer;
     WindowLink  = ^WindowControlBlock;
     WindowControlBlock = record
                            X1,Y1,X2,Y2    : integer;
                            X,Y            : integer;
                            ID             : byte;
                            backLink       : WindowLink;
                            ScreenContents : ScreenBlock;
                          end;
var ActiveWindow : WindowLink;
    ScreenPtr    : ^ScreenArray;
    FixedSize    : integer;
    WindowCount  : byte;
procedure Windowbox (X1,Y1,X2,Y2 : byte);
const Top     = 1;
      Left    = 2;
      Right   = 3;
      Bottom  = 4;
      UpLeft  = 5;
      UpRight = 6;
      LoLeft  = 7;
      LoRight = 8;
var X,Y : byte;
begin
    Window(X1,Y1,X2,Y2);
    SetAttr(AttrOfWindow);
    clrscr;
    window(1,1,80,25);
    SetAttr(AttrOfBox);
    {Top}
    gotoxy(X1,Y1);
    write(TypeOfBox[BoxStyle,Upleft]);
    for X:=X1+1 to X2-1 do
        write(TypeOfBox[BoxStyle,Top]);
    write(TypeOfBox[BoxStyle,UpRight]);
    {Sides}
    for Y:=Y1+1 to Y2-1 do begin
        gotoxy(X1,Y);
        write(TypeOfBox[BoxStyle,Left]);
        gotoxy(X2,Y);
        write(TypeOfBox[BoxStyle,Right]);
    end;
    {Bottom}
    gotoxy(X1,Y2);
    write(TypeOfBox[BoxStyle,LoLeft]);
    for X:=X1+1 to X2-1 do
        write(TypeOfBox[Boxstyle,Bottom]);
    write(TypeOfBox[BoxStyle,LoRight]);
    {Make it the current window and locate cursor to top}
    SetAttr(AttrOfHeader);
    gotoxy((X1+X2-Length(HeaderOfWindow)) div 2,Y1);
    write(HeaderOfWindow);
    Window(X1+1,Y1+1,X2-1,Y2-1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    SetAttr(AttrOfChar);
end;
procedure WindowOpen (X1,Y1,X2,Y2 : byte);
var Block                : WindowLink;
   LineLength,WindowSize,I : integer;
   Y                     : byte;
begin
    LineLength:=X2-X1+1;
    WindowSize:=LineLength*(Y2-Y1+1)*2+FixedSize;
    if (X2>80) or (Y2>25) or (X2-X1<2) or (Y2-Y1<2) then
       ErrorWindow:=1
    else
        if (abs(MemAvail)<WindowSize) then
           ErrorWindow:=2
        else
            ErrorWindow:=0;
    if ErrorWindow=0 then begin
       Getmem(Block,WindowSize);
       Block^.X1:=X1;
       Block^.X2:=X2;
       Block^.Y1:=Y1;
       Block^.Y2:=Y2;
       Block^.X:=WhereX;
       Block^.Y:=WhereY;
       Block^.BackLink:=ActiveWindow;
       ActiveWindow:=Block;
       WindowCount:=WindowCount+1;
       Block^.ID:=WindowCount;
       I:=1;
       for Y:=Y1 to Y2 do begin
           Move(ScreenPtr^[Y,X1],Block^.ScreenContents[I],LineLength*2);
           I:=I+LineLength;
       end;
       WindowBox(X1,Y1,X2,Y2);
    end;
end;
procedure WindowClose;
var Block                : WindowLink;
   LineLength,WindowSize,I : integer;
   Y                     : byte;
begin
    if ActiveWindow<>nil then begin
       Block:=ActiveWindow;
       LineLength:=Block^.X2-Block^.X1+1;
       WindowSize:=LineLength*(Block^.Y2-Block^.Y1+1)*2+FixedSize;
       WindowCount:=WindowCount-1;
       I:=1;
       for Y:=Block^.Y1 to Block^.Y2 do begin
           Move(Block^.ScreenContents[I],ScreenPtr^[Y,Block^.X1],LineLength*2);
           I:=I+LineLength;
       end;
       ActiveWindow:=Block^.BackLink;
       if ActiveWindow=nil then
          Window(1,1,80,25)
       else
           With ActiveWindow^ do Window(X1+1,Y1+1,X2-1,Y2-1);
       gotoxy(Block^.X,Block^.Y);
       FreeMem(Block,WIndowSize);
    end;
end;
procedure InitWin;
begin
    ActiveWindow:=nil;
    FixedSize:=SizeOf(WindowControlBlock)-SizeOf(ScreenBlock);
    ScreenPtr:=Ptr(VideoSeg,0);
    Window(1,1,80,25);
    WindowCount:=0;
end;
procedure SetBoxStyle (Attrib : byte);
begin
    BoxStyle:=Attrib;
end;
procedure SetWinHeader (St : string);
begin
    HeaderOfWindow:=St;
end;
procedure SetWinAttr (Attrib : byte);
begin
    AttrOfWindow:=Attrib;
end;
procedure SetBoxAttr (Attrib : byte);
begin
    AttrOfBox:=Attrib;
end;
procedure SetHeadAttr (Attrib : byte);
begin
    AttrOfHeader:=Attrib;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;
procedure SetCharAttr (Attrib : byte);
begin
    AttrOfChar:=Attrib;
end;
begin
    InitWin;
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสมชาติ จิริวิภากร เกิดวันที่ 9 ธันวาคม 2515 ที่จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 และสำเร็จการศึกษาบริหารธุรกิจบัณฑิต สาขาการบริหารทั่วไป จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2537 เข้ารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ 3 สังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทบวงมหาวิทยาลัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ 4 สังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทบวงมหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้