



การออกแบบ ระบบกราฟิกโดยอาศัยคอมพิวเตอร์
GROUND DESIGNING BY COMPUTOR

นายบุญเยื่อน จินตนา

MR. BOONYUEN JINTANA

วัน เดือน ปี.....	-4.ค.ค.2541
เลขทะเบียน.....	038652
เลขเรียกหนังสือ.....	T.4009&13887

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทางอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038652

ปริญญาโทปีการศึกษา 2540

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบระบบกราฟด์โดยอาศัยคอมพิวเตอร์

(GROUND DESIGNING BY COMPUTOR)

ผู้จัดทำ

นาย บุญเขื่อน จินตนา 38012101

รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. พิพัฑฒ์ เลหาสงคราม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบ Ground โดยอาศัยคอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นายบุญเชื่อน จินตนา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. พิพัฒน์ เลหาสงคราม
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรม สาขาวิศวกรรม
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าทางอุตสาหกรรม
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการศึกษาและวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมกับลักษณะงานต่างๆ เช่น ในกรณีของสถานีไฟฟ้าย่อย โรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆ ก็มีลักษณะการใช้แรงดันไฟฟ้าสูงแตกต่างกัน ตามพื้นที่การใช้งานต่างๆ ของโรงงาน ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีวิธีการออกแบบที่รวดเร็วและเหมาะสมต่างกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและประหยัด โดยจะใช้ตะแกรงตัวนำต่อลงดินที่ปราศจากตัวนำต่อลงดินในแนวดิ่งซึ่งอ้างอิงจากหลักการของ IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE Std.80-1986 โดยได้ปรับปรุงเพิ่มเติมสามารถออกแบบให้เร็วขึ้น จะกล่าวถึงการศึกษา วิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลกระทบ ต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญในการออกแบบระบบ ต่อลงดิน ได้แก่ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณเกิดความผิดพลาดเมื่อใช้หลักการดังกล่าว โดยจะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธีต่างๆ เพื่อนำไปสู่การเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสม และมีความผิดพลาดน้อยที่สุด และปลอดภัยมากที่สุดเช่นกัน

นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ยังได้รวบรวม วิธีการแก้ไขและปรับปรุงระบบต่อลงดินให้มีค่าความปลอดภัยสูงขึ้น โดยใช้วัสดุที่หาง่ายในวิธีการต่างๆ กัน ตลอดจนถึงหลักการและวิธีการวัดค่าต่างๆ ที่จำเป็นในการออกแบบระบบต่อลงดิน

TESIS TITLE DESIGN OF GROUNDING SYSTEM BY COMPUTER
STUDY MR. BOONYUAN JINTANA
THESIS ADVISOR ASSOC. PRGF. PIPAT LOAHASORNGKRAM
LEVEL OF STUDY BACHELOR OF ENGINEER IN INSTRUMENT
DEPARTMENT INSTRUMENT ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
ACADEMIC YEAR 1997

ABSTRACT

This thesis concerns the study and the design of the grounding system which is conformed to different kind of work, Such as substation : and plants of different demand of high voltage for hrese pasticular examples, each of them exists the most convenient and the most effective design by using ground grid without vertical ground rod as principally refered in IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE Std.80-1986 Furthermore, this thesis is also contained of the study of main factors that effect the security system of grounding design ; like the case of soil resistivity which is constantly varied and the case of different shape of ground grid the mentioned conditions are frequently lead mistake in calculation the table of comparison and the percentage of default of each case will be show in order to help users to finalize their decision.

กิติกรรมประกาศ

ในท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ร.ศ. พิพัทธ์ เลหาสงคราม เป็นอย่างสูง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาต่างๆ เป็นอย่างดีเสมอมา พร้อมทั้งขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสถาบันแห่งนี้ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าจนทำให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของระบบต่อลงดิน	1
1.2 ปัญหาที่พบในการออกแบบระบบต่อลงดิน	2
1.3 เป้าหมายของการออกแบบระบบต่อลงดินในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการออกแบบ	5
2.1 รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน	6
2.1.1 วงจรสมมูลของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสไฟฟ้า	7
2.1.2 ค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้	10
2.1.3 ค่าแรงดันสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้	11
2.1.4 ค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน	12
2.1.5 ค่าความยาวของตัวนำต่อลงดินที่สั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัย	13
2.2 การออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย	14
2.3 การออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆ	17
2.3.1 การพิจารณาเลือกระบบต่อลงดิน	17
2.3.2 การแยกระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	17
นอกจากระบบต่อลงดินของโรงงานอุตสาหกรรม	

สารบัญ

หน้า

2.3.3 การรวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกับระบบต่อลงดิน ของบริเวณอื่นๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม	18
- กรณีขนาดพื้นที่ของโรงงานมีขนาดไม่กว้างขวางมาก	
- กรณีขนาดพื้นที่ของโรงงานมีขนาดกว้างขวางมาก	
บทที่ 3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญของระบบต่อลงดิน	22
3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน	23
3.2 ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน	26
บทที่ 4 การปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดิน	29
4.1 วิธีลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน	29
- โดยการเพิ่มความยาวของตัวนำตะแกรงต่อลงดิน	29
- โดยการเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง	30
- โดยการใช้สารเคมี	
4.2 วิธีเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่า	33
บทที่ 5 หลักการและวิธีการวัดค่าที่สำคัญของระบบต่อลงดิน	37
5.1 การวัดค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะของดิน	37
5.1.1 วิธี Four Point test	37
5.1.2 วิธี Driven Rod	42
5.2 ค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโตรดระบบต่อลงดิน	46
5.2.1 วิธี Fall-of-Potential	46
5.2.2 วิธี Driven Rod	49

บทนำ

บทที่ 1

1.1 ความสำคัญของระบบต่อลงดิน

การต่อลงดินนี้ มีจุดประสงค์หลักก็เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่นักคนที่เกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมาก และความต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟทั้งหลายมีปริมาณมาก การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจำนวนมากไปยังส่วนต่างๆ ของประเทศที่มีระยะทางไกลๆ จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อลดความสูญเสียในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งการใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงดังกล่าว จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ที่เข้ามาเกี่ยวข้องในบริเวณนั้นๆ ได้

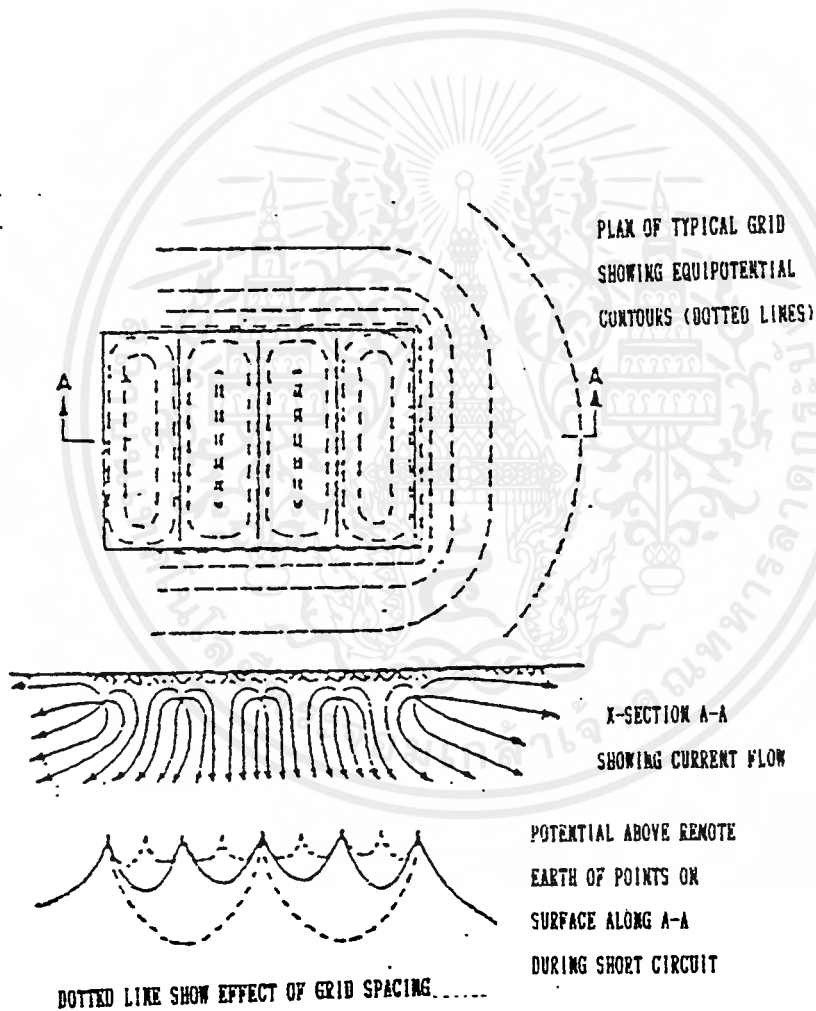
ไม่ว่าจะเป็นสถานีไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการปรับระดับแรงดันให้สูงขึ้น เพื่อใช้ในการส่ง, จ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือสถานีไฟฟ้าย่อยที่รับและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมหรือบริเวณใด ๆ ที่มีการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งในบริเวณดังกล่าว จำเป็นที่จะต้องทำให้เกิดความปลอดภัยอันเนื่องมาจากความแตกต่างของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradient) ที่จะเกิดขึ้น เมื่อเกิดสถานะผิดปกติ เช่น การลัดวงจรลงดิน (Ground Fault) และอื่นๆ ฯลฯ โดยการต่อลงดิน (Grounding) ซึ่งการต่อลงดินนี้ นอกจากจะทำให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานแล้ว ยังทำให้เกิดความปลอดภัยกับอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย เพราะระบบต่อลงดินจะช่วยเป็นทางให้กระแสไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสได้อย่างสะดวก และทำให้อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับ Fault ทำงานได้ดีขึ้นด้วย จึงเหมือนกับว่าทำให้ระบบมีการทำงานดีขึ้นอีกด้วย โดยการต่อลงดินจะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การต่อลงดินของระบบ (Grounding System)
2. การต่อลงดินของบริภัณฑ์หรืออุปกรณ์ (Equipment Grounding)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการต่อลงดินของระบบ (Grounding System) โดยใช้ตะแกรงตัวนำต่อลงดิน (Ground Grid) เป็นทางไหลกลับของกระแสลัดวงจรขณะเกิดสถานะผิดปกติ เพื่อลดความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยด้วยวิธีที่สะดวกและเชื่อถือได้ โดยอ้างอิงหลักการจาก IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE Std.80-1986 [1]

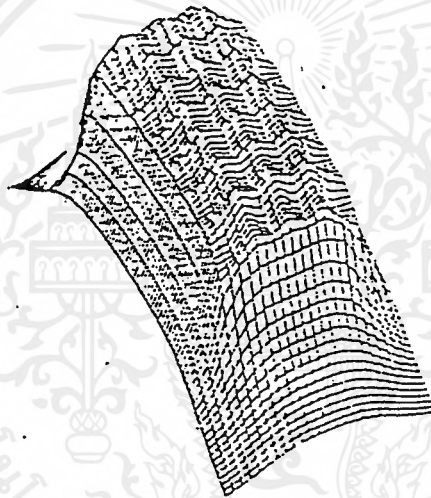
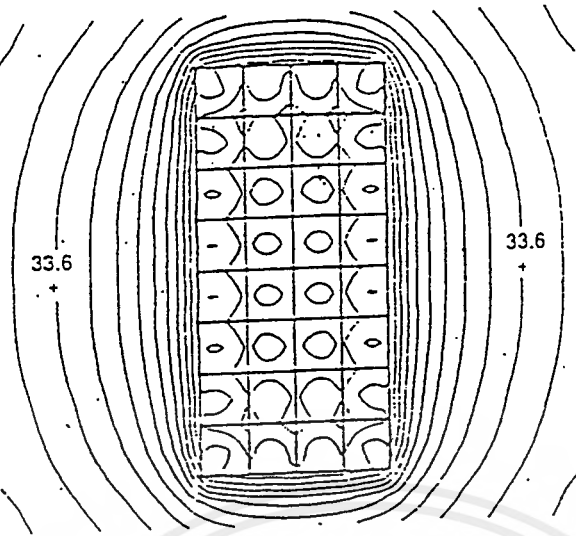
1.2 ปัญหาที่พบในการออกแบบระบบต่อลงดิน

ปัญหาสำคัญที่พบในการออกแบบระบบต่อลงดินคือ ในขณะที่เกิดสถานะผิดปกติ เช่น กระแสลัดวงจรลงดิน (Ground Fault Current) ทิศทางการไหลกระแสจะไหลกระจายจากจุดเกิดเหตุผ่านตัวนำต่อลงดินกลับไปยังแหล่งจ่ายเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradients) ขึ้นในบริเวณตะแกรงที่ต่อลงดินและดินในบริเวณใกล้เคียง ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้น เมื่อมีการออกแบบระบบต่อลงดินอย่างไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ค่าแรงดันของศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงมาก เป็นผลให้เกิดอันตรายแก่ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นๆ ได้ [2]



รูปที่ 1.1 ทิศทางการไหลของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดินในภาพ 3 มิติ
ซึ่งจะมีค่าความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของตะแกรงกับจุดตัดของตะแกรง

ปัญหาของความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดสภาวะผิดปกติ เป็นสิ่ง
ที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากจะต้องคำนึงถึงเรื่องความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าแล้วยังมี
ปัญหาอื่นๆ ที่จะต้องคำนึงถึงที่จะทำให้ระบบต่อลงดินไม่สมบูรณ์ ได้แก่

- ตำแหน่งที่ร่างกายคนสัมผัสระหว่างจุด 2 จุดมีค่าความต่างศักย์มากเกินไปจนขอบเขต
ความปลอดภัยที่กำหนด
- ค่าความต้านทานที่จะป้องกันการไหลผ่านของกระแสจากจุดที่มีสัมผัสไหล
ผ่านร่างกายลงไปยังดินมีค่าสูงไม่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงเวลาที่กระแสคิดปกติไหลผ่านร่างกายมนุษย์ จนกระทั่งอุปสรรคป้องกัน ปลดวงจรออกขณะเกิดสภาวะไม่ปกติขึ้นมีค่านานเกินไป
- การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งจะเป็ผลให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเปลี่ยนไปเป็นผลให้การออกแบบผิดพลาด
- ผลของความต้านทานจำเพาะของดินที่จะมีผลต่อการกระจายของกระแสขณะเกิดสภาวะผิดปกติ
- การผิดพลาดจากวิธีการวัดค่าต่าง ๆ การเก็บข้อมูล และการผิดพลาดจากการคำนวณทำให้เกิดความผิดพลาดในการออกแบบ
- ความล่าช้าในการออกแบบและสิ้นเปลืองวัสดุเกินความจำเป็น เมื่อเลือกใช้วิธีการออกแบบที่ไม่เหมาะสม

ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ล้วนแต่เป็นสาเหตุทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้เกี่ยวข้องทั้งสิ้น ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้สามารถแก้ไขได้ โดยการออกแบบที่เหมาะสม และถูกวิธี ดังจะกล่าวต่อไปในรายละเอียดของบทต่าง ๆ

1.3 เป้าหมายของการออกแบบระบบต่อลงดินในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เป้าหมายของการออกแบบระบบต่อลงดิน ที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์หลัก คือ

1. แนะนำถึงหลักการและวิธีการออกแบบระบบต่อลงดิน
2. สามารถออกแบบระบบต่อลงดินได้อย่างเหมาะสมกับลักษณะของงานที่ต้องการติดตั้งระบบต่อลงดินเพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบ ประหยัดทั้งวัสดุและค่าแรงในการติดตั้ง
3. วิเคราะห์ปัจจัยองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน เพื่อให้สามารถคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
4. กล่าวถึงวิธีการปรับปรุง แก้ไข ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินในระบบต่อลงดิน เพื่อเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมที่สุดนำมาปรับปรุงระบบต่อลงดินให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

ซึ่งจุดประสงค์ดังกล่าวจะกล่าวไว้อย่างชัดเจนในหัวข้อต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการออกแบบ

ในระบบไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน กระแสจะไหลจากจุดเกิดเหตุ กลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเสมอ ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์บนผิวดินมีค่าสูงขึ้น (GPR*) เป็นผลให้เกิดอันตรายแก่นักคนที่เกี่ยวข้อง

ในการป้องกันอันตรายจากการเกิดความต่างศักย์ของผิวดินขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน ทำได้หลายทาง คือ

1. ลดกระแสลัดวงจรลงดิน โดยติดตั้ง Resistance Grounding ให้มากกว่า Solid Grounding ที่ Neutral ของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ใช้ระบบต่อลงดิน เป็นทางเดินของกระแสลัดวงจรแทนผิวดิน (ซึ่งจะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) โดย
 - แยกระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ออกจากระบบต่อลงดินบริเวณใกล้เคียง
 - รวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกับระบบต่อลงดินของบริเวณใกล้เคียงเข้าด้วยกัน โดยออกแบบร่วมกัน

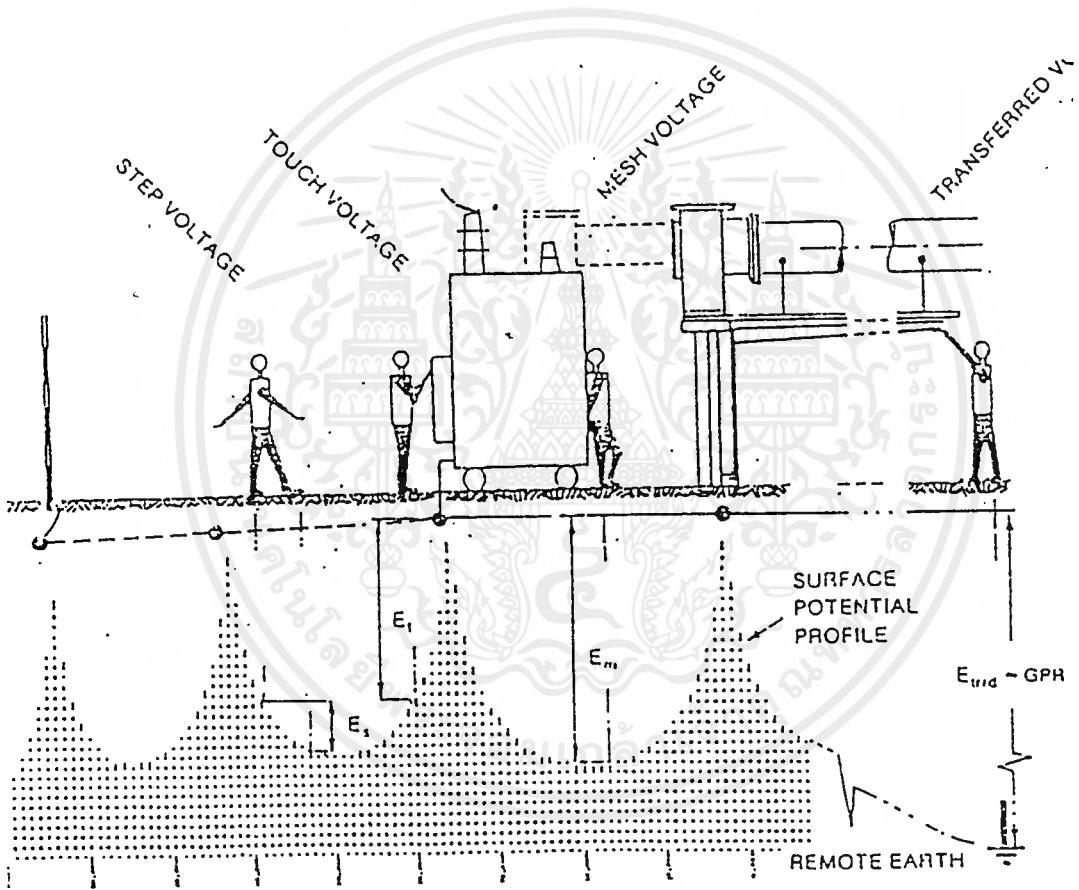
การออกแบบระบบต่อลงดินที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการคำนวณเปรียบเทียบค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน (E_m , E_s) กับค่าขอบเขตความปลอดภัยที่ร่างกายสามารถทนได้ (E_{touch} , E_{step}) โดยอ้างอิงจากหลักการของ IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE std.80-1986 และได้ปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณโดยเพิ่มการตรวจสอบเพื่อให้ได้ผลการออกแบบที่เร็วกว่าเดิม ซึ่งการคำนวณโดยวิธีนี้ จะสามารถทำได้สะดวก, รวดเร็วกว่าวิธีอื่น

GPR* : Grid Potential Rise คือ ศักดาของระบบต่อลงดินที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระแสลัดปกติเมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ ตามปกติแล้วขณะที่ไม่เกิดกระแสลัดปกติ ศักดาของระบบต่อลงดินจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์และถือว่าเท่ากับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ แต่ขณะเกิดกระแสลัดปกติศักดาของระบบต่อลงดินจะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ (คำนวณได้จากสมการที่ 2.30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (พิจารณารูปที่ 2.1)

1. แรงดันสัมผัส (Touch Voltage : $E_{\text{touch}} : E_t$) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาเพิ่มของระบบต่อลงดิน (GPR*) ขณะเกิดกระแสผิดปกติเทียบกับศักดาพื้นผิวดำแหน่งที่คนยืนขณะที่เอามือจับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน
2. แรงดันก้าว (Step Voltage : E_{step}) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาพื้นผิวของจุดที่เท้าคนก้าวเดิน ขณะเกิดกระแสผิดปกติโดยไม่มีส่วนใดในร่างกายสัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน



รูปที่ 2.1 รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

เมื่อ E_{touch} (TOUCH Voltage) คือ แรงดันสัมผัส

E_{step} (STEP Voltage) คือ แรงดันก้าว

E_m (MESH Voltage, Maximum touch voltage) คือ ค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่

ขึ้นบนตะแกรงต่อลงดิน

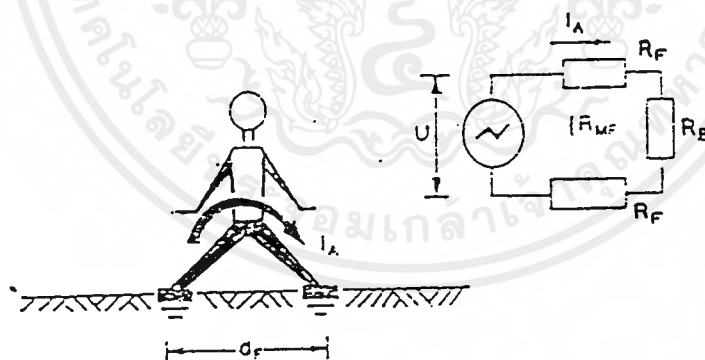
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E_s (Miximum Step Voltage) คือ ค่าแรงดันก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดิน
 E_{trans} (Transferred Voltage) คือ รูปแบบหนึ่งของแรงดันสัมผัส ที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมต่อของตัวนำไฟฟ้าออกนอกระบบต่อลงดิน เพราะการเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น ระหว่างตัวนำที่เชื่อมต่อออกไปยังนอกบริเวณของระบบต่อลงดินที่วงจรมันต์

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.1 จะพบว่า เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน กระแสจะไหลผ่านร่างกายคนในรูปแบบของแรงดันก้าวและแรงดันสัมผัส ซึ่งเขียนเป็นวงจรมูลยได้ทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 2.2, 2.3

2.1.1 วงจรมูลยของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสลัดปกติ (ACCIDENTAL GROUND CIRCUIT)

การพิจารณาค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ เพื่อกำหนดค่าขอบเขตความปลอดภัย ในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น สามารถแทนค่าความต้านทานในส่วนต่างๆ ของร่างกายมนุษย์ขณะที่มีกระแสไหลผ่านเป็นวงจรมูลยได้ ดังในรูปที่ 2.2, 2.3



$$d_f = 1 \text{ m}$$

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

$$I_A = U/R_A$$

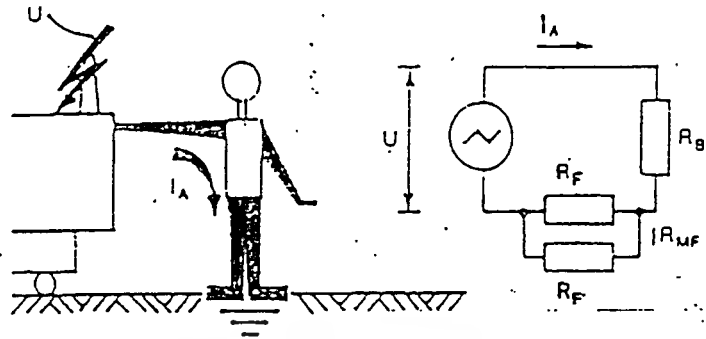
$$R_B = 1000 \Omega$$

where

I_A = the current of accidental circuit;
 R_A = the total resistance of accidental circuit

รูปที่ 2.2 วงจรมูลยของความต้านทานในรูปของแรงดันก้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของความต้านทานในรูปของแรงดันสัมผัส

ในกรณีของแรงดันก้าว

ค่าความต้านทานรวมของวงจรความต้านทานสมมูล (R_A) หาได้จาก

$$\begin{aligned} R_A &= R_B + R_{2FS} \\ &= R_B + 2(R_{FOOT} - R_{MFOOT}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

ในกรณีของแรงดันสัมผัส

$$\begin{aligned} R_A &= R_B + R_{2FP} \\ &= R_B + \frac{1}{2}(R_{FOOT} + R_{MFOOT}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ R_B คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (ปกติให้ = 1000 โอห์ม)

R_{2FS} คือ ความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างที่ค่อนุกรม

R_{2FP} คือ ความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างที่ต่อขนาน

R_{FOOT} คือ ความต้านทานของดินเฉพาะที่อยู่ใต้ฝ่าเท้า (ปกติสมมติให้เท้าของ

คนแทนด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี $b=8$ ซม. ซึ่งจะมีขนาดใกล้เคียงกับพื้นที่ใต้ฝ่าเท้าที่สัมผัสกับพื้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} R_{\text{FOOT}} &= \rho/4b \\ &= 3\rho \end{aligned} \quad (2.3)$$

R_{MFOOT} = ความต้านทาน mutual ระหว่างเท้าทั้ง 2 ข้าง ซึ่งถูกสมมติให้เป็นแผ่นโลหะกลมที่มีระยะห่าง = d_{foot} หน่วยเมตร

$$R_{\text{MFOOT}} = \rho/2\pi d_{\text{foot}} \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่า $R_{2\text{FS}}$, $R_{2\text{FP}}$ ให้อยู่ในรูปของ ρ จะได้

$$R_{2\text{FS}} = 6\rho \quad (2.5)$$

และ

$$R_{2\text{FP}} = 1.5\rho \quad (2.6)$$

ในกรณีที่มีการโรยหินกรวดค่า $R_{2\text{FS}}$, $R_{2\text{FP}}$ จากสมการ 2.5, 2.6 จะมีฟังก์ชันของความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_s) และความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) เข้ามาร่วมอยู่ด้วย โดยสมการที่ 2.5, 2.6 จะเปลี่ยนเป็น

$$R_{2\text{FS}} = 6 C_s(h_s, K) \rho_s \quad (2.7)$$

และ

$$R_{2\text{FP}} = 1.5 C_s(h_s, K) \rho_s \quad (2.8)$$

เมื่อ $C_s(h_s, K)$ คือ แฟกเตอร์ลดทอน จาก [1]

$$C_s(h_s, K) = 1 - a \left[\frac{1 - \rho / \rho_s}{2h_s + a} \right]; a = 0.106m$$

และ $C_s(h_s, K) = 1$ เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด = ความต้านทานจำเพาะของดิน

h_s คือ ความหนาของชั้นหินกรวด

K คือ Reflection factor

$$= (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้(PERMISSIBLE BODY CURRENT LIMIT)

ค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายทนได้ก่อนจะเกิดอันตรายจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส และช่วงเวลาที่ได้รับกระแส จากการศึกษาโดย Dalziel [3] พบว่า ที่ความถี่ 50, 60 Hz 99.5% ของ คนทั่วไป ค่ากระแสสูงสุดที่สามารถทนได้ หาได้จาก

$$I_B = k / \sqrt{t_s}$$

เมื่อ t_s คือ ช่วงเวลาที่คนได้รับกระแส

k คือ ค่าคงที่ซึ่งได้จากการทดลอง = $\sqrt{S_B}$

S_B คือ ค่า shock energy ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะจ่ายกระแสผ่านร่างกายคนในช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในช่วง 0.03-0.3 วินาทีเพื่อดูปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับมนุษย์

$S_B = (I_B)^2 t_s$ (ไม่มีหน่วย เนื่องจากเป็นค่าคงที่เฉลี่ยจากการทดลอง)

โดย S_{FP50} คือ ค่า shock energy ที่คนน้ำหนักไม่เกิน 50 kg สามารถทนได้=0.0135

S_{FP70} คือ ค่า shock energy ที่คนน้ำหนักไม่เกิน 70 kg สามารถทนได้=0.0246

จะได้

$$\text{ค่า } k_{50} = 0.116$$

$$\text{ค่า } k_{70} = 0.157$$

ดังนั้น

ค่ากระแสสูงสุดที่คนน้ำหนักไม่เกิน 50 kg ทนได้

$$I_B = 0.116 / \sqrt{t_s}$$

ค่ากระแสสูงสุดที่คนน้ำหนักไม่เกิน 70 kg ทนได้

$$I_B = 0.157 / \sqrt{t_s}$$

เมื่อกระแสผ่านร่างกาย 1 mA จะทำให้มีความรู้สึกเล็กน้อย

1-6 mA เกิดการกระตุกแต่ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อได้

9-25 mA รู้สึกเจ็บ ไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้ เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อทำให้การหายใจลำบากและอาจหยุดหายใจ ถ้าได้รับกระแสหลายๆ นาที

60-100 mA จะยับยั้งการทำงานของระบบหายใจ ทำให้กล้ามเนื้อเยื่อเสียหายและตายได้

ถ้าไม่ได้รับการรักษาอย่างทันทั่วถึง ซึ่งในการออกแบบจะให้ค่า I_B อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 60-100 mA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้

(CRITERIA OF PERMISSIBLE POTENTIAL DIFFERENCE)

เมื่อพิจารณา วงจรสมมูลย์ของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสติด
ปกติและค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายทนได้แล้ว สามารถหาค่าระดับแรงดันสัมผัสสูงสุด และแรงดัน
ก้าวสูงสุดได้โดย พิจารณาค่าแรงดันสัมผัส

$$E_{\text{TOUCH}} = (R_B + R_{2FP}) I_B$$

$R_s = 1000 \text{ ohms}$ และ R_{2FP}, I_B จากสมการ 2.8, 2.10 ในสมการ (2.12)

แรงดันสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50 kg

$$E_{\text{Touch } 50} = \frac{(1000 + 15C_s(h_s, k) \rho_s)(0.116)}{\sqrt{t_s}}$$

แรงดันสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 70 kg

$$E_{\text{Touch } 70} = \frac{(1000 + 15C_s(h_s, k) \rho_s)(0.157)}{\sqrt{t_s}}$$

พิจารณาแรงดันก้าว

$$E_{\text{STEP}} = (R_B + R_{2FS}) I_B$$

แทนค่า $R_B = 1000 \text{ ohms}$ และ R_{2FS}, I_B จากสมการ 2.7, 2.10 ใน สมการ (2.15)

จะได้

แรงดันก้าวสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50 kg

$$E_{\text{step } 50} = \frac{(1000 + 6C_s(h_s, k) \rho_s)(0.116)}{\sqrt{t_s}}$$

แรงดันก้าวสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 70 kg

$$E_{\text{step } 70} = \frac{(1000 + 6C_s(h_s, k) \rho_s)(0.157)}{\sqrt{t_s}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบต่อลงดิน จะต้องให้ค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันก้าวอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

โดยให้ $E_m < E_{\text{touch } 50}$ และ $E_s < E_{\text{step } 50}$

E_m : Mesh Voltage คือค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแกรงของระบบต่อลงดิน

E_s : Max.step Voltage คือค่าแรงดันก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแกรงของระบบต่อลงดิน

ค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน

(Maximum Step and Mesh Voltage)

โดยปกติแล้ว ระบบต่อลงดินที่ถูกออกแบบให้มีความปลอดภัยเพียงพอ นั้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินจะถูกพิจารณาในรูปของ E_m ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 แล้ว จะเห็นว่า E_m (Mesh Voltage) จะเป็นค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแกรงของระบบต่อลงดิน ซึ่งในกรณีของระบบต่อลงดินที่มีระยะห่างของตะแกรงเท่าๆ กัน ค่า E_m จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดกลางไปยังที่มุมของตะแกรงโดยค่า E_m ที่ตะแกรงมุมสุดจะมีค่าสูงสุด ซึ่งจะใช้ค่านี้ในการกำหนดเทียบขอบเขตความปลอดภัย ซึ่งเมื่อค่า $E_m < E_{\text{touch}}$ แล้วค่า E_s มักจะน้อยกว่าค่า E_{step} ไปด้วย

โดย E_m : Mesh Voltage =
$$\frac{(\rho K_m K_1 I_g)}{L}$$

และ E_s : Max.Step Voltage =
$$\frac{(\rho K_s K_1 I_g)}{L}$$

โดยที่
$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D_1^2}{16hD_2} + \frac{(D_1 + 2h)^2}{8D_1D_2} - \frac{h}{4D_2} \right) + \frac{K_{11}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{2n-1} \right] \right]$$

$$K_{11} = \frac{1}{(2n)^{2n}}$$

$$K_1 = 0.656 + 0.172 * n$$

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_0}; h_0 = 1$$

$$C_s(h_s, k) = 1 - a \left[\frac{1 - (\rho / \rho_s)}{2h_s + a} \right]; a = 0.106m.$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D14h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]; \text{ สำหรับ } 0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m} \quad (2.25)$$

- เมื่อ D_1 คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวขนาน
 D_2 คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำต่อลงดิน
 n คือ จำนวนตัวนำในแนวขนาน
 L คือ ความยาวของตัวนำรวมที่สมมติการลงวางตะแกรง

โดยที่ $L > L_{50}$ หรือ L_{70}

ในกรณีที่ไม่มี Ground rod หรือมีเพียง 2-3 แท่ง

$$L = L_{\text{grid}} + L_{\text{rod}} \quad (2.26)$$

ในกรณีที่มี ground rod

$$L = L_{\text{grid}} + 1.15L_{\text{rod}} \quad (2.27)$$

2.1.5 ค่าความยาวของตัวนำต่อลงดินสั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัย

(Minimum Buried Conductor Length)

เพื่อเป็นการตรวจสอบอย่างง่ายเกี่ยวกับความยาวของตัวนำต่อลงดิน ที่ได้จากการสมมติลงวางตะแกรงให้อยู่ในช่วงค่าที่ปลอดภัย สามารถหาค่าความยาวตัวนำสั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัยได้

ภายใต้เงื่อนไข $E_m < E_{\text{touch } 50}$

แทนค่า E_m , $E_{\text{touch } 50}$ จากสมการ 2.18, 2.13

จะได้

$$L_{50} = \frac{(K_m K_i \rho I_g \sqrt{T})}{((116.00) + (0.174) C_s (h_s, k) \rho_s)} \quad (2.28)$$

เมื่อ

L_{50} คือ ความยาวของตัวนำสั้นที่สุด ที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุดกับคนน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัม

ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานนีไฟฟ้าย่อย

การออกแบบระบบต่อลงดินที่ดีนั้น จะต้องทำให้ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจร (GPR) ถ้า E_m , E_S มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัยที่กำหนด ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดิน จะต้องทำการออกแบบให้เหมาะสม ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกขนาดน้ำหนักตัว

ขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

ขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 70 kg

2. เลือกชนิดของพื้นที่การวางตะแกรงลงดิน

พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจตุรัส, ผืนผ้า

พื้นที่รูปตัวที

พื้นที่รูปตัวแอล

3. ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho =$ _____ โอห์ม-เมตร

ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด ที่ใช้ในการโรยหน้าดิน $\rho_s =$ _____ โอห์ม-เมตร

ความหนาของพื้นที่หินกรวด $h_s =$ _____ เมตร

ความลึกของตะแกรงตัวนำ $h =$ _____ เมตร

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $D_2 =$ _____ เมตร

ขนาดของกระแสลัดวงจรสูงสุด $I_g =$ _____ แอมป์

เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ในการปลดวงจร $t_s =$ _____ วินาที

4. คำนวณค่า E_{touch} 50 จากสมการ

1. กรณีเลือกน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

$$E_{touch\ 50} = \frac{(1000 + 1.5cs(hs, k)ps)(0.116)}{\sqrt{ts}}$$

2. กรณีเลือกน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 70 kg

$$E_{touch\ 70} = \frac{(1000 + 1.5cs(hs, k)ps)(0.157)}{\sqrt{ts}}$$

5. สมมุติการวางตะแกรงตัวนำของระบบต่อลงดิน โดยประมาณระยะห่างของตัวนำ โดยคร่าวๆ โดยป้อนข้อมูลดังต่อไปนี้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวขนาน D_1 _____ เมตร

จำนวนตัวนำในแนวขนาน n _____ แท่ง

พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน A _____ ตารางเมตร

ความยาวของตัวนำรวมทั้งสมมุติการลองวางตะแกรง L_1 _____ เมตร

6. คำนวณค่าความยาวตัวนำสั้นที่สุดที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุด จากสมการเพื่อเป็นการตรวจสอบอย่างง่ายเกี่ยวกับความยาวของตัวนำต่อลงดิน ที่ได้จากการสมมุติลองวางตะแกรงให้อยู่ในช่วงค่าที่ปลอดภัย สามารถหาค่าความยาวตัวนำที่สั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัยได้

ภายใต้เงื่อนไข $E_m < E_{touch}$

$$\text{โดย } E_m = \frac{\rho k m k i I_g}{L}$$

$$\text{และ } L_{50} = \frac{k m k i I_g \sqrt{t}}{(116.0 + (0.174) c s (h_s, k) p s)}$$

$$\text{หรือ } L_{70} = \frac{k m k i I_g \sqrt{t}}{(157 + (0.235) c h (h_s, k) p s)}$$

7. คำนวณค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มขณะเกิดกระแสผิดปกติ (GPR) , E_g

$$GPR = I_g R_g$$

เมื่อ R_g เป็นค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของพื้นที่ด้วย ดังจะกล่าวต่อไปนี้

R_g กรณีที่พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ผืนผ้า

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

R_g = กรณีพื้นที่เป็นรูปตัวที หรือ ตัวแอล R_g จะเป็นดังนี้

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20A}} + \left[1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right] \right] * [1.52 [2m(L_p \sqrt{2/A}) - 1]]$$

เปรียบเทียบค่า GPR กับ E_{touch}

ถ้าค่า $GPR < E_{touch}$ แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีความปลอดภัยเพียงพอสามารถนำค่าที่ได้จากการสมมุติวางตะแกรงไปใช้การติดตั้งได้

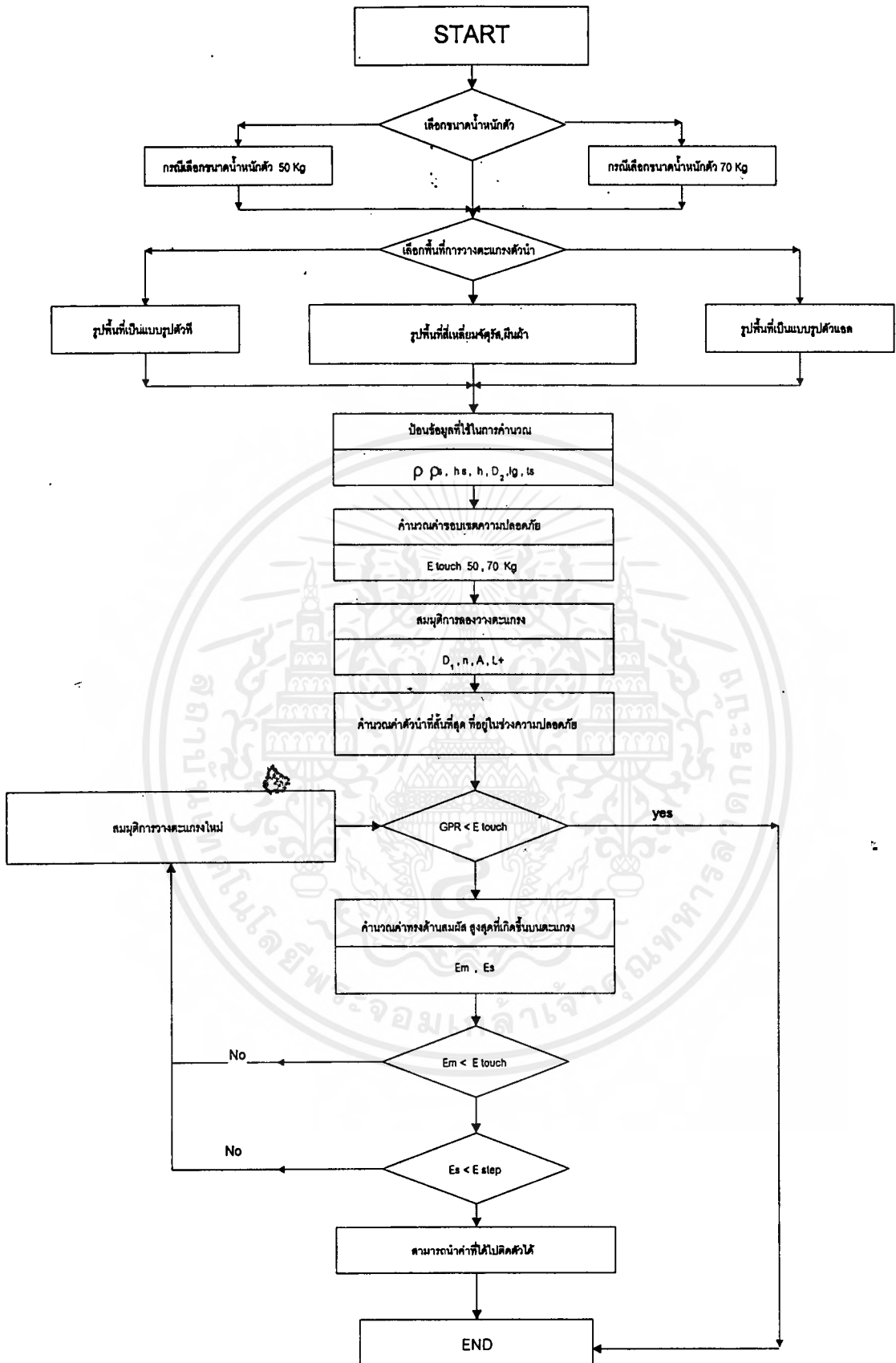
ถ้าค่า $GPR > E_{touch}$ แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีความปลอดภัยไม่เพียงพอให้ทำตามขั้นตอนที่ 8

8. คำนวณค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด (E_m), แรงดันก้าวสูงสุด (E_s) ที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน เทียบกับค่าขอบเขตความปลอดภัย E_{touch} , E_{step}

ถ้าค่า $E_m < E_{touch}$ และ $E_s < E_{step}$ แสดงว่าปลอดภัย

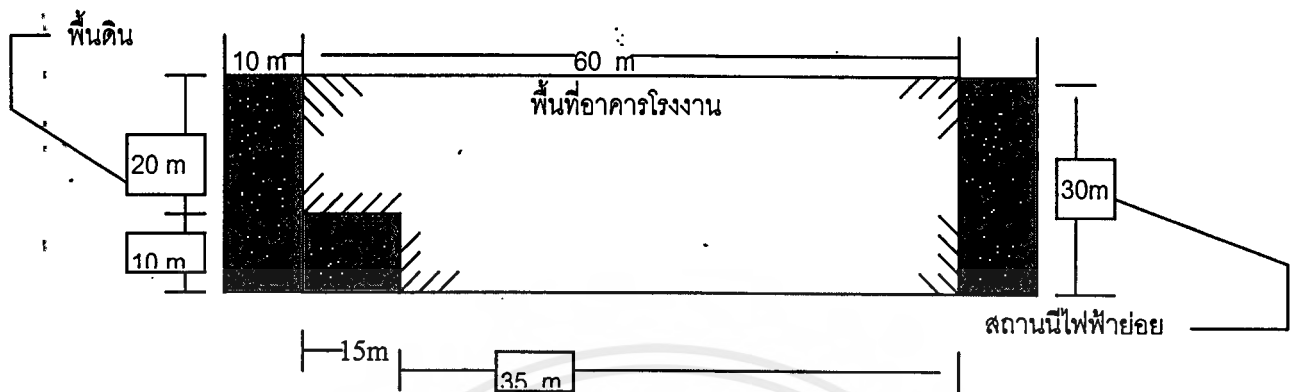
ถ้าค่า $E_m > E_{touch}$ หรือ $E_s > E_{step}$ แสดงว่าไม่ปลอดภัย

จะต้องทำการลองวางตะแกรงตัวนำใหม่ โดยให้มีขนาดของความถี่สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการทดลองการออกแบบแบบพื้นที่รูปตัวแอล /x



ขั้นตอนการโปรแกรม

1. คลิกเลือกขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

ขนาดน้ำหนักตัว	
File	Help
<u>โปรดเลือกขนาดน้ำหนักตัว</u>	
<input checked="" type="checkbox"/>	กรณีน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg
<input type="checkbox"/>	กรณีน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 70 kg
Exit	

2. คลิกเลือกลักษณะโครงสร้างของตึกเป็นรูปตัวแอล

ลักษณะโครงสร้างของตึก	
File	Help
<u>โปรดเลือกลักษณะโครงสร้างของตึก</u>	
<input type="checkbox"/>	รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ผืนผ้า
<input type="checkbox"/>	รูปตัวที
<input checked="" type="checkbox"/>	รูปตัวแอล
Exit	

3. ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลที่ใช้คำนวณ		
File Help		
<u>ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ</u>		
ความต้านทานจำเพาะของดิน	30,000	โอห์ม-เมตร
ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดที่โรย	30,000	โอห์ม-เมตร
ความหนาของพื้นดินหินทราย	0.20	เมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ	0.30	
ขนาดของกระแสไฟฟ้าสูงสุด	30,000	แอมป์
เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ปลดวงจร	0.50	วินาที
Previous OK Exit		

4. สมมุติการวางตะแกรง

สมมุติการวางตะแกรง		
File Help		
<u>สมมุติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน</u>		
ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวนอน	๓ ๒๕	เมตร
ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน	๓ ๒๕	เมตร
จำนวนตัวนำในแนวนอน	120	แท่ง
พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน	๑๑๐	ตารางเมตร
ความยาวของตัวนำรวมที่ได้สมมุติ	500	เมตร
previous OK Exit		

5. หลังจากทำการสมมุติวางตะแกรงตัวนำงานได้ค่าที่ถูกต้องแล้ว เราต้องทำการพิมพ์ข้อมูลที่ใช้ในการติดตั้งทั้งหมดไปใช้งานได้ดังนี้



สรุป

ขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

รูปตัวแอล

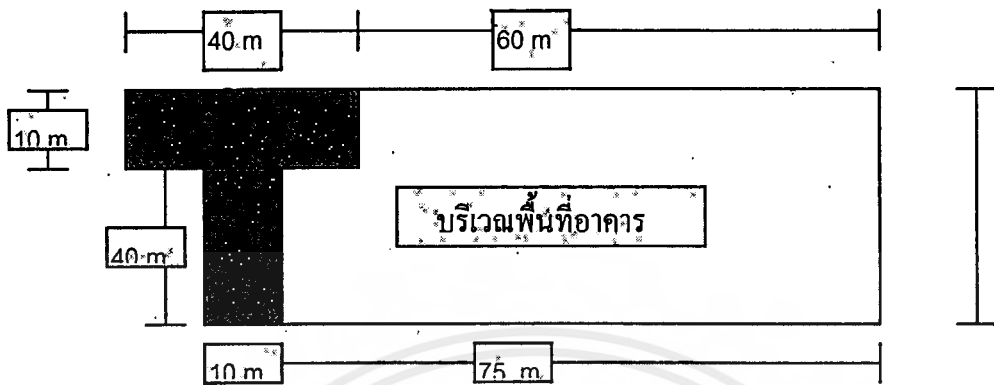
ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

1. ความต้านทานจำเพาะของดิน	30,000	โอห์ม-เมตร
2. ความต้านทานจำเพาะของดินกรวดที่ใช้โรย	30,000	โอห์ม-เมตร
3. ความหนาของพื้นที่หินกรวด	0.20	เมตร
4. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ	0.30	เมตร
5. ขนาดของกระแสไฟฟ้าสูงสุด	30,000	แอมป์
6. เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ในการปลดวงจร	0.5	วินาที

ค่าที่สมมุติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน

1. ระยะห่างระหว่าง ตัวนำในแนวนอน	0.25	เมตร
2. ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน	0.25	เมตร
3. จำนวนตัวนำในแนวนอน	120	แท่ง
4. ความยาวของตัวนำรวมทั้งสมมุติการลงวางตะแกรง	500	เมตร
5. พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน	910	ตารางเมตร

ตัวอย่างการทดลองการออกแบบแบบพื้นที่รูปตัวที /x



ขั้นตอนการ โปรแกรม

1. คลิกเลือกขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

ขนาดน้ำหนักตัว	
File	Help
โปรดเลือกขนาดน้ำหนักตัว	
<input type="checkbox"/>	กรณีน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg
<input checked="" type="checkbox"/>	กรณีน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 70 kg
<input type="button" value="Exit"/>	

2. คลิกเลือกลักษณะโครงสร้างตะแกรง เป็นรูปตัวที

ลักษณะโครงสร้างของตะแกรง	
File	Help
โปรดเลือกลักษณะโครงสร้างตะแกรง	
<input type="checkbox"/>	รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ผืนผ้า
<input checked="" type="checkbox"/>	รูปตัวที
<input type="checkbox"/>	รูปตัวแอล
<input type="button" value="Exit"/>	

3. ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลที่ใช้คำนวณ		
File	Help	
<u>ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ</u>		
ความต้านทานจำเพาะของดิน	<input type="text" value="30"/>	โอห์ม-เมตร
ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดที่โรย	<input type="text" value="30"/>	โอห์ม-เมตร
ความหนาของพื้นดินหินทราย	<input type="text" value="0.1"/>	เมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ	<input type="text" value="0.01"/>	
ขนาดของกระแสลัดปกติสูงสุด	<input type="text" value="30.000"/>	แอมป์
เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ปลดวงจร	<input type="text" value="0.5"/>	วินาที
<input type="button" value="Previous"/>		<input type="button" value="OK"/>
<input type="button" value="Exit"/>		

4. สมมุติการวางตะแกรง

สมมุติการวางตะแกรง		
File	Help	
<u>สมมุติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน</u>		
ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวนอน	<input type="text" value="0.25"/>	เมตร
ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน	<input type="text" value="0.25"/>	เมตร
จำนวนตัวนำในแนวนอน	<input type="text" value="350"/>	แท่ง
พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน	<input type="text" value="800"/>	ตารางเมตร
ความยาวของตัวนำรวมที่ได้สมมุติ	<input type="text" value="3,550"/>	เมตร
<input type="button" value="previous"/>		<input type="button" value="OK"/>
<input type="button" value="Exit"/>		

5. หลังจากทำการสมมุติวางตะแกรงตัวนำจนได้ค่าที่ถูกต้องแล้ว เราต้องทำการพิมพ์ข้อมูลที่ใช้ในการติดตั้งทั้งหมด ไปใช้งานได้ดังนี้

สรุป

ขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 70 kg

รูปตัวที

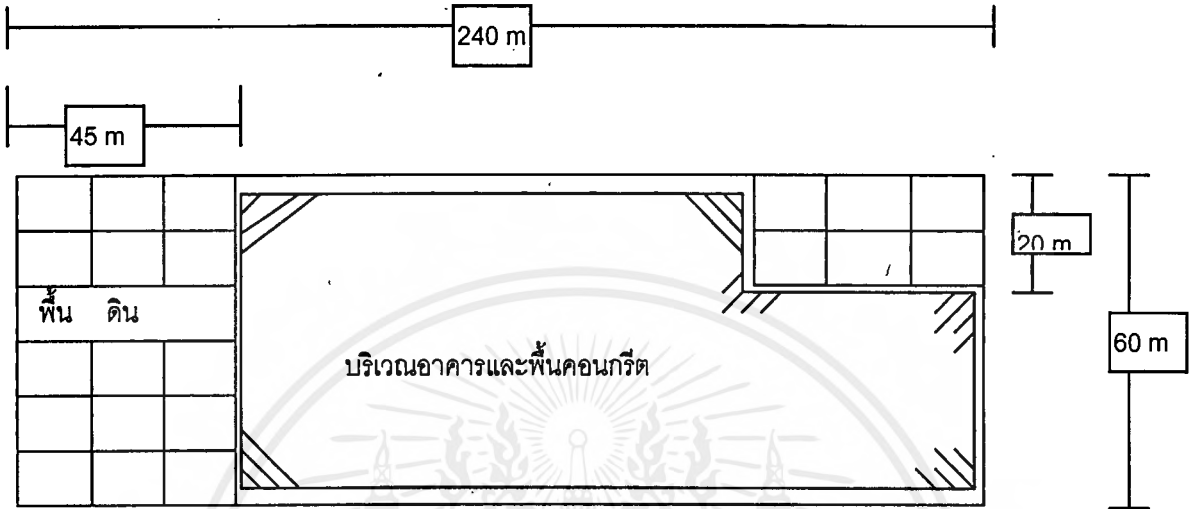
ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

1. ความต้านทานจำเพาะของดิน 30 โอห์ม-เมตร
2. ความต้านทานจำเพาะของดินกรวดที่ใช้โรย 30 โอห์ม-เมตร
3. ความหนาของพื้นที่หินกรวด 0.1 เมตร
4. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ 0.01 เมตร
5. ขนาดของกระแสไฟฟ้าสูงสุด 30,000 แอมป์
6. เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ในการปลดวงจร 0.5 วินาที

ค่าที่สมมุติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน

1. ระยะห่างระหว่าง ตัวนำในแนวนอน 0.25 เมตร
2. ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน 0.25 เมตร
3. จำนวนตัวนำในแนวนอน 350 แท่ง
4. ความยาวของตัวนำรวมทั้งสมมุติการลงวางตะแกรง 3,550 เมตร
5. พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน 800 ตารางเมตร

ตัวอย่างการทดลองการออกแบบแบบพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจตุรัส, ผืนผ้า



รูปที่ 1.0 แสดงขนาดและพื้นที่ของการต่อลงดิน

ขั้นตอนการโปรแกรม

1. คลิกเลือกขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

ขนาดน้ำหนักตัว

File Help

โปรดเลือกขนาดน้ำหนักตัว

กรณีน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

กรณีน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 70 kg

Exit

2. คลิกเลือกลักษณะโครงสร้างตะแกรง เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ผืนผ้า

ลักษณะโครงสร้างของตะแกรง	
File	Help
<u>โปรดเลือกลักษณะโครงสร้างตะแกรง</u>	
<input checked="" type="checkbox"/>	รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ผืนผ้า
<input type="checkbox"/>	รูปตัวที
<input type="checkbox"/>	รูปตัวแอล
<input type="button" value="Exit"/>	

3. ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลที่ใช้คำนวณ		
File Help		
<u>ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ</u>		
ความต้านทานจำเพาะของดิน	<input type="text" value="30"/>	โอห์ม-เมตร
ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดที่โรย	<input type="text" value="30"/>	โอห์ม-เมตร
ความหนาของพื้นดินหินทราย	<input type="text" value="0.1"/>	เมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ	<input type="text" value="0.0138"/>	
ขนาดของกระแสไฟฟ้าสูงสุด	<input type="text" value="8000"/>	แอมป์
เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ปลดวงจร	<input type="text" value="0.1"/>	วินาที
<input type="button" value="Previous"/> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Exit"/>		

4. สมมุติการลงวางตะแกรง

สมมุติการวางตะแกรง		
File Help		
<u>สมมุติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน</u>		
ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวนอน	<input type="text" value="10"/>	เมตร
ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน	<input type="text" value="2"/>	เมตร
จำนวนตัวนำในแนวนอน	<input type="text" value="7"/>	แท่ง
พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน	<input type="text" value="3600"/>	ตารางเมตร
ความยาวของตัวนำรวมที่ได้สมมุติ	<input type="text" value="1155"/>	เมตร
<input type="button" value="previous"/> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Exit"/>		

5. หลังจากทำการสมมุติวางตะแกรงตัวนำจนได้ค่าที่ถูกต้องแล้ว เราต้องทำการพิมพ์ข้อมูลที่ใช้ในการติดตั้งทั้งหมด ไปใช้งานได้ดังนี้

สรุป

ขนาดน้ำหนักตัวไม่ต่ำกว่า 50 kg

รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผืนผ้า

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

1. ความต้านทานจำเพาะของดิน	30	โอห์ม-เมตร
2. ความต้านทานจำเพาะของดินกรวดที่ใช้โรย	30	โอห์ม-เมตร
3. ความหนาของพื้นที่หินกรวด	0.1	เมตร
4. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ	0.0138	เมตร
5. ขนาดของกระแสพิคปกติสูงสุด	8000	แอมป์
6. เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ในการปลดวงจร	0.1	วินาที

ค่าที่สมมุติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน

1. ระยะห่างระหว่าง ตัวนำในแนวนอน	10	เมตร
2. ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน	2	เมตร
3. จำนวนตัวนำในแนวนอน	7	แท่ง
4. ความยาวของ ตัวนำรวมทั้ง สมมุติการลงวางตะแกรง	1155	เมตร
5. พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน	3600	ตารางเมตร

บทที่ 3

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญของระบบต่อลงดิน

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงค่า Mesh Voltage, E_m ซึ่งเป็นค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินและ Step Voltage, E_s ซึ่งเป็นค่าแรงดันย่างก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินและค่า GPR ซึ่งเป็นค่าศักดาที่เพิ่มขึ้นบนระบบต่อลงดินในขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินนี้จะพบว่า ทั้งค่า E_m , E_s และ GPR จะเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดขอบเขตความปลอดภัยของระบบว่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า E_m , E_s และ GPR ในสมการที่ 2.18, 2.19, 2.30 แล้วจะพบว่า

$$E_m = \frac{\rho K_m K_1 I_g}{L}$$

และ

$$E_s = \frac{\rho K_s K_1 I_g}{L}$$

และ

$$GPR = I_g R_g$$

ซึ่งค่า E_m , E_s จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวประกอบค่า ρ และค่าความยาวของตัวนำ L ส่วนในค่า K_m , K_1 และ K_s นั้น เพื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.20, 2.22, 2.25 แล้วจะพบว่าล้วนมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวของตัวนำ L ซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยทั้งสิ้น แต่เนื่องจากค่า L สามารถกำหนดได้แน่นอนจากการออกแบบ ในขณะที่ค่า ρ จะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามองค์ประกอบต่างๆ ดังนั้นเพื่อให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่เที่ยงตรงจึงควรที่จะต้องวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่ทำให้ค่า ρ เกิดการเปลี่ยนแปลง

และค่า GPR ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของกระแสลัดวงจรลงดิน (I_g) และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (R_g) ซึ่งโดยปกติแล้วค่า I_g ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าที่สูงสุดอยู่แล้ว ดังนั้น จะพบว่า R_g จะมีผลต่อค่า GPR ที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่า R_g จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อรูปร่างของระบบต่อลงดินเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้น จะพบว่าองค์ประกอบที่สำคัญของค่าที่ใช้ในการพิจารณาความปลอดภัยที่สำคัญ (E_m , E_s , GPR) ในระบบต่อลงดิน คือ

1. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ
2. ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน R_g

3.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความต้านทานจำเพาะของดินกับค่าความปลอดภัย E_m , E_s จะพบว่า ในกรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) มีค่าสูง ก็จะทำให้ค่า E_m มีค่าสูงตามไปด้วย ในทำนองกลับกัน ถ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) มีค่าต่ำ ค่า E_m ก็จะมีค่าต่ำตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น และสามารถลดขนาดของตัวนำ L ได้อีกด้วย เพราะว่าจะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน จะมีกระแสบางอย่างใช้ตัวดินเป็นทางไหลกลับควมคู่ไปกับการไหลผ่านในระบบต่อลงดิน ซึ่งในกรณีที่ค่า ρ ต่ำ ก็จะทำให้สิ้นเปลืองตัวนำต่อลงดินน้อยลง

องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ)

เนื่องจากดินเกิดจากการสะสม ทับถมของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มากมายหลายชนิด ดังนั้น การนำไฟฟ้าของดินนั้นจึงขึ้นกับปริมาณ แร่ธาตุ ส่วนผสมทางเคมีของสารต่างๆ และของเหลวที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในดิน ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินพอจะจำแนกเป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. ชนิดและคุณสมบัติของดิน

GROUND TESTED	SOIL	RESISTANCE IN OHM		
		AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM
24	FILE AND GROUND CONTAINING MORE OR LESS REFUSE SUCH AS ASHES, CINDERS, AND BRINE WASTE	14	3.5	41
205	CLAY, SHALE, ADOBE, GUMBO, LOAM, AND SLIGHTLY SANDY LOAM WITH NO STONE OR GRAVEL	21	2.0	98
237	CLAY, ADOBE, GUMBO AND LOAM, MIXED MIXED WITH VERYING PROPORTIONS OF SAND GRAVEL AND STONE	93	6.0	800
72	SAND, STONES, OR GRAVEL WITH LITTLE OR NO CLAY OR LOAM	554	35	2700

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามชนิดของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณความชื้นและระดับของเหลวในดิน

ส่วนประกอบของของเหลว % โดยน้ำหนัก	พิกัดค่าความต้านทาน ($\Omega - m$)
0	สูงมาก
10	3000
15	300
20	80
25	60
30	50
35	40
40	25
45	น้อยมาก

ตารางที่ 3.2 แสดงผลของของเหลวที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน

3. ปริมาณแร่ธาตุและสารเคมีในดิน

ปริมาณของเกลือ % โดยน้ำหนัก ที่ความชื้น 30% โดยน้ำหนัก	พิกัดค่าความต้านทาน ($\Omega - m$)
1	200
2	55
3	40
4	30
5	20
6	15
7	10
8	8
9	6
10	น้อยมาก

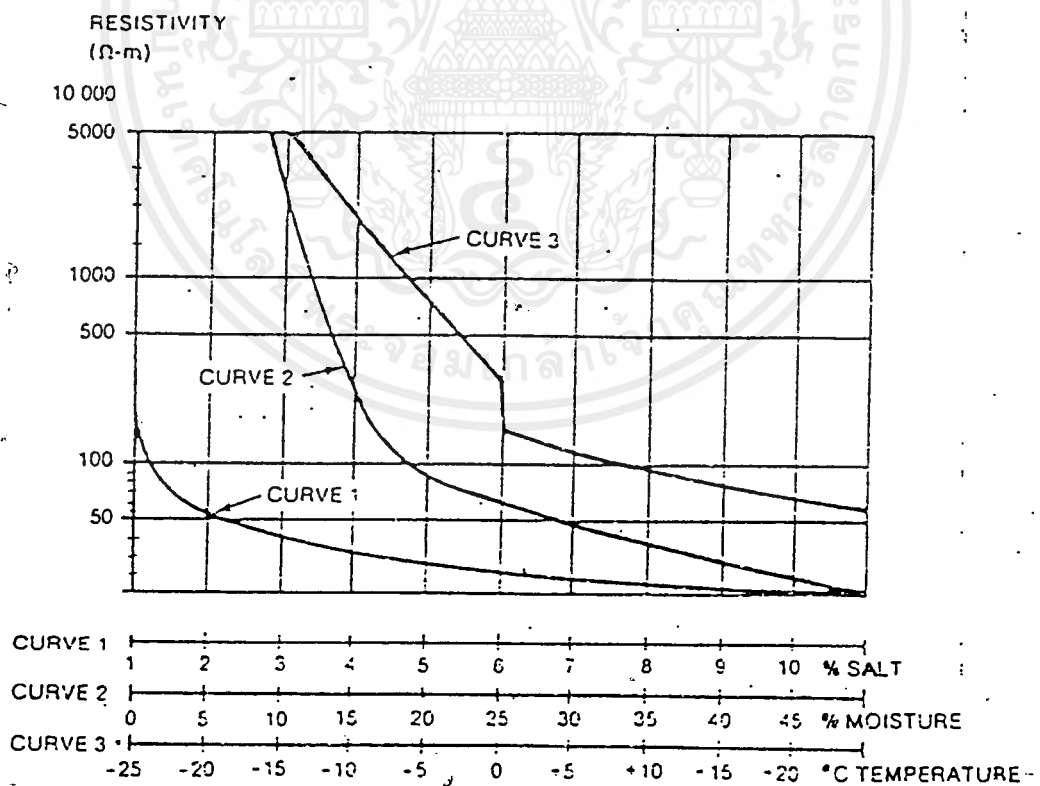
ตารางที่ 3.3 แสดงผลของเกลือที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิ	พิกัดค่าความต้านทาน ($\Omega - m$)
-15	5000
-10	2000
-5	750
0	200-350
5	150
10	95
15	25
20	15

ตารางที่ 3.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลกับค่าความต้านทานของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* หมายเหตุ ค่าที่ได้จากตารางที่ 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 และรูปที่ 3.1 ไม่ควรจะนำไปใช้ในการคำนวณ เพราะเป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ เท่านั้น (จาก IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI / IEEE Std.80-1986) ควรจะใช้ค่าที่วัดได้จากสถานที่ที่ติดตั้งระบบ

จากตารางที่ 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 และรูปที่ 3.1 แสดงถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการคำนวณค่า E_m , E_s ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน ดังนั้น ค่าของ ρ จะต้องทำการวัดอย่างละเอียดและถูกวิธี ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 5 ส่วนผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานของดิน R และค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ในบริเวณต่างๆ แสดงในบทที่ 6 และการวิเคราะห์ผลแสดงในบทที่ 7

3.2 ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน R_g

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า R_g จะมีผลเป็นอย่างมากต่อค่า GPR ที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ค่า R_g มีค่าต่ำ ค่า GPR ก็จะมีค่าต่ำไปด้วย ซึ่งจะหมายความว่าระบบมีความปลอดภัยมากขึ้นด้วย (แต่ไม่ได้หมายความว่าระบบจะปลอดภัยเมื่อระบบต่อลงดินมีค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งจะต้องพิจารณาค่าความปลอดภัยอื่นควบคู่ไปด้วย เช่น E_m , E_s , E_{touch} , E_{step}) ดังนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าค่า GPR ที่คำนวณได้มีค่าถูกต้อง ค่า R_g จะต้องมีการวัดด้วย

เมื่อ

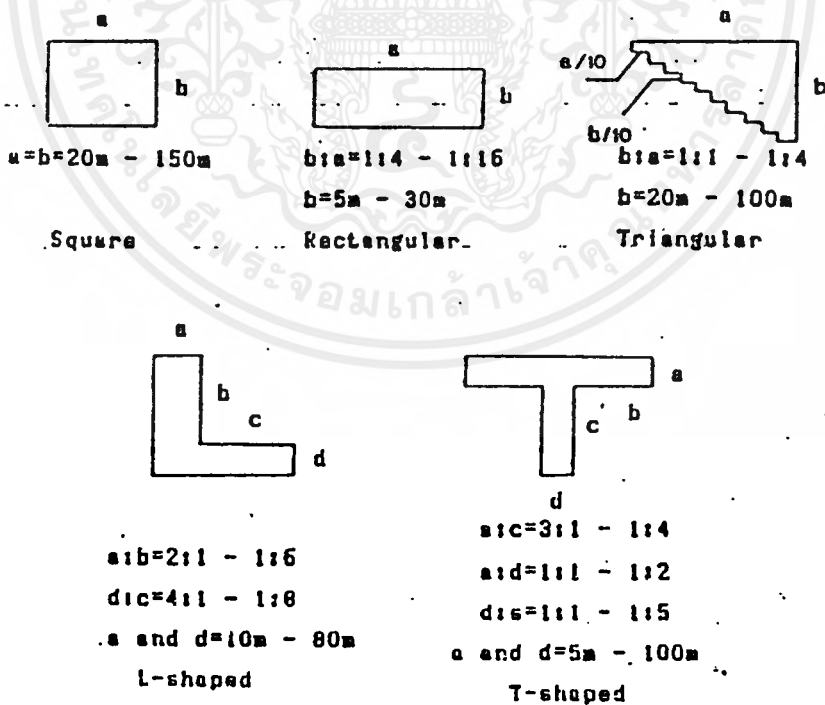
$$E_g \text{ (GPR)} = I_g R_g$$

โดยปกติแล้ว ค่า R_g สามารถหาได้หลายวิธี คือ

1. จากสมการของ Sverak [6]
2. จากสมการของ Schwarz [7]
3. โดยการใช้ Finite element analysis [8]

ในการหาค่า R_g โดยวิธีของ Sverak และ Schwarz นั้นเหมาะสำหรับตำแหน่งต่อลงดินที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ในกรณีที่รูปร่างของตะแกรงต่อลงดินไม่ได้มีลักษณะดังกล่าว ซึ่งในบางครั้งระบบต่อลงดินจะถูกกำหนดด้วยพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นรูปต่างๆ เช่น รูปสามเหลี่ยม, รูปตัว "T", รูปตัว "L" ดังรูปที่ 3 การใช้สมการของ Sverak และของ Schwarz ในวิธีที่ 1, 2 จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดมาก ส่วนในวิธีที่ 3 จะเป็นวิธีที่ให้ค่าถูกต้องเพราะเป็นการคำนวณในทุกๆ จุด ซึ่งจะแบ่งตัวนำต่อลงดินออกเป็นส่วนเล็กๆ จากนั้นจะใช้ค่าความต้านทานเฉพาะตัว (self resistance) และความต้านทานร่วม (mutual resistance) ของทุกๆ ส่วนย่อย มาคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน R_g ซึ่งวิธีนี้จะต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก เกี่ยวกับความยาว เส้นผ่าศูนย์กลางความลึกของตำแหน่งที่ฝัง ในแต่ละจุดอย่างละเอียด และต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ จึงเป็นวิธีที่ยุ่งยาก และต้องใช้เวลามาก

ในกรณีเช่นนี้ สามารถใช้วิธีที่ได้พัฒนามาจากวิธีของ Severak โดยจะเพิ่มเฟกเตอร์ที่เป็นความสัมพันธ์ของพื้นที่และความยาวของเส้นรอบวงของตะแกรงต่อลงดิน ($\sqrt{A/L_p}$) เข้าไป



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดและรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการหาค่า R_g ของ Severak [6]

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_i} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right] \right] \quad (3.1)$$

พบว่าเมื่อรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินเปลี่ยนจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า ไปเป็นรูปตัว “L” หรือรูปตัว “T” จะพบว่า ค่าความยาวของเส้นรอบวงจะเพิ่มมากขึ้นไม่สัมพันธ์กับขนาดของพื้นที่ (A) ดังนั้น ค่า R_g ที่ได้ควรจะมีค่าลดลง แต่จากสมการของ Severak (3.1) ค่า R_g ที่คำนวณได้ยังคงลดน้อยกว่าที่ควรจะเป็นจึงต้องเสริมค่า

$$1.52[21n(L_p \sqrt{2/A}) - 1] \sqrt{A/L_p}$$

เข้าไปในสมการเดิมเพื่อให้ค่าความต้านทานที่ได้ลดลงอย่างเหมาะสม

โดยจะได้

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_i} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right] \right] * [1.52[21n(L_p \sqrt{2/A}) - 1] \sqrt{A/L_p}] \quad (3.2)$$

เมื่อ L_p คือ ความยาวเส้นรอบวงของตะแกรงต่อลงดิน เมตร

L_i คือ ความยาวรวมของตัวนำในตะแกรงต่อลงดิน เมตร

(ค่า L_i จะเป็นไปตามสมการที่ 2.26, 2.27)

A คือ พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน (ตารางเมตร)

h คือ ความลึกที่ฝังของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

ρ คือ ค่า ค.ต.ท. จำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่าการคำนวณที่ถูกต้อง จึงต้องพิจารณาถึงรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินด้วย ซึ่งสมการที่ 3.2 นี้ จะให้ความแม่นยำสูงในกรณีที่ระบบต่อลงดินมีลักษณะดังรูป 3.2

บทที่ 4

การปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดิน

จากบทที่ 2 เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณที่มีการติดตั้งระบบต่อลงดิน ทั้งแรงดันสัมผัส (E_{touch}) และแรงดันก้าว (E_{step}) ตลอดจนค่า GPR ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสผิดปกติลงจรลงดินแล้ว การเพิ่มขอบเขตความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดินสามารถทำได้ 2 ทางคือ

1. ลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน
2. เพิ่มค่าความต้านทานที่เท้า

4.1 การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

เนื่องจากค่า GPR, E_m , E_s ล้วนมีความเกี่ยวข้องกับค่าความยาวตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน (L) ทั้งสิ้น โดยพิจารณา

จาก

$$GPR = I_g R_g$$

และ

$$E_m = \frac{\rho K_m K_l I_g}{L}$$

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

ดังนั้น การเพิ่มค่า L จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่ำลง และทำให้ E_m , E_s ลดลง ซึ่งจะทำให้ระบบมีความปลอดภัยมากขึ้น การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินสามารถทำได้โดย

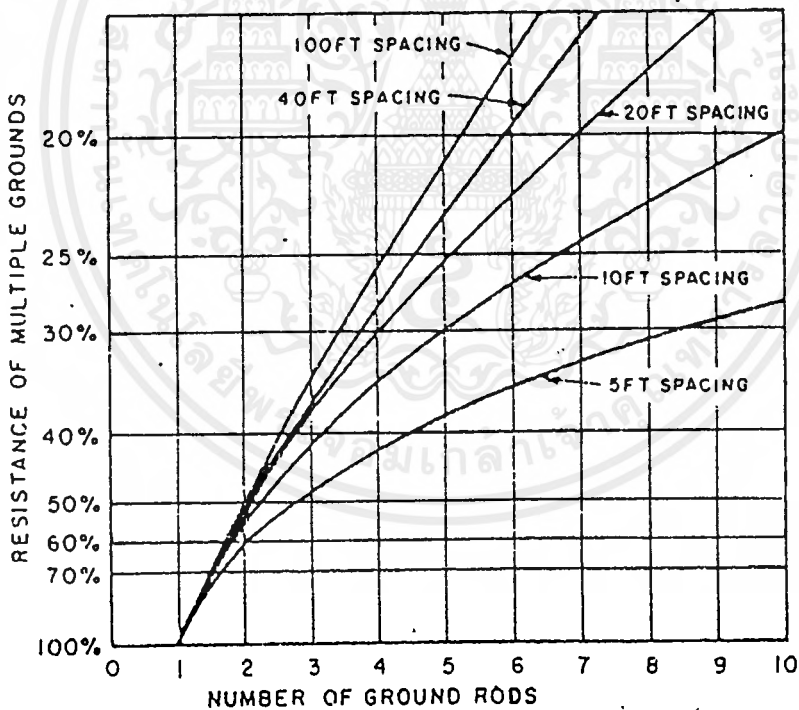
1. เพิ่มค่าความยาวของตัวนำต่อลงดิน L โดย

- เพิ่มความยาวของตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน (Ground grid) ซึ่งอาจจะเพิ่มในบริเวณที่คาดว่าจะมีค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสผิดปกติลงจรลงดินสูงกว่าในบริเวณอื่น เช่น ที่บริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (หม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ) หรือ เพิ่มจำนวน mesh ให้กับระบบต่อลงดิน โดยการสร้างตะแกรงให้ถี่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวดิ่ง (Ground rod) ในบริเวณที่คาดว่าจะมีค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินสูงกว่าในบริเวณอื่น เช่น ที่มุมของตะแกรงของตัวนำต่อลงดิน (mesh ที่อยู่มุมนอกสุดของตะแกรงต่อลงดิน) หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (หม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ) หรือที่มุมรอบนอกทั้งหมดของระบบต่อลงดิน

ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวดิ่ง (Ground rod) จาก [9] แสดงดังรูปที่ 4.1

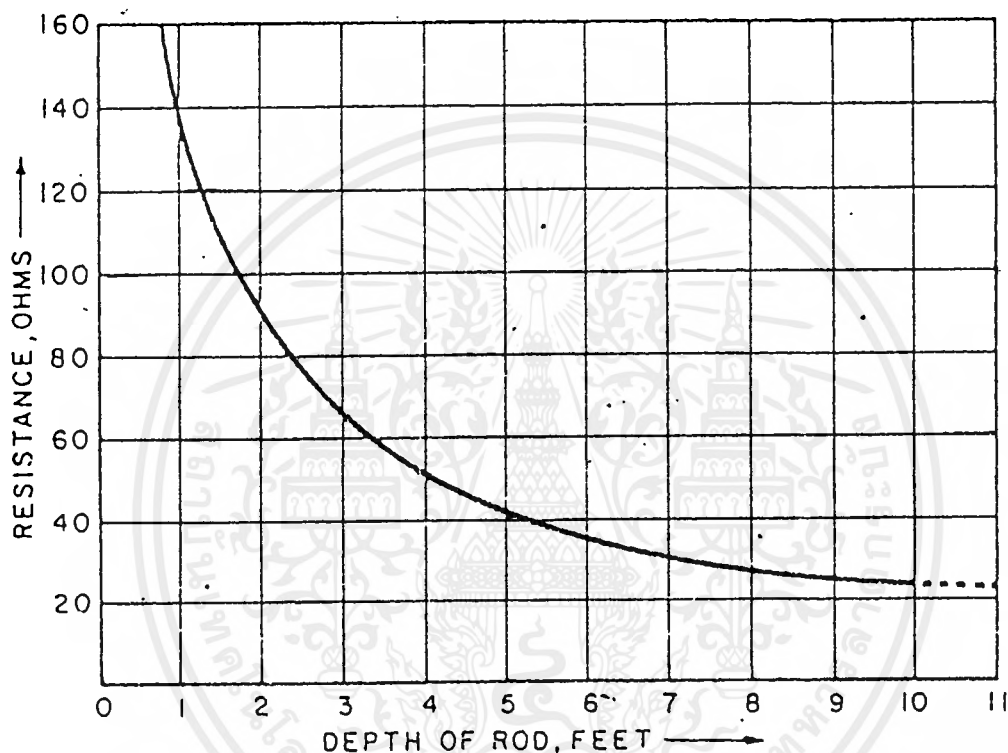


รูปที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวดิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มความยาวของแท่งตัวนำในแนวตั้ง (Ground rod) ซึ่งนอกจากผลของความยาวตัวนำที่เพิ่มขึ้นแล้ว จะยังมีผลจากความลึก และผลจากปริมาณความชื้น และระดับน้ำใต้ดินเข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย ซึ่งล้วนแล้วแต่ทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าต่ำลงอีกด้วย ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มความยาวแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง (Ground rod) จาก [10] แสดงดังรูปที่ 4.2

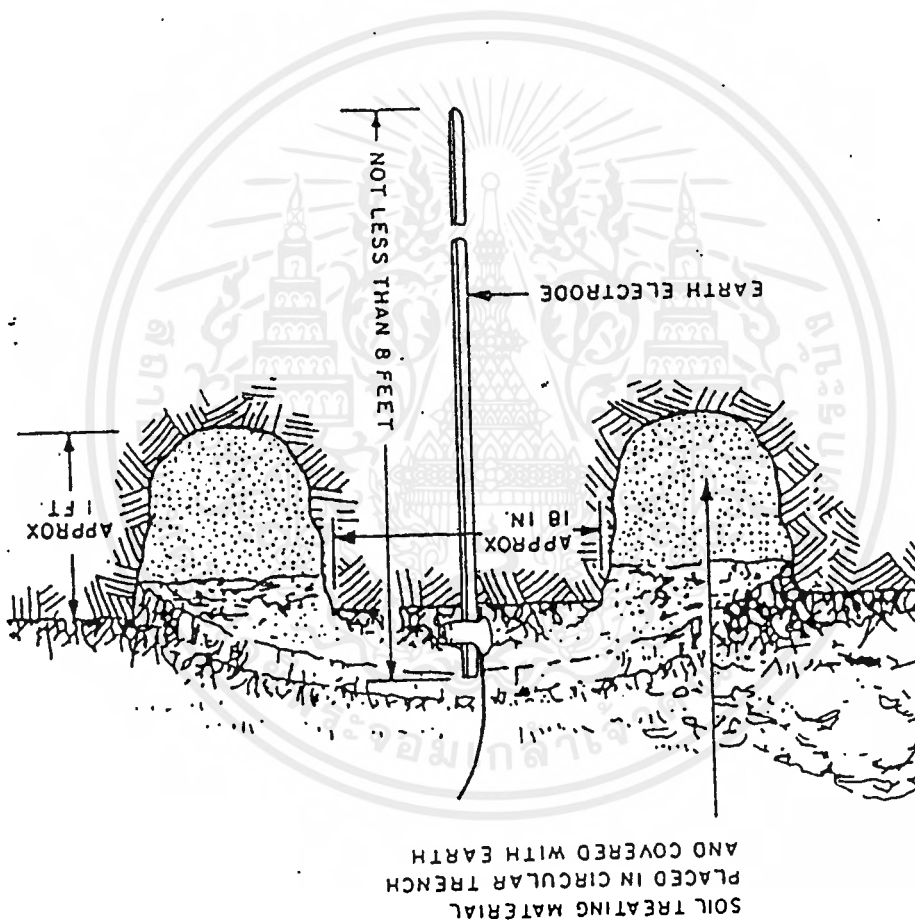


รูปที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง

นอกจากการเพิ่มค่าตัวนำ L แล้วยังสามารถลดค่าความต้านทานได้โดย

2. ใช้สารเคมีจำพวก Magnesium sulphate, Copper sulphate หรือสารจำพวก Rock salt ใสลงในบริเวณที่ปักแท่งตัวนำ (Ground Rod) ดังรูปที่ 4.3 โดยที่ความลึกของแท่ง Ground Rod ไม่ลึกกว่าชั้นหินใต้ดิน โดยการใส่สาร Magnesium sulphate จะให้ผลดี คือ ทำให้การกักครองของแท่งตัวนำต่อลงดินจากสารน้อยกว่าแบบอื่น ในขณะที่การใช้สารจำพวก Rock salt จะประหยัดที่สุด

ถึงแม้ว่า การใช้สารเคมีจะช่วยให้อายุการใช้งานของระบบต่อลงดินมีค่าต่ำลง
ไปได้มากก็ตามแต่จะมี ข้อเสีย คือทำให้แท่งตัวนำต่อลงดินผุกร่อนได้เร็วขึ้น และต้องทำการเติม
สารเหล่านี้อยู่เสมอ เนื่องจากสารจะถูกละลายและชะล้างไปกับน้ำฝนได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้
สารเคมีก็มีความจำเป็นกับงานบางชนิด เช่น ในบริเวณภูเขา หรือที่ราบสูงที่ดินมีความชื้น และ
ระดับน้ำใต้ดินลึกมากๆ และควรเลือกใช้วิธีนี้หลังจากที่การปักแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้งไม่
สามารถทำได้

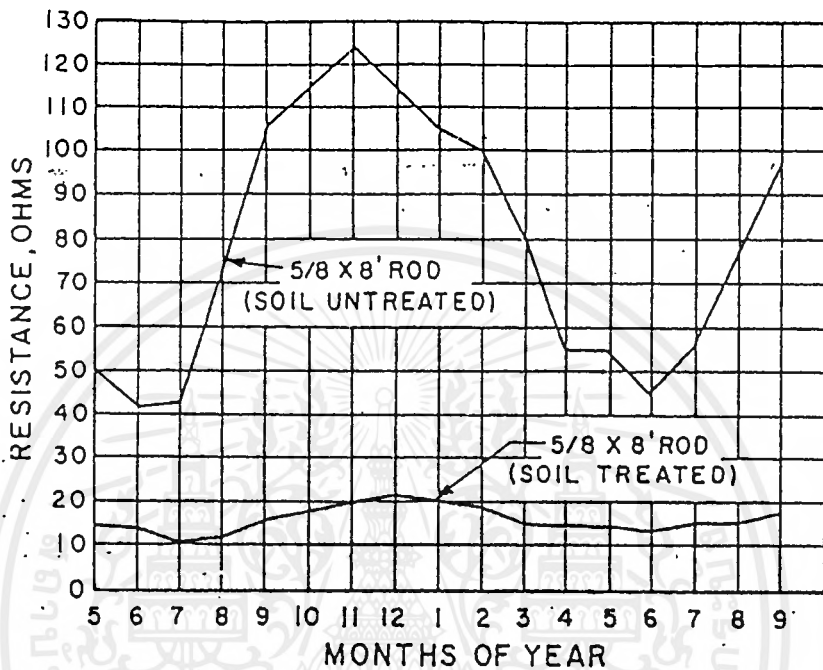


รูปที่ 4.3 แสดงการเติมสารเคมีเพื่อช่วยลดความต้านทานของอิเล็กโทรด

การเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดนี้ นอกจากจะช่วยลด
ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดแล้ว ยังสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานที่มี
ผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นและระดับน้ำใต้ดินตามฤดูกาลอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้วิธีเติมสารเคมี เพื่อช่วยลดค่าความต้านทานของแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง (Ground rod) จาก [10] แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงผลของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้สารเคมี ช่วยลดค่าความต้านทานแท่งอิเล็กโทรด

4.2 การเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่า

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าการโรยหินกรวด (crushed rock) หรือ เทพื้นซีเมนต์เป็นการเพิ่มค่าความต้านทานให้กับเท้าของคน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงวงจรสมมูลของค่าความต้านทานของร่างกายคนขณะเกิดกระแสไฟฟ้า ทั้งในรูปแบบของแรงดันอย่างก้าวและแรงดันสัมผัส ในหัวข้อ 2.1.1 รูปที่ 2.2, 2.3 จะพบว่า ค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกาย I_A จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของร่างกาย และค่าความต้านทานของดินที่เท้าด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วจะเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่าได้โดยการทำให้พื้นที่เท้าสัมผัสมีค่าความต้านทานที่สูงขึ้น เช่น การโรยหินกรวดที่พื้นให้มีความหนาเพียงพอ (ปกติประมาณ 10 ซม.) หรือโดยการเทพื้นซีเมนต์ แต่ในกรณีที่ดินกรวดเริ่มบางลง และค่าความต้านทานของดินบริเวณนั้นมีค่าต่ำ จะทำให้ค่าความต้านทานที่เทามีค่าต่ำมาก หรือในกรณีที่ฝนตกค่าความต้านทานของพื้นซีเมนต์จะมีค่าต่ำลงมาก ซึ่งสถานการณ์ดังกล่าวจะทำให้ค่าขอบเขตความปลอดภัยมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.12

และ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อ

E_{touch} = ค่าแรงดันสัมผัสที่มนุษย์ทนได้โดยไม่เป็นอันตราย

E_{step} = ค่าแรงดันก้าวที่มนุษย์ทนได้โดยไม่เป็นอันตราย

R_B = ค่าความต้านทานของร่างกาย

R_{2FP} = ค่าความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างต่อขนานกัน

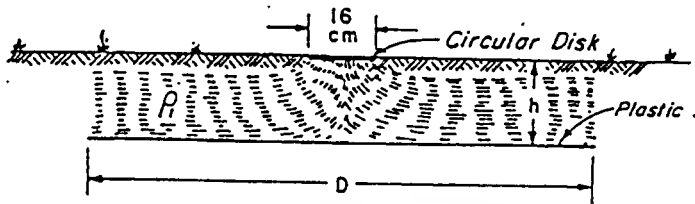
R_{2FS} = ค่าความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างต่ออนุกรมกัน

I_B = ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านร่างกายคนโดยไม่เป็นอันตราย

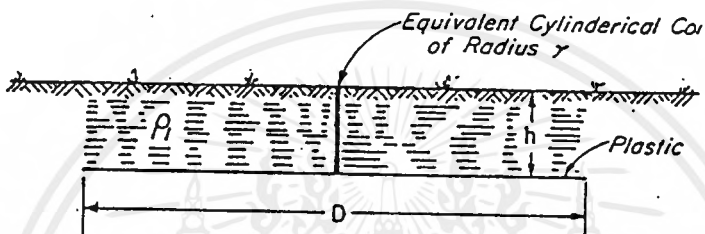
ซึ่งจะเห็นว่า การเพิ่มค่าความต้านทาน ให้กับเท้าของคนจะสามารถเพิ่มค่าความปลอดภัยได้ทั้ง E_{touch} และ E_{step} อย่างไรก็ตามยังสามารถที่จะเพิ่มค่าความต้านทานให้กับเท้าของคนได้อีก โดยการใช้แผ่นพลาสติกที่หาได้ตามท้องตลาด วางภายใต้หีนกรวดอย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในบริเวณที่จำเป็น

ค่าความต้านทานของเท้าเมื่อใช้แผ่นพลาสติกรอง

เมื่อพิจารณาเท้าของมนุษย์โดยไม่คิดค่าความต้านทานของรองเท้าและถุงเท้า สามารถแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมบางรัศมี 8 ซม. ในรูปที่ 4.5 (a) เมื่อทำการวางแผ่นพลาสติกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D ซม. ที่ความลึก h จากผิวหน้าของดิน ถ้ากระแสจะไหลผ่านไปยังแผ่นโลหะวงกลมในบริเวณเหนือแผ่นพลาสติก ทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 4.5(a) เนื่องจากค่าความต้านทานของพลาสติกสูงกว่าดินมาก แต่กระแสจะไหลได้ในแนวคิ่งด้วย เมื่อพ้นจากขอบของแผ่นพลาสติก ดังนั้น เราสามารถแทนลักษณะดังกล่าวได้ ด้วยรูปที่ 4.5(b) โดยใช้แท่งค้ำน้ำหนักกระบอกสมมูลย์



(a)



(b)

รูปที่ 4.5 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไปยังแผ่นโลหะกลมเมื่อรองรับพื้นด้วยแผ่นพลาสติก ซึ่งสามารถแทนแผ่นโลหะกลมได้ด้วยแท่งตัวนำสมมูลย์

สามารถหาค่าความต้านทานของการต่อลงดินของแท่งตัวนำทรงกระบอก ($R=R_{\text{foot}}$)

ได้โดยจาก [11]

$$R = \frac{\rho_i}{2\pi h} \ln \left[\frac{D}{2r_{eq}} \right]$$

เมื่อ ρ_i = ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเหนือแผ่นพลาสติก (โอห์ม-เมตร)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของพลาสติก, ($D > 6h$) (เมตร)

h = ความลึกในการฝังของแผ่นพลาสติก ; ($4\text{cm} < h < 20\text{cm}$) (ซ.ม.)

r_{eq} = ค่ารัศมีสมมูลย์ของตัวนำทรงกระบอก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า h โดยค่า

r_{eq} สามารถหาได้จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ารัศมีสมมูลของตัวนำทรงกระบอกที่ความถี่ต่างๆ

h (cm)	r_{eq} (cm)
4	4.4
8	2.8
12	2.04
20	1.48

ผลของค่าความต้านทานที่เท่า ที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้แผ่นพลาสติกรองแสดงในบทที่ 6



บทที่ 5

หลักการและวิธีการวัด

ตามที่กล่าวมาแล้วจะพบว่า ค่าความปลอดภัยต่างๆ ที่สำคัญทั้งหลาย เช่น ค่า E_m , E_s , ค่า L_{50} และ R_g ล้วนมีสัดส่วนแปรผันโดยตรงกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณค่าดังกล่าวได้ค่าที่ถูกต้องด้วย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ในบริเวณสถานที่ที่จะติดตั้งระบบต่อลงดินเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง และทำการย้ายตำแหน่งการวัดไปหลายๆ ตำแหน่งภายในบริเวณที่จะติดตั้งระบบต่อลงดิน เพื่อนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วดินในบริเวณต่างๆ จะประกอบด้วยเนื้อดินหลากหลายชนิดแตกต่างกัน ตามการสะสมตัวของสารต่างๆ และมีระดับของชั้นดินแตกต่างกันซึ่งจะมีผลต่อค่าความต้านทานของดินทั้งสิ้น นอกจากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าขอบเขตความปลอดภัยต่างๆ แล้ว หลังจากการออกแบบและทำการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดินแล้ว จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (R_g) เพื่อตรวจสอบผล, เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อยืนยันผลการออกแบบและเพื่อให้แน่ใจได้ว่าเกิดความปลอดภัยเพียงพอ โดยในรายละเอียดจะแบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การวัดค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดิน
2. การวัดค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโทรดหรือระบบต่อลงดิน

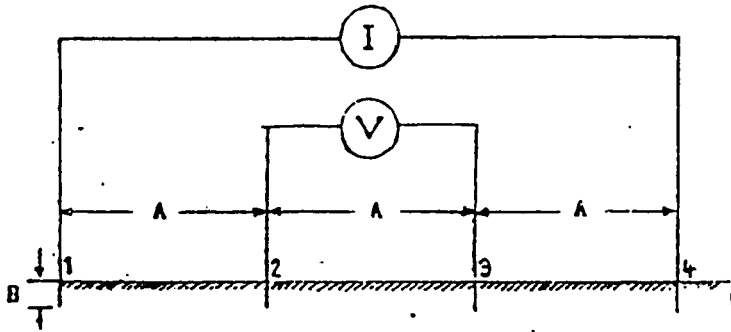
5.1 การวัดค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดิน

การหาค่าความต้านทานและค่าความต้านทานจำเพาะของดินจำเพาะของดินสามารถหาได้จากวิธี Four Point Test และวิธี Driven Rod Test ซึ่งทั้งสองวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ซึ่งจะกล่าวต่อไป

5.1.1 วิธี Four Point Test

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่ให้ค่าความถูกต้องสูงโดยจะปักแท่งตัวนำ 4 แท่ง ลงที่ระดับความลึก (B) เป็นระยะห่างเท่าๆ กัน (A) เรียงกันในแนวเส้นตรง

จากนั้นจ่ายกระแสสลับที่เข้าที่ขั้ว 1, 4 และวัดค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 2, 3 ค่าความต้านทานจะหาได้จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากขั้ว 2, 3หารด้วยค่ากระแสที่วัดได้จากขั้ว 1, 4 ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธี Four Point Test

ในกรณีของดินชั้นเดียว

สามารถหาค่าความต้านทานของดิน (ρ) ได้จาก [1]

$$\rho = \frac{(4\pi AR)}{1 + 2A/(\sqrt{A^2 + 4B^2}) - A/(\sqrt{A^2 + B^2})} \text{ ohm-m} \quad (5.1)$$

R = ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องวัด (ค่าที่ได้จาก V/I ในรูปที่ 1)

A = ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำ (เมตร)

B = ความลึกของแท่งตัวนำ (เมตร)

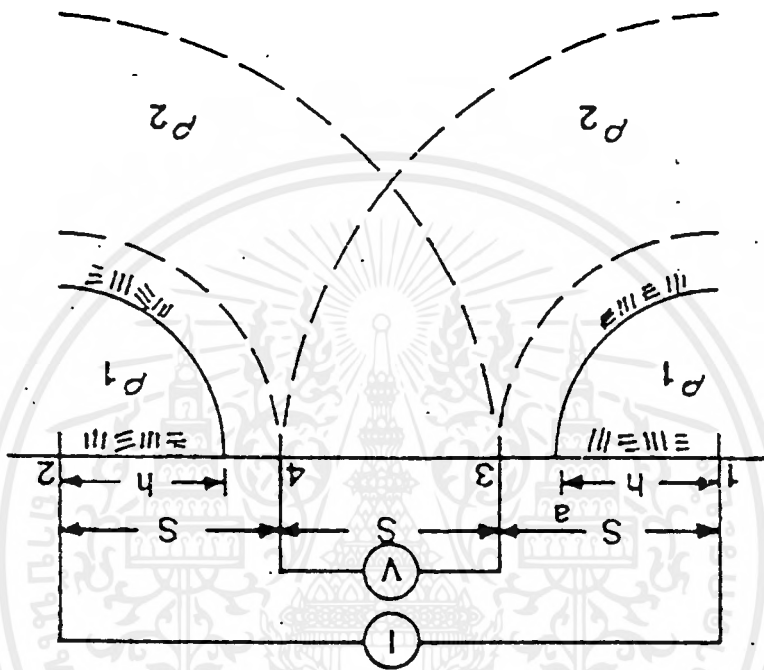
ถ้าค่า B มีค่าน้อยกว่าค่า A มากๆ ($B < A/20$) สามารถลดรูปสมการที่ 5.1 เป็น

$$\rho = 2\pi AR \quad (5.2)$$

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างการปักแท่งตัวนำที่อยู่ติดกัน มีระยะห่างน้อย กระแสส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มไหลผ่านทางผิวดิน และในกรณีที่ระยะห่างระหว่างการปักแท่งตัวนำที่อยู่ติดกันมีค่ามาก กระแสก็จะมีแนวโน้มไหลลึกลงไปใ้ดินมากขึ้นด้วย ดังนั้น ในกรณีที่ดินมีลักษณะไม่เป็น uniform หรือในดินที่มีลักษณะเป็นดิน 2 ชั้น ก็จะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 2 (ρ_2) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยสามารถหาได้ดังนี้

ในกรณีของดิน 2 ชั้น

จากสมการที่ 5.1 และ 5.2 เป็นการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยปรากฏของดินที่มีความลึก A เมตร แต่ในกรณีที่ดินมีลักษณะเป็นดิน 2 ชั้น จะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 2 (ρ_2) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



รูปที่ 5.2 แสดงการวัดด้วยวิธี Four Point Test ในดิน 2 ชั้น

พิจารณาในรูปที่ 5.2 เมื่อดินชั้นบนมีความหนา = h และระยะห่างระหว่าง Probe = s

$h < s$

กระแสจะไหลลงไปในดินจากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 2 ค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 3 จะมีค่าของ ρ_1 และ ρ_2 เป็นองค์ประกอบด้วย ส่วนค่าความต่างศักย์ที่จุด a ที่ระยะทาง h จากจุด 1 จะมีแต่ค่าของ ρ_1

โดย
$$V_{a1} = \frac{I\rho_1}{z-h}$$

เมื่อ V_{a1} = ความต่างศักย์ที่ระยะทาง h (โวลต์)

ρ_1 = ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (โอห์ม-เมตร)

h = ความหนาของดินชั้นบน ρ_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ระหว่างจุด 3 และจุด a จะมีค่าความต้านทาน
จำเพาะของดิน ρ_2 ซึ่งเท่ากับ

$$V_{3'1} - V_{a'1} = \frac{I \rho_2}{2\pi s} - \frac{I \rho_2}{2\pi h}$$

เมื่อ $V_{3'1} - V_{a'1}$ = ความแตกต่างของความต่างศักย์ระหว่างจุด 3 และจุด a (โวลต์)
ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่จุด 3 เนื่องจากกระแสไหลผ่านในดินที่จุด 1 จะได้

$$\begin{aligned} V_{31} &= V_{a1} + (V_{3'1} - V_{a'1}) \\ &= \frac{I \rho_1}{2\pi h} + \frac{I \rho_2}{2\pi s} - \frac{I \rho_2}{2\pi h} \\ &= \frac{I \rho_1}{2\pi h} + \frac{I \rho_2}{2\pi s} - \frac{I \rho_2}{2\pi h} \quad \text{โวลต์} \end{aligned}$$

โดยวิธีเดียวกันเราจะได้ความต่างศักย์ที่จุด 3 เนื่องจากกระแสไหลจากจุด 2 (-I) จะได้

$$V_{32} = \frac{-I \rho_1}{2\pi h} - \frac{I \rho_2}{2\pi s} + \frac{I \rho_2}{2\pi h} \quad \text{โวลต์}$$

และ

$$\begin{aligned} V_3 &= V_{31} + V_{32} \\ &= \frac{I \rho_2}{2\pi(2s)} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าความต่างศักย์ที่ตำแหน่ง 4 เมื่อคิดว่ามีกระแสไหลจาก
ตำแหน่ง 2 (-I) จะได้

$$V_4 = \frac{-I \rho_2}{2\pi(2s)}$$

ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ที่ Prob 3 และ Prob 4 จะได้

$$\begin{aligned} V &= V_3 - V_4 \\ &= \frac{I\rho_2}{2\pi(2s)} - \frac{[-I\rho_2]}{2\pi(2s)} \\ &= \frac{I\rho_2}{2\pi s} \quad (\text{โวลต์}) \end{aligned}$$

และค่า “ความต้านทานที่วัดได้” $R_w = \frac{V}{I}$

จะได้

$$R_w = \frac{(I\rho_2 / 2\pi s)}{I} = \frac{\rho_2}{2\pi s} \quad (\text{โอห์ม})$$

และค่า “ความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด”

$$\begin{aligned} \rho_w &= 2\pi s R_w \\ &= 2\pi s \left(\frac{\rho_2}{2\pi s} \right) \end{aligned}$$

$$\rho_w = \rho_2$$

จากการวิเคราะห์ จะพบว่า

ถ้า $h < s$ ค่า $\rho_w : \rho_2$

$s < h < 2s$ ค่า ρ_w จะมีค่าอยู่ในช่วงของ ρ_1 และ ρ_2

$2s < h$ ค่า $\rho_w = \rho_1$

5.1.2 วิธี Driven Ground Rod

วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีที่มีบริเวณที่ต้องการวัดความต้านทานของดินมีลักษณะค้ำแคบ ซึ่งไม่เหมาะกับการวัดแบบอื่นๆ ค่าความต้านทานที่วัดได้จะมีค่าความต้านทานของสายวัดรวมอยู่ด้วยจึงเป็นวิธีที่วัดค่าได้ถูกต้องเมื่อค่าความต้านทานของสายสามารถละเลยได้เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่ถูกวัด เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว แต่ไม่สามารถวัดได้ในกรณีที่ดินมีค่าความต้านทานสูงมากๆ วิธีการวัดแบบ Driven Ground Rod แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงการวัดโดยวิธี Driven Rod

ในกรณีของดินชั้นเดียว

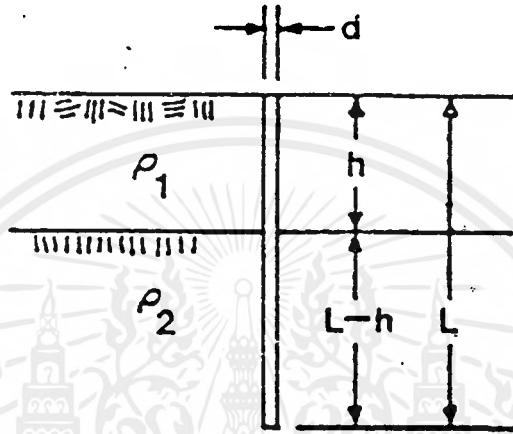
สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จาก [12]

$$\rho_D = \frac{2\pi LR_D}{\ln 8L/d - 1} \quad (5.3)$$

- เมื่อ
- ρ_D = ความต้านทานจำเพาะของดินปรากฏที่ความลึก L (โอห์ม-เมตร)
 - L = ความยาวของไดร์เวนกราวนรีรอดที่สัมผัสกับพื้นดิน (เมตร)
 - d = เส้นผ่าศูนย์กลางของกราวนรีรอด (เมตร)
 - R_D = ความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)

ในกรณีของดินสองชั้น

พิจารณาในรูป 5.4 เมื่อจ่ายกระแสเข้าไปในแท่งตัวนำ ความหนาแน่นของกระแสจะเป็นฟังก์ชันกับความต้านทานจำเพาะของดิน ρ_1, ρ_2 (จากการทดลองของ F. Dawalibi)



รูปที่ 5.4 แสดงการวัดโดยวิธี Driven Rod ในดิน 2 ชั้น

โดยที่ ρ_1 จะเป็นความหนาแน่นของกระแสในส่วนของแท่งตัวนำที่ฝังลง a ในดินชั้นบน ลึก h และมีความต้านทานจำเพาะ 1 ซึ่งจะได้ว่า

$$I = i_1 h + i_2 (L-h) \quad (5.4)$$

- เมื่อ
- I = กระแสรวมทั้งหมดในแท่งตัวนำ (แอมป์)
 - i_1 = ความหนาแน่นของกระแสในแท่งตัวนำของดินชั้นบน 1 (แอมป์/เมตร)
 - h = ความลึกของดินชั้นบน (เมตร)
 - i_2 = ความหนาแน่นของกระแสในแท่งตัวนำในส่วนของดินชั้นล่าง ρ_2 (แอมป์/เมตร)
 - L = ความยาวของแท่งตัวนำที่ฝังลงในดิน (เมตร)
 - $L-h$ = ความยาวของแท่งตัวนำที่ฝังลงในดินส่วนของดินชั้นล่าง ρ_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าความหนาแน่นของกระแส i_1 ของแท่งตัวนำของชั้นบน ρ_1 เมื่อปัดแท่งตัวนำยาว L ลงในดึกชั้นเดียว จะได้

$$\rho_1 = \frac{2\pi L R_1}{\ln \frac{8L}{d} - 1} \quad (\text{โอห์ม-เมตร}) \quad (5.4.1)$$

$$R_1 = \frac{\rho_1}{2L} * \ln \frac{8L}{d} - 1 \quad (\text{โอห์ม}) \quad (5.4.2)$$

ให้ V_R เป็นความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าแท่งตัวนำ จะได้

$$i_1 = \frac{V_R}{R_1} \quad (5.4.3)$$

แทนสมการ (5.4.2) ลงใน (5.4.3) จะได้

$$I_1 = \frac{V_R 2\pi L}{\rho_1 [\ln \frac{8L}{d} - 1]} \quad (\text{แอมป์/เมตร}) \quad (5.4.4)$$

จงหาความหนาแน่นของกระแส i_2 ของแท่งตัวนำในส่วนของดินชั้นล่าง ได้ในทำนองเดียวกันจะได้

$$i_2 = \frac{V_R 2\pi}{\rho_2 [\ln \frac{8L}{d} - 1]} \quad (\text{โอห์ม-เมตร}) \quad (5.4.5)$$

แทนสมการ (5.4.4) และ (5.4.5) ลงในสมการ (5.4) จะได้

$$I = \frac{V_R 2\pi x h}{\rho_1 [\ln \frac{8L}{d} - 1]} + \frac{V_R 2\pi x (L-h)}{\rho_2 [\ln \frac{8L}{d} - 1]} \quad (\text{แอมป์})$$

$$I = \frac{V_R 2\pi}{\ln \frac{8L}{d} - 1} \left[\frac{h}{\rho_1} + \frac{L-h}{\rho_2} \right] \quad (5.4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน. เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าป้อนความต่างศักย์ V_R เข้าที่แท่งตัวนำ ค่าความต้านทานของแท่งตัวนำ R_D จะเท่ากับ

$$R_D = \frac{V_R}{I} \quad \text{แทนค่า } I \text{ จากสมการ (5.4.6)}$$

จะได้

$$R_D = \ln \frac{8L}{d} - 1 \frac{[1]}{\frac{h}{\rho_1} + \frac{L-h}{\rho_2}} \quad (5.4.7)$$

$$\text{แทนค่า } R_D = \frac{L\rho_1\rho_2}{\rho_2 h + \rho_1(L-h)} \quad (\text{โอห์ม-เมตร}) \quad (5.4.8)$$

จากสมการ (5.4.8) จะพบว่า

ถ้าดินชั้นบนมีความลึก $h = 0$ ค่า $\rho_D = \rho_2$

และ ถ้าดินชั้นบนมีความลึก $h > L$ ค่า $\rho_D = \rho_1$

จากการวัดที่ได้กล่าวมาทั้ง 2 วิธีนั้น ในการบันทึกความต้านทานที่วัดได้ จะทำการวัดที่ระดับความลึกต่างๆ ตามต้องการเพื่อหาค่าเฉลี่ยและเพื่อเป็นการตรวจสอบลักษณะชั้นของดิน

ซึ่งจะพบว่าดินเป็นดิน 2 ชั้น เมื่อค่าความต้านทานที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกเพียงเล็กน้อย (เมื่อความชื้นและปริมาณน้ำใต้ดินมีผลน้อย) และควรจะบันทึกค่าของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นของดินในเวลาทีวัดด้วย เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนี้ ไม่ควรวัดในบริเวณที่มีการฝังแท่งตัวนำของระบบต่อลงดินอื่นๆ ปนอยู่ด้วย เพราะจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากมีกระแสส่วนไหลผ่านทางระบบต่อลงดินของระบบอื่น ยกเว้น ในกรณีที่ตำแหน่งที่วัดอยู่ตรงกลางของ mesh ของตะแกรงต่อลงดินที่มีขนาดกว้างมากๆ

5.2 การวัดค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโทรดและระบบต่อลงดิน

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งระหว่างต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการวัดค่าต้านทานของระบบต่อลงดินเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้คำนวณ เพื่อเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่า ค่า R_g ที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยพิจารณาระบบต่อลงดินที่ติดตั้งแล้วเสร็จ เสมือนเป็นแท่งอิเล็กโทรดที่ต้องการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งวิธีการวัดสามารถวัดได้จากหลายวิธี เช่น

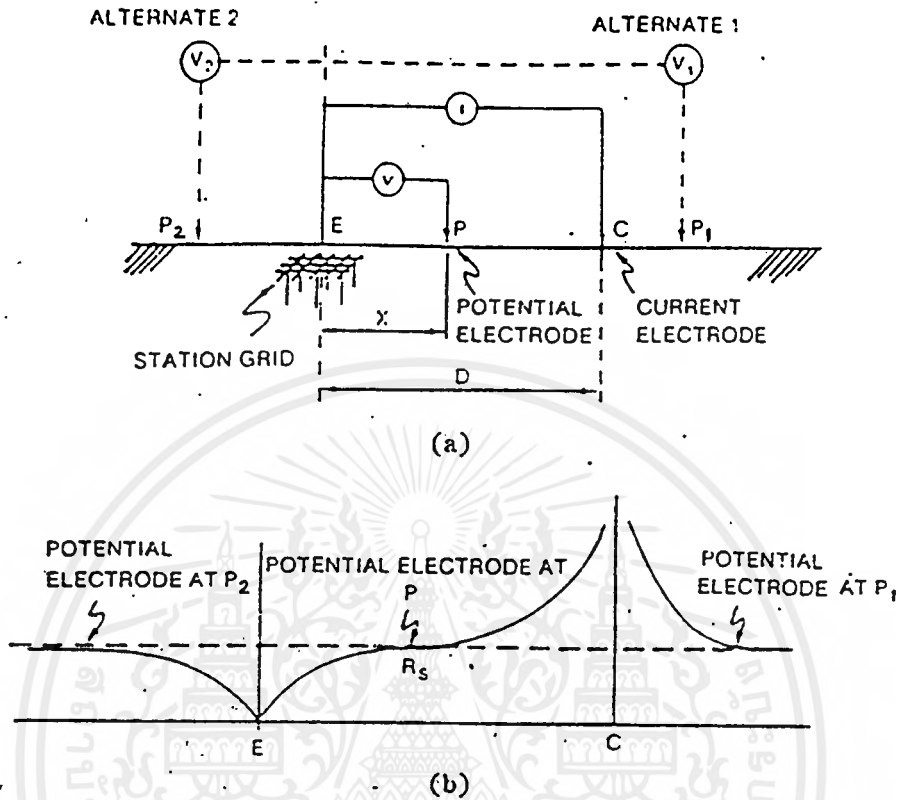
1. two-point method
2. three-point method
3. ratio method
4. Staged-fault test
5. fall-of-potential method

แต่วิธีที่นิยมและสามารถใช้กับการวัดค่า Ground Impedance ในทุกๆ แบบ คือวิธี Fall-of-Potential ดังจะกล่าวต่อไป

5.2.1 วิธี Fall-of-Potential

การวัดโดยวิธีนี้ แสดงในรูปที่ 5.5(a) โดยการจ่ายกระแสผ่านระบบต่อลงดินที่จุด E (เสมือนเป็นขั้วอิเล็กโทรด) ไปยังจุด C (Current electrode) ที่อยู่ไกลระบบต่อลงดินเป็นระบบ D มีความยาวมากพอและอยู่ในตำแหน่งที่ถือได้ว่า ค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งปกติแล้วระยะ X จะมีค่าอยู่ในช่วงหลายร้อยฟุต

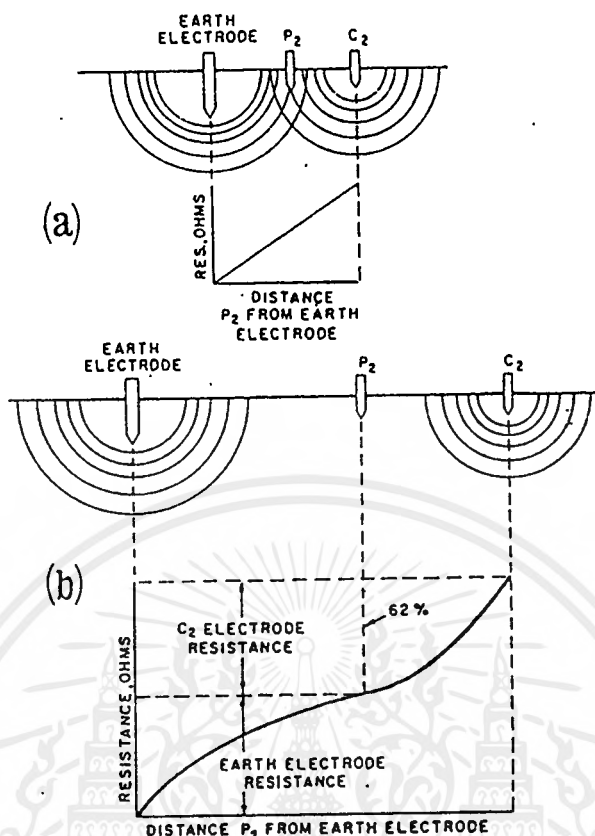
การวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด E และจุด P ให้วัดในหลายๆ ตำแหน่งโดยการเลื่อนตำแหน่ง P ไปยังทิศทางตำแหน่ง C โดยการเพิ่มระยะทางเท่าๆ กันในแต่ละครั้ง ซึ่งตำแหน่งของจุด P อาจจะเริ่มตั้งแต่บริเวณใกล้ๆ กับจุด E เลื่อนไปทางจุด C เรื่อยๆ และทำการบันทึกข้อมูลซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟควรจะได้ดังรูปที่ 5.5(b) ตาม curve ของ EPC จากจุด E ไปยังจุด P ค่าแรงดันต่อกระแสของกระแสทดสอบจะสูงขึ้นแต่ความแตกต่างของแรงดันจะเป็นศูนย์ที่จุด P ไปยังจุด C ผลของกระแสที่ไหลไปยัง current electrode จะสูงขึ้นเรื่อยๆ และแอมแปร์มิเตอร์ของแรงดันก็จะสูงขึ้น



รูปที่ 5.5 แสดงการวัดโดยวิธี Fall-of-Potential

จากกราฟในส่วนบริเวณจุด P ซึ่งเป็นบริเวณที่เกรเดียนท์ของแรงดันมีค่าเท่ากับ ศูนย์เป็นบริเวณที่ดีว่าผลของกระแสที่เคลื่อนไปยัง current electrode มีค่าน้อยมากและละเอียดได้ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ถูกรบกวนโดยศักย์ไฟฟ้าจากจุด E และ C ซึ่งค่าความต้านทานที่วัดได้ในขณะนี้ จะเป็นค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด (ระบบต่อลงดิน) (R_g)

เพื่อที่จะหาบริเวณจุด P ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้า จากขั้วอิเล็กโทรดที่จุด E และจุด C นั้น ระยะทาง X จะต้องมีค่ามากพอ ซึ่งโดยปกติแล้วค่าระยะ ทางระหว่าง E และ P ที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้ามักจะเป็น 62% ของระยะทางระหว่าง E กับ C และระยะทาง P กับ C จะเป็น 32% ของระยะทาง E กับ C ดังรูปที่ 5.6 (รายละเอียดหา ได้จาก [8])



รูปที่ 5.6 แสดงระยะการวัดที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้าในวิธี Fall-of-Potential

5.6 (a) แสดงตำแหน่งของจุด P อยู่ในตำแหน่งที่มีการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้า

5.6 (b) แสดงตำแหน่งของจุด P อยู่ในตำแหน่งที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้า

ในกรณีระบบต่อลงดินมีขนาดไม่ใหญ่นัก ระยะ X จะอยู่ในช่วงประมาณ 50 เมตร แต่

ในกรณีที่ระบบต่อลงดินมีขนาดใหญ่ ค่า R_s ในบริเวณจุด P (บริเวณที่แกรเดียนท์ของแรงดัน ถือว่ามีค่าเท่ากับศูนย์) อาจจะต้องใช้ระยะที่ไกลมาก ซึ่งรายละเอียดหาได้จาก [8]

ในกรณีตำแหน่งของ Potential electrode P อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกับขั้ว electrode C (ที่ตำแหน่ง P₂) ค่าความต้านทานที่วัดได้ จะมีค่าต่ำกว่าค่าจริง และเมื่อตำแหน่งของ Potential electrode P อยู่ทางด้านเดียวกับขั้ว electrode C (ที่ตำแหน่ง P) ก็จะได้ค่าความต้านทานที่วัดได้เป็นค่าจริง



เอกสารอ้างอิง

1. IEEE Guide For Safety in AC Substation Grounding Ansi/IEEE Std.80-1986
2. IEEE Guide For Safety in AC Substation Grounding Ansi/IEEE Std.80-1976
3. DALZIEL, C.F., LAGEN, J.B. and THURSTON, J.L. Electric Shock. ATEE Transaction, Vol 60, 1941, PP 1073-1079.
4. RALPH A.HARVIE, "Avoiding Hazards from Earth Currents in Industrail Plants," IEEE Transaction on industry App.May/June 1977
5. PETER A. ZOTOS, "Ground Grid Design in Large Industrial Plants," IEEE Transaction on industry App. Vol.24 May/June 1988
6. SVERAK, J.G. Simplified Analysis of Electrical Gradients Abore a Ground Grid, Part I-How Good is the Present IEEE Mjethod? IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol PAS-103, not, Jan 1984. PP 7-25.
7. SCHWARZ. S.J. Analysis Expression for Resistance of Grounding System AIEE Transactions, Vol.73, part III-B, 1954 PP 1011-1016.