

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบกราวด์กฤษของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000



นายจีรพัฒน์ นวอนุรักษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

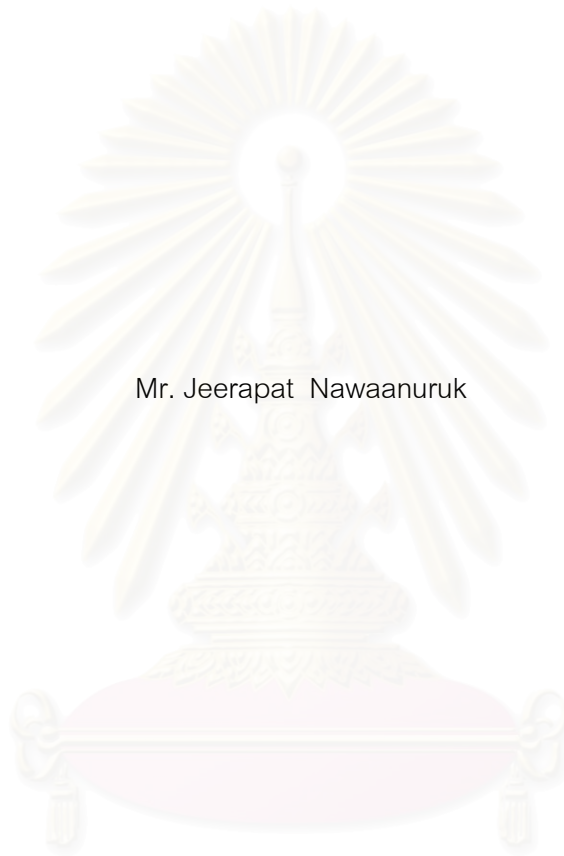
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3428-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A COMPUTER SOFTWARE FOR SUBSTATION GROUND GRID DESIGN
ACCORDING TO IEEE std. 80-2000



Mr. Jeerapat Nawaanuruk

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic year 2006

ISBN 974-14-3428-6

Copyright of Chulalongkorn University

จิรพัฒน์ นวอนุรักษ์ : การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าตาม
มาตรฐาน IEEE 80-2000 (DEVELOPMENT OF A COMPUTER SOFTWARE FOR
SUBSTATION GROUND GRID DESIGN ACCORDING TO IEEE std. 80-2000.)

อ.ที่ปรึกษา: อ.ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 102 หน้า. ISBN 974-14-3428-6

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเมื่อ
พิจารณาดินเป็นแบบสองชั้นและชั้นเดียว โดยอ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE 80 -2000 ที่มี
วัตถุประสงค์เพื่อให้คำแนะนำเกี่ยวกับการติดตั้งระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าให้เกิดความปลอดภัย
พัฒนาข้อกำหนดในการออกแบบ และนำเสนอขั้นตอนการออกแบบตามข้อกำหนดอย่างง่ายในการ
คำนวณ

จากข้อมูลของดินพบว่าดินส่วนมากที่พบเป็นดินแบบไม่สม่ำเสมอ การออกแบบกราวด์กริด
ของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่
คำนวณได้จากวิธีดินสองชั้นกับค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้น
เดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน
IEEE 80-2000 แรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าการออกแบบ
กราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ดังนั้นการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้เกิด
ความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าและเกิดความประหยัด ส่วนการออกแบบกราวด์กริด
ด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า
เพิ่มขึ้น แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ไม่ทำให้เกิดความประหยัด และการออกแบบกราวด์กริดของสถานี
ไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 แรงดันไฟฟ้าเมฆและ
แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดมีค่ามากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ดังนั้นการ
ออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานใน
สถานีไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ไม่ทำให้เกิดความประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับกราวด์กริด
กราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต..... จิรพัฒน์ นวอนุรักษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อ.ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์
ปีการศึกษา 2549

4770245721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : SUBSTATION GROUND GRID DESIGN / IEEE std. 80-2000

JEERAPAT NAWAANURUK : DEVELOPMENT OF A COMPUTER SOFTWARE FOR
SUBSTATION GROUND GRID DESIGN ACCORDING TO IEEE std. 80-2000. THESIS
ADVISOR : KOMSON PETCHARAKS, Ph.D., 102 pp. ISBN 974-14-3428-6

This thesis presents the development of a computer software for substation ground grid design by using two-layer soil and uniform soil methods. The software was designed according to IEEE std. 80-2000, which advices about a safe method to install substation grounding system, a design guidelines as well as simple design procedures.

Normally, most of soil was nonuniform. Using two-layer soil, parameters for substation ground grid design should provide a better result than substation ground grid design by using uniform soil parameter according to IEEE std. 80-2000.

For substation ground grid designed by two-layer soil method of soil type 1, mesh voltage and step voltage are less than those calculated from uniform soil method. Therefore, application of two-layer soil method in ground grid design will provide safety to the operators in the substation, it is an economical design. In case of application of substation ground grid design by uniform soil method according to IEEE std. 80-2000 will provide more safety to the operators in the substation, but it is an expensive design. However for substation ground grid design by two-layer soil method of soil type 2, mesh voltage and step voltage are higher than those calculated from uniform soil method. Therefore, application of two-layer soil method in ground grid design will provide more safety to the operators in the substation, but it is an expensive design when compared to substation ground grid design by uniform soil method according to IEEE std. 80-2000.

Department :.....Electrical Engineering..... Student's Signature :.....*J. Nawaanuruk*.....

Field of Study :.....Electrical Engineering..... Advisor's Signature :.....*K. Petcharaks*.....

Academic Year :.....2006.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และอาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนหวังว่า ถ้าสิ่งใดที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ นั่นก็เพราะบุคคลดังกล่าวทุกท่าน ที่ได้กล่าวถึง แต่ในส่วนของความผิดพลาดประการใดๆ ก็ตามที่เกิดขึ้นภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอรับไว้แต่เพียงผู้เดียวและ ขออภัยล่วงหน้าไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ให้การสนับสนุนทุกๆ เรื่องและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
2. การออกแบบบกราวด์กритของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000	3
2.1 คำจำกัดความของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบระบบบกราวด์กритในสถานีไฟฟ้า	3
2.2 ความปลอดภัยในการต่อลงดิน	4
2.3 อันตรายที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า	5
2.4 ย่านของกระแสที่มีอันตรายต่อคน	5
2.4.1 ผลของความถี่	5
2.4.2 ผลของขนาดและระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย	5
2.4.3 ความเร็วในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน.....	6
2.5 ขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายคน	6
2.6 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้	7
2.6.1 ความต้านทานร่างกายคน.....	8
2.6.2 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch Voltage)	8
2.6.3 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ (Step Voltage)	10
2.6.4 ผลของวัสดุปูผิวดิน.....	12

2.6.5 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถได้เมื่อคิดผลของวัสดุปู ผิวดินและไม่คิดผลของวัสดุปูผิวดิน	13
2.7 การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า	14
2.8 การเลือกและการต่อตัวนำ.....	15
2.8.1 วัสดุที่ใช้ทำตัวนำและปัญหาการกัดกร่อน.....	15
2.8.1.1 ทองแดง	15
2.8.1.2 เหล็กชุบทองแดง.....	16
2.8.1.3 อะลูมิเนียม.....	16
2.8.1.4 เหล็ก.....	16
2.8.2 ขนาดของสายตัวนำ	16
2.8.3 การต่อตัวนำ.....	17
2.9 คุณลักษณะของดิน.....	17
2.9.1 โมเดลของดิน.....	17
2.9.2 ผลของแรงดันเกรเดียนท์.....	18
2.9.3 ผลของขนาดกระแส.....	18
2.9.4 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และส่วนประกอบเคมี.....	18
2.9.5 ผลของวัสดุปูผิวดิน.....	18
2.10 ความต้านทานจำเพาะของดินและการวัด	18
2.10.1 การวัดความต้านทานจำเพาะของดิน	19
2.10.2 โมเดลความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้.....	21
2.10.2.1 ดินสม่ำเสมอ	21
2.10.2.2 ดินสองชั้น	21
2.10.2.2.1 โมเดลดินสองชั้นจากการคำนวณ.....	22
2.10.2.2.2 โมเดลดินสองชั้นจากกราฟ.....	22
2.10.2.2.3 การเปรียบเทียบดินแบบสม่ำเสมอและดินแบบสองชั้น	26
2.11 การหาความต้านทานของระบบกราวด์กริดเมื่อใช้โมเดลดินสม่ำเสมอ	26
2.11.1 วิธีอย่างง่ายในการคำนวณความต้านทานดิน.....	27
2.11.2 การคำนวณความต้านทานดินจากสมการของ Schwarz.....	28
2.12 การหาค่ากระแสกริดสูงสุด	30
2.12.1 กระแสผิดพลาดลงดิน	31

2.12.2 ผลของความต้านทานดินสถานีไฟฟ้า	32
2.12.3 ผลของความต้านทานจุดผิดพ่วง	32
2.12.4 ผลของสายดินและสายนิวทรัลของสายส่งเหนือดิน	33
2.12.5 ผลของท่อและเคเบิลฝังดิน	33
2.12.6 กระแสผิดพ่วงสูงสุด	33
2.12.7 การคำนวณกระแสแบ่งไหล	33
2.12.8 ผลของกระแสตรง	36
2.13 หลักการออกแบบ	37
3. การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้น	39
3.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้น	39
3.2 เงื่อนไขการออกแบบระบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า	45
3.3 ขั้นตอนการออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า	46
3.3.1 สำรองข้อมูลและพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า	46
3.3.2 หาขนาดของสายตัวนำ	46
3.3.3 หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้	46
3.3.4 การออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น	46
3.3.5 การหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด	47
3.3.6 การหาค่ากระแสกริดสูงสุด	54
3.3.7 การตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้	54
3.3.8 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า	54
3.3.9 การตรวจสอบแรงดันเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่มนุษย์ทนได้	56
3.3.10 การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดกับ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้	57
3.3.11 การเปลี่ยนแปลงการออกแบบ	57
4. ผลการออกแบบและการวิเคราะห์ผล	59
4.1 วิธีการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น และดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80	59
4.1.1 การป้อนข้อมูลสนามและการคำนวณหาขนาดพื้นที่ของกราวด์กริด	60
4.1.2 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาขนาดสายตัวนำ	61

4.1.3 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ที่มนุษย์สามารถทนได้	63
4.1.4 การป้อนข้อมูลและการออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น.....	63
4.1.5 การป้อนข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงการออกแบบกราวด์กริด	64
4.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียว.....	64
4.2.1 ดินชนิดที่ 1	64
4.2.2 ดินชนิดที่ 2.....	65
4.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริด ด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียว	68
4.3.1 ดินชนิดที่ 1	68
4.3.2 ดินชนิดที่ 2.....	70
5. สรุปและข้อเสนอนะ	74
5.1 สรุปผลการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก ข้อมูลคุณสมบัติและค่าคงที่ต่างๆของวัสดุตัวนำ	78
ภาคผนวก ข ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดินจากมาตรฐาน IEEE 80-2000 และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น	79
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบกราวด์กริด	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	102

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ขนาดกระแสต่ำสุดและระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเปิดวงจร.....	7
2.2 ความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่างๆ.....	19
2.3 อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่มุมกับแรงดันไฟฟ้าเมฆต่ำสุดที่กึ่งกลางกริด.....	38
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่คำนวณได้ในรอบที่ $k = 1$	43
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่คำนวณได้ในรอบที่ $k = 2$	44
4.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น กับค่าตามมาตรฐาน IEEE 80 ของดินชนิดที่ 1	64
4.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น กับค่าตามมาตรฐาน IEEE 80 ของดินชนิดที่ 2	66
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1	68
4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80	68
4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2	71
4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80	71
5.1 การเปรียบเทียบการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียว	74
ก.1 คุณสมบัติและค่าคงที่ต่างๆของวัสดุตัวนำ.....	78
ข.1 ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดินจากมาตรฐาน IEEE 80-2000 และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1	79
ข.2 ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดินจากมาตรฐาน IEEE 80-2000 และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2	80
ข.3 ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดแบบสื่จุด และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2	81

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า	3
2.2 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส.....	8
2.3 วงจรแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเพื่อหา Z_{Th}	9
2.4 วงจรเทวินินของวงจรอุบัติเหตุเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	9
2.5 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว	10
2.6 วงจรแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเพื่อหา Z_{Th}	11
2.7 วงจรเทวินินของวงจรอุบัติเหตุเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว.....	11
2.8 โมเดลของดิน.....	17
2.9 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่จุด	19
2.10 แสดงกราฟ Sunde	23
2.11 ตัวอย่างความต้านทานจำเพาะกับระยะห่างของโพรบในการวัดแบบสี่จุด	24
2.12 ตัวอย่างการหาค่า ρ_a/ρ_1 เมื่อทราบค่า ρ_2/ρ_1 จากกราฟ Sunde.....	25
2.13 การหาค่าระยะห่างโพรบที่วัดจากค่า $\rho_a = 200$ โอห์ม.เมตร	26
2.14 สัมประสิทธิ์ K_1 และ K_2 ในสมการของ Schwarz.....	29
2.15 การต่อสี่แควนซ์ของการฝังพ่วงเฟสลงดิน.....	31
2.16 กระแสกริดลดลงเมื่อกระแสฝังพ่วงลงดินบางส่วนไหลย้อนกลับไปยังสายซึ่งอากาศ.....	34
2.17 วงจรเพื่อการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์ส่วนลด.....	34
3.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นด้วยวิธี gradient.....	40
3.2 การเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น ในรอบที่ $k = 1$ กับค่าที่วัดได้	43
3.3 การเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น ในรอบที่ $k = 2$ กับค่าที่วัดได้	44
3.4 การเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นกับค่าที่วัดได้.....	45
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p กับพารามิเตอร์ p	48
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ N กับ x	50
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p กับพารามิเตอร์ p	51
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K'_p กับพารามิเตอร์ p	53
3.9 แสดงขั้นตอนการออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า.....	58

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบกราวด์กริด	59
4.2 การป้อนขนาดของกริดแบบรูปตัวแอล	60
4.3 โปรแกรมการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและชั้นเดียว	61
4.4 โปรแกรมการคำนวณหาขนาดของกระแสผิวดำรง	62
4.5 การใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80.....	65
4.6 การใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80.....	66
4.7 การใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินชนิดที่ 2	67
4.8 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80	69
4.9 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80	70
4.10 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80	72
4.11 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80	73
ค.1 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งรากสายดิน 56 แท่ง.....	88
ค.2 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแท่งรากสายดิน 42 แท่ง	92
ค.3 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งรากสายดิน 70 แท่ง.....	97

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอน การดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า ต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า จากกระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริดหรือพื้นที่ที่อยู่บริเวณรอบๆทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติกระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริดจะมีขนาดสูงมากทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองข้างในขณะที่มนุษย์เดินอยู่ในสถานีไฟฟ้า (step voltage) หรือเกิดขึ้นระหว่างเท้าและแขนในขณะที่มนุษย์สัมผัสกับอุปกรณ์ (touch voltage) เพราะมีกระแสไหลผ่านเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ถ้ากระแสที่ไหลเข้าสู่ร่างกายนี้มีค่ามากกว่ากระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ก็จะทำให้เกิดช็อกหรือเสียชีวิตได้ การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าที่ดีจึงควรออกแบบให้ค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดมีค่าต่ำ

มาตรฐาน IEEE 80-2000 กล่าวถึงการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นในการทำวิจัยนี้จะทำการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นด้วยวิธีที่กำหนดในมาตรฐาน IEEE 80-2000

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าให้มีความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
- 2) เพื่อพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบกราวด์กริดตามมาตรฐาน IEEE 80-2000
- 3) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

1.3 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์

- 1) พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นแล้วสามารถนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปใช้งานได้
- 2) พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นให้เกิดความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าจากมาตรฐาน IEEE 80-2000
- 2) พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของดินด้วยวิธีดินสองชั้น นำค่าที่คำนวณได้มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง ทำการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างและความลึกของดินชั้นบน
- 3) พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า นำค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่ได้มาใช้ในการคำนวณในโปรแกรมการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า
- 4) สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1) ได้โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้น
- 2) การออกแบบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดินสองชั้น จะมีค่าถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าการออกแบบด้วยดินชั้นเดียว เนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากวิธีดินสองชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้
- 3) การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้น ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าในสภาวะปกติและสภาวะผิดปกติ

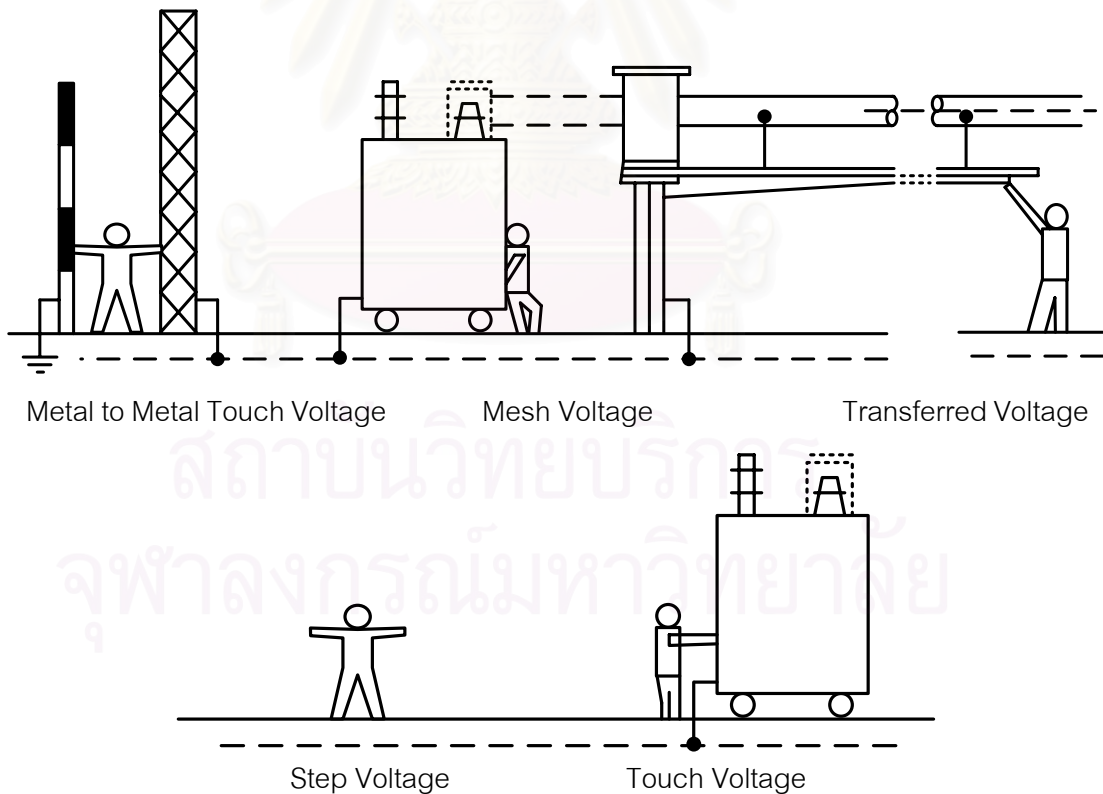
บทที่ 2

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 เพื่อให้การออกแบบเกิดความถูกต้องปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า และมีขั้นตอนการออกแบบตามข้อกำหนดอย่างง่ายในการคำนวณ

2.1 คำจำกัดความของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบระบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า

เมื่อเกิดความผิดปกติหรือเกิดการลัดวงจร กระแสผิดพลาดที่ไหลในกราวด์กริดจะทำให้แรงดันที่กราวด์กริดเพิ่มขึ้นและดินที่อยู่รอบๆกราวด์กริดที่ห่างออกไปจะมีแรงดันเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวดินในสถานีไฟฟ้า โดยแรงดันที่เกิดขึ้นบนกราวด์กริดจะมีค่าสูงที่สุด แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

ระบบกราวด์กริด (Grounding Grid) เป็นระบบการต่อลงดินในแนวราบที่ประกอบด้วยตัวนำฝังดินที่ต่อถึงกัน และเป็นจุดต่อลงดินร่วมของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างโลหะที่อยู่ภายในพื้นที่นั้นๆ

แรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise, GPR) เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า ค่า GPR เท่ากับผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับความต้านทานของระบบกราวด์กริด

แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage) เป็นแรงดันสัมผัสที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ที่พบในเมชของกราวด์กริด

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสโลหะ-โลหะ (Metal to Metal Touch Voltage) เป็นความต่างศักย์ระหว่างวัตถุโลหะหรือโครงสร้างภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งต่อถึงกันระหว่างมือกับมือ หรือมือกับเท้าทำให้เกิดกระแสไหลในร่างกาย

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) เป็นความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าบนผิวดินระหว่างจุด 2 จุดระยะห่างกันหนึ่งเมตรเท่ากับก้าวหนึ่งของคน ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเท้าโดยไม่ได้สัมผัสวัตถุที่ต่อลงดินส่งผลให้เกิดกระแสไหลในร่างกาย

แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) เป็นความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของระบบต่อลงดินที่คนไปแตะหรือสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าที่ผิวจุดที่คนยืนอยู่นั้นทำให้เกิดกระแสไหลในร่างกาย

แรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transferred Voltage) เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ถ่ายโอนเข้าไปหรือออกจากสถานีไฟฟ้าไปยังจุดระยะไกล (Remote Point) ที่อยู่ภายนอกสถานีไฟฟ้า

2.2 ความปลอดภัยในการต่อลงดิน

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า กระแสผิดปกติจะทำให้อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าได้รับความเสียหาย และทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบระบบกราวด์กริดจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าขณะที่กระแสลงดินทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ

2.3 อันตรายที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

เมื่อเกิดความผิดปกติหรือเกิดการลัดวงจร กระแสที่ไหลลงดินทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นรอบๆสถานี แรงดันที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวดินอาจมีขนาดสูงทำให้เกิดอันตรายกับคนระหว่างเกิดความผิดปกติ ดังนั้นอันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสถานีไฟฟ้ามีดังนี้

- 1) ความต้านทานจำเพาะของดินสูงและกระแสไหลลงสู่ดินมีค่าสูงทำให้เกิดแรงดันสูงที่พื้นผิวของสถานีไฟฟ้า
- 2) มีส่วนของร่างกายไปสัมผัสระหว่างสองจุดที่มีความต่างศักย์สูง ในระหว่างที่เกิดกระแสผิดปกติลงดิน
- 3) ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายคนนานมากจนทำให้เกิดอันตรายกับคนในสถานีไฟฟ้า

2.4 ย่านของกระแสที่มีอันตรายต่อคน

ย่านของกระแสที่มีอันตรายต่อคนขึ้นอยู่กับระยะเวลา ขนาดและความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน

2.4.1 ผลของความถี่

คนมีอันตรายเนื่องจากไฟฟ้าที่ความถี่ 50-60 เฮิร์ตซ์ แต่ที่ความถี่สูงกระแสที่ทำให้เกิดอันตรายต่อคนก็จะสูงขึ้น IEC ได้มีการกำหนดขนาดกระแสที่มีอันตรายกับคนตามฟังก์ชันของความถี่ (IEC 60479-2(1987-03))

2.4.2 ผลของขนาดและระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย

ผลของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายตามขนาดกระแสที่เพิ่มขึ้นคือ รู้สึกถึงไฟดูด กล้ามเนื้อเกร็ง ไม่รู้สึกตัว หัวใจไม่ทำงาน ระบบควบคุมการหายใจไม่ทำงาน และเกิดการไหม้

- 1) การรับรู้ถึงกระแส (Threshold of Perception) ขนาดกระแสเฉลี่ย 1 mA ทำให้คนรู้สึกถึงกระแสที่ไหลผ่าน Dalziel (IEEE Std 80-2000) ได้ทดลองกับผู้หญิง 28 คน และผู้ชาย 134 คนพบว่าค่ากระแสที่รับรู้ได้สำหรับผู้หญิงเท่ากับ 6 mA และกระแสที่รับรู้ได้สำหรับผู้ชายเท่ากับ 9 mA
- 2) กระแสปลดปล่อย (Let-go Current) ขนาดกระแสเฉลี่ย 1 – 6 mA ทำให้รู้สึกไม่สามารถที่จะจับส่วนที่มีไฟฟ้าต่อได้ แต่ไม่ทำให้สูญเสียการควบคุม Dalziel (IEEE Std 80-2000) ได้ทดลองกับผู้หญิง 28 คน และผู้ชาย 134 คนพบว่าค่ากระแสปลดปล่อยสำหรับผู้หญิงเท่ากับ 10.5 mA และกระแสปลดปล่อยสำหรับผู้ชายเท่ากับ 16 mA

3) กล้ามเนื้อเกร็ง (Muscular Contraction) ขนาดกระแสเฉลี่ย 9 – 25 mA ทำให้กล้ามเนื้อเกร็งและไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อมือได้ แต่ไม่มีผลถาวร ความรู้สึกนี้จะหายไปเมื่อกระแสหยุดไหล

4) หัวใจเต้นผิดจังหวะ (Ventricular Fibrillation) ขนาดกระแสเฉลี่ย 60 – 100 mA ทำให้หัวใจไม่ทำงานและไม่สามารถสูบฉีดโลหิตไปเลี้ยงร่างกายได้ ดังนั้นการออกแบบต้องไม่ให้เกิดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนเกินกว่าค่านี้เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

พลังงานที่ร่างกายดูดซับ, S_B เมื่อมีกระแสไหลผ่านร่างกายในช่วงระยะเวลาระหว่าง 0.03 – 3.0 วินาทีโดยไม่เกิดอันตราย สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$S_B = I_B^2 \times t_s \quad (2.1)$$

เมื่อ I_B คือกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน, A

t_s คือระยะเวลาที่กระแสไหลผ่าน, s

2.4.3 ความเร็วในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน

ความเร็วในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายคนเมื่อมีกระแสผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ ระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันตัดวงจรพิจารณาได้สองระดับ คือระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงาน (Main Protection) และระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเสริม (Backup Protection) ทำงาน เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงานมีค่าน้อยกว่าอุปกรณ์ป้องกันเสริมทำงาน ดังนั้นระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายคนสามารถใช้เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงาน แต่ถ้าต้องการให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้นก็สามารถใช้เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเสริมทำงานได้

2.5 ขนาดกระแสที่มีผลต่อร่างกายคน

ขนาดกระแสที่คนไม่ได้รับอันตรายเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านร่างกายคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สำหรับระยะเวลา 0.03 – 3.0 วินาที คือ

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.2)$$

ขนาดกระแสที่คนไม่ได้รับอันตรายเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านร่างกายคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม สำหรับระยะเวลา 0.03 – 3.0 วินาที คือ

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.3)$$

เมื่อ I_B คือกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน, A

t_s คือระยะเวลาที่กระแสไหลผ่าน, s

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) เมื่อพิจารณาเวลาดัตถวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน จะได้ขนาดกระแสต่ำสุดที่ไหลผ่านร่างกายคนน้ำหนัก 50 และ 70 กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เวลาดัตถกระแส (s)	กระแส (mA)	
	50 kg	70 kg
0.03	670	906
0.1	367	496
0.5	164	222
1	116	157
2	82	111
3	67	91
15	30	41

ตารางที่ 2.1 ขนาดกระแสต่ำสุดและระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเปิดวงจร

2.6 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้

การออกแบบระบบกราวด์กจริตของสถานีไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าขณะเกิดความผิดปกติลงดินต้องพิจารณาค่าความต้านทานของร่างกายคน และผลของวัสดุปูผิวดินที่อยู่ด้านบนของพื้นสถานีไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

2.6.1 ความต้านทานร่างกายคน

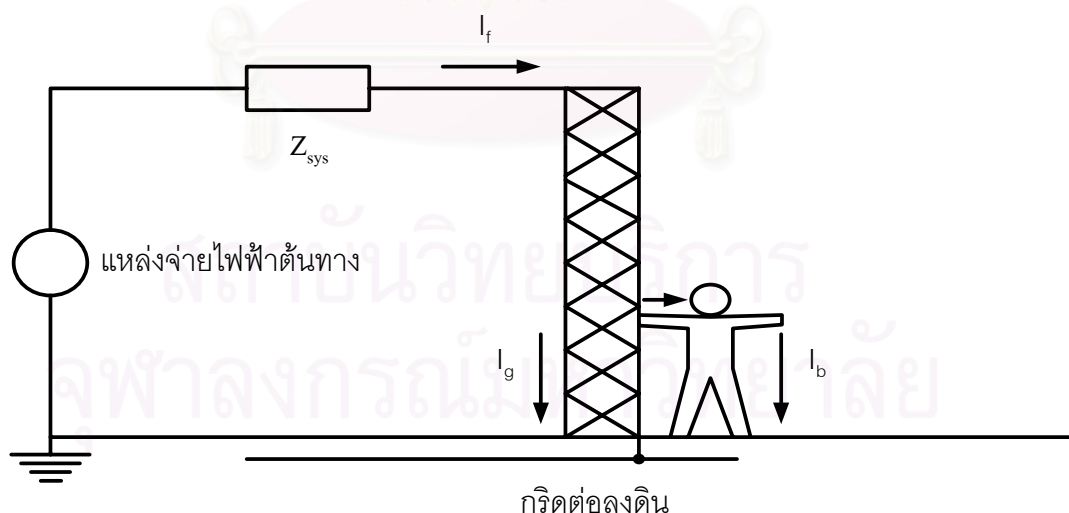
สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ 50 – 60 Hz ร่างกายคนสามารถแทนได้ด้วยค่าความต้านทาน กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนอาจพิจารณาได้สองกรณี คือ จากแขนไปเท้าทั้งสองข้าง หรือจากเท้าข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่ง ความต้านทานร่างกายภายในมีค่า 300 โอห์ม ความต้านทานร่างกายรวมทั้งชั้นของผิวหนังจะมีค่าอยู่ระหว่าง 500 – 3000 โอห์ม

จากการทดลองของ Dalziel (IEEE Std 80-2000) เพื่อหากระแสปลดปล่อย (Let-go Current) โดยใช้น้ำเกลือแทนมือและเท้าทั้งสองข้าง และใช้กระแสสลับ 60 Hz ได้ความต้านทานระหว่างมือกับมือมีค่าเฉลี่ย 2330 โอห์ม ความต้านทานระหว่างมือกับเท้าทั้งสองข้างมีค่าเฉลี่ย 1130 โอห์ม จากการวิเคราะห์สรุปว่าความต้านทานระหว่างมือกับมือ มือกับเท้าทั้งสองข้างหรือระหว่างเท้าทั้งสองข้างของคนใช้ค่าความต้านทานเท่ากับ 1000 โอห์ม

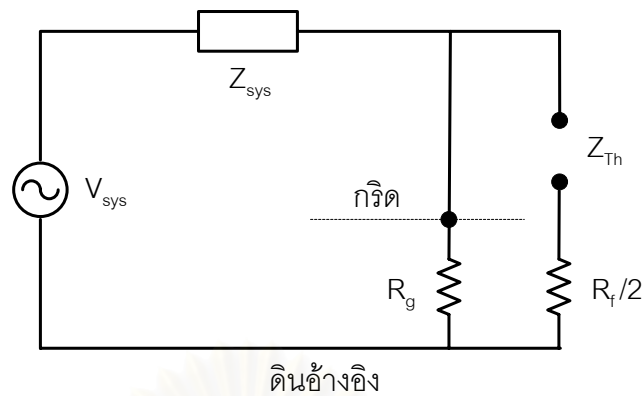
2.6.2 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch Voltage)

ในรูปที่ 2.2 เป็นวงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เมื่อคนสัมผัสโครงโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินในขณะที่มีกระแสผิดพ่วงเกิดขึ้นทำให้เกิดกระแสไหลผ่านร่างกาย

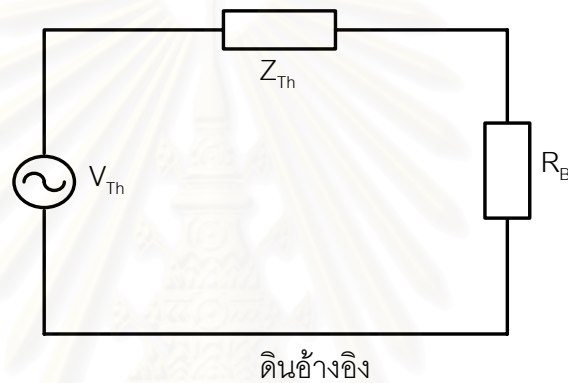
ในรูปที่ 2.3 ค่า R_g และ Z_{sys} มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า $R_f/2$ ดังนั้น Z_{Th} จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $R_f/2$ และค่า V_{Th} ในรูปที่ 2.3 คือค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่โครงโลหะก่อนที่คนจะไปสัมผัส



รูปที่ 2.2 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 2.3 วงจรแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเพื่อหา Z_{Th}



รูปที่ 2.4 วงจรเทวินินของวงจรอุบัติเหตุเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

- เมื่อ V_{sys} คือแรงดันไฟฟ้าของระบบ, V
 Z_{sys} คืออิมพีแดนซ์ของระบบ, Ω
 Z_{Th} คืออิมพีแดนซ์เทวินิน, Ω
 R_f คือความต้านทานทำหนึ่งข้าง, Ω
 R_B คือความต้านทานร่างกายคน, Ω
 R_g คือความต้านทานของระบบกราวด์กริด, Ω
 ρ คือความต้านทานจำเพาะของดิน, $\Omega \cdot m$

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสตามรูปที่ 2.4 เขียนสมการได้เป็น

$$E_{touch} = I_B (R_B + Z_{Th}) = I_B (R_B + R_f / 2) \quad (2.4)$$

ถ้าแท่นรัศมีเท้าด้วย b เมตร (รัศมีที่ใช้เท่ากับ 0.08 เมตร) บนพื้นผิวที่มีความต้านทานจำเพาะ ρ โอห์ม-เมตรจะได้

$$R_f = \rho/4b = 3.125\rho \quad (2.5)$$

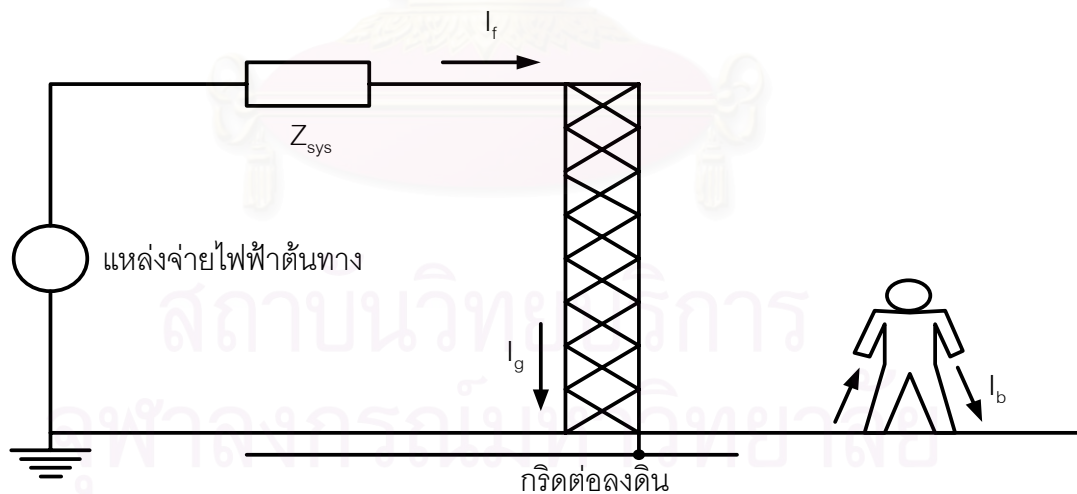
$$Z_{Th} = R_f / 2 \approx 1.5\rho \quad (2.6)$$

$$E_{touch} = I_B (1000 + 1.5\rho) \quad (2.7)$$

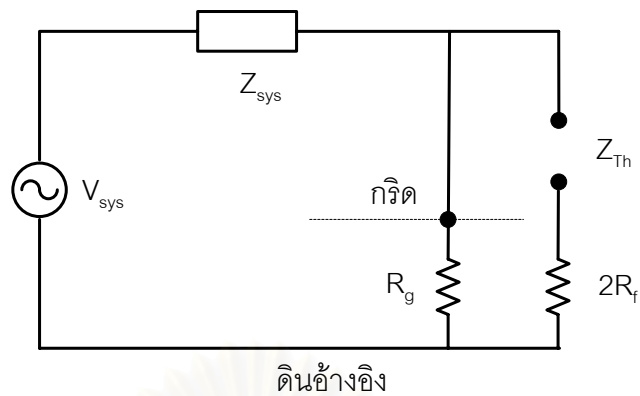
2.6.3 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ (Step Voltage)

ในรูปที่ 2.5 เป็นวงจรอุบัตินี้เพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว เมื่อคนเดินหรือยืนอยู่ในสถานีไฟฟ้าในขณะที่มีกระแสผิดพลาดเกิดขึ้น ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเท้าทั้งสองข้างและมีกระแสไหลผ่านร่างกาย

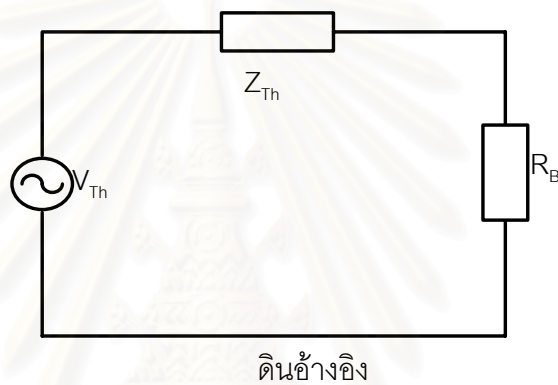
ในรูปที่ 2.6 ค่า R_g และ Z_{sys} มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า $2R_f$ ดังนั้น Z_{Th} จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $2R_f$ และค่า V_{Th} ในรูปที่ 2.6 คือค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวก่อนที่คนถูกไฟฟ้าดูด



รูปที่ 2.5 วงจรอุบัตินี้เพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว



รูปที่ 2.6 วงจรแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเพื่อหา Z_{Th}



รูปที่ 2.7 วงจรเทวินินของวงจรอุบัติเหตุเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ตามรูปที่ 2.7 เขียนสมการได้เป็น

$$E_{step} = I_B (R_B + Z_{Th}) = I_B (R_B + 2R_f) \quad (2.8)$$

ถ้าแทนรัศมีเท้าด้วย b เมตร (รัศมีที่ใช้เท่ากับ 0.08 เมตร) บนพื้นผิวที่มีความต้านทานจำเพาะ ρ โอห์ม-เมตรจะได้

$$R_f = \rho/4b = 3.125\rho \quad (2.9)$$

$$Z_{Th} = 2R_f \approx 6\rho \quad (2.10)$$

$$E_{step} = I_B (1000 + 6\rho) \quad (2.11)$$

2.6.4 ผลของวัสดุปูผิวดิน

วัสดุปูผิวดินหมายถึงวัสดุที่อยู่บนพื้นผิวของสถานีไฟฟ้า ในสถานีไฟฟ้ามีการโรยหินกรวดด้านบนพื้นผิวเพื่อทำให้เกิดความต้านทานสูงระหว่างเท้ากับพื้นผิวของสถานีไฟฟ้าทำให้เกิดอันตรายน้อยลง หินกรวดที่โรยมีความหนาประมาณ 0.08 – 0.15 เมตร การใช้หินกรวดโรยหน้าดินทำให้ดินข้างล่างสูญเสียความชื้นช้าลง ความต้านทานจำเพาะของดินด้านล่างก็มีค่าต่ำ

กรวดสามารถช่วยลดอันตรายจากไฟฟ้าได้หากความต้านทานจำเพาะของหินกรวดมีค่าสูงกว่าความต้านทานจำเพาะของดินด้านล่าง หากความต้านทานจำเพาะของกรวดมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของกรวด ความชื้น สมการสำหรับหาความต้านทานเท้าหนึ่งข้าง, R_f เมื่อคิดผลของหินกรวดสามารถหาได้จาก

$$R_f = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) C_s \quad (2.12)$$

สามารถหาค่าแฟคเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูผิวดิน (reduction factor), C_s ได้จากสมการ

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (2.13)$$

เมื่อ C_s คือแฟคเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูผิวดิน

ρ คือความต้านทานจำเพาะของดิน, $\Omega \cdot m$

ρ_s คือความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน, $\Omega \cdot m$

h_s คือความหนาของวัสดุปูผิวดิน, m

สามารถหาสมการแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเมื่อคิดผลของวัสดุปูผิวดินได้ดังนี้
แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.14)$$

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.15)$$

และสามารถหาสมการแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเมื่อคิดผลของวัสดุปูผิวดินได้ดังนี้
แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.16)$$

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.17)$$

2.6.5 การเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถได้เมื่อคิดผลของวัสดุปูผิวดินและไม่คิดผลของวัสดุปูผิวดิน

กำหนดให้ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านคน $t_s = 0.5$ s ความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho = 100 \Omega \cdot m$ ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน $\rho_s = 2500 \Omega \cdot m$ และมีความหนา $h_s = 0.15$ m จากสมการ (2.13) สามารถหาค่าเฟคเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูผิวดินได้ดังนี้

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{100}{2500} \right)}{2(0.15) + 0.09} = 0.7785$$

จากสมการ (2.7) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม เมื่อไม่คิดผลของวัสดุปูผิวดินได้ดังนี้

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5(100)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 188.66 \text{ V}$$

จากสมการ (2.14) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม เมื่อคิดผลของวัสดุปูผิวดินได้ดังนี้

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5(C_s)(2500)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 642.95 \text{ V}$$

จะเห็นว่าคนจะสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสได้สูงขึ้นไปประมาณ 3 เท่าเมื่อมีวัสดุปูผิวดิน และจากสมการ (2.11) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม เมื่อไม่คิดผลของวัสดุผลปูผิวดินได้ดังนี้

$$E_{step50} = (1000 + 6(100)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 262.48 \text{ V}$$

จากสมการ (2.16) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม เมื่อคิดผลของวัสดุผลปูผิวดินได้ดังนี้

$$E_{step50} = (1000 + 6(C_s)(2500)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 2079.63 \text{ V}$$

จะเห็นว่าคนจะสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวได้สูงขึ้นไปประมาณ 8 เท่าเมื่อมีวัสดุปูผิวดิน ดังนั้นสถานีไฟฟ้าที่มีการโรยหินกรวดด้านบนพื้นผิวทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้ามากขึ้น

2.7 การออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าต้องจำกัดแรงดันไฟฟ้าของดินเพื่อให้แรงดันและกระแสไม่เป็นอันตรายต่อคนหรืออุปกรณ์ในสภาวะปกติและสภาวะผิดปกติ

ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ามีรูปแบบเป็นตัวนำกริดในแนวราบ และเสริมด้วยแท่งรากสายดินที่จุดต่อต่างๆ การต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าต้องพิจารณาการวางอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีด้วย แนวกริดหรือตัวนำที่ฝังดินควรวางในแนวเดียวกับการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสามารถต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าลงดินได้สะดวก การต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าสรุปได้ดังนี้

- 1) วางตัวนำกริดฝังดินตามแนวติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า
- 2) ตัวนำกริดฝังในดินลึกประมาณ 0.3 – 0.5 เมตร
- 3) สายไฟที่ต่อลงดินจากอุปกรณ์ไฟฟ้าไปที่กริดให้สั้นที่สุด

- 4) ระบบกริดจะปูเต็มพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ตัวนำอาจมีขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่มีขนาดกระแสผิดพลาดมีจำนวนมาก เช่น บริเวณจุดต่อระหว่างสายนิวทรัลลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และคาปาซิเตอร์ หรืออาจใช้ตัวนำสองชุด
- 5) ต่อแท่งรากสายดินที่จุดต่อต่างๆของกริดเพื่อให้ความต้านทานดินต่ำทำให้แรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise) มีค่าต่ำลง
- 6) แท่งรากสายดินจะติดตั้งที่มุมของกริดและจุดต่อบริเวณเส้นรอบรูปของกริดและบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยเฉพาะที่กับดักฟ้าผ่า
- 7) อัตราส่วนของด้านของกริดโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 1:3
- 8) กรณีที่แรงดันไฟฟ้าสัมผัสหรือแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวมีค่าสูง หรือต้องการความปลอดภัยมากขึ้นอาจติดตั้งแผ่นโลหะรอบอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับคนทำงาน ทำให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสหรือแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเป็นศูนย์ถ้าคนเดินหรือยืนทำงานบนแผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กอาจใช้เป็นกริดขนาด 0.60x0.60 เมตร ทำด้วยเหล็กชุบทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด 25 ตารางมิลลิเมตรวางเหนือพื้นดินได้กรวด และเชื่อมต่อเข้ากับกริดใต้ดินหลายๆจุด
- 9) สายตัวนำกริดที่ใช้ส่วนมากเป็นทองแดงและไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน
- 10) จุดต่อให้ใช้แบบหลอมระเบิด (Exothermic Weld) ไม่ควรใช้บัดกรีเพราะเมื่อมีกระแสไหลสูงมากอาจทำให้จุดต่อด้วยบัดกรีหลอมละลายได้

2.8 การเลือกและการต่อตัวนำ

ในระบบกราวด์กริดตัวนำที่ใช้ทำกริด สายต่อ และแท่งรากสายดินต้องมีอายุการใช้งานได้นานและมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) มีความนำไฟฟ้าเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดความต่างศักย์ภายในตัวนำมากเกินไป
- 2) ต้องไม่หลอมละลายหรือเสียรูปทางกลเมื่อมีกระแสผิดพลาดที่รุนแรงและเกิดขึ้นเป็นเวลานาน
- 3) มีความเชื่อถือได้ทางกลและทนอุณหภูมิสูงได้
- 4) ต้องสามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ไม่ว่าจะอยู่ในสภาพที่มีการกัดกร่อนหรือภายใต้แรงทางกล

2.8.1 วัสดุที่ใช้ทำตัวนำและปัญหาการกัดกร่อน

2.8.1.1 ทองแดง

ทองแดงเป็นวัสดุที่ใช้ทำตัวนำในระบบกราวด์กริดมาก เพราะมีความทนต่อการกัดกร่อนได้สูงและมีความนำไฟฟ้าที่ดีกว่าวัสดุอื่นๆ

2.8.1.2 เหล็กชุบทองแดง

เหล็กชุบทองแดงเป็นวัสดุที่ใช้ทำตัวนำแท่งรากสายดินมาก และบางครั้งใช้ทำกราวด์กริด ในบริเวณที่มีปัญหาเรื่องการโจรกรรม การใช้เหล็กชุบทองแดงต้องสามารถใช้งานได้นานหลายสิบปี และทนการกัดกร่อนได้ดี

2.8.1.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้ทำตัวนำกริดน้อย แต่ใช้ได้กับอุปกรณ์ในระบบ GIS ที่เครื่องหล่อหุ้มทำด้วยอะลูมิเนียมหรืออะลูมิเนียมอัลลอย แต่มีข้อเสียคืออะลูมิเนียมอาจเกิดการผุกร่อนเพราะอะลูมิเนียมเมื่ออยู่ใกล้กับโลหะอื่นจะเกิดการผุกร่อนได้ง่ายกว่าโลหะอื่น และชั้นผิวอะลูมิเนียมที่เกิดการผุกร่อนเป็นตัวนำที่ไม่ดีสำหรับระบบกราวด์กริด ดังนั้นอะลูมิเนียมที่ใช้ควรเป็นอะลูมิเนียมแบบบริสุทธิ์มากกว่าแบบอัลลอยและต้องพิจารณาหลายๆด้านว่าจะไม่เกิดปัญหา

2.8.1.4 เหล็ก

เหล็กเป็นวัสดุที่อาจใช้ทำใช้ตัวนำกริดหรือแท่งรากสายดิน แต่จะมีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน ดังนั้นการใช้เหล็กชุบสังกะสีหรือเหล็กที่มีการป้องกันการกัดกร่อนจะสามารถใช้เป็นระบบกราวด์กริดได้

2.8.2 ขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำที่ต่อลงดินมีค่าขึ้นอยู่กับ ขนาดของกระแสผิดพลาดที่ไหลผ่านตัวนำ ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพลาดหรือช่วงเวลาตัดกระแส คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบและอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้ ดังนั้นค่าพื้นที่หน้าตัดของตัวนำสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2.18)$$

เมื่อ I คือกระแสลัดวงจร, kA

A_{mm^2} คือพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, mm²

T_m คืออุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้, °C

T_a คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ, °C

T_r คืออุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงที่ของวัสดุ, °C

α_0 คือสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0 °C, 1/°C

α_r คือสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง T_r , $1/^\circ\text{C}$

ρ_r คือความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง T_r , $\mu\Omega \cdot \text{cm}$

t_c คือช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิวดำรง, s

$TCAP$ ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

$$K_0 = 1/\alpha_0, (1/\alpha_r) - T_r$$

อุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้, T_m โดยทั่วไปจะไม่ใช่ที่ค่าหลอมละลายเนื่องจากบริเวณจุดต่อและจุดที่มีการต่อเข้ากับตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหลผ่านสูงมากจะทำให้เกิดการหลอมละลายก่อนจุดอื่น ดังนั้นค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้จะใช้ที่ 250°C คุณสมบัติและค่าคงที่ต่างๆของวัสดุตัวนำสามารถหาได้จากภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1

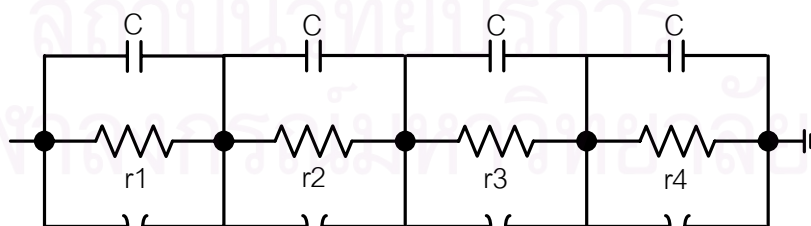
2.8.3 การต่อตัวนำ

การต่อตัวนำในระบบบกราวด์กริดต้องมีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติต่างๆคือ ต้องมีความนำไฟฟ้าที่ดี ป้องกันการกัดกร่อน ทนต่อแรงกระทำทางกลที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ และจุดต่อต้องสามารถรับกระแสผิวดำรงและทนแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสผิวดำรงได้ การต่อตัวนำและการทดสอบจุดต่อควรละเอียดได้จากมาตรฐาน IEEE Std. 837-1989 (IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections used in Substation Grounding)

2.9 คุณลักษณะของดิน

2.9.1 โมเดลของดิน

อิเล็กโทรดที่ฝังในดินสามารถแทนด้วยโมเดลดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดินอาจทำหน้าที่เป็นความต้านทานหรือเป็นฉนวน สำหรับสัญญาณความถี่สูงหรือหน้าคลื่นชันมากก็ทะลุทะลวงดินลงไปได้มากและเร็ว ทำให้ความเป็นความจุของดินก็น้อยลง



รูปที่ 2.8 โมเดลของดิน

2.9.2 ผลของแรงดันเกรเดียนท์

แรงดันเกรเดียนท์ที่ไม่มีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดิน แต่ถ้าแรงดันเกรเดียนท์มีค่าสูงมากเกินไปกว่าค่าวิกฤติจะทำให้ดินเกิดการแตกตัวและเหมือนกับอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนแรงดันเกรเดียนท์ลดลงจนต่ำกว่าค่าวิกฤติดังแสดงด้วยช่องว่างในรูปที่ 2.8 ระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าที่คิดแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัส แรงดันเกรเดียนท์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าแรงดันเกรเดียนท์วิกฤติมาก

2.9.3 ผลของขนาดกระแส

กระแสที่ไหลผ่านอิเล็กโทรดลงสู่ดินมีผลกับความต้านทานจำเพาะของดินบริเวณใกล้ๆ อิเล็กโทรด เนื่องจากความร้อนและปริมาณความชื้นของดินขึ้นอยู่กับขนาดและระยะเวลาที่กระแสไหลในดิน ทำให้ความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงไป ความหนาแน่นของกระแสไม่ควรเกิน 200 A/mm^2 ที่ระยะเวลานาน 1 วินาที

2.9.4 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และส่วนประกอบเคมี

ความนำไฟฟ้าของดินขึ้นกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความชื้นต่ำกว่า 15% ของน้ำหนักดิน และความต้านทานจำเพาะของดินจะไม่เปลี่ยนแปลงมากที่ความชื้นมากกว่า 22% ของน้ำหนักดิน ปริมาณความชื้นของดินขึ้นอยู่กับความอัดแน่นของดินและความหลากหลายของขนาดกรวดและดิน ส่วนผสมและปริมาณของสารละลายเกลือ กรด และด่างมีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดินมาก เมื่อสารละลายเกลือมีค่ามากทำให้ความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าน้อยลง

2.9.5 ผลของวัสดุผิวดิน

หินกรวดหรือวัสดุผิวดินที่อยู่ด้านบนมีความหนา 0.08 – 0.15 เมตร มีประโยชน์ในการป้องกันความชื้นจากดินระเหยออกไป และทำให้เกิดไฟฟ้าดูดได้ยากขึ้นเพราะวัสดุผิวดินมีความต้านทานจำเพาะสูงมากประมาณ 1000 – 6000 โอห์ม.เมตร

2.10 ความต้านทานจำเพาะของดินและการวัด

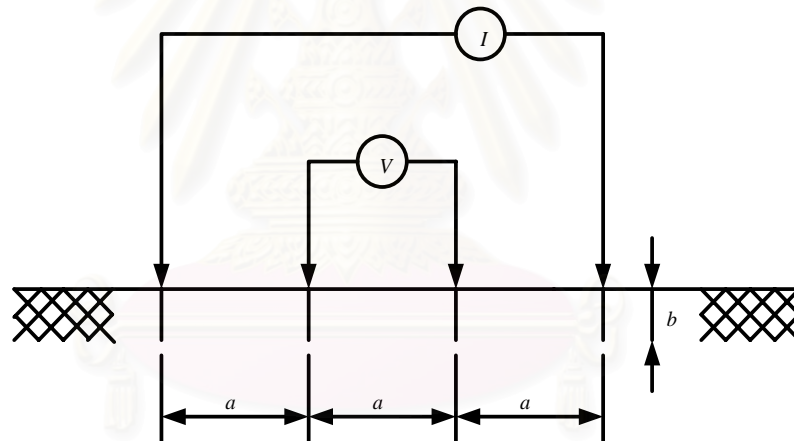
ความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นกับชนิดของดินมีค่าโดยประมาณดังแสดงในตารางที่ 2.2 การหาความต้านทานจำเพาะของดินที่ถูกต้องจะได้จากการวัด และควรทำการวัดหลายๆแนวในบริเวณที่ติดตั้งระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสม่ำเสมอทั้งพื้นที่ และมีความลึกของชั้นดินที่ใกล้เคียงกันจะไม่ค่อยพบ ส่วนมากเป็นดินแบบหลายชั้นและมีความต้านทานจำเพาะต่างกันในแต่ละชั้น

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega \cdot m$)
ดินเปียก	10
ดินชื้น	100
ดินแห้ง	1000
หินใต้ดิน	10000

ตารางที่ 2.2 ความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่างๆ

2.10.1 การวัดความต้านทานจำเพาะของดิน

วิธีที่นิยมใช้ในการวัดความต้านทานจำเพาะของดินที่นิยมใช้คือ Wenner method หรือแบบสี่จุด โดยมีระยะห่างโพรบเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่จุด

ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความต้านทานของดิน โดยค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.19)$$

- เมื่อ ρ_a คือความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณได้, $\Omega \cdot m$
 a คือระยะห่างของโพรบ, m
 b คือความลึกของอิเล็กโทรดที่ปักลงดิน, m
 R คือค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ที่ระยะห่างโพรบ, Ω
 ถ้า $a \gg b$

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (2.20)$$

การวัดค่าความต้านทานของดินโดยวิธี Wenner มักทำการวัดในหลายๆแนวประมาณ 3-6 แนวขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า เพื่อที่จะได้ค่าเฉลี่ยความต้านทานจำเพาะของดิน

สมมติการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่จุดมีระยะห่างโพรบ $a=5$ m ความลึกของอิเล็กโทรดที่ปักลงดิน $b=0.25$ m และค่าความต้านทานดินที่วัดได้ $R=0.552 \Omega$ จากสมการ (2.19) สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho_a = \frac{4\pi(5)(0.552)}{1 + \frac{2(5)}{\sqrt{5^2 + 4(0.25)^2}} - \frac{5}{\sqrt{5^2 + (0.25)^2}}} = 17.42 \Omega \cdot m$$

ถ้า $a \gg b$ ค่าโดยประมาณจะสามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จากสมการ (2.20)

$$\rho_a = 2\pi(5)(0.552) = 17.34 \Omega \cdot m$$

ในทางปฏิบัติการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่จุดใช้ความลึกของอิเล็กโทรดที่ปักลงดินมีค่าประมาณ 5% ของระยะห่างโพรบซึ่งมีค่าน้อยกว่าระยะห่างโพรบมาก และจากการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินพบว่าค่าทั้งสองที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการหาค่าความจำเพาะของดินแบบสี่จุดโดยทั่วไปจึงใช้สมการ $\rho_a = 2\pi a R$

2.10.2 โมเดลความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้

โมเดลดินที่ใช้สำหรับการหาความต้านทานจำเพาะของดินคือ แบบดินสม่ำเสมอ และแบบดินสองชั้น โดยทั่วไปใช้โมเดลของดินสองชั้นเพราะเป็นโมเดลที่วิเคราะห์และประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงหรืออาจใช้โมเดลดินหลายชั้นเมื่อต้องการความละเอียดหรือค่าที่วัดได้มีความหลากหลายจนไม่สามารถแทนได้ด้วยโมเดลดินสองชั้น

โมเดลดินสม่ำเสมอใช้เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้แต่ละครั้งไม่แตกต่างกันมาก ถ้าค่าที่วัดได้แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันมากและใช้โมเดลดินสม่ำเสมอจะทำให้เกิดความผิดพลาดมาก

โมเดลดินสองชั้นประกอบด้วยคุณสมบัติของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง โดยโมเดลดินสองชั้นสามารถหาได้จากทฤษฎีวิเคราะห์ค่าความต้านทานดินที่วัดได้และระยะห่างระหว่างโพรบสำหรับการวัดแบบสี่จุด

2.10.2.1 ดินสม่ำเสมอ

โมเดลดินสม่ำเสมอจะใช้ได้หากดินแบบหลายชั้นมีความแตกต่างของความต้านทานจำเพาะไม่ต่างกันมาก และค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างของโพรบต่าง ๆ กัน แสดงดังสมการ

$$\rho_{a(av)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (2.21)$$

เมื่อ $\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \dots$ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้ที่ระยะห่างของโพรบต่าง ๆ กัน n คือจำนวนครั้งที่ทำการวัด

สมการ (2.21) ใช้สำหรับความต้านทานจำเพาะของดินสม่ำเสมอซึ่งในทางปฏิบัติไม่ค่อยพบ การจำลองหรือประมาณดินไม่สม่ำเสมอด้วยโมเดลดินที่สม่ำเสมอ โดยใช้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนในการคำนวณแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

2.10.2.2 ดินสองชั้น

การวัดความต้านทานจำเพาะของดินที่มีค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างโพรบในการวัดแบบสี่จุด ต้องใช้โมเดลของดินไม่สม่ำเสมอมาใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานจำเพาะของดิน

2.10.2.2.1 โมเดลดินสองชั้นจากการคำนวณ

โมเดลดินสองชั้นของดินไม่สม่ำเสมอประกอบด้วยความลึกของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง สามารถใช้ในการหาค่าแฟคเตอร์การสะท้อน (Reflection Factor) K ได้ดังสมการ

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.22)$$

เมื่อ ρ_1 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน, $\Omega \cdot m$

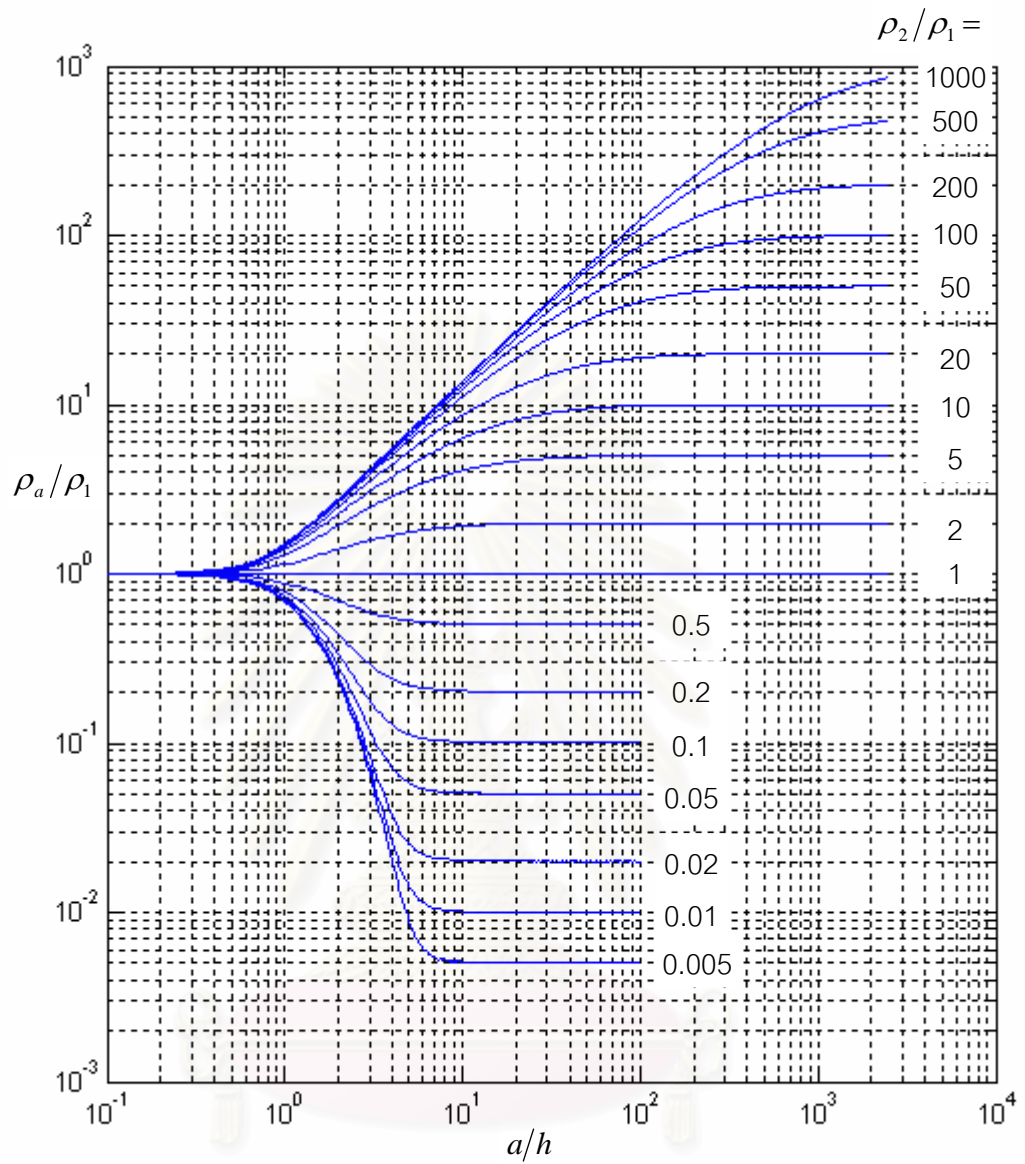
ρ_2 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง, $\Omega \cdot m$

โมเดลที่ถูกต้องในการแทนลักษณะของดินต้องสามารถจำลองค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดตามจุดต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้นแต่การออกแบบกราวด์กริดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจะสามารถใช้โมเดลดินสองชั้นแทนลักษณะของดินได้

2.10.2.2.2 โมเดลดินสองชั้นจากกราฟ

การหาโมเดลดินสองชั้นจากกราฟสามารถทำได้ดังขั้นตอนดังนี้

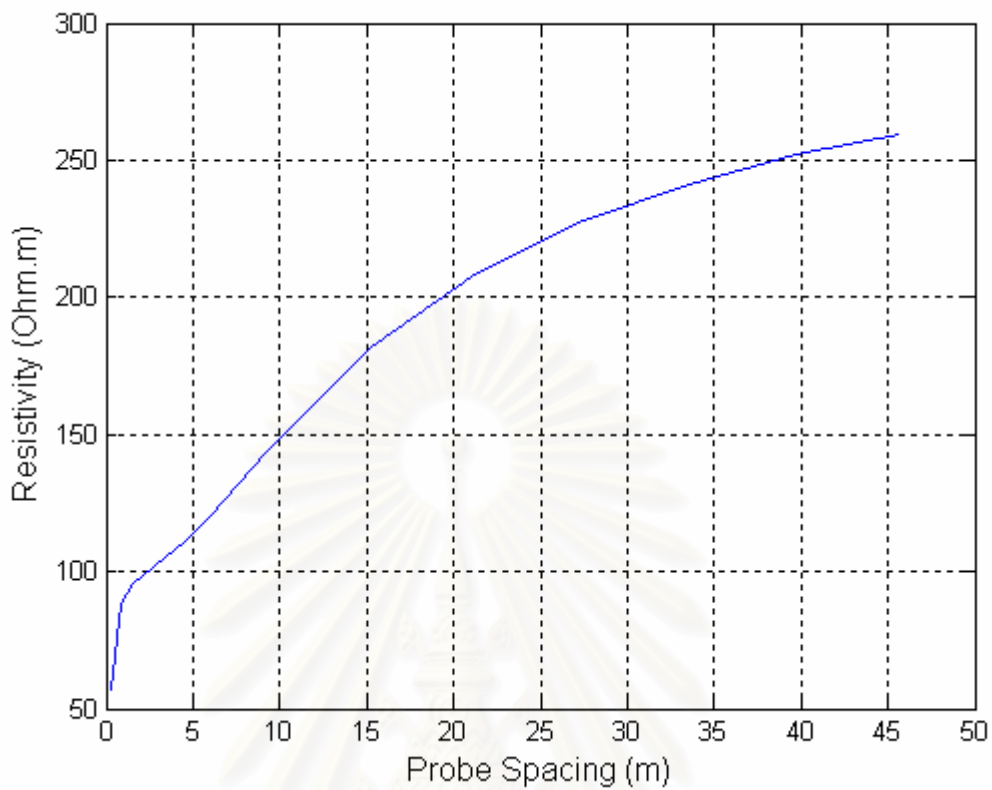
- 1) เขียนกราฟระหว่างความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้และระยะห่างของโพรบ
- 2) ประมาณค่า ρ_1 และ ρ_2 จากกราฟในข้อ 1) โดย ρ_1 เป็นค่าที่หาได้จากระยะห่างของโพรบที่มีค่าน้อย และค่า ρ_2 เป็นค่าที่หาได้จากระยะห่างของโพรบที่มีค่ามาก
- 3) หาค่า ρ_2/ρ_1 และเลือกค่า ρ_a/ρ_1 จากกราฟในรูปที่ 2.10 ที่หาค่าได้ใกล้เคียงกับ ρ_2/ρ_1
- 4) จากค่า ρ_a/ρ_1 ในกราฟรูปที่ 2.10 หาค่า a/h ที่แกน x
- 5) หาค่า ρ_a จากข้อ 4) และจากรูปที่ 2.11 หาค่า a
- 6) คำนวณค่า h



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟ Sunde

a และ h คือระยะห่างโพรบและความลึกของดินชั้นบน, m

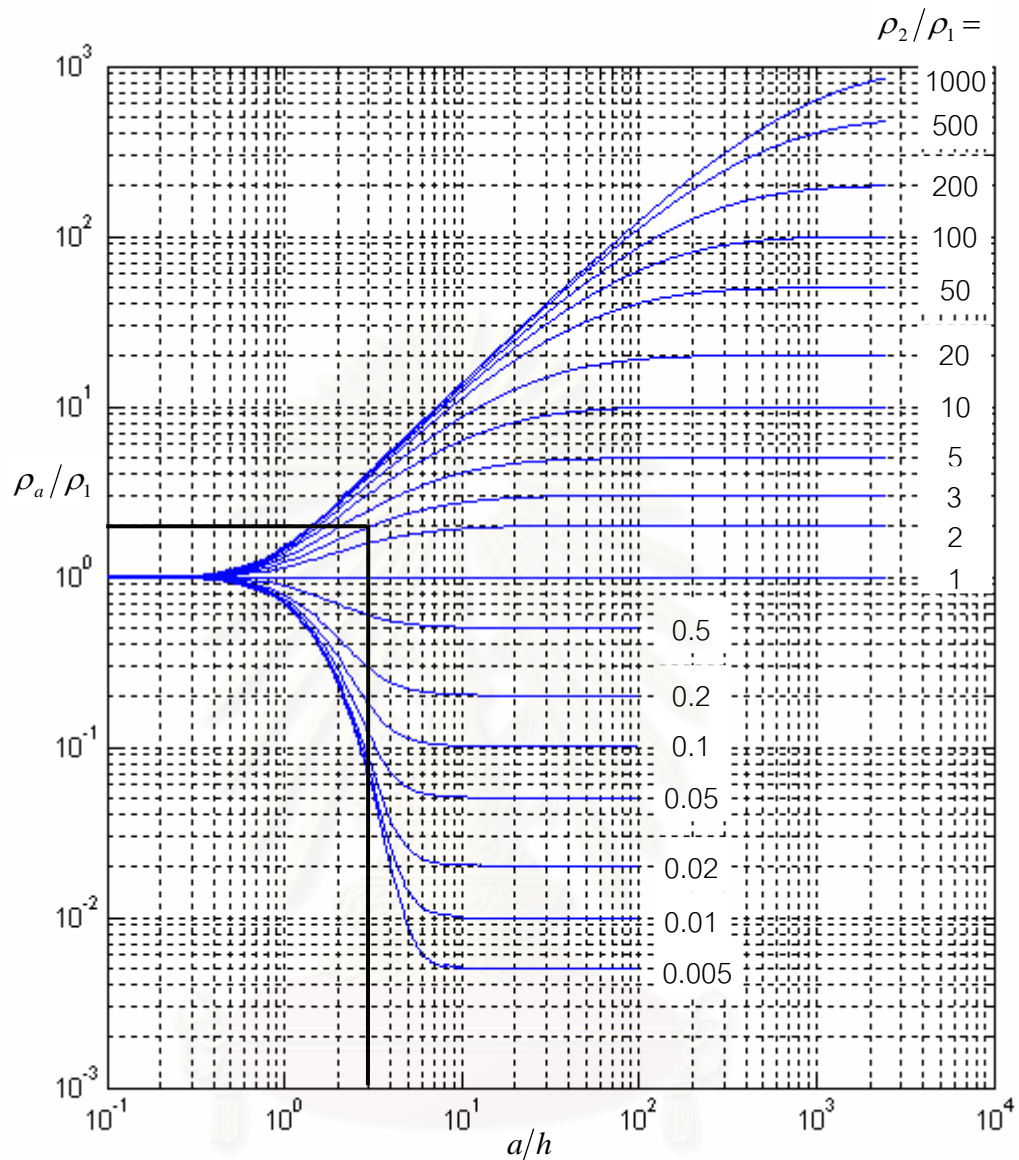
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างความต้านทานจำเพาะกับระยะห่างของโพรบในการวัดแบบสี่จุด

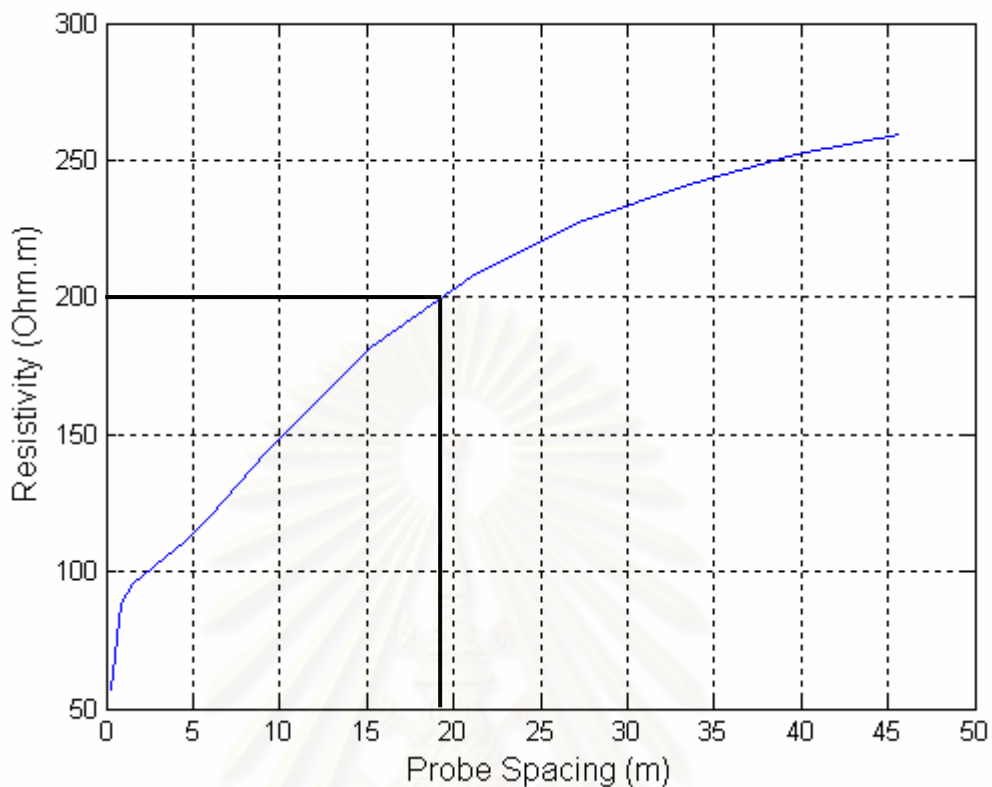
สมมติการวัดความต้านทานจำเพาะแบบสี่จุดได้ค่าตามรูปที่ 2.11 จะสามารถหาโมเดลดินสองชั้นโดยหาค่าความลึกของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างได้ดังนี้

- 1) สร้างความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะของดินและระยะห่างโพรบได้แสดงในรูปที่ 2.11
- 2) จากกราฟความต้านทานจำเพาะของดินและระยะห่างโพรบดังในรูปที่ 2.11 สามารถหาความต้านทานจำเพาะสูงสุดและต่ำสุดโดยประมาณได้ดังนี้ $\rho_2 = 300$ โอห์ม.เมตร $\rho_1 = 100$ โอห์ม.เมตร
- 3) $\rho_2/\rho_1 = 3$ และจากกราฟในรูปที่ 2.10 เลือกค่า ρ_a/ρ_1 ที่ใกล้เคียงกับ ρ_2/ρ_1 ได้ค่า $\rho_a/\rho_1 = 2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และได้ $a/h = 3$



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการหาค่า ρ_a/ρ_1 เมื่อทราบค่า ρ_2/ρ_1 จากกราฟ Sunde

- 4) $\rho_a/\rho_1=2$ เมื่อค่า $\rho_1=100$ โอห์ม.เมตร ดังนั้น $\rho_a=200$ โอห์ม.เมตร
- 5) จากค่า $\rho_a=200$ โอห์ม.เมตร นำไปหาค่าระยะห่างโพรบจากรูปที่ 2.11 จะได้ค่าระยะห่างโพรบดังแสดงในรูปที่ 2.13 ได้ $a=19$ เมตร
- 6) จากค่า $a/h=3$ ที่ได้จากข้อ 3) และค่า $a=19$ เมตร ที่ได้จากข้อ 5) หาค่า $h=a/3$ จะได้ค่า $h=19/3=6.33$ เมตร



รูปที่ 2.13 การหาค่าระยะห่างโพรบที่วัดจากค่า $\rho_a = 200$ โอห์ม.เมตร

จากการวัดความต้านทานจำเพาะของดินตามรูปที่ 2.11 ได้โมเดลดินสองชั้นที่มีค่า $\rho_1 = 100$ โอห์ม.เมตร $\rho_2 = 300$ โอห์ม.เมตร และความลึกของดินชั้นบนมีค่า 6.33 เมตร

2.10.2.3 การเปรียบเทียบดินแบบสมำเสมอและดินแบบสองชั้น

การใช้โมเดลดินสองชั้นมีความถูกต้องมากกว่าการใช้โมเดลดินแบบสมำเสมอ กรณีดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดินชั้นล่างทำให้กระแสผิดพร่องส่วนใหญ่ไหลลงไปที่ดินชั้นล่าง ทำให้กระแสในตัวนำกริดมีความสมำเสมอ และกรณีดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่าดินชั้นล่างทำให้กระแสผิดพร่องส่วนใหญ่ไหลไปตามดินชั้นบนออกทางด้านข้างมาก ทำให้ตัวนำด้านบนของกริดมีความหนาแน่นกระแสสูงกว่าตัวนำด้านในของกริด

2.11 การหาความต้านทานของระบบกราวด์กริดเมื่อใช้โมเดลดินสมำเสมอ

ความต้านทานของระบบกราวด์กริดยิ่งต่ำยิ่งดีเพราะทำให้ค่าแรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise) มีค่าน้อยลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสลดลงอยู่

ในกรณีที่ปลอดภัย โดยทั่วไปความต้านทานของระบบเสาส่งและสถานีไฟฟ้ามีค่าประมาณ 1 โอห์มหรือต่ำกว่า และความต้านทานของสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าประมาณ 1 – 5 โอห์ม

2.11.1 วิธีอย่างง่ายในการคำนวณความต้านทานดิน

การคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดและดินบริเวณรอบๆที่ไกลออกไป สำหรับโมเดลดินแบบสม่ำเสมอ จะสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (2.23)$$

ความต้านทานของระบบกราวด์กริดเนื่องจากกริดที่ฝังในดินสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (2.24)$$

เมื่อ R_g คือค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า, Ω

ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, $\Omega \cdot m$

A คือพื้นที่ของกราวด์กริด, m^2

L_T คือค่าความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดและรากสายดิน, m

เมื่อพิจารณาการฝังตัวนำที่มีความลึก h สามารถหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดได้จากสมการของ Srevaik ดังนี้

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (2.25)$$

เมื่อ R_g คือค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า, Ω

ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, $\Omega \cdot m$

A คือพื้นที่ของกราวด์กริด, m^2

h คือค่าความลึกของกริด, m

L_T คือค่าความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดและรากสายดิน, m

2.11.2 การคำนวณความต้านทานดินจากสมการของ Schwarz

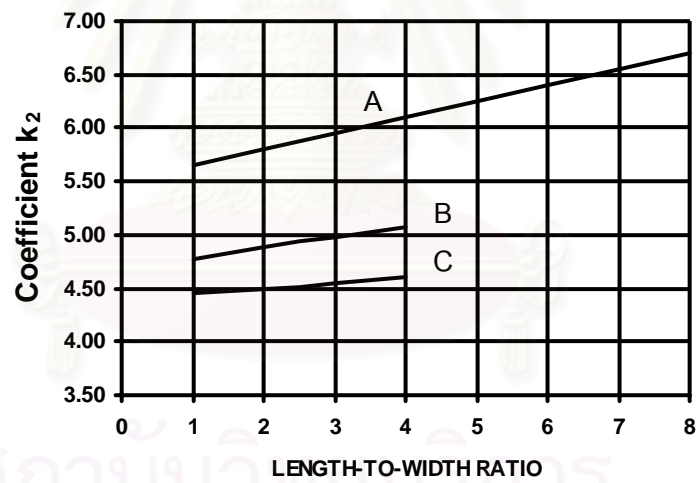
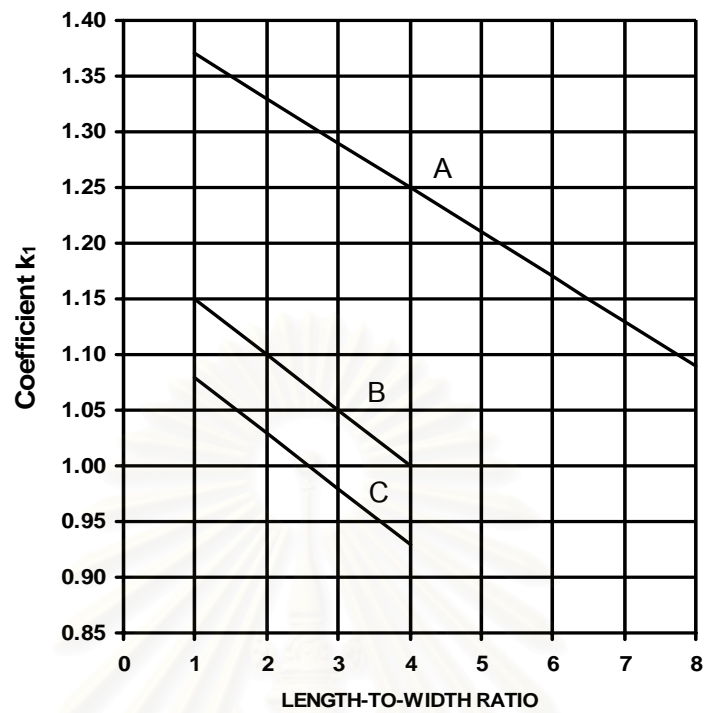
วิธีการของ Schwarz เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกราวด์กริดมาก และยังสามารถหาค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน ความต้านทานร่วมระหว่างกราวด์กริดกับแท่งรากสายดินได้ โดยค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (2.26)$$

เมื่อ R_1 คือค่าความต้านทานของกราวด์กริด, Ω
 R_2 คือค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน, Ω
 R_m คือความต้านทานร่วม, Ω
 ค่าความต้านทานของกราวด์กริด เป็นไปตามสมการ

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (2.27)$$

เมื่อ ρ คือความต้านทานจำเพาะของดิน
 L_c คือความยาวทั้งหมดของตัวนำกราวด์กริด, m
 $a' = \sqrt{a2h}$ เมื่อฝังกราวด์กริดที่ความลึก h, m
 a' มีค่า a สำหรับตัวนำวางบนพื้น, m
 $2a$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, m
 A คือพื้นที่ของกราวด์กริด, m²
 K_1 และ K_2 คือค่าที่แสดงในรูปที่ 2.14



CURVE A FOR DEPTH $h=0$

CURVE B FOR DEPTH $h=\sqrt{AREA}/10$

CURVE C FOR DEPTH $h=\sqrt{AREA}/6$

รูปที่ 2.14 สัมประสิทธิ์ K_1 และ K_2 ในสมการของ Schwarz

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน เป็นไปตามสมการ

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_R} \left[\ln\left(\frac{4L_R}{b}\right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (2.28)$$

- เมื่อ L_r คือความยาวของแท่งรากสายดินแต่ละแท่ง, m
 L_R คือความยาวของแท่งรากสายดินทั้งหมด, m
 $2b$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งรากสายดิน, m
 n_r คือจำนวนแท่งรากสายดินในพื้นที่กรวดกริด
 ค่าความต้านทานรวม เป็นไปตามสมการ

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln\left(\frac{2L_C}{L_r}\right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (2.29)$$

2.12 การหาค่ากระแสกริดสูงสุด (Maximum Grid Current)

แฟคเตอร์ส่วนลด (Decrement Factor) หมายถึง แฟคเตอร์เพื่อใช้ในการคูณกระแสกริดเฉลี่ย (rms) เพื่อหาค่ากระแสผิดพ่วงที่รวมกระแสตรงด้วย

ค่ากระแสกริดสูงสุดสามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$I_G = D_f \times I_g \quad (2.30)$$

- เมื่อ I_G คือค่ากระแสกริดสูงสุด, A
 I_g คือกระแสกริดเฉลี่ย (rms), A
 D_f คือแฟคเตอร์ส่วนลด (Decrement Factor)
 และสามารถหาค่ากระแสกริดเฉลี่ยได้จากสมการดังนี้

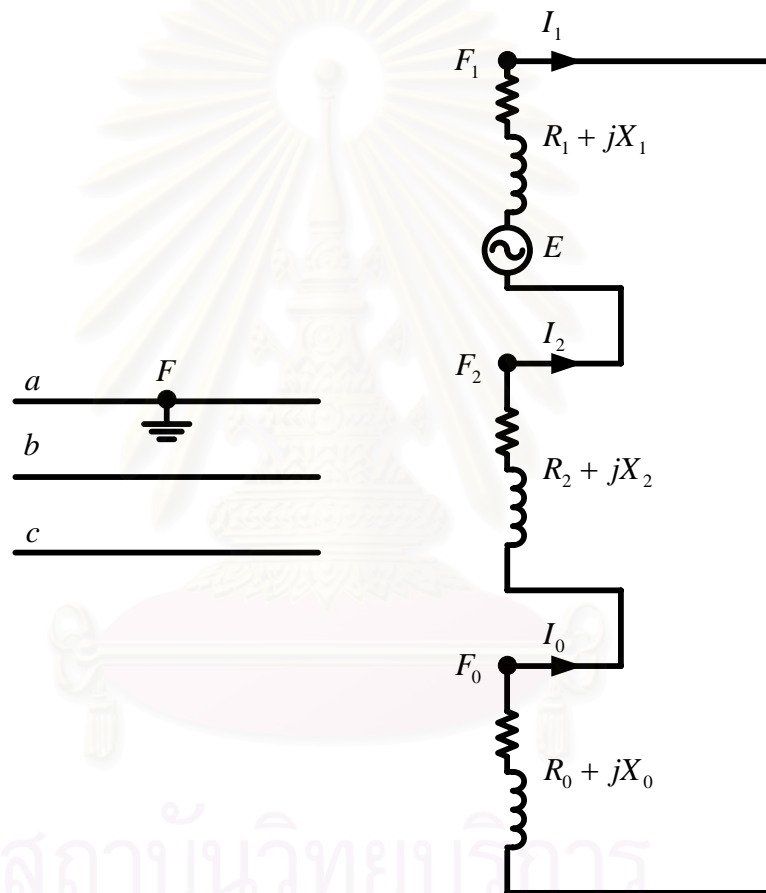
$$I_g = S_f \times I_f \quad (2.31)$$

- เมื่อ I_f คือกระแสผิดพ่วงลงดิน
 S_f คือแฟคเตอร์แบ่งกระแส (Division Factor)

2.12.1 กระแสผิดพลาดลงดิน

กระแสผิดพลาดลงดินหมายถึงกระแสผิดพลาดลงดินทั้งหมด และบางส่วนหรือทั้งหมดของกระแสผิดพลาดลงดินไหลผ่านกริดของสถานีไฟฟ้า

กระแสผิดพลาดลงดินที่มีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดในระบบไฟฟ้าคือ กระแสผิดพลาดลงดิน (Single Line to Ground Fault) ดังนั้นการออกแบบระบบกราวด์กริดจะใช้ค่ากระแสผิดพลาดลงดินในการออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยมากที่สุด



รูปที่ 2.15 การต่อซีเควนซ์ของการผิดพลาดลงดิน (Single Line to Ground Fault)

จากรูปที่ 2.15 สามารถหาค่ากระแสผิดพลาดลงดินได้ดังนี้

$$I_0 = I_1 = I_2 \quad (2.32)$$

$$I_0 = E / (R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 + R_0 + jX_0) \quad (2.33)$$

กรณีที่คิดความต้านทานของจุดผิดพลาดด้วย สมการที่ (2.33) เปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

$$I_0 = E / (R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 + R_0 + jX_0 + 3R_f) \quad (2.34)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสผิดพลาดของซีคอนซ์ศูนย์, A

E คือแรงดันไฟฟ้าเฟส-นิวทรัล, V

R_f คือความต้านทานของจุดผิดพลาด, Ω

R_1 คือความต้านทานของซีคอนซ์บวก, Ω

R_2 คือความต้านทานของซีคอนซ์ลบ, Ω

R_0 คือความต้านทานของซีคอนซ์ศูนย์, Ω

X_1 คือค่ารีแอคแตนซ์ของซีคอนซ์บวก, Ω

X_2 คือค่ารีแอคแตนซ์ของซีคอนซ์ลบ, Ω

X_0 คือค่ารีแอคแตนซ์ของซีคอนซ์ศูนย์, Ω

ดังนั้นค่ากระแสผิดพลาดที่ไหลลงสู่ดินมีค่าเท่ากับ

$$I_f = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_0 \quad (2.35)$$

2.12.2 ผลของความต้านทานดินสถานีไฟฟ้า

การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดยไม่คิดความต้านทานของสถานีไฟฟ้าและความต้านทานจุดผิดพลาด ทำให้ค่ากระแสผิดพลาดที่ได้มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การออกแบบมีความปลอดภัยขึ้น แต่ถ้าความต้านทานของสถานีไฟฟ้ามีค่าสูงมากให้คิดค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้าด้วยเพื่อลดค่าใช้จ่าย

2.12.3 ผลของความต้านทานจุดผิดพลาด

ความต้านทานของจุดผิดพลาดหมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างจุดผิดพลาดกับดิน เมื่อเกิดความผิดพลาดภายในหรือภายนอกสถานีการคิดความต้านทานจุดผิดพลาดเป็นศูนย์ ทำให้ค่ากระแสผิดพลาดที่ได้มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้การออกแบบมีความปลอดภัยขึ้นแต่ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้การออกแบบไม่ประหยัด

2.12.4 ผลของสายดินและสายนิวทรัลของสายส่งเหนือดิน

การเดินสายดินหรือสายนิวทรัลของสายส่งมาต่อลงดินที่สถานีไฟฟ้า ทำให้กระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นไหลย้อนออกไปที่สายนิวทรัลและสายดินที่ต่อกับสถานีไฟฟ้า ทำให้กระแสกริดมีค่าน้อยลง ค่าแรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise) มีค่าน้อยลงเนื่องจากกระแสกริดมีค่าน้อยลง แต่ค่าแรงดันมีค่าสูงขึ้นที่เสาส่ง

2.12.5 ผลของท่อและเคเบิลฝังดิน

ท่อโลหะและเคเบิลฝังดินที่ต่อกับกริดของสถานีไฟฟ้ามีผลทำให้กระแสกริดมีค่าน้อยลง และแรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise) ของสถานีไฟฟ้ามีค่าต่ำลง เนื่องจากผลของความยุ่งยากและความไม่แน่นอนของระบบท่อต่างๆและเคเบิลที่ฝังดินทำให้หากระแสที่ไหลลงกริดได้ลำบาก

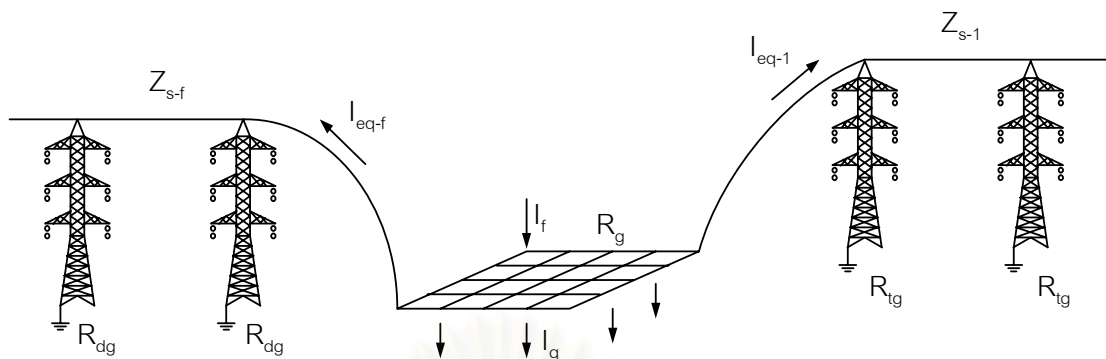
2.12.6 กระแสผิดพ่วงสูงสุด

การหากระแสผิดพ่วงสูงสุดพิจารณาจากกระแสผิดพ่วงที่เกิดจากเฟสลงดิน กระแสผิดพ่วงลงดินสูงสุดพิจารณาได้จากกระแสที่ไหลในซีเควนซ์ศูนย์ได้ และค่ากระแสผิดพ่วงลงดินมีค่าเท่ากับ $3I_0$

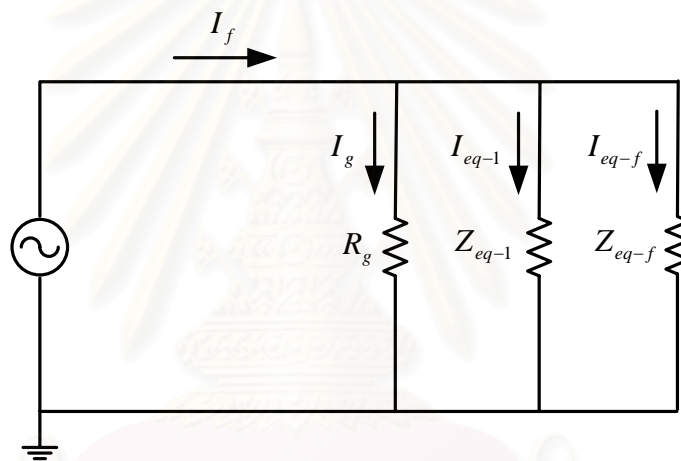
2.12.7 การคำนวณกระแสแบ่งไหล

วิธีการหาแพคเตอร์แบ่งกระแสสามารถทำได้โดยพิจารณาจำนวนและลักษณะการต่อของสายดินและสายนิวทรัลที่ต่อกับกริด เพื่อนำมาคำนวณกระแสกริดที่ไหลลงดินแพคเตอร์แบ่งกระแสขึ้นกับพารามิเตอร์ดังนี้

- 1) ตำแหน่งที่เกิดกระแสผิดพ่วง
- 2) ค่าอิมพีแดนซ์ของกริด
- 3) วงจรของระบบที่มีสายดินและสายนิวทรัลมาต่อกับกริดที่สถานีไฟฟ้า รวมถึงทางเดินกระแสอื่นๆ
- 4) ท่อและโลหะฝังดินอื่นๆข้างหรือใต้กริด



รูปที่ 2.16 กระแสกริดลดลงเมื่อกระแสผิดพ่วงลงดินบางส่วนไหลย้อนกลับไปยังสายซึ่งอากาศ



รูปที่ 2.17 วงจรเพื่อการวิเคราะห์หาค่าแฟคเตอร์ส่วนลด

จากรูปที่ 2.17 สามารถหากระแสกริดเฉลี่ยได้จากสมการดังนี้

$$I_g = \left(\frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right) \times I_f \tag{2.36}$$

$$I_g = S_f \times I_f \tag{2.37}$$

เมื่อ I_f คือกระแสผิดพ่วงลงดิน

S_f คือแฟคเตอร์แบ่งกระแส (Division Factor)

ดังนั้นค่าแฟคเตอร์แบ่งกระแส, S_f สามารถหาได้จากสมการ

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| \quad (2.38)$$

โดยที่

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{eq-1}} + \frac{1}{Z_{eq-f}}} \quad (2.39)$$

จากสมการของ Endrenyi สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายดินและสายนิวทรัลได้จากสมการดังนี้

$$Z_{eq-1} = \frac{Z_{S-1}}{2} + \sqrt{R_{tg} Z_{S-1}} \quad (2.40)$$

$$Z_{eq-f} = \frac{Z_{S-f}}{2} + \sqrt{R_{dg} Z_{S-f}} \quad (2.41)$$

เมื่อ R_g คือค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด, Ω
 R_{tg} คือค่ากราวด์อิมพีแดนซ์ของระบบสายส่ง, Ω
 R_{dg} คือค่ากราวด์อิมพีแดนซ์ของระบบจำหน่าย, Ω
 Z_{eq} คือค่าอิมพีแดนซ์รวมของสายดินกับสายนิวทรัลขนานกัน, Ω
 Z_{eq-1} คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายดินในระบบสายส่ง, Ω
 Z_{eq-f} คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายนิวทรัลในระบบจำหน่าย, Ω
 Z_{S-1} คือค่า self impedance ของสายดินในระบบสายส่ง, Ω/mile
 Z_{S-f} คือค่า self impedance ของสายนิวทรัลในระบบจำหน่าย, Ω/mile
 และสามารถหาค่า self impedance ของสายดินและสายนิวทรัลจากสมการของ Endrenyi ได้ดังนี้

$$Z_{S-1} = r_a + \frac{r_e}{3} + jX_a + \frac{jX_e}{3} \quad (2.42)$$

$$Z_{s-f} = r_a + \frac{r_e}{3} + jX_a + \frac{jX_e}{3} \quad (2.43)$$

- เมื่อ ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, $\Omega \cdot m$
 GMR คือค่ารัศมีเฉลี่ยของสายตัวนำ, ft
 r_a คือค่าความต้านทานกระแสลับของตัวนำสายดินหรือสายนิวทรัลที่ความถี่ f , $\Omega/mile$
 X_a คือค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำของสายตัวนำห่างกันหนึ่งฟุต (one foot spacing) ของสายดินหรือสายนิวทรัลที่ความถี่ f , $\Omega/mile$

$$X_a = 4.657 \times 10^{-3} f (\log_{10}(1/GMR))$$

$$r_e = 0.00477 f$$

$$X_e = 0.006985 f \left(\log_{10} \left(\frac{4.6655 \times 10^6 \rho}{f} \right) \right)$$

2.12.8 ผลของกระแสตรง

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกระแสผิดปกติจะประกอบด้วยกระแสตรงและกระแสลับ กระแสผิดปกติที่รุนแรงที่สุดคือกระแสผิดปกติที่รวมทั้งกระแสตรงและกระแสลับและคิดที่ค่าสูงสุดของกระแสผิดปกติ

กระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นตามเวลามีค่าดังสมการ

$$i_f(t) = \sqrt{2} E Y_{ac} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-t/T_a} \sin(\alpha - \theta)] \quad (2.44)$$

- เมื่อ $i_f(t)$ คือค่ากระแสผิดปกติที่เวลา t ต่างๆ, s
 E คือแรงดันเฟส-นิวทรัลเฉลี่ยก่อนเกิดความผิดปกติ (rms), V
 ω คือความถี่ของระบบ, radians/s
 α คือมุมของแรงดันที่กระแสเริ่มต้น, radians
 θ คือมุมเฟสของวงจร, radians
 Y_{ac} คือค่าแอดมิตแตนซ์กระแสลับ, mhos
 T_a คือค่าคงที่ทางเวลาเพื่อชดเชยค่ากระแสตรง, s [$T_a = X/(\omega R)$]
 กระแสผิดปกติที่สูงสุดคิดที่ค่ากระแสตรงมากที่สุดคือ ค่า \sin มีค่าเป็นหนึ่ง

$$i_f(t) = \sqrt{2} E Y_{ac} [e^{-t/T_a} - \cos(\omega t)] \quad (2.45)$$

เนื่องจากการทดลองหาค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายว่ามีผลอย่างไรนั้นคิดจากสัญญาณกระแสที่มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ย (rms) ของกระแสผิดปร๋องดังนี้

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (2.46)$$

เมื่อ I_F คือค่ากระแสผิดปร๋องเฉลี่ย (rms), A
 t_f คือช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดปร๋อง, s
 t คือระยะเวลาหลังจากเริ่มเกิดความผิดปร๋อง, s

$$I_F = I_f \sqrt{\frac{2}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (2.47)$$

และสามารถหาค่าแฟคเตอร์ส่วนลด, D_f ได้จากสมการ

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad (2.48)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \quad (2.49)$$

กรณีที่เวลาที่เกิดกระแสผิดปร๋องมีค่ามากกว่า 30 ไซเคิล ให้คิดค่า D_f เท่ากับศูนย์ได้

2.13 หลักการออกแบบ

การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเน้นความปลอดภัยเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสทั้งในสถานีไฟฟ้าและบริเวณข้างเคียงสถานีไฟฟ้า ความปลอดภัยภายในสถานีไฟฟ้าจะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเมฆ ซึ่งถือว่าเป็นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มีค่ามากที่สุด สำหรับกริดที่ทำเป็นเมฆขนาดเท่าๆกันนั้น แรงดันเมฆจะมีค่ามากที่สุดที่มุมของกริด ส่วน

แรงดันไฟฟ้าเมฆที่มีค่าน้อยที่สุดคือบริเวณตรงกลางกริด ในการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานี่ไฟฟ้านี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสเป็นแรงดันไฟฟ้าเมฆที่สูงที่สุดของเมฆที่มุม กริด ความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าเมฆที่มุมของกริดและแรงดันไฟฟ้าเมฆที่กึ่งกลางของกริด คืออัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าเมฆที่สูงที่สุดและแรงดันไฟฟ้าเมฆที่ต่ำสุดได้แสดงในตารางที่ 2.3 ถ้าจำนวนเมฆมากอัตราส่วนดังกล่าวก็มีค่ามากขึ้น ในพื้นที่เดียวกันเปรียบเทียบระหว่างจำนวนเมฆ 10x10 และเมฆ 30x30 ที่จำนวนเมฆมาก อัตราส่วนแรงดันเมฆดังกล่าวก็มีค่ามากขึ้นจาก 2.71 เป็น 8.85

จำนวนเมฆ	E_m สูงสุด/ E_m ต่ำสุด
10x10	2.71
20x20	5.55
30x30	8.85

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่มุมกับแรงดันไฟฟ้าเมฆต่ำสุดที่กึ่งกลางกริด

การคำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้เทียบกับแรงดันเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริด ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ต้องมีค่ามากกว่าแรงดันเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบกราฟด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้น

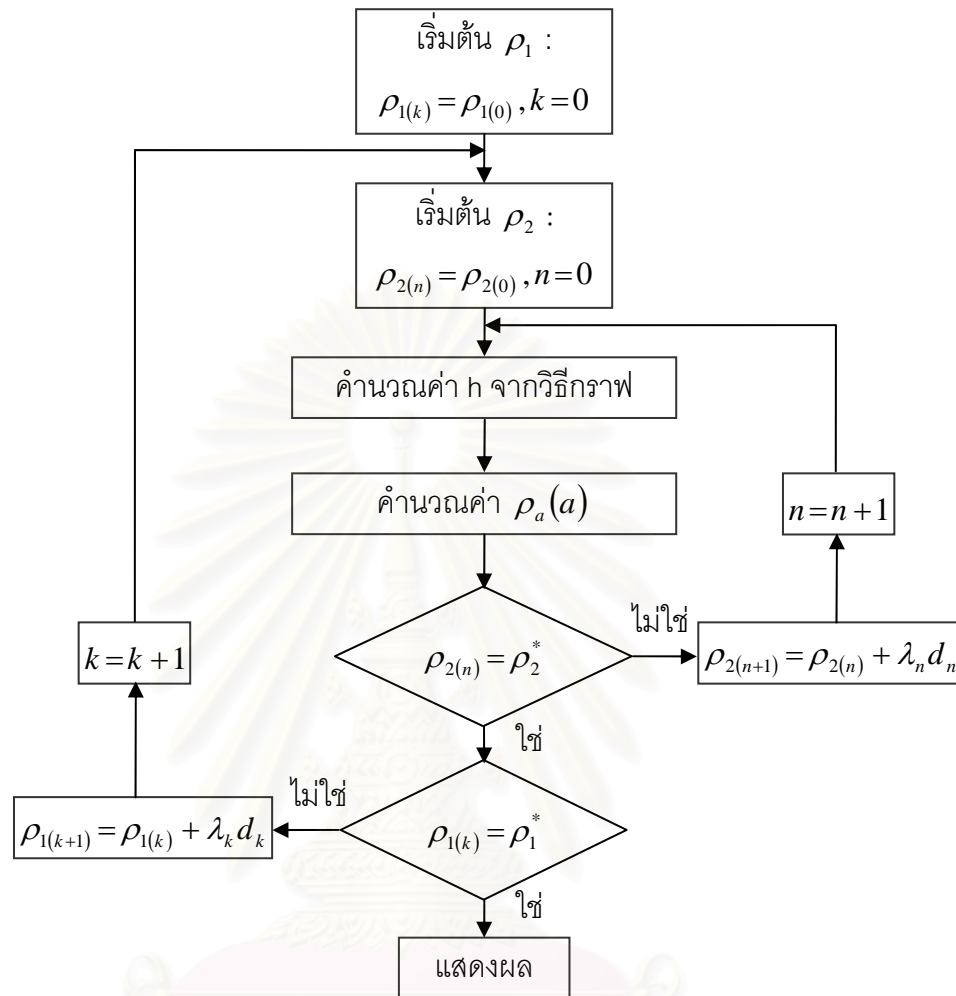
ค่าพารามิเตอร์ของดินมีผลต่อการออกแบบกราฟด์กริดของสถานีไฟฟ้า เนื่องจากต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินที่วิเคราะห์ได้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดิน แสดงวิธีคำนวณ และขั้นตอนการออกแบบกราฟด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น

3.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้น

การหาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้น จะไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่แท้จริงได้จึงต้องทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่เหมาะสม โดยสามารถประเมินได้จากค่าที่เข้าใกล้กับค่าจริงที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมคือ

- 1) เริ่มต้นในจุดที่อยู่ในช่วงระยะที่จะทำการคำนวณแล้วทำการคำนวณหาค่าของจุดเริ่มต้น
- 2) คำนวณหาค่าจุดที่อยู่รอบๆจุดที่พบในช่วงระยะที่จะทำการคำนวณ
- 3) ถ้าค่าที่คำนวณได้ของจุดที่พบมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าค่าที่คำนวณได้ของจุดที่อยู่รอบๆ ให้ลดช่วงระยะที่จะทำการคำนวณลง แล้วทำการคำนวณหาค่าจุดที่อยู่รอบๆที่อยู่ในช่วงระยะใหม่ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับอีกครั้ง ถ้าจุดที่พบยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า ให้ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนช่วงระยะที่จะทำการคำนวณมีค่าลดลงจนสามารถพบจุดที่เหมาะสมที่นำไปใช้ได้
- 4) ถ้าค่าที่คำนวณได้ของจุดที่พบมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ของจุดที่อยู่รอบๆจะต้องเริ่มต้นคำนวณในข้อที่ 1) ใหม่ในจุดที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า
- 5) ทุกๆครั้งที่เริ่มต้นคำนวณในข้อที่ 2) ช่วงระยะที่จะทำการคำนวณต้องมีค่าลดลงจนเพียงพอต่อการคำนวณหาค่าหรือสามารถพบจุดที่เหมาะสมที่อยู่ในข้อที่ 3)



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้น

สัญลักษณ์ที่ใช้ในรูปที่ 3.1 คือ

$\rho_{1(0)}$ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนที่ใช้ในการเริ่มต้นคำนวณ

$\rho_{2(0)}$ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างที่ใช้ในการเริ่มต้นคำนวณ

k คือจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณของค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน

n คือจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณของค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

ρ_1^* คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนที่เหมาะสม

ρ_2^* คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างที่เหมาะสม

d_k คือทิศทางกรคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนรอบที่ k

d_n คือทิศทางกรคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างรอบที่ n

λ_k คือช่วงความยาวที่เหมาะสมในการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน

λ_n คือช่วงความยาวที่เหมาะสมในการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

$\rho_{1(k+1)}$ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนที่ใช้ในการคำนวณรอบต่อไป

$\rho_{2(n+1)}$ คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างที่ใช้ในการคำนวณรอบต่อไป

จากรูปที่ 3.1 จะสามารถอธิบายวิธีคำนวณในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นได้ดังนี้

1) กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) ที่ใช้ในการเริ่มต้นคำนวณโดยกำหนดให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างค่ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุดของความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้

2) กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) ที่ใช้ในการเริ่มต้นคำนวณโดยค่าที่ใช้ในการเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน คือ

ดินชนิดที่ 1 เป็นดินชนิดที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) มีค่าน้อยกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) ให้กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) อยู่ในช่วงระหว่างค่ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุดของความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้ และมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1)

ดินชนิดที่ 2 เป็นดินชนิดที่ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) มีค่ามากกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) ให้กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) อยู่ในช่วงระหว่างค่ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุดของความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้ และมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1)

3) คำนวณหาค่าความลึกของดินชั้นบน (h) จากโมเดลดินสองชั้นจากกราฟแสดงในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.10.2.2

4) คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระยะโพรบต่างๆ $\rho_a(a)$ แสดงในสมการ

$$\rho_a(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_1 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน, Ω .m

ρ_2 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง , $\Omega \cdot m$

K คือแฟคเตอร์การสะท้อน

a คือระยะห่างของโพรบ , m

h คือความลึกของดินชั้นบน , m

5) เปรียบเทียบค่าความต้านทานของดินที่ระยะโพรบต่างๆที่คำนวณกับค่าที่วัดได้ ถ้ามีค่าใกล้เคียงกันและยอมรับได้โดยค่า ρ_1 ที่คำนวณได้ในรอบที่ k กับ $k+1$ และค่า ρ_2 ที่คำนวณได้ในรอบที่ n กับ $n+1$ ต้องมีค่าต่างกันน้อยกว่า 0.1 แสดงว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) และค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) ที่ใช้ในการคำนวณเป็นจุดที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ได้ แต่ถ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) และค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) ยังไม่เป็นจุดที่เหมาะสมให้ทำการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) และค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) ใหม่ จนสามารถหาจุดที่เหมาะสมได้

สมมติการวัดความต้านทานจำเพาะแบบสี่จุดได้ค่าได้ตามภาคผนวก ข.ตารางที่ ข.3 ซึ่งเป็นดินชนิดที่ 2 และสามารถวิเคราะห์หาค่าความลึกของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างได้ดังนี้

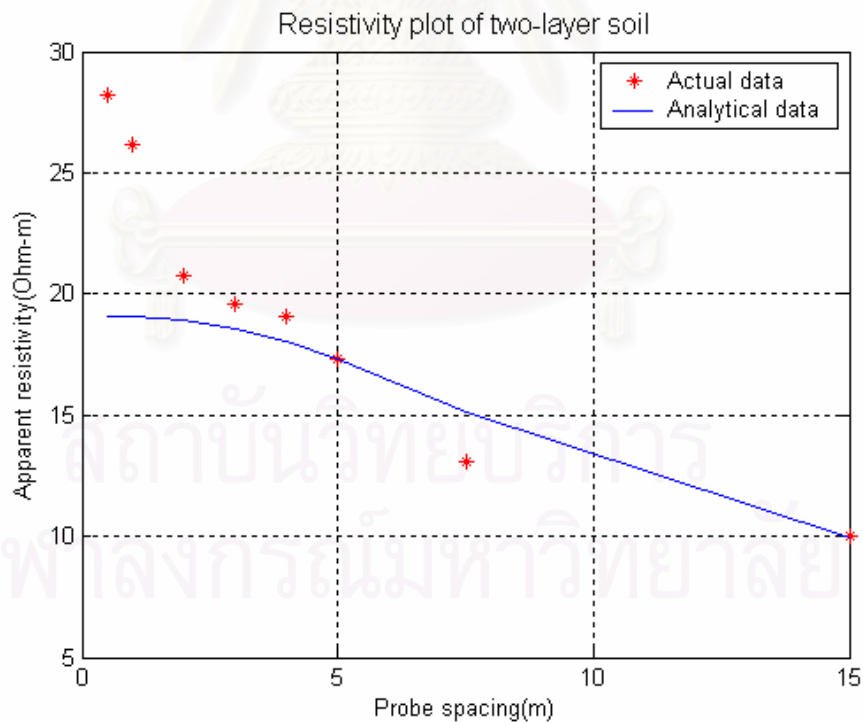
- 1) กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนที่ใช้ในการเริ่มต้น $\rho_1 = 19.085 \Omega \cdot m$
- 2) กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างที่ใช้ในการเริ่มต้น $\rho_2 = 6.362 \Omega \cdot m$
- 3) ค่าความลึกของดินชั้นบน $h = 6.746 m$ ที่คำนวณได้จากโมเดลดินสองชั้นจากกราฟ
- 4) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระยะโพรบต่างๆ $\rho_a(a)$ สามารถหาได้ดังนี้

$$\rho_a(a) = (19.085) \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(-0.5)^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2n(6.746)}{a} \right)^2}} - \frac{(-0.5)^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2n(6.746)}{a} \right)^2}} \right) \right]$$

รอบที่ $k = 1$ เมื่อความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน $\rho_1 = 19.085 \Omega \cdot m$

n	1	2	3	4	10	11	12
ρ_2	6.3617	12.723	3.1808	9.5425	6.7593	6.1629	6.5605
h	6.7457	4.376	9.2989	5.8092	6.3916	6.9314	6.5659
$\rho_a(0.5)$	19.082	19.081	19.084	19.082	19.082	19.082	19.082
$\rho_a(1.0)$	19.063	19.053	19.073	19.062	19.061	19.065	19.062
$\rho_a(2.0)$	18.923	18.863	18.995	18.917	18.904	18.931	18.914
$\rho_a(3.0)$	18.588	18.470	18.797	18.585	18.537	18.612	18.563
$\rho_a(4.0)$	18.044	17.932	18.451	18.070	17.950	18.090	17.997
$\rho_a(5.0)$	17.325	17.332	17.95	17.424	17.188	17.393	17.257
$\rho_a(7.5)$	15.137	15.938	16.149	15.617	14.943	15.238	15.039
$\rho_a(15.0)$	9.9076	13.829	9.8848	11.912	9.9242	9.9138	9.9112

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่คำนวณได้ในรอบที่ $k = 1$

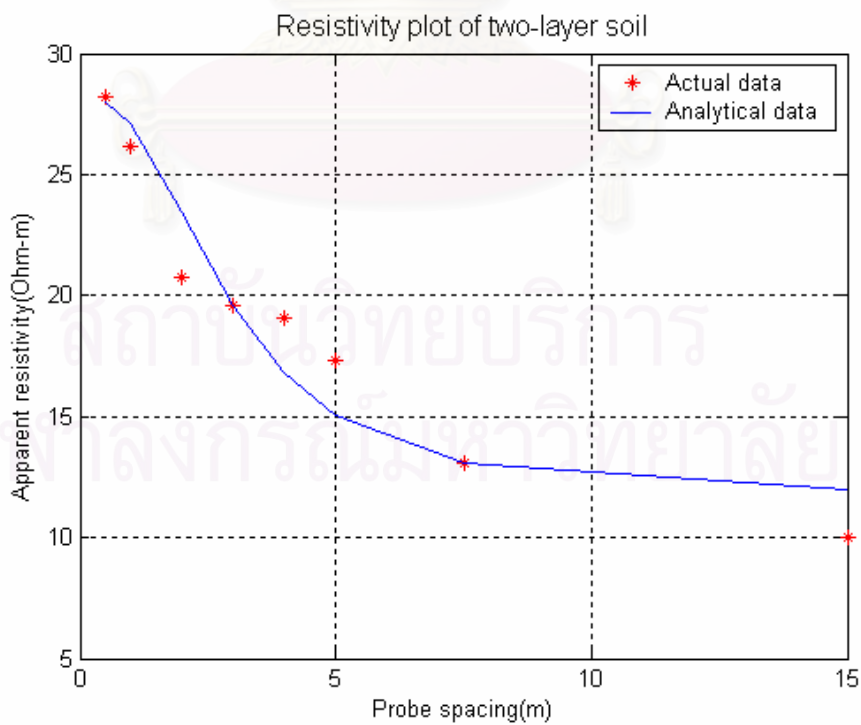


รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น
ในรอบที่ $k = 1$ กับค่าที่วัดได้

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในรอบที่ $k=1$ จะได้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง $\rho_2 = 6.362 \Omega \cdot m$ และความลึกของดินชั้นบน $h = 6.746 m$ รอบที่ $k=2$ เมื่อความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน $\rho_1 = 28.18 \Omega \cdot m$

n	1	2	3	4	5	6	14
ρ_2	9.3933	18.787	4.6967	14.090	7.0450	11.742	11.888
h	2.6805	0.6388	3.6760	1.5249	2.9937	1.8289	1.7927
$\rho_a(0.5)$	28.117	26.953	28.145	27.964	28.126	28.022	28.015
$\rho_a(1.0)$	27.724	24.021	27.918	26.844	27.782	27.135	27.094
$\rho_a(2.0)$	25.543	20.716	26.453	22.935	25.755	23.441	23.330
$\rho_a(3.0)$	22.284	19.666	23.735	19.580	22.469	19.595	19.493
$\rho_a(4.0)$	19.095	19.274	20.445	17.489	19.000	16.836	16.786
$\rho_a(5.0)$	16.500	19.095	17.223	16.277	15.995	15.082	15.086
$\rho_a(7.5)$	12.644	18.921	11.177	14.990	11.202	13.090	13.176
$\rho_a(15.0)$	9.9759	18.820	5.6524	14.290	7.6980	12.015	12.152

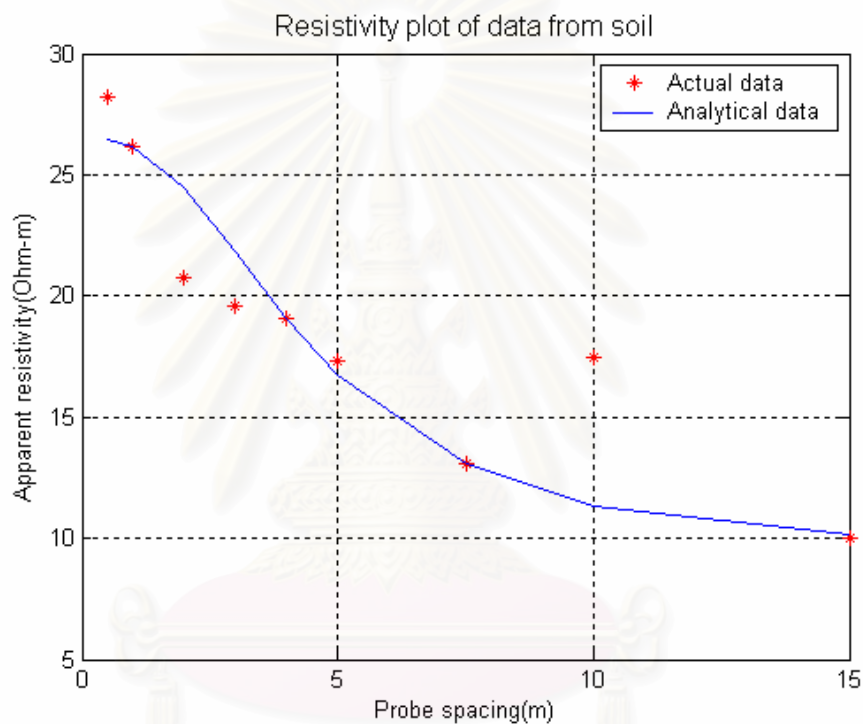
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่คำนวณได้ในรอบที่ $k=2$



รูปที่ 3.3 การเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นในรอบที่ $k=2$ กับค่าที่วัดได้

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในรอบที่ $k = 2$ จะได้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง $\rho_2 = 11.742 \Omega \cdot m$ และความลึกของดินชั้นบน $h = 1.8289 m$

ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในรอบต่อไปจนค่า ρ_1 ที่คำนวณได้ในรอบที่ k กับ $k + 1$ มีค่าต่างกันน้อยกว่า 0.1 จากผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นจะได้ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน $\rho_1 = 26.47 \Omega \cdot m$ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง $\rho_2 = 9.51 \Omega \cdot m$ และความลึกของดินชั้นบน $h = 2.87 m$



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นกับค่าที่วัดได้

3.2 เงื่อนไขการออกแบบระบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า

1) ระยะเวลาที่คนสามารถทนได้โดยที่ไม่เกิดอันตราย 0.03-3 s และระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติคือ 0.25-1.0 s

2) กระแสกริดเป็นกระแสที่ไหลอยู่ระหว่างกริดและบริเวณดินโดยรอบ กระแสกริดจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสผิดพลาด เพราะกระแสผิดพลาดบางส่วนอาจไหลออกจากระบบกราวด์ไปยังสายซึ่งอากาศของเสาไฟฟ้า

3) วัสดุปูผิวดินควรที่จะมีความหนาประมาณ 0.08-0.15 m และค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดินอยู่ที่ประมาณ 1000-6000 $\Omega \cdot m$

4) ค่าความลึกของกริดที่ฝังลงไปจะอยู่ที่ประมาณ 0.3-1.5 m

5) ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

กรณีที่เป็นดินชั้นเดียว ค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดที่ระยะห่างของโพรบต่างๆกันสามารถหาได้จากสมการ (2.21) ในบทที่ 2

กรณีที่เป็นดินสองชั้น ต้องทำการประมาณและวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง และค่าความลึกของดินชั้นบน

3.3 ขั้นตอนการออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า

การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวและแรงดันไฟฟ้า สัมผัสต้องมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อคนที่ทำงานในสถานีไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพลาดลงดินที่กริดของสถานีไฟฟ้า ขั้นตอนการออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า แสดงได้ดังนี้

3.3.1 สำรวจข้อมูลและพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

โดยทั่วไปจะสามารถรู้ขนาดพื้นที่และรูปร่างของการออกแบบสถานีไฟฟ้า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถได้จาก Wenner method โดยทำการวัดค่าความต้านทานประมาณ 4-5 จุดในหลายๆแนวแล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะดินสองชั้นออกมา

3.3.2 หาขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำที่ต่อลงดินมีค่าขึ้นอยู่กับ ขนาดของกระแสผิดพลาดที่ไหลผ่านตัวนำ ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพลาดหรือช่วงเวลาตัดกระแส คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบและอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้ ดังนั้นค่าพื้นที่หน้าตัดของตัวนำสามารถหาได้จากสมการ (2.18) ในบทที่ 2

3.3.3 หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้

การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์สามารถทนได้อย่างปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุผิวดิน ความหนาของวัสดุผิวดินและระยะเวลาที่มนุษย์สามารถทนต่อกระแสที่ไหลเข้าสู่ร่างกายได้ สามารถหาได้จากหัวข้อที่ 2.6 ในบทที่ 2

3.3.4 การออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

เมื่อทราบรูปร่างและขนาดพื้นที่ของกราวด์กริดที่ใช้ในการออกแบบแล้ว ให้ทำการเริ่มต้นออกแบบโดยเริ่มจากเมฆเดี่ยวครอบคลุมทั้งพื้นที่

3.3.5 การหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด

กรณีดินชั้นเดียว การคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดและดินบริเวณรอบๆที่ไกลออกไป จะสามารถหาได้จากสมการ (2.25) ในบทที่ 2

กรณีของดินสองชั้น วิธีการของ Schwarz เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกราวด์กริดมาก และยังสามารถหาค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน ความต้านทานร่วมระหว่างกราวด์กริดกับแท่งรากสายดินได้ โดยค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (3.2)$$

เมื่อ R_1 คือค่าความต้านทานของกราวด์กริด , Ω

R_2 คือค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน , Ω

R_m คือความต้านทานร่วม , Ω

ค่าความต้านทานของกราวด์กริด เป็นไปตามสมการ

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left[K_r \left(\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + N - 1 \right) + K_p K_1 \left(\frac{L_c}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.4)$$

เมื่อ L_c คือความยาวทั้งหมดของตัวนำกราวด์กริด, m

$a' = \sqrt{a2h}$ เมื่อฝังกราวด์กริดที่ความลึก h, m

a' มีค่า a สำหรับตัวนำวางบนพื้น, m

$2a$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, m

K_1 คือค่าที่แสดงในรูปที่ 2.14

K_r คือ Nonuniformity correction factor for single-mesh grid แสดงในรูปที่ 3.5

N คือ Geometrical parameter แสดงในรูปที่ 3.6

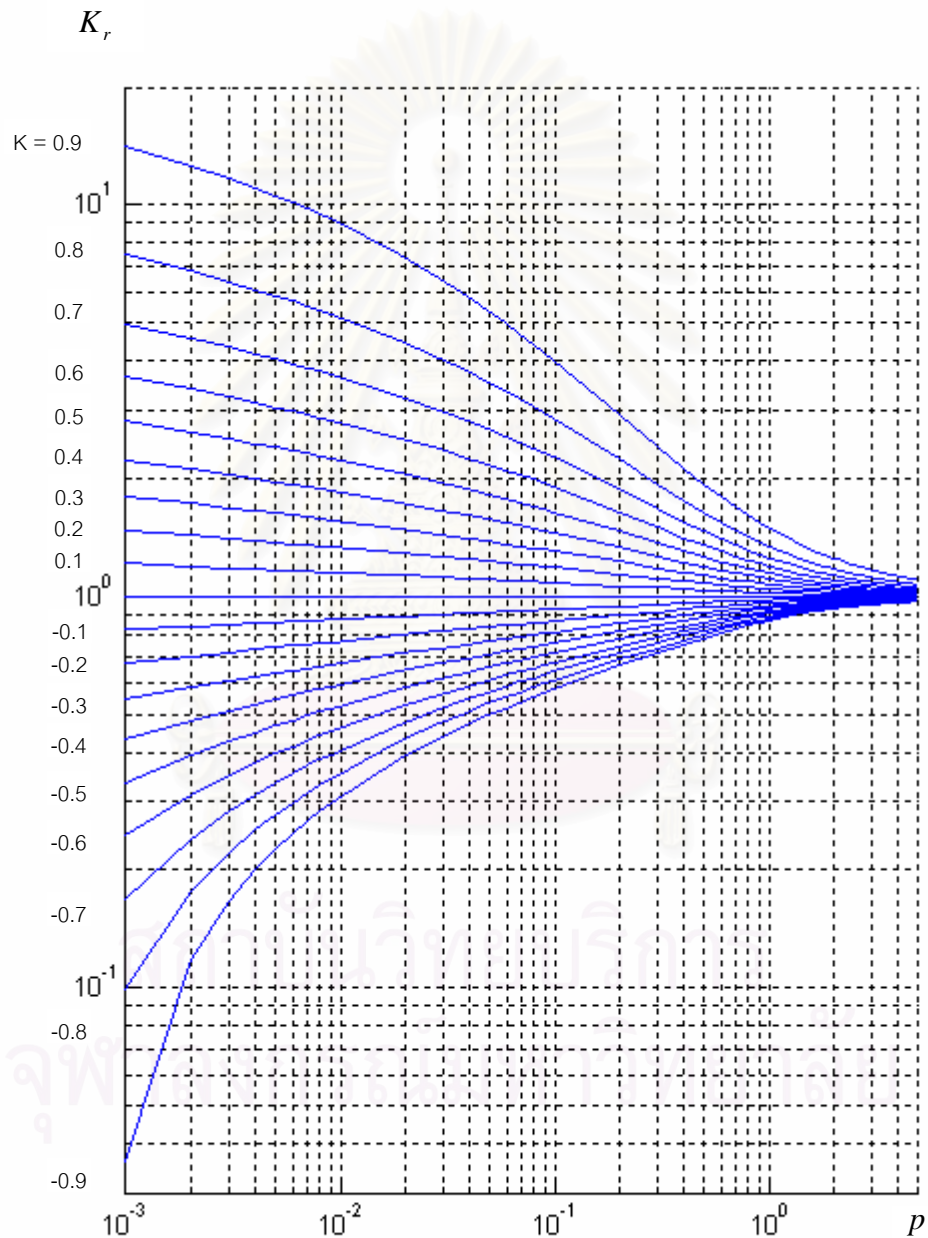
K_p คือ Nonuniformity correction factor แสดงในรูปที่ 3.7

x คืออัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของสถานีไฟฟ้า

K คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ρ_1 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน, $\Omega \cdot m$

ρ_2 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง, $\Omega \cdot m$



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_r กับพารามิเตอร์ p

สามารถหาค่า Nonuniformity correction factor for single-mesh grid, K_r ได้จากสมการดังนี้

$$K_r = 1 + \frac{2}{c} \sum_{n=1}^{\infty} K^n q K(q) \quad (3.5)$$

โดยที่

$$c = \ln \left(\frac{8\sqrt{A}}{h'\sqrt{\pi}} \right) \quad (3.6)$$

$$q = \left[1 + \pi(np)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

และจาก Complete elliptic integral of the first kind สามารถหาค่า $K(q)$ ได้จากสมการดังนี้

$$K(q) = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{(1-t^2)(1-q^2t^2)}} dt \quad (3.8)$$

เมื่อ $h' = d/2$ สำหรับตัวนำกริดที่วางบนพื้น, m

$h' = \sqrt{hd}$ สำหรับตัวนำกริดที่วางในดิน, m

h คือค่าความลึกของกริด, m

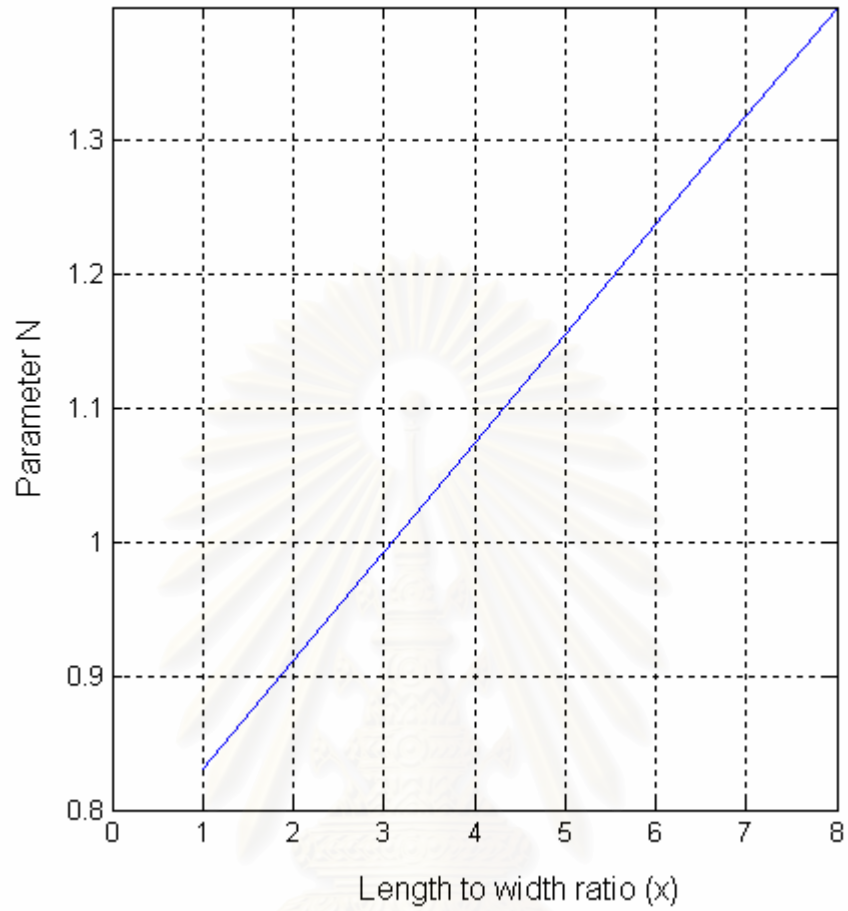
H คือค่าความลึกของดินชั้นบน, m

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำกริด, m

A คือพื้นที่ของกราวด์กริด, m²

$p = \frac{H}{\sqrt{A}}$ สำหรับ $\rho_1 < \rho_2$

$p = \frac{H-h}{\sqrt{A}}$ สำหรับ $\rho_1 > \rho_2$



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ N กับ x

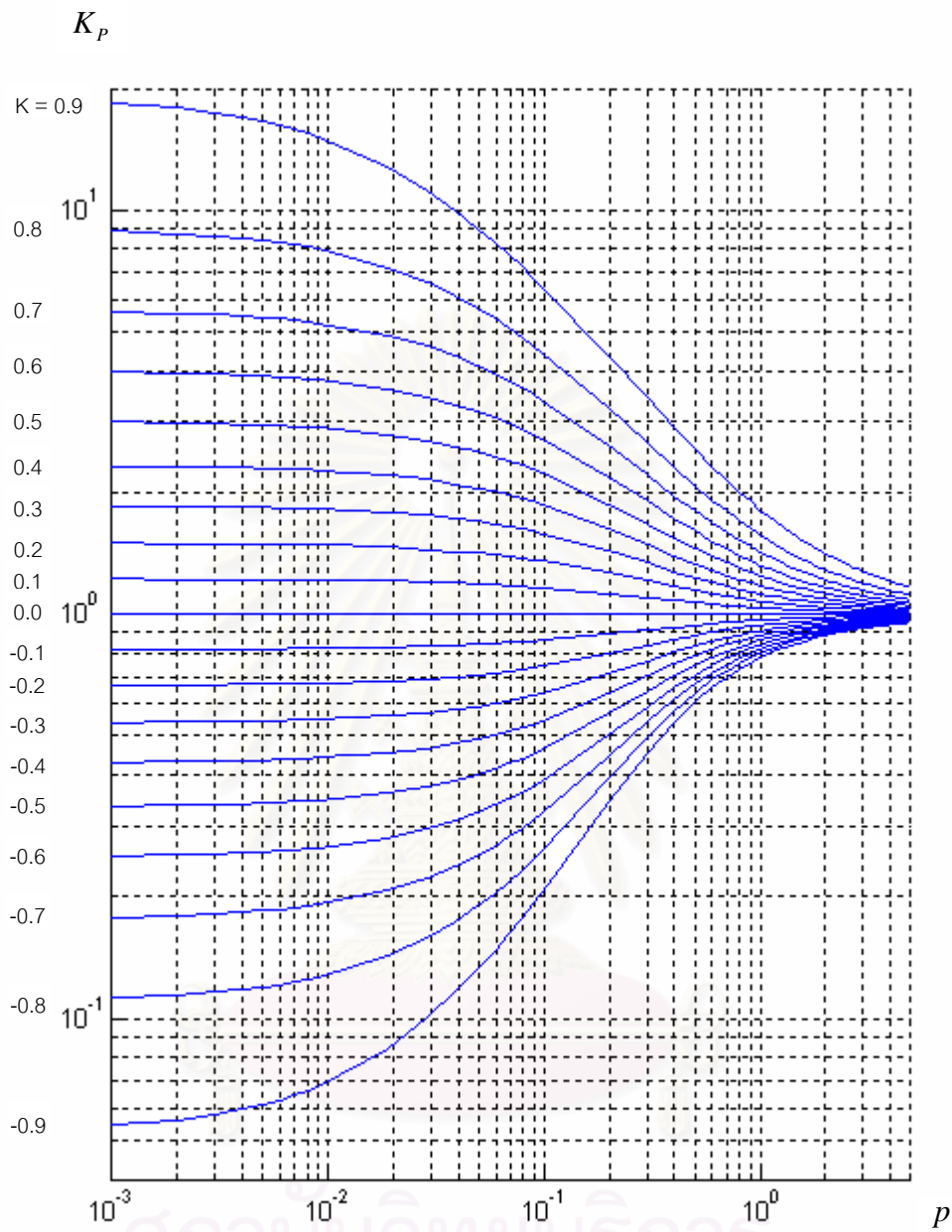
สามารถหาค่า Nonuniformity correction factor, K_p ได้จากสมการดังนี้

$$K_p = 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \int_0^1 \arcsin 2 \left[\sqrt{(t+1)^2 + 4\pi(np)^2} + \sqrt{(t-1)^2 + 4\pi(np)^2} \right]^{-1} dt \quad (3.9)$$

เมื่อ

$$p = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad \text{สำหรับ } \rho_1 < \rho_2$$

$$p = \frac{H-h}{\sqrt{A}} \quad \text{สำหรับ } \rho_1 > \rho_2$$



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p กับพารามิเตอร์ p

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน เป็นไปตามสมการ

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi m_R L_r} \left(\ln \left(\frac{4L_a}{b} \right) - 1 \right) + \frac{\rho_2}{n_R \pi \sqrt{A}} K_1(0) K'_p (\sqrt{n_R} - 1)^2 \quad (3.10)$$

$$L_a = L_2 + L_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3.11)$$

$$\rho_a = \rho_2 \frac{L_r}{L_a} \quad (3.12)$$

$$L_r = L_1 + L_2 \quad (3.13)$$

เมื่อ L_1 และ L_2 คือความยาวของแท่งรากสายดินส่วนที่อยู่ในดินชั้นบนและดินชั้นล่างตามลำดับ, m

L_r คือความยาวของแท่งรากสายดินแต่ละแท่ง, m

$2b$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งรากสายดิน, m

n_R คือจำนวนแท่งรากสายดินในพื้นที่กรวดกกริด

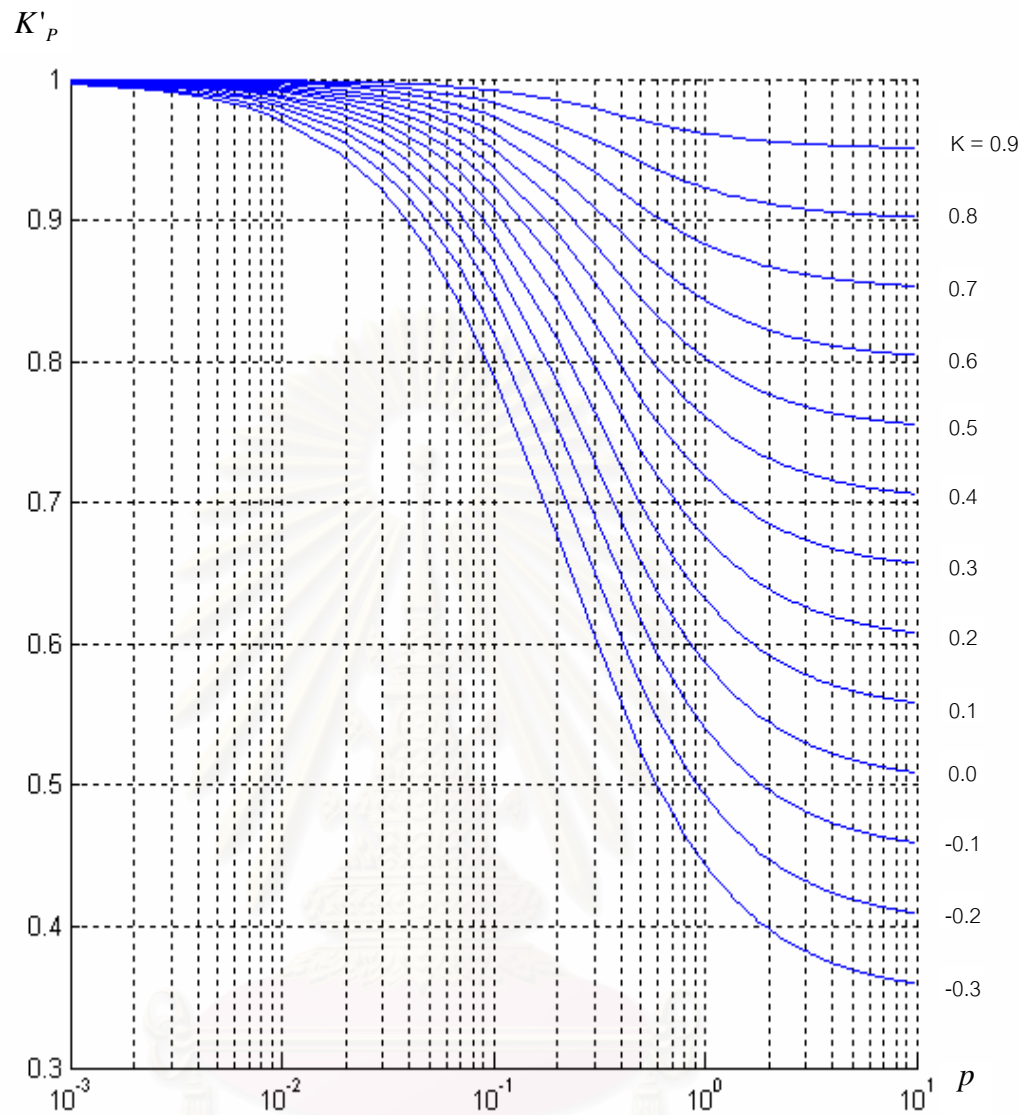
$K_1(0)$ คือ Geometrical factor ที่ $h = 0$ m คือค่าที่แสดงในรูปที่ 2.14

K'_p คือ Nonuniformity correction factor for the plate ที่วางในดินชั้นล่างแสดงในรูปที่ 3.8

สามารถหาค่า Nonuniformity correction factor for the plate, K'_p ได้จากสมการดังนี้

$$K'_p = \frac{1-K}{2} + (1-K^2) \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} K^n \int_0^1 \arcsin 2 \left[\frac{\sqrt{(t+1)^2 + 4\pi(1+n)^2 p^2} + \sqrt{(t-1)^2 + 4\pi(1+n)^2 p^2}}{2} \right]^{-1} dt \quad (3.14)$$

เมื่อ $p = \frac{H}{\sqrt{A}}$



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K'_p กับพารามิเตอร์ p

ค่าความต้านทานรวม เป็นไปตามสมการ

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_C} \left(\ln \left(\frac{2L_C}{L_e} \right) + N \right) + \frac{\rho_2}{\pi L_C} K_1(0) \left(\frac{L_C}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right) \quad (3.15)$$

$$L_e = L_1 + L_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (3.16)$$

3.3.6 การหาค่ากระแสกริดสูงสุด

เมื่อเกิดกระแสผิวดพร้อม กระแสที่ไหลลงดินจะมีค่าน้อยกว่ากระแสสูงสุด แต่ถ้าต้องการให้การออกแบบมีความปลอดภัยสูง สามารถที่จะให้กระแสกริดมีค่าเท่ากับกระแสตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขณะเกิดความผิวดพร้อม

3.3.7 การตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

ค่าแรงดันที่กราวด์กริด (Ground Potential Rise) หาได้จากผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน ดังสมการ

$$GPR = I_G R_g \quad (3.17)$$

เมื่อ I_G คือค่ากระแสกริดสูงสุด , kA

R_g คือค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า , Ω

ทำการเปรียบเทียบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ ถ้าแรงดันที่กราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าแรงดันที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

3.3.8 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวตามมาตรฐาน IEEE 80 นั้นจะให้ความปลอดภัยและคิดผลกระทบของตัวแปรทุกตัว ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดสามารถหาได้จากสมการดังนี้

แรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริด

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \quad (3.18)$$

โดยที่

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (3.19)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \text{ (เท่ากับ 1 กราวด์กริดมีรากสายดิน)} \quad (3.20)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}, h_0 = 1m \text{ (ความลึกอ้างอิงเท่ากับ 1 เมตร)} \quad (3.21)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (3.22)$$

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (3.23)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P} \quad (3.24)$$

$n_b = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$n_c = 1$ สำหรับกริดแบบ square ,rectangular

$n_d = 1$ สำหรับกริดแบบ square ,rectangular ,L-shaped

และในกรณีอื่นๆค่า n_b , n_c และ n_d มีค่าดังนี้

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}} \quad (3.25)$$

$$n_c = \left[\frac{L_X L_Y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_X L_Y}} \quad (3.26)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \quad (3.27)$$

เมื่อ D คือระยะห่างระหว่างตัวนำขนานกัน , m

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำกริด, m

L_C คือความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน , m

L_P คือเส้นรอบรูปของกราวด์กริด , m

A คือพื้นที่ของกราวด์กริด , m²

สำหรับกริดที่มีแท่งรากสายดินที่มุมเส้นกราวด์กริดหรือทั่วพื้นที่กราวด์กริด สามารถหา
ค่า effective buried length ได้ดังสมการ (3.33)

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R \quad (3.28)$$

เมื่อ L_R คือความยาวรวมของแท่งรากสายดินทุกแห่ง , m

L_r คือความยาวของแท่งรากสายดินแต่ละแห่ง , m

L_X คือความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง x , m

L_Y คือความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง y , m

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริด

$$E_S = \frac{\rho K_S K_i I_G}{L_S} \quad (3.29)$$

โดยที่

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (3.30)$$

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (3.31)$$

3.3.9 การตรวจสอบแรงดันเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทน ได้

ถ้าแรงดันเมฆของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ แสดงว่าการ
ออกแบบนั้นมีความปลอดภัยแต่จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดกับ
แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป แต่ถ้าแรงดันเมฆของกราวด์กริดมีค่ามากกว่า
แรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่

3.3.10 การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์ทนได้

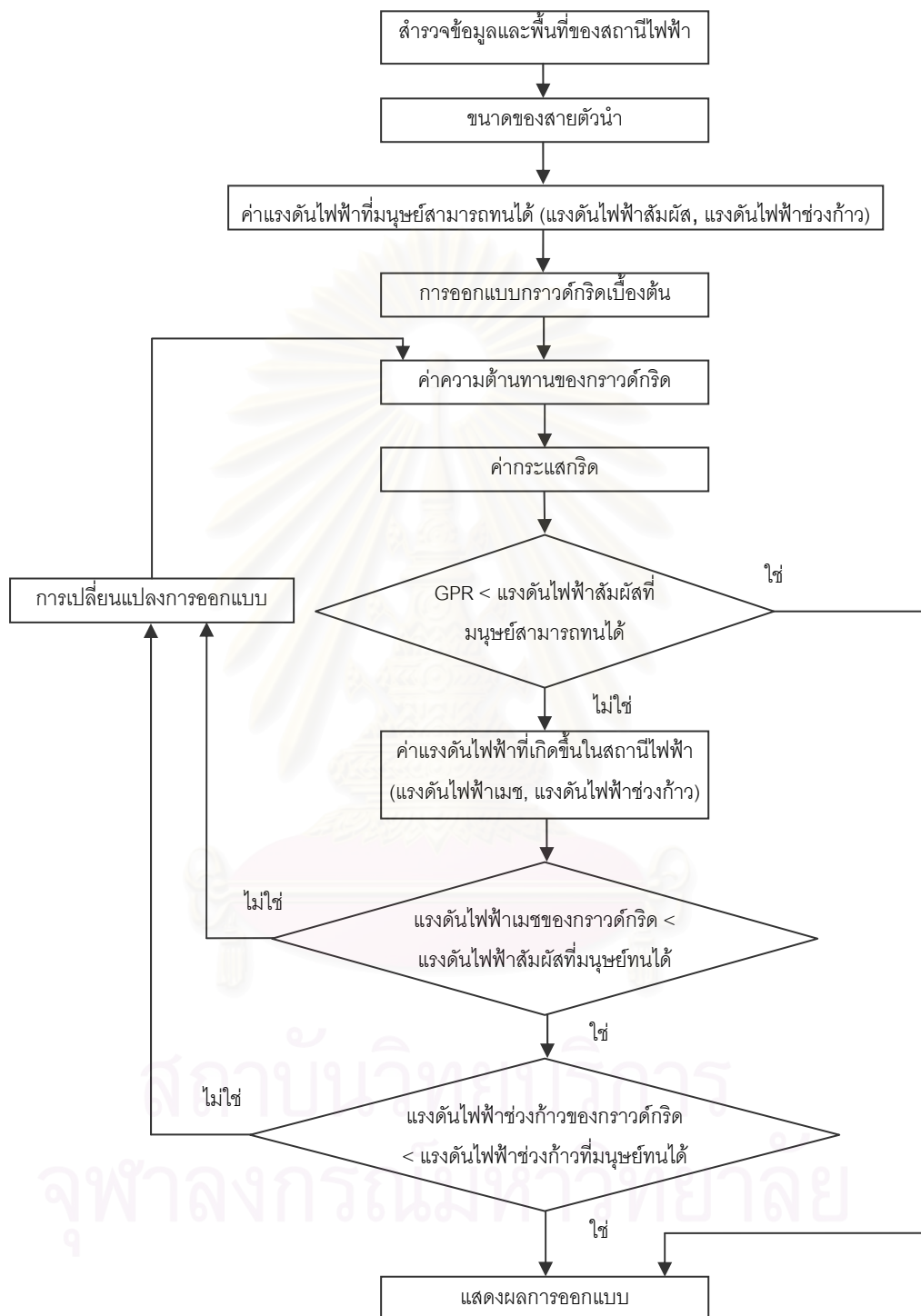
ถ้าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์ทนได้ แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์สามารถทนได้ จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่

3.3.11 การเปลี่ยนแปลงการออกแบบ

ถ้าการออกแบบยังไม่เกิดความปลอดภัย ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆเพื่อเพิ่มแรงดันที่คนสามารถทนได้และลดแรงดันของกราวด์กริดลง

- 1) ลดระยะห่างของกริด เพิ่มจำนวนเมฆของกริดจะเป็นการเพิ่มความยาวของสายดินด้วย แต่ระยะห่างต้องไม่น้อยกว่าข้อกำหนดของสมการ
- 2) เพิ่มความลึกของการฝังกราวด์กริด
- 3) เพิ่มแท่งรากสายดิน เพื่อเพิ่มความยาวของสายดิน
- 4) ลดกระแสลัดวงจรหรือกระแสผิดพ่วง เพื่อลดกระแสกริด
- 5) ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสลัดวงจร เพื่อให้คนทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น
- 6) เพิ่มความหนาของวัสดุที่ปูผิวดินเพื่อเพิ่มความต้านทานจำเพาะหรือใช้วัสดุปูผิวดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะมากขึ้น

จากหัวข้อที่ 3.3.1 ถึง 3.3.11 นำมาเขียนเป็นขั้นตอนการออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการออกแบบกราวด์กิริตในสถานีไฟฟ้า

บทที่ 4

ผลการออกแบบและการวิเคราะห์ผล

การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีผลต่อการออกแบบมาก ถ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณหรือวิเคราะห์ได้มีความผิดพลาดทำให้การออกแบบไม่ถูกต้องเกิดความไม่ปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าหรือเกิดความเสียหายในการออกแบบ จึงต้องเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

4.1 วิธีการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นและดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80

The screenshot shows a software window titled "Design" with the following sections:

- Field data:** Grid type: Square grid; Soil type: Uniform soil; Calculate button.
- Conductor size:** Fault current, If: Input fault current; Material: copper, annealed soft-drawn; Ambient temperature, Ta: 40 Celsius; Fusing temperature, Tm: 250 Celsius; Duration of fault, If: 1 s; Calculate button.
- Touch & step criteria:** Resistivity of surface layer: 0 ohm.m; Surface layer thickness: 0 m; Person weight: Input weight kg; Calculate button.
- Initial design:** Depth of ground grid: 0 m; Decrement factor, Df: Input decrement factor; Split factor, Sf: Input split factor; Initial button.
- Modify design:** Length of ground rod at each location, Lr: 0 m; Diameter of ground rods: 0 m; Next >> button.
- Result:** Total area enclosed by ground grid, A: 0 m²; Conductor cross section: 0 (m.m)²; Etouch: 0; Estep: 0 V; Maximum grid current, IG: 0 A; Resistance of grounding system, Rig: 0 ohm; Ground potential rise (GPR): 0 V; Em: 0; Es: 0 V.
- Ground grid design:** Maximum length in x direction: 0; Width right side in x direction: 0 m; Maximum length in y direction: 0; Width upper side in y direction: 0 m; Spacing between parallel conductors, D: 0 m.
- Show figure ground grid design** button.

รูปที่ 4.1 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบกราวด์กริด

4.1.1 การป้อนข้อมูลสนาม (Field data) และการคำนวณหาขนาดพื้นที่ของกราวด์ กริด

หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลสนาม (Field data) และการคำนวณหาขนาดพื้นที่ของกราวด์กริดแสดงดังรูปที่ 4.1 (A)

1) คลิก Grid type เลือกชนิดของกริดที่ใช้ในการออกแบบ (Square grid, Rectangular grid, L-shaped grid)

เลือก Square grid จะแสดงหน้าจอเพื่อป้อนขนาดความยาวของกริดให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก Rectangular grid จะแสดงหน้าจอเพื่อป้อนขนาดความกว้างและความยาวของกริดให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก L-shaped grid จะแสดงหน้าจอเพื่อป้อนขนาดของกริดแบบรูปตัวแอลดังแสดงในรูปที่ 4.2 ให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

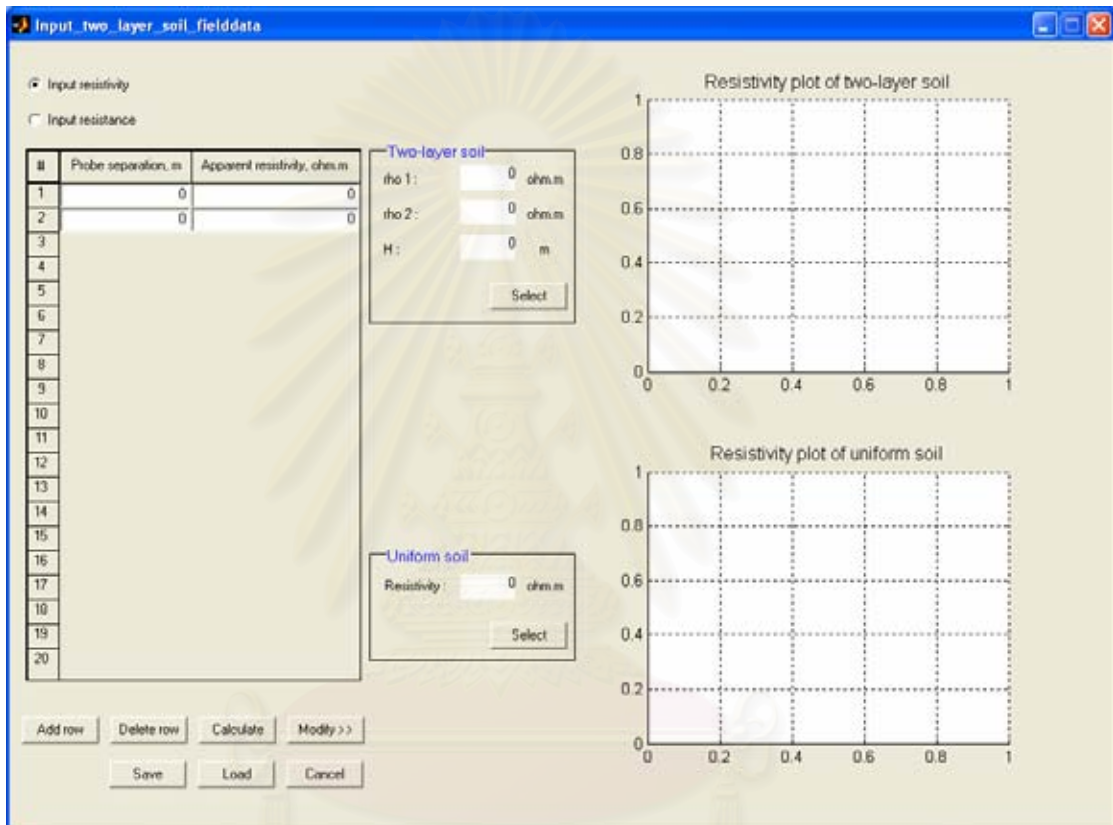
รูปที่ 4.2 การป้อนขนาดของกริดแบบรูปตัวแอล

2) คลิก Soil type เลือกชนิดของดินที่ใช้ในการออกแบบ (Uniform soil, Two-layer soil, Soil field data)

เลือก Uniform soil จะแสดงหน้าจอเพื่อป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดินให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก Two-layer soil จะแสดงหน้าจอเพื่อป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและชั้นล่าง และความลึกของดินชั้นบนให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก Soil field data จะแสดงหน้าจอเพื่อให้ป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ระยะ โพรบต่างๆและค่าระยะห่างโพรบหรือถ้าต้องการป้อนค่าความต้านทานของดินที่ระยะ โพรบต่างๆคลิก Input resistance จากนั้นให้ทำการป้อนค่า คลิก Calculate หรือ Modify >> โปรแกรมจะแสดงกราฟและค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและดินชั้นเดียวเปรียบเทียบกัน จากนั้นคลิก Select เลือกชนิดของดินที่ใช้ในการออกแบบ แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โปรแกรมการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและชั้นเดียว

3) คลิก Calculate ที่หน้าจอหลักของ Field data จากนั้นโปรแกรมจะแสดงขนาดพื้นที่ของกราวด์กริดที่ได้จากการคำนวณ

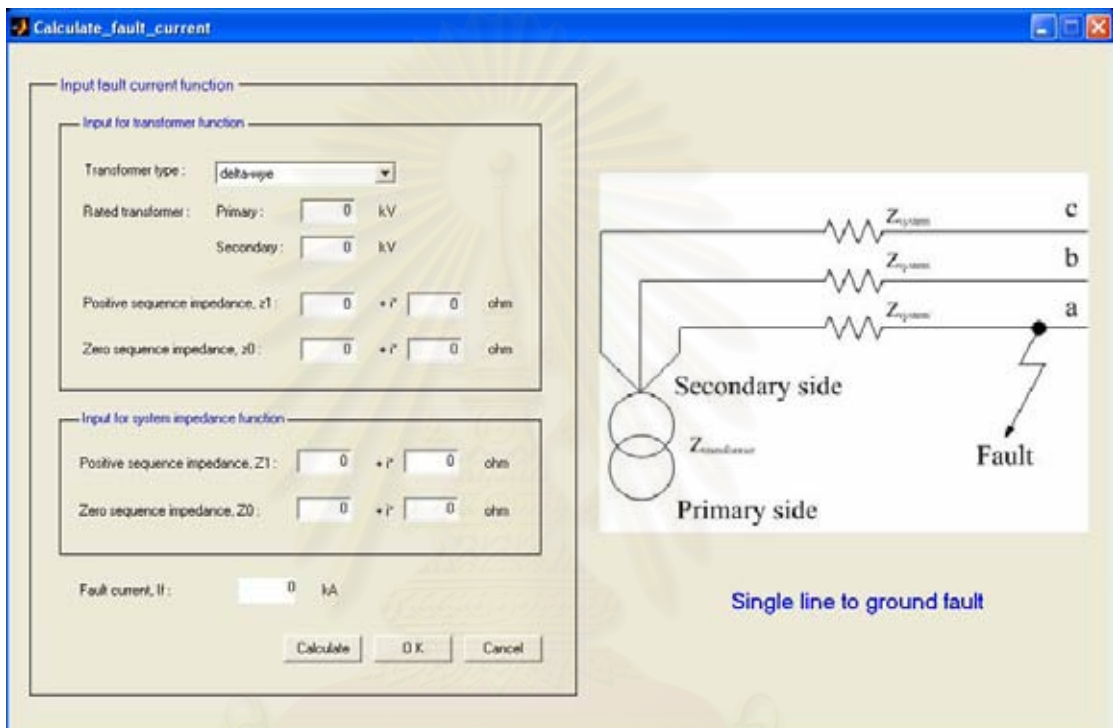
4.1.2 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาขนาดสายตัวนำ (Conductor size)

หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลและคำนวณหาขนาดสายตัวนำ (Conductor size) แสดงดังรูปที่ 4.1 (B)

1) คลิก Fault current เลือกวิธีในการหาขนาดของกระแสผิดพลาด (Input fault current, Calculate fault current)

เลือก Input fault current จะแสดงหน้าจอเพื่อให้ป้อนขนาดของกระแสผิดพลาดพร้อมให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก Calculate fault current จะแสดงหน้าจอเพื่อให้ป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาขนาดของกระแสผิดพลาดพร้อมให้ทำการป้อนค่า คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงขนาดของกระแสผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณ จากนั้นคลิก OK แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โปรแกรมการคำนวณหาขนาดของกระแสผิดพลาด

2) คลิก Material เลือกชนิดของตัวนำที่ใช้ในการออกแบบ หรือกรณีเลือก Input material constants จะแสดงหน้าจอเพื่อให้ป้อนค่าคงที่ของวัสดุตัวนำให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

3) ป้อนค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Ambient temperature, T_a)

4) ป้อนค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้ (Fusing temperature, T_m)

5) ป้อนค่าช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพลาด (Duration of fault, t_f)

6) คลิก Calculate ที่หน้าจอหลักของ Conductor size จากนั้นโปรแกรมจะแสดงพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำที่ได้จากการคำนวณ

4.1.3 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลและคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงดังรูปที่ 4.1 (C)

- 1) ป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุผิวพื้น (Resistivity of surface layer)
- 2) ป้อนค่าความหนาของวัสดุผิวพื้น (Surface layer thickness)
- 3) คลิก Person weight เลื่อนน้ำหนักของร่างกายคนที่ใช้ในการออกแบบ (50, 70) หรือกรณีต้องการป้อนน้ำหนักของร่างกายคน เลือก Input weight จะแสดงหน้าจอเพื่อให้อป้อนน้ำหนักของร่างกายคนให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK
- 4) คลิก Calculate ที่หน้าจอหลักของ Touch & step criteria จากนั้นโปรแกรมจะแสดงขนาดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ที่ได้จากการคำนวณ

4.1.4 การป้อนข้อมูลและการออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลและการออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 4.1 (D)

- 1) ป้อนค่าความลึกของดินชั้นบน (Depth of ground grid)
- 2) คลิก Decrement factor เลื่อนวิธีในการหาค่าแฟคเตอร์ส่วนลด (Input Decrement factor, Calculate Decrement factor)

เลือก Input Decrement factor จะแสดงหน้าจอเพื่อให้อป้อนค่าแฟคเตอร์ส่วนลดให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก Calculate Decrement factor จะแสดงหน้าจอเพื่อให้อป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าแฟคเตอร์ส่วนลดให้ทำการป้อนค่า คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่าแฟคเตอร์ส่วนลดที่ได้จากการคำนวณ จากนั้นคลิก OK

- 3) คลิก Split factor เลื่อนวิธีในการหาค่าแฟคเตอร์แบ่งกระแส (Input Split factor, Calculate Split factor)

เลือก Input Split factor จะแสดงหน้าจอเพื่อให้อป้อนค่าแฟคเตอร์แบ่งกระแสให้ทำการป้อนค่า จากนั้นคลิก OK

เลือก Calculate Split factor จะแสดงหน้าจอเพื่อให้อป้อนข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าแฟคเตอร์แบ่งกระแสให้ทำการป้อนค่า คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายดินกับสายนิวทรัลขนานกัน Z_{eq} ที่ได้จากการคำนวณเพื่อนำไปคำนวณหาค่าแฟคเตอร์แบ่งกระแสต่อไป จากนั้นคลิก OK

4) คลิก Initial ที่หน้าจอหลัก จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

4.1.5 การป้อนข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงการออกแบบกราวด์กริด

หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงการออกแบบกราวด์กริดแสดงดังรูปที่ 4.1 (E)

- 1) ป้อนขนาดความยาวของแท่งรากสายดิน (Length of ground rod at each location)
- 2) ป้อนขนาดความยาวของแท่งรากสายดิน (Diameter of ground rods)
- 3) คลิก Next >> จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงการออกแบบกราวด์กริดใน รอบต่อไป กรณีที่ต้องการผลการออกแบบกราวด์กริดในรอบเดิมให้คลิก << Back เพื่อย้อนกลับ

4.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียว

4.2.1 ดินชนิดที่ 1

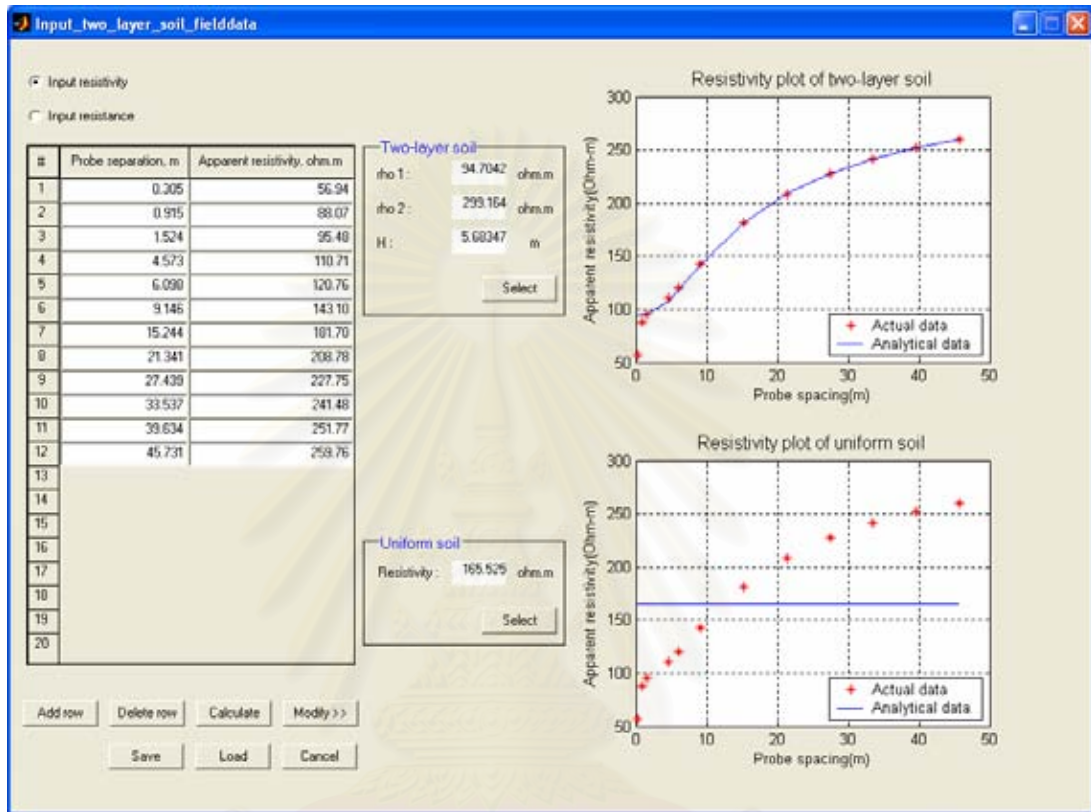
ดินชนิดนี้เป็นดินชนิดที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

จากภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นเดียวได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์กับค่าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างและความลึกของดินชั้นบนที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

การวิเคราะห์			ตามมาตรฐาน IEEE 80		
ความต้านทานจำเพาะ(Ω .m)		ความลึกดิน	ความต้านทานจำเพาะ(Ω .m)		ความลึกดิน
ดินชั้นบน	ดินชั้นล่าง	ชั้นบน (m)	ดินชั้นบน	ดินชั้นล่าง	ชั้นบน (m)
94.70	299.16	5.68	100	300	6.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นกับค่าตามมาตรฐาน IEEE 80 ของดินชนิดที่ 1

ทำการป้อนข้อมูลของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80 ที่ได้จากการวัดลงในโปรแกรมที่จะทำการคำนวณ แล้วทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลหาค่าพารามิเตอร์ของดินโดยใช้โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE80

4.2.2 ดินชนิดที่ 2

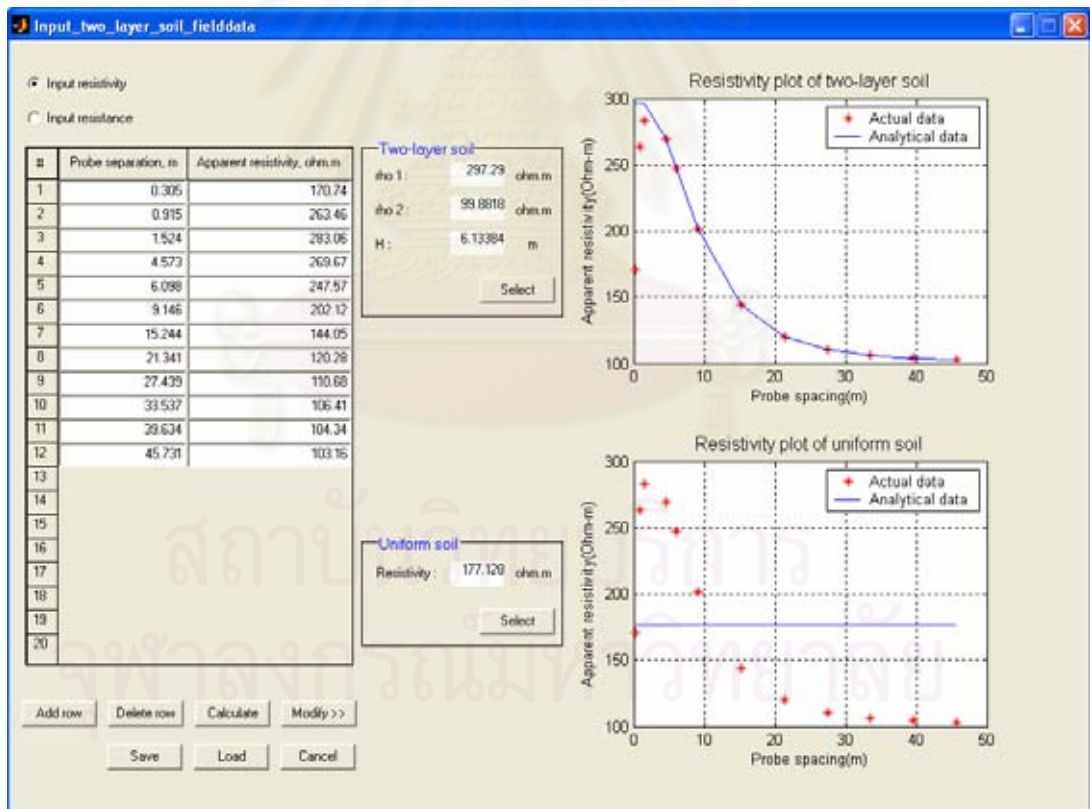
ดินชนิดนี้เป็นดินชนิดที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

จากภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นเดียวได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์กับค่าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างและความลึกของดินชั้นบนที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

การวิเคราะห์			ตามมาตรฐาน IEEE 80		
ความต้านทานจำเพาะ($\Omega \cdot m$)		ความลึกดิน	ความต้านทานจำเพาะ($\Omega \cdot m$)		ความลึกดิน
ดินชั้นบน	ดินชั้นล่าง	ชั้นบน (m)	ดินชั้นบน	ดินชั้นล่าง	ชั้นบน (m)
297.29	99.88	6.13	300	100	6.1

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น
กับค่าตามมาตรฐาน IEEE 80 ของดินชนิดที่ 2

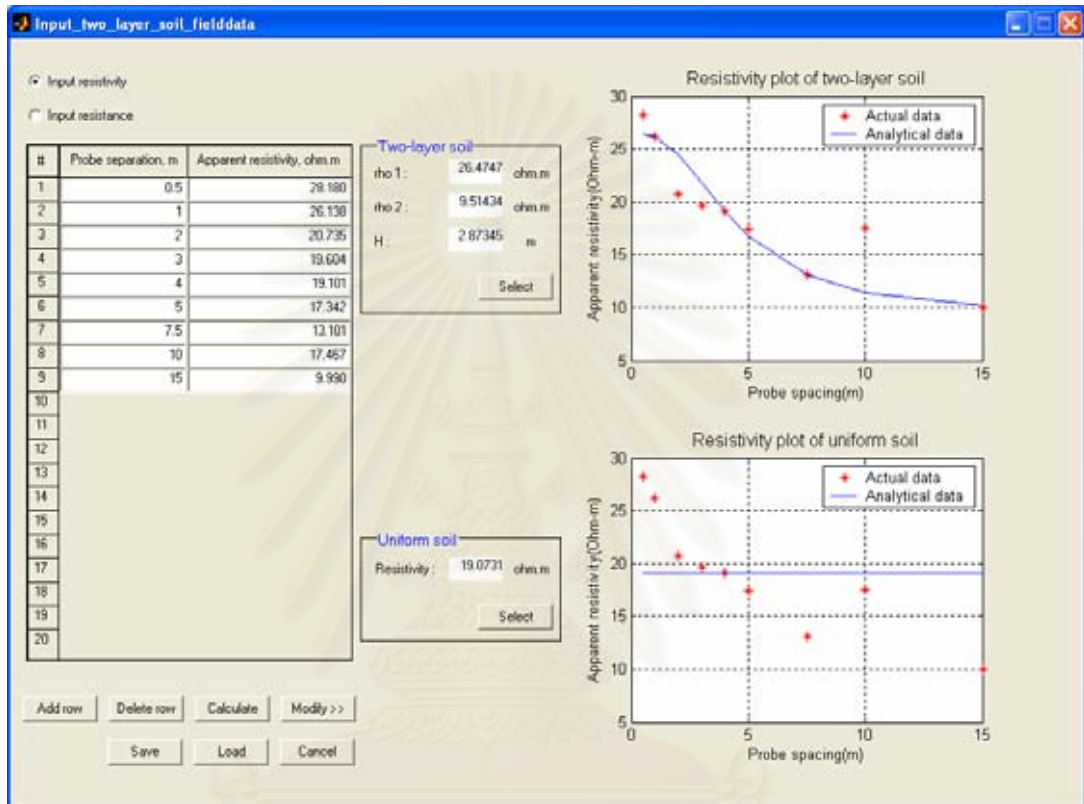
ทำการป้อนข้อมูลของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80 ที่ได้จากการวัดลงในโปรแกรม
ที่จะทำการคำนวณ แล้วทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลหาค่าพารามิเตอร์ของดินโดยใช้โปรแกรม
ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80

จากภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3 สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นและคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นเดียวได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ทำการป้อนข้อมูลของดินชนิดที่ 2 ที่ได้จากการวัดลงในโปรแกรมที่จะทำการคำนวณ แล้วทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลหาค่าพารามิเตอร์ของดินโดยใช้โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินชนิดที่ 2

จากผลที่ได้พบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณหรือวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีดินสองชั้นมีความถูกต้องและมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าแบบดินชั้นเดียว ค่าความลึกของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างที่วิเคราะห์ได้ด้วยวิธีดินสองชั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ดังนั้นในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามีความถูกต้อง

4.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียว

4.3.1 ดินชนิดที่ 1

จากภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ กำหนดให้กริดเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 70x70 m ฝังลึกลงไป 0.5 m ระยะห่างระหว่างตัวนำกริด 17.5 m และกริดเป็นแบบ Copper annealed soft-drawn มีอุณหภูมิรอบๆกริด 40 °C และอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้ 250 °C แท่งรากสายดินมีความยาว 7.5 m และมีรัศมี 0.0075 m กระแสผิดพลาดลงดิน 6.815 kA และช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด 0.5 s แฟลคเตอร์ส่วนลดและแฟลคเตอร์แบ่งกระแสมีค่าเท่ากับ 1 และ 0.5 ตามลำดับ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุขุดดินมีค่า 2500 Ω.m และมีความหนา 0.15 m และคนมีน้ำหนัก 70 kg

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้น							
ρ_1 (Ω.m)	ρ_2 (Ω.m)	h (m)	R_g (Ω)	E_m (V)	E_s (V)	E_{touch} (V)	E_{step} (V)
94.7	299.16	5.68	1.62	608.69	250.66	869.79	2813.05

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยดินชั้นเดียว					
ρ_{av} (Ω.m)	R_g (Ω)	E_m (V)	E_s (V)	E_{touch} (V)	E_{step} (V)
165.52	1.24	1063.88	438.11	875.23	2834.82

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยดินชั้นเดียวของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80 แสดงดังรูปที่ 4.8

Design

Field data

Grid type:

Soil type:

Resistivity 1: ohm.m H: m

Resistivity 2: ohm.m

Conductor size

Fault current, If: kA

Material:

Ambient temperature, Ta: Celsius

Fusing temperature, Tf: Celsius

Duration of fault, If: s

Touch & step criteria

Resistivity of surface layer: ohm.m

Surface layer thickness: m

Person weight: kg

Initial design

Depth of ground grid: m

Decrement factor, DI:

Split factor, SF:

Modify design

Length of ground rod at each location, Lr: m

Diameter of ground rods: m

Result

Total area enclosed by ground grid, A: m²

Conductor cross section: (m.m)²

E_{touch70}: E_{step70}: V

Maximum grid current, IG: A

Resistance of grounding system, Rg: ohm

Ground potential rise (GPR): V

E_m: E_s: V

Ground grid design

Maximum length in x direction: Width right side in x direction: m

Maximum length in y direction: Width upper side in y direction: m

Spacing between parallel conductors, D: m

รูปที่ 4.8 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น
ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวของดินชนิดที่ 1
ตามมาตรฐาน IEEE 80 แสดงดังรูปที่ 4.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.9 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว
ของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80

การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียวของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเมช E_m และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว E_s ของกราวด์กริดที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นมีค่าน้อยกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส E_{touch} และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว E_{step} ที่มนุษย์สามารถทนได้พบว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวยังไม่เกิดความปลอดภัยต้องทำการออกแบบเพิ่มทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่ม แต่การออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นในทางเศรษฐศาสตร์การออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้เกิดความประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80

4.3.2 ดินชนิดที่ 2

จากภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ กำหนดให้กริดเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ขนาด 70x70 m ฝั่งลึกลงไป 0.5 m ระยะห่างระหว่างตัวนำกริด 14 m และกริดเป็นแบบ Copper annealed soft-drawn มีอุณหภูมิรอบๆกริด 40 °C และอุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้ 250 °C แท่งรากสายดินมีความยาว 7.5 m และมีรัศมี 0.0075 m กระแสผิดพลาดลงดิน 6.815 kA และช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด 0.5 s แฟลคเตอร์ส่วนลดและแฟลคเตอร์แบ่งกระแสมีค่าเท่ากับ 1 และ 0.5 ตามลำดับ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุขุดดินมีค่า 2500 Ω.m และมีความหนา 0.15 m และคนมีน้ำหนัก 70 kg

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธีดินสองชั้น							
ρ_1 (Ω.m)	ρ_2 (Ω.m)	h (m)	R_g (Ω)	E_m (V)	E_S (V)	E_{touch} (V)	E_{step} (V)
297.29	99.88	6.13	1.02	1313.53	634.06	885.36	2875.33

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณด้วยดินชั้นเดียว					
ρ_{av} (Ω.m)	R_g (Ω)	E_m (V)	E_S (V)	E_{touch} (V)	E_{step} (V)
177.13	1.27	782.62	377.79	876.12	2838.39

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80 แสดงดังรูปที่ 4.10

Design

Field data

Grid type:

Soil type:

Resistivity 1: 297.29 ohm.m H: 6.13 m

Resistivity 2: 99.00 ohm.m

Conductor size

Fault current, I_f : 6.815 kA

Material:

Ambient temperature, T_a : 40 Celsius

Fusing temperature, T_m : 250 Celsius

Duration of fault, t_f : 0.5 s

Touch & step criteria

Resistivity of surface layer: 2500 ohm.m

Surface layer thickness: 0.75 m

Person weight: 70 kg

Initial design

Depth of ground grid: 0.5 m

Decrement factor, DF : 1

Split factor, SF : 0.5

Modify design

Length of ground rod at each location, L_r : 7.5 m

Diameter of ground rods: 0.015 m

Result

Total area enclosed by ground grid, A : 4900 m²

Conductor cross section: 35 [m.m]²

$E_{touch70}$: 885.356 E_{step70} : 2875.33 v

Maximum grid current, I_G : 3407.5 A

Resistance of grounding system, R_g : 1.0750 ohm

Ground potential rise (GPR): 2461.25 v

E_m : 1313.53 E_s : 534.054 v

Ground grid design

Maximum length in x direction: 70 m Width right side in x direction: 0 m

Maximum length in y direction: 70 m Width upper side in y direction: 0 m

Spacing between parallel conductors, D : 14 m

รูปที่ 4.10 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น
ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวของดินชนิดที่ 2
ตามมาตรฐาน IEEE 80 แสดงดังรูปที่ 4.11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design

Field data
 Grid type: Square grid
 Soil type: Uniform soil
 Resistivity: 177.13 ohm.m
 Calculate

Conductor size
 Fault current, I_f: Input fault current 6.875 kA
 Material: copper, annealed soft-drawn
 Ambient temperature, T_a: 40 Celsius
 Fusing temperature, T_m: 250 Celsius
 Duration of fault, t_f: 0.5 s
 Calculate

Touch & step criteria
 Resistivity of surface layer: 2500 ohm.m
 Surface layer thickness: 0.15 m
 Person weight: 70 kg
 Calculate

Initial design
 Depth of ground grid: 0.5 m
 Decrement factor, Df: Input decrement factor 1
 Split factor, Sf: Input split factor 0.5 Initial

Modify design
 Length of ground rod at each location, L_r: 7.5 m
 Diameter of ground rods: 0.015 m << Back Next >>

Result
 Total area enclosed by ground grid, A : 4900 m²
 Conductor cross section: 35 (m.m)²
 E_{touch}70: 876.121 E_{step}70: 2838.29 V
 Maximum grid current, I_G: 3407.5 A
 Resistance of grounding system, R_g: 1.2695 ohm
 Ground potential rise (GPR): 4325.04 V
 E_m: 782.619 E_s: 377.785 V

Ground grid design
 Maximum length in x direction: 70 Width right side in x direction: 0 m
 Maximum length in y direction: 70 Width upper side in y direction: 0 m
 Spacing between parallel conductors, D : 14 m

รูปที่ 4.11 การใช้โปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว
 ของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80

การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียวของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ E_m และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว E_s ของกราวด์กริดที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นมีค่ามากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส E_{touch} และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว E_{step} ที่มนุษย์สามารถทนได้พบว่ากราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นยังไม่เกิดความปลอดภัยต้องทำการออกแบบเพิ่มทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่ม แต่การออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวทำให้เกิดความปลอดภัย ดังนั้นการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นจะทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ไม่ทำให้เกิดความประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า

จากการออกแบบพบว่า การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดินสองชั้นจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากวิธีดินสองชั้นกับค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 และส่งผลให้การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ การคำนวณหาค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดจากสมการของ Schwarz การคำนวณหาค่ากระแสกริด และการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามืดมีความถูกต้อง และผลที่ได้จากการเปรียบเทียบการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียวแสดงได้ดังนี้

1) การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1 ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า และในทางเศรษฐศาสตร์ทำให้เกิดความประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นมีค่าน้อยกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว

2) การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2 ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ไม่ทำให้เกิดความประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดที่ได้จากการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นมีค่ามากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว

การออกแบบกราวด์กริดของดินชนิดที่ 1		การออกแบบกราวด์กริดของดินชนิดที่ 2	
วิธีดินสองชั้น	วิธีดินชั้นเดียว	วิธีดินสองชั้น	วิธีดินชั้นเดียว
ปลอดภัย	ปลอดภัยเพิ่มขึ้น	ปลอดภัยเพิ่มขึ้น	ปลอดภัย
ประหยัด	ฟุ่มเฟือย	ฟุ่มเฟือย	ประหยัด

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้นกับดินชั้นเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาค่าความลึกของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างด้วยวิธีดินสองชั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับค่าที่วัดได้อาจมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากผลของความไม่สม่ำเสมอของดิน เพื่อให้เกิดความถูกต้องมากขึ้นควรทำการเปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลที่วิเคราะห์ได้ด้วยวิธี steepest descent หรือโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของดินได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. IEEE Standard 80 - 2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. 2000.
2. ANSI/IEEE Std 81-1983 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. 1983.
3. J. Nahman, D. Salamoon. Analytical expressions for the resistance of rodbeds and of combined grounding systems in nonuniform soil. IEEE Transactions on Power Delivery vol. PWRD-1 no. 3 July 1986.:90 – 96.
4. J. Nahman, D. Salamoon. Analytical expressions for the resistance of grounding grids in nonuniform soil. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems vol. PAS-103 no. 4 April 1984:880 – 885.
5. Endrenyi, J. Analysis of transmission tower potentials during ground faults. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems vol. PAS-86 no. 10 Oct. 1967:1274 – 1283.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลคุณสมบัติและค่าคงที่ต่างๆของวัสดุตัวนำ

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C	Fusing temperature T_m (°C)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCAP thermal capacity [J/(cm ³ ·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
steel, 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติและค่าคงที่ต่างๆของวัสดุตัวนำ

ภาคผนวก ข

ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดิน จากมาตรฐาน IEEE 80-2000 และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้น

ข.1 ข้อมูลดินชนิดที่ 1

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดิน
จากมาตรฐาน IEEE 80-2000 และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1

ระยะห่างโพรบ (m)	ดินชนิดที่ 1		
	ความต้านทาน Ω	ความต้านทานจำเพาะดิน $\Omega \cdot m$	
		การวัด	การวิเคราะห์
0.305	29.73	56.94	94.71
0.915	15.33	88.07	94.87
1.524	9.97	95.48	95.42
4.573	3.85	110.71	107.78
6.098	3.15	120.76	118.59
9.146	2.49	143.10	142.18
15.244	1.90	181.70	181.69
21.341	1.56	208.78	208.88
27.439	1.32	227.75	227.84
33.537	1.15	241.48	241.54
39.634	1.01	251.77	251.74
45.731	0.09	259.76	259.52

ข.2 ข้อมูลดินชนิดที่ 2

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดิน จากมาตรฐาน IEEE 80-2000 และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2

ระยะห่างโพรบ (m)	ดินชนิดที่ 2		
	ความต้านทาน Ω	ความต้านทานจำเพาะดิน $\Omega \cdot m$	
		การวัด	การวิเคราะห์
0.305	89.13	170.74	297.28
0.915	45.85	263.46	296.95
1.524	29.55	283.06	295.78
4.573	9.39	269.67	269.67
6.098	6.46	247.57	247.29
9.146	3.52	202.12	202.04
15.244	1.50	144.05	144.15
21.341	0.90	120.28	120.34
27.439	0.64	110.68	110.71
33.537	0.51	106.41	106.42
39.634	0.42	104.34	104.25
45.731	0.36	103.16	103.02

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดิน
ที่ได้จากการวัดแบบสี่จุด และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2

ระยะห่างโพรบ (m)	ดินชนิดที่ 2		
	ความต้านทาน Ω	ความต้านทานจำเพาะดิน $\Omega \cdot m$	
		การวัด	การวิเคราะห์
0.5	8.97	28.180	26.429
1.0	4.16	26.138	26.141
2.0	1.65	20.735	24.472
3.0	1.04	19.604	21.832
4.0	0.76	19.101	19.100
5.0	0.552	17.342	16.762
7.5	0.278	13.101	13.049
10.0	0.278	17.467	11.353
15.0	0.106	9.990	10.189

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบกราวด์กริดด้วยวิธีดินสองชั้น

กำหนดให้ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบมีค่าดังนี้

ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพ่วง $t_f = 0.5$ s

อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ของระบบ $Z_1 = 4 + j10 \Omega$ (115 kV)

อิมพีแดนซ์ที่ศูนย์ของระบบ $Z_0 = 10 + j40 \Omega$ (115 kV)

กระแสแบ่งไหล $S_f = 0.5$

แฟคเตอร์ส่วนลด $D_f = 1$

ความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน $\rho_s = 2500 \Omega \cdot \text{m}$

ความหนาของวัสดุปูผิวดิน $h_s = 0.15$ m

ความลึกของกริด $h = 0.5$ m

อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง $Z_1 = Z_0 = 0.034 + j1.014 \Omega$ (13 kV)

ค.1 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่มีแท่งรากสายดิน (Square grid without ground rod)

ขั้นตอนที่ 1: สรรวจข้อมูลและพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

กำหนดให้กราวด์กริดของสถานีไฟฟ้ามีขนาด 70×70 m ดังนั้นกราวด์กริดมีขนาดพื้นที่ $A = 4900 \text{ m}^2$ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน $\rho_1 = 300 \Omega \cdot \text{m}$ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง $\rho_2 = 100 \Omega \cdot \text{m}$ และค่าความหนาของดินชั้นบน $h = 6$ m

ขั้นตอนที่ 2: หาขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำที่ต่อลงดินมีค่าขึ้นอยู่กับ ขนาดของกระแสผิดพ่วงที่ไหลผ่านตัวนำ ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพ่วงสามารถหาได้จากสมการ

$$I_f = 3I_0$$

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

เมื่อคิดแรงดันที่บัส 13 kV ค่าอิมพีแดนซ์ที่ 115 kV จะต้องมีการถ่ายโอนไปด้าน 13 kV ของหม้อแปลง ถ้าชนิดของหม้อแปลงเป็นแบบเดลต้า-วาย จะมีเฉพาะค่าในซีคอนซ์บวคของ 115 kV เท่านั้นที่มีการถ่ายโอน

$$\text{ดังนั้น } Z_1 = \left(\frac{13}{115}\right)^2 (4 + j10) + 0.034 + j1.014 = 0.085 + j1.142$$

$$Z_0 = 0.034 + j1.014$$

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

$$|3I_0| = 6815 \text{ A และค่าอัตราส่วน } X/R = 16.2$$

เมื่อทำการหาค่ากระแสผัดพร้อมแล้วจะสามารถหาขนาดสายตัวนำได้จากสมการ

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} = \frac{\pi d^2}{4}$$

กำหนดให้ใช้ตัวนำชนิด Copper annealed soft-drawn จากบทที่ 2 ตารางที่ 2.2 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง กำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถรับได้เท่ากับ 250°C และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบกรวดกรีตมีค่า 40°C ดังนั้นสามารถหาขนาดสายตัวนำได้ดังนี้

$$A_{mm^2} = \frac{6.815}{\sqrt{\left(\frac{3.42 \times 10^{-4}}{(0.5)(0.00393)(1.72)}\right) \ln\left(\frac{234 + 250}{234 + 40}\right)}} = 28.40 \text{ mm}^2$$

เนื่องจากขนาดที่ได้จากการคำนวณไม่มีในการใช้งาน ดังนั้นจะเลือกใช้สายขนาด 35 mm^2 และ $d = 0.0067 \text{ m}$

ขั้นตอนที่ 3: หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้

ค่าแฟคเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูผิวเดิน (reduction factor), C_s หาค่าได้ดังนี้

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

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{300}{2500} \right)}{2(0.15) + 0.09} = 0.80$$

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม หาค่าได้ดังนี้

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5(0.80)2500) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 885.56$$

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัม หาค่าได้ดังนี้

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{step70} = (1000 + 6(0.80)2500) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 2876.16$$

ขั้นตอนที่ 4: การออกแบบกรวดกริดเบื้องต้น

เมื่อทราบรูปร่างและขนาดพื้นที่ของกรวดกริดที่ใช้ในการออกแบบแล้ว ให้ทำการเริ่มต้นออกแบบโดยเริ่มจากเมฆเดี่ยวครอบคลุมทั้งพื้นที่ จะได้ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำขนานกัน $D = 70$ m ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน $L_C = 280$ m และ ความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดและรากสายดิน $L_T = 280$ m

ขั้นตอนที่ 5: การหาค่าความต้านทานของระบบกรวดกริด

จากรูปที่ 2.14, 3.5, 3.6 และ 3.7 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$K_1 = 1.37, K_p = 0.4381, K_r = 0.6253, N = 0.83 \text{ และ } a' = \sqrt{(0.0067/2)(2)(0.5)} = 0.0579, x = 1$$

ความต้านทานของระบบกราวด์กริดจะมีค่าเท่ากับความต้านทานของกราวด์กริด เนื่องจากระบบกราวด์กริดไม่มีแผงรากสายดิน แสดงได้ดังสมการ

$$R_g = R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left[K_r \left(\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + N - 1 \right) + K_p K_1 \left(\frac{L_c}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right) \right]$$

$$R_g = R_1 = \frac{300}{\pi(280)} \left[0.6253 \left(\ln \left(\frac{2(280)}{0.0579} \right) + 0.83 - 1 \right) + (0.4381)(1.37) \left(\frac{(280)}{\sqrt{4900}} - \frac{2(1+1)}{\sqrt{1}} \right) \right]$$

$$R_g = R_1 = 1.9214 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6: การหาค่ากระแสกริด

$$I_G = D_f S_f I_f$$

$$I_G = (1)(0.5)(6815) = 3407.6 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7: การตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริด (GPR) กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G R_g$$

$$GPR = (3407.6)(1.9214) = 6547.21 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทน จะเห็นว่าแรงดันที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (885.56 V) จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 8: การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริด

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

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

เมื่อ $K_{ii} = \frac{1}{(2n)^2}$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times 2)^2} = 0.25$$

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{70^2}{16(0.5)0.0067} + \frac{(70+2(0.5))^2}{8(70)0.0067} - \frac{0.5}{4(0.0067)} \right] + \frac{0.25}{1.2247} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2(2)-1)} \right] \right]$$

$$K_m = 1.8156$$

และ $K_i = 0.644 + 0.148n$

เมื่อ $n = n_a n_b n_c n_d$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

$$n_a = \frac{2(280)}{280} = 2$$

$n_b = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$n_c = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$n_d = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$$n = (2)(1)(1)(1) = 2$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(2) = 0.94$$

ดังนั้น
$$E_m = \frac{(300)(1.8156)(0.94)(3407.6)}{280} = 6230.9 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริด

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{0.75 L_C + 0.85 L_R}$$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{70+0.5} + \frac{1}{70} (1 - 0.5^{2-2}) \right] = 0.3228$$

ดังนั้น
$$E_s = \frac{(300)(0.3228)(0.94)(3407.6)}{0.75(280)} = 1477.18 \text{ V}$$

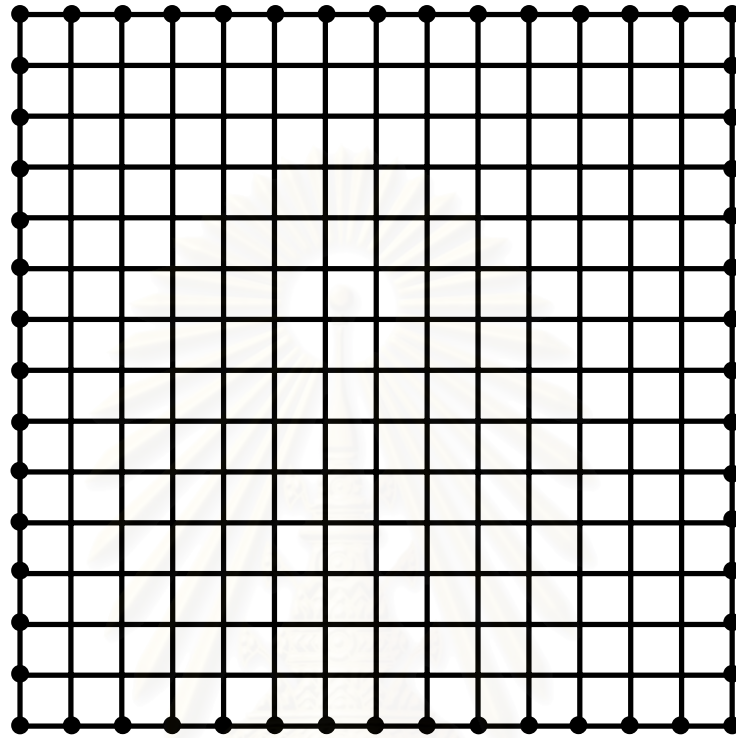
ขั้นตอนที่ 9: การตรวจสอบแรงดันเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

จะเห็นว่าแรงดันเมฆของกราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (885.56V) จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่

ค.2 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งกราสายดิน (Square grid with ground rod)

กำหนดให้กราวด์กริดของสถานีไฟฟ้ามีขนาด 70x70 m ดังนั้นกราวด์กริดมีขนาดพื้นที่ $A = 4900 \text{ m}^2$ แท่งกราสายดินมีความยาว $L_r = 7.5 \text{ m}$ และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.015 m ระยะห่างระหว่างตัวนำขนานกัน $D = 5 \text{ m}$ ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน $L_C = 2100 \text{ m}$ ความยาวรวม

ของแท่งรากสายดินทุกแห่ง $L_R = (56)(7.5) = 420 \text{ m}$ และ ความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดและรากสายดิน $L_T = 2100 + 420 = 2520 \text{ m}$ แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งรากสายดิน 56 แท่ง

ขั้นตอนที่ 5: การหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด

จากรูปที่ 2.14, 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$K_1 = 1.37, K_1(0) = 1.37, K_p = 0.4381, K_p' = 0.9575, K_r = 0.6253, N = 0.83 \text{ และค่า}$$

$$a' = 0.0579, b = (0.015/2) = 0.0075, x = 1$$

ค่าความต้านทานของกราวด์กริด

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_C} \left[K_r \left(\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + N - 1 \right) + K_p K_1 \left(\frac{L_C}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right) \right]$$

$$R_1 = \frac{300}{\pi(2100)} \left[0.6253 \left(\ln \left(\frac{2(2100)}{0.0579} \right) + 0.83 - 1 \right) + (0.4381)(1.37) \left(\frac{(2100)}{\sqrt{4900}} - \frac{2(1+1)}{\sqrt{1}} \right) \right]$$

$$R_1 = 1.0231 \Omega$$

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน เมื่อ $L_a = 2 + 5.5 \left(\frac{100}{300} \right) = 3.8333$, $L_r = 5.5 + 2 = 7.5$

$$\text{และ } \rho_a = 100 \left(\frac{7.5}{3.8333} \right) = 195.65$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_R L_r} \left(\ln \left(\frac{4L_a}{b} \right) - 1 \right) + \frac{\rho_2}{n_R \pi \sqrt{A}} K_1(0) K'_P (\sqrt{n_R} - 1)^2$$

$$R_2 = \frac{195.65}{2\pi(56)7.5} \left(\ln \left(\frac{4(3.8333)}{0.0075} \right) - 1 \right) + \frac{100}{56\pi\sqrt{4900}} (1.37)(0.9575)(\sqrt{56} - 1)^2 = 0.9388 \Omega$$

ค่าความต้านทานรวม เมื่อ $L_e = 5.5 + 2 \left(\frac{300}{100} \right) = 11.5$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_C} \left(\ln \left(\frac{2L_C}{L_e} \right) + N \right) + \frac{\rho_2}{\pi L_C} K_1(0) \left(\frac{L_C}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right)$$

$$R_m = \frac{195.65}{\pi(2100)} \left(\ln \left(\frac{2(2100)}{11.5} \right) + 0.83 \right) + \frac{100}{\pi(2100)} (1.37) \left(\frac{2100}{\sqrt{4900}} - \frac{2(1+1)}{\sqrt{1}} \right) = 0.7395 \Omega$$

$$\text{ดังนั้น } R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_g = \frac{1.0231(0.9388) - (0.7395)^2}{1.0231 + 0.9388 - 2(0.7395)} = 0.8565 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6: การหาค่ากระแสกริด

$$I_G = D_f S_f I_f$$

$$I_G = (1)(0.5)(6815) = 3407.6 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7: ตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริด (GPR) กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G R_g$$

$$GPR = (3407.6)(0.8565) = 2918.64 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทน จะเห็นว่าแรงดันที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (885.56 V) จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 8: การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริด

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

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

เมื่อ $K_{ii} = 1$ กราวด์กริดมีรากสายดิน

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{5^2}{16(0.5)0.0067} + \frac{(5+2(0.5))^2}{8(5)0.0067} - \frac{0.5}{4(0.0067)} \right] + \frac{1}{1.2247} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2(15)-1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.6977$$

และ $K_i = 0.644 + 0.148n$

เมื่อ $n = n_a n_b n_c n_d$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

$$n_a = \frac{2(2100)}{280} = 15$$

$n_b = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$n_c = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$n_d = 1$ สำหรับกริดแบบ square

$$n = (15)(1)(1)(1) = 15$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(15) = 2.864$$

ดังนั้น
$$E_m = \frac{(300)(0.6977)(2.864)(3407.6)}{2100 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] 420} = 732.24 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริด

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{0.75L_C + 0.85L_R}$$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{5+0.5} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{15-2}) \right] = 0.4398$$

$$\text{ดังนั้น } E_s = \frac{(300)(0.4398)(2.864)(3407.6)}{0.75(2100) + 0.85(420)} = 666.54 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 9: การตรวจสอบแรงดันเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

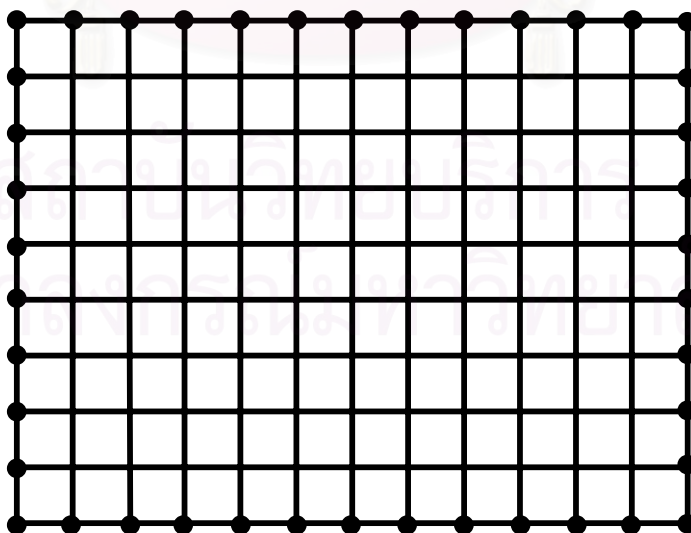
จะเห็นว่าแรงดันเมฆของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ (885.56 V) แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยแต่จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 10: การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำที่มนุษย์ทนได้

จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำที่มนุษย์ทนได้ (2876.16 V) แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้งานได้

ค.3 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแท่งรากสายดิน (Rectangular grid with ground rod)

กำหนดให้กราวด์กริดของสถานีไฟฟ้ามีขนาด 63x84 m ดังนั้นกราวด์กริดมีขนาดพื้นที่ $A=5292 \text{ m}^2$ แท่งรากสายดินมีความยาว $L_r=7.5 \text{ m}$ และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.015 m ระยะห่างระหว่างตัวนำขนานกัน $D=7 \text{ m}$ ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน $L_C=13 \times 63 + 10 \times 84$ $L_C=1659 \text{ m}$ ความยาวรวมของแท่งรากสายดินทุกแท่ง $L_R=(42)(7.5)=315 \text{ m}$ และ ความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดและรากสายดิน $L_T=1659 + 315=1974 \text{ m}$ แสดงดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 กราวด์กริดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแท่งรากสายดิน 42 แท่ง

ขั้นตอนที่ 5: การหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด

จากรูปที่ 2.14, 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$K_1 = 1.3567, K_1(0) = 1.3567, K_p = 0.4345, K'_p = 0.959, K_r = 0.6236, N = 0.8571 \text{ และค่า}$$

$$a' = 0.0579, b = (0.015/2) = 0.0075, x = 1.33$$

ค่าความต้านทานของกราวด์กริด

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left[K_r \left(\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + N - 1 \right) + K_p K_1 \left(\frac{L_c}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right) \right]$$

$$R_1 = \frac{300}{\pi(1659)} \left[0.6236 \left(\ln \left(\frac{2(1659)}{0.0579} \right) + 0.8571 - 1 \right) + (0.434)(1.3567) \left(\frac{1659}{\sqrt{5292}} - \frac{2(1.33+1)}{\sqrt{1.33}} \right) \right]$$

$$R_1 = 1.0249 \Omega$$

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน เมื่อ $L_a = 2 + 5.5 \left(\frac{100}{300} \right) = 3.8333, L_r = 5.5 + 2 = 7.5$

และ $\rho_a = 100 \left(\frac{7.5}{3.8333} \right) = 195.65$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_R L_r} \left(\ln \left(\frac{4L_a}{b} \right) - 1 \right) + \frac{\rho_2}{n_R \pi \sqrt{A}} K_1(0) K'_p (\sqrt{n_R} - 1)^2$$

$$R_2 = \frac{195.65}{2\pi(42)7.5} \left(\ln \left(\frac{4(3.8333)}{0.0075} \right) - 1 \right) + \frac{100}{42\pi\sqrt{5292}} (1.3567)(0.959)(\sqrt{42} - 1)^2 = 1.0618 \Omega$$

ค่าความต้านทานรวม เมื่อ $L_e = 5.5 + 2 \left(\frac{300}{100} \right) = 11.5$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_c} \left(\ln \left(\frac{2L_c}{L_e} \right) + N \right) + \frac{\rho_2}{\pi L_c} K_1(0) \left(\frac{L_c}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right)$$

$$R_m = \frac{195.65}{\pi(1659)} \left(\ln \left(\frac{2(1659)}{11.5} \right) + 0.8571 \right) + \frac{100}{\pi(1659)} (1.3567) \left(\frac{1659}{\sqrt{5292}} - \frac{2(1.33+1)}{\sqrt{1.33}} \right)$$

$$R_m = 0.7333 \Omega$$

ดังนั้น

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_g = \frac{1.0249(1.0618) - (0.7333)^2}{1.0249 + 1.0618 - 2(0.7333)} = 0.8878 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6: การหาค่ากระแสกริด

$$I_G = D_f S_f I_f$$

$$I_G = (1)(0.5)(6815) = 3407.6 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7: การตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริด (GPR) กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G R_g$$

$$GPR = (3407.6)(0.8878) = 3025.01 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทน จะเห็นว่าแรงดันที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (885.56 V) จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 8: การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริด

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

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

เมื่อ $K_{ii} = 1$ กราฟด์กริดมีรากสายดิน

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{7^2}{16(0.5)0.0067} + \frac{(7+2(0.5))^2}{8(7)0.0067} - \frac{0.5}{4(0.0067)} \right] + \frac{1}{1.2247} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2(11.35)-1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.8318$$

และ $K_i = 0.644 + 0.148n$

เมื่อ $n = n_a n_b n_c n_d$

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

$$n_a = \frac{2(1659)}{294} = 11.29$$

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

$$n_b = \sqrt{\frac{294}{4\sqrt{5292}}} = 1.005$$

$n_c = 1$ สำหรับกริดแบบ rectangular

$n_d = 1$ สำหรับกริดแบบ rectangular

$$n = (11.29)(1.0005)(1)(1) = 11.35$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(11.35) = 2.3229$$

ดังนั้น

$$E_m = \frac{(300)(0.8318)(2.3229)(3407.6)}{1659 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{7.5}{\sqrt{63^2 + 84^2}} \right) \right] 315} = 908.27 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวของกราวด์กริด

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{0.75 L_C + 0.85 L_R}$$

โดยที่

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11.35-2}) \right] = 0.4062$$

ดังนั้น

$$E_s = \frac{(300)(0.4062)(2.3229)(3407.6)}{0.75(1659) + 0.85(315)} = 637.88 \text{ V}$$

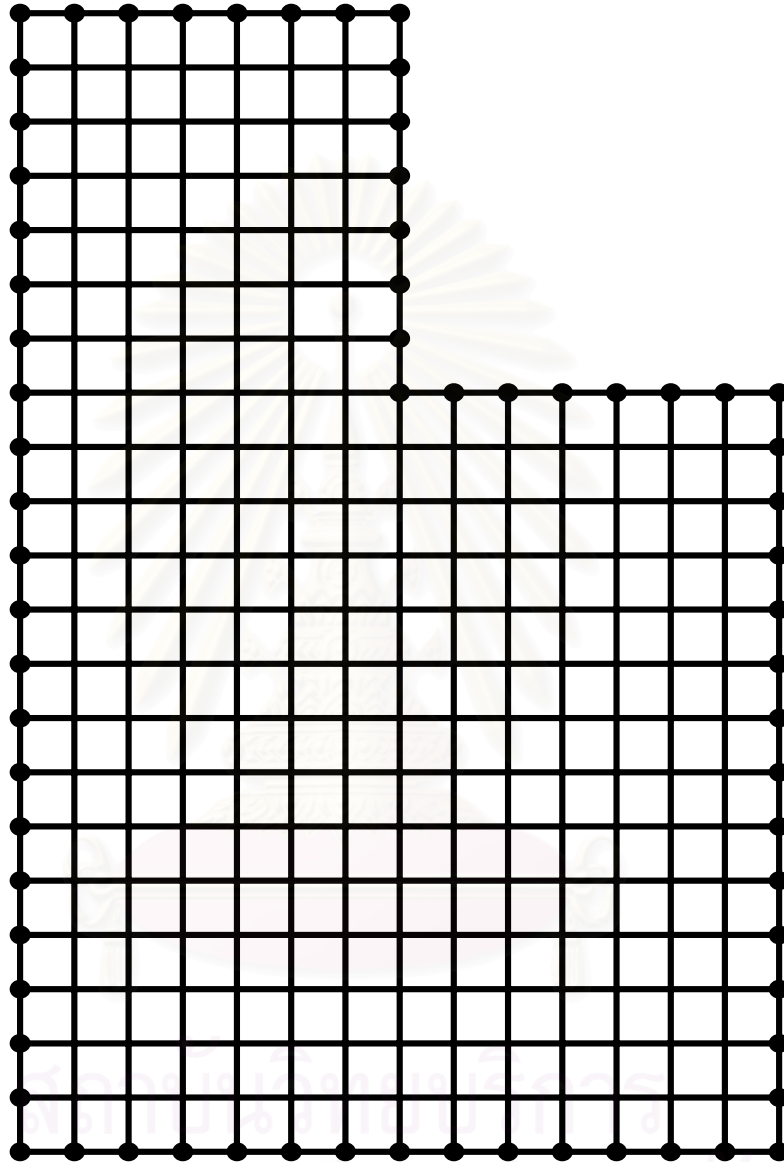
ขั้นตอนที่ 9: การตรวจสอบแรงดันเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

จะเห็นว่าแรงดันเมฆของกราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (885.56 V) จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงการออกแบบใหม่

ค.4 กราวด์กริดแบบรูปตัวแอลมีแท่งรากสายดิน (L-shaped grid with ground rod)

กำหนดให้กราวด์กริดมีขนาดพื้นที่ $A = 6125 \text{ m}^2$ แท่งรากสายดินมีความยาว $L_r = 7.5 \text{ m}$ และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.015 m ระยะห่างระหว่างตัวนำขนานกัน $D = 5 \text{ m}$ ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน $L_C = 7 \times 70 + 8 \times 105 + 7 \times 35 + 15 \times 70 = 2625 \text{ m}$ ความยาวรวมของแท่งรากสาย

ดินทุกแห่ง $L_R = (70)(7.5) = 525$ m และ ความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดและรากสายดิน
 $L_T = 2625 + 525 = 3150$ m แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 กราวด์กริดแบบรูปตัวแอลมีแท่งรากสายดิน 70 แท่ง

ขั้นตอนที่ 5: การหาค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด

จากรูปที่ 2.14, 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$K_1 = 1.35, K_1(0) = 1.35, K_p = 0.4280, K_p' = 0.9616, K_r = 0.6203, N = 0.8707 \text{ และค่า}$$

$$a' = 0.0579, b = (0.015/2) = 0.0075, x = 1.5$$

ค่าความต้านทานของกราวด์กริด

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_C} \left[K_r \left(\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + N - 1 \right) + K_p K_1 \left(\frac{L_C}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right) \right]$$

$$R_1 = \frac{300}{\pi(2625)} \left[0.6203 \left(\ln \left(\frac{2(2625)}{0.0579} \right) + 0.8707 - 1 \right) + (0.4280)(1.35) \left(\frac{2625}{\sqrt{6125}} - \frac{2(1.5+1)}{\sqrt{1.5}} \right) \right]$$

$$R_1 = 0.8739 \Omega$$

ค่าความต้านทานของแท่งรากสายดิน เมื่อ $L_a = 2 + 5.5 \left(\frac{100}{300} \right) = 3.8333$,

$$L_r = 5.5 + 2 = 7.5 \text{ และ } \rho_a = 100 \left(\frac{7.5}{3.8333} \right) = 195.65$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_R L_r} \left(\ln \left(\frac{4L_a}{b} \right) - 1 \right) + \frac{\rho_2}{n_R \pi \sqrt{A}} K_1(0) K'_p (\sqrt{n_R} - 1)^2$$

$$R_2 = \frac{195.65}{2\pi(70)7.5} \left(\ln \left(\frac{4(3.8333)}{0.0075} \right) - 1 \right) + \frac{100}{70\pi\sqrt{6125}} (1.35)(0.9616)(\sqrt{70} - 1)^2 = 0.8021 \Omega$$

ค่าความต้านทานรวม เมื่อ $L_e = 5.5 + 2 \left(\frac{300}{100} \right) = 11.5$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_C} \left(\ln \left(\frac{2L_C}{L_e} \right) + N \right) + \frac{\rho_2}{\pi L_C} K_1(0) \left(\frac{L_C}{\sqrt{A}} - \frac{2(x+1)}{\sqrt{x}} \right)$$

$$R_m = \frac{195.65}{\pi(2625)} \left(\ln \left(\frac{2(2625)}{11.5} \right) + 0.8707 \right) + \frac{100}{\pi(2625)} (1.35) \left(\frac{2625}{\sqrt{6125}} - \frac{2(1.5+1)}{\sqrt{1.5}} \right) = 0.6482 \Omega$$

ดังนั้น $R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$

$$R_g = \frac{0.8739(0.8021) - (0.6482)^2}{0.8739 + 0.8021 - 2(0.6482)} = 0.7397 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6: การหาค่ากระแสกริด

$$I_G = D_f S_f I_f$$

$$I_G = (1)(0.5)(6815) = 3407.6 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7: การตรวจสอบแรงดันที่กราวด์กริด (GPR) กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G R_g$$

$$GPR = (3407.6)(0.7397) = 2520.54 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบแรงดันที่กราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทน จะเห็นว่าแรงดันที่กราวด์กริดมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (885.56 V) จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริดกับแรงดันสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 8: การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเมฆของกราวด์กริด

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

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

เมื่อ $K_{ii} = 1$ กราวด์กริดมีรากสายดิน

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

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{5^2}{16(0.5)0.0067} + \frac{(5 + 2(0.5))^2}{8(5)0.0067} - \frac{0.5}{4(0.0067)} \right] + \frac{1}{1.2247} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2(17.64) - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.676$$

และ $K_i = 0.644 + 0.148n$

เมื่อ $n = n_a n_b n_c n_d$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

$$n_a = \frac{2(2625)}{350} = 15$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{350}{4\sqrt{6125}}} = 1.0574$$

$$n_c = \left[\frac{L_X L_Y}{A} \right]^{0.7A / L_X L_Y}$$

$$n_c = \left[\frac{105(70)}{6125} \right]^{0.7(6125) / 105(70)} = 1.1122$$

$n_d = 1$ สำหรับกริดแบบ L-shaped

$$n = (15)(1.0574)(1.1122)(1) = 17.64$$

$$K_i = 0.644 + 0.148(17.64) = 3.2548$$

ดังนั้น
$$E_m = \frac{(300)(0.676)(3.2548)(3407.6)}{2625 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{7.5}{\sqrt{105^2 + 70^2}} \right) \right] 525} = 646.92 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริด

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{0.75 L_C + 0.85 L_R}$$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{5+0.5} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{17.64-2}) \right] = 0.4398$$

ดังนั้น
$$E_s = \frac{(300)(0.4398)(3.2548)(3407.6)}{0.75(2625) + 0.85(525)} = 605.98 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 9: การตรวจสอบแรงดันเมชของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

จะเห็นว่าแรงดันเมชของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ (885.56 V) แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยแต่จะต้องทำการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์สามารถทนได้ต่อไป

ขั้นตอนที่ 10: การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดกับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์ทนได้

จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มนุษย์ทนได้ (2876.16 V) แสดงว่าการออกแบบนั้นมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้งานได้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรพัฒน์ นวอนุรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2546 เข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย