

การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาดินเป็นแบบชั้นเดียวและสองชั้น



นาย อภินันต์ สามพันธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

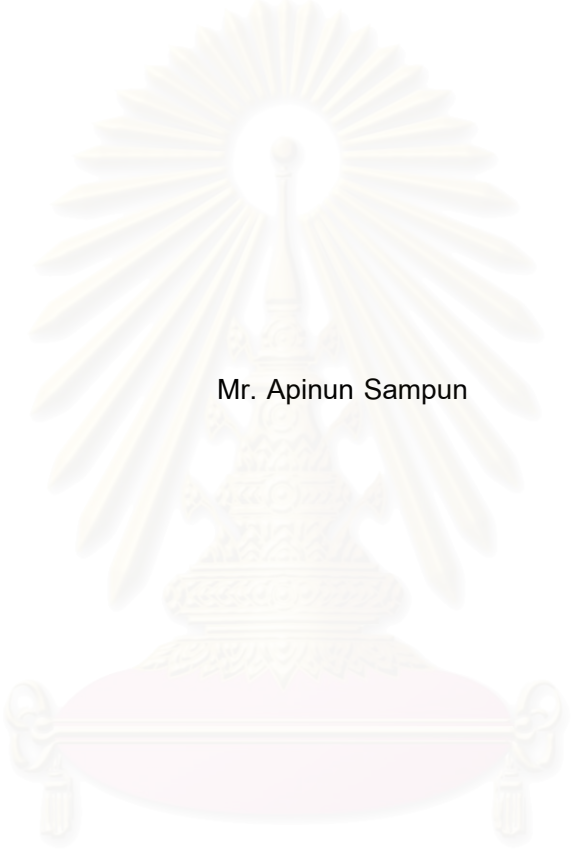
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF THE GROUNDING SYSTEM OF TRANSMISSION LINE TOWER
BY CONSIDERING EARTH AS ONE AND TWO LAYERS



Mr. Apinun Sampun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

อกินันต์ สามพันธ์ : การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาดินเป็นแบบชั้นเดียวและสองชั้น (ANALYSIS OF THE GROUNDING SYSTEM OF TRANSMISSION LINE TOWER BY CONSIDERING EARTH AS ONE AND TWO LAYERS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 84 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาดินเป็นแบบชั้นเดียวและสองชั้น ผลการศึกษาพบว่าระบบการต่อลงดินนั้นมีหลายรูปแบบขึ้นกับชนิดของดิน ตามภูมิประเทศต่างๆ

ในการศึกษาได้พัฒนาโปรแกรม เพื่อคำนวณค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นสำหรับการต่อลงดินแต่ละแบบ โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทาน ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเรียนรู้ และออกแบบระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี



สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
 สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
 ปีการศึกษา _____ 2550 _____

4770527721: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ONE LAYER / TWO LAYERS / TRANSMISSION LINE TOWER / GROUNDING SYSTEM

APINUN SAMPUN: ANALYSIS OF THE GROUNDING SYSTEM OF TRANSMISSION LINE TOWER BY CONSIDERING EARTH AS ONE AND TWO LAYERS. THESIS ADVISOR: KOMSON PETCHARAKS, Dr.Sc.Techn. 84 pp.

This thesis presents a study of transmission line tower grounding system by considering earth as one and two layers. It was found that there are many type of grounding system depend on soil characteristic.

A computer program is also developed in order to determine earth resistance. The program is able to adjust various parameters which effect the earth resistance. Therefore, this program is useful for learning and designing of transmission line tower grounding system.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature A. Sampun
Field of study Electrical Engineering Advisor's signature K. Petcharaks
Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.คมสัน เพ็ชร
รักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโดยท่านได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์
ต่อการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์
ไชยะ แซ่มซ้อย และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้
คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา และขอขอบคุณ
คุณไชยวัฒน์ อภินิวิทย์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดีทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์รวมทั้งทุกๆ
คนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	v
กิตติกรรมประกาศ.....	vi
สารบัญตาราง.....	x
สารบัญภาพ.....	xi
บทที่	
1. บทนำทั่วไป.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 สภาพปัญหาและแนวทางการแก้ไข	1
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	1
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์	2
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	2
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
2. ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า	4
2.1 จุดประสงค์ของการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า	6
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของดิน	6
2.2.1 ผลกระทบของชนิดของดิน	6
2.2.2 ผลของความชื้นและเกลือละลายในน้ำ	7
2.2.3 ผลของเกลือละลายในน้ำ	7
2.2.4 ผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน	7
2.2.5 ผลของอุณหภูมิและความดัน	7
2.3 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน	8
2.4 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน	9
2.4.1 ทองแดง	9
2.4.2 เหล็กชุบทองแดง	9
2.4.3 อลูมิเนียม	9
2.4.4 เหล็ก	9

บทที่

2.5 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	10
2.6 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์	11
2.6.1 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส	12
2.6.2 วงจรสมมูลของอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน	13
3. ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว.....	14
3.1 บทนำ	14
3.2 การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นเดียว	14
3.3 การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีดินชั้นเดียว	14
3.3.1 สมการพื้นฐาน	14
3.3.2 แผ่นกราวด์	18
3.3.3 ท่อหรือหลักดิน	18
3.3.4 ตัวนำฝังดิน	20
3.3.5 ตัวนำฝังแนวรัศมี	21
3.3.6 แบบวงแหวน	22
3.3.7 แบบหลักดินรวมกับตัวนำฝังดิน	23
3.4 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว	25
4. ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น.....	26
4.1 บทนำ	26
4.2 การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้น	26
4.3 การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีดินสองชั้น	28
4.3.1 หลักดินฝังในดินชั้นบน	28
4.3.2 หลักดินฝังในดินทั้งสองชั้น	33
4.3.3 แ่่งตัวนำฝังในดินชั้นบน	36
4.4 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น	38
5. ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า.....	39
5.1 บทนำ	39
5.2 กรณีไม่คิดผลการแตกตัวของดิน	39
5.2.1 แบบหลักดิน	39
5.2.2 แบบตัวนำฝังดิน	40
5.3 กรณีคิดผลการแตกตัวของดิน	40

บทที่

5.3.1	อิเล็กทรอนิกส์เครื่องทรงกลม	42
5.3.2	แท่งหลักดิน	44
5.4	การวิเคราะห์ผลกระทบจากกระแสฟ้าผ่า	45
6.	โปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า.....	46
6.1	บทนำ	46
6.2	ลักษณะของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า	46
6.2.1	ขอบเขตและเงื่อนไขของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน ของเสาส่งไฟฟ้า	46
6.2.2	ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน ของเสาส่งไฟฟ้า	47
7.	ผลการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า	53
7.1	วิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว	53
7.2	วิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น	64
7.3	วิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลกระทบ ของกระแสฟ้าผ่า	68
8.	สรุปและข้อเสนอแนะ	78
	รายการอ้างอิง	80
	ภาคผนวก.....	82
	ก.การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้น.....	83
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	7
2.2	ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นแท่งตัวนำไฟฟ้า	10
2.3	ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์	11
3.1	แสดงตัวอย่างค่า $N(n)$	22
7.1	เปรียบเทียบค่าความต้านทานกรณีรวมผลและไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่า ของหลักดิน	71
7.2	เปรียบเทียบค่าความต้านทานกรณีรวมผลและไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่า ของตัวนำ	73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและวงจรมูล 4	4
2.2 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและวงจรมูล 5	5
2.3 อิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม 5	5
2.4 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อความต้านทาน จำเพาะของดิน 8	8
2.5 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด 11	11
2.6 วงจรมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส 12	12
2.7 วงจรมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน 13	13
3.1 ตัวนำวางตามแกน x 15	15
3.2 ตัวนำหลักดิน n ตัวจัดวางเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D 16	16
3.3 การจัดวางตัวนำ n ตัวนำในระนาบตามแนวรัศมี 17	17
3.4 แผ่นกราวด์ 18	18
3.5 ความต้านทานหลักดินที่ความต้านทานจำเพาะ 100 ohms-meter 19	19
3.6 หลักดิน n หลักจัดวางเป็นแนวเส้นตรง 20	20
3.7 แสดงตัวนำที่ฝังเพียงครั้งเดียว 21	21
3.8 ตัวนำขนานสองตัวฝังลึก d 21	21
3.9 ตัวนำ n ตัวจัดวางตามแนวรัศมี 22	22
3.10 การจัดแบบวงแหวน 22	22
3.11 ความต้านทานของวงแหวนตัวนำ 23	23
3.12 การต่อร่วมกันระหว่างสายตัวนำกับหลักดิน 24	24
3.13 แผนผังการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินกรณีดินชั้นเดียว 25	25
4.1 พิจารณาค่าความต่างศักย์เมื่ออยู่บนดินสองชั้น 27	27
4.2 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด 28	28
4.3 หลักดินฝังในดินชั้นบน 29	29
4.4 หลักฝังดินและเงา 29	29
4.5 หลักฝังดินและเงาที่ n 30	30
4.6 การเพิ่มขึ้นของความต้านทานเนื่องจากชั้นล่างที่ความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 30	30

รูปที่	หน้า
4.7 การลดลงของความต้านทานเนื่องจากชั้นล่างที่ความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า	31
4.8 ค่าของฟังก์ชัน F สำหรับค่า k เป็นบวก	32
4.9 ค่าของฟังก์ชัน F สำหรับค่า k เป็นลบ	33
4.10 หลักดินฝังในดินทั้งสองชั้น	33
4.11 ค่า <i>Penetration factor</i>	34
4.12 ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น R_a กรณีค่า k เป็นบวก	35
4.13 ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น R_a กรณีค่า k เป็นลบ	36
4.14 แท่งตัวนำฝังในดินชั้นบน	36
4.15 ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้นล่างที่มีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า	37
4.16 ความต้านทานที่ลดลงเนื่องจากชั้นล่างที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า	37
4.17 แผนผังการวิเคราะห์กรณีดินสองชั้น	38
5.1 แบบจำลองหลักดินแนวตั้ง	39
5.2 แบบจำลองหลักดินแนวนอน	40
5.3 อิมพัลส์เบรกดาว์นของดินรอบหลักดิน	41
5.4 แบบจำลองอย่างง่ายของบริเวณแตกตัว	41
5.5 หลักดินหลายหลักแทนได้ด้วยครึ่งทรงกลม	42
5.6 อิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม	42
5.7 ความต้านทานอิมพัลส์ของครึ่งทรงกลม	43
5.8 ที่กระแสสูงหลักดินจะกลายเป็นครึ่งทรงกลม	44
5.9 Korsuntcev's similitude relationship ของความต้านทานอิมพัลส์ทั่วไป	44
5.10 แผนผังการวิเคราะห์ผลของกระแสฟ้าผ่า	45
6.1 วินโดว์แรกสู่การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า	47
6.2 แสดงรูปแบบย่อ	47
6.3 แสดงการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับดินชั้นเดียว	48
6.4 การแสดงผลสำหรับดินชั้นเดียว	48
6.5 รูปแบบการต่อลงดินสำหรับดินสองชั้น	49
6.6 แสดงการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับดินสองชั้น	49
6.7 การแสดงผลสำหรับดินสองชั้น	50

รูปที่	หน้า
6.8	รูปแบบการต่อลงดินกรณีฟ้าผ่า 51
6.9	แสดงการป้องกันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กรณีฟ้าผ่า 51
6.10	การแสดงผลกรณีฟ้าผ่า 52
7.1	ความต้านทานของ Ground Plate ที่ความลึกต่างๆ..... 54
7.2	ความต้านทานของ Ground Plate ที่รัศมีต่างๆ..... 54
7.3	ความต้านทานของ Ground Rod ที่รัศมีต่างๆ..... 55
7.4	ผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างหลักดิน..... 56
7.5	กรณีเปลี่ยนจำนวนหลักดิน..... 56
7.6	ผลการวิเคราะห์ของ Horizontal One Wire ที่รัศมีต่างๆ..... 57
7.7	ผลการวิเคราะห์ของ Horizontal One Wire ที่ความลึกต่างๆ 58
7.8	แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่รัศมีต่างกัน..... 59
7.9	แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความลึกต่างกัน..... 59
7.10	แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ระยะห่างตัวต่างกัน..... 60
7.11	กราฟแสดงผลของ radial wire ที่ 4 ตัวนำ..... 61
7.12	ผลการวิเคราะห์ของ radial wire ที่รัศมี 1 cm 61
7.13	แสดงกราฟของ Ring Ground รัศมี 2 cm..... 62
7.14	แสดงกราฟของ Ring Ground ที่ความลึก 2 m..... 62
7.15	เปรียบเทียบความต้านทานของ Compound Ground เมื่อจำนวนหลักดินต่างกัน..... 63
7.16	ความต้านทานกรณีความต้านทานจำเพาะชั้นล่างมากกว่าชั้นบน..... 64
7.17	ความต้านทานกรณีความต้านทานจำเพาะชั้นล่างน้อยกว่าชั้นบน..... 65
7.18	แสดงความต้านทานกรณีหลักดินฝังในดินทั้งสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะ ดินชั้นบนมากกว่าชั้นล่าง..... 65
7.19	แสดงความต้านทานกรณีหลักดินฝังในดินทั้งสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะ ดินชั้นบนน้อยกว่าชั้นล่าง..... 66
7.20	ความต้านทานของตัวนำในดินชั้นบนที่มีความต้านทานจำเพาะน้อยกว่าดินชั้นล่าง... 67
7.21	ความต้านทานของตัวนำในดินชั้นบนที่มีความต้านทานจำเพาะมากกว่า ดินชั้นล่าง..... 67

รูปที่	หน้า
7.22 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 400 Hz.....	69
7.23 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 100 kHz.....	69
7.24 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 200 kHz.....	70
7.25 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 1 MHz.	70
7.26 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 400 Hz	72
7.27 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 1 kHz	72
7.28 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 4 kHz.....	73
7.29 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 200$ kV/m.	74
7.30 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 400$ kV/m.....	75
7.31 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 600$ kV/m.....	75
7.32 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 300$ kV/m.....	76
7.33 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 400$ kV/m	77
7.34 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 500$ kV/m	77
ก-1 ดินสองชั้น	83

บทที่ 1

บทนำทั่วไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในการส่งพลังงานไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและการป้องกันที่ดี สำหรับสายส่งแบบซึ่งในอากาศนั้นฟ้าผ่าเป็นสาเหตุหลักสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาในการส่งพลังงาน[1] ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องมีเส้นทางให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว นอกจากนี้การต่อลงดินยังช่วยลดแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้ำวเมื่อมีคนอยู่ในบริเวณเสาส่งไฟฟ้าด้วย จึงต้องมีการออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสมเพื่อให้ความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าต่ำ ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงในกรณีที่ดินเป็นแบบชั้นเดียวและสองชั้นพร้อมทั้งพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่าด้วย[2-4] สุดท้ายจะพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ออกแบบ

1.2 สภาพปัญหาและแนวทางการแก้ไข

ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันจะทำการออกแบบโดยสมมติว่าดินมีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอตลอดความลึกของดินแต่ในความเป็นจริงแล้วค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามคุณสมบัติของชั้นดิน ซึ่งจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวอันเป็นเกณฑ์ด้านความปลอดภัยของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาเป็นดินชั้นเดียวและดินสองชั้น แล้วทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีรวมทั้งกรณีที่พิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่าด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์ผลของดินชั้นเดียวและดินสองชั้นที่มีต่อความต้านทานของระบบต่อลงดิน

1.3.2 ออกแบบและวิเคราะห์ระบบต่อลงดินในรูปแบบที่ต่างกันสำหรับดินชั้นเดียวและดินสองชั้น

1.3.3 ศึกษาผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าที่มีต่อความต้านทานของระบบต่อลงดิน

1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาระบบต่อลงดินสำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบต่างๆ เมื่อพิจารณาดินเป็นแบบชั้นเดียว

1.4.2 ศึกษาระบบต่อลงดินสำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบต่างๆ เมื่อพิจารณาดินเป็นแบบสองชั้น

1.4.3 ศึกษาผลของกระแสฟ้าผ่าที่มีต่อระบบต่อลงดิน

1.4.4 พัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดินสำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง

1.4.5 สรุปและประเมินผล

1.4.6 เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

เนื่องจากคุณสมบัติของดินจะแตกต่างกันไปตามภูมิประเทศและภูมิอากาศแต่เนื่องจากสภาพอากาศตลอดทั้งปีไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นคุณสมบัติของดินจึงขึ้นอยู่กับภูมิประเทศหรือชนิดของดินเป็นสำคัญ สำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้ระบบต่อลงดินสำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงจะแบ่งพิจารณาเป็นดินชั้นเดียวและดินสองชั้น ซึ่งมีสิ่งที่ต้องปฏิบัติคือ

1.5.1 หาความต้านทานของระบบต่อลงดินรูปแบบต่างๆ สำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงในกรณีดินชั้นเดียว

1.5.2 หาความต้านทานของระบบต่อลงดินรูปแบบต่างๆ สำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงในกรณีดินสองชั้น

1.5.3 กำหนดแบบจำลองและหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับผลจากกระแสฟ้าผ่า

1.5.4 สร้างโปรแกรมคำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดินแต่ละกรณี และในกรณีที่รวมผลของกระแสฟ้าผ่าด้วย

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ระบบการต่อลงดิน และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบการต่อลงดิน

บทที่ 3 กล่าวถึง การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว

บทที่ 4 กล่าวถึง การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น

บทที่ 5 กล่าวถึง ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า

บทที่ 6 กล่าวถึง ลักษณะ MATLAB และโปรแกรมวิเคราะห์ระบบต่อลงดินที่ได้พัฒนา

บทที่ 7 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้ทั้งสองกรณี และกรณีที่พิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า

บทที่ 8 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

จะได้ทราบถึงความต้านทานและผลที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าของระบบต่อลงดินในรูปแบบต่างๆ สำหรับเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง เมื่อพิจารณาดินเป็นระบบดินชั้นเดียวและดินสองชั้น เพื่อใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีความเหมาะสมตามสภาพของดิน



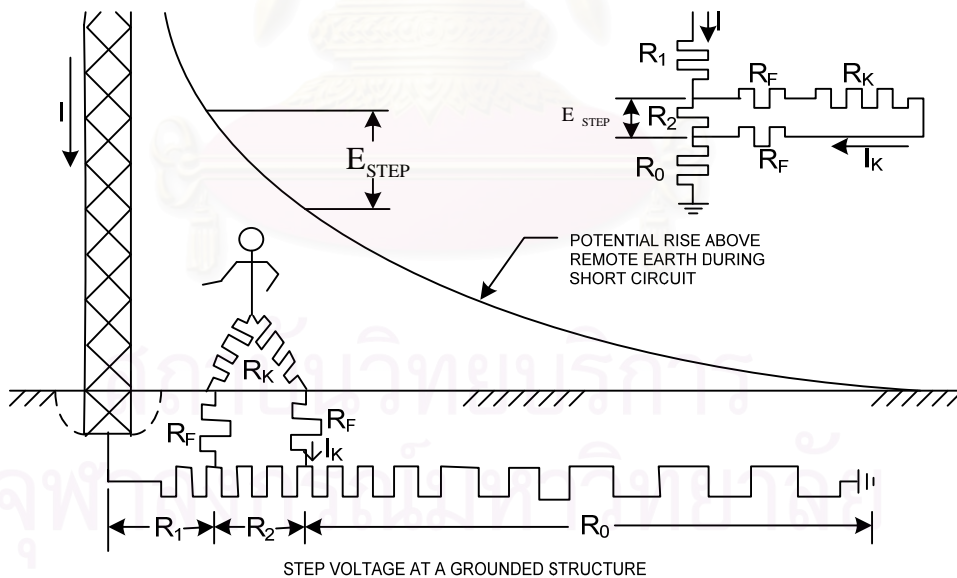
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

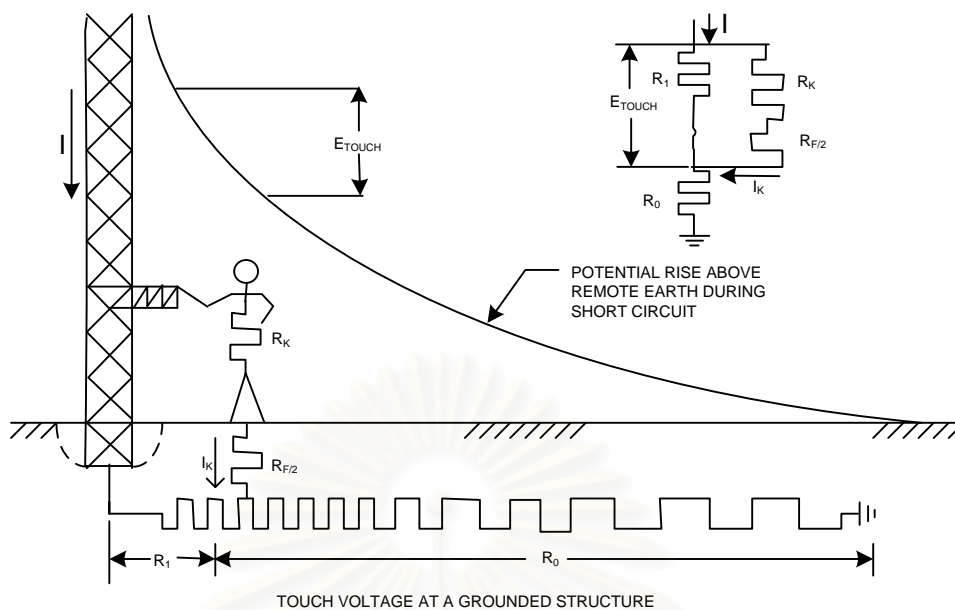
ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

การต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อความปลอดภัยของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสหรืออยู่ใกล้กับเสาส่งไฟฟ้า ที่จะได้รับผลจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรลงดินซึ่งจะทำให้เกิดเกรเดียนท์ของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradient) สูงที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้จะเป็นทางผ่านให้อุปกรณ์กับดักฟ้าผ่าและอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินคายประจุลงดิน

โดยปกติกระแสฟ้าผ่าจะมีค่าสูง ในการออกแบบระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าจึงต้องให้มีค่าความต้านทานต่ำพอ เพื่อให้กระแสฟ้าผ่าไหลผ่านได้อย่างรวดเร็วซึ่งไม่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงจนเป็นอันตรายต่อมนุษย์ แรงดันไฟฟ้านี้เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนผิวดิน (Ground Potential Rise) และแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ได้รับโดยตรงประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) รูปที่ 2.1 และแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) รูปที่ 2.2 เพื่อลดอันตรายจากศักดาไฟฟ้าทั้งสอง จึงต้องมีการควบคุมหรือแก้ไขไม่ให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเกินกว่าที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เป็นอันตราย



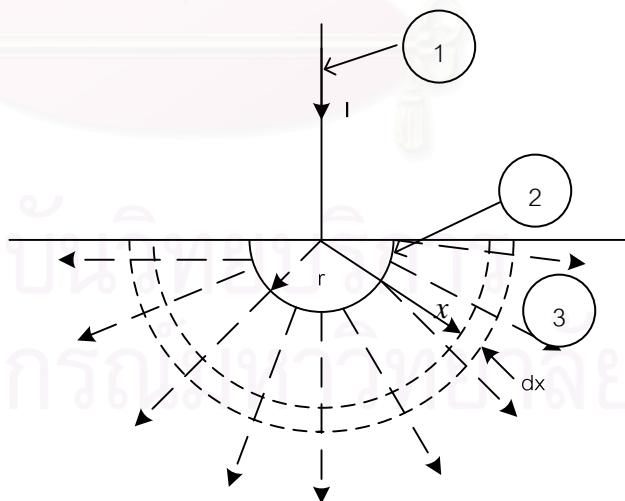
รูปที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและวงจรมุมูล



รูปที่ 2.2 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและวงจรมุมมูล

ความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าพิจารณาแบบง่าย ๆ ดังรูปที่ 2.3 ความต้านทานรวมทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน [5] คือ

1. ความต้านทานของตัวนำที่ต่อระหว่างหลักดินกับเสาไฟฟ้า
2. ความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างหลักดินกับดิน
3. ความต้านทานของดินรอบๆ หลักดิน



รูปที่ 2.3 อิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม

ความต้านทานตัวนำเป็นความต้านทานปกติของตัวนำสามารถแยกพิจารณาได้ ส่วนความต้านทานผิวสัมผัสมีค่าน้อยสามารถละเลยได้ ดังนั้นความต้านทานส่วนใหญ่จะเป็นความต้านทานของดินรอบหลักดิน

2.1 จุดประสงค์ของการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

การต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ามีจุดประสงค์หลัก 2 อย่างคือ

1. เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าให้สามารถไหลลงดินได้สะดวก ทั้งในภาวะที่เกิดกระแสผิดปกติปริมาณสูงเนื่องจากฟ้าผ่า หรือการลัดวงจรในระบบให้สามารถไหลลงดินได้โดยไม่สร้างผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในระบบไฟฟ้า
2. เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้ผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ในบริเวณเสาส่งไฟฟ้าได้รับอันตรายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลลงสู่ดิน

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของดิน

ดินและหินส่วนมากเมื่อแห้งสนิทจะไม่นำไฟฟ้า ยกเว้นมีลิ่มแร่ปนอยู่จึงจะนำไฟฟ้า เพราะมีโลหะปนอยู่ อย่างไรก็ตามทั้งทราย ดินร่วน และหินเองสามารถพิจารณาได้ว่าไม่นำไฟฟ้า เพราะมีความต้านทานจำเพาะสูง แต่เมื่อมีน้ำเป็นองค์ประกอบความต้านทานจำเพาะลดลงต้องพิจารณาว่าเป็นตัวนำ แม้ว่ามันจะเป็นตัวนำที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับโลหะ ความต้านทานจำเพาะของดินจะถูกกำหนดด้วยปริมาณน้ำในดินและความต้านทานจำเพาะของน้ำเอง หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการนำผ่านดินคือการนำผ่านน้ำที่อยู่ในดิน

ปัจจัยหลักที่กำหนดความต้านทานจำเพาะของดินคือ[5]

1. ชนิดของดิน
2. องค์ประกอบทางเคมีของเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำ
3. ความเข้มข้นของเกลือละลายในน้ำ
4. ความชื้น
5. อุณหภูมิ
6. ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน
7. ความแน่นของดิน

2.2.1 ผลกระทบของชนิดของดิน

ชนิดของดินเป็นส่วนที่สำคัญมากในการกำหนดความต้านทานจำเพาะของดิน แต่มันเป็นการยากที่จะกำหนดชนิดของดินได้อย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าจะเป็นดินชนิดเดียวกันที่อยู่ต่างที่กันก็มีคุณสมบัติที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินบางชนิด [5]

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega - m$)
Loams, garden soil, etc.	50 – 500
Clays	80 – 500
Clay, sand and gravel mixtures	400 – 2,500
Sand and gravel	600 – 1,000
Slates, shale, sandstone, etc.	100 – 5,000
Crystalline rocks	2,000 – 100,000

ตารางที่ 2.1 เป็นการรวบรวมค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดหลายๆ แหล่ง ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณที่ยอมรับได้เท่านั้น

2.2.2 ผลของความชื้นและเกลือละลายในน้ำ

เพราะว่าการนำกระแสเกิดจาก อิเล็กโทรไลต์เป็นหลักขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำและเกลือละลายเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดค่าความต้านทานจำเพาะ ปริมาณของน้ำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพอากาศ ช่วงเวลาของปี ธรรมชาติของดินและความลึกของดิน เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความต้านทานจะลดลงดังกราฟที่ 2 ของรูปที่ 2.4

2.2.3 ผลของเกลือละลายในน้ำ

เนื่องจากปริมาณน้ำในดินเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดค่าความต้านทาน ซึ่งในน้ำเองจะมีเกลือละลายเป็นตัวกำหนดความต้านทานของน้ำเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของน้ำลดลงดังกราฟที่ 1 ของรูปที่ 2.4

2.2.4 ผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน

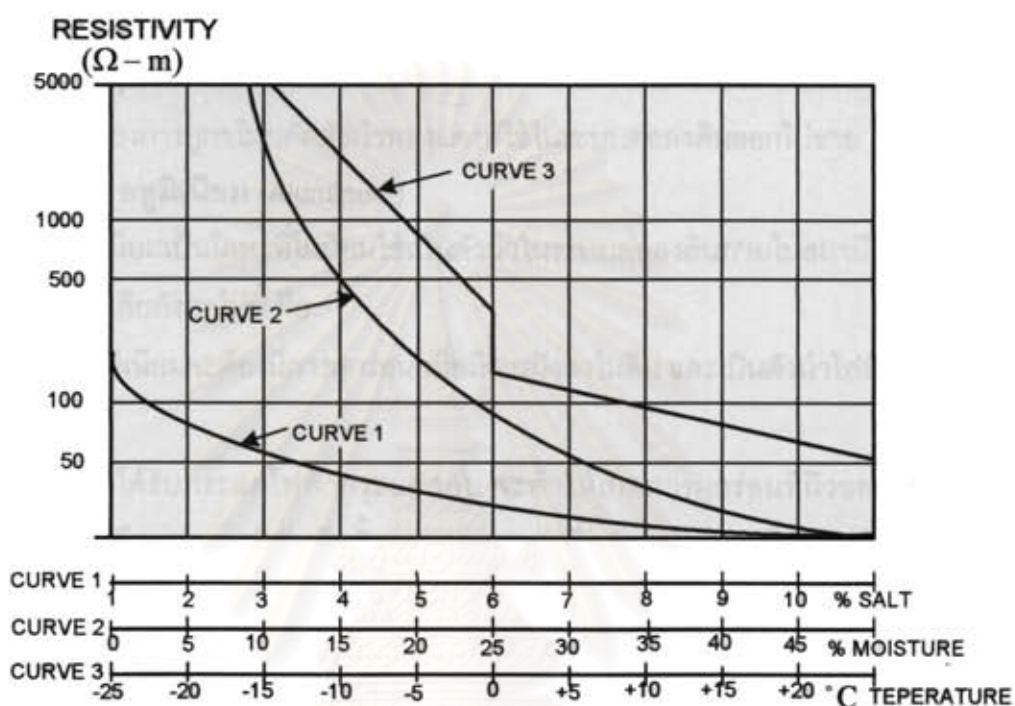
อนุภาคของดินจะมีขนาดต่างๆ และเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความต้านทาน ขนาดและการกระจายตัวมีผลกับการเก็บความชื้น ซึ่งความชื้นจะสร้างแรงดึงดูดที่จุดสัมผัสของอนุภาค ถ้าอนุภาคสามารถเก็บความชื้นได้มากความต้านทานจะต่ำ

2.2.5 ผลของอุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิของดินนั้นอาจไม่ต้องนำมาพิจารณาถ้าอุณหภูมิของดินมีค่าสูงกว่า $0^{\circ}C$ แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า $0^{\circ}C$ น้ำภายในดินจะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ค่าความต้านทานภายในดินเพิ่มขึ้นรวดเร็วมากดังกราฟที่ 3 ของรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทาน

จำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 12.5% ของน้ำหนักดิน ทำนองเดียวกันในทางปฏิบัติผลจากความต้านสามารถละลายได้

จะเห็นได้ว่าความต้านทานจำเพาะของดินมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ดังนั้นถ้าต้องการรู้ค่า ณ ตำแหน่งใดควรใช้วิธีการวัดที่ตำแหน่งนั้นๆ



รูปที่ 2.4 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อความต้านทานจำเพาะของดิน [6]

2.3 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน [6, 7]

ตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนั้น จะต้องมียุทธสมบัติดังต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) สูงเพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้า
2. สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการหลอมละลาย เนื่องจากจะต้องทนกระแสไฟฟ้าปริมาณมากที่ไหลผ่านในช่วงเวลาสั้นๆ
3. มีความแข็งแรงทางกลสามารถทนต่อการผูกมัดได้
4. สามารถใช้งานได้ปกติเมื่อได้มีการผูกมัดที่ผิวของวัสดุและอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

2.4 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน [6]

2.4.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี และไม่มีปัญหาในเรื่องของการผุกร่อนเพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบ (Cathodic) เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

2.4.2 เหล็กชุบทองแดง (Copper-Clad Steel)

เหล็กชุบทองแดงนั้น นิยมใช้เป็นแท่งหลักดิน (Ground rod) และเป็นตะแกรงต่อลงดิน เพื่อทำการหลีกเลี่ยงการถูกขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินออกไปขาย

2.4.3 อลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมนิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบธรรมดา เนื่องจากมีข้อเสียดังต่อไปนี้ คือ

1. อลูมิเนียมจะต้องมีการผุกร่อน เมื่อมีการฝังลงในดิน และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีได้เมื่อเกิดการผุกร่อน

2. เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้เกิดการผุกร่อนที่ผิวของอลูมิเนียม ทั้งนี้เพราะว่าอลูมิเนียมประพฤติตัวเป็นขั้วบวก (anodic) เมื่อเทียบกับโลหะอื่นฝังอยู่ในบริเวณเดียวกัน โดยส่วนมากแล้วอลูมิเนียมจะใช้เป็นเปลือกหุ้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS (Gas insulated Substation)

2.4.4 เหล็ก (Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน และใช้เป็นแท่งหลักดิน แต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องทำการแก้ปัญหาเรื่องการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวของเหล็ก หรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็ก เพื่อให้ประพฤติตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดินในระบบต่อลงดิน ถึงแม้จะทำการเลือกใช้ทองแดง หรือเหล็กชุบทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน เพื่อแก้ปัญหาการเกิดการผุกร่อนที่ผิวดำนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน แต่ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากการผุกร่อนของโลหะผสมที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ฝังในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดิน เพราะว่าทองแดง และ เหล็กนั้นจะประพฤติตัวเหมือน Galvanize Cell โดยมีดินทำหน้าที่เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า โดยที่เหล็กจะประพฤติเหมือนขั้วบวก และทองแดงจะประพฤติตัวเหมือนขั้วลบ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาการผุกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินได้ดังนี้

1. ทำการเคลือบผิววัสดุที่ประพฤติตัวเป็นขั้วบวก เมื่อฝังลงในดินโดยการพันเทปพลาสติก หรือใช้ Asphalt ผสมเคลือบที่ผิวของวัสดุ

2. การกำหนดวางแนวท่อในบริเวณที่มีการฝังระบบต่อลงดินนั้น จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีการเคลือบผิวโลหะ เพื่อป้องกันการผุกร่อน

3. ใช้คุณสมบัติของขั้วลวด ในการป้องกันการผุกร่อน หรือ ควบคุมการเสไฟฟ้าในระบบ
4. หลีกเลี่ยงการใช้ท่อเหล็ก โดยเลือกใช้ท่อพลาสติกแทน

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นแท่งตัวนำไฟฟ้า [9, 11]

Material	Conductivity(%)	T_m (°C)
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250
Copper-clad steel wire	40.0	1084
Copper-clad steel wire	30.0	1084
Copper-clad steel rod	20.0	1084
Aluminum EC Grade	61.0	657
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654
Aluminum-clad steel wire	20.3	657
Steel 1020	10.8	1510
Stainless clad steel rod	9.8	1400
Zinc-coated steel rod	8.6	419
Stainless steel 304	2.4	1400

หมายเหตุ: T_m คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำสามารถทนได้

2.5 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

จากปัจจัยต่างๆ ภายในดินเป็นผลให้ความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละแห่งแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินแต่ละครั้งจึงจำเป็นต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินทุกๆ ครั้ง การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และให้ผลที่ถูกต้องอีกทั้งยังสะดวกเนื่องจากไม่ต้องใช้แท่งดินยาวมากในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินคือ [6] การวัดแบบ 4 จุด

การวัดแบบนี้เป็นการหาความต้านทานจำเพาะของดิน โดยการวัดค่ากระแส และแรงดัน โดยปักแท่งดิน 4 แท่ง โดยระยะห่างมีทั้งที่เท่ากันและไม่เท่ากัน แต่วิธีที่นิยมคือ กำหนดระยะห่าง

ระหว่างแท่งดินเท่ากัน ซึ่งเป็นวิธีของเวนเนอร์ (Wenner's Four-Pin Method) ดังรูปที่ 2.5 และสามารถคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

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

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

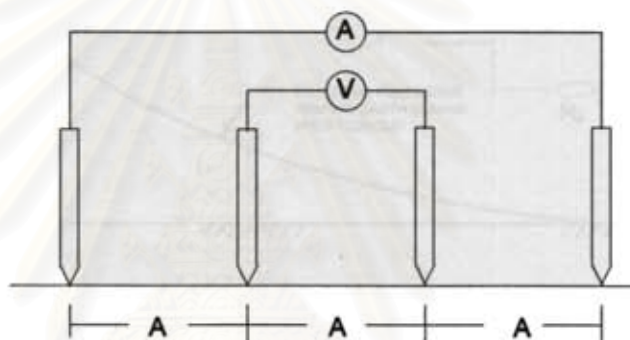
R คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ (Ω)

A คือ ระยะห่างระหว่างแท่งดินข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (m)

B คือ ความลึกของแท่งดินจากผิวดิน (m)

ในกรณีที่ $B \ll A$ เราจะได้ว่า

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



รูปที่ 2.5 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด

2.6 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์

เนื่องจากโอกาสที่มนุษย์ จะได้รับอันตรายจากระบบเสาส่งไฟฟ้ามี 2 สาเหตุคือ จากการสัมผัสโครงสร้างโลหะของเสาส่งที่มีการต่อลงดิน (Touch Voltage) ซึ่งจะมีกระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์จากมือสู่เท้า และจากการอยู่ในบริเวณหรือใกล้กับเสาส่งไฟฟ้า (Step Voltage) ซึ่งจะมีกระแสไหลจากเท้าสู่เท้า ดังนั้นความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำไปพิจารณาถึงขีดจำกัดของกระแสหรือแรงดันที่มนุษย์สามารถทนได้ดังตารางที่ 2.3 [9] แต่โดยทั่วไปค่าความต้านทานเฉลี่ยของร่างกายมนุษย์มีค่าประมาณ 1,000 Ω

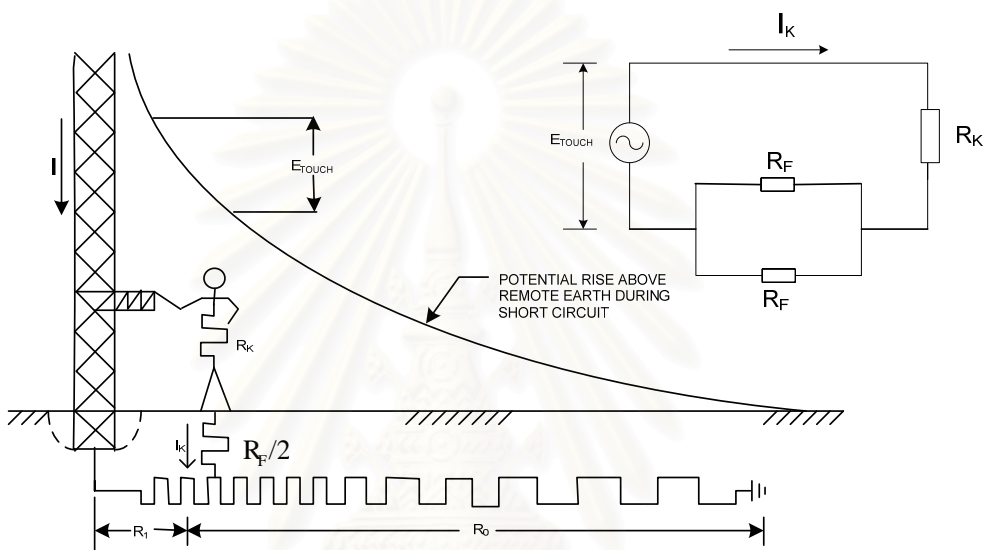
ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทานของอวัยวะต่างๆ ของมนุษย์

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

การพิจารณาค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยจำลองอันตรายที่เกิดขึ้นจริงกับมนุษย์ เป็นวงจรสมมูลของการเกิดอันตราย ซึ่งสามารถจำลองได้สองแบบ ตามสาเหตุของการเกิดอันตราย ดังนี้ [6, 9]

2.6.1 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

เมื่อมนุษย์สัมผัสโครงสร้างโลหะของเสาส่งที่ต่อลงดินผ่านระบบกราวด์ของเสาส่งในขณะที่เกิดฟ้าผ่าหรือเกิดการผิดปกติของเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากมือสู่เท้า โดยแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการสัมผัส

สามารถคำนวณค่าความต้านทานระหว่างมือกับเท้าได้ดังนี้

$$R_T = R_K + \frac{1}{2} R_F \tag{2.3}$$

โดยที่ R_T คือ ความต้านทานรวมระหว่างมือกับเท้า (Ω)

R_K คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Ω)

R_F คือ ความต้านทานระหว่างเท้าข้างหนึ่งกับดิน (Ω)

เราสามารถแทนเท้าทั้งสองด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี b วางอยู่บนพื้นดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ เพราะฉะนั้น

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \tag{2.4}$$

ขนาดเท้าโดยเฉลี่ยของมนุษย์สามารถแทนได้ด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี 0.083 m และห่างกัน 1 เมตร ดังนั้นสมการ (2.3) สามารถเขียนได้เป็น

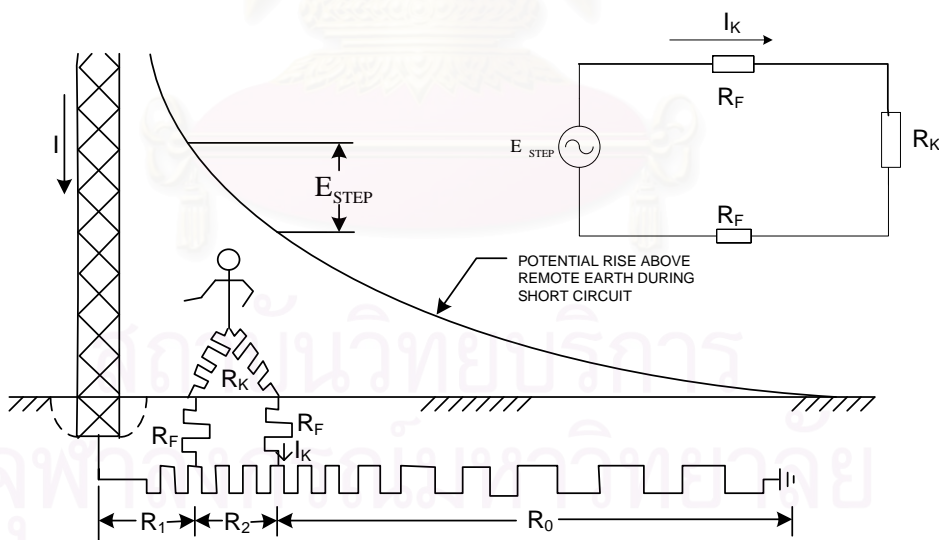
$$R_T = R_B + 1.5\rho \tag{2.5}$$

2.6.2 วงจรสมมูลของอันตรายเนื่องจากการก้าวเดิน

เป็นการจำลองการไหลของกระแสจากเท้าข้างหนึ่งผ่านร่างกายไปสู่เท้าอีกข้างหนึ่ง ดังนั้นวงจรสมมูลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และสามารถคำนวณค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับเท้าได้ดังนี้

$$R_S = R_K + 2R_F \tag{2.6}$$

- โดยที่ R_S คือ ความต้านทานรวมระหว่างเท้าสองข้าง (Ω)
- R_K คือ ความต้านทานรวมของขาสองข้าง (Ω)
- R_F คือ ความต้านทานระหว่างเท้าข้างหนึ่งกับดิน (Ω)



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของการเกิดอันตรายเนื่องจากการก้าวเดินจากเงื่อนไขเดียวกันกับวงจรสัมผัส ดังนั้นสมการ 2.6 สามารถเขียนได้เป็น

$$R_S = R_B + 6\rho \tag{2.7}$$

บทที่ 3

ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว

3.1 บทนำ

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าอาจมีวัตถุประสงค์หลายอย่างขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจร การต่อลงดินเพื่อป้องกันศักย์เกินระหว่างวงโครงสร้างโลหะกับดินขณะเกิดความผิดปกติหรือช่วงทำงานปกติ เพื่อให้มีพีแอนด์ความผิดปกติและให้อุปกรณ์กำจัดความผิดปกติที่ทนทานที่ แล้ว ยังนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินเพื่อจำกัดแรงดันฟ้าผ่าบนสายส่งหรือสายโทรศัพท์

ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าในปัจจุบัน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่บนสมมติฐานว่าเป็นดินเนื้อเดียว (Uniform soil) ในบทนี้จะกล่าวถึง การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นเดียว การคำนวณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินกรณีดินชั้นเดียว [5, 10] โดยใช้ทฤษฎี Average Potential Method, Current Image และ Duality Concept ตอนท้ายจะอธิบายแผนผังการวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินกรณีดินชั้นเดียว

3.2 การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นเดียว

เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานที่ระยะห่างระหว่างหลักดินระยะต่างๆ จากภาคสนามจะสามารถพิจารณาเป็นค่าความต้านทานจำเพาะได้จากสมการ (2.1) โดยค่าความต้านทานจำเพาะเมื่อพิจารณาเป็นดินชั้นเดียวจะเฉลี่ยค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้จากระยะต่างๆ ดังสมการ

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

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

ρ_j คือ ค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากระยะต่างๆ

n คือ จำนวนระยะที่วัด (โดยทั่วไปวัดประมาณ 5-6 ระยะ)

3.3 การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีดินชั้นเดียว (Homogenous Soil)

3.3.1 สมการพื้นฐาน

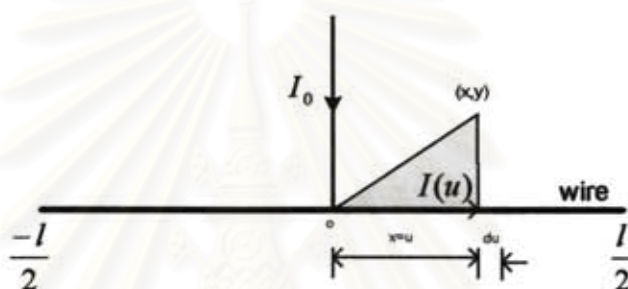
การติดตั้งระบบกราวด์โดยปกติจะใช้สายหรือตัวนำทรงกระบอกยาว ความต้านทานของตัวนำทรงกระบอกแนวนอนหรือแนวตั้งที่อยู่ใกล้ผิวดินอาจหาได้ด้วยวิธีง่ายๆ จากความต้านทานของทรงกระบอกที่อยู่ในตัวกลางที่ขยายออกไปทุกทิศทางระยะอนันต์ เมื่อรู้ความต้านทานร่วม

ระหว่างตัวนำสองตัวใดๆ สามารถที่จะหาความต้านทานของกราวด์แบบแนวนอนหรือแนวตั้ง กรณีที่มีตัวนำหลายตัวได้

สมมติว่าตัวนำวางตามแกน x ระหว่าง $x = -l/2$ และ $x = l/2$ แล้วให้กระแส I_0 เข้าที่จุดกลางและให้กระแสบนตัวนำที่ระยะ $x = u$ คือ $I(u)$ ศักย์ในตัวกลางรอบๆ ตัวนำที่จุด x, y เนื่องจากกระแสในตัวนำ du ที่ $x = u$ ดังรูปที่ 3.1 คือ

$$dV(x, y) = \frac{dI(u)}{du} \frac{\rho}{4\pi} [(x-u)^2 + y^2]^{-1/2} du \quad (3.2)$$

เมื่อเทอมที่คูณอยู่กับ $\frac{dI(u)}{du} du$ เป็นความต้านทานร่วม (mutual resistance) ระหว่างจุดสองจุดในตัวกลาง



รูปที่ 3.1 ตัวนำวางตามแกน x

สมมติว่าศักย์เนื่องจากกระแสในส่วนตัวนำ du เสมือนว่าเป็นแหล่งกำเนิดจุด (Point Source) ที่แกนตัวนำ จะได้ศักย์เนื่องจากกระแสรั่วไหลตามผิวตัวนำทั้งหมดคือ

$$V(x, y) = \frac{\rho}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} [(x-u)^2 + y^2]^{-1/2} \frac{dI(u)}{du} du \quad (3.3)$$

ถ้าไม่คิดความต้านทานของตัวนำ จะได้เงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับที่ผิวของตัวนำ $y = a$ (a = รัศมีของตัวนำ) คือ

$$dV(x, a)/dx = 0 \quad (3.4)$$

ดังนั้นกระแสที่กระจายตามตัวนำต้องสอดคล้องกับ

$$0 = \frac{d}{dx} \int_{-l/2}^{l/2} [(x-u)^2 + a^2]^{-1/2} \frac{dI(u)}{du} du \quad (3.5)$$

สมมติว่ากระแสรั่วไหลที่ผิวของตัวนำคงที่ $dI(u)/du = 2I(0)/l$ ตามตัวนำ จากสมการที่ (3.3) จะได้

$$V(x, y) = \frac{2I(0)\rho}{4\pi l} \ln \alpha(x, y) \quad (3.6)$$

$$\alpha(x, y) = \frac{\sqrt{(x+l/2)^2 + y^2} + (x+l/2)}{\sqrt{(x-l/2)^2 + y^2} + (x-l/2)} \quad (3.7)$$

เมื่อความยาวของตัวนำมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางมากๆ จะได้ศักย์ที่จุดกลางและจุดปลายของตัวนำ (เมื่อ $y = a$ และ $[(l/2)^2 + a^2]^{1/2} - l/2 \cong a^2/l$) คือ

$$V(0, a) = \frac{2I(0)\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{a} \quad (3.8)$$

$$V(l/2, a) = \frac{2I(0)\rho}{4\pi l} \ln \frac{2l}{a}$$

เมื่อศักย์เฉลี่ยที่หาจากสมการ (3.6) ระหว่าง $x = 0$ และ $x = l/2$ หาด้วย $2I(0)$ ซึ่งจะได้สมการสำหรับความต้านทานของตัวนำในตัวกลางคือ

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{l}{a} (1 + \sqrt{1 + (a/l)^2}) \right] + \frac{a}{l} - \sqrt{1 + (a/l)^2} \right) \quad (3.9)$$

เมื่อ $l \gg a$ จะได้

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{a} - 1 \right] \cong \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{0.74l}{a} \quad (3.10)$$

ให้ $R_1(a)$ แทนความต้านทานของตัวนำที่กำหนดโดยสมการที่ (3.9) ความต้านทานร่วม (mutual resistance) $R_1(a_{12})$ ระหว่างตัวนำขนานสองตัวมีความยาวเท่ากัน สามารถหาได้โดยการแทน a ด้วยระยะห่างระหว่างตัวนำ a_{12} ในสมการที่ (3.9)

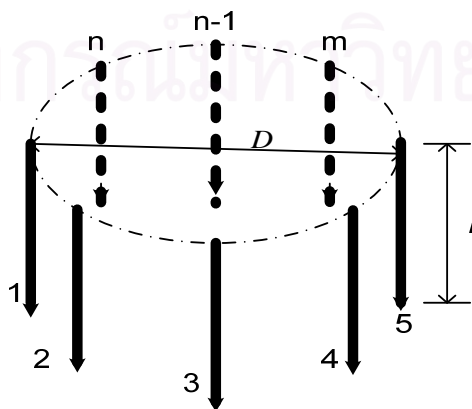
นอกจากนี้ความต้านทานร่วมของตัวนำสองตัวที่เริ่มจากจุดเดียวกันแต่ทำมุมระหว่างกันเท่ากับ θ (จำเป็นสำหรับหาความต้านทานของหลายตัวนำที่เริ่มจากจุดเดียวกัน) โดยการใช่วิธีศักย์เฉลี่ยความต้านทานร่วมหาได้โดยการอินทิเกรตศักย์จากสมการที่ (3.6) ตามเส้นตรง $y = kx = x \sin \theta$ โดย x เริ่มจากปลายด้านหนึ่งแทนจุดตรงกลางซึ่งจะได้ความต้านทานร่วมคือ

$$R_0(\theta) = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{1 + \sin \theta / 2}{\sin \theta / 2} \quad (3.11)$$

$\theta =$ มุมระหว่างตัวนำ

กรณีตัวนำหลักดิน n ตัวยาวเท่ากันจัดวางเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งทุกตัวนำมีกระแสไหลเท่ากัน เมื่อรวมผลของความต้านทานร่วมทั้งหมด จะได้ความต้านทานรวมคือ

$$R_n = \frac{1}{n} \left[R_1(a) + \sum_{m=1}^{n-1} R_1(D \sin m\pi/n) \right] \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.2 ตัวนำหลักดิน n ตัวจัดวางเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D

เมื่อ $R_1(a)$ และ $R_1(D \sin m\pi/n)$ มาจากสมการที่ (3.9) โดยที่ $a_{1m} = D \sin m\pi/n$ เป็นระยะระหว่างตัวนำที่ 1 และตัวนำที่ m ตัวอย่างเช่น

$$R_2 = \frac{1}{2}[R_1(a) + R_1(D)]$$

$$R_3 = \frac{1}{3}[R_1(a) + 2R_1(D \sin \pi/3)]$$

$$R_4 = \frac{1}{4}[R_1(a) + 2R_1(D \sin \pi/4) + R_1(D)]$$

$$R_5 = \frac{1}{5}[R_1(a) + 2R_1(D \sin \pi/5) + 2R_1(D \sin 2\pi/5)]$$

$$R_6 = \frac{1}{6}[R_1(a) + 2R_1(D \sin \pi/6) + 2R_1(D \sin 2\pi/3) + R_1(D)]$$

เมื่อมี n ตัวนำยาวเท่ากันวางในแนวรัศมีบนระนาบเดียวกันจากจุดรวม ระหว่างตัวนำที่ติดกันทำมุมกัน $\theta = 2\pi/n$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งทั้งหมดนำกระแสเท่ากัน จะได้ความต้านทานรวมเท่ากับ

$$R_n = \frac{1}{n} \left[R_1(a) + \sum_{m=1}^{n-1} R_0(2\pi m/n) \right] \quad (3.13)$$

เมื่อ R_0 คือความต้านทานร่วมระหว่างตัวนำที่ 1 และตัวนำที่ m ซึ่งทำมุมกัน $\theta = 2\pi m/n$ ดังนั้น

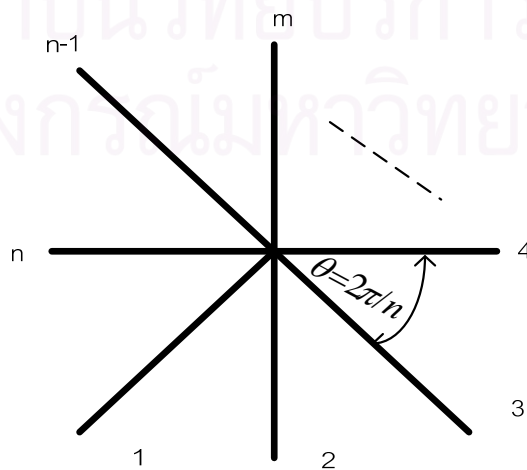
$$R_2 = \frac{1}{2}[R_1(a) + R_0(\pi)]$$

$$R_3 = \frac{1}{3}[R_1(a) + 2R_0(2\pi/3)]$$

$$R_4 = \frac{1}{4}[R_1(a) + 2R_0(\pi/2) + R_0(\pi)]$$

$$R_5 = \frac{1}{5}[R_1(a) + 2R_0(2\pi/5) + 2R_0(4\pi/5)]$$

$$R_6 = \frac{1}{6}[R_1(a) + 2R_0(\pi/3) + 2R_0(2\pi/3) + R_0(\pi)]$$



รูปที่ 3.3 การจัดวางตัวนำ n ตัวนำในระนาบตามแนวรัศมี

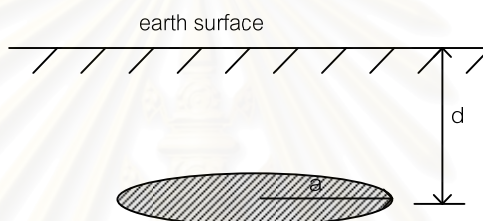
3.3.2 แผ่นกราวด์ (Plate grounds)

ในบางครั้งเพื่อให้ได้ความต้านทานต่ำพอจะใช้ตาข่ายตัวนำ ถ้าช่องตาข่ายไม่ใหญ่เกินไป ความต้านทานเทียบกับดินในทางปฏิบัติเหมือนกับของแผ่นทึบ เมื่อฝังแผ่นกราวด์ที่มีความลึก d ซึ่งมากกว่ารัศมี (a) ของแผ่นกราวด์ดังรูปที่ 3.4 ระยะประสิทธิผลถึงเงาของมันคือ $2d$ จะได้ความต้านทานเป็น

$$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{8\pi d} \quad (3.14)$$

ถ้า $d \ll a$ แล้ว

$$R = \frac{\rho}{4a} \left[1 - \frac{4d}{\pi a} \right] \quad (3.15)$$



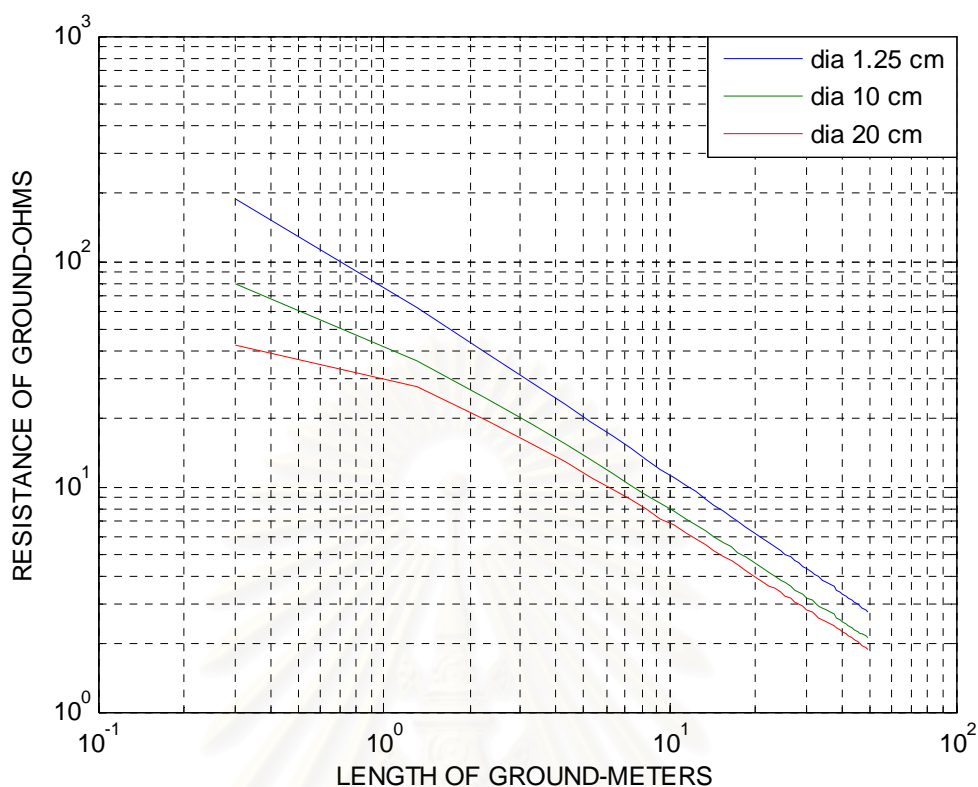
รูปที่ 3.4 แผ่นกราวด์

3.3.3 ท่อหรือหลักดิน (Vertical ground rods or pipes)

แบบกราวด์ที่นิยมสร้างประกอบด้วยหลักดินหนึ่งหลักหรือหลายหลักเชื่อมต่อกันด้วยสายเปลือยซึ่งตัวมันเองก็เป็นกราวด์ที่ดีแต่จะไม่รวมเข้าไปในการคำนวณ เมื่อหลักดินยาว l ดังนั้นความต้านทาน[10] คือ

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left[\frac{2l}{a} (1 + \sqrt{1 + (a/2l)^2}) \right] + \frac{a}{2l} - \sqrt{1 + (a/2l)^2} \right) \quad (3.16)$$

$$\cong \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right), \text{ เมื่อ } l \gg a \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.5 ความต้านทานหลักดินที่ความต้านทานจำเพาะ 100 ohms-meter

ความต้านทานของท่อหรือหลักดินที่ความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางค่าต่างๆ จากสูตรข้างบนแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 สำหรับ $\rho=100$ ohms-meter

สำหรับกรณีที่มีหลักดิน n หลักดินจัดวางเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง D เมื่อระยะห่างระหว่างหลักดินที่อยู่ติดกันเท่ากับหรือมากกว่าความยาวหลักดิน จากสมการ (3.12) จะได้ความต้านทานรวม คือ

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{l}{D} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\sin m\pi/n} \right] \quad (3.18)$$

เมื่อ $D \sin \pi m/n$ เป็นระยะระหว่างตัวนำที่ 1 และตัวนำที่ m ซึ่งทำมุมกัน $2\pi m/n$ เช่น

$$R_2 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{l}{D} \right]$$

$$R_3 = \frac{1}{3} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{2l}{D \sin \pi/3} \right]$$

$$R_4 = \frac{1}{4} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{2l}{D \sin \pi/4} + \frac{l}{D} \right]$$

$$R_5 = \frac{1}{5} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{2l}{D \sin \pi/5} + \frac{2l}{D \sin 2\pi/5} \right]$$

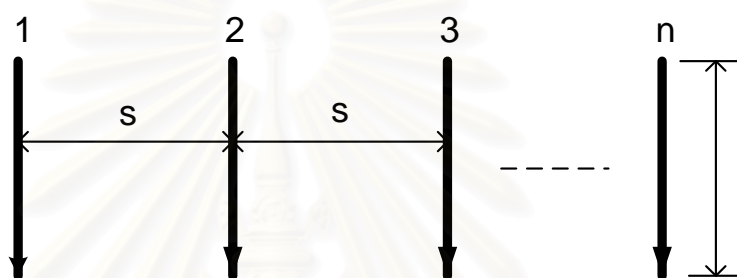
$$R_6 = \frac{1}{6} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{a} - 1 + \frac{2l}{D \sin \pi/6} + \frac{2l}{D \sin 2\pi/3} + \frac{l}{D} \right]$$

สำหรับการจัดวางหลักดิน n หลักเป็นแนวเส้นตรงโดยระยะห่างระหว่างหลักดินสองหลักดินที่อยู่ติดกันเท่ากับ s ดังรูปที่ 3.6 กระแสที่ไหลผ่านหลักดินจะไม่เท่ากันทุกหลักจะได้รับความต้านทานรวมคือ

$$R_n = \frac{1}{n} \left(R_1(a) + \frac{2}{n} [(n-1)R_1(s) + (n-2)R_1(2s) + \dots + R_1(ns-s)] \right) \quad (3.19)$$

เมื่อ $s \geq l$, ดังนั้น $R_1(ms) \cong \rho / 2\pi ms$ จะได้

$$R_n = \frac{1}{n} \left(R_1(a) + \frac{\rho}{\pi s} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right) \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.6 หลักดิน n หลักจัดวางเป็นแนวเส้นตรง

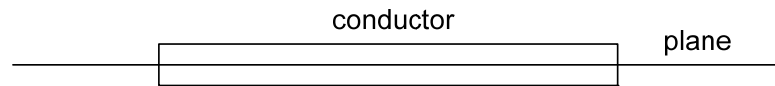
3.3.4 ตัวนำฝังดิน (Horizontal wire)

ในบางกรณีเมื่อต้องการความต้านทานของดินต่ำๆ จึงต้องใช้การฝังตัวนำในดิน เพื่อที่จะหาความต้านทานของการติดตั้งรูปแบบนี้ให้พิจารณากระแสน้ำที่ผ่านแกนของตัวนำจากตอนที่ 3.2.1 ดังรูปที่ 3.7 เมื่อเอากระแสและตัวนำบนระนาบด้านหนึ่งออกจะไม่มีผลกับศักย์ไฟฟ้าเพราะกระแสทั้งหมดในตัวนำคือ $I(0)$ ไม่ใช่ $2I(0)$ ความต้านทานของตัวนำยาว l ที่ผิวของดินจะเป็นสองเท่าของสมการที่(3.9) หรือเท่ากับ

$$\begin{aligned} R_1(a) &= \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \left[\frac{l}{a} (1 + \sqrt{1 + (a/l)^2}) \right] + \frac{a}{l} - \sqrt{1 + (a/l)^2} \right) \\ &\cong \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \frac{2l}{a} - 1 \right], \text{ เมื่อ } l \gg a \end{aligned} \quad (3.21)$$

สมการข้างบนเป็นการสมมุติว่าตัวนำถูกฝังเพียงครั้งเดียวที่ผิวดิน เมื่อตัวนำฝังที่ความลึก d ความต้านทานหาได้โดยการสมมุติว่าตัวนำสองตัวมีระยะห่างกัน $2d$ ในตัวกลาง ดังนั้นจะได้ความต้านทานของสายตัวนำฝังดินเท่ากับ

$$\begin{aligned} R_1 &= R_1(a) + R_1(2d) \\ &= \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \frac{2l}{(2ad)^{1/2}} - 1 \right], \text{ เมื่อ } d \ll l \end{aligned} \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.7 แสดงตัวนำที่ฝังเพียงครึ่งเดียว

ดังนั้น เมื่อสายตัวนำฝังลึก d ความต้านทานของตัวนำจะเท่ากับความต้านทานของตัวนำที่มีรัศมีสมมูล $(2ad)^{1/2}$ ฝังที่ผิวดิน

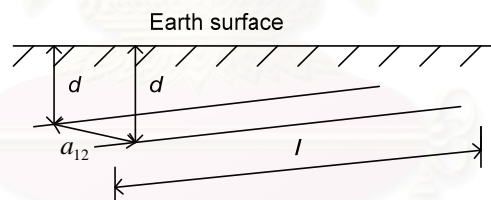
ความต้านทานรวมของตัวนำขนานสองตัวนำฝังที่ความลึก d ระยะห่างระหว่างตัวนำคือ a_{12} ซึ่งน้อยเมื่อเทียบกับความยาวของตัวนำดังรูปที่ 3.8 กำหนดโดย

$$\begin{aligned} R(a_{12}) &= \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{a_{12}} + \ln \frac{2l}{a'_{12}} - 2 \right) \\ &= \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{(a_{12}a'_{12})^{1/2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

เมื่อ a_{12} = ระยะห่างระหว่างตัวนำ

$a'_{12} = (4d^2 + a_{12}^2)^{1/2}$ = ระยะห่างระหว่างตัวนำหนึ่งถึงเงาของอีกตัวนำหนึ่ง

$(a_{12}a'_{12})^{1/2}$ = ระยะห่างประสิทธิผล

รูปที่ 3.8 ตัวนำขนานสองตัวฝังลึก d

ดังนั้นความต้านทานรวมของสองตัวนำ เมื่อหาโดยใช้สมการที่ (3.12) คือ

$$R_2 = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{a'} - 1 \right) \quad (3.24)$$

เมื่อ $a' = [(2ad)^{1/2} (a_{12}a'_{12})^{1/2}]^{1/2}$ = รัศมีสมมูลของตัวนำเมื่อวางที่ผิวดิน

3.3.5 ตัวนำฝังแนวรัศมี (Buried radial wires)

แทนที่จะใช้การฝังตัวนำแบบขนานบางครั้งอาจจะใช้การจัดวางตามแนวรัศมีจากจุดร่วม ซึ่งมักใช้กับเสาส่งวิทยุหรือเสาสายส่งไฟฟ้าเพื่อให้ได้ความต้านทานต่ำ สำหรับตัวนำ n ตัวฝังในแนวรัศมีจากจุดร่วมดังรูปที่ 3.9 สามารถหาความต้านทานได้จากสมการที่ (3.13) เป็น

$$R_n = \frac{\rho}{n\pi l} \left[\ln \frac{2l}{a} - 1 + N(n) \right] \quad (3.25)$$

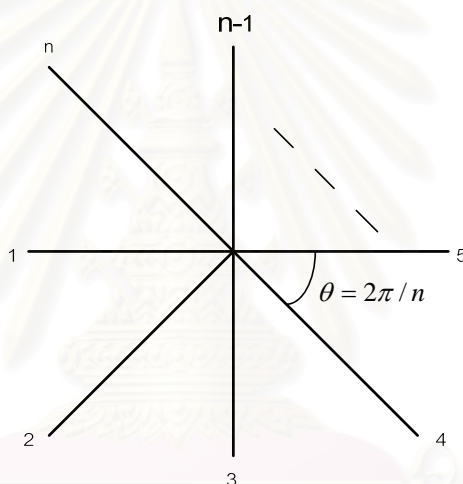
เมื่อ

$$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \frac{1 + \sin \pi m / n}{\sin \pi m / n} \quad (3.26)$$

$$\cong (n-1) \ln(2 \cdot 1.707) - \ln n, \text{ เมื่อ } n > 6$$

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างค่า $N(n)$

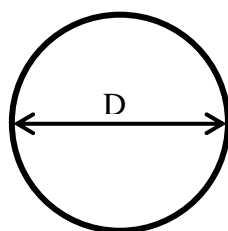
n	2	3	4	6	8	12	100
$N(n)$	0.7	1.53	2.45	4.42	6.5	11.0	116

สำหรับการจัดวางแบบ Right angle ค่า $N(n) = 0.88$ รูปที่ 3.9 ตัวนำ n ตัวจัดวางตามแนวรัศมี

3.3.6 แบบวงแหวน (Buried ring of wire)

อีกรูปแบบที่น่าสนใจคือการจัดวางแบบวงแหวนดังรูปที่ 3.10 สามารถหาความจุ (Capacitance) ของวงแหวนพร้อมกับเงาของมันได้เป็น

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\pi D} \left(\ln \frac{8D}{a} + \ln \frac{8D}{l} \right) \quad (3.27)$$



รูปที่ 3.10 การจัดแบบวงแหวน

ซึ่งจะคำนวณความต้านทานได้ดัง [5]

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{a} + \ln \frac{8D}{l} \right) \quad (3.28)$$

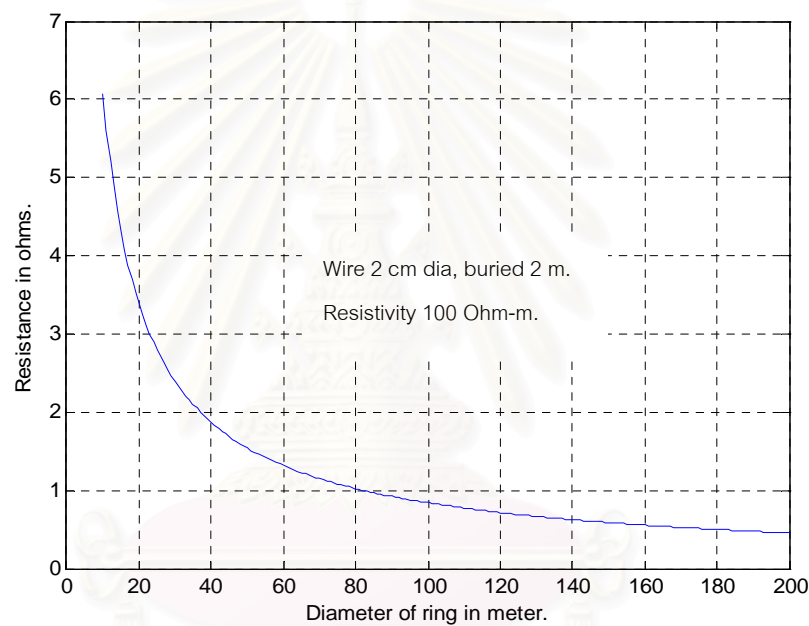
เมื่อ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวน (m)

a = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (m)

l = ความลึก (m)

รูปที่ 3.11 แสดงกราฟค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณสมการ (3.28)



รูปที่ 3.11 ความต้านทานของวงแหวนตัวนำ

3.3.7 แบบหลักดินร่วมกับตัวนำฝังดิน (Combine buried wire and ground rods)

เมื่อหลักดินต่อเข้าด้วยกันโดยสายเปลือยฝังดินดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะได้ความต้านทาน

รวมเป็น

$$R = \frac{R_w R_r - R_{wr}^2}{R_w + R_r - 2R_{wr}} \quad (3.29)$$

เมื่อ

R_w คือความต้านทานของสายตัวนำอย่างเดียว

R_r คือความต้านทานรวมของหลักดิน

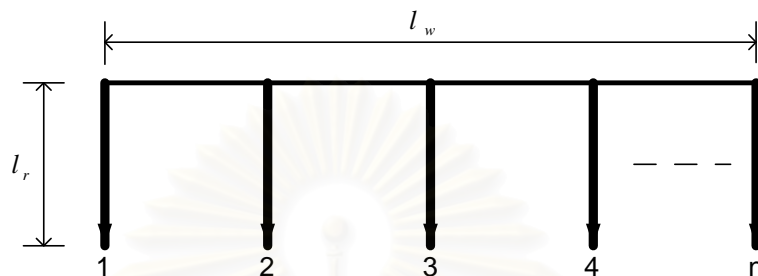
R_{wr} คือความต้านทานร่วมของหลักดินกับสาย

โดย

$$R_{wr} = \frac{\rho}{\pi l_w} \left(\ln \frac{2el_w}{l_r} - 1 \right) = \frac{\rho}{\pi l_w} \ln \frac{2l_w}{l_r} \quad (3.30)$$

l_w = ความยาวสายตัวนำ (m)

l_r = ความยาวหลักดิน (m)

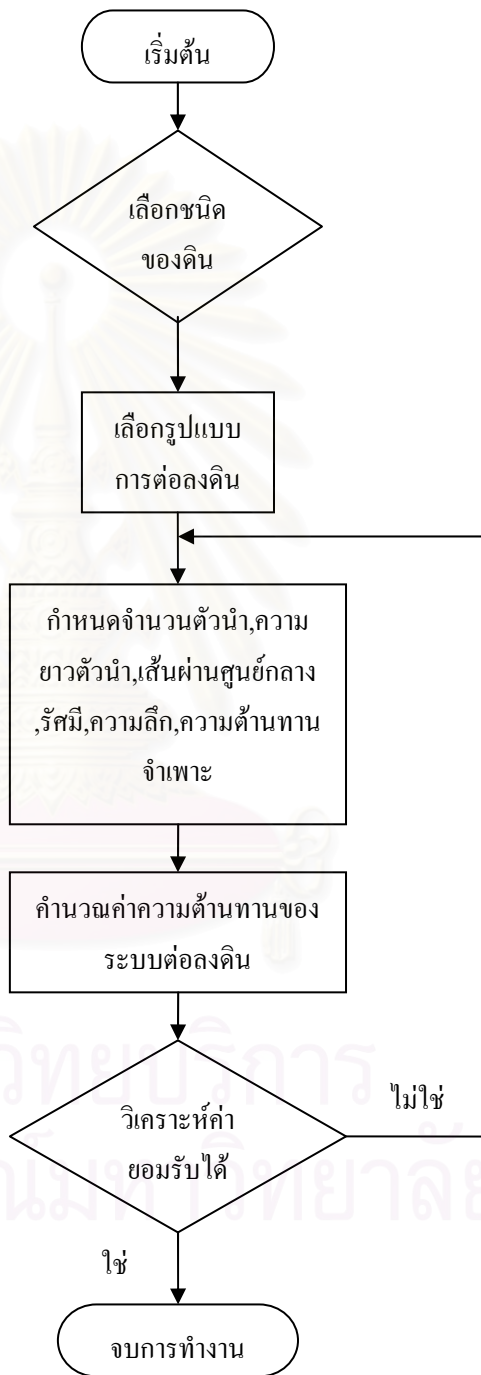


รูปที่ 3.12 การต่อร่วมกันระหว่างสายตัวนำกับหลักดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว

สำหรับการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียวสามารถสรุปเป็นแผนผังดังรูปที่ 3.13 ได้ดังนี้



รูปที่ 3.13 แผนผังการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินกรณีดินชั้นเดียว

ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น

4.1 บทนำ

ปกติการคำนวณค่าความต้านทานของหลักดินรูปแบบต่างๆจะกระทำบนสมมติฐานที่ว่าดินเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Soil) อย่างสมบูรณ์และมีค่าความต้านทานจำเพาะค่าเดียวเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบว่าดินจะเรียงกันอยู่เป็นชั้นตามชนิดของดิน เนื่องจากความต้านทานของหลักดินคือความต้านทานของดินรอบๆ หลักดิน ดังนั้นชั้นดินเหล่านี้จึงมีผลกับความต้านทาน ถึงแม้ว่าหลักดินจะฝังอยู่ในดินชั้นเดียวก็ตาม ซึ่งจะเพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบหลักดิน และสิ่งที่สำคัญคือค่าความต้านทานจำเพาะของดินซึ่งจะต้องมีการสำรวจค่าตำแหน่งที่ทำการติดตั้งหลักดินเพื่อให้มีความถูกต้อง

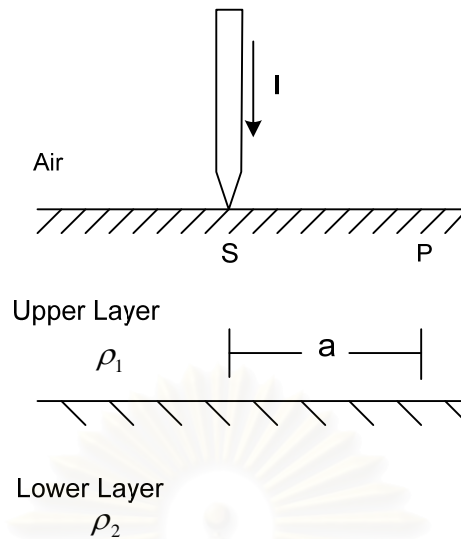
ในบทนี้จะแสดงขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น (Two Layer Soil) โดยจะทำการคำนวณความหนาของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนและความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง จากนั้นทำการคำนวณความต้านทานระบบการต่อลงดินกรณีดินสองชั้น โดยสูตรการคำนวณได้อ้างอิงทฤษฎี Numerical Moment Method, Current Image และ Duality Concept

การคำนวณความหนาของดินชั้นบน ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน และความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง การประมาณค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะใช้ Finite Wenner Resistivity Expression แสดงได้ดังนี้

4.2 การคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้น [11]

พิจารณารูปที่ 4.1 ความต่างศักย์ที่จุด P (V_p) เมื่อจุด P อยู่ห่างจากจุด S (Point Current Source) ตามแนวระดับเท่ากับ a โดยทั้งจุด P และจุด S อยู่บนพื้นผิวของดินสองชั้นมีค่าดังนี้

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



รูปที่ 4.1 พิจารณาค่าความต่างศักย์เมื่ออยู่บนดินสองชั้น

โดยที่ ρ_1 = ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ($\Omega - m$)
 ρ_2 = ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\Omega - m$)
 h = ความลึกของดินชั้นบน (m)
 I = กระแสที่กระจายลงดินโดยจุด S (A)
 k = สัมประสิทธิ์การสะท้อน = $\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

สำหรับโครงสร้างของดินเมื่อให้ตัวแปรได้แก่ ρ_1 , k , h มีค่าคงที่สามารถเขียนความต่างศักย์ที่จุด P (V_p) ในรูปฟังก์ชันของระยะห่างตามแนวระดับ (a) ได้ดังนี้

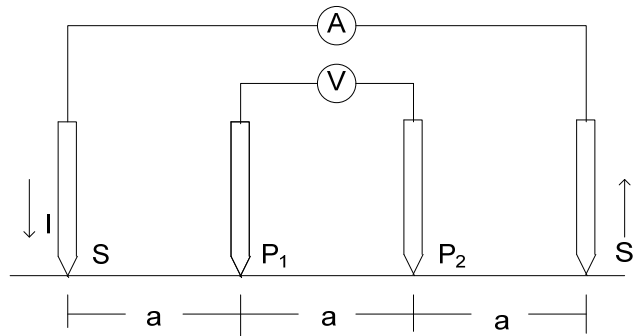
$$V_p = \frac{I \cdot F(a)}{2\pi a} \quad (4.2)$$

โดยที่

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

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

จากรูปแบบวิธีการวัดของ Wenner ซึ่งเป็นการวัดแบบ 4 จุด โดยระยะห่างระหว่างหลักดินที่ใกล้กันมีค่าเท่ากับ (a) ดังรูปที่ 4.2 ความต่างศักย์ที่คร่อมระหว่างหลักดิน P_1 และ P_2 จะเป็นดังนี้



รูปที่ 4.2 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด

$$V = \left(\frac{I \cdot F(a)}{2\pi a} - \frac{I \cdot F(2a)}{2\pi(2a)} \right) - \left(\frac{I \cdot F(2a)}{2\pi(2a)} - \frac{I \cdot F(a)}{2\pi a} \right) \quad (4.4)$$

$$= \frac{I}{2\pi a} [2F(a) - F(2a)]$$

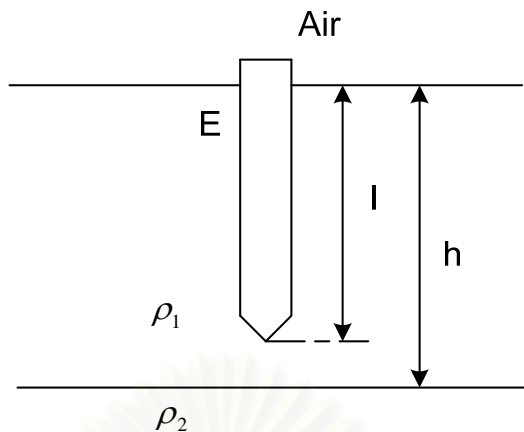
จากสมการ (4.3), (4.4) และ จาก $\rho = 2\pi AR$ จะได้

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \right] \quad (4.5)$$

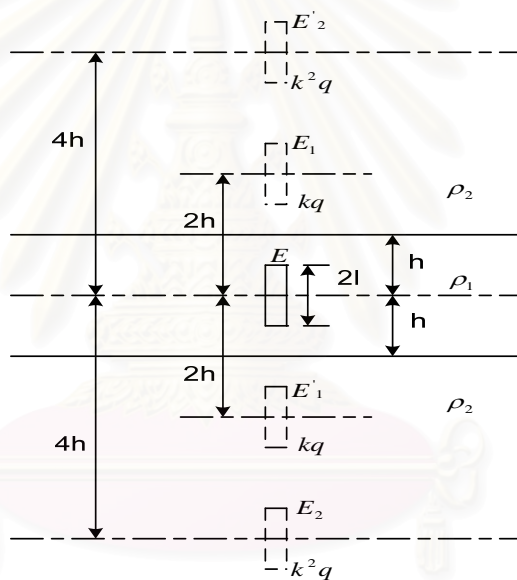
4.3 การคำนวณค่าความต้านทานระบบต่อลงดินกรณีดินสองชั้น

4.3.1 หลักดินฝังในดินชั้นบน [3, 5]

สมมติว่าดินประกอบด้วยสองชั้นดังรูปที่ 4.3 ชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะ ρ_1 มีความหนาของชั้นบนหรือความลึกของชั้นที่สอง h ความต้านทานจำเพาะของชั้นที่สองคือ ρ_2 และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกำหนดเป็น $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ หลักดิน E ฝังอยู่ในดินชั้นบนลึก l ดังที่แสดง ผลเนื่องจากดินชั้นที่สองที่มีต่อความต้านทานของหลักดินอาจคำนวณโดยประมาณได้โดยการใช่วิธีศักย์เฉลี่ย (Average Potential Method) ร่วมกับวิธีภาพเงา (Image Method) ทำให้สามารถแทนรูปที่ 4.3 ได้ด้วยรูปที่ 4.4

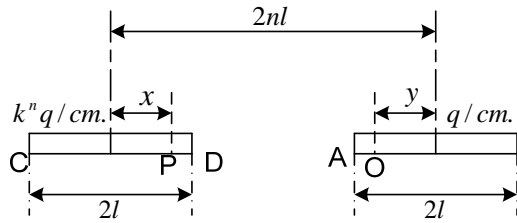


รูปที่ 4.3 หลักดินฝังในดินชั้นบน



รูปที่ 4.4 หลักฝังดินและเงา

หลักดินรวมกับเงาของมันเป็นเนื้อผิวดินให้เป็นแหล่งกำเนิดยาว $2l$ และนำประจุต่อความยาว q/cm ศักย์ที่จุดใดๆ ในระบบสามารถหาได้จากประจุที่ตัวมันรวมกับศักย์เนื่องจากเงาระหว่างชั้นที่สัมพันธ์กัน ซึ่งจะทำให้เกิดภาพคู่เงาเป็นจำนวนอนันต์ ดังรูปที่ 4.4 แสดงสี่เงาแรกซึ่งคู่แรกคือ E_1 และ E_1' ทั้งสองห่างจากศูนย์กลางแหล่งกำเนิด $2h$ สามารถแสดงได้ว่าประจุในเงาทั้งสองคือ kq/cm เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน $((\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1))$ เงาคู่ที่สองคือ E_2 และ E_2' ที่ระยะ $4h$ จากศูนย์กลางหลักดินแหล่งกำเนิดและมีประจุ k^2q/cm ทำนองเดียวกันคู่ที่ n ที่ระยะ $2nh$ ประจุจะเป็น $k^n q$ แสดงดังรูปที่ 4.5



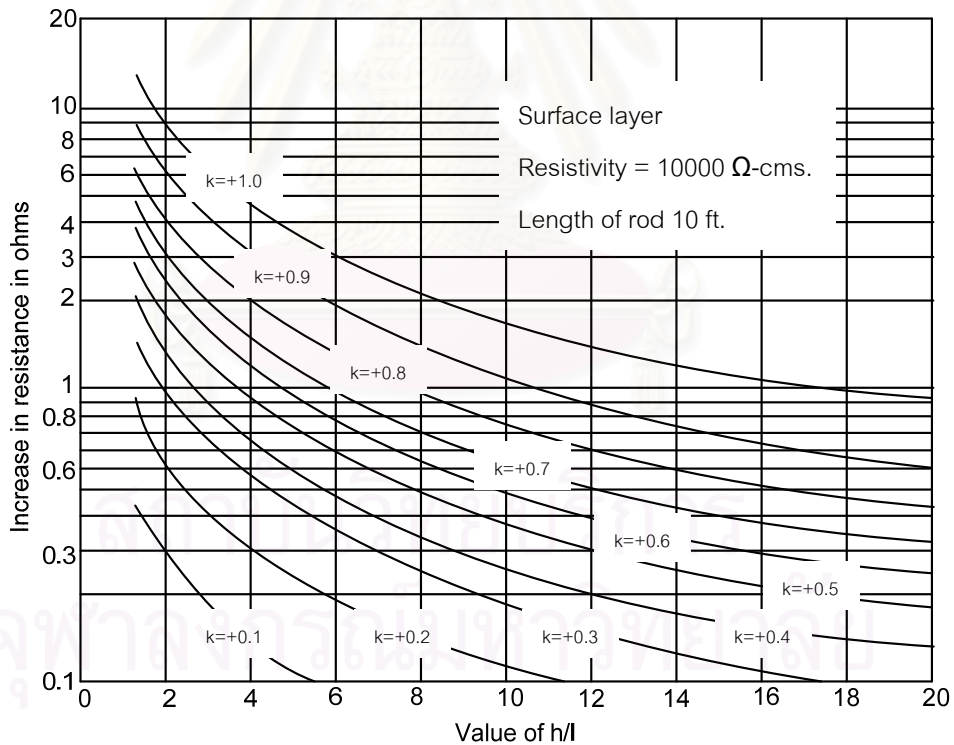
รูปที่ 4.5 หลักรีดดินและเงาที่ n

พิจารณาจุด O บนหลักรีดดินที่ระยะ y จากศูนย์กลาง และส่วน dx ในเงา ที่ระยะ x จากศูนย์กลาง ซึ่งจะนำประจุ $k^n q \cdot dx$ และศักย์ที่จุด O เนื่องจากประจุเหล่านี้คือ

$$\frac{k^n q \cdot dx}{(2nh - x - y)} \tag{4.6}$$

ศักย์รวมเนื่องจากประจุทั้งหมดบนเงาคือ

$$\int_{x=-l}^{x=+l} \frac{k^n q \cdot dx}{(2nh - x - y)} = k^n q \{ \ln(2nh + l - y) - \ln(2nh - l - y) \} \tag{4.7}$$



รูปที่ 4.6 การเพิ่มขึ้นของความต้านทานเนื่องจากชั้นล่างที่ความต้านทานจำเพาะสูงกว่า ดังนั้นศักย์เฉลี่ยของหลักรีดดินเนื่องจากประจุเงาคือ

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2l} \int_{y=-l}^{y=+l} k^n q \{ \ln(2nh + l - y) - \ln(2nh - l - y) \} dy \\ & = \frac{k^n q}{2} [\ln(2nh + 2l) - \ln(2nh - 2l)] \end{aligned} \tag{4.8}$$

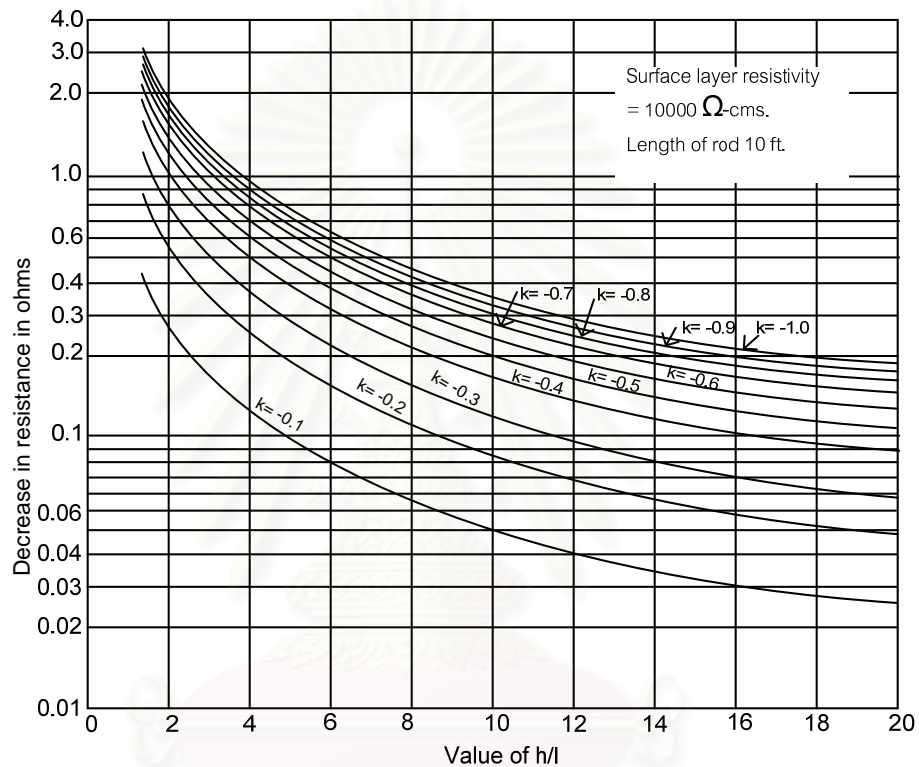
เนื่องจากว่าจะมีสองเงาที่ระยะ $2nh$ นำประจุ $k^n q/cm$ ดังนั้นศักย์รวมเนื่องจากอนุกรมของเงาคือ

$$\sum_{n=1}^{\infty} k^n q [\ln(2nh + 2l) - \ln(2nh - 2l)] \quad (4.9)$$

จากการคำนวณของหลักเดียว ศักย์เนื่องจากประจุของมันเองคือ

$$2q \left\{ \ln \frac{4l}{a} - 1 \right\} \quad (4.10)$$

เมื่อ a เป็นรัศมีของหลักดิน



รูปที่ 4.7 การลดลงของความต้านทานเนื่องจากชั้นล่างที่ความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า

เพราะฉะนั้นจะได้ศักย์รวมของหลักดินเป็น

$$2q \left\{ \ln \frac{4l}{a} - 1 \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n q \{ \ln(2nh + 2l) - \ln(2nh - 2l) \} \quad (4.11)$$

ดังนั้นค่าความจรวมคือ

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{l} \left\{ \ln \frac{4l}{a} - 1 \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2l} \ln \frac{(2nh + 2l)}{(2nh - 2l)} \quad (4.12)$$

จะได้ความต้านทานของหลักดินเป็น

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left\{ \ln \frac{4l}{a} - 1 \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \frac{\{nh/l + 1\}}{\{nh/l - 1\}} \right] \quad (4.13)$$

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

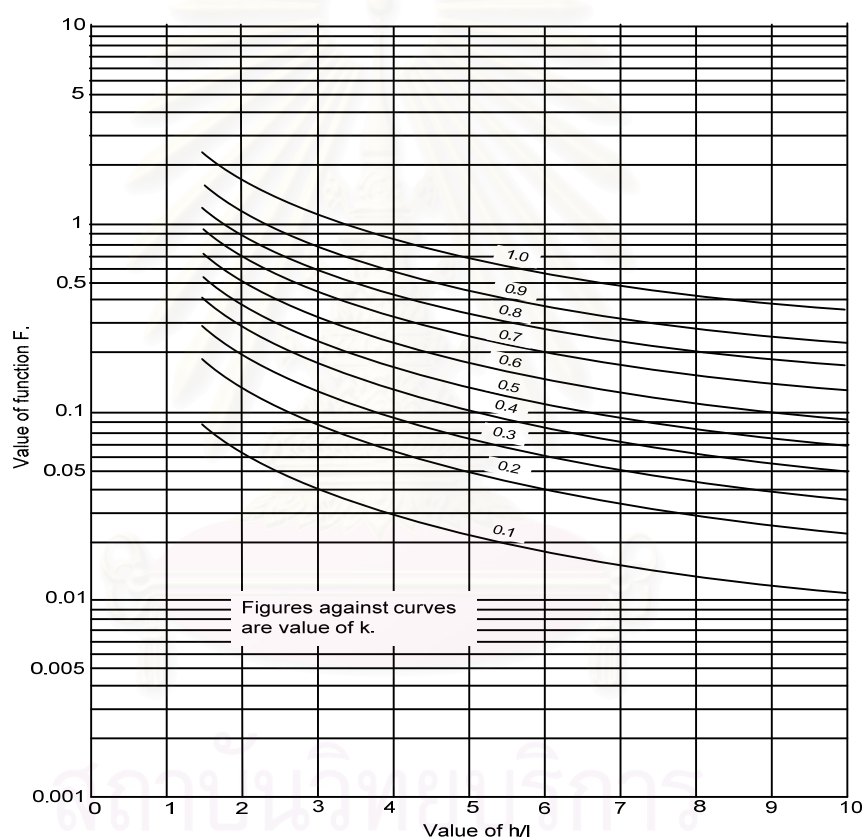
ρ_2 = ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\Omega\text{-m}$)

h = ความลึกของดินชั้นบน (m)

l = ความยาวของหลักดิน (m)

เทอมแรกในสมการคือความต้านทานของหลักดินยาว / ฝังลงในดินที่มีความต้านทานจำเพาะ ρ_1 เทอมที่สองแทนความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากดินชั้นที่สอง แทนด้วย R_a คือ

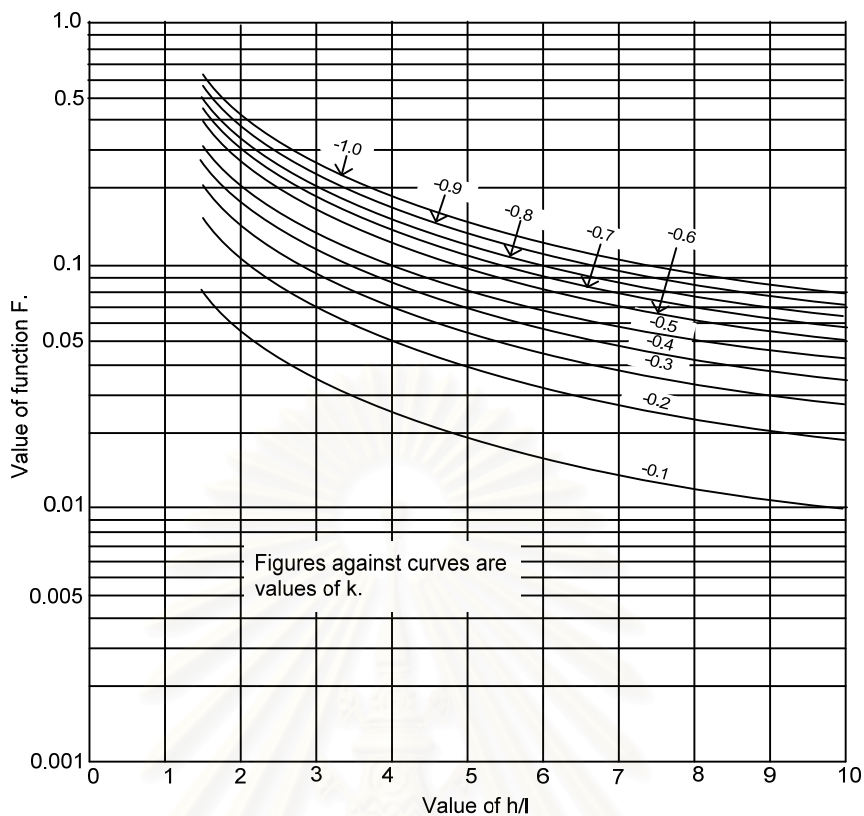
$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{2} \ln \frac{\{nh/l+1\}}{\{nh/l-1\}} \right] \quad (4.14)$$



รูปที่ 4.8 ค่าของฟังก์ชัน F สำหรับค่า k เป็นบวก

กราฟในรูปที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทาน [5] ที่เพิ่มขึ้นสำหรับค่า h/l ค่าต่างๆ ในรูปที่ 4.7 เมื่อค่า k เป็นลบค่าความต้านทานจะลดลงด้วย เพื่อความสะดวกในการคำนวณกำหนดตัวประกอบ F ดังสมการ 4.15 และได้กราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

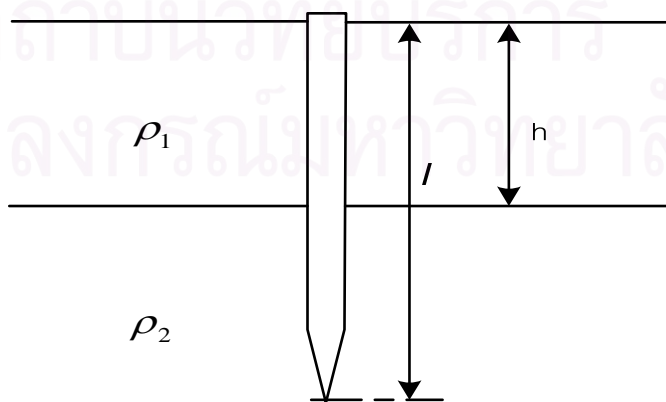
$$F = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{2} \ln \frac{\{nh/l+1\}}{\{nh/l-1\}} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.9 ค่าของฟังก์ชัน F สำหรับค่า k เป็นลบ

4.3.2 หลักรีดฝังในดินทั้งสองชั้น [5]

ในกรณีนี้ความยาวหลักรีด (l) มากกว่าความหนาของดินชั้นบน (h) ดังในรูปที่ 4.10 เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจำเพาะในดินรอบหลักรีด สมมติฐานที่ว่ากระแสไหลอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวจึงเป็นไปไม่ได้ อย่างไรก็ตามมันสมเหตุสมผลที่จะสมมติว่าความหนาแน่นของกระแสแปรผกผันกับความต้านทานจำเพาะ



รูปที่ 4.10 หลักรีดฝังในดินทั้งสองชั้น

ให้ σ_1 และ σ_2 เป็นกระแสต่อหน่วยความยาวในดินชั้นบนและดินชั้นล่างตามลำดับ

ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์

$$\sigma_1 \rho_1 = \sigma_2 \rho_2$$

และ

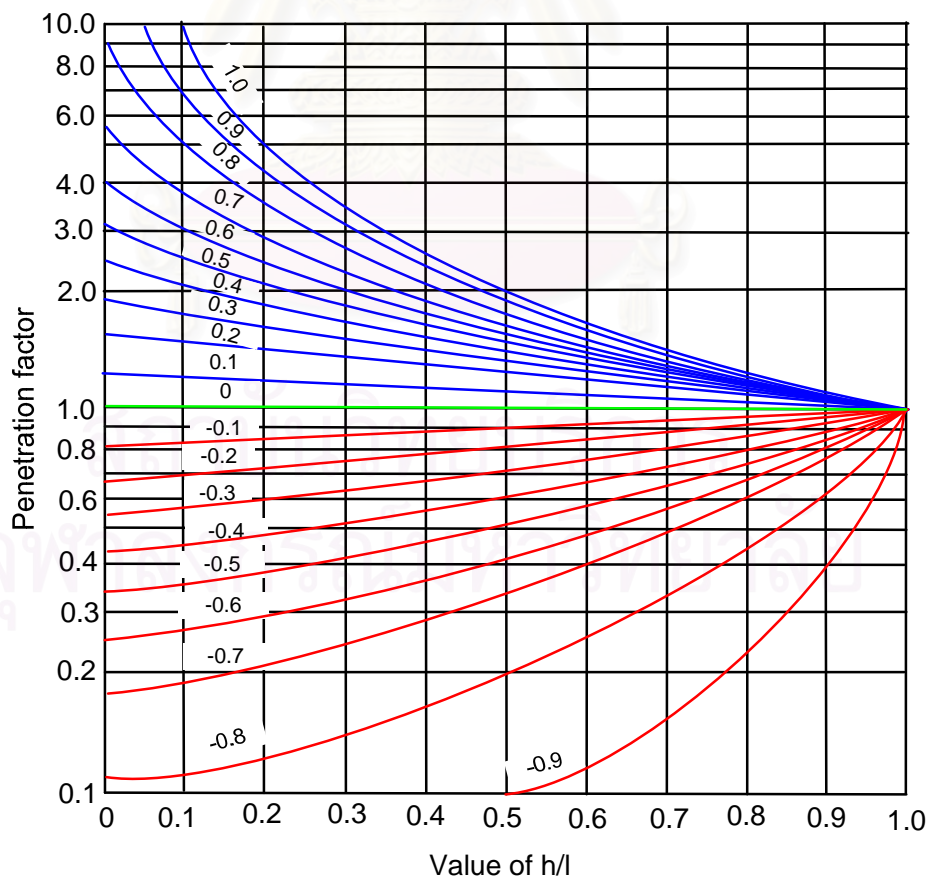
$$\sigma_1 h + \sigma_2 (l - h) = I$$

แก้สมการทั้งสองนี้จะได้

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{I \rho_2}{\rho_2 h + \rho_1 (l - h)} \\ \sigma_2 &= \frac{I \rho_1}{\rho_2 h + \rho_1 (l - h)} \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

ศักยภาพที่ผิวของหลักดินบนผิวดินเนื่องจากกระแสไหลของหลักดินในชั้นบนคือ

$$\frac{I \rho_1 \rho_2}{2\pi \{\rho_2 h + \rho_1 (l - h)\}} \left[\frac{1}{(a^2 + d^2)^{1/2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{k^n}{\{a^2 + (2nh - d)^2\}^{1/2}} + \frac{k^n}{\{a^2 + (2nh + d)^2\}^{1/2}} \right\} \right] \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.11 ค่า Penetration factor

และศักย์ที่ผิวของหลักดินเนื่องจากกระแสในชั้นล่างคือ

$$\frac{I\rho_2}{2\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(1-k)k^n}{\{a^2 + (2nh + d)^2\}^{1/2}} \tag{4.18}$$

แทน / ด้วย σ_2 จะได้

$$\frac{I\rho_1\rho_2}{2\pi[\rho_2h + \rho_1(l-h)]} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(1-k)k^n}{[a^2 + (2nh + d)^2]^{1/2}} \tag{4.19}$$

ดังนั้นศักย์เฉลี่ยตลอดทั้งหลักดินคือ

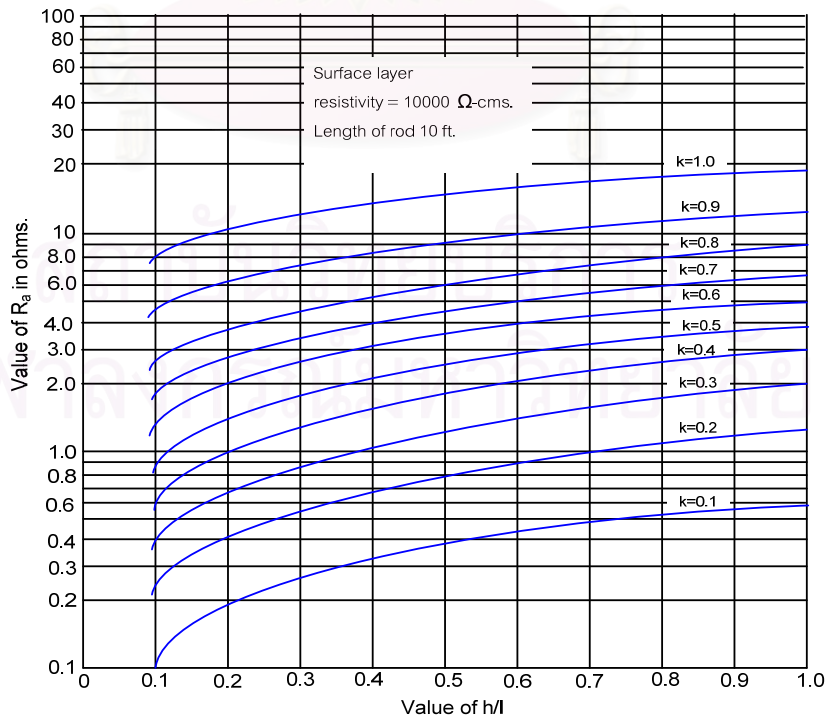
$$\frac{I\rho_1\rho_2}{2\pi\{\rho_2h + \rho_1(l-h)\}l} \int_0^h \left\{ \frac{1}{(a^2 + d^2)^{1/2}} + \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{\{a^2 + (2nh - d)^2\}^{1/2}} + \frac{k^n}{\{a^2 + (2nh + d)^2\}^{1/2}} \right\} \\ + \frac{I\rho_1\rho_2}{2\pi\{\rho_2h + \rho_1(l-h)\}l} \int_h^l \left\{ \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(1-k)k^n}{[a^2 + (2nh + d)^2]^{1/2}} \right\}$$

ซึ่งจะได้สมการของความต้านทานคือ

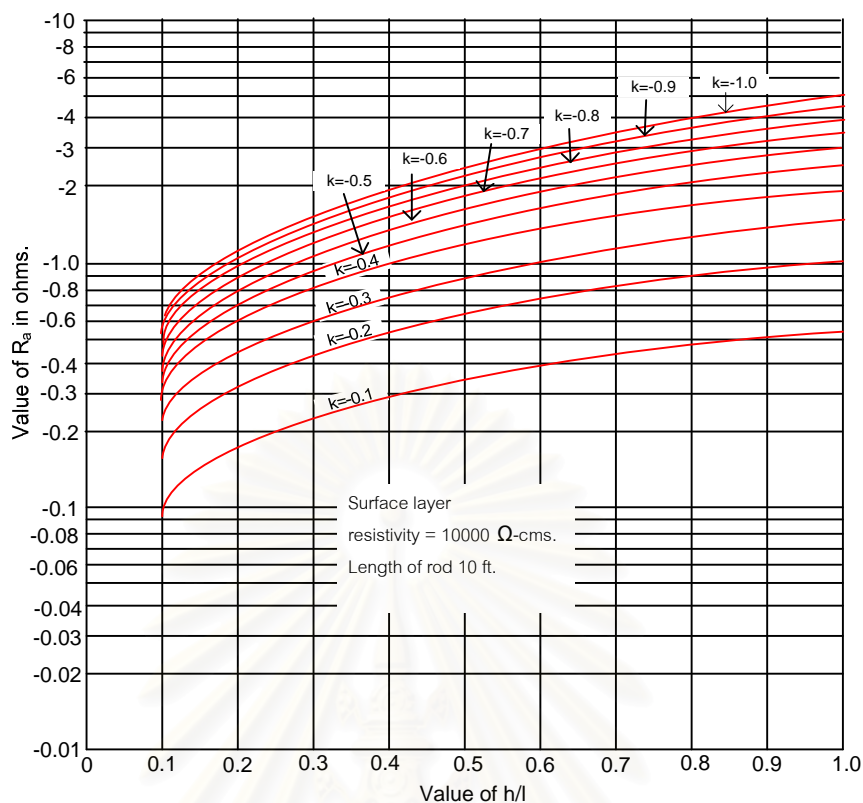
$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \cdot \frac{(1+k)}{\left\{ (1-k) + 2k \frac{h}{l} \right\}} \left[\ln \frac{2l}{a} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \frac{(2nh+l)}{\{(2n-2)h+l\}} \right] \\ = F[R_1 + R_a] \tag{4.20}$$

เมื่อ R_1 คือความต้านทานของหลักดินในดินที่มีความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ ρ_1 และ R_a คือความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้นที่สอง ส่วน F คือค่า Penetration Factor

ค่าของ Penetration factor F แสดงในรูปที่ 4.11 และค่าของ R_a แสดงในรูปที่ 9.12 และ 9.13



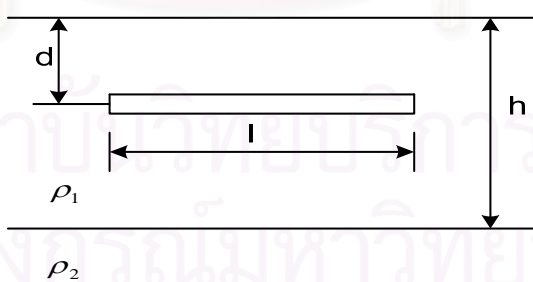
รูปที่ 4.12 ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น R_a กรณีค่า k เป็นบวก



รูปที่ 4.13 ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น R_a กรณีค่า k เป็นลบ

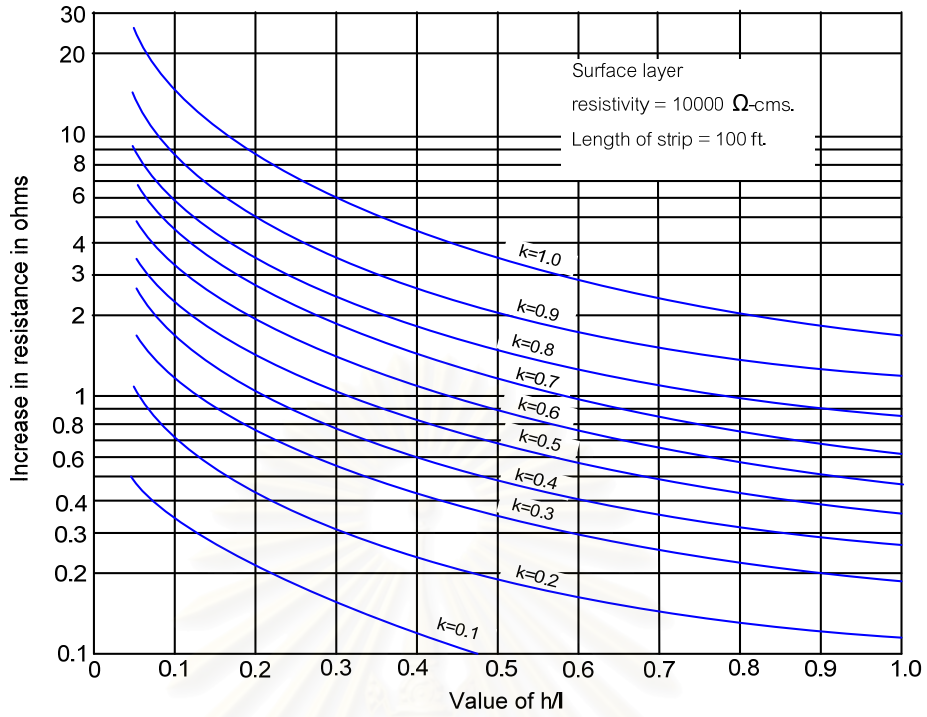
4.3.3 แท่งตัวนำฝังในดินชั้นบน

ดังรูปที่ 4.14 แท่งตัวนำยาว l ฝังลึก d ในตัวกลางความต้านทานจำเพาะ ρ_1 และความหนาของดินชั้นบน h ชั้นที่สองมีความต้านทานจำเพาะ ρ_2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทำนองเดียวกับหลักดินฝังแนวตั้ง ดังนั้นจะได้ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อแท่งตัวนำอยู่ใกล้ผิวมากขึ้น [5] คือ

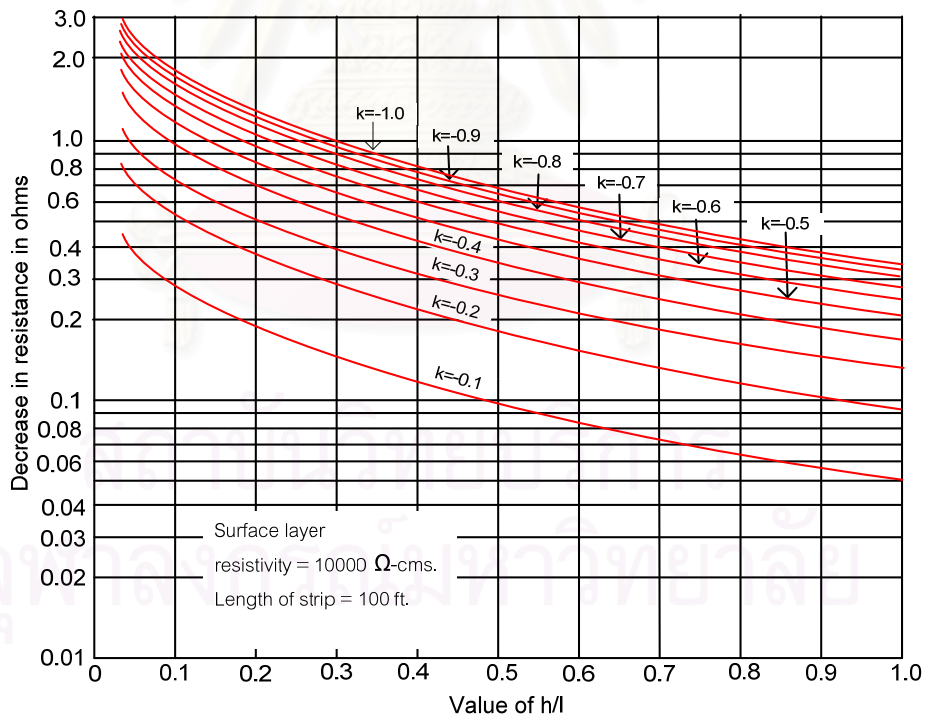


รูปที่ 4.14 แท่งตัวนำฝังในดินชั้นบน

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi d} \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \left\{ 4 \ln \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2nh}{l}\right)^2 + 1}}{2n \frac{h}{l}} + \frac{8nh}{l} - 4 \sqrt{\left(\frac{2nh}{l}\right)^2 + 1} \right\} \quad (4.3)$$

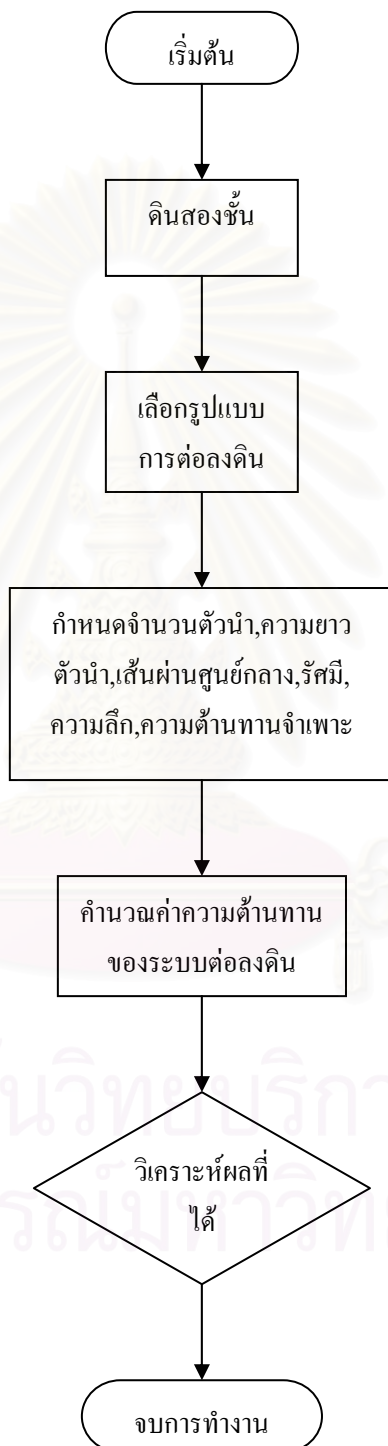


รูปที่ 4.15 ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากดินชั้นล่างที่มีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า



รูปที่ 4.16 ความต้านทานที่ลดลงเนื่องจากดินชั้นล่างที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า

4.4 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น
 สำหรับการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้นสามารถสรุปเป็นแผนผัง
 ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนผังการวิเคราะห์กรณีดินสองชั้น

บทที่ 5

ระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า

5.1 บทนำ

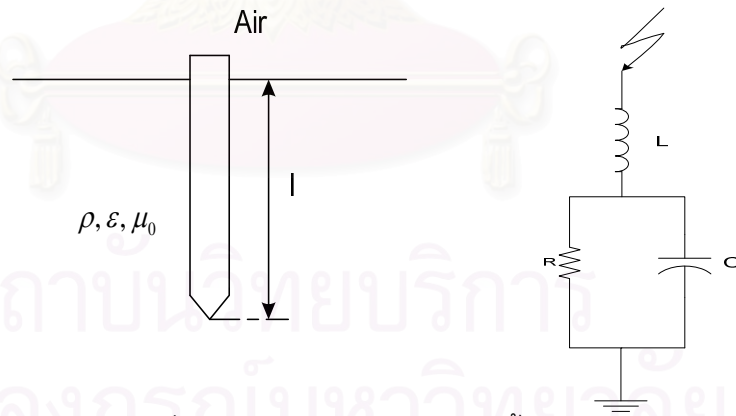
กระแสฟ้าผ่าปริมาณสูงไหลผ่านความต้านทานของดินจะทำให้ความต้านทานของดินต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากกระแสค่าต่ำซึ่งเป็นสิ่งที่รู้กันมานาน แต่ก็ยังไม่มีวิธีการที่จะประมาณค่าความต้านทานอิมพัลส์เนื่องจากขาดข้อมูลและกระบวนการคำนวณที่ง่าย

แบบจำลองของระบบดินและหลักดินเป็นความสำคัญเบื้องต้นสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทรานเซียนท์ของการติดตั้งระบบไฟฟ้าใดๆ การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาวของหลักดินที่ถูกต้องเป็นส่วนที่สำคัญเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ ในบทนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองกรณีคือกรณีไม่คิดผลการแตกตัวของดิน (Soil Ionization) และกรณีคิดผลการแตกตัวของดิน

5.2 กรณีไม่คิดผลการแตกตัวของดิน

5.2.1 แบบหลักดิน

สำหรับหลักดินแนวตั้งสามารถแทนได้โดยวงจรลัมพ์ R-L-C [12] ดังนี้



รูปที่ 5.1 แบบจำลองหลักดินแนวตั้ง

โดย

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{\alpha}, \\ C &= 2\pi\epsilon \ln \frac{2l}{\alpha}, \\ L &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2l}{\alpha} \end{aligned} \tag{5.1}$$

เมื่อ

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω -m)

ε = ความซบซึ่มได้ของสนามไฟฟ้า (F/m)

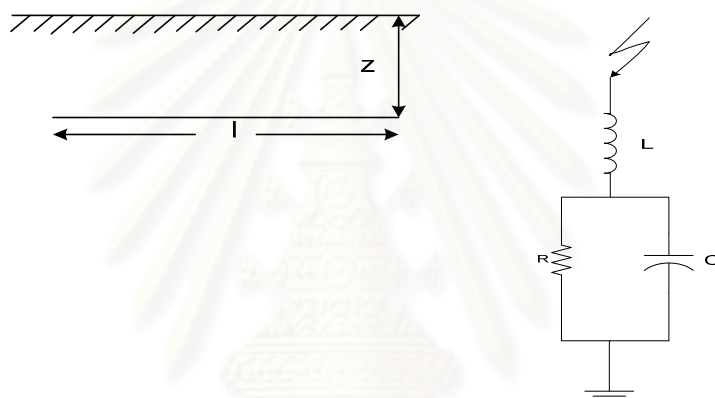
μ_0 = ความซบซึ่มได้ของสนามแม่เหล็ก (H/m)

l = ความยาวหลักดิน (m)

α = รัศมีหลักดิน (m)

5.2.2 แบบตัวนำฝังดิน

สำหรับหลักดินแนวนอนสามารถแทนได้โดยวงจรสมมูล [2, 10] ดังนี้



รูปที่ 5.2 แบบจำลองหลักดินแนวนอน

โดย

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right], \\
 C &= 2\pi\varepsilon \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right], \\
 L &= \frac{\mu_0 l}{\alpha} \left[\ln \frac{2l}{\alpha} - 1 \right]
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

เมื่อ

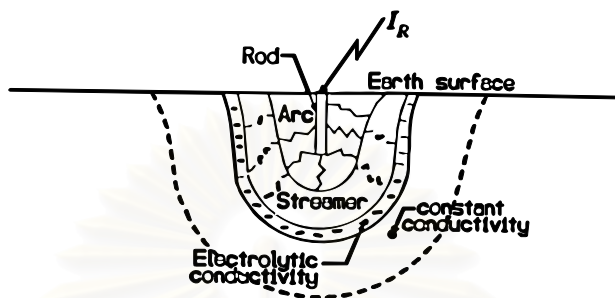
α คือ รัศมีสมมูลของตัวนำแทนได้โดย $\sqrt{2 \cdot a \cdot z}$ เมื่อ z เป็นความลึกของตัวนำ

5.3 กรณีคิดผลการแตกตัวของดิน

การประมาณค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์จะใช้วิธีของ K.H. Weck ที่ได้นำเสนอใน CIGRE Technical Brochure No. 63 [13]

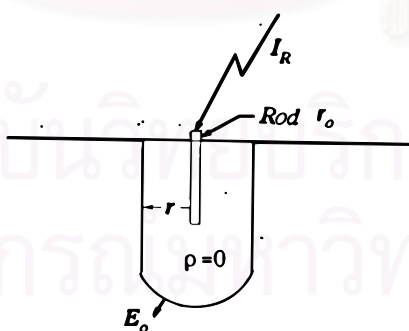
ความหนาแน่นของกระแส J ที่ระยะ r จากหลักดิน และแรงดันเกรเดียนท์ E เมื่อป้อนกระแส I_R คือ

$$J = \frac{I_R}{2\pi rL} \quad E = \rho J = \frac{\rho I_R}{2\pi rL} \quad (5.3)$$

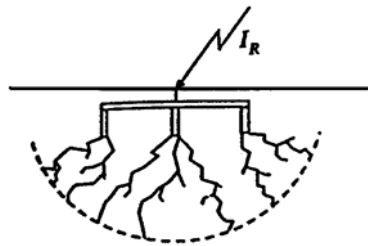


รูปที่ 5.3 อิมพัลส์เบรกดาวน์ของดินรอบหลักดิน

สำหรับกระแสสูงซึ่งแทนฟ้าผ่าเมื่อเกรเดียนท์เกินค่าวิกฤติ E_0 จะเกิดการเบรกดาวน์ของดินขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.3 เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจะเกิดสตรีมเมอร์เนื่องจากความชื้นของดินและจะนำไปสู่การเกิดอาร์ค ดังนั้นภายในบริเวณสตรีมเมอร์และอาร์คความต้านทานจำเพาะจะลดลงจากค่าเริ่มต้นเข้าใกล้ศูนย์สำหรับตัวนำที่สมบูรณ์ การเกิดเบรกดาวน์ของดินเปรียบได้กับการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลักดินซึ่งสามารถจำลองได้ดังรูปที่ 5.4 เมื่อการแตกตัวเพิ่มขึ้นรูปร่างของบริเวณแตกตัวจะคล้ายทรงกลมมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.5 สำหรับหลักดินหลายอัน ดังนั้นที่กระแสสูงๆ หลักดินสามารถจำลองอย่างๆ ได้เป็นอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม



รูปที่ 5.4 แบบจำลองอย่างง่ายของบริเวณแตกตัว



รูปที่ 5.5 หลักรากดินหลายหลักแทนได้ด้วยครึ่งทรงกลม

5.3.1 อิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม

สำหรับอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลมดังรูปที่ 5.6 มีรัศมี r_0 ความต้านทานคือ

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (5.4)$$

$$J = \frac{I_R}{2\pi r^2} \quad E = \frac{\rho I_R}{2\pi r^2}$$

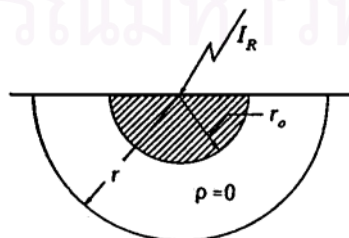
สมมติว่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นศูนย์ในบริเวณที่มีการแตกตัว รัศมีขยายไปสู่ r กำหนดให้ $E = E_0$ ในสมการที่ 5.4 แล้วแทน r_0 ด้วยรัศมีใหม่และแทนความต้านทานอิมพัลส์ด้วย R_i จะได้สมการ

$$R_i = \sqrt{\frac{E_0 \rho}{2\pi I_R}} \quad (5.6)$$

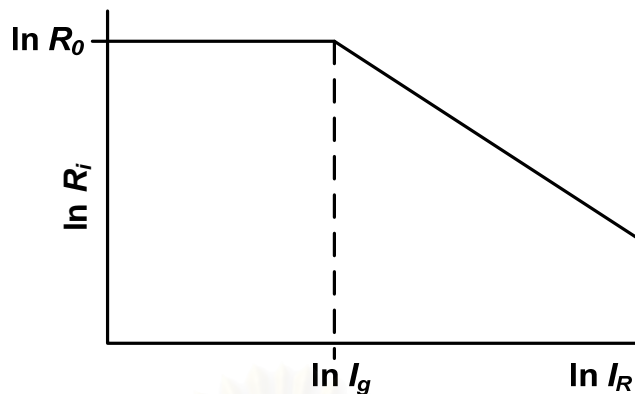
หรือในรูปของลอกกาติทิมจะได้

$$\ln R_i = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{E_0 \rho}{2\pi} - \ln I_R \right] \quad (5.7)$$

ดังนั้นความต้านทานอิมพัลส์เป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของกระแส สามารถแสดงความสัมพันธ์แบบลอกกาติทิมได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 อิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม



รูปที่ 5.7 ความต้านทานอิมพีแดนซ์ของเครื่องทรงกลม

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์จะยังไม่เป็นจริงจนกว่าจะมีกระแสพอที่จะสร้างเกรเดียนตึงศักย์ E_0 ที่ผิวของทรงกลม เพื่อที่จะหากระแส I_g นี้ให้ $r = r_0$, $E = E_0$, และ $I_R = I_g$ ในสมการที่ 5.4 ดังนั้น

$$I_g = \frac{2\pi r^2 E_0}{\rho} = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_0}{R_0^2} \quad (5.8)$$

แทนสมการที่ 5.8 ในสมการที่ 5.6 จะได้

$$R_i = R_0 \sqrt{\frac{I_g}{I_R}} \quad (5.9)$$

จัดรูปสมการที่ 5.6 ใหม่ ละให้ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องทรงกลม จะได้

$$\frac{R_i D}{\rho} = \sqrt{\frac{E_0 D^2}{2\pi \rho I_R}} \quad (5.10)$$

และให้

$$\Pi_1 = \frac{R_i D}{\rho} \quad \Pi_2 = \frac{\rho I_R}{E_0 D^2} \quad (5.11)$$

จะได้ความสัมพันธ์

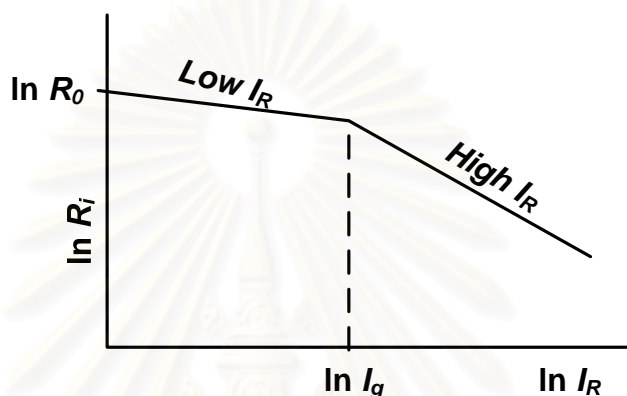
$$\ln \Pi_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} \pi - \ln \Pi_2 \quad (5.12)$$

5.3.2 แท่งหลักดิน

จากรูปแบบครึ่งทรงกลมแทน r_0 ด้วย r เมื่อ $E = E_0$ จะได้

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{8\pi L^2 E_0}{\rho} - 1 - \ln I \right] \quad (5.13)$$

ดังนั้น R_i เป็นฟังก์ชันของล็อก I ดังแสดงในรูปที่ 5.8

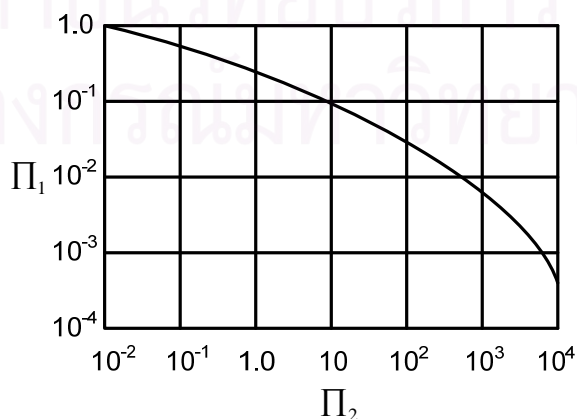


รูปที่ 5.8 ที่กระแสสูงหลักดินจะกลายเป็นครึ่งทรงกลม

เพราะว่าหลักดินมีขนาดเล็กกระแสที่ทำให้เกิดการแตกตัวน้อยและสามารถละลายได้ ดังนั้นสมการที่ 5.13 จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Pi_1 = \frac{1}{2\pi} \ln 8\pi - 1 - \ln \Pi_2 \quad (5.14)$$

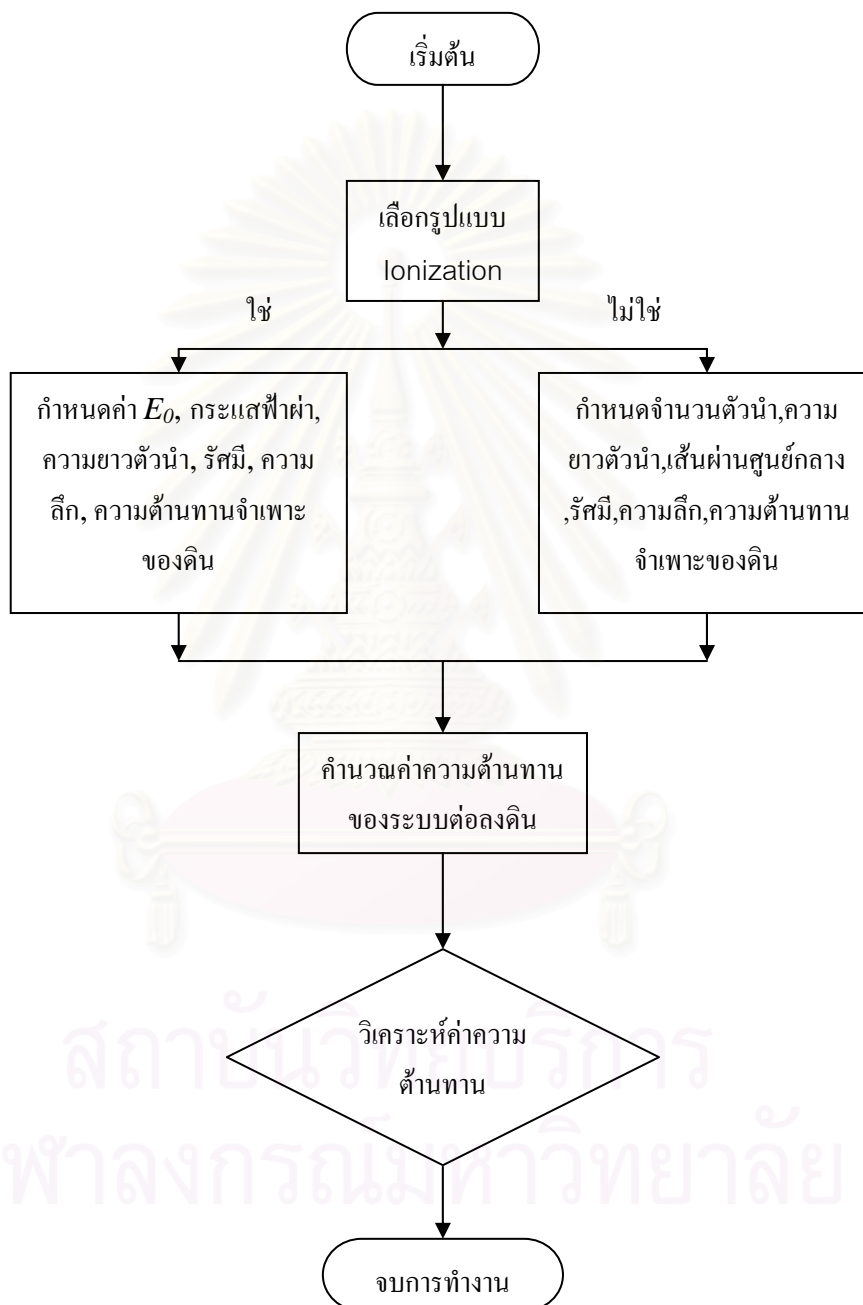
ในกรณีนี้ความยาว L ใช้แทนเส้นผ่านศูนย์กลาง D ในสมการที่ 3.12 ทั้งสองกรณีพล็อตในเทอมของ Π_1 และ Π_2 ได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 Korsuntcev's similitude relationship ของความต้านทานอิมพัลส์ทั่วไป [14]

5.4 การวิเคราะห์ผลกระทบจากกระแสฟ้าผ่า

สำหรับการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียวสามารถสรุปเป็นแผนผังดังรูปที่ 5.10 ได้ดังนี้



รูปที่ 5.10 แผนผังการวิเคราะห์ผลของกระแสฟ้าผ่า

บทที่ 6

โปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

6.1 บทนำ

โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลขซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในการแก้ปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการศึกษาเพื่อใช้งานเพราะเป็นโปรแกรมในลักษณะ Interactive การเขียนโปรแกรมไม่ยุ่งยากซับซ้อน ตลอดจนมีฟังก์ชันการใช้งานในสาขาต่างๆ ให้เลือกใช้มากมาย

6.2 ลักษณะของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

6.2.1 ขอบเขตและเงื่อนไขของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

ความสามารถของโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้านี้สามารถที่จะวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าดังลักษณะต่อไปนี้

1. โปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าสามารถเลือกโหมดการวิเคราะห์ได้ 3 แบบคือ

- 1.1 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินสำหรับดินชั้นเดียว (One Layer Soil)
- 1.2 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินสำหรับดินสองชั้น (Two Layers Soil)
- 1.3 การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินเมื่อพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า (Lightning Current)

2. การวิเคราะห์จะแสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์

3. ดินแต่ละชั้นมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินสม่ำเสมอ (Uniform Soil)

4. การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าทั้ง 3 แบบจะแสดงในหน้าตาเดียวกัน

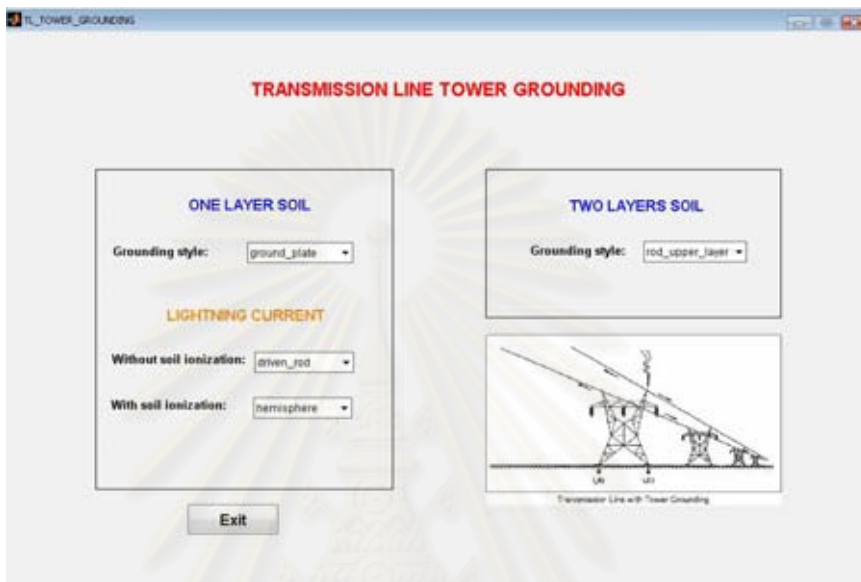
เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

5. สามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการวิเคราะห์ได้ตามต้องการ

6. ผลการวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความยาวหรือความลึกของอิเล็กโทรด

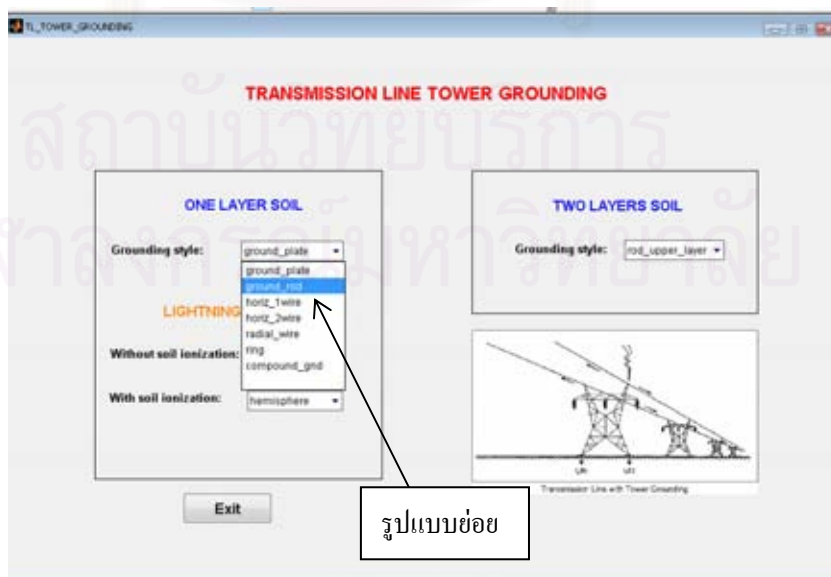
6.2.2 ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสา ส่งไฟฟ้า

โปรแกรมการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้านี้ มีส่วนประกอบที่เป็นวินโดว์หลัก
อยู่วินโดว์เดียวคือ เมื่อทำการเรียกโปรแกรมจะพบวินโดว์การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่ง
ไฟฟ้ายุคที่ 6.1



รูปที่ 6.1 วินโดว์แรกสู่การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

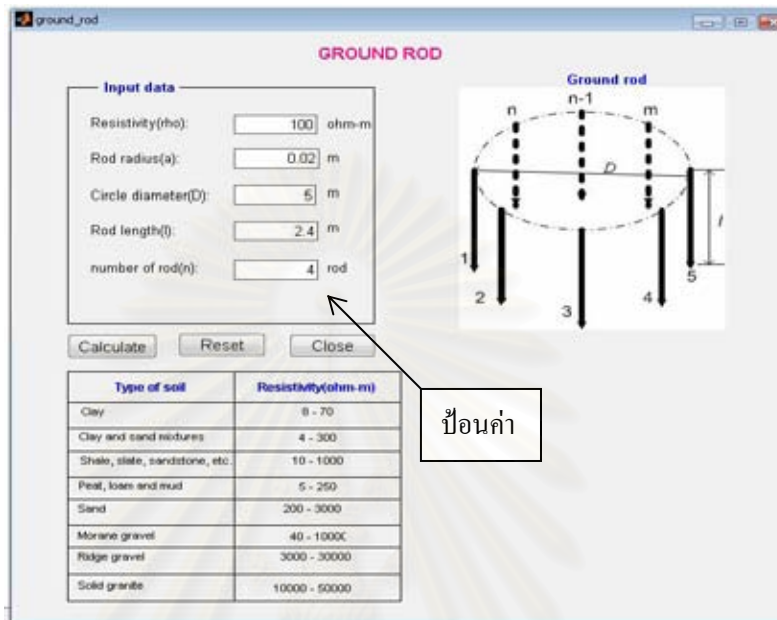
หลังจากที่วินโดว์ดังรูปที่ 6.1 ปรากฏขึ้นบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ วินโดว์หน้านี้จะแสดงรูปแบบ
สำหรับกรวิเคราะห์ 3 รูปแบบให้เลือก ซึ่งแต่ละแบบจะมีรูปแบบย่อยของการต่อลงดินให้เลือกดัง
รูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงรูปแบบย่อย

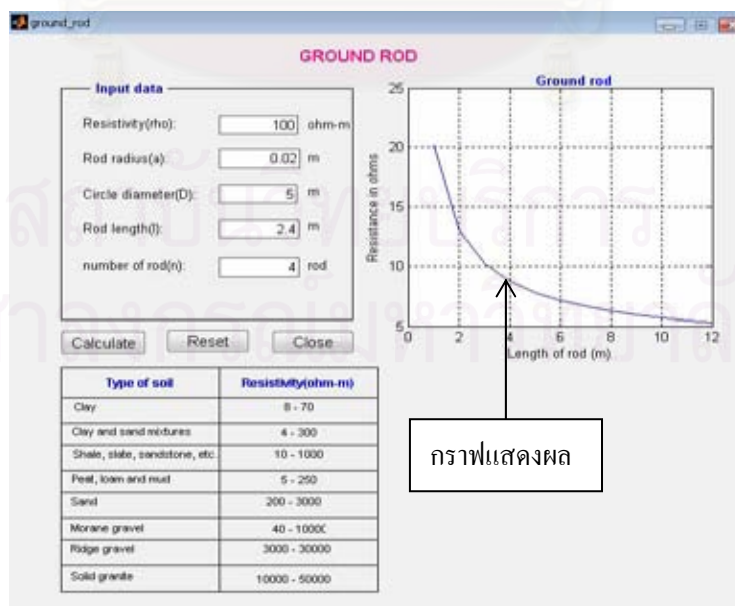
One Layer Soil

ในส่วนนี้จะมีรูปแบบการต่อลงดินให้เลือก 7 รูปแบบ เมื่อทำการเลือกรูปแบบที่ต้องการเสร็จแล้วให้ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ครบดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับดินชั้นเดียว

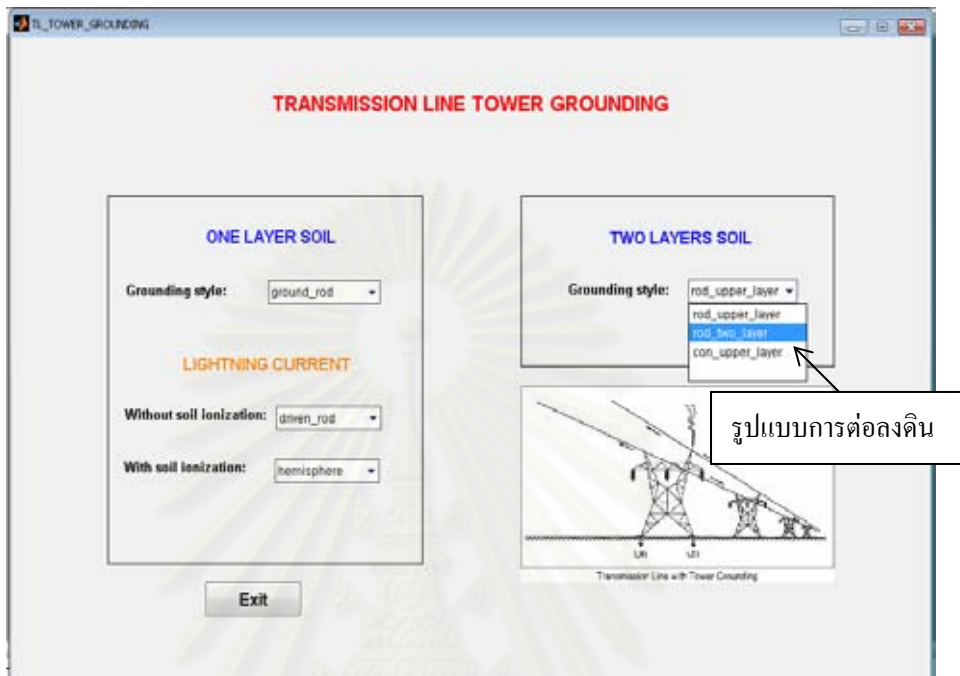
หลังจากป้อนค่าต่างๆ ครบหมดทุกช่องแล้วให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม **Calculate** โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.4



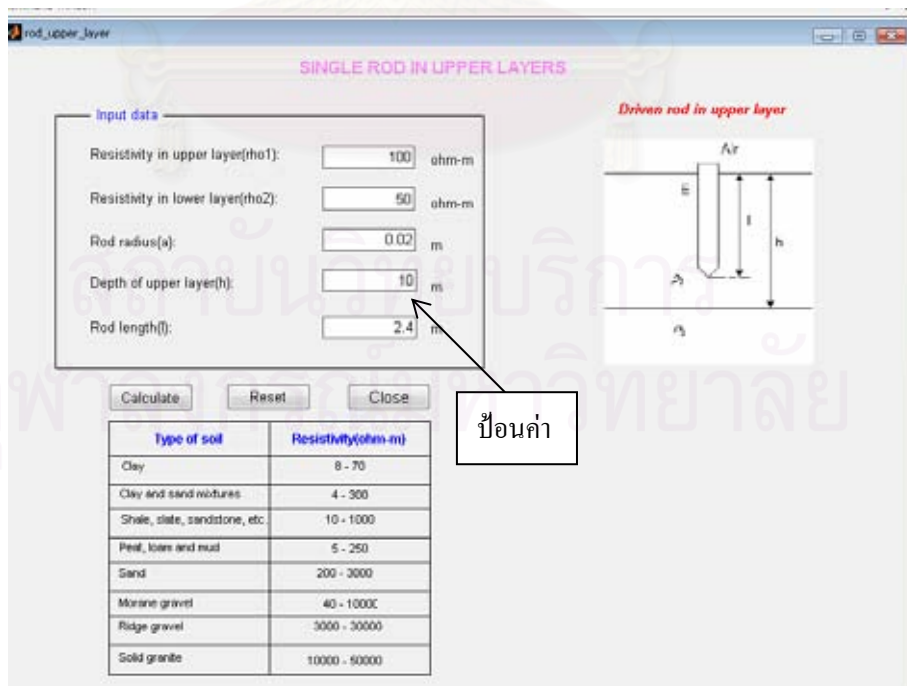
รูปที่ 6.4 การแสดงผลสำหรับดินชั้นเดียว

Two Layers Soil

ในส่วนนี้จะมีรูปแบบการต่อลงดินให้เลือก 3 รูปแบบดังรูปที่ 6.5 เมื่อทำการเลือกรูปแบบที่ต้องการเสร็จแล้วให้ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ครบดังรูปที่ 6.6

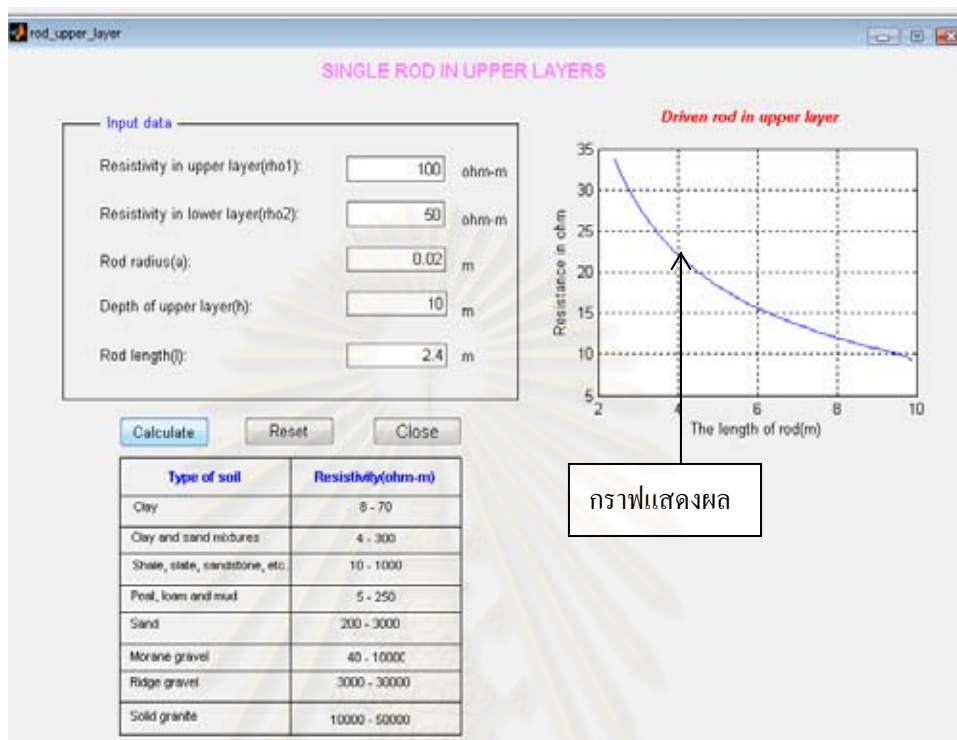


รูปที่ 6.5 รูปแบบการต่อลงดินสำหรับดินสองชั้น



รูปที่ 6.6 แสดงการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับดินสองชั้น

หลังจากป้อนค่าต่างๆ ครบหมดทุกช่องแล้วให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม **Calculate** โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.7

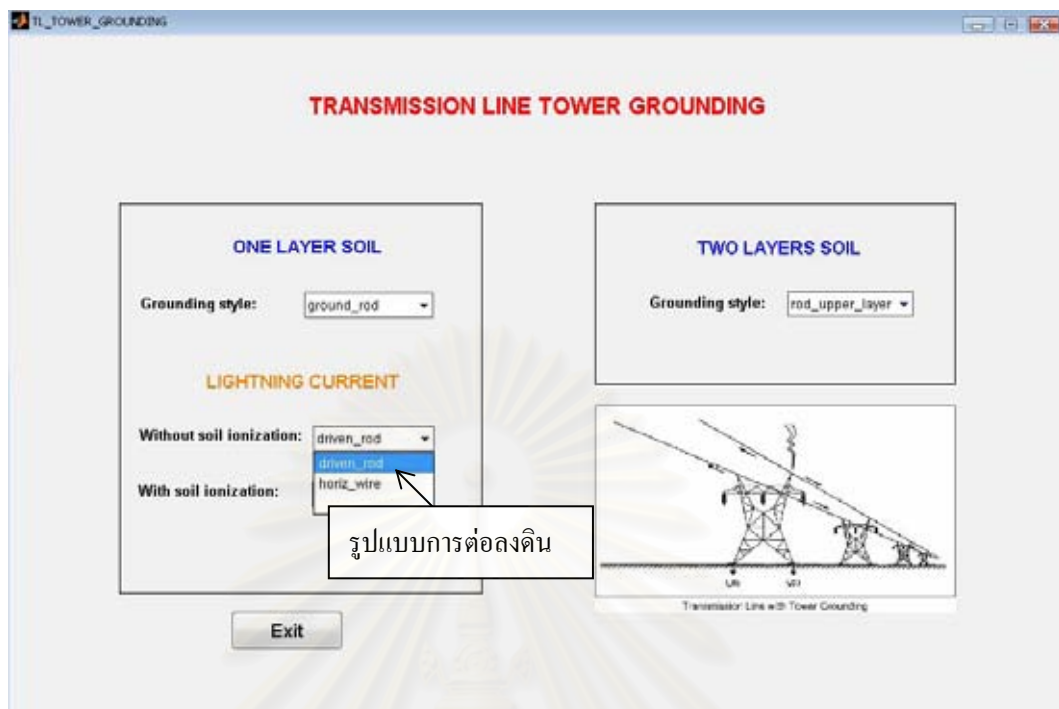


รูปที่ 6.7 การแสดงผลสำหรับดินสองชั้น

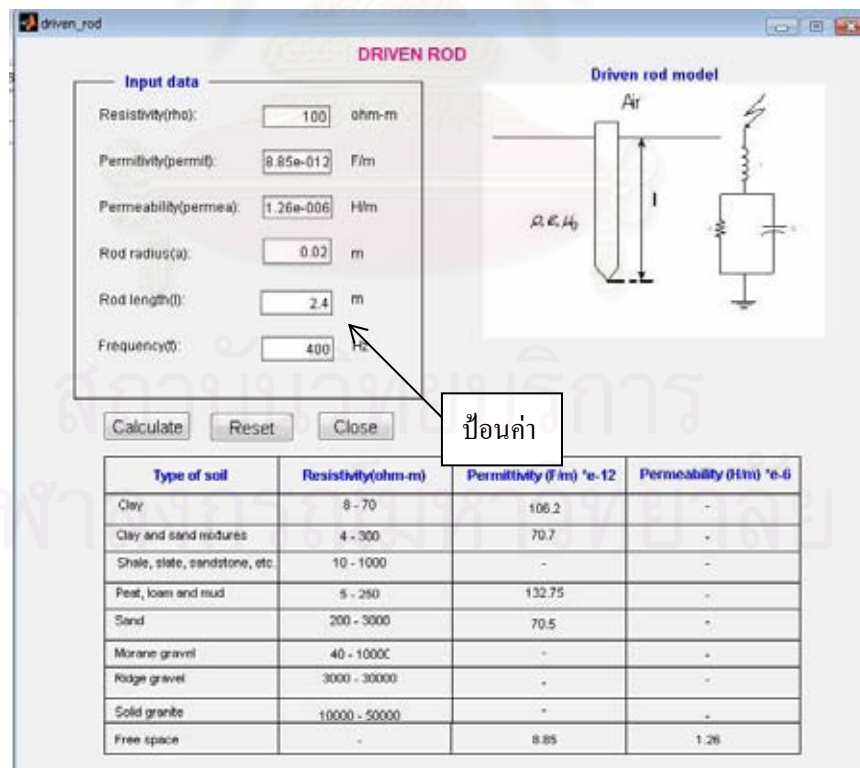
Lightning Current

ในส่วนนี้จะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ กรณีไม่คิดผลการแตกตัวของดิน (Without Soil Ionization) และกรณีที่คิดผลการแตกตัวของดิน (With Soil Ionization) ซึ่งแต่ละกรณีจะมีรูปแบบการต่อลงดินให้เลือก 2 รูปแบบดังรูปที่ 6.8 เมื่อทำการเลือกรูปแบบที่ต้องการเสร็จแล้วให้ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ครบดังรูปที่ 6.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

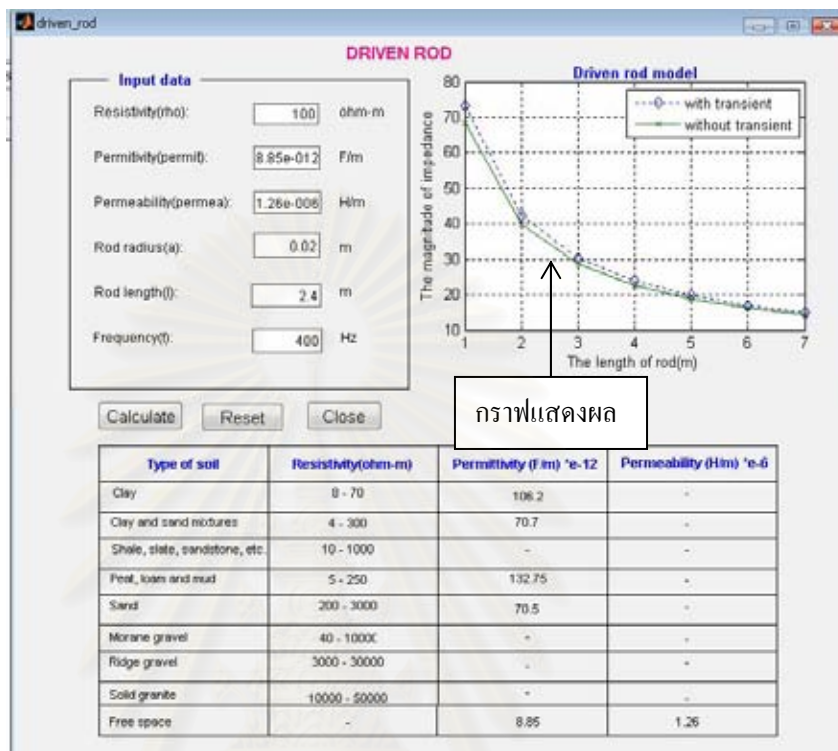


รูปที่ 6.8 รูปแบบการต่อลงดินกรณีฟ้าผ่า



รูปที่ 6.9 แสดงการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆกรณีฟ้าผ่า

หลังจากป้อนค่าต่างๆ ครบหมดทุกช่องแล้วให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม **Calculate** โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 การแสดงผลกรณีฟ้าผ่า

ในการแสดงผลจะแสดงเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่คิดผลของกระแสฟ้าผ่าเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในลำดับต่อไป

บทที่ 7

ผลการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีเป็นดินชั้นเดียว กรณีเป็นดินสองชั้น และกรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณี ซึ่งในการวิเคราะห์เราจะกำหนดให้ค่าจำเพาะของดินเช่น ค่า Resistivity, Permittivity, Permeability มีค่าคงที่

โดยใช้โปรแกรมที่ได้ศึกษาและพัฒนา โดยขั้นตอนการวิเคราะห์และแสดงผลเป็นดังนี้

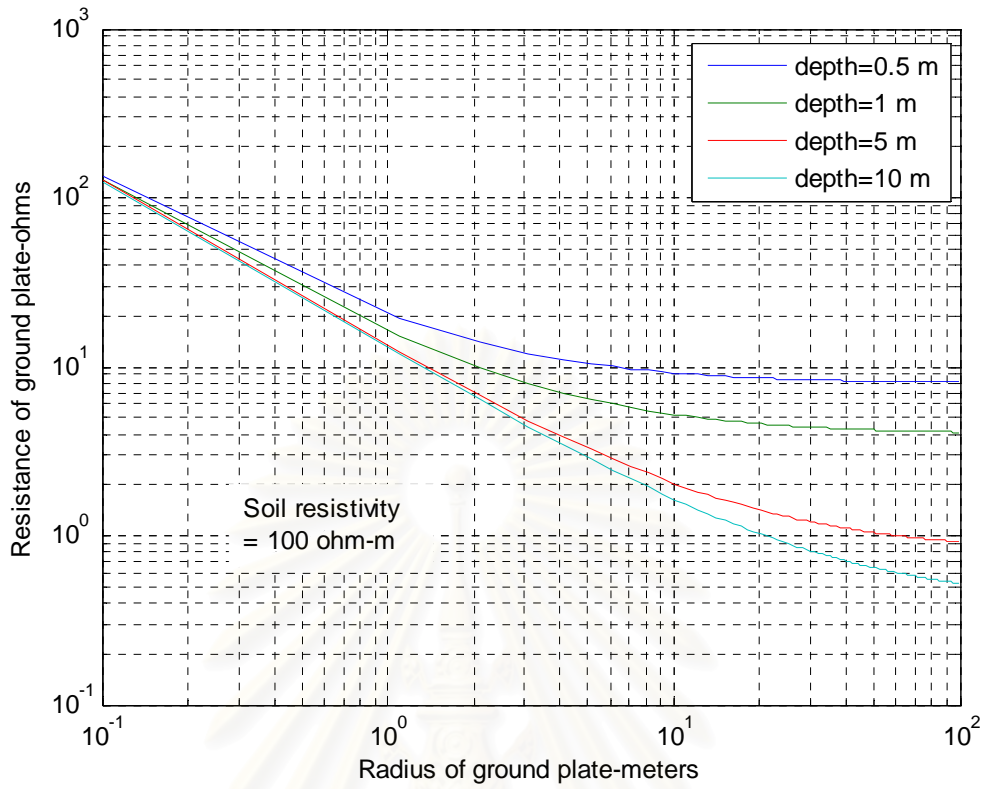
- 1) เลือกรูปแบบการวิเคราะห์
- 2) เลือกรูปแบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า
- 3) ป้อนข้อมูลให้โปรแกรม
- 4) โปรแกรมทำการคำนวณผล
- 5) แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์

7.1 วิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว

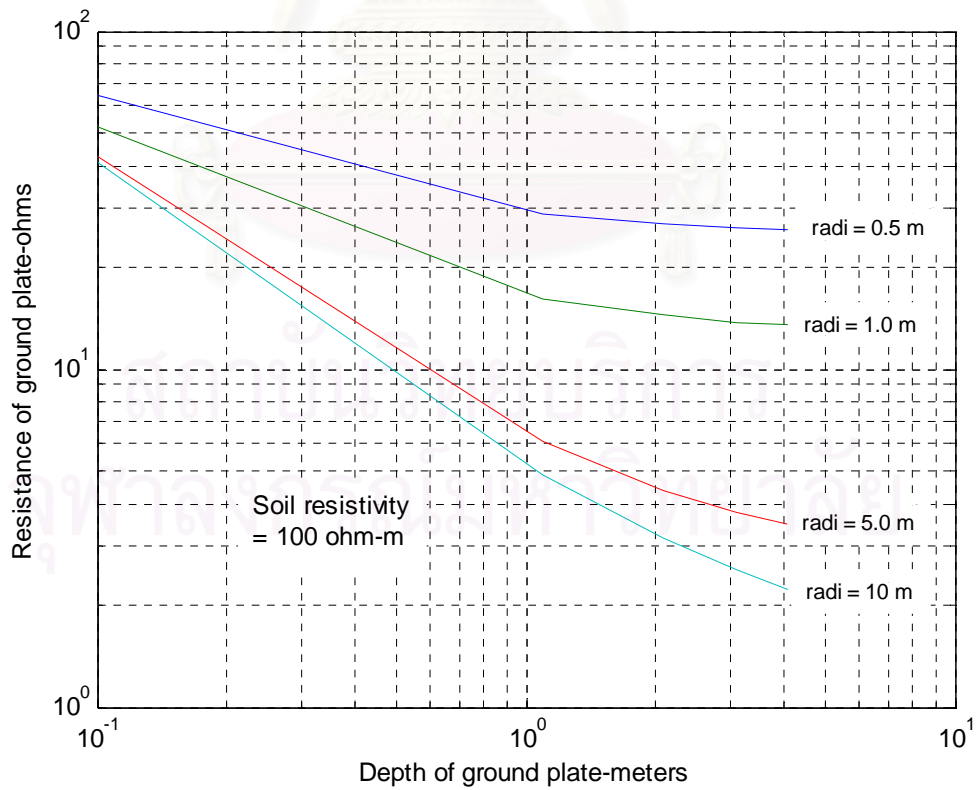
7.1.1 Ground Plate

สำหรับการต่อลงดินแบบแผ่นกราวด์ (Ground Plate) ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของระบบมีสองตัวคือขนาดของแผ่นกราวด์และ ความลึกของแผ่นกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 7.1 และ 7.2 จากรูปที่ 7.1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความลึกของแผ่นกราวด์มากขึ้นจะทำให้ความต้านทานลดลงที่แผ่นกราวด์ขนาดเดียวกัน ยิ่งแผ่นกราวด์มีขนาดต่างกันมากก็จะทำให้ความต้านทานต่างกันมากด้วย

สำหรับรูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความลึกของแผ่นกราวด์ ที่รัศมีแผ่นกราวด์ต่างกันซึ่งจะพบว่าเมื่อรัศมีแผ่นกราวด์มากขึ้นจะทำให้ความต้านทานลดลงและยิ่งขนาดของแผ่นกราวด์มากขึ้นความต้านทานของแผ่นกราวด์จะลดลง



รูปที่ 7.1 ความต้านทานของ Ground Plate ที่ความลึกต่างๆ



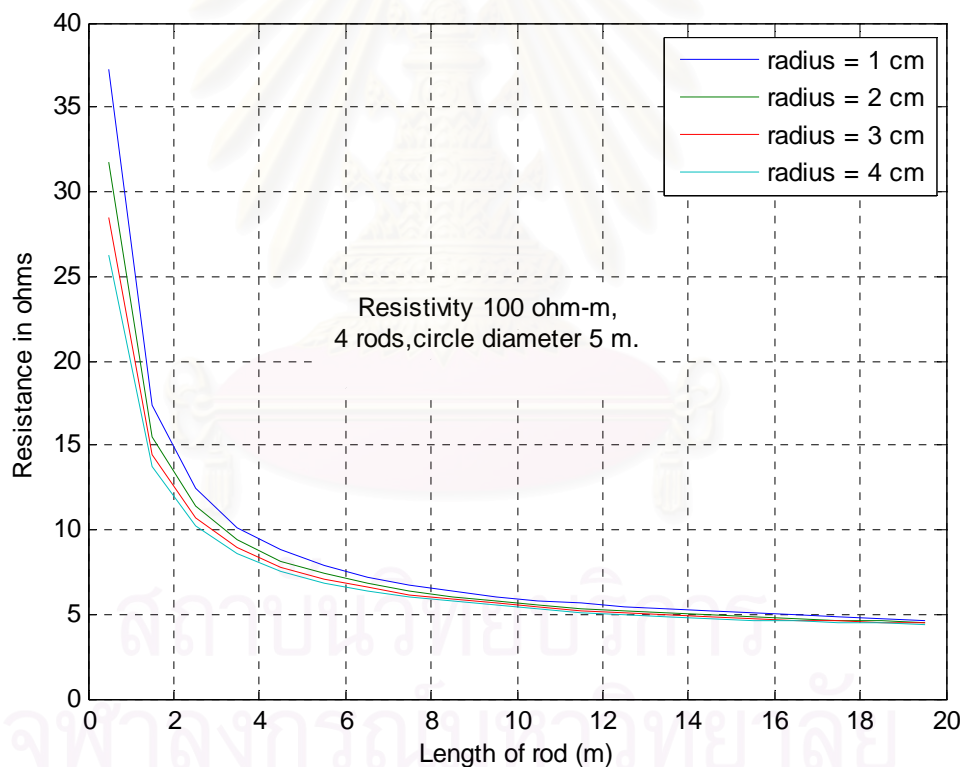
รูปที่ 7.2 ความต้านทานของ Ground Plate ที่รัศมีต่างๆ

7.1.2 Ground Rod

การต่อลงดินแบบแท่งหลักดิน (Ground Rod) เป็นรูปแบบหนึ่งที่ย่างที่สุดและนิยมใช้กัน โดยทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์การต่อลงดินรูปแบบนี้เราจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของระบบ ต่อลงดินว่าตัวไหนมีผลต่อความต้านทานของระบบต่อลงดินอย่างไรโดยจะแสดงผลเทียบกับความ ยาวของหลักดิน และหลักดินจัดวางเป็นทรงกลม

กรณี เปลี่ยนขนาดของหลักดิน

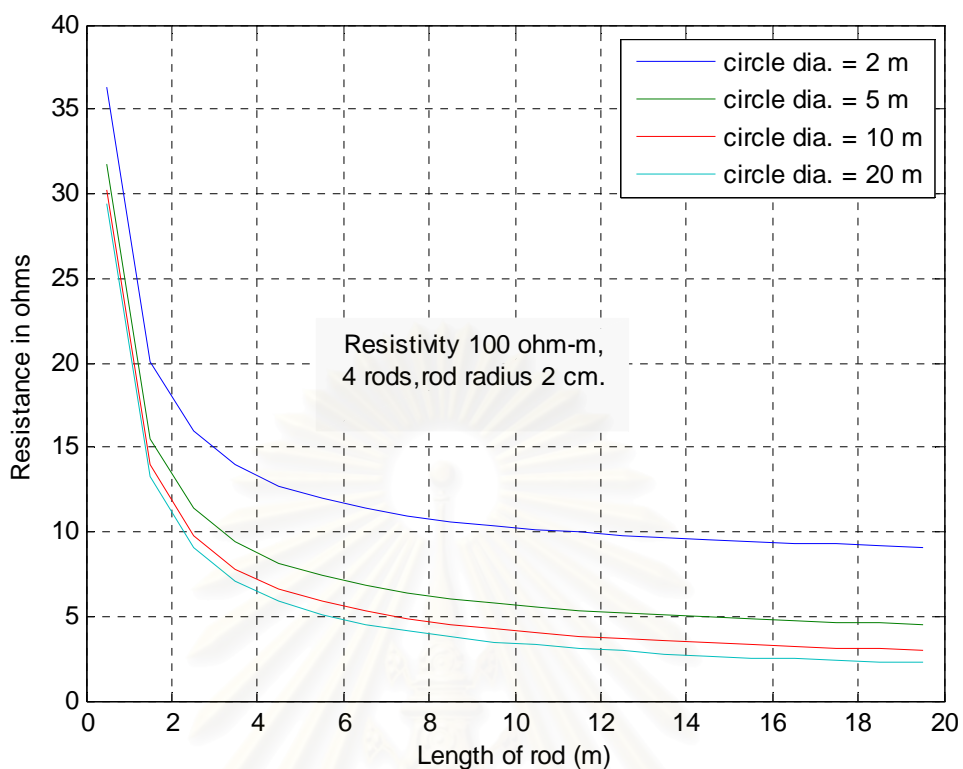
รูปที่ 7.3 แสดงค่าความต้านเทียบกับความยาวหลักดินเมื่อความต้านทานจำเพาะของดิน เท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร จำนวนหลักดิน 4 หลักและจัดวางหลักดินเป็นทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร ซึ่งจากรูปที่ 7.3 จะพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของหลักดินจะทำให้ความต้านทานลดลง แต่เมื่อ ความยาวหลักดินมากขึ้นขนาดของหลักดินจะมีผลต่อความต้านทานน้อยลง



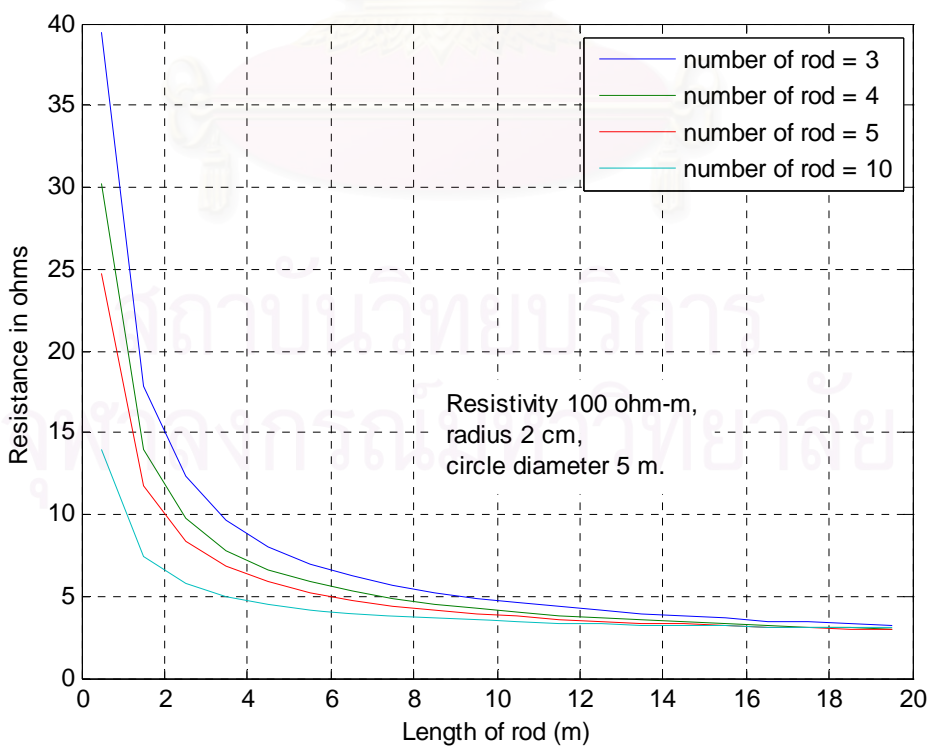
รูปที่ 7.3 ความต้านทานของ Ground Rod ที่รัศมีต่างๆ

กรณี เปลี่ยนระยะห่างหลักดิน

เมื่อทำการเปลี่ยนระยะห่างหลักดิน(ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมของการจัดวางหลัก ดิน) จากรูปที่ 7.4 จะพบว่าเมื่อระยะห่างหลักดินมากขึ้นความต้านทานจะลดลงและ เมื่อเทียบกับ ความยาวหลักดินแล้วความต้านทานจะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อความยาวหลักดินมากขึ้น



รูปที่ 7.4 ผลการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างหลักดิน
กรณี เปลี่ยนจำนวนหลักดิน

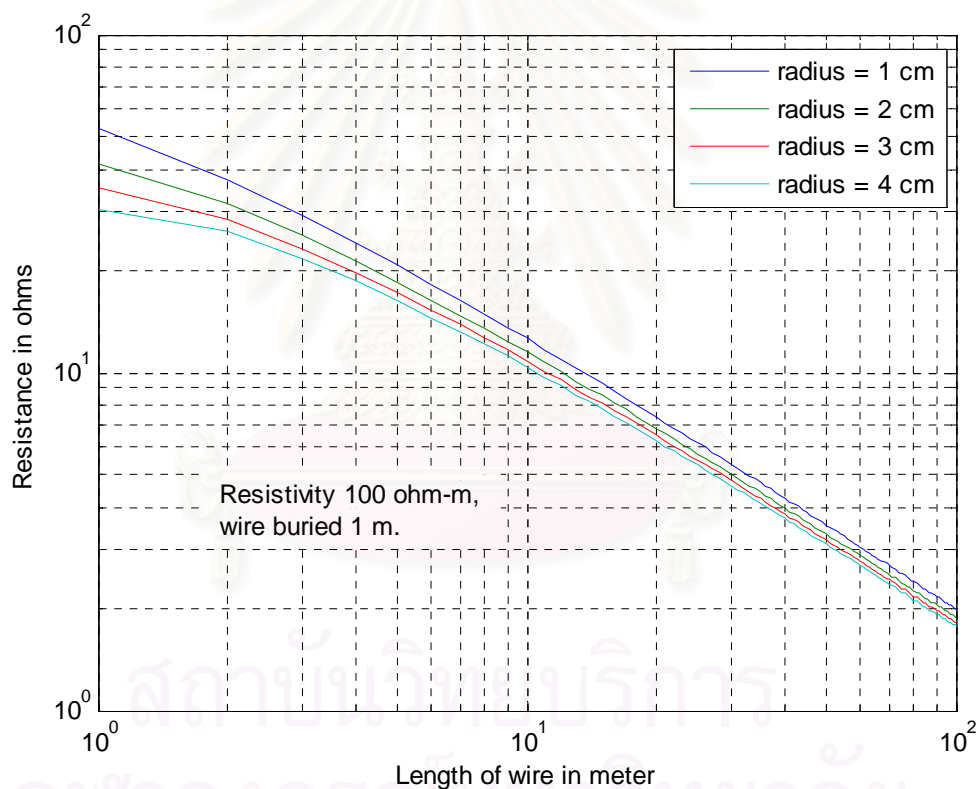


รูปที่ 7.5 กรณีเปลี่ยนจำนวนหลักดิน

เมื่อเพิ่มจำนวนหลักดินค่าความต้านทานจะลดลง แต่ระยะห่างของหลักดินต้องมากกว่าความยาวหลักดิน ถ้าความยาวหลักดินมากกว่าระยะห่างหลักดินเมื่อเพิ่มจำนวนหลักดิน จะมีผลต่อความต้านทานเพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 7.5

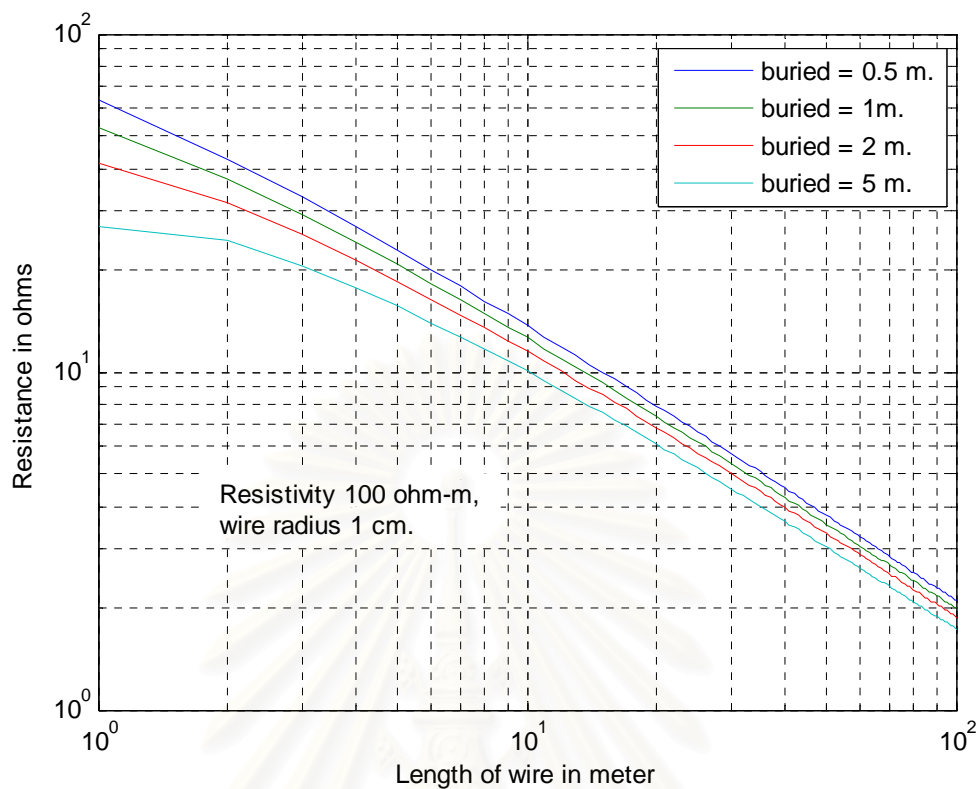
7.1.3 Horizontal One Wire

การต่อลงดินรูปแบบนี้มีพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาอยู่ 3 ตัวคือขนาดตัวนำ ความยาวและความลึก ซึ่งการวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความยาวตัวนำ โดยจะทำการเปลี่ยนขนาดและความลึกของตัวนำ ดังรูปที่ 7.6 และ รูปที่ 7.7 จากผลที่ได้จะพบว่าเมื่อเราเพิ่มขนาดของตัวนำมากขึ้นค่าความต้านทานจะลดลง แต่ที่ความยาวตัวนำมากขึ้นค่าความต้านทานที่ลดลงจะเปลี่ยนแปลงน้อยลง



รูปที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์ของ Horizontal One Wire ที่รัศมีต่างๆ

เมื่อเราเปลี่ยนความลึกของตัวนำ จากกราฟรูปที่ 7.7 จะเห็นว่าความต้านทานจะลดลง อย่างเห็นได้ชัดที่ความยาวตัวนำช่วงหนึ่งเท่านั้น เมื่อความยาวตัวนำมากขึ้นความแตกต่างของความต้านทานจะลดลง

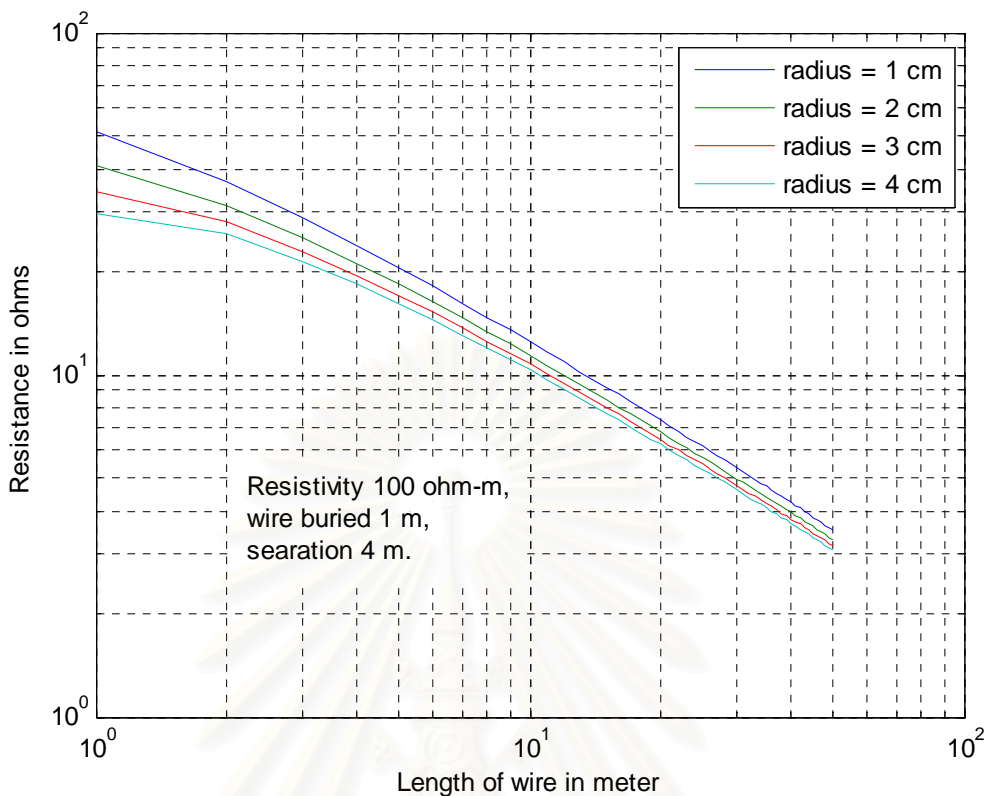


รูปที่ 7.7 ผลการวิเคราะห์ของ Horizontal One Wire ที่ความลึกต่างๆ

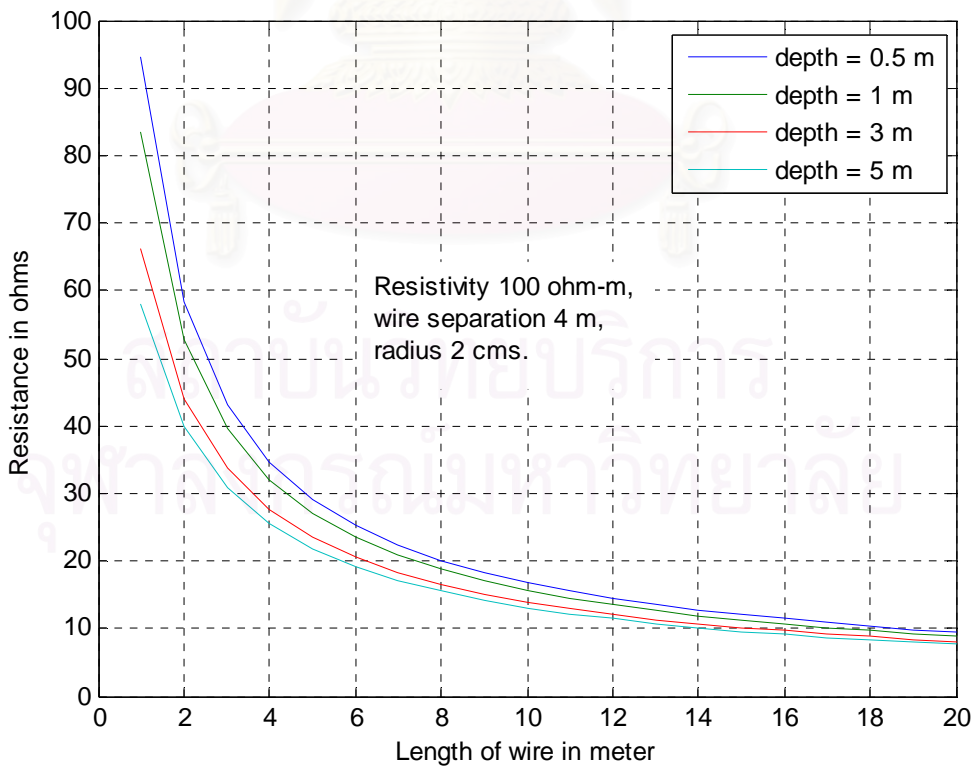
จากทั้งสองกรณีจะพบว่าความยาวของตัวนำจะมีผลกับความต้านทานของระบบอย่างเห็นได้ชัดที่ความยาวระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งในการติดตั้งระบบต่อลงดินจริงๆ ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวนำที่ยาวเกินความจำเป็น

7.1.4 Horizontal Two Wires

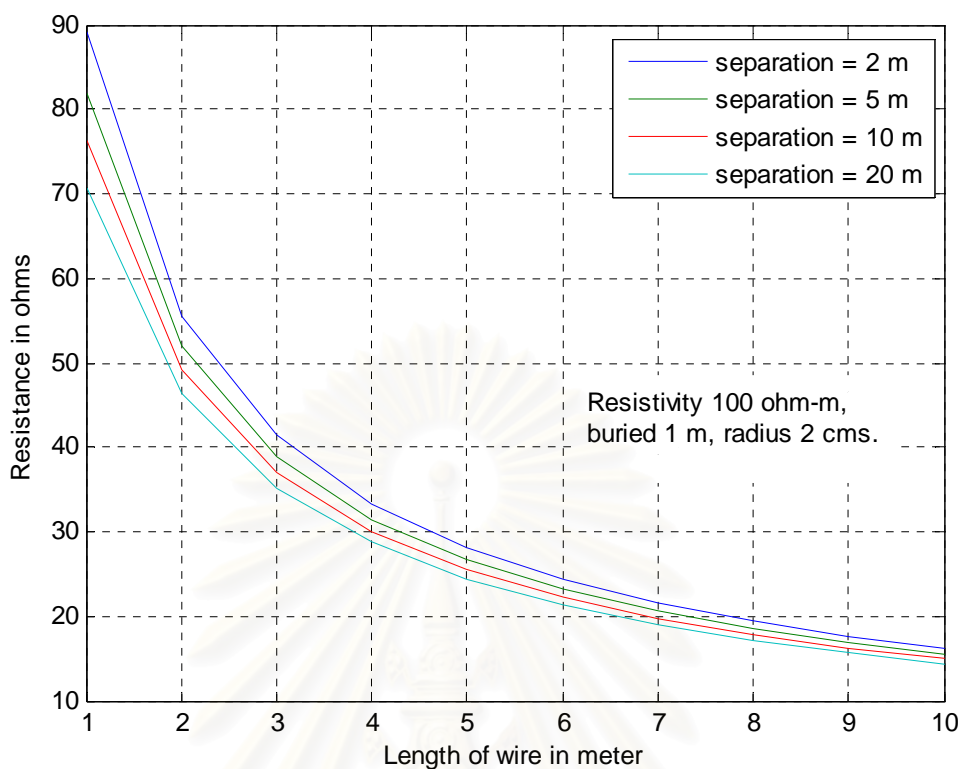
จากรูปที่ 7.8 และ 7.9 จะพบว่าผลที่เกิดจากขนาดและความลึกคล้ายกับตัวนำเส้นเดียว ดังนั้นเราจะวิเคราะห์เฉพาะผลที่เกิดจากระยะห่างระหว่างตัวนำดังรูปที่ 7.10 จากรูปจะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำมากขึ้นค่าความต้านทานจะต่ำลง แต่ค่าความต้านทานที่ลดลงนี้จะมีค่าไม่มากนักเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างตัวนำที่เพิ่มขึ้นและเมื่อความยาวยิ่งมากขึ้นความแตกต่างยิ่งน้อยลง



รูปที่ 7.8 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่รัศมีต่างกัน



รูปที่ 7.9 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความลึกต่างกัน

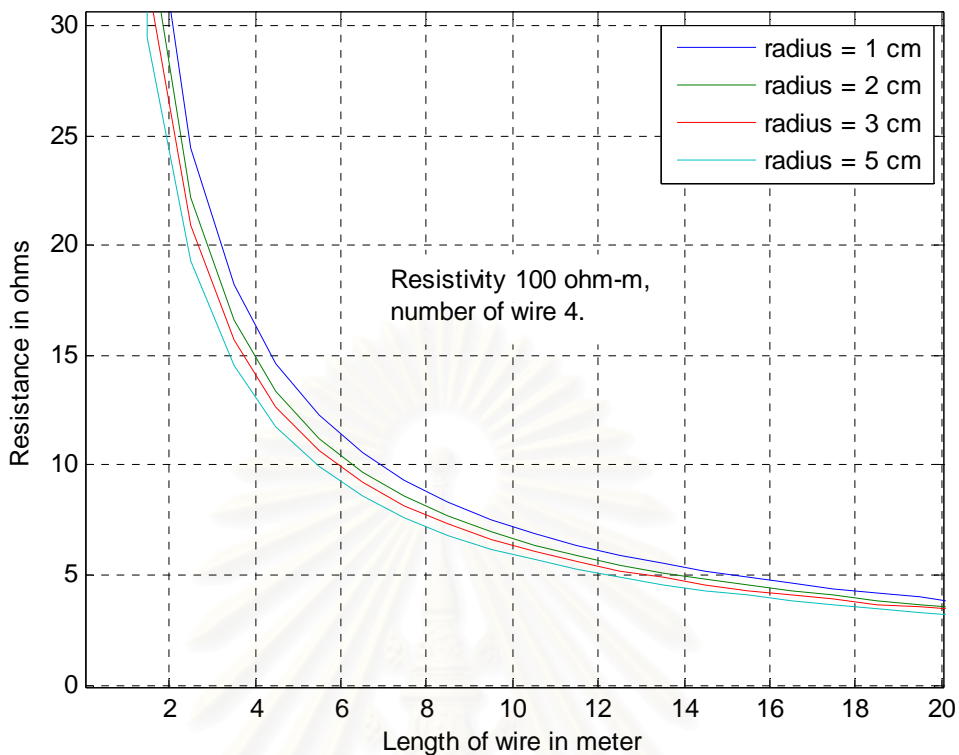


รูปที่ 7.10 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ระยะห่างตัวต่างกัน

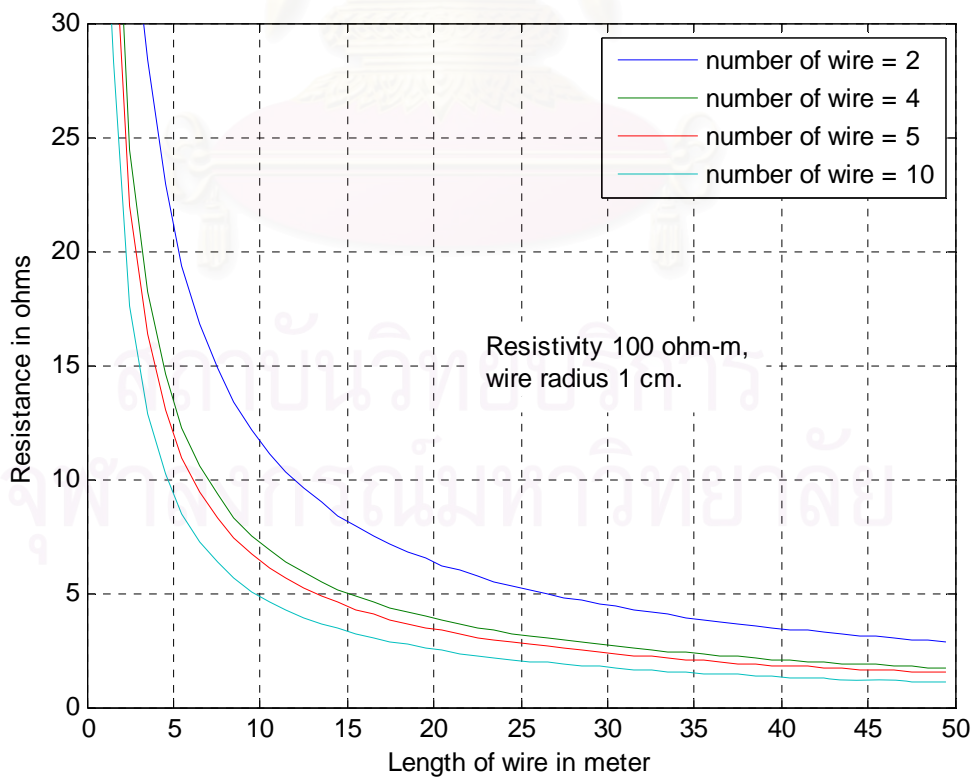
7.1.5 Radial Wire

สำหรับการวิเคราะห์การต่อลงดินแบบแนวรัศมี เราจะดูผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและจำนวนตัวนำของระบบการต่อลงดินดังรูปที่ 7.11 และ 7.12 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเราเพิ่มขนาดของตัวนำจะทำให้ความต้านทานลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนตัวนำมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อความยาวตัวนำมากขึ้นความต้านทานก็จะลดลงด้วยแต่ที่ความยาวระดับหนึ่งถ้าความยาวเพิ่มขึ้นอีกจะไม่มีผลกับความต้านทานมากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

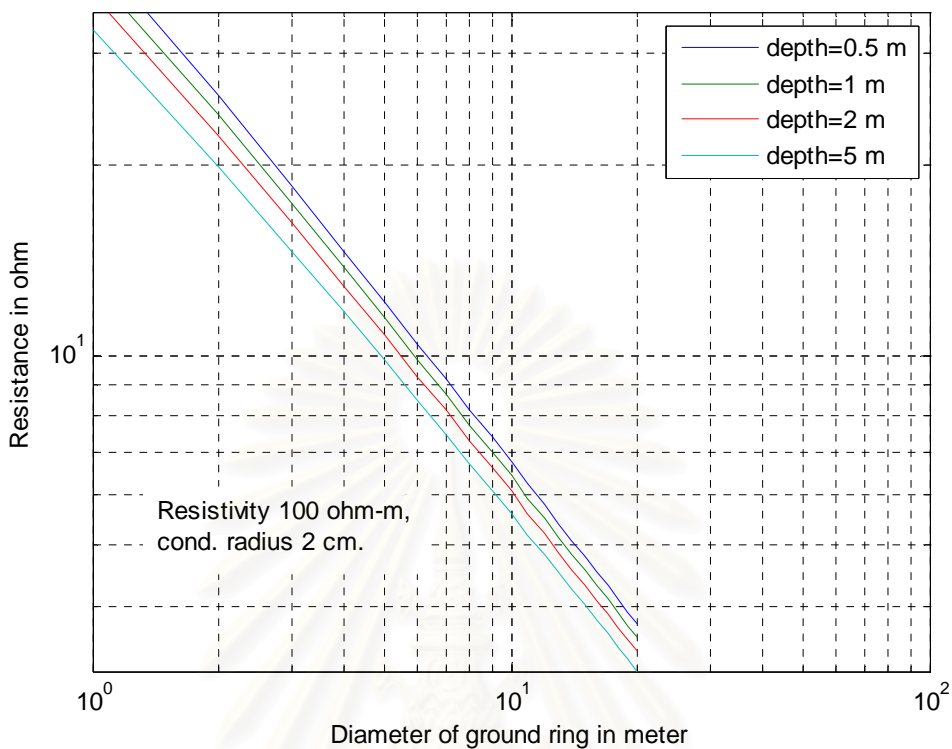


รูปที่ 7.11 กราฟแสดงผลของ radial wire ที่ 4 ตัวนำ

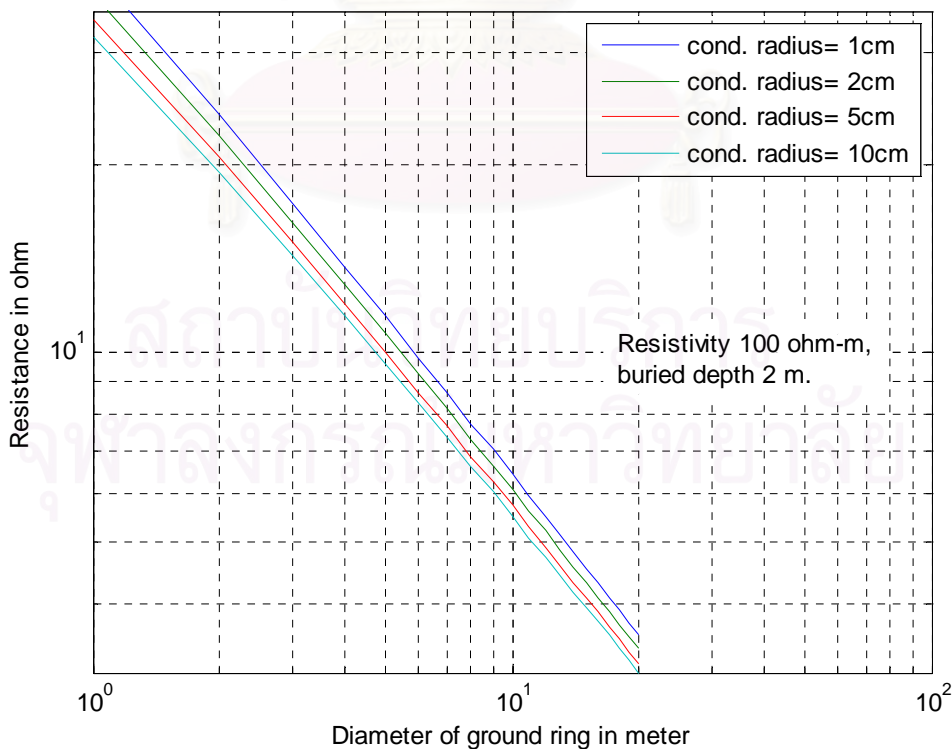


รูปที่ 7.12 ผลการวิเคราะห์ของ radial wire ที่รัศมี 1 cm.

7.1.6 Ring Ground



รูปที่ 7.13 แสดงกราฟของ Ring Ground รัศมี 2 cm.



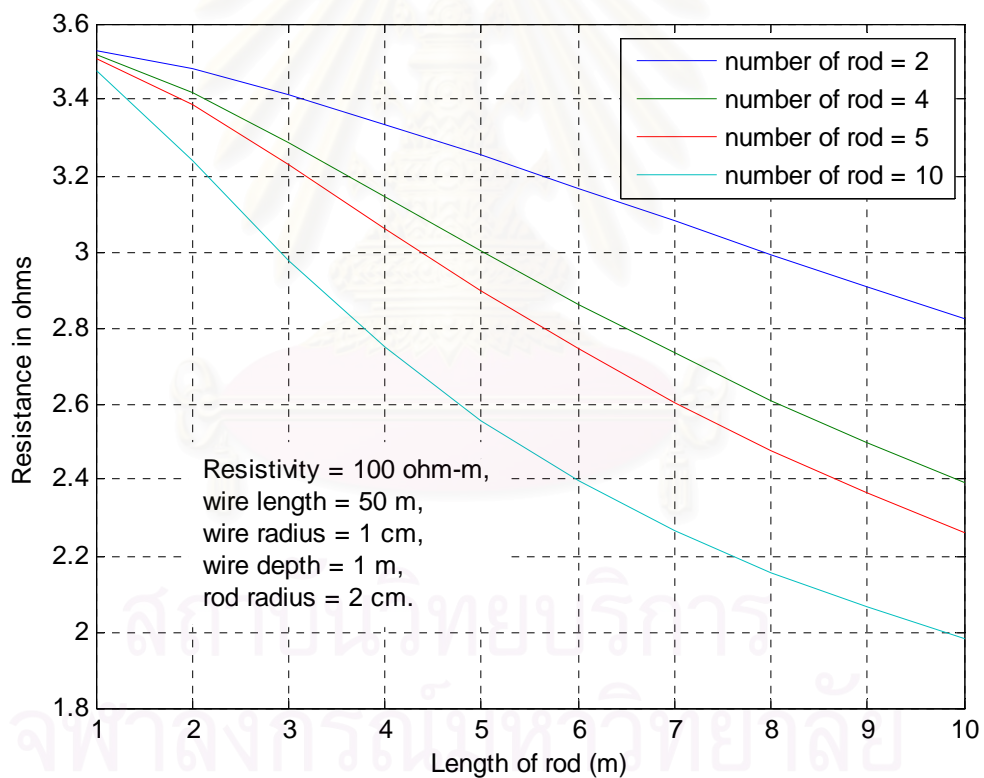
รูปที่ 7.14 แสดงกราฟของ Ring Ground ที่ความลึก 2 m.

จากรูป 7.13 และ 7.14 พบว่าความต้านทานของ Ring Ground จะลดลงเมื่อขนาดและความลึกในการฝังดินมากขึ้นซึ่งค่าความต้านทานจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนตัวนำเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือการเพิ่มความยาวของตัวนำนั่นเอง

7.1.7 Compound Ground

เนื่องจากการต่อลงดินรูปแบบนี้มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของหลายตัวซึ่งผลของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่มีต่อค่าความต้านทานเป็นอย่างไร ได้แสดงให้เห็นแล้วในรูปแบบก่อนหน้านี้ ในตอนนี้เราจะวิเคราะห์ผลของจำนวนหลักดิน โดยเราจะให้องค์ประกอบอื่นคงที่ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 7.15

จากรูปที่ 7.15 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนหลักดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานมีค่าลดลง แต่ถ้าจำนวนหลักดินมากเกินไปก็จะได้ความต้านทานดั่งที่ต้องการ ดังนั้นการจัดวางหลักดินรูปแบบนี้ควรให้ระยะห่างระหว่างหลักดินมากกว่าความยาวของหลักดิน

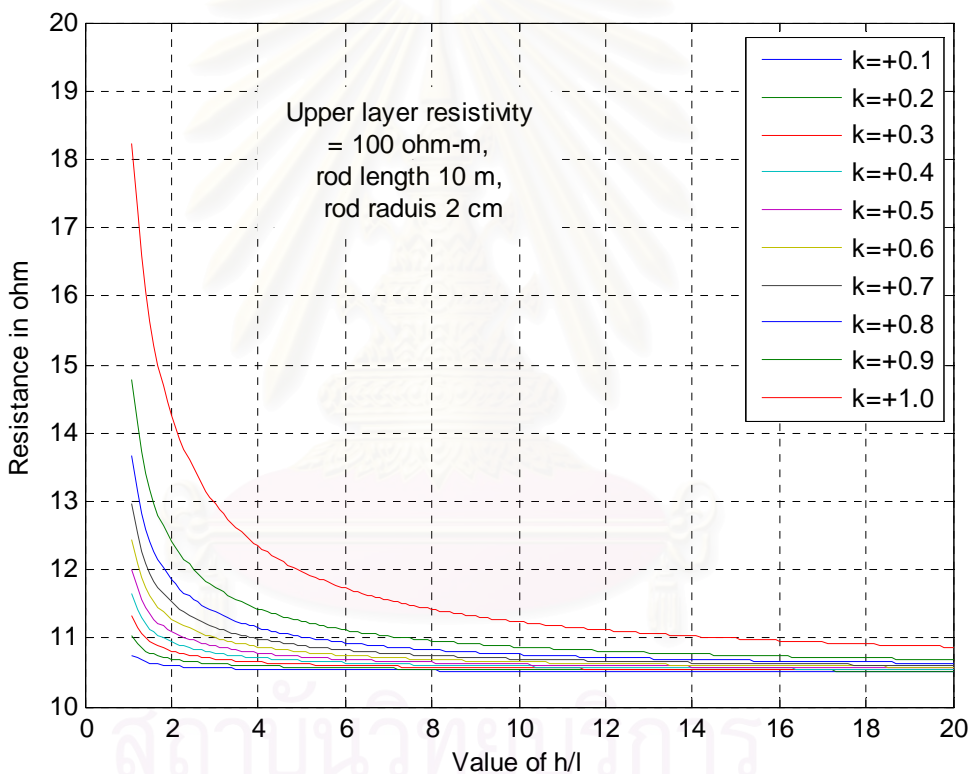


รูปที่ 7.15 เปรียบเทียบความต้านทานของ Compound Ground เมื่อจำนวนหลักดินต่างกัน

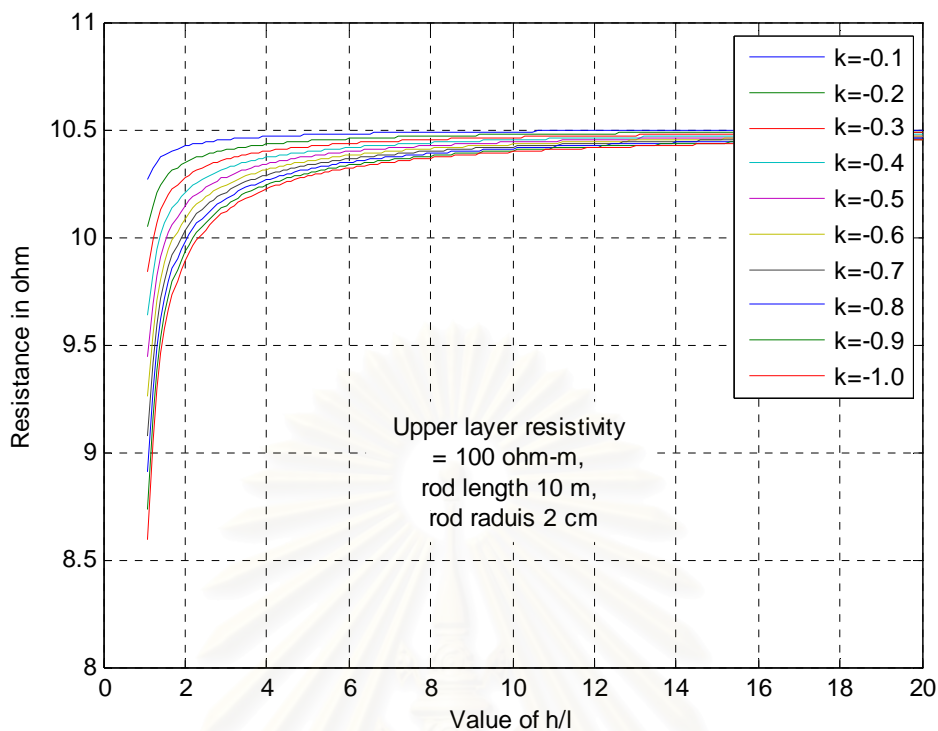
7.2 วิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาเป็นดินสองชั้น

7.2.1 Driven Rod in Upper Layer

ในการวิเคราะห์เราจะทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดเนื่องจากชั้นดินกรณีที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมากกว่าและน้อยกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง โดยให้องค์ประกอบอื่นมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 7.16 และ 7.17 จากรูปเราจะพบว่ากรณีที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนน้อยกว่าดินชั้นล่างจะทำให้ความต้านทานลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากหลักดินฝังอยู่ในดินชั้นบนเท่านั้นทำให้กรณีที่มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนต่ำกว่าจะได้ความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ต่ำกว่า

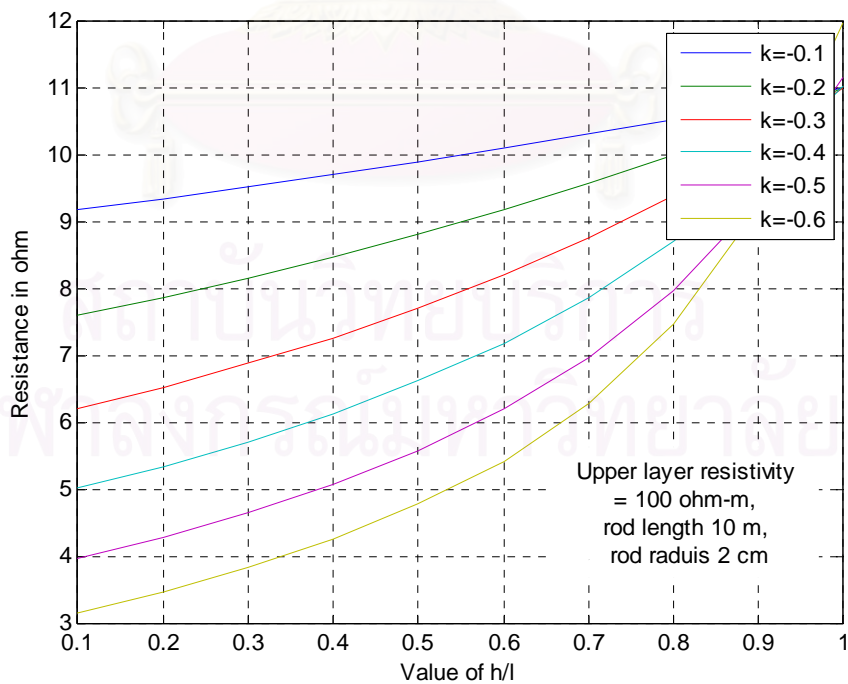


รูปที่ 7.16 ความต้านทานกรณีความต้านทานจำเพาะชั้นล่างมากกว่าชั้นบน

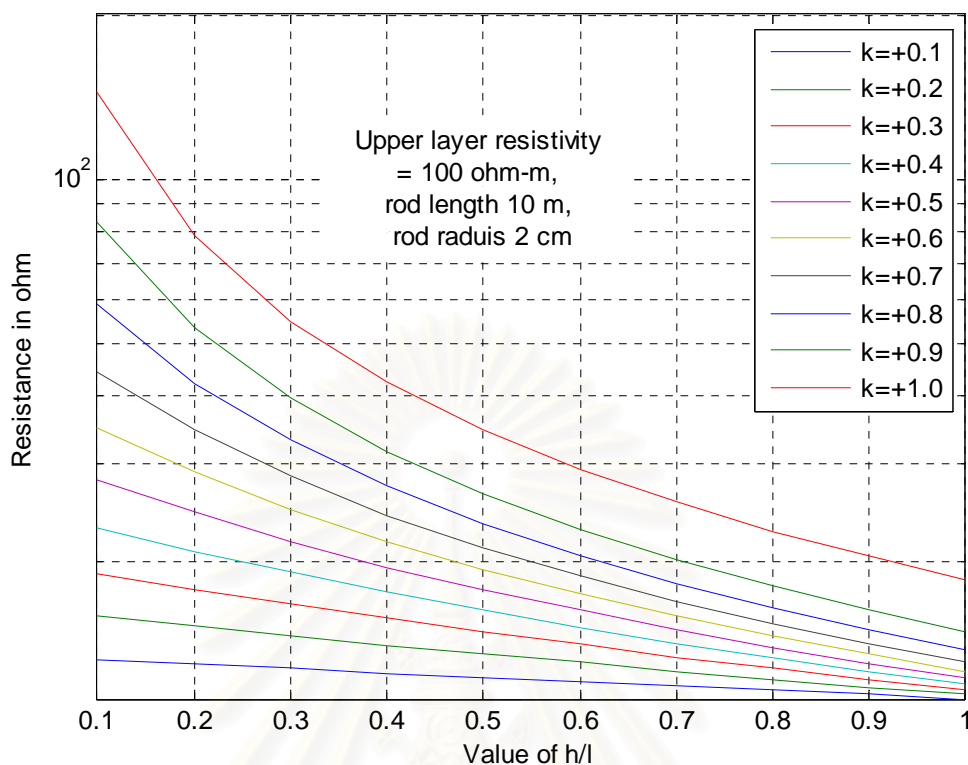


รูปที่ 7.17 ความต้านทานกรณีความต้านทานจำเพาะชั้นล่างน้อยกว่าชั้นบน

7.2.2 Driven Rod Penetrating Two Layers



รูปที่ 7.18 แสดงความต้านทานกรณีหลักดินฝังในดินทั้งสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนมากกว่าชั้นล่าง

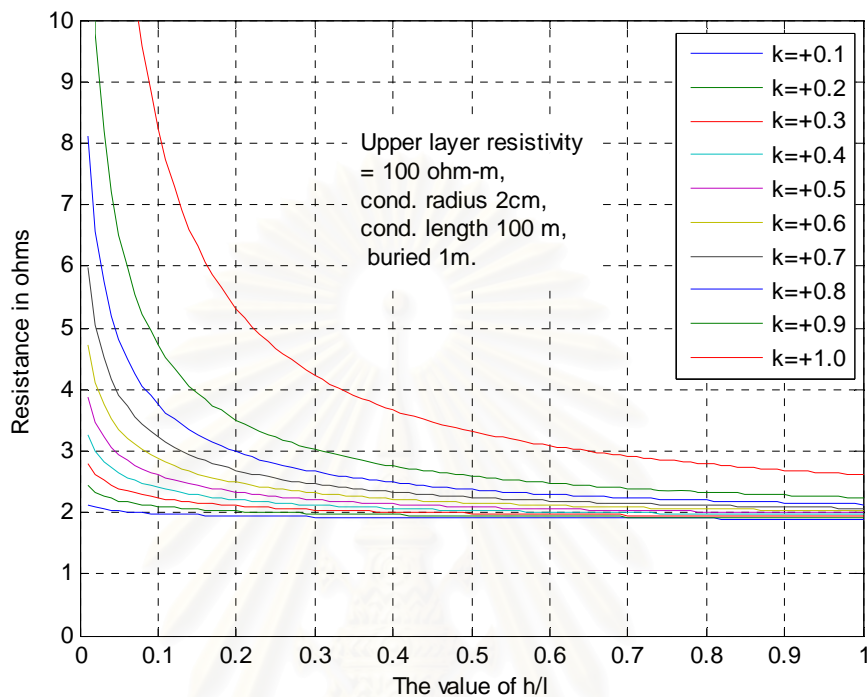


รูปที่ 7.19 แสดงความต้านทานกรณีหลักดินฝังในดินทั้งสองชั้นโดยความต้านทานจำเพาะดินชั้นบนน้อยกว่าชั้นล่าง

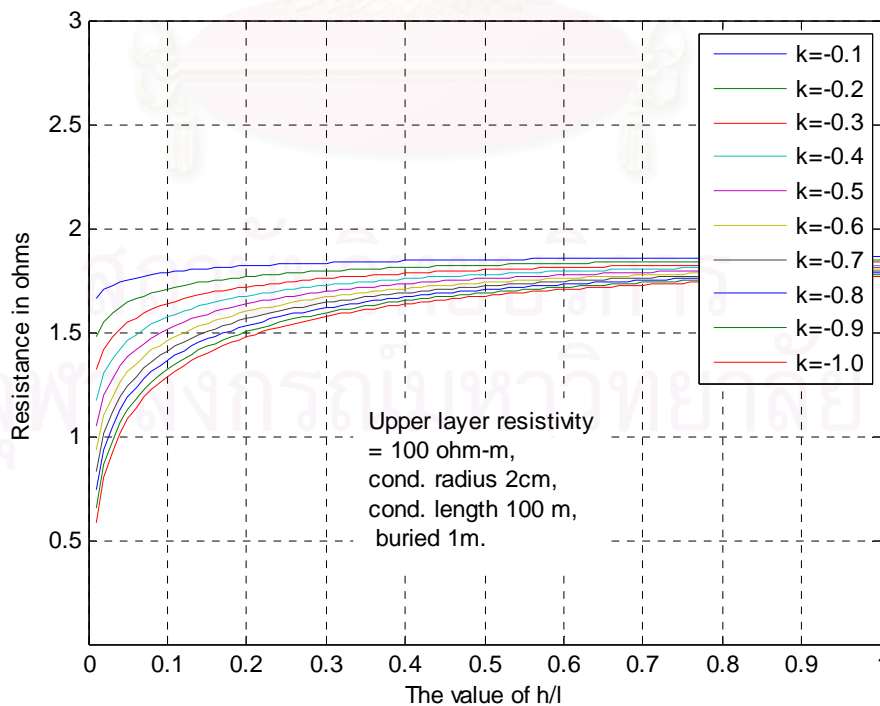
จากรูปที่ 7.18 และ 7.19 จะพบว่าความต้านทานของ Driven Rod Penetrating Two Layers จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่หลักดินฝังอยู่ คือถ้าส่วนของหลักดินส่วนมากฝังในชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่าจะทำให้ได้ความต้านทานที่ต่ำกว่า ยิ่งถ้าหลักดินฝังอยู่ในดินชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่ามากเท่าไรค่าความต้านทานที่ได้ก็จะต่ำลง

7.2.3 Buried Conductor in Upper Layer

สำหรับการวิเคราะห์เราจะทำการดูผลที่เกิดเนื่องจากการความต้านทานจำเพาะของชั้นดินที่มีต่อความต้านทานของระบบต่อลงดิน



รูปที่ 7.20 ความต้านทานของตัวนำในดินชั้นบนที่มีความต้านทานจำเพาะน้อยกว่าดินชั้นล่าง



รูปที่ 7.21 ความต้านทานของตัวนำในดินชั้นบนที่มีความต้านทานจำเพาะมากกว่าดินชั้นล่าง

จากรูปที่ 7.20 และ 7.21 จะพบว่าความต้านทานของ Buried Conductor in Upper Layer จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นชั้นที่ตัวนำฝังอยู่ โดยดินชั้นล่างจะมีผลต่อความต้านทานคือ ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมากกว่าดินชั้นบน จะทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างน้อยกว่าดินชั้นบนจะมีผลให้ความต้านทานลดลง

7.3 วิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลกระทบของกระแสฟ้าผ่า

ในกรณีพิจารณาผลทรานเซียนท์ (กระแสฟ้าผ่า) แบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ไม่มีการแตกตัวของดิน (without soil ionization) และ กรณีที่มีการแตกตัวของดิน (soil ionization)

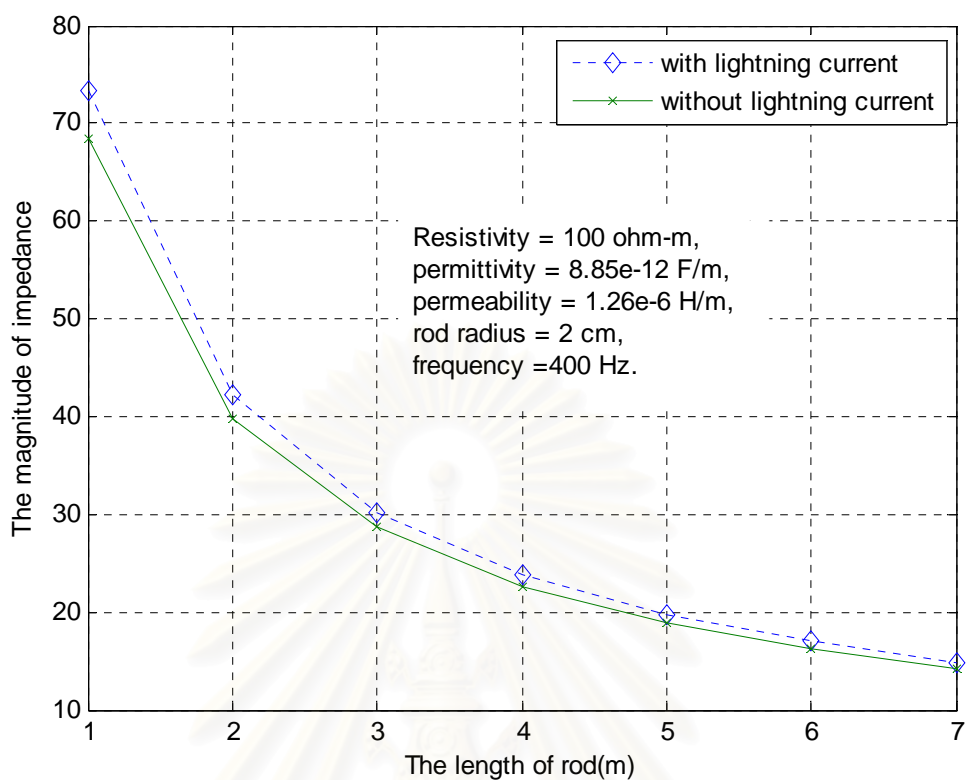
7.3.1 Without Soil Ionization

7.3.1.1 Driven Rod

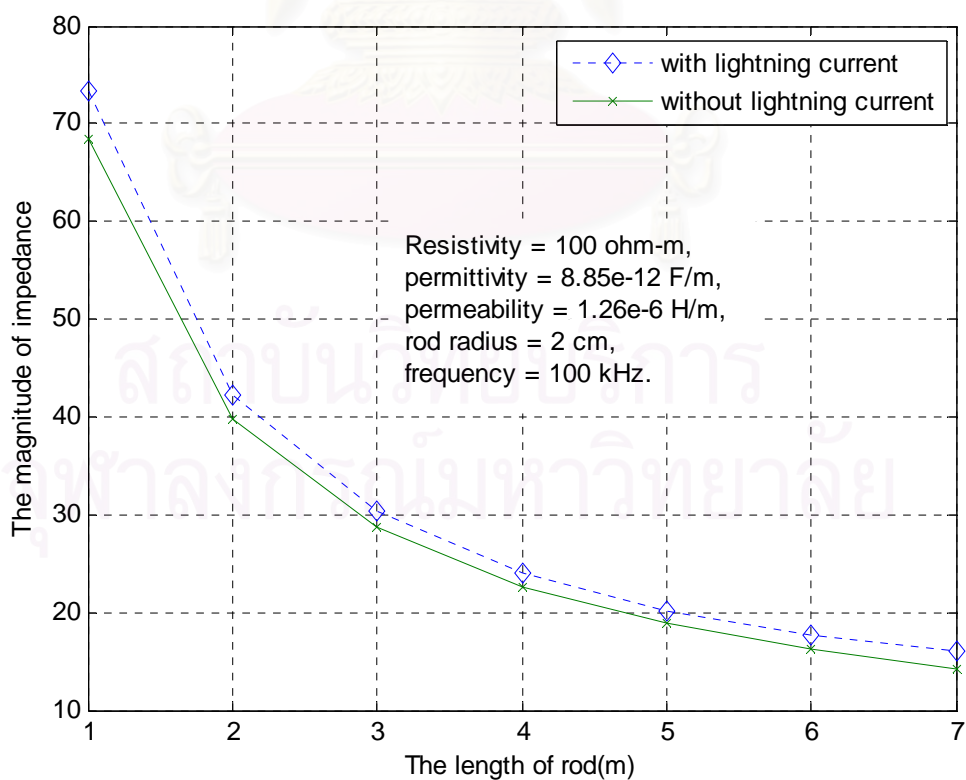
การต่อลงดินแบบหลักดิน (Driven Rod) ในการวิเคราะห์เราจะทำการเปรียบเทียบความต้านทานระหว่างกรณีคิดผลของกระแสฟ้าผ่าและไม่คิดผลของกระแสฟ้าผ่า โดยจะใช้ค่า Permittivity และ Permeability ของ free space ในการวิเคราะห์

เพื่อทำการวิเคราะห์การต่อลงดิน ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นกราฟเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างกรณีที่รวมผลของกระแสฟ้าผ่าและกรณีไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่า โดยจะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นผ่านทางความถี่ของกระแสฟ้าผ่า ดังรูปที่ 7.22 ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 kHz เช่น ที่ความถี่ 400 Hz พบว่าความต้านทานของ Driven Rod ทั้งสองกรณีจะแตกต่างกันบ้างในช่วงความยาวหลักดินช่วงต้นโดยกรณีรวมผลของกระแสฟ้าผ่าจะมีค่าสูงกว่า แต่เมื่อความยาวหลักดินเพิ่มขึ้นความต้านทานทั้งสองกรณีแทบไม่ต่างกันเลย เช่นที่ความยาวหลักดินประมาณ 6 เมตร จากรูปที่ 7.22 ซึ่งผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่า Inductance และ Capacitance ที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินนั่นเอง

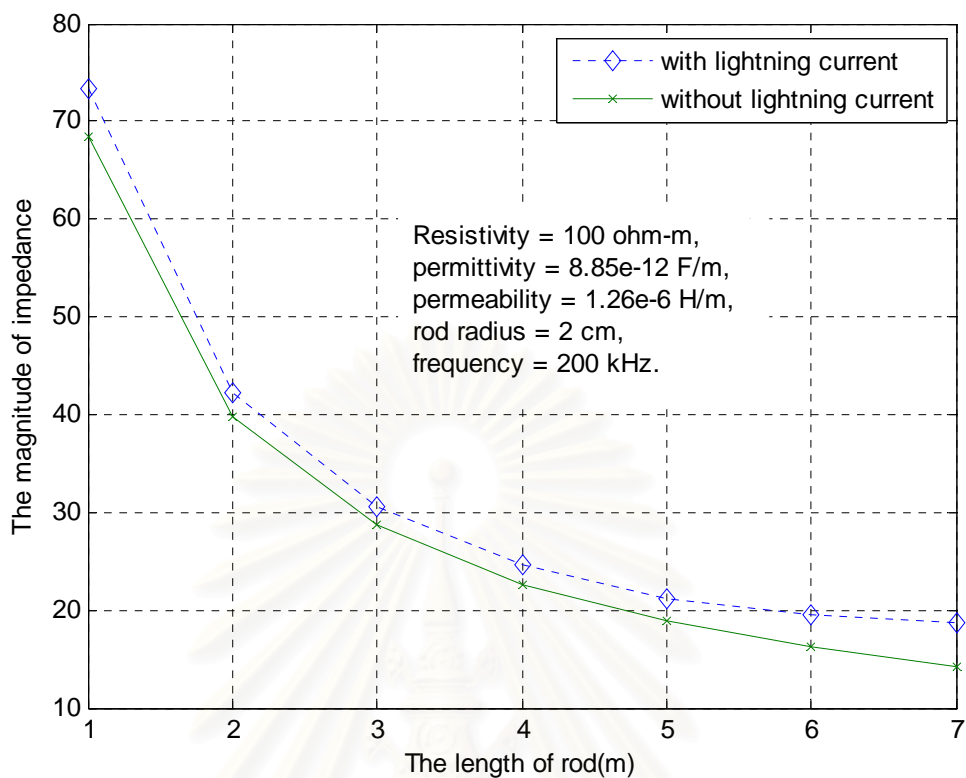
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



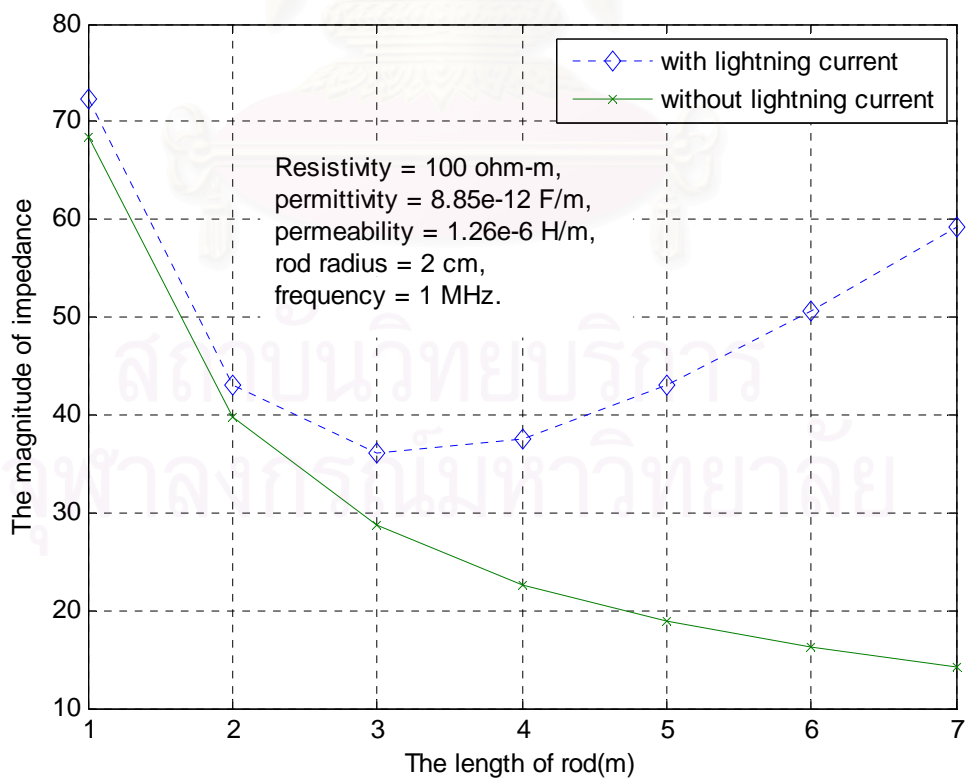
รูปที่ 7.22 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 400 Hz.



รูปที่ 7.23 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 100 kHz.



รูปที่ 7.24 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 200 kHz.



รูปที่ 7.25 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 1 MHz.

จากรูปที่ 7.23, 7.24 และ 7.25 จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเกิน 100 kHz ความต้านทานของระบบต่อลงดินจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า Self inductance ของหลักดินเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวหลักดินมากขึ้น ดังตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบความต้านระหว่างรวมผลและไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่า ที่ความถี่ต่างๆ ของหลักดินรัศมี 2 cm. โดยใช้ค่า Permittivity และ Permeability ของ free space

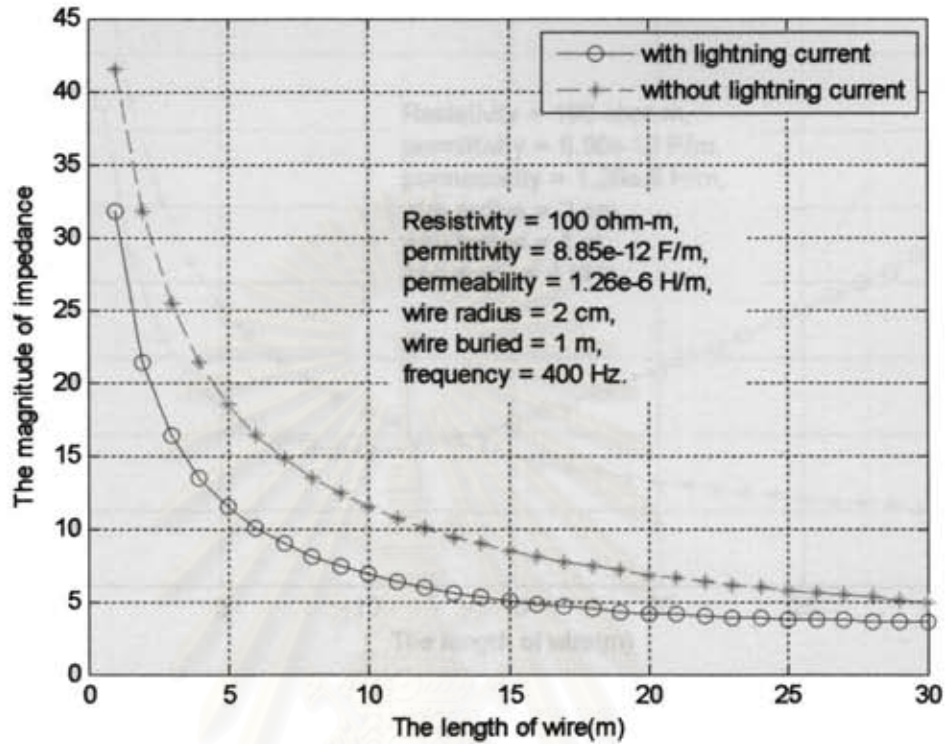
ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบค่าความต้านทานกรณีรวมผลและไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่าของหลักดิน

ความถี่	400 Hz		100 kHz		200 kHz		1 MHz	
	รวม	ไม่รวม	รวม	ไม่รวม	รวม	ไม่รวม	รวม	ไม่รวม
1	73.3	68.4	73.3	68.4	73.3	68.4	72.3	68.4
2	42.2	39.7	42.2	39.7	42.2	39.7	43.1	39.7
3	30.3	28.6	30.3	28.6	30.5	28.6	36.0	28.6
4	23.8	22.6	24.0	22.6	24.5	22.6	37.5	22.6
5	19.8	18.8	20.2	18.8	21.2	18.8	43.1	18.8
6	17.0	16.2	17.6	16.2	19.5	16.2	50.6	16.2
7	14.9	14.2	16.0	14.2	18.8	14.2	59.2	14.2
8	13.3	12.7	14.9	12.7	18.9	12.7	68.3	12.7
9	12.0	11.5	14.3	11.5	19.5	11.5	77.7	11.5
10	11.0	10.5	14.0	10.5	20.5	10.5	87.4	10.5

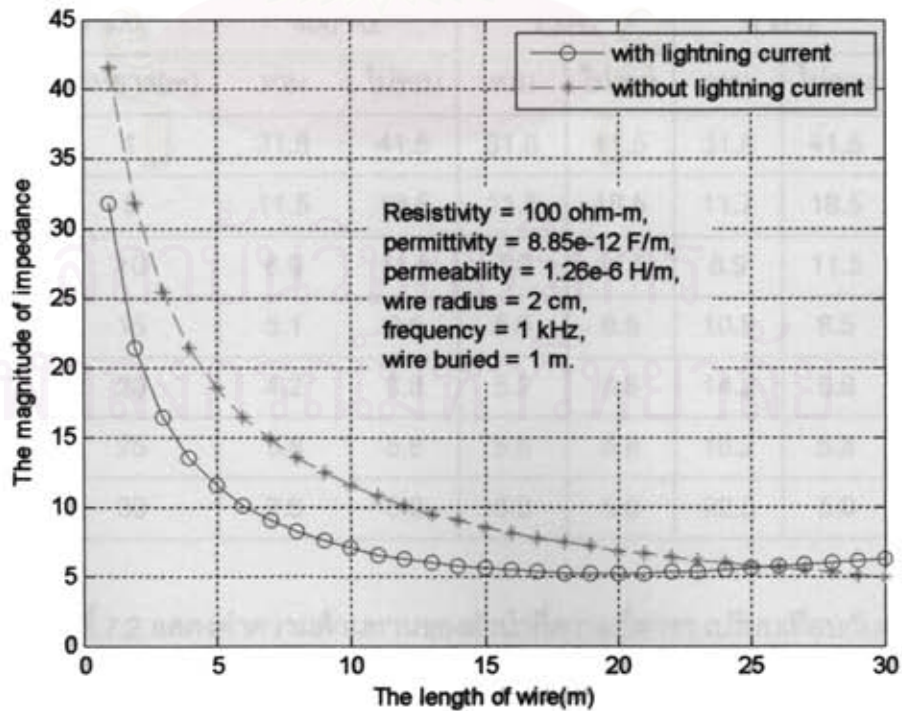
7.3.1.2 Horizontal Wire

สำหรับการวิเคราะห์การต่อลงดินแบบตัวนำฝังดิน (Horizontal Wire) ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นกราฟเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างกรณีที่ยรวมผลของกระแสฟ้าผ่า และกรณีไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่า โดยจะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นผ่านทางความถี่ของกระแสฟ้าผ่า จากรูปที่ 7.26, 7.27 และ 7.28 จะพบว่าความต้านทานของระบบต่อลงดินทั้งสองกรณีจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยกรณีรวมผลของกระแสฟ้าผ่า จะมีค่าต่ำกว่าในช่วงความยาวตัวนำช่วงต้นช่วงหนึ่งเท่านั้นซึ่งเป็นผลมาจากค่า Capacitive loss ในดินขึ้นกับความถี่ ยิ่งความถี่สูงขึ้นความยาวตัวนำที่ทำให้ความต้านทานกรณีของกระแสฟ้าผ่า ต่ำกว่ายิ่งสั้นลง แต่เมื่อความยาวตัวนำเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งความต้านทานกรณีของกระแสฟ้าผ่าจะเพิ่มขึ้นและสูงกว่ากรณีไม่คิดผลของกระแส

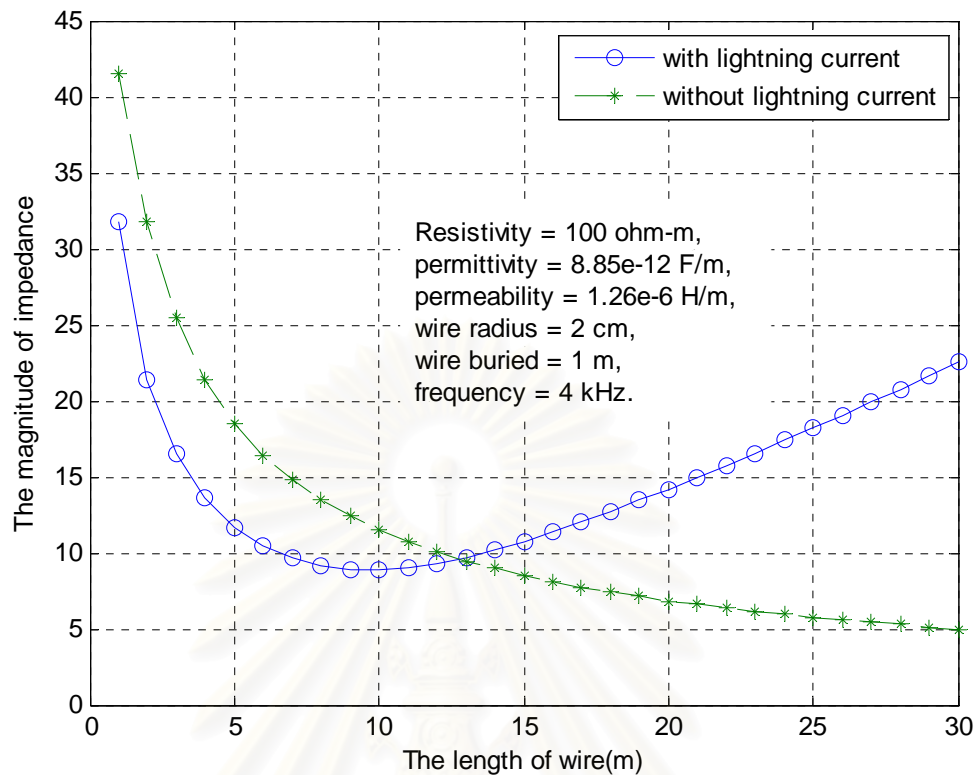
ฟ้าผ่า ซึ่งความถี่ที่เริ่มทำให้ Self Inductance มีผลให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเพิ่มขึ้นเรียกว่า Frequency threshold



รูปที่ 7.26 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 400 Hz.



รูปที่ 7.27 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 1 kHz.



รูปที่ 7.28 แสดงกราฟผลการวิเคราะห์ที่ความถี่ 4 kHz.

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานกรณีสวมผลและไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่าของตัวนำ

ความถี่	400 Hz		1 kHz		4 kHz	
	รวม	ไม่รวม	รวม	ไม่รวม	รวม	ไม่รวม
ความยาว(m)						
1	31.8	41.5	31.8	41.5	31.8	41.5
5	11.5	18.5	11.5	18.5	11.7	18.5
10	6.9	11.5	7.0	11.5	8.9	11.5
15	5.1	8.5	5.5	8.5	10.8	8.5
20	4.2	6.8	5.2	6.8	14.2	6.8
25	3.8	5.8	5.6	5.8	18.2	5.8
30	3.6	5.0	6.3	5.0	22.5	5.0

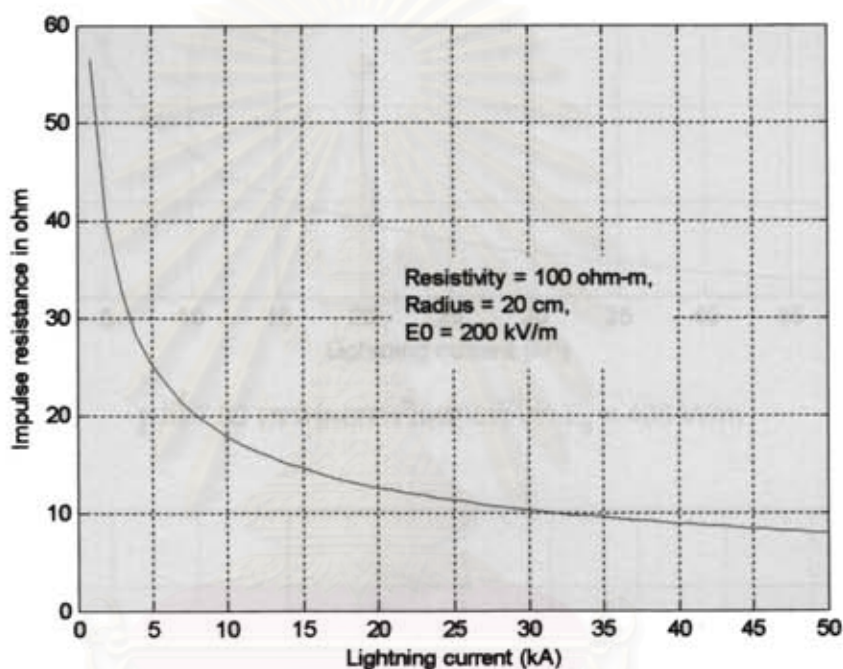
ตารางที่ 7.2 แสดงค่าความต้านทานของตัวนำที่ความถี่ต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีไม่รวมผลของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นความต้านทานจะลดลงถึงค่าหนึ่งแล้วจะกลับ

เพิ่มขึ้นอีกเมื่อเทียบกับความยาวตัวนำ โดยใช้ค่า Permittivity และ Permeability ของ free space ความต้านทานจำเพาะ 100 โอห์ม-เมตร, รัศมี 2 cm, ฝังลึก 1 เมตร

7.3.2 With Soil Ionization

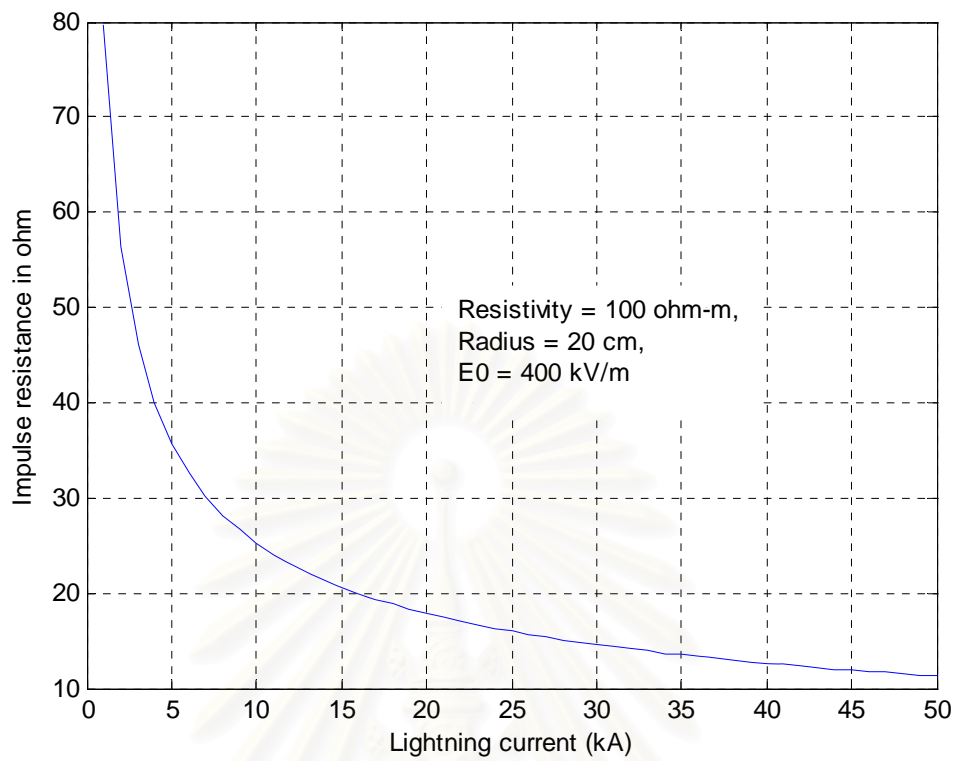
7.3.2.1 Hemisphere Electrode

ในการวิเคราะห์การต่อลงดินแบบอิเล็กโทรดครึ่งทรงกลม (Hemisphere Electrode) เราจะดูผลของการแตกตัวของดินที่มีต่อความต้านทานของระบบต่อลงดินโดยเราจะพิจารณาค่า Critical gradient (E_0) ของดิน ซึ่งปกติมีค่าประมาณ 400 kV/m.

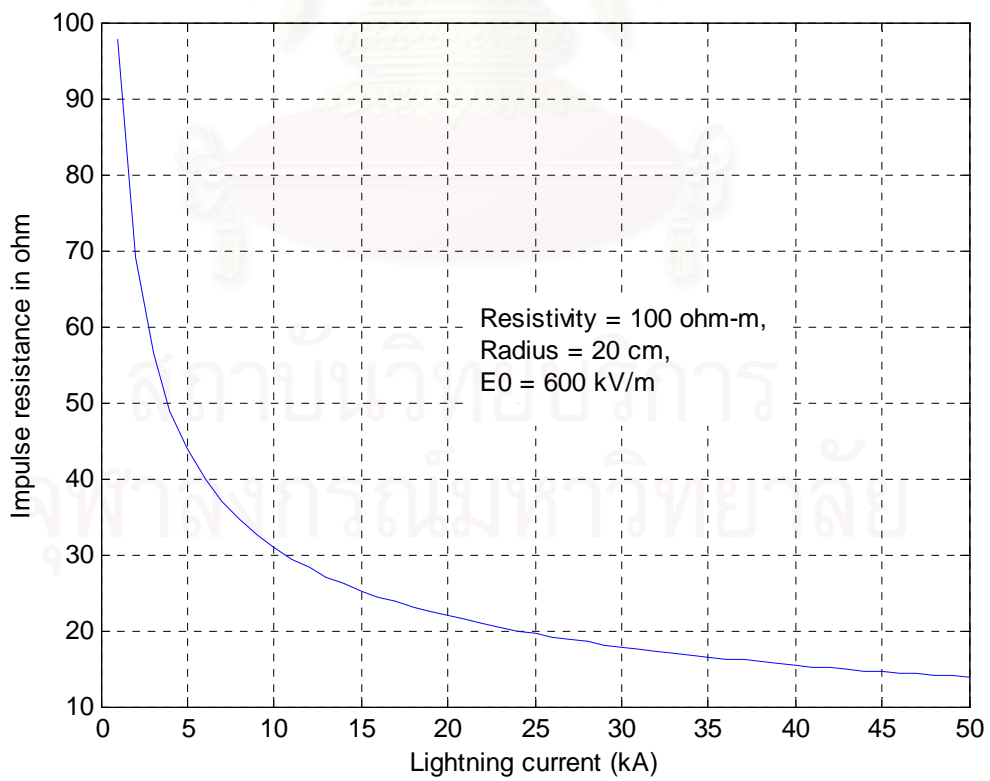


รูปที่ 7.29 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 200$ kV/m.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.30 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 400$ kV/m

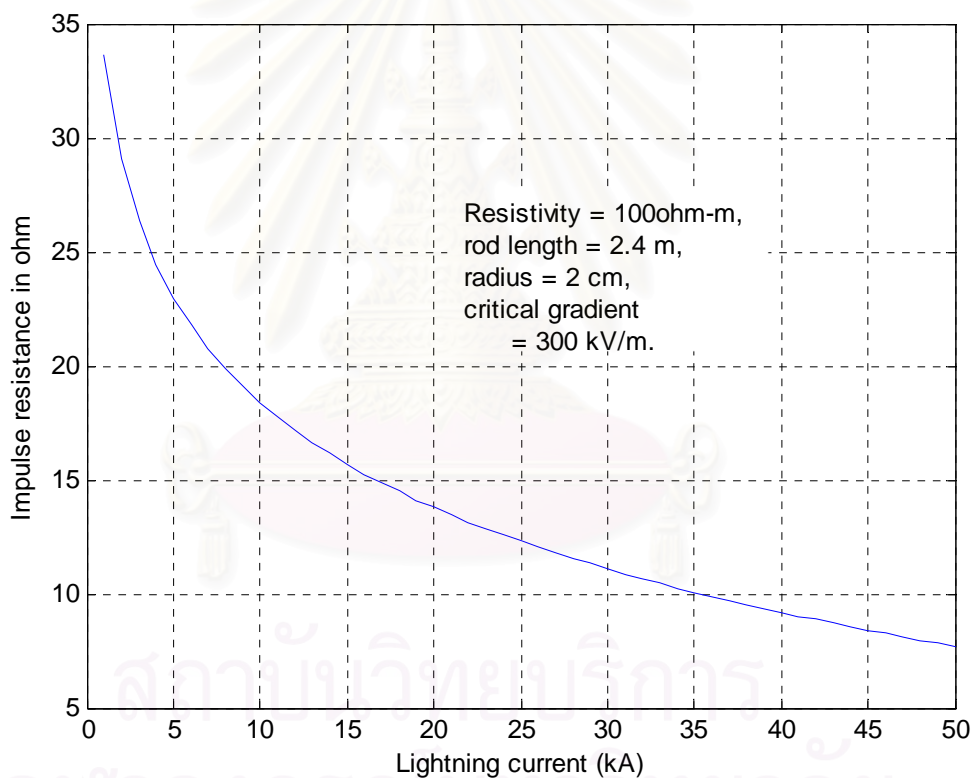


รูปที่ 7.31 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 600$ kV/m

จากรูปที่ 7.29, 7.30 และ 7.31 จะพบว่าที่กระแสค่าเดียวกัน ถ้าค่า Critical gradient (E_0) ของดินน้อยจะทำให้ค่าความต้านทานต่ำ แต่ถ้าค่า Critical gradient ของดินสูงจะทำให้ค่าความต้านทานสูงด้วยเนื่องจากดินมีการแตกตัวได้ยากกว่าและการแตกตัวของดินยังขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าด้วย

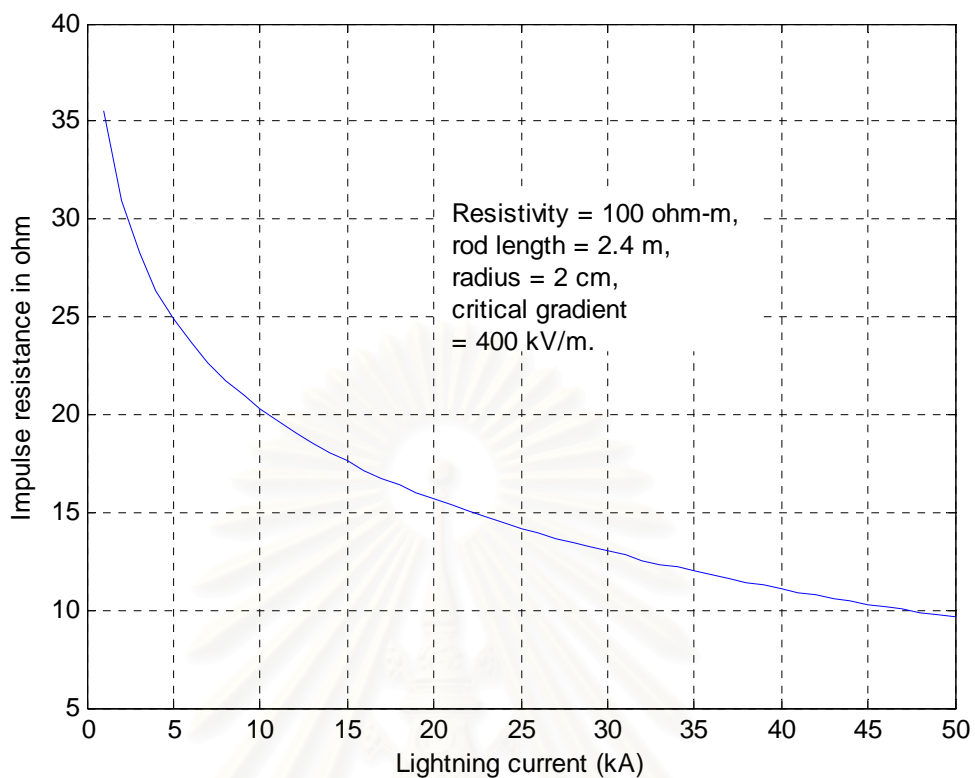
7.3.2.2 Rod Electrode

จากรูปแบบการต่อลงดินแบบหลักดิน (Rod Electrode) เมื่อมีกระแสไหลสู่หลักดินแล้วกระแสจะแพร่กระจายตัวออกรอบหลักดินซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นรอบหลักดิน ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า Critical gradient (E_0) ของดิน จะทำให้ดินรอบหลักดินเกิดการแตกตัวกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า

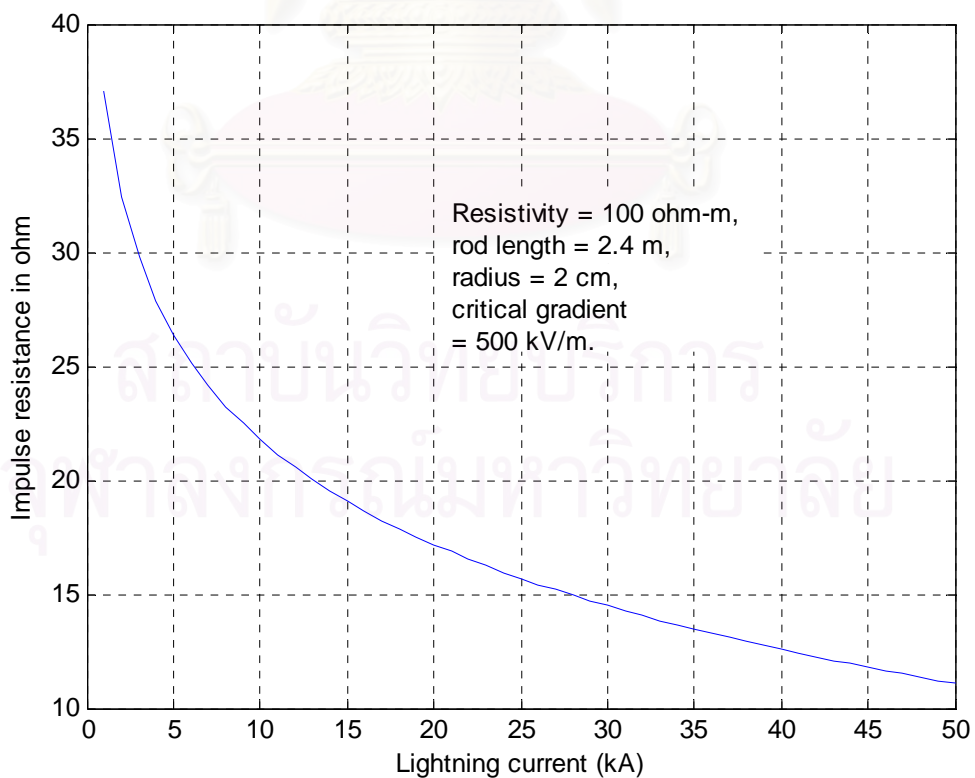


รูปที่ 7.32 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 300$ kV/m

จากรูปที่ 7.32, 7.33 และ 7.34 ข้างบนเราจะพบว่าที่กระแสค่าเดียวกัน ถ้าค่า Critical gradient (E_0) ของดินน้อยจะทำให้ค่าความต้านทานต่ำ แต่ถ้าค่า Critical gradient ของดินสูงจะทำให้ค่าความต้านทานสูงด้วยเนื่องจากดินมีการแตกตัวได้ยากกว่า เพราะเมื่อดินรอบหลักดินมีการแตกตัวจะทำให้การนำกระแสของดินดีขึ้นซึ่งทำให้การคายประจุหรือปล่อยกระแสได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 7.33 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 400$ kV/m



รูปที่ 7.34 กราฟผลการวิเคราะห์ที่ค่า $E_0 = 500$ kV/m

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ถึงระบบการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาผลของชั้นดิน และกระแสฟ้าผ่า โดยแยกเป็นกรณีดินชั้นเดียว กรณีดินสองชั้น และกรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า หลังจากนั้นได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ระบบการต่อลงดินทั้งสามกรณี โดยโปรแกรมได้พัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรม MATLAB [16, 17] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในงานวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ในปัจจุบัน และจะมีบทบาทสำคัญในอนาคต

การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาผลของชั้นดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่พิจารณาแต่ละชั้นดินจะกำหนดให้มีค่าคงที่

8.1 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีดินชั้นเดียว

จากการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีดินชั้นเดียวพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความต้านทานจะแปรผันโดยตรงกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity)
2. ความต้านทานจะแปรผกผันกับความยาวหลักดินหรือ ตัวนำ
3. ความต้านทานจะแปรผกผันกับขนาดของหลักดินหรือ ตัวนำ
4. ความต้านทานจะแปรผกผันกับจำนวนหลักดินหรือ ตัวนำ

8.2 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีดินสองชั้น

จากการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีดินสองชั้นพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินสามารถสรุปได้ดังนี้

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) จากการวิเคราะห์จะพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินแต่ละชั้นที่ต่างกันจะส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยถ้าตัวนำหรือหลักดินส่วนใหญ่วางตัวอยู่ในชั้นดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำกว่าจะให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินต่ำกว่ากรณีวางตัวบนชั้นที่มีความต้านทานจำเพาะที่สูงกว่า

8.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า

จากการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้ากรณีพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่าพบว่า กรณีไม่มีการแตกตัวของดิน (Without Soil Ionization) จะเป็นการวิเคราะห์ที่พิจารณาผลเนื่องจากความถี่ของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งในกรณีของหลักดินการพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่าจะมีความเหมาะสมมากกว่าในการออกแบบระบบต่อลงดิน สำหรับกรณีตัวนำฝังดินถ้าความยาวตัวนำน้อยไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่า แต่ถ้าความยาวตัวนำมากจะต้องพิจารณาผลของกระแสฟ้าผ่าด้วยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสฟ้าผ่า

กรณีมีการแตกตัวของดิน (With Soil Ionization) จะเป็นการวิเคราะห์ที่พิจารณาผลเนื่องจากขนาดของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าของดินสูงถึงค่าหนึ่งจะทำให้ดินเกิดการแตกตัวกลายเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ดี ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าน้อย แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าด้วย ซึ่งในการออกแบบระบบต่อลงดินการไม่คิดผลการแตกตัวของดินจะได้ค่าที่เหมาะสมกว่า

8.4 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาซอฟต์แวร์โปรแกรมนี้ต่อไปในอนาคต ควรพัฒนาให้ซอฟต์แวร์มีความสามารถในการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินให้สามารถวิเคราะห์ชั้นดินตั้งแต่สองชั้น (Double Layer Soil) ขึ้นไปจนถึงชั้นดินที่มีโครงสร้างดินหลายชั้น (Multi Layer Soil) ซึ่งดินแต่ละชั้นจะมีค่าความต้านทานจำเพาะ (Soil Resistivity) ไม่คงที่ โดยปกติจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Std. 1243-1997.
- [2] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou and B. C. Papadias, "Time Domain Analysis of Grounding Electrodes Impulse Response", IEEE Trans. Power Apparatus System, 2003.
- [3] Y. Liu, "Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments", Uppsala, Acta Universitatis Upsaliensis, 2004.
- [4] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou: "Transmission Line Modeling of Grounding Electrodes and Calculation of their Effective Length under Impulse Excitation", IEEE Trans. on PWRD, 2005.
- [5] G. F. Tagg, "Earth Resistances", London, George Newnes Limited, 1964
- [6] ANSI/IEEE Std 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc., New York 2000
- [7] Weimin SUN, Qi SU, Jinliang HE and others, "Optimal Design Analysis of Grounding Grid for Substations Built in Nonuniform Soil," IEEE Journal 2000, ISBN: 0-7803-6338-8
- [8] J.G. Sverak. "Sizing of Ground Conductors Against Fusing". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-100, No.1 January 1981.
- [9] ชาญชัย เลาะห์พงศ์ไพศาล. การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจ่ายโดยพิจารณาผลของชั้นดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- [10] E. D. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems", Copyright ©1968 by Bell Telephone Laboratories, Incorporated.
- [11] H.R. Seedher, J.K.Arona. Estimation of Two Layer Soil Parameters Using Finite Wenner Resistivity Expressions. IEEE Transactions on Power Delivery 7, 3 (July 1992)
- [12] R. Rudenberg: "Electrical shock waves in power systems", Cambridge Harvard Univ Press, 1968, pp. 273-277.

- [13] CIGRE Working Group 33.01 (Lightning), "Guide to procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines," CIGRE Technical Brochure 63, Oct. 1991
- [14] F. Popolansky, "Generalization of Model Measurements Results of Impulse Characteristics of Concentrated Earth," CIGRE sc 33-80 (WG01), IWD, Aug. 1986. "Determination of Impulse Characteristics of Concentrated electrodes," CIGRE sc 33-86(WG-1), IWD, 1986.
- [15] THAPAR, B., and GROSS, E. T. B. "Grounding Grids for High-Voltage Stations, Part IV, Resistance of Grounding Grids in Non Uniform Soil", IEEE Transactions, Oct 1963, Power Apparatus Systems vol 82, pp 782-788.
- [16] Chapman, Stephen J. MATLAB Programming for engineers. 2nd ed , BROOKS/COLE, 2002
- [17] มนต์ สังวรศิลป์ และวรรรัตน์ ภัทรอมรกุล. 2543. คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส, ISBN 974-8237-91-5.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้น

ก.1 ความต้านทานจำเพาะปรากฏของดิน (Two-Layer Soil Apparent Resistivity)

จากแบบจำลองของดิน (ดังรูปที่ ก.1) กำหนดคุณสมบัติดังนี้

$$\text{ความลึกชั้นบน} = h$$

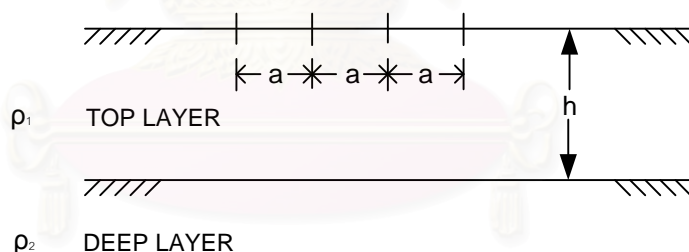
$$\text{ความต้านทานจำเพาะชั้นบน} = \rho_1$$

$$\text{ความต้านทานจำเพาะชั้นล่าง} = \rho_2$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อน} \quad K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (\text{ก-1})$$

ความต้านทานจำเพาะหาโดยวิธี Wenner ผลของค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏที่ได้เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (a) ในเทอมของพารามิเตอร์ข้างบนความต้านทานจำเพาะปรากฏสามารถแสดง [5] เป็น

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right] \quad (\text{ก-2})$$



รูปที่ ก-1 ดินสองชั้น

ก.2 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจำเพาะแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

แบบจำลองของดินแบบนี้กำหนดคุณสมบัติดังนี้

$$\text{ความต้านทานจำเพาะใกล้ผิวดิน} = \rho_1$$

$$\text{ความต้านทานจำเพาะที่ความลึกมากๆ} = \rho_2$$

$$\text{ค่าคงที่} = \lambda$$

ความต้านทานจำเพาะหาโดยวิธี Wenner จะได้ความต้านทานจำเพาะปรากฏซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะห่างอิเล็กโทรด, a กำหนด โดย [15]

$$\rho(a) = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)e^{-\lambda a} (2 - e^{-\lambda a}) \quad (\text{ก-3})$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิวัฒน์ สามพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย