

การศึกษาและออกแบบระบบต่อลงดิน
STUDY AND DESIGN OF GROUDING SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2535

ISBN 974-8158-54-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษาและการออกแบบระบบต่อดงดิน

STUDY AND DESIGN OF GROUNDING SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2535

ISBN 974-8158-54-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND DESIGN OF GROUNDING SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

MASTER OF ELECTRICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1992

ISB 974-8158-54-3

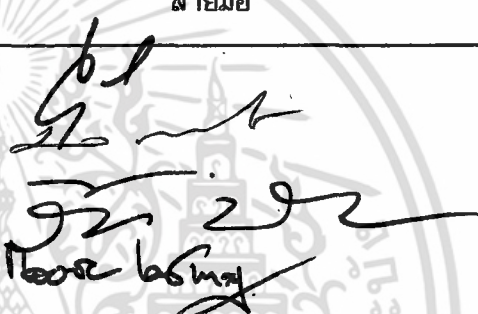
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและการออกแบบระบบต่อลงดิน

STUDY AND DESIGN GROUNDING SYSTEM

ชื่อนักศึกษา นายอลงกรณ์ พรหมสวัสดิ์ รหัสประจำตัว 33620028
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ศุภี บรรจงจิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือ
รศ. ศุภี บรรจงจิตร	
ผศ. มณฑล ลีลาจินดา ไกรฤกษ์	
อาจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา	
รศ. ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ	
ผศ. ดร. กอบชัย เดชหาญ	

ค่าระดับคะแนนที่เป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ GOOD

วัน/เดือน/ปี ทสอบ 14 พฤษภาคม 2536 เวลา 10.00 น. ถึงเวลา 11.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง (A-307) คณะวิศวกรรมศาสตร์



วันที่... 31... เดือน... พฤษภาคม... พ.ศ. 2536...

หมายเหตุ การวัดผลวิทยานิพนธ์ให้ใช้ค่าระดับคะแนนดังนี้

ค่าระดับคะแนน	ผลการศึกษา
O	Outstanding (ดีเยี่ยม)
G	Good (ดี)
P	Pass (ผ่าน)
F	Fail (ไม่ผ่าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและการออกแบบระบบต่อลงดิน
นักศึกษา	นายอลงกรณ์ พรหมสวาสดิ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุภี บรรจงจิตร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	-
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
พ.ศ.	2535

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึง การศึกษาและวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมกับลักษณะงานต่างๆ เช่น ในกรณีของสถานีไฟฟ้าย่อย โรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆที่มีลักษณะการใช้แรงดันไฟฟ้าสูงแตกต่างกัน ตามพื้นที่การใช้งานต่างๆของ โรงงาน ซึ่งในแต่ละกรณี จะมีวิธีการออกแบบที่รวดเร็วและเหมาะสมต่างกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและประหยัด โดยจะใช้ตะแกรงตัวนำต่อลงดินที่ปราศจากตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง ซึ่งอ้างอิงจาก หลักการของ IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/std.80-1986 โดยได้ปรับปรุงเพิ่มเติมให้สามารถออกแบบให้เร็วยิ่งขึ้น และจะกล่าวถึง การศึกษา วิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน อันได้แก่ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจะมีผลทำให้ ค่าที่ได้จากการคำนวณ เกิดความผิดพลาดเมื่อใช้หลักการดังกล่าว โดยจะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธีต่างๆ และแสดงเปอร์เซ็นต์การผิดพลาดในกรณีต่างๆ เพื่อนำไปสู่ การเลือกใช้ วิธีที่เหมาะสม เพื่อให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความผิดพลาดน้อยที่สุดและเกิดความปลอดภัยมากที่สุด

ในเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้ ยังได้รวบรวม วิธีการแก้ไขและปรับปรุงระบบต่อลงดินให้มีค่าความปลอดภัยสูงขึ้น โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในวิธีการต่างๆกัน ตลอดจนจะกล่าวถึง หลักการ และวิธีการวัดค่าต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบระบบต่อลงดิน เช่น ค่าความต้านทานของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน หัวต่อลงดิน และ ข้อผิดพลาด ผลเสียต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นเมื่อทำการวัดอย่างไม่ถูกต้อง รวมทั้งข้อแนะนำต่างๆที่มีจะถูกละเลย เพื่อให้การออกแบบระบบต่อลงดินเป็นไปอย่างถูกต้อง ปลอดภัยและเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน I เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THESIS TITLE STUDY AND DESIGN OF GROUNDING SYSTEM
STUDY MR. ALONGKORN PROMSAWARD
THESIS ADVISOR ASSOC. PROF. SULEE BANJONGJIT
CO-ADVIOR -
LEVEL OF STUDY MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT ELECTRICAL ENGINEERING KING MONGKUT'S INSTITUTE
 OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
ACADEMIC YEAR 2535

ABSTRACT

This thesis concerns the study and the design of the grounding system which is conformed to different kind of work, such as substations and plants of different demand of high voltage. For Hrese particular 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/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 shown in order to help users to finalize their decision. Apart from that we have also included the way to rectify and to evaluate the design of grounding system to posses more security by using common materials. The principle and essencial ways of measure in designing the grounding system are given herein after aswell.

กิตติกรรมประกาศ

ในท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ร.ศ. ศุภี บรรจงจิตร เป็นอย่างสูง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดีเสมอมา พร้อมทั้งขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสถาบันแห่งนี้ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้

ขอขอบคุณ คุณสมเกียรติ คุณเผือก บริษัท ศรีอุทอง ที่ได้สละเวลา และให้คำแนะนำต่างๆเป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **III** การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของระบบต่อลงดิน	1
1.2 ปัญหาที่พบในการออกแบบระบบต่อลงดิน	2
1.3 เป้าหมายของการออกแบบระบบต่อลงดินในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้	5
บทที่ 2 ทฤษฎีการออกแบบ	6
2.1 รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน	7
2.1.1 วงจรสมมูลย์ของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสไฟฟ้า	9
2.1.2 ค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้	11
2.1.3 ค่าแรงดันสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้	12
2.1.4 ค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน	14
2.1.5 ค่าความยาวของตัวนำต่อลงดินที่สั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัย	15
2.2 การออกแบบระบบต่อลงดิน ในสถานีไฟฟ้าย่อย	16
2.3 การออกแบบระบบต่อลงดิน ให้เหมาะสมกับ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่าง ๆ	19
2.3.1 การพิจารณาเลือกระบบต่อลงดิน	19
2.3.2 การแยกระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ออกจากระบบต่อลงดิน ของโรงงานอุตสาหกรรม	19

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การรวมระบบต่อลงดินของสถานีวิทยุกับระบบต่อลงดินของบริเวณอื่น ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม	20
- กรณีขนาดพื้นที่ของโรงงานมีขนาดไม่กว้างขวางมาก	21
- กรณีขนาดพื้นที่ของโรงงานมีขนาดกว้างขวางมาก	22
บทที่ 3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญของระบบต่อลงดิน	24
3.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน	25
3.2 ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน	30
บทที่ 4 การปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดิน	33
4.1 วิธีลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน	33
- โดยการเพิ่มความยาวของตัวนำตะแกรงต่อลงดิน	33
- โดยการเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง	34
- โดยการใส่สารเคมี	35
4.2 วิธีเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่า	37
บทที่ 5 หลักการและวิธีการวัดค่าที่สำคัญของระบบต่อลงดิน	41
5.1 การวัดค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะของดิน	41
5.1.1 วิธี Four Point test	42
5.1.2 วิธี Driven Rod	46
5.2 ค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโรด ระบบต่อลงดิน	51
5.2.1 วิธี Fall-of-Potential	51
5.2.2 วิธี Driven Rod	54
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจัย	55
6.1 ผลการคำนวณ และ ตัวอย่างการออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย	55
- ผลการคำนวณที่ 1	71

	หน้า
- ผลการคำนวณที่ 2	72
- ผลการคำนวณที่ 3	73
6.2 ผลการคำนวณและ ตัวอย่างการออกแบบการรวมระบบต่อลงดิน ในสถานีไฟฟ้า ย่อยกับ ระบบต่อลงดินบริเวณอื่นๆ ใน โรงงานอุตสาหกรรม ที่มีขนาดพื้นที่ไม่ กว้างขวางมาก	60
- ผลการคำนวณที่ 4	74
- ผลการคำนวณที่ 5	75
- ผลการคำนวณที่ 6	76
6.3 ผลการคำนวณและ ตัวอย่างการออกแบบการรวมระบบต่อลงดิน ในสถานีไฟฟ้า ย่อยกับ ระบบต่อลงดินบริเวณอื่นๆ ใน โรงงานอุตสาหกรรม ที่มีขนาดพื้นที่ กว้างขวางมาก	63
- ผลการคำนวณที่ 7	77
- ผลการคำนวณที่ 8	78
- ผลการคำนวณที่ 9	79
- ผลการคำนวณที่ 10	80
- ผลการคำนวณที่ 11	81
- ผลการคำนวณที่ 12	82
6.4 ผลการวิจัยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยสำคัญของระบบต่อลงดิน	83
6.4.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	83
6.4.2 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน	87
6.5 ผลการวิจัยการปรับปรุงระบบต่อลงดิน เพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยของระบบ ต่อลงดิน	92
6.5.1 การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน	92
6.5.2 การเพิ่มความต้านทานที่เท่า	92
บทที่ 7 สรุป วิเคราะห์ ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	94
เอกสารอ้างอิง	101

ประวัติผู้เขียน
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

หน้า
102
103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **VII** การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดง ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามชนิดของดิน	26
3.2	แสดง ผลของของเหลวที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน	27
3.3	แสดง ผลของเกลือที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน	28
3.4	แสดง ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน	29
4.2	แสดง ค่ารัศมีสมมูลย์ของตัวนำทรงกระบอกที่ความลึกต่างๆ	40
6.4.1	แสดง ค่าความต้านทานและความต้านทานจำเพาะของดินที่เปลี่ยนแปลงตามความลึก	83
6.4.2	แสดง ผลของการหาค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน โดยวิธีต่างๆ	87



สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดง ทิศทางการไหลของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน	2
1.2	แสดง ความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน ในภาชนะ 3 มิติ ซึ่งจะมีค่าความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของตะแกรงกับจุดตัดของตะแกรง	3
2.1	แสดง รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน	7
2.2	แสดง วงจรสมมูลย์ของความต้านทาน ในรูปของแรงดันก้าว	9
2.3	แสดง วงจรสมมูลย์ของความต้านทาน ในรูปของแรงดันสัมผัส	9
2.4	แสดง แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดิน	10
3.1	แสดง ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลกับค่าความต้านทานของดิน	29
3.2	แสดง ขนาดและรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน	31
4.1	แสดง ค่าความต้านทานของอิเล็กโตรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดิน ในแนวตั้ง	34
4.2	แสดง ค่าความต้านทานของอิเล็กโตรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มความยาวแท่งตัวนำต่อลงดิน ในแนวตั้ง	35
4.3	แสดง การเติมสารเคมีเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโตรด	36
4.4	แสดง ผลของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้สารเคมีช่วยลดค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโตรด	37
4.5	แสดง ทิศทางการไหลของกระแสไปยังแผ่นโลหะกลม เมื่อรองพื้นด้วยแผ่นพลาสติกซึ่งสามารถแทนแผ่นโลหะกลม ได้ด้วยแท่งตัวนำสมมูลย์	39
5.1	แสดง การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยวิธี Four Point Test	42
5.2	แสดง การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยวิธี Four Point Test ในดิน 2 ชั้น	43
5.3	แสดง การวัดโดยวิธี Driven Rod	46
5.4	แสดง การวัดโดยวิธี Driven Rod ในดิน 2 ชั้น	47
5.5	แสดง การวัดโดยวิธี Fall-of-Potential	52
5.6	แสดง ระยะเวลาวัดที่ปลอดภัยการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้าในวิธี Fall-of-Potential	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 IX
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่		หน้า
6.1	แสดง การวางตะแกรงต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยในชั้นแรก	56
6.2	แสดง การวางตะแกรงต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยในชั้นสุดท้าย เมื่อลด ความยาวตัวนำ L	59
6.3	แสดง การรวมระบบต่อลงดินของ โรงงาน	60
6.4	แสดง การรวมระบบต่อลงดินของ โรงงานเมื่อเพิ่มความยาวตัวนำที่สถานีไฟฟ้าย่อย	62
6.5	แสดง ระบบต่อลงดินของ โรงงานที่1 และสถานีไฟฟ้าย่อย(8*8 mesh)	63
6.6	แสดง ระบบต่อลงดินของ โรงงานที่1 และสถานีไฟฟ้าย่อย(16*16 mesh)	65
6.7	แสดง ระบบต่อลงดินของ โรงงานที่1+สถานีไฟฟ้าย่อย+บริเวณที่พัก ในชั้นแรก	66
6.8	แสดง ระบบต่อลงดินของ โรงงานที่1+สถานีไฟฟ้าย่อย+บริเวณที่พัก ในชั้นสุดท้าย	67
6.9	แสดง ระบบต่อลงดินของ โรงงานทั้งหมดในชั้นแรก	68
6.10	แสดง ระบบต่อลงดินของ โรงงานทั้งหมดในชั้นสุดท้าย	69
6.11	แสดง การเปรียบเทียบค่า R_D ที่คำนวณจากค่า R_D กับค่า R_D ที่คำนวณจาก R_u ที่จังหวัดสระบุรี	84
6.12	แสดง การเปรียบเทียบค่า R_D ที่คำนวณจากค่า R_D กับค่า R_D ที่คำนวณจาก R_u ที่จังหวัดชลบุรี	85
6.13	แสดง การเปรียบเทียบค่า R_D ที่คำนวณจากค่า R_D กับค่า R_D ที่คำนวณจาก R_u ที่จังหวัดนครปฐม	86
6.14	แสดง ค่าความต้านทานที่เท่าที่ ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จาก Model test จาก[11]	92
6.15	แสดง ผลของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ผิวดินเมื่อวางแผ่นพลาสติกลงบน ตะแกรงต่อลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ	93
7.1	แสดง การเชื่อมต่อระบบต่อลงดินที่ถูกต้อง	95
7.2	แสดง การเชื่อมต่อระบบต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง	95

1.1 ความสำคัญของระบบต่อลงดิน

การต่อลงดินนี้ มีจุดประสงค์หลัก ก็เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่บุคคลที่เกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นมาก และความต้องการกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟทั้งหลายมีปริมาณมาก การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจำนวนมากไปยังส่วนต่างๆ ของประเทศที่มีระยะทางไกล ๆ จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อลดความสูญเสียในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งการใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงดังกล่าว จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ที่เข้ามาเกี่ยวข้องในบริเวณนั้น ๆ ได้

ไม่ว่าจะเป็น สถานีไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับการปรับระดับแรงดันให้สูงขึ้น เพื่อใช้ในการส่ง, จ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือ สถานีไฟฟ้าย่อยที่รับและจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับ โรงงานอุตสาหกรรม หรือ บริเวณใด ๆ ที่มีการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งในบริเวณดังกล่าว จำเป็นที่จะต้องทำให้เกิดความปลอดภัยอันเนื่องมาจากความแตกต่างของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradient) ที่จะเกิดขึ้น เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติ เช่น การลัดวงจรลงดิน (Ground Fault) และอื่นๆ ฯลฯ โดย การต่อลงดิน (Grounding) ซึ่งการต่อลงดินนี้ นอกจากจะทำให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานแล้ว ยังทำให้เกิดความปลอดภัยกับอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย เพราะระบบต่อลงดิน จะช่วยเป็นทางให้กระแสไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสได้อย่างสะดวก และทำให้อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับ Fault ทำงานได้ดีขึ้นด้วย จึงเหมือนกับว่าทำให้ระบบมีการทำงานดีขึ้นอีกด้วย

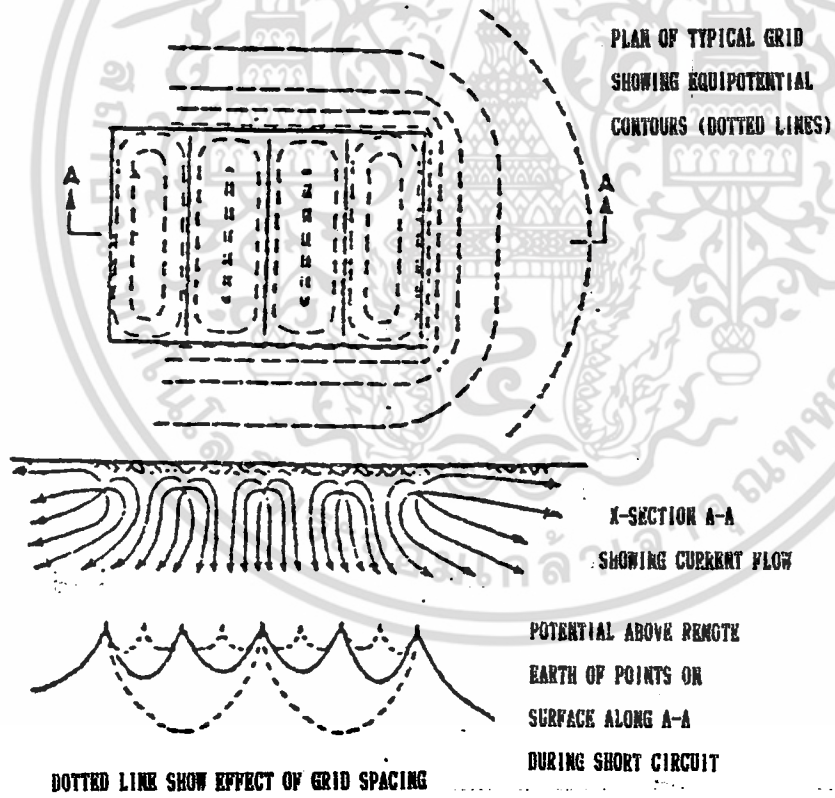
โดยการต่อลงดินจะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

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

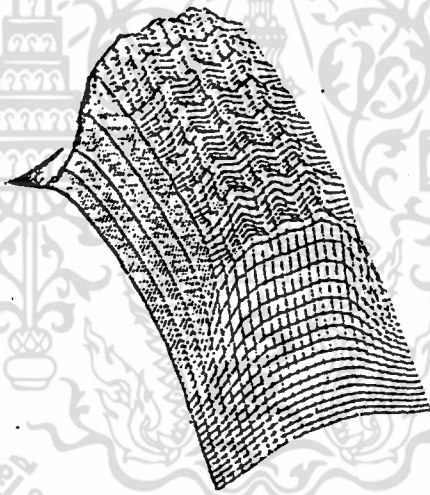
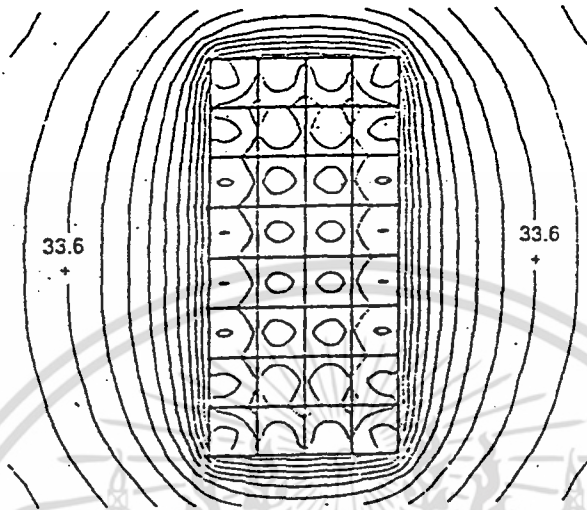
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึง การออกแบบการต่อลงดินของระบบ (Grounding System) โดยใช้ตะแกรงตัวนำต่อลงดิน (Ground Grid) เป็นทางไหลกลับของกระแสลัดวงจรขณะเกิดสภาวะผิดปกติ เพื่อลดความแตกต่างของศักดาไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นให้อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยด้วยวิธีที่สะดวก และเชื่อถือได้ โดยอ้างอิงหลักการจาก **IEEE GUIDE FOR SAFETY IN**

1.2 ปัญหาที่พบในการออกแบบระบบต่อลงดิน

ปัญหาลำคัญที่พบในการออกแบบระบบต่อลงดิน คือ ในขณะที่เกิดสภาวะผิดปกติขึ้น เช่น กระแสลัดวงจรลงดิน (Ground Fault Current) ที่คทางกรไหลกระแสจะไหลกระจายจากจุดเกิดเหตุผ่านตัวนำต่อลงดินกลับไปยังแหล่งจ่าย เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของศักดาไฟฟ้า (Potential Gradients) ขึ้นในบริเวณตะแกรงที่ต่อลงดินและดินในบริเวณใกล้เคียง ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้นเมื่อมีการออกแบบระบบต่อลงดินอย่างไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ค่าแรงดันที่ของศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงมาก เป็นผลให้เกิดอันตรายแก่ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้น ๆ ได้ [2]



รูปที่ 1.1 ทิศทางการไหลของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน



รูปที่ 1.2 ความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน ในภาพ 3 มิติ ซึ่งจะมีค่าความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของตะแกรงกับจุดตัดของตะแกรง

ปัญหาของความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดสภาวะผิดปกติ เป็น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากจะต้องคำนึงถึง เรื่องความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าแล้วยังมีปัญหาค่าอื่น ๆ ที่จะต้องคำนึงถึงที่จะทำให้ระบบต่อลงดิน ไม่สมบูรณ์ ได้แก่

- ตำแหน่งที่ร่างกายคนสัมผัสระหว่างจุด 2 จุด มีค่าความต่างศักย์มากเกินขอบเขตความปลอดภัยที่กำหนด
- ค่าความต้านทานที่จะป้องกันการไหลผ่านของกระแสจากจุดที่มีสัมผัสไหลผ่านร่างกายลงไปยังดินมีค่าสูงไม่เพียงพอ
- ช่วงเวลาที่กระแสผิดปกติไหลผ่านร่างกายมนุษย์ จนกระทั่งอุปกรณ์ป้องกันปลดวงจรออกขณะเกิดสภาวะไม่ปกติขึ้นมีค่านานเกินไป
- การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเปลี่ยนไปเป็นผลให้การออกแบบผิดพลาด
- ผลของความต้านทานจำเพาะของดินที่จะมีผลต่อการกระจายของกระแสขณะเกิดสภาวะผิดปกติ
- การผิดพลาดจากวิธีการวัดค่าต่างๆ การเก็บข้อมูล และการผิดพลาดจากการคำนวณทำให้เกิดความผิดพลาดในการออกแบบ
- ความล่าช้าในการออกแบบและสิ้นเปลืองวัสดุเกินความจำเป็น เมื่อเลือกใช้วิธีการออกแบบที่ไม่เหมาะสม

ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ล้วนแต่เป็นสาเหตุทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้เกี่ยวข้องทั้งสิ้น ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้สามารถแก้ไขได้ โดยการออกแบบที่เหมาะสม และกฎวิธี ดังจะกล่าวต่อไปในรายละเอียดของบทต่าง ๆ

1.3 เป้าหมายของการออกแบบระบบต่อลงดินในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เป้าหมายของการออกแบบระบบต่อลงดินที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดประสงค์หลักคือ

1. แนะนำถึงหลักการและวิธีการออกแบบระบบต่อลงดิน

2. สามารถออกแบบระบบต่อลงดินได้อย่างเหมาะสมกับลักษณะของงานที่ต้องการติดตั้งระบบต่อลงดินเพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบ ประหยัดทั้งวัสดุและค่าแรงในการติดตั้ง

3. วิเคราะห์ ปัจจัย องค์ประกอบต่างๆที่มีผลกระทบ ต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน เพื่อให้สามารถคำนวณ ออกแบบระบบต่อลงดิน ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

4. กล่าวถึงวิธีการปรับปรุง แก้ไข ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะ เกิดกระแสลัดวงจรลงดินในระบบต่อลงดิน เพื่อเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมที่สุดนำมาปรับปรุงระบบต่อลงดินให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

ซึ่งจุดประสงค์ดังกล่าวจะกล่าวไว้อย่างชัดเจนในหัวข้อต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2
ทฤษฎีการออกแบบ

ในระบบไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน กระแสจะไหลจากจุดเกิดเหตุกลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเสมอ ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์บนผิวดินมีค่าสูงขึ้น (GPR*) เป็นผลให้เกิดอันตรายแก่บุคคลที่เกี่ยวข้อง

ในการป้องกันอันตรายจากการเกิดความต่างศักย์ของผิวดินขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน ทำได้หลายทาง คือ

1. ลดกระแสลัดวงจรลงดิน โดยติดตั้ง Resistance Grounding ให้มากกว่า Solid Grounding ที่ Neutral ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2. ใช้ระบบต่อลงดิน เป็นทางเดินของกระแสลัดวงจรแทนผิวดิน (ซึ่งจะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) โดย

- แยกระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ออกจาก ระบบต่อลงดินบริเวณใกล้เคียง
- รวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย กับระบบต่อลงดินของบริเวณใกล้เคียงเข้าด้วยกัน

โดยออกแบบร่วมกัน

การออกแบบระบบต่อลงดินที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการคำนวณเปรียบเทียบค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน (E_m, E_u) กับค่าขอบเขตความปลอดภัยที่ร่างกายสามารถทนได้ (E_{touch}, E_{step}) โดยอ้างอิงจาก หลักการของ IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUB STATION GROUNDING ANSI/IEEE std 80-1986 และได้ปรับปรุงขั้นตอนการคำนวณโดยเพิ่มการตรวจสอบเพื่อให้ได้ผลการออกแบบที่เร็วกว่าเดิม ซึ่งการคำนวณโดยวิธีนี้ จะสามารถทำได้สะดวก, รวดเร็วกว่าวิธีอื่น

GPR*: Grid Potential Rise คือ ศักดาของระบบต่อลงดินที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระแสลัดปกติ เมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ ตามปกติแล้วขณะที่ไม่เกิดกระแสลัดปกติ ศักดาของระบบต่อลงดินจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์และถือว่าเท่ากับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ แต่ขณะเกิดกระแสลัดปกติ ศักดาของระบบต่อลงดินจะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ (คำนวณได้จากสมการที่

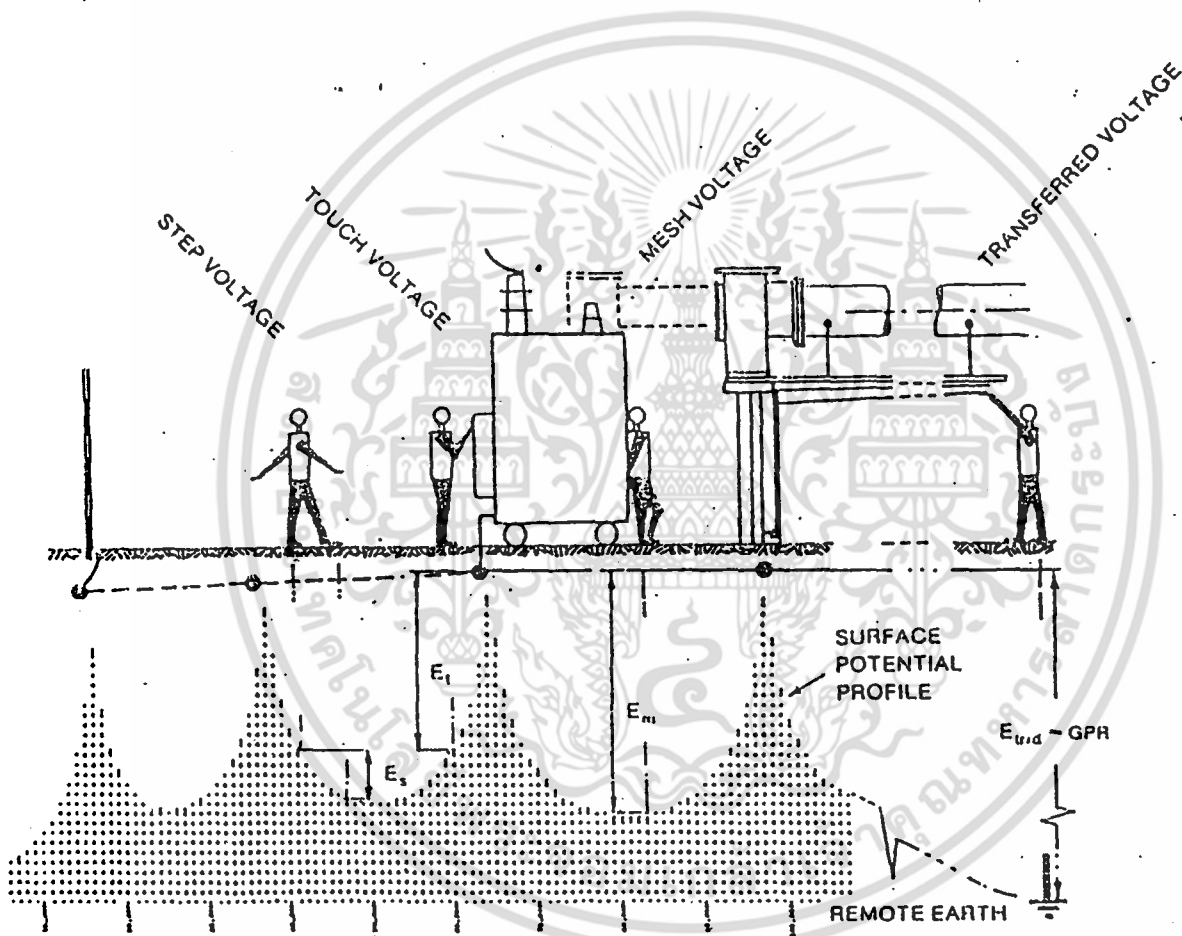
2.30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทบทวน-6-การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (พิจารณา รูปที่ 2.1)

1. แรงดันสัมผัส (Touch Voltage : $E_{touch} = E_t$) คือ ความต่างศักย์ระหว่างตัวกลางใหม่ของระบบต่อลงดิน (GPR*) ขณะเกิดกระแสผิดปกติ เทียบกับ ศักดาพื้นผิวตำแหน่งที่คนยืนขณะที่เอามือจับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

2. แรงดันก้าว (Step Voltage : E_{step}) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาพื้นผิวสองจุดที่เท้าคนก้าวเดิน ขณะเกิดกระแสผิดปกติ โดยไม่มีส่วนใดในร่างกายสัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน



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 ค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด

ที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน-7-การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E_u (Miximum Step Voltage) คือ ค่าแรงดันก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นบนระแนง
ต่อลงดิน

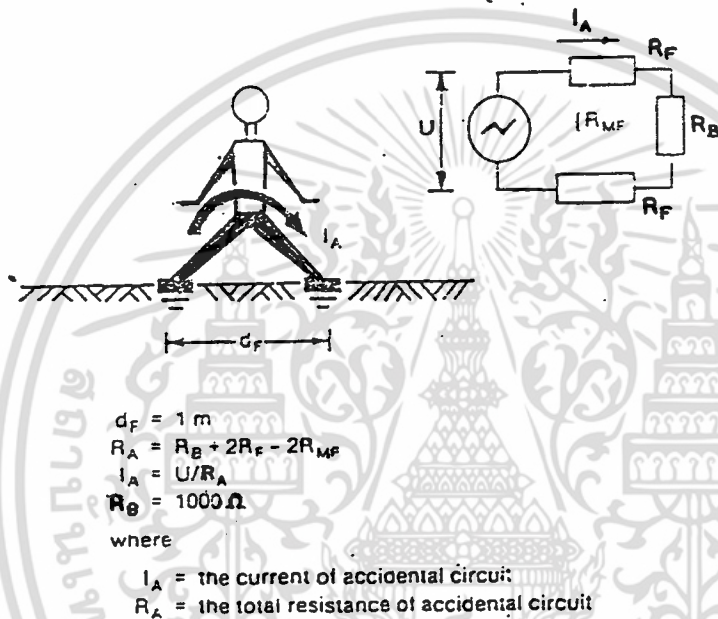
E_{trrd} (Transferred Voltage) คือ รูปแบบหนึ่งของแรงดันสัมผัส ที่จะเกิดขึ้น
เมื่อมีการเชื่อมต่อของตัวนำไฟฟ้าออกนอกระบบต่อลงดิน เพราะในเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน จะ
เกิดความต่างศักย์ขึ้น ระหว่างตัวนำที่เชื่อมต่อออกไปยังนอกบริเวณของระบบต่อลงดินที่ระยะอนันต์

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.1 จะพบว่า เมื่อเกิดกระแสลัดปกิตลัดวงจรลงดิน กระแสจะ
ไหลผ่านร่างกายคนในรูปแบบของแรงดันก้าวและแรงดันสัมผัส ซึ่ง เขียนเป็นวงจรสมมูลย์ได้ทั้งสอง
กรณี ดังรูปที่ 2.2, 2.3

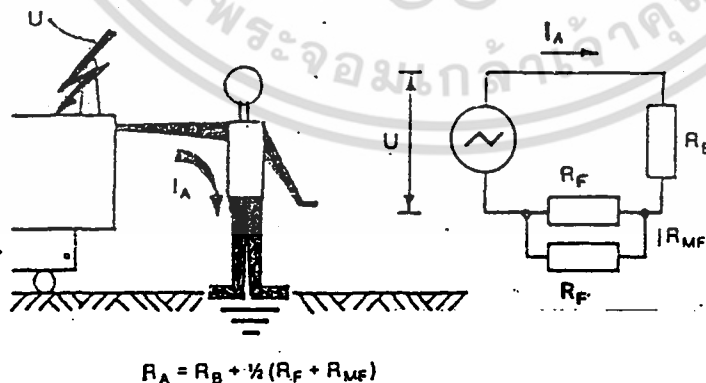


2.1.1 วงจรสมมุติของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสผิดปกติ (ACCIDENTAL GROUND CIRCUIT)

การพิจารณาค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ เมื่อกำหนดค่าขอบเขตความปลอดภัย ในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น สามารถแทนค่าความต้านทานในส่วนต่างๆของร่างกายมนุษย์ขณะที่มีกระแสไหลผ่านเป็นวงจรสมมุติได้ ดังในรูปที่ 2.2, 2.3



รูปที่ 2.2 วงจรสมมุติของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ในรูปของแรงดันก้าว



รูปที่ 2.3 วงจรสมมุติของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ในรูปของแรงดันสัมผัส

ในกรณีของ แรงดันก้าว

ค่า ความต้านทาน รวมของวงจรความต้านทานสมมูลย์ (R_A) หาได้จาก

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

ในกรณีของ แรงดันสัมผัส

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

เมื่อ R_B คือ ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (ปกติให้ = 1000 โอห์ม)

R_{2FS} คือ ความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างที่ต่ออนุกรม

R_{2FP} คือ ความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างที่ต่อขนาน

R_{FOOT} คือ ความต้านทานของดินเฉพาะที่อยู่ใต้ฝ่าเท้า (ปกติสมมติให้เท้าของคน แทนด้วยแผ่นโลหะกลมรัศมี $b=8$ ซม. ซึ่งจะมีขนาดใกล้เคียงกับพื้นที่ใต้ฝ่าเท้าที่สัมผัสกับพื้น)

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

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

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

เมื่อแทนค่า R_{2FS}, R_{2FP} ให้อยู่ในรูปของ ρ จะได้

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

และ $R_{2FP} = 1.5\rho \quad (2.6)$

ในกรณีที่มีการโรยหินกรวด ค่า R_{2FS}, R_{2FP} จากสมการ 2.5, 2.6 จะมีฟังก์ชันของ

ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (ρ_s) และ ความหนาของชั้นหินกรวด (h_s) จะพิจารณาร่วมอยู่ด้วย โดยสมการที่ 2.5, 2.6 จะเปลี่ยนเป็น

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

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

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

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

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

h_s คือ ความหนาของชั้นหินกรวด

K คือ Reflection factor

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

2.1.2 ค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้ (PERMISSIBLE BODY CURRENT LIMIT)

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

$$I_B = k / \sqrt{t_e} \quad (2.9)$$

เมื่อ

t_e คือ ช่วงเวลาที่คนได้รับกระแส

k คือ ค่าคงที่ ซึ่งได้จากการทดลอง $= \sqrt{S_B}$

S_B คือ ค่า shock energy ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะจ่ายกระแสผ่านร่างกายคนในช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในช่วง 0.03-0.3 วินาที เพื่อดูปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ $S_B = (I_B)^2 t_e$ (ไม่มีหน่วย เนื่องจากเป็นค่าคงที่เฉลี่ยจากการทดลอง)

โดย S_{B50} คือ ค่า shock energy ที่คนน้ำหนักไม่เกิน 50 kg สามารถทนได้ = 0.0135

S_{B70} 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

$$I_B = 0.116/\sqrt{t_e} \quad (2.10)$$

ค่ากระแสสูงสุดที่คนน้ำหนักไม่เกิน 70 kg ทนได้

$$I_B = 0.157/\sqrt{t_e} \quad (2.11)$$

เมื่อกระแสผ่านร่างกาย 1 mA จะทำให้มีความรู้สึกชาเล็กน้อย

1-6 mA เกิดการกระตุกแต่ยังคงสามารถควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อได้

9-25 mA รู้สึกเจ็บ ไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้ เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ ทำให้การหายใจลำบาก และอาจหยุดหายใจ ถ้าได้รับกระแสหลาย ๆ นาที

60-100mA จะยับยั้งการทำงานของระบบหายใจ ทำให้กล้ามเนื้อเยื่อเสียหายและตายได้ ถ้าไม่ได้รับการรักษาอย่างทันเวลาที่

ซึ่งในการออกแบบจะให้ค่า I_B อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 60-100 mA

2.1.3 ค่าแรงดันสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้ (CRITERIA OF PERMISSIBLE / POTENTIAL DIFFERENCE)

เมื่อพิจารณา วงจรสมมุติของความต้านทานในร่างกายมนุษย์ขณะเกิดกระแสผิดปกติ และค่ากระแสสูงสุดที่ร่างกายทนได้แล้ว สามารถหาค่าระดับแรงดันสัมผัสสูงสุด และแรงดันก้าวสูงสุดได้โดย

พิจารณาค่าแรงดันสัมผัส

$$E_{TOUCH} = (R_B + R_{2FP}) I_B \quad (2.12)$$

แทนค่า $R_B = 1000 \text{ ohms}$ และ R_{2FP} , I_B จาก สมการ 2.8 , 2.10 ใน สมการ(2.12)

จะได้

แรงดันสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่น้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50kg

$$E_{\text{touch } 50} = \frac{(1000+1.5C_s(h_s, k)\rho_s)(0.116)}{\sqrt{t_s}} \quad (2.13)$$

แรงดันสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่น้ำหนักไม่ต่ำกว่า 70kg

$$E_{\text{touch } 70} = \frac{(1000+1.5C_s(h_s, k)\rho_s)(0.157)}{\sqrt{t_s}} \quad (2.14)$$

พิจารณาแรงดันก้าว

$$E_{\text{STEP}} = (R_B + R_{2FS}) I_B \quad (2.15)$$

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

แรงดันก้าวสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่น้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50kg

$$E_{\text{step } 50} = \frac{(1000+6C_s(h_s, k)\rho_s)(0.116)}{\sqrt{t_s}} \quad (2.16)$$

แรงดันก้าวสูงสุดที่ร่างกายทนได้ สำหรับคนที่น้ำหนักไม่ต่ำกว่า 70kg

$$E_{\text{step } 70} = \frac{(1000+6C_s(h_s, k)\rho_s)(0.157)}{\sqrt{t_s}} \quad (2.17)$$

ในการออกแบบระบบต่อลงดิน จะต้องให้ค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันก้าวอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

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

E_m : Mesh Voltage คือ ค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแกรงของ ระบบต่อลงดิน

E_s : Max.Step Voltage คือ ค่าแรงดันก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแกรงของระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน-13-การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน (Maximum Step and Mesh Voltage)

โดยปกติแล้ว ระบบต่อลงดินที่ถูกออกแบบให้มีความปลอดภัยเพียงพอแล้ว ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินจะถูกพิจารณาในรูปของ E_m ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 แล้วจะเห็นว่า E_m (Mesh Voltage) จะเป็น ค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแกรงของระบบต่อลงดิน ซึ่งในกรณีของระบบต่อลงดินที่มีระยะห่างของตะแกรงเท่าๆกัน ค่า E_m จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดกลางไปยังที่มุมของตะแกรงโดยค่า E_m ที่ตะแกรงมุมสุดจะมีค่าสูงสุด ซึ่งจะใช้ค่านี้ในการกำหนดเทียบขอบเขตความปลอดภัย ซึ่งเมื่อค่า $E_m < E_{touch}$ แล้ว ค่า E_s มักจะน้อยกว่าค่า E_{step} ไปด้วย

โดย

$$E_m : \text{Mesh Voltage} = \frac{(\rho K_m K_1 I_g)}{L} \quad (2.18)$$

และ

$$E_s : \text{Max. Step Voltage} = \frac{(\rho K_s K_1 I_g)}{L} \quad (2.19)$$

โดยที่

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{16hD_2} + \frac{(D_1 + 2h)^2 - h^2}{8D_1 D_2} - \frac{h}{4D_2} \right] + \frac{K_{11}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{(2n-1)} \right] \right] \quad (2.20)$$

$$K_{11} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (2.21)$$

$$K_1 = 0.656 + 0.172 * n \quad (2.22)$$

$$K_h = \sqrt{1+h/h_o} ; h_o = 1 \quad (2.23)$$

$$C_s(h_e, k) = 1 - a \left[\frac{1 - (\rho/\rho_e)}{2h_e + a} \right] ; a = 0.106 \text{ m.} \quad (2.24)$$

$$K_g = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D_1+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right]; \text{ สำหรับ } 0.25\text{m} < h < 2.5\text{m} \quad (2.25)$$

- เมื่อ D_1 คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวราบ
 D_2 คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำต่อลงดิน
 n คือ จำนวนตัวนำในแนวราบ
 L คือ ความยาวของตัวนำรวมหรือเส้นตีกรงวางระนาบ

โดยที่ $L > L_{50}$ หรือ L_{70}

ในกรณีที่ ไม่มี ground rod หรือมีเพียง 2-3 แท่ง

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

ในกรณีที่ มี ground rod

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

2.1.5 ค่าความยาวของตัวนำต่อลงดินสั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัย (Minimum Buried Conductor Length)

เพื่อเป็นการตรวจสอบอย่างง่ายเกี่ยวกับความยาวของตัวนำต่อลงดิน ที่ได้จากการสมมติลองวางตะแกรงให้อยู่ในช่วงค่าที่ปลอดภัย สามารถหาค่าความยาวตัวนำสั้นที่สุดที่ทำให้เกิดความปลอดภัยได้

ภายใต้เงื่อนไข

$$E_m < E_{touch 50}$$

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

จะได้

$$L_{50} = \frac{(K_m K_1 I_g \sqrt{T})}{((116.00) + (0.174) C_g (h_g, k) \rho_g)} \quad (2.28)$$

เมื่อ

L_{50} คือ ความยาวของตัวนำสั้นที่สุด ที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุดกับคนน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัม

ในทำนองเดียวกัน จะได้

$$L_{70} = \frac{(K_m K_i \mu I_g \sqrt{T})}{(157) + (0.235) C_u (h_u, k) \mu_u} \quad (2.29)$$

เมื่อ

L_{70} คือ ความยาวของตัวนำสั้นที่สุด ที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุดกับคนน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 70 กิโลกรัม

2.2 การออกแบบระบบต่อลงดิน ในสถานีไฟฟ้าย่อย

การออกแบบระบบต่อลงดินที่ดีนั้น จะต้องทำให้ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจร (GPR), ค่า E_m, E_u มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัยที่กำหนด ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินจะต้องทำการออกแบบให้เหมาะสม ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการคำนวณ (ตัวอย่างการออกแบบแสดงในหัวข้อ 6.1)

1. มีข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho =$ _____ โอห์ม-เมตร

ความต้านทานจำเพาะของหินกรวดที่ใช้โรยหน้าดิน $\rho_g =$ _____ โอห์ม-เมตร

(กรณีที่ไม่ได้โรยหินกรวดให้กำหนดค่า $\rho_g = \rho$)

ความหนาของชั้นหินกรวด $h_g =$ _____ เมตร

ความลึกของตะแกรงตัวนำ $h =$ _____ เมตร

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $D_2 =$ _____ เมตร

ขนาดของกระแสผิดปกติสูงสุด $I_g =$ _____ แอมป์

เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันใช้ในการปลดวงจร $t_g =$ _____ วินาที

2. คำนวณค่า $E_{touch 50,70}, E_{step 50,70}$ จากสมการ 2.13, 2.16 (กรณี 50 kg)

3. สมมติการวางตะแกรงตัวนำของระบบต่อลงดิน โดยประมาณระยะห่างของตัวนำอย่างคร่าว ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณค่าความยาวตัวนำสั้นที่สุดที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุด จากสมการที่ 2.28, 2.29

เมื่อได้ค่าความยาวตัวนำที่สั้นที่สุดแล้ว (L_{50}, L_{70}) นำไปเปรียบเทียบกับค่าความยาวตัวนำจากที่ได้สมมติการวางตะแกรง

ถ้า ค่า $L_{50,70}$ ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า ค่า L ที่ได้สมมติการวางตัวนำลงไป สามารถลดค่าความยาวตัวนำที่สมมติการวางตะแกรง ลงจนมีขนาดเท่ากับค่า L_{50} ที่คำนวณได้

ถ้า ค่า $L_{50,70}$ ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า ค่า L ที่ได้สมมติการวางตัวนำลงไป จะต้องเพิ่มค่าความยาวตัวนำที่สมมติการวางตะแกรงจนมีขนาดเท่ากับค่า L_{50} ที่คำนวณได้ ในตำแหน่งที่คาดว่าจะมีความต่างศักย์สูงกว่าจุดอื่นๆ ในขณะ เกิดกระแสผิดปกติ เช่น ภัยบริเวณใกล้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

5. คำนวณค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มขณะ เกิดกระแสผิดปกติ (GPR), E_g

จาก

$$GPR, (E_g) = I_g R_g \quad \text{-----} (2.24)$$

เมื่อ ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน คำนวณได้จาก สมการที่ 3.2

เปรียบเทียบค่า GPR กับค่า $E_{touch 50}$

ถ้าค่า $GPR < E_{touch}$ แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีความปลอดภัยเพียงพอ สามารถนำค่าที่ได้จากการสมมติวางตะแกรง ไปใช้ในการติดตั้งได้

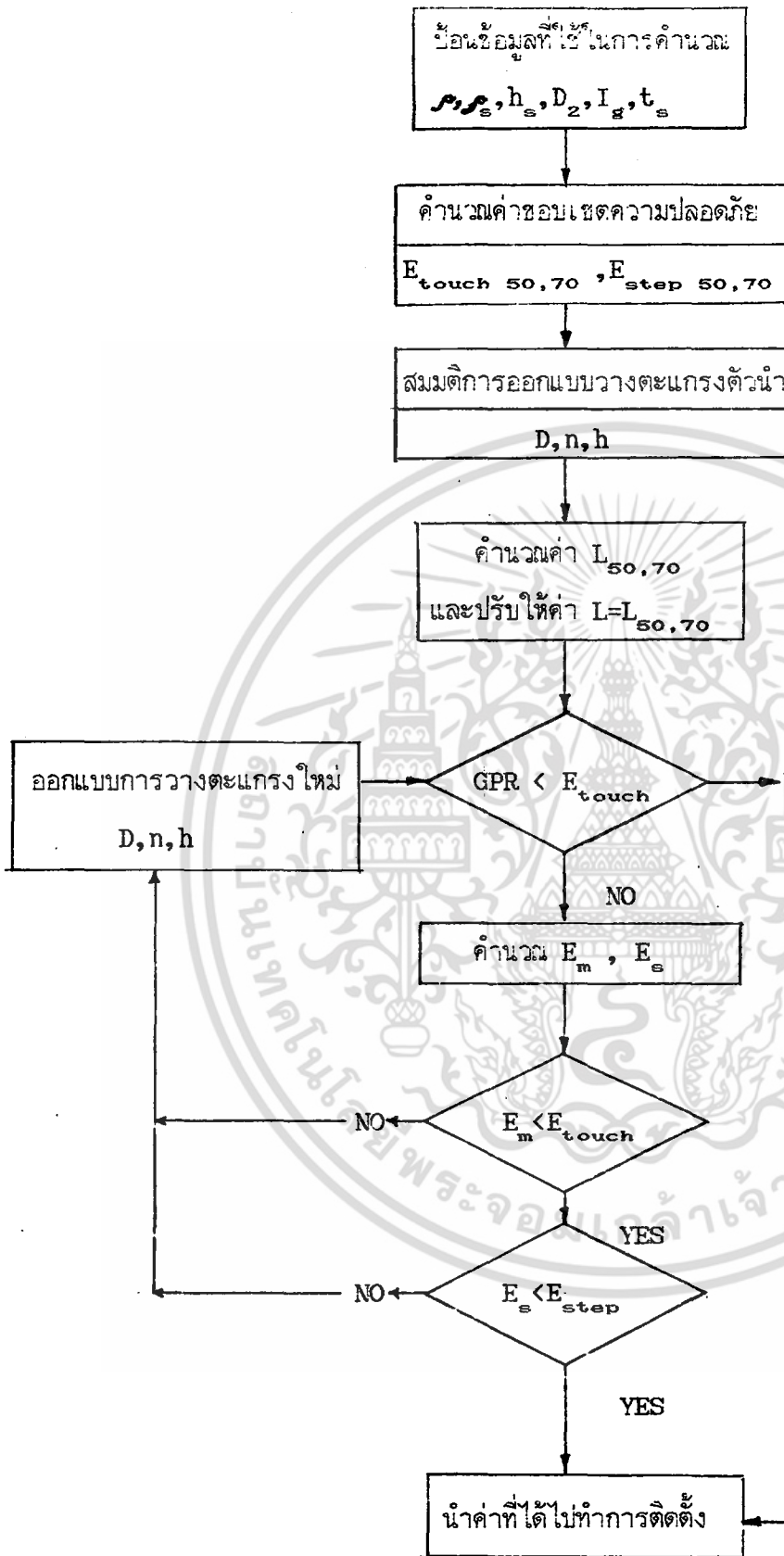
ถ้าค่า $GPR > E_{touch}$ แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีความปลอดภัยไม่เพียงพอ ให้ทำตามขั้นตอนที่ 6

6. คำนวณค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด (E_m), แรงดันก้าวสูงสุด (E_s) ที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน เทียบกับ ค่าขอบเขตความปลอดภัย E_{touch}, E_{step}

ถ้า $E_m < E_{touch 50}$ และ $E_s < E_{step 50}$ แสดงว่าปลอดภัย สามารถนำระบบต่อลงดินที่ได้จากการสมมติวางตะแกรง ไปใช้ในการติดตั้งได้

ถ้า $E_m > E_{touch 50}$ หรือ $E_s > E_{step 50}$ แสดงว่าไม่ปลอดภัย ให้ทำการสมมติการวางตะแกรงใหม่ โดยเพิ่มตัวนำ โดยการแบ่งตะแกรง ให้มีขนาดเล็กลงอีก (กลับไปขั้นตอนการทำงานที่ 3)

จากขั้นตอนทั้งหมดในการออกแบบระบบต่อลงดินสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดิน

2.3 การออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสมกับ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆ

2.3.1 การพิจารณาเลือกระบบต่อลงดิน

ปกติแล้วใน โรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้พลังงาน ไฟฟ้าจำนวนมากจะต้องมีสถานี ไฟฟ้าย่อยภายใน เพื่อรับพลังงาน ไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงจากสายส่งจ่ายของการไฟฟ้า เพื่อมาจ่ายให้กับ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ต่างๆภายใน โรงงาน และเนื่องจากขนาดของ โรงงานอุตสาหกรรมมีขนาดแตกต่างกัน และยังมีลักษณะความต้องการใช้พลังงาน ไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่างๆกันอีกด้วย ดังนั้น เพื่อให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความเหมาะสมและรวดเร็ว จึงควรที่จะเลือกวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของ โรงงานอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งการพิจารณาการเลือกลักษณะการติดตั้งระบบต่อลงดินและวิธีการออกแบบควรคำนึงถึง

1. ระดับแรงดัน ไฟฟ้าที่ใช้งานและลักษณะการส่งจ่าย ไฟฟ้าเข้าในบริเวณ โรงงาน
2. ขนาดของพื้นที่ที่จะติดตั้งระบบต่อลงดิน

โดยการใช้ระบบต่อลงดินเป็นทาง ไหลกลับของกระแสขณะ เกิดกระแสลัดวงจรลงดินสามารถทำได้ 2 ทางคือ

1. แยกระบบต่อลงดินของสถานี ไฟฟ้าย่อย ออกจาก ระบบต่อลงดินบริเวณ ใกล้เคียง
2. รวมระบบต่อลงดินของสถานี ไฟฟ้าย่อย กับ ระบบต่อลงดินของบริเวณ ใกล้เคียงเข้าด้วยกัน โดยออกแบบร่วมกัน

2.3.2 การแยกระบบต่อลงดินของสถานี ไฟฟ้าย่อยออกจากระบบต่อลงดินของ โรงงาน

เหมาะสำหรับ โรงงานที่ใช้ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ ไฟฟ้า ที่ต้องการพลังงาน ไฟฟ้าและแรงดัน ไฟฟ้าไม่สูงนัก และ ไม่มีการส่งจ่าย ไฟฟ้าแรงดันสูง เข้าไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ ไฟฟ้า ในพื้นที่การทำงาน ที่มีพนักงานทำงานอยู่ โดยจะมีการใช้ ไฟฟ้าแรงดันสูงในบริเวณสถานี ไฟฟ้าย่อยเท่านั้น เนื่องจาก ในบริเวณสถานี ไฟฟ้าย่อยนั้น เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูงกว่าในบริเวณ โรงงานมากจึงควรแยกระบบต่อลงออกจากกัน โดยต้องระวัง ไม่ให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างระบบต่อลงดินทั้งสองส่วน ที่อาจเกิดจาก ท่อน้ำสาย, โครงของ busduct, busway หรือ โครง โลหะต่างๆ เพราะ จะทำให้เกิดอันตรายอันเนื่องมาจาก Transfer Voltage ได้

การออกแบบ

ให้พิจารณาแยกระบบต่อลงดินของโรงงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. บริเวณสถานีไฟฟ้าหน่วยย่อย (บริเวณที่มีการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง) ตัวอย่างและผลการคำนวณการออกแบบแสดงในหัวข้อ 6.1 หน้า 52
2. บริเวณพื้นที่ทำงานในส่วนที่มีการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำ

โดยการออกแบบระบบต่อลงดินในบริเวณทั้ง 2 ในหลักการเดียวกันกับการออกแบบระบบต่อลงดินในหัวข้อ 2.2 โดยจะต้องทำการออกแบบแยกต่างหาก และติดตั้งระบบต่อลงดินของทั้งสองบริเวณแยกออกจากกันอย่างเด็ดขาด

เมื่อนิยาม ข้อดี , ข้อเสีย ของการแยกระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าหน่วยย่อยออกจากระบบต่อลงดินของโรงงาน จะพบว่า

ข้อดี

1. ทำให้ประหยัดตัวนำที่ใช้ทำระบบต่อลงดิน, ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง เพราะจะเลือกทำเลเหมาะบริเวณ
2. ทำให้เกิดความปลอดภัยแก่นักงานในโรงงาน เพราะมีการแยกระบบต่อลงดินอย่างชัดเจน

ข้อเสีย

1. ถ้ามีการเชื่อมโยงระบบต่อลงดิน โดยไม่เจตนาจะทำให้เกิดอันตรายจาก Transfer Voltage

2.3.3 การรวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกับระบบต่อลงดินบริเวณอื่นๆ ในโรงงาน

เหมาะสำหรับโรงงาน ที่ต้องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ไปยังเครื่องจักรกล หรืออุปกรณ์จำนวนมาก ในบริเวณโรงงาน เพราะเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินจะเกิดกระแสลัดวงจรจำนวนมาก จึงต้องใช้ตัวนำต่อลงดินที่มากขึ้นในการออกแบบ ดังนั้น การรวมระบบต่อลงดินของระบบเข้าด้วยกันจะทำให้ประหยัดตัวนำต่อลงดินลงไปได้มาก ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

- กรณีขนาดพื้นที่ของ โรงงาน ไม่กว้างขวางมาก
- กรณีขนาดพื้นที่ของ โรงงาน กว้างขวางมาก

ในกรณีที่จะพิจารณาว่า โรงงานมีขนาดพื้นที่กว้างขวางมากหรือน้อย ให้พิจารณาจากความสะดวกในการออกแบบเป็นหลัก

การออกแบบในกรณีที่ขนาดพื้นที่ของ โรงงาน ไม่กว้างขวางมาก [4]

สามารถใช้หลักการเดิมจากหัวข้อ 2.2 โดยพิจารณาเนื้อที่ทั้งหมดเสมือนเป็นเนื้อที่เดียวกัน และทำการออกแบบร่วมกัน โดยพิจารณาเนื้อที่ใช้งานส่วนต่างๆของ โรงงานออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. สถานีไฟฟ้าย่อย
2. อาคารหรือพื้นที่คอนกรีตที่มีการวาง โครงเหล็ก พื้นภายในส่วนนี้ไม่ต้องคำนึงถึง E_m, E_u เพราะมีโครงเหล็กวางบนผิวดินอยู่แล้ว เพียงแต่วางตัวนำ โดยรอบก็เพียงพอ
3. พื้นดินที่ไม่ได้โรยหินกรวด

ขั้นตอนการออกแบบ

การหาระบบต่อลงดิน ในแบบนี้ เริ่มจากการประมาณระยะห่างของตัวนำ (L) บนพื้นที่ทั้งหมดของ โรงงาน โดยหลักการเดียวกันกับการออกแบบระบบต่อลงดิน ในหัวข้อ 2.2 แต่ให้ละเว้นการตีตะแกรงในส่วนที่ 2 (อาคารหรือพื้นที่คอนกรีตที่มีการวาง โครงเหล็ก) เพียงแต่วางตัวนำโดยรอบก็เพียงพอ

ซึ่งจะได้ $L_{รวม} = L_1 + L_2 + L_3$

L_1 = จากสถานีไฟฟ้าย่อย

L_2 = จากอาคารและพื้นที่คอนกรีต

L_3 = จากพื้นดินที่ไม่ได้โรยหินกรวด

แล้วเปรียบเทียบค่า $L_{รวม}$ กับค่า L_{50} (จากนั้นทำตามขั้นตอนต่อไปเหมือน ในการออกแบบระบบต่อลงดิน ในหัวข้อ 2.2 จนได้ค่าที่ปลอดภัย)

ตัวอย่างและผลการคำนวณการออกแบบ แสดงในหัวข้อ 6.2

ในกรณีนี้จะค่อนข้างไม่เหมาะสม ถ้าใช้วิธีการออกแบบในหัวข้อ 2.2 เนื่องจากพื้นที่ของ โรงงานมีขนาดกว้างขวางมาก การสมมติการเปลี่ยนแปลง, เคลื่อนย้ายตัวนำต่อลงดิน จะทำได้ ไม่สะดวกนักเมื่อพบว่าการสมมติการวางตัวนำไม่ได้ค่าความปลอดภัยที่กำหนด ซึ่งจะต้องทำการ เปลี่ยนแปลงตำแหน่งของตัวนำต่อลงดินจนกว่าจะได้ค่าที่ปลอดภัย ทำให้ต้องใช้เวลานานและไม่ สะดวกนัก ดังนั้นในกรณีที่โรงงานมีขนาดกว้างขวางมาก สามารถออกแบบโดยการนำหลักการ ของความสัมพันธ์ ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างระหว่างการเพิ่มจำนวน mesh ของตะแกรงต่อลงดิน กับ ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของ E_m/E_g

โดยที่

การเพิ่มจำนวน mesh ของตะแกรงเป็น 2 เท่า (แบ่งตะแกรงแต่ละช่องเป็นส่วนเท่าๆกัน) จะทำให้ ค่า E_m/E_g เปลี่ยนไปในอัตราส่วนประมาณ 2/3

ดังนั้น จะได้

$$\frac{E_m}{E_g}(2n \times 2n \text{ mesh}) = \frac{E_m}{E_g}(n \times n \text{ mesh}) * \frac{2}{3} \quad (2.31)$$

ขั้นตอนการออกแบบ

1. คำนวณพื้นที่ที่จะติดตั้งระบบต่อลงดิน
2. สมมติการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดิน
3. คำนวณความยาวตัวนำรวม
4. คำนวณค่าความต้านของตะแกรงต่อลงดิน R_g
5. คำนวณค่า GPR, (E_g)

คำนวณค่า E_m, E_{touch}

6. พิจารณาค่าอัตราส่วน

ถ้า $E_m/E_g < E_{touch}/E_g$ แสดงว่าการออกแบบสามารถให้ความปลอดภัยเพียงพอ ให้นำค่าที่ได้จากการสมมติขนาดการวางตะแกรงดังกล่าวไปติดตั้งได้

ถ้า $E_m/E_g > E_{touch}/E_g$ แสดงว่าการออกแบบไม่สามารถให้ความปลอดภัยเพียงพอ ให้เพิ่มจำนวน mesh ของตะแกรงต่อลงดินเป็น 2 เท่า

จากสมการ 2.31 จะได้

$$E_m/E_g(2n \times 2n \text{ mesh}) = E_m/E_g(n \times n \text{ mesh}) * 2/3$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่า $E_m/E_g(2n \times 2n \text{ mesh})$ มีขนาดน้อยลงกว่าเดิม และให้นำไปเทียบกับค่า

E_{touch}/E_g ถ้าค่า $E_m/E_g(2n \times 2n \text{ mesh}) < E_{\text{touch}}/E_g$ แสดงว่า การออกแบบระบบ
ต่อลงดินปลอดภัย ให้นำค่าจำนวนตะแกรงที่เพิ่มขึ้น 2 เท่านี้ไปใช้ในการติดตั้งระบบต่อลงดินได้

ถ้าค่า $E_m/E_g(2n \times 2n \text{ mesh})$ ยังคงมากกว่า E_{touch}/E_g ก็ให้เพิ่ม mesh เป็น 2 เท่าอีก
แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่า E_{touch}/E_g อีก จนได้ค่าที่ปลอดภัย

ตัวอย่างและผลการคำนวณการออกแบบ แสดงในหัวข้อ 6.3

เมื่อพิจารณา ข้อดี ข้อเสีย ของการรวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าหน่วยย่อยออกจาก
ระบบต่อลงดินของโรงงาน จะพบว่า

ข้อดี

1. ทำให้ประหยัดตัวนำที่ใช้ทำระบบต่อลงดิน เพราะมีการเชื่อมโยงตัวนำในทุกๆส่วนเข้าด้วยกัน
2. ถ้าระบบมีการออกแบบที่ดีแล้วจะทำให้เกิดความปลอดภัยโรงงาน

ข้อเสีย

1. ถ้าการออกแบบระบบไม่ดีอาจทำให้เกิดอันตรายจากค่า GPR ได้

บทที่ 3

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยที่สำคัญของระบบต่อลงดิน

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงค่า Mesh Voltage, E_m ซึ่งเป็นค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดิน และ Step Voltage, E_s ซึ่งเป็นค่าแรงดันย่างก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดิน และ ค่า GPR ซึ่งเป็นค่าศักดาที่เพิ่มขึ้นบนระบบต่อลงดินในขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน ดังนั้น ในการออกแบบระบบต่อลงดินนี้จะพบว่า ทั้งค่า E_m , E_s และ GPR จะเป็น ตัวแปรสำคัญในการกำหนดขอบเขตความปลอดภัยของระบบว่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งเมื่อพิจารณา ค่า E_m , E_s และ GPR ในสมการที่ 2.18, 2.19, 2.30 แล้วจะพบว่า

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

และ

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

และ

$$GPR = I_g R_g$$

ซึ่ง ค่า E_m , E_s จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวประกอบค่า K_m และค่าความยาวของตัวนำ L ส่วนในค่า K_m , K_1 และ K_s นั้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.20, 2.22, 2.25 แล้วจะพบว่าล้วนมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวของตัวนำ L ซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยทั้งสิ้น แต่เนื่องจากค่า L สามารถกำหนดได้แน่นอนจากการออกแบบ ในขณะที่ ค่า K_m จะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามองค์ประกอบต่างๆ ดังนั้นเพื่อให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่เที่ยงตรงจึงควรที่จะต้องวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบต่างๆที่ทำให้ค่า K_m เกิดการเปลี่ยนแปลง

และค่า GPR ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของกระแสลัดวงจรลงดิน (I_g) และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (R_g) ซึ่งโดยปกติแล้วค่า I_g ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าที่สูงสุดอยู่แล้ว ดังนั้น

จะพบว่าค่า R_{m} จะมีผลต่อค่า GPR ที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่า R_{m} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อรูปร่างของระบบต่อลงดินเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นจะพบว่าองค์ประกอบที่สำคัญของค่าที่ใช้ในการพิจารณาความปลอดภัยกับที่สำคัญ (E_m , E_u , GPR) ในระบบต่อลงดิน คือ

1. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ
2. ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน R_{m}

3.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานจำเพาะของดินกับค่าความปลอดภัย E_m , E_u จะพบว่า ในกรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) มีค่าสูง ก็จะทำให้ ค่า E_m มีค่าสูงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) มีค่าต่ำ ค่า E_m ก็จะมีค่าต่ำไปด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น และสามารถลดขนาดของตัวนำ L ได้อีกด้วย เพราะว่าจะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน จะมีกระแสบางส่วนใช้ผิวดินเป็นทางไหลกลับควบคุมไปกับการไหลผ่านในระบบต่อลงดิน ซึ่งในกรณีที่ค่า ρ ต่ำ ก็จะทำให้สิ้นเปลืองตัวนำต่อลงดินน้อยลง

องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ()

เนื่องจากดินเกิดจากการสะสมทับถมของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มากมายหลายชนิด ดังนั้น การนำไฟฟ้าของดินนั้นจึงขึ้นกับ ปริมาณ แร่ธาตุ ส่วนผสมทางเคมีของสารต่าง ๆ และของเหลวที่เป็นส่วนประกอบอยู่ภายในดิน ซึ่งองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินพอจะจำแนกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ชนิดและคุณสมบัติของดิน

GROUND TESTED	SOIL	RESISTANCE IN OHM		
		AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM
24	FILLS 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 VARYING 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

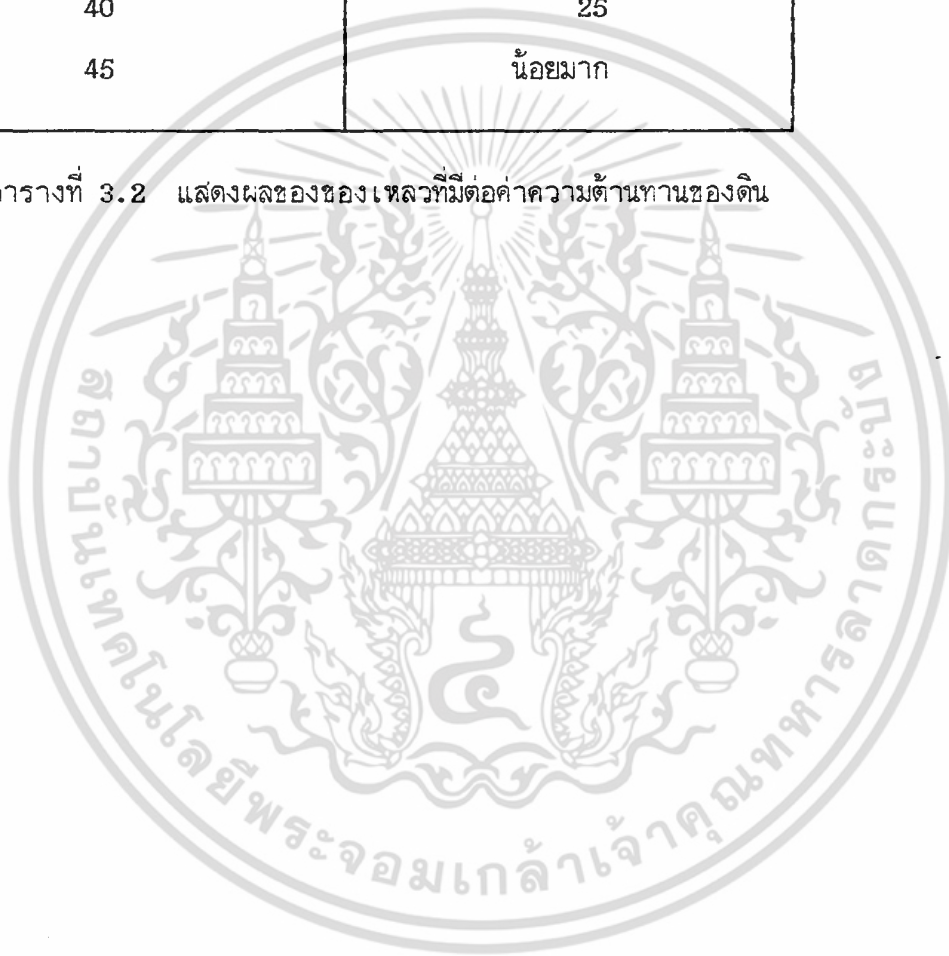
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามชนิดของดิน

2. ปริมาณความชื้นและระดับของเหลวในดิน

ส่วนประกอบของของเหลว % โดยน้ำหนัก	พิกัดค่าความต้านทาน (Ω - m)
0	สูงมาก
10	3000
15	300
20	80

ส่วนประกอบของของเหลว % โดยน้ำหนัก	พิกัดค่าความต้านทาน (Ω - m)
25	60
30	50
35	40
40	25
45	น้อยมาก

ตารางที่ 3.2 แสดงผลของของเหลวที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน



3. ปริมาณแร่ธาตุ และสารเคมีในดิน

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

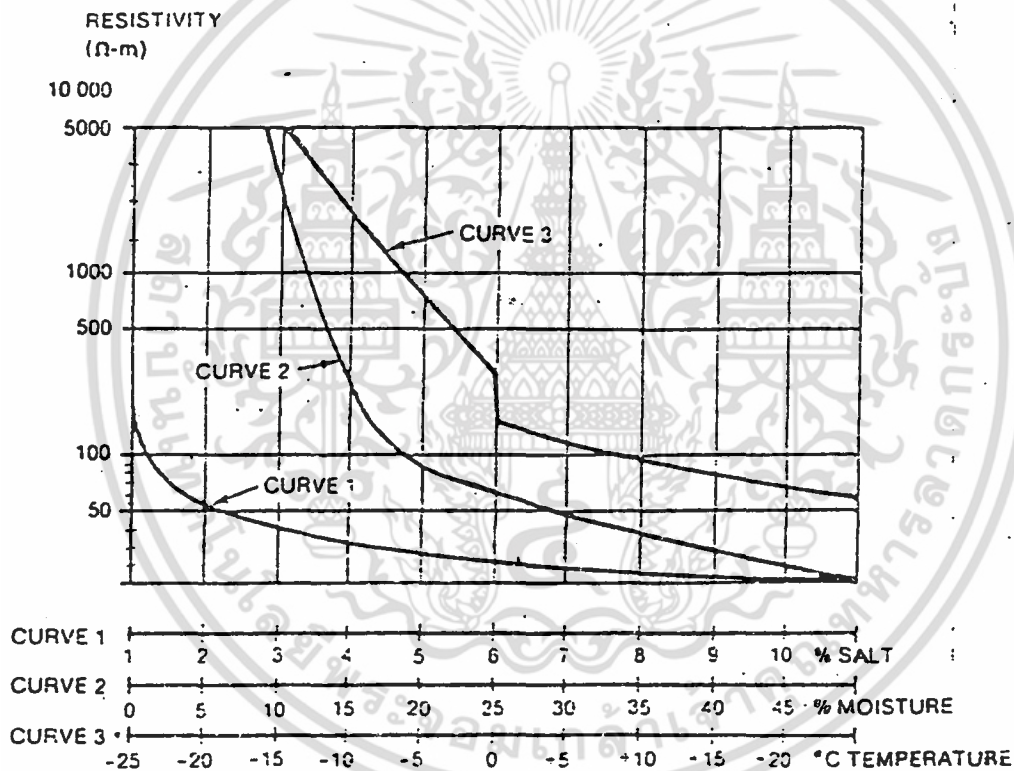
ตารางที่ 3.3 แสดงผลของเกลือที่มีต่อค่าความต้านทานของดิน

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 แสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆที่มีผลกับค่าความต้านทานของดิน

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

จากตารางที่ 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 และ รูปที่ 3.1 แสดงถึง องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการคำนวณค่า E_m, E_s ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน ดังนั้นค่าของ μ จะต้องทำการวัดอย่างละเอียดและถูกวิธี ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 5 ส่วนผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานของดิน R และค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (μ) ในบริเวณต่าง ๆ แสดงในบทที่ 6 และการวิเคราะห์ผลแสดงในบทที่ 7

3.2 ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน R_g

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าค่า R_g จะมีผลเป็นอย่างมากต่อค่า GPR ที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ค่า R_g มีค่าต่ำ ค่า GPR ก็จะมีค่าต่ำไปด้วย ซึ่งจะหมายความว่าระบบมีความปลอดภัยมากขึ้นด้วย(แต่ไม่ได้หมายความว่าระบบจะปลอดภัยเมื่อระบบต่อลงดินมีค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งจะต้องพิจารณาค่าความปลอดภัยอื่นควบคู่ไปด้วย เช่น $E_m, E_s, E_{touch}, E_{step}$) ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าค่า GPR ที่คำนวณได้มีค่าถูกต้อง ค่า R_g จะต้องมีการวัดค่าที่ถูกต้องด้วย

เมื่อ

$$E_g (GPR) = I_g R_g$$

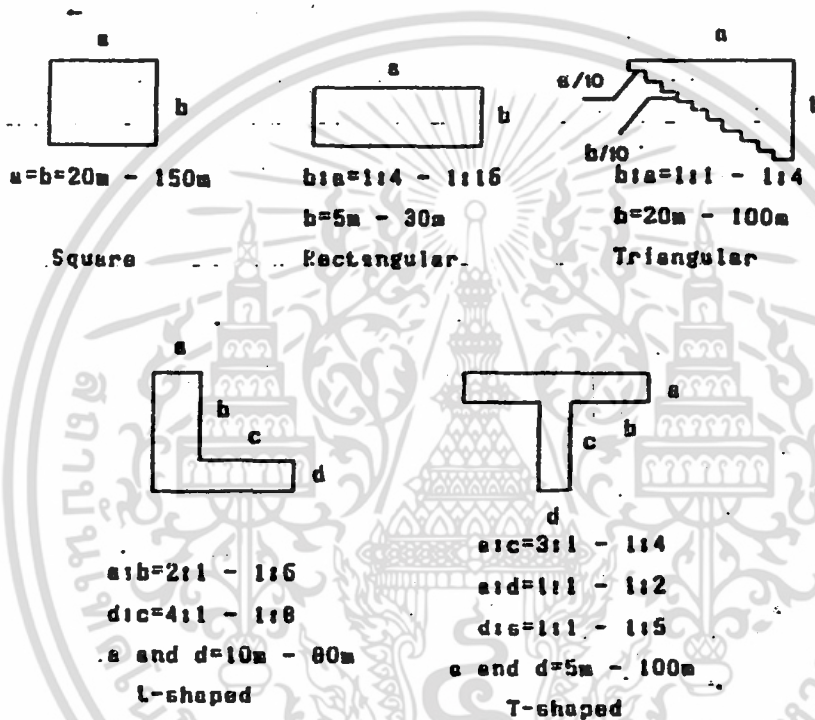
โดยปกติแล้ว ค่า R_g สามารถหาได้หลายวิธีคือ

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

ในการหาค่า R_g โดยวิธีของ Sverak และ Schwarz นั้นเหมาะสำหรับตะแกรงต่อลงดินที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ในกรณีที่รูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน ไม่ได้มีลักษณะดังกล่าว ซึ่งในบางครั้งระบบต่อลงดินจะถูกกำหนดด้วยพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นรูปต่างๆ เช่น รูปสามเหลี่ยม, รูปตัว "T", รูปตัว "L" ดังรูปที่ 3 การใช้สมการของ Sverak และ ของ Schwarz ในวิธีที่ 1, 2 จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดมาก ส่วนในวิธีที่ 3 จะเป็นวิธีที่ให้ค่าถูกต้อง เพราะเป็นการคำนวณในทุกๆจุด ซึ่งจะแบ่งตัวนำต่อลงดินออกเป็นส่วนเล็กๆ จากนั้นจะใช้ค่าความต้านทานเฉพาะตัว(self resistance)และความต้านทานร่วม(mutual resistance) ของ

ทุกๆส่วนย่อย มาคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน R_{Σ} ซึ่งวิธีนี้จะต้องใช้ข้อมูล เป็นจำนวนมาก เกี่ยวกับความยาว เส้นผ่าศูนย์กลาง ความลึกของตำแหน่งที่ฝัง ในแต่ละจุดอย่างละเอียด และต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ จึงเป็นวิธีที่ยุ่งยาก และต้องใช้เวลามาก

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



รูปที่ 3.2 แสดง ขนาดและรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน

จากสมการหาค่า R_{Σ} ของ Severak [6]

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

พบว่า เมื่อรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน เปลี่ยนจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า ไป

เป็น รูปตัว "L" หรือรูปตัว "T" จะพบว่า ค่าความยาวของเส้นรอบวงจะเพิ่มมากขึ้น ไม่สัมพันธ์กับขนาดของพ.ท (A) ดังนั้นค่า R_{z} ที่ได้ควรจะมีค่าลดลง แต่จากสมการของ Severak(3.1) ค่า R_{z} ที่คำนวณได้ยิ่งลดลงน้อยกว่าที่ควรจะเป็นจึงต้องเสริมค่า

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

เข้าไปในสมการเดิมเพื่อให้ค่าความต้านทานที่ได้ลดลงอย่างเหมาะสม

โดยจะได้

$$R_z = \rho \left[\frac{1 + \frac{1}{L_c \sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] * \left[1.52[2\ln(L_p\sqrt{2/A})-1]\sqrt{A/L_p} \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ L_p คือ ความยาวเส้นรอบวงของตะแกรงต่อลงดิน เมตร

L_c คือ ความยาวรวมของตัวนำในตะแกรงต่อลงดิน เมตร

(ค่า L_c จะ เป็น ไป ตาม สมการ ที่ 2.26, 2.27)

A คือ พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน (ตารางเมตร)

h คือ ความลึกที่ฝังของตะแกรงต่อลงดิน (เมตร)

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

ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าการคำนวณที่ถูกต้อง จึงต้องพิจารณาถึงรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินด้วย ซึ่งสมการที่ 3.2 นี้จะให้ความแม่นยำสูงในกรณีที่ระบบต่อลงดินมีลักษณะดังรูป 3.2 ซึ่งผลการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน โดยวิธีต่างๆ และขีดจำกัดของสมการนี้แสดงในบทที่ 6 และการวิเคราะห์แสดงในบทที่ 7.

บทที่ 4

การปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดิน

จากบทที่ 2 เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณที่มีการติดตั้งระบบต่อลงดิน ทั้งแรงดันสัมผัส (E_{touch}) และแรงดันก้าว (E_{step}) ตลอดจนค่า GPR ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสผิดปกติลัดวงจรลงดินแล้ว การเพิ่มค่าขอบเขตความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดินสามารถทำได้ 2 ทางคือ

1. ลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน
2. เพิ่มค่าความต้านทานที่เท้า

4.1 การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

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

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad GPR &= I_g R_g \\ \text{และ} \quad E_m &= \frac{K_m K_1 I_g}{L} \\ E_s &= \frac{K_s K_1 I_g}{L} \end{aligned}$$

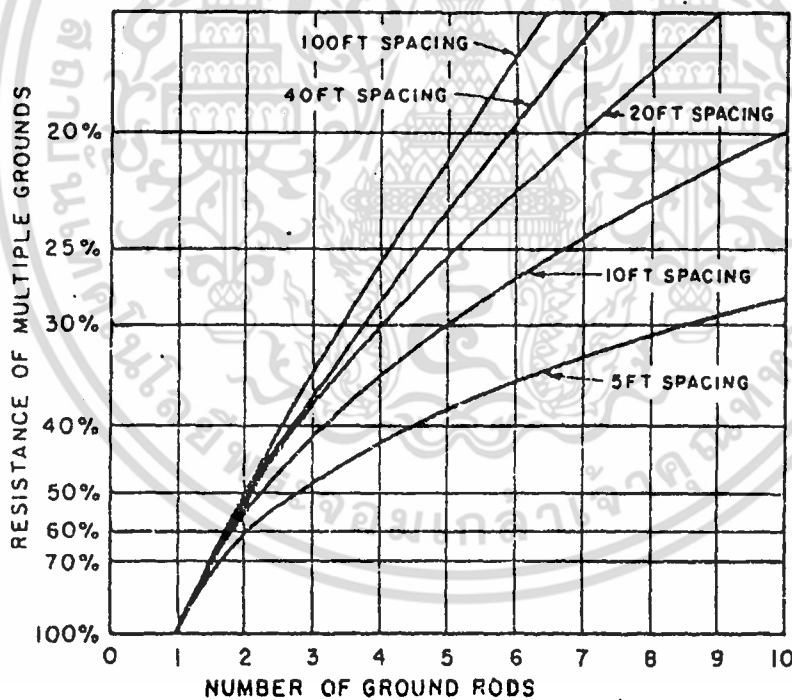
ดังนั้น การเพิ่มค่า L จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่ำลง และทำให้ E_m , E_s ลดลง ซึ่งจะทำให้ระบบมีความปลอดภัยมากขึ้น การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินสามารถทำได้ โดย

1. เพิ่มค่าความยาวของตัวนำต่อลงดิน L โดย
 - เพิ่มความยาวของตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน (Ground grid) ซึ่งอาจจะเพิ่ม

ในบริเวณ ที่คาดว่าจะมีค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินสูงกว่าในบริเวณอื่น เช่น ที่บริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (หม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ) หรือ เพิ่มจำนวน mesh ให้กับระบบต่อลงดิน โดยการสร้างตะแกรงให้ถี่ขึ้น (ผลของการเพิ่มความยาวตัวนำ L แสดงในผลการออกแบบระบบต่อลงดินในบทที่ 6)

- เพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง (Ground rod) ในบริเวณ ที่คาดว่าจะมีค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินสูงกว่าในบริเวณอื่น เช่น ที่มุมของตะแกรงของตัวนำต่อลงดิน (mesh ที่อยู่มุมนอกสุดของตะแกรงต่อลงดิน) หรือบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (หม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ) หรือที่มุมรอบนอกทั้งหมดของระบบต่อลงดิน

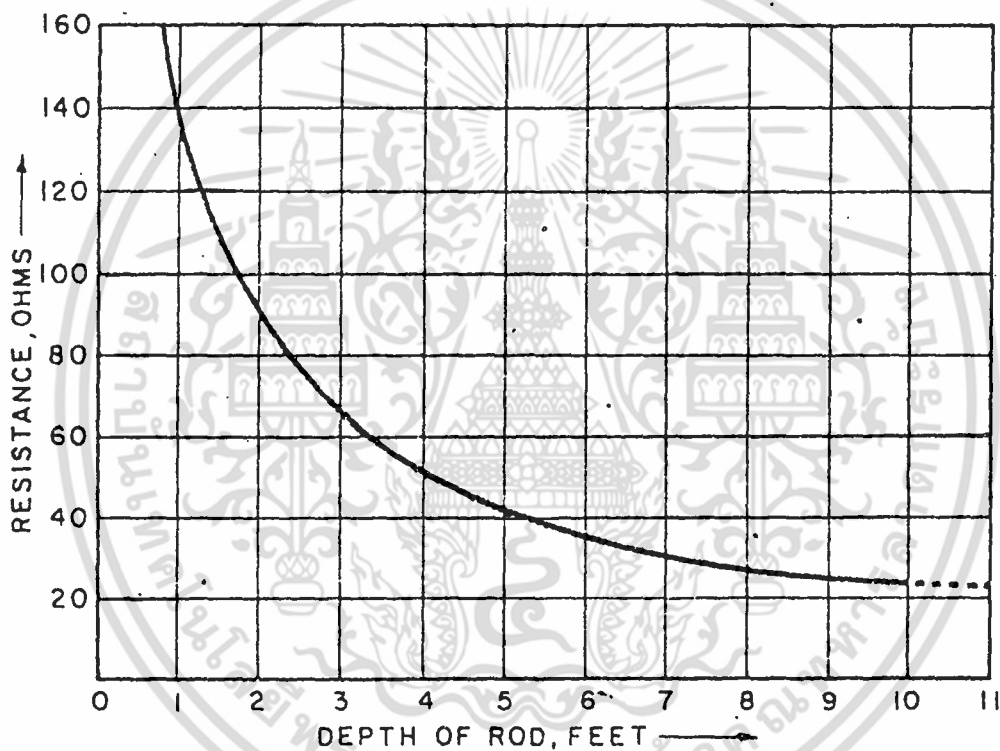
ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง (Ground rod) จาก [9] แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง

- เพิ่มความยาวของแท่งตัวนำในแนวตั้ง (Ground rod) ซึ่งนอกจากผลของความยาวตัวนำที่เพิ่มขึ้นแล้ว จะยังมีผลจากความลึก และผลจากปริมาณความชื้น และระดับน้ำใต้ดินเข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วยซึ่งล้วนแล้วแต่ทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าต่ำลงอีกจួយ (ผลของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อ เปลี่ยนแปลงความลึกของการปักแท่ง Ground rod แสดงในผลการทดลองในบทที่ 6)

ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มความยาวแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง (Ground rod) จาก [10] แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง

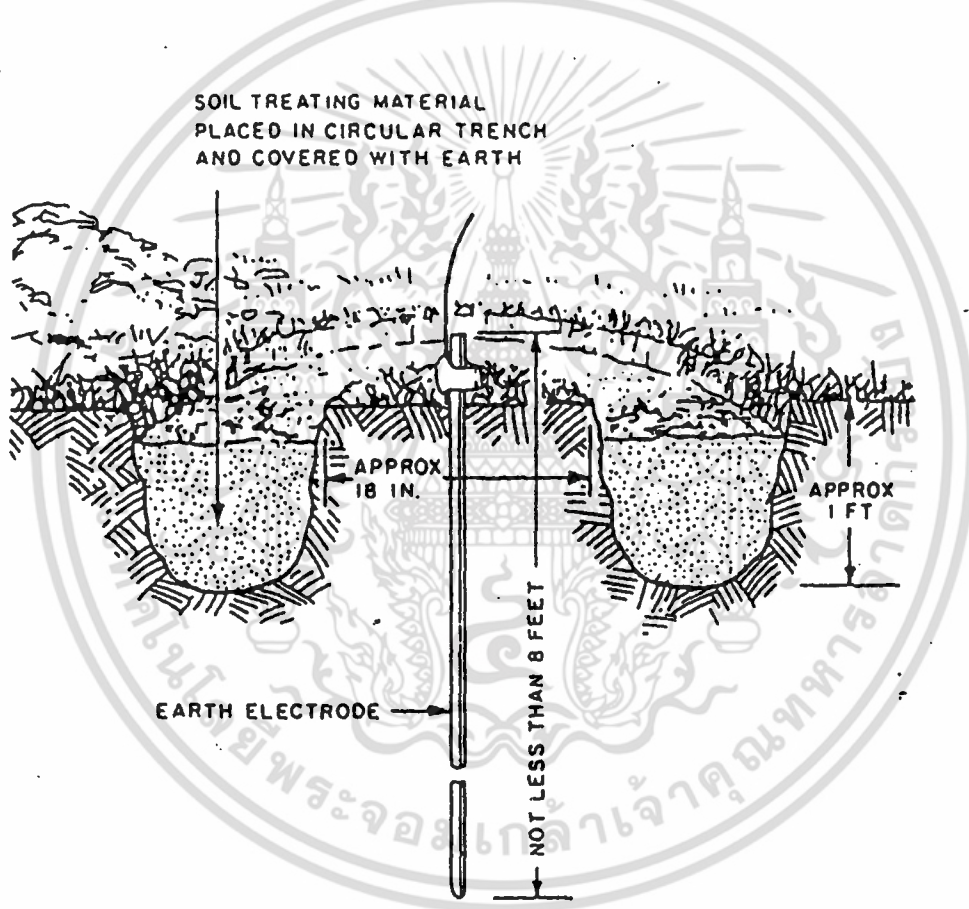
นอกจากการเพิ่มค่าตัวนำ L แล้วยังสามารถลดค่าความต้านทาน ได้โดย

2. ใช้สารเคมีจำพวก Magnesium sulphate, Copper sulphate หรือสารจำพวก Rock salt ใส่ลงในบริเวณที่ปักแท่งตัวนำ (Ground Rod) ดังรูปที่ 4.3 โดยที่ความลึกของแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน -35- ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ground Rod ไม่ลึกกว่าชั้นหินใต้ดิน โดยการใส่สาร Magnesium sulphate จะให้ผลคือทำให้การกัดกร่อนของแท่งตัวนำต่อลงดินจากสารน้อยกว่าแบบอื่น ในขณะที่การใช้ สารจำพวก Rock salt จะประหยัดที่สุด

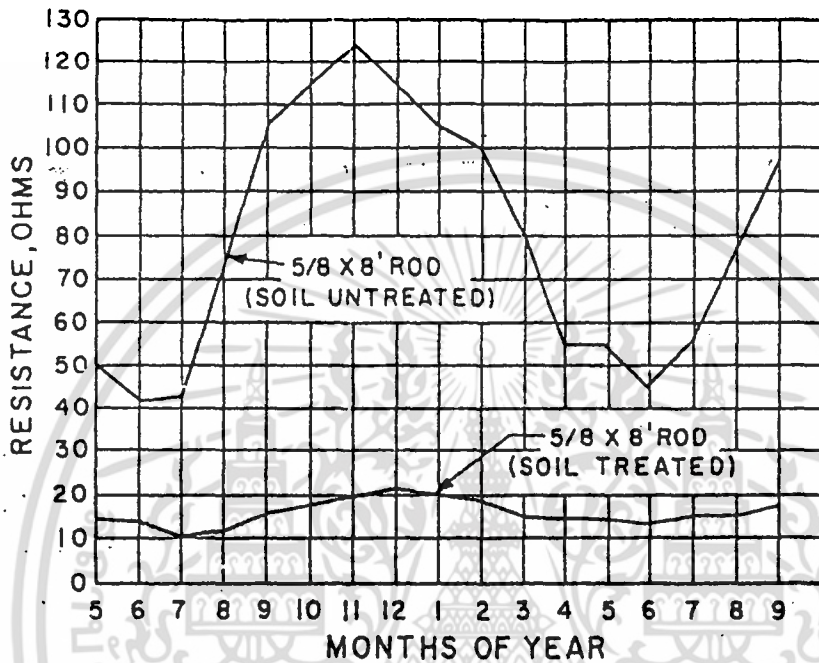
ถึงแม้ว่า การใช้สารเคมีจะช่วยให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าต่ำลงไปได้มากก็ตามแต่จะมี ข้อเสีย คือทำให้แท่งตัวนำต่อลงดินผุกร่อนได้เร็วขึ้น และต้องทำการเติมสาร เหล่านี้ อยู่เสมอ เนื่องจากสารจะถูกละลายและชะล้าง ไปกับน้ำฝนได้ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีก็มีความจำเป็นกับงานบางชนิด เช่น ในบริเวณภูเขา หรือ ที่ราบสูงที่ดินมีความชื้น และระดับน้ำใต้ดินลึกมากๆ และควรเลือกใช้วิธีนี้หลังจากที่การปักแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวตั้ง ไม่สามารถทำได้



รูปที่ 4.3 แสดงการเติมสารเคมีเพื่อช่วยลดความต้านทานของอิเล็กโทรด

การเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดนี้ นอกจากจะช่วยลดค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดแล้ว ยังสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นและระดับน้ำใต้ดินตามฤดูกาล อีกด้วย

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



รูปที่ 4.4 แสดงผลของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้สารเคมีช่วยลดค่าความต้านทานแท่งอิเล็กโทรดของ

4.2 การเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้า

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าการโรยหินกรวด (crushed rock) หรือ เทพื้นซีเมนต์เป็นการเพิ่มค่า ความต้านทานให้กับเท้าของคน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงวงจรสมมูลย์ของค่าความต้านทานของร่างกายคนขณะเกิดกระแสไฟฟ้าตก ทั้งในรูปแบบของ แรงดันอย่างก้าว และแรงดันสัมผัส ในหัวข้อ 2.1.1 รูปที่ 2.2, 2.3 จะพบว่า ค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกาย I_A จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของร่างกาย และค่าความต้านทานของดินที่เท้าด้วย ซึ่ง โดยปกติแล้ว

จะเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้าได้ โดยการ ทำให้พื้นที่เท้าสัมผัสกับพื้นมีความต้านทานที่สูงขึ้น เช่น การโรยหินกรวดที่พื้น ให้มีความหนาเพียงพอ (ปกติ ประมาณ 10 ซม.) หรือ โดยการ เทพื้นซีเมนต์ แต่ ในกรณีที่หินกรวดเริ่มบางลง และค่าความต้านทานของดินบริเวณนั้นมีค่าต่ำ จะทำให้ค่าความต้านทานที่เท้ามีค่าต่ำมาก หรือในกรณีที่พื้นตลกว่าค่าความต้านทานของพื้นซีเมนต์จะมีค่าต่ำลงมาก ซึ่งสถานการณ์ดังกล่าวจะทำให้ค่าขอบเขตความปลอดภัยมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.12 และ 2.15

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

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

เมื่อ

E_{touch} = ค่าแรงดันสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ โดยไม่เป็นอันตราย

E_{step} = ค่าแรงดันก้าวที่มนุษย์ทนได้ โดยไม่เป็นอันตราย

R_B = ค่าความต้านทานของร่างกาย

R_{2FP} = ค่าความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างต่อชนกัน

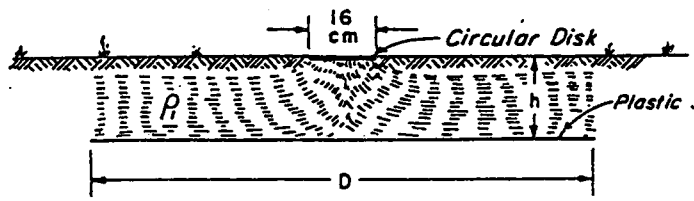
R_{2FS} = ค่าความต้านทานของเท้าทั้ง 2 ข้างต่ออนุกรมกัน

I_B = ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านร่างกายคน โดยไม่เป็นอันตราย

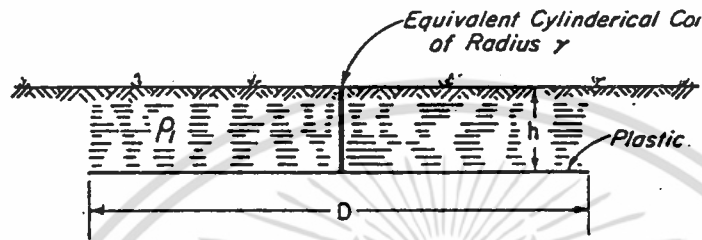
ซึ่งจะเห็นว่า การเพิ่มค่าความต้านทาน ให้กับเท้าของคนจะสามารถ เพิ่มค่าความปลอดภัยได้ทั้ง E_{touch} และ E_{step} อย่างไรก็ตามยังสามารถที่จะเพิ่มค่าความต้านทานให้กับเท้าของคนได้อีก โดยการ ใช้แผ่นพลาสติกที่หาได้ตามท้องตลาด วางภายใต้หินกรวดอย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในบริเวณที่จำเป็น

ค่าความต้านทานของเท้าเมื่อใช้แผ่นพลาสติกกรอง

เมื่อพิจารณาเท้าของมนุษย์ โดยไม่คิดค่าความต้านทาน ของรองเท้าและถุงเท้า สามารถแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมบางรัศมี 8 ซม. ในรูปที่ 4.5(a) เมื่อทำการวางแผ่นพลาสติก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D ซม. ที่ความลึก h จากผิวหน้าของดิน ถ้ากระแสจะไหลผ่านไปยังแผ่นโลหะวงกลมในบริเวณเหนือแผ่นพลาสติก ทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นดัง รูปที่ 4.5(a) เนื่องจากค่าความต้านทาน ของพลาสติกสูงกว่าดินมาก แต่กระแสจะไหลได้เป็นแนวตั้งด้วย เมื่อพ้นจากขอบของแผ่นพลาสติก ดังนั้น เราสามารถแทนลักษณะดังกล่าวได้ ด้วยรูปที่ 4.5(b) โดยใช้แท่งตัวนำทรงกระบอกสมมุติ



(a)



(b)

รูปที่ 4.5 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไปยังแผ่นโลหะกลม เมื่อรองรับด้วยแผ่นพลาสติก ซึ่งสามารถแทน แผ่นโลหะกลมได้ด้วยแท่งตัวนำสมมูลย์

สามารถหา ค่าความต้านทาน ของการต่อลงดินของแท่งตัวนำทรงกระบอก ($R = R_{foot}$) ได้ โดย จาก [11]

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi h} \ln\left(\frac{D}{2r_{eq}}\right)$$

เมื่อ ρ_1 = ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเหนือบ่อพลาสติก (โอห์ม-เมตร)

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

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

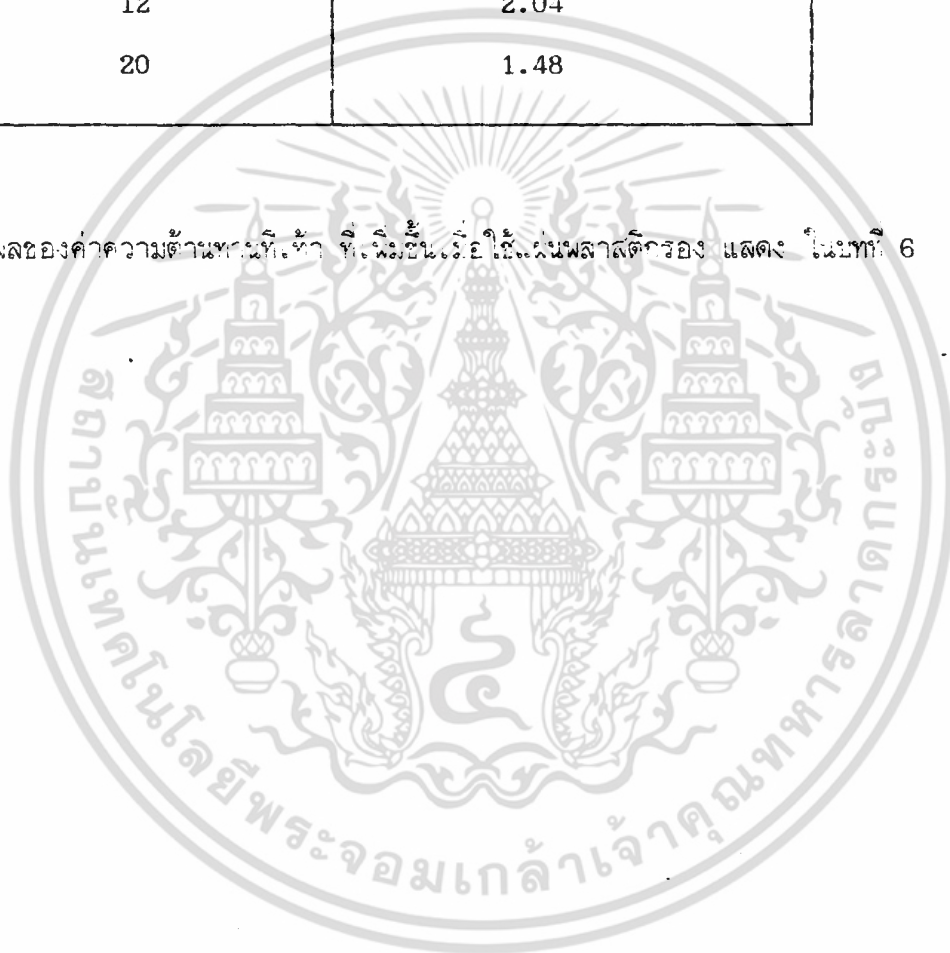
r_{eq} = ค่ารัศมีสมมูลย์ ของตัวนำทรงกระบอก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า h โดยค่า r_{eq}

สามารถทำได้จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ารัศมีสมมูลของส่วนทรงกระบอกที่มีความลึกต่างก

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

ผลของค่าความต้านทานที่เท่า ๆ กันนั้นจะใช้แผ่นพลาสติกกรอง แสดง ในบทที่ 6



บทที่ 5

หลักการและวิธีการวัด

จากที่กล่าวมาแล้วจะพบว่า ค่าความปลอดภัยต่าง ๆ ที่สำคัญทั้งหลาย เช่น ค่า E_m , E_u , ค่า L_{50} , ค่า R_{Σ} ล้วนมีสัดส่วนแปรผันโดยตรง กับ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณค่าดังกล่าวได้ค่าที่ถูกต้องด้วย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องทำการวัด ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ในบริเวณสถานที่ที่จะติดตั้งระบบต่อลงดินเป็นจำนวนหลาย ๆ ครั้งและทำการย้ายตำแหน่งการวัดไปหลาย ๆ ตำแหน่งภายในบริเวณที่จะติดตั้งระบบต่อลงดิน เพื่อนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว ดินในบริเวณต่าง ๆ จะประกอบด้วยเนื้อดินหลากหลายชนิดแตกต่างกัน ตามการสะสมตัวของสารต่าง ๆ และมีระดับของชั้นดินแตกต่างกันซึ่งจะมีผลต่อค่าความต้านทานของดินทั้งสิ้น นอกจากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าขอบเขตความปลอดภัยต่าง ๆ แล้ว หลังจากการออกแบบ และทำการวางตะแกรงตัวนำต่อลงดินแล้ว จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (R_{Σ}) เพื่อตรวจสอบผล, เปรียบเทียบ กับ ค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อยืนยันผลการออกแบบ และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าเกิดความปลอดภัยเพียงพอ โดยในรายละเอียดจะแบ่งการวัดออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. การวัดค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดิน
2. การวัดค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโทรดหรือระบบต่อลงดิน

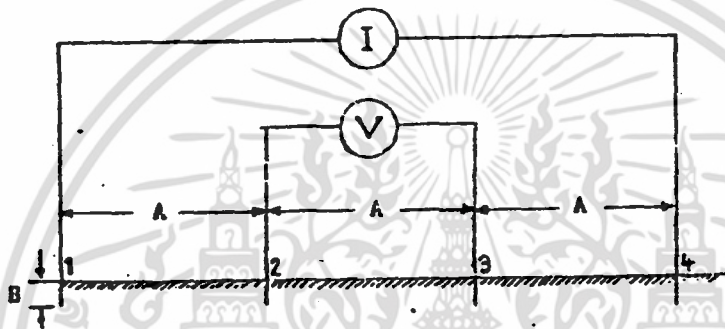
5.1 การวัดค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดิน

การหาค่าความต้านทาน และค่าความต้านทานจำเพาะของดินจำเพาะของดิน สามารถหาได้จากวิธี Four Point Test และวิธี Driven Rod Test ซึ่งทั้งสองวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ดังจะกล่าวต่อไป

5.1.1 วิธี Four Point Test

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ที่ให้ค่าความถูกต้องสูง โดยจะปักแท่งตัวนำ 4 แท่ง ลงในดิน ที่ระดับความลึก (B) เป็นระยะห่างเท่า ๆ กัน (A) เรียงกันในแนวเส้นตรง

จากนั้นจ่ายกระแสคงที่เข้าที่ขั้ว 1, 4 และวัดค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 2, 3 ค่าความต้านทานของดินจะหาได้จาก ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากขั้ว 2, 3 หารด้วย ค่ากระแสที่วัดได้จากขั้ว 1, 4 ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธี Four Point Test

ในกรณีของดินชั้นเดียว

สามารถหาค่า ความต้านทานของดิน (ρ) ได้จาก [1]

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

เมื่อ R = ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องวัด(ค่าที่ได้จาก V/I ในรูปที่1)

A = ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำ (เมตร)

B = ความลึกของแท่งตัวนำ (เมตร)

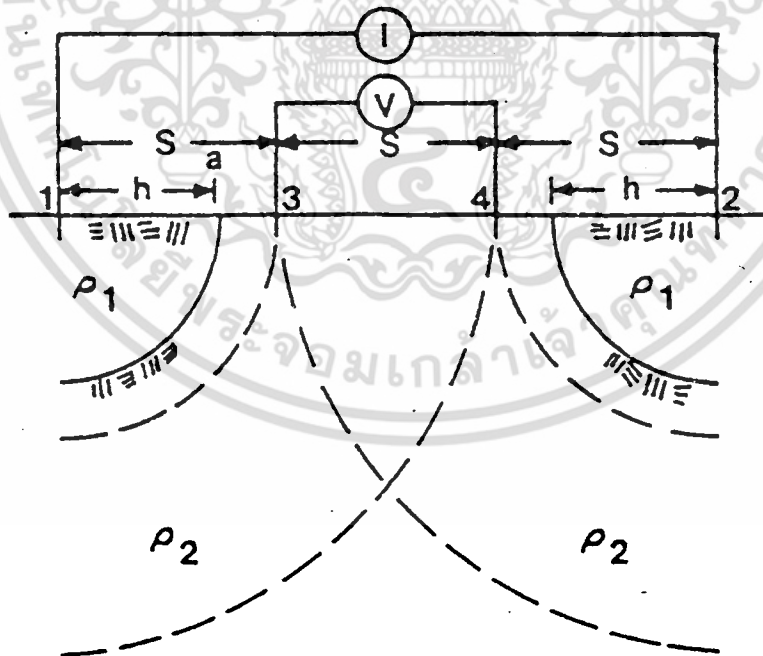
ถ้าค่า B มีค่าน้อยกว่าค่า A มากๆ ($B < A/20$) สามารถลด รูปสมการที่ 5.1 เป็น

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

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างการปักแท่งตัวนำที่อยู่ติดกัน มีระยะห่างน้อย กระแสส่วนใหญ่ จะมีแนวโน้มไหลผ่านทางผิวดิน และในกรณีที่ระยะห่างระหว่างการปักแท่งตัวนำที่อยู่ติดกันมีค่ามาก กระแสก็จะมีแนวโน้มไหลลึกลงไปในดินมากขึ้นด้วย ดังนั้น ในกรณีที่ดินมีลักษณะไม่เป็น uniform หรือในดินที่มีลักษณะเป็นดิน 2 ชั้น ก็จะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 2 (ρ_2) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยสามารถหาได้ดังนี้

ในกรณีของดิน 2 ชั้น

จากสมการที่ 5.1 และ 5.2 เป็น การคำนวณ ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยปรากฏ ของดินที่ความลึก A เมตร แต่ในกรณีที่ดินมีลักษณะเป็นดิน 2 ชั้น จะมีค่าความต้านทานจำเพาะ ของดินชั้นที่ 2 (ρ_2) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



รูปที่ 5.2 แสดง การวัดด้วยวิธี Four Point Test ในดิน 2 ชั้น

พิจารณาในรูปที่ 5.2 เมื่อดินชั้นบนมีความหนา = h และระยะห่างระหว่าง Prob = s
เมื่อ $h < s$

กระแสจะไหลลงไปในดินจากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 2 ค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 3 จะมีค่า V_{a1}
และ ρ_2 เป็นองค์ประกอบด้วย ส่วนค่าความต่างศักย์ที่จุด a ที่ระยะทาง h จากจุด 1 จะมีแต่
ค่าของ 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

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 เนื่องจาก กระแสไหลผ่านในดินที่จุด 1 จะได้

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

โดยวิธีเดียวกัน เราจะได้ ความต่างศักย์ที่จุด 3 เนื่องจากกระแสไหลจากจุด 2 (-I) จะได้

$$V_{32} = -\frac{I_1}{2\pi h} - \frac{I_2}{2\pi s} + \frac{I_2}{2\pi h} \quad (\text{โวลต์})$$

และ

$$\begin{aligned} V_3 &= V_{31} + V_{32} \\ &= \frac{I_2}{2\pi(2s)} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าความต่างศักย์ที่ตำแหน่ง 4 เมื่อคิดว่ามีกระแสไหลจากตำแหน่ง 2 (-I) จะได้

$$V_4 = \frac{-I_2}{2\pi(2s)}$$

ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ระหว่าง ศักย์ที่ Prob 3 และ Prob 4 จะได้

$$\begin{aligned} V &= V_3 - V_4 \\ &= \frac{I_2}{2\pi(2s)} - \left[\frac{-I_2}{2\pi(2s)} \right] \\ &= \frac{I_2}{2\pi s} \quad (\text{โวลต์}) \end{aligned}$$

และค่า "ความต้านทานที่วัดได้" $R_w = \frac{V}{I}$

จะได้

$$R_w = \frac{(I_2/2\pi s)}{I} = \frac{\rho_2}{2\pi s} \quad (\text{โอห์ม})$$

และค่า "ความต้านทานจำเพาะที่ได้จากการวัด"

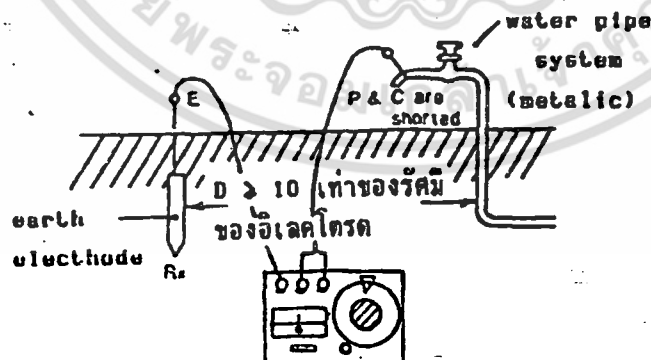
$$\begin{aligned} \rho_w &= 2\pi s R_w \\ &= 2\pi s (\rho_2) \\ &2\pi s \\ \rho_w &= \rho_2 \end{aligned}$$

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

วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีที่ดินบริเวณที่ต้องการวัดความต้านทานของดิน มีลักษณะค้ำเค้นซึ่งไม่เหมาะกับการวัดแบบอื่น ๆ ค่าความต้านทานที่วัดได้จะมีค่าความต้านทานของสายวัดรวมอยู่ด้วยจึงเป็นวิธีที่วัดค่าได้ถูกต้อง เมื่อค่าความต้านทานของสายสามารถลดลงได้เร็วเทียบกับค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่ถูกวัด เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว แต่ไม่สามารถวัดได้ในกรณีที่ดินมีค่าความต้านทานสูงมาก ๆ วิธีการวัดแบบ Driven Ground Rod แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงการวัดโดยวิธี DRIVEN ROD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของดินชั้นเดียว

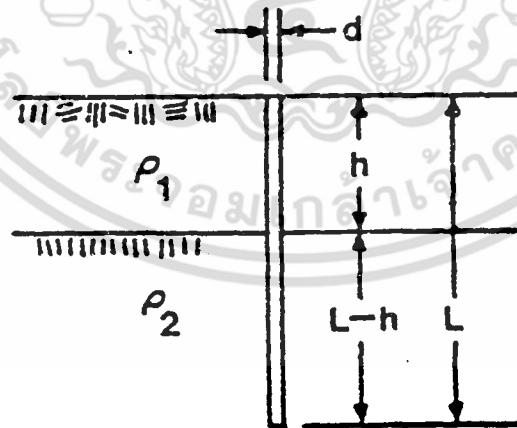
สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จาก [12]

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

- เมื่อ ρ_D = ความต้านทานจำเพาะของดินปรากฏที่ความลึก L (โอห์ม-เมตร)
 L = ความยาวของ ไดรฟ์ เวนกราวน์ร็อดที่สัมผัสกับพื้นดิน (เมตร)
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางของกราวน์ร็อด (เมตร)
 R_D = ความต้านทาน ที่วัดได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)

ในกรณีของดินสองชั้น

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



รูปที่ 5.4 แสดง การวัดโดยวิธี DRIVEN ROD ในดิน 2 ชั้น

โดยที่ i_1 จะเป็นความหนาแน่นของกระแสในส่วนของแท่งตัวนำที่ผูกฝัง a ในดินชั้นบนลึก h และมีค่าความต้านทานจำเพาะ 1 ซึ่งจะได้ว่า

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

เมื่อ I = กระแสรวมทั้งหมดในแท่งตัวนำ (แอมป์)

i_1 = ความหนาแน่นของกระแสในแท่งตัวนำของดินชั้นบนนี้ (แอมป์/เมตร)

h = ความลึกของดินชั้นบน (เมตร)

i_2 = ความหนาแน่นของกระแสในแท่งตัวนำในส่วนของดินชั้นล่าง ρ_2 (แอมป์/เมตร)

L = ความยาวของแท่งตัวนำที่ฝังลงในดิน (เมตร)

$L-h$ = ความยาวของแท่งตัวนำที่ฝังลงในดินส่วนของดินชั้นล่าง ρ_2 (เมตร)

- หาค่าความหนาแน่นของกระแส i_1 ของแท่งตัวนำของดินชั้นบน ρ_1 เมื่อใช้แท่งตัวนำยาว L ลงในดินชั้นเดียว จะได้

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

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

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

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

และค่า ความหนาแน่นของกระแสในแท่งตัวนำ

$$i_1 = \frac{I_1}{L} = \frac{V_R 2\pi}{\rho_1 [\ln 8L - 1]} \quad (\text{แอมป์/เมตร}) \quad (5.4.4)$$

- หากความหนาแน่นของกระแส i_2 ของแท่งตัวนำในส่วนของดินชั้นล่าง ได้ในทำนองเดียวกัน
จะได้

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

แทนสมการ (5.4.4) และ (5.4.5) ลงใน สมการ (5.4) จะได้

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

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

ถ้าป้อนความต่างศักย์ V_R เข้าที่แท่งตัวนำ ค่าความต้านทานของแท่งตัวนำ R_D จะเท่ากับ

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

จะได้
$$R_D = \ln 8L-1 \left[\frac{1}{\frac{d}{2d} + \frac{h}{\rho_1} + \frac{L-h}{\rho_2}} \right] \quad (5.4.7)$$

แทนค่า R_D จากสมการที่ 5.4.7 ลงในสมการ (5.3) จะได้

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

จากสมการ (5.4.8) จะพบว่า

ถ้า ดินชั้นบนมีความลึก $h = 0$ ค่า $\rho_r = \rho_2$
 และ ถ้า ดินชั้นบนมีความลึก $h > L$ ค่า $\rho_D = \rho_1$

จากการวัดที่ได้กล่าวมาทั้ง 2 วิธีนั้น ในการบันทึกค่าความต้านทานที่วัดได้ จะทำการวัดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ตามต้องการเพื่อหาค่าเฉลี่ย และ เพื่อเป็นการตรวจสอบลักษณะชั้นของดิน

ซึ่งจะพบว่าดินเป็นดิน 2 ชั้น เมื่อค่าความต้านทานที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกเพียงเล็กน้อย (เมื่อความชื้นและปริมาณน้ำใต้ดินมีผลน้อย) และ ควรจะบันทึกค่าของอุณหภูมิและปริมาณความชื้นของดินในเวลาทีวัดด้วย เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนี้ ไม่ควรวัดในบริเวณที่มีการฝังแท่งตัวนำของระบบต่อลงดินอื่น ๆ บนอยู่ด้วย เพราะจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากมีกระแสส่วนไหลผ่านทางระบบต่อลงดินของระบบอื่น ยกเว้น ในกรณีที่ตำแหน่งที่วัดอยู่ตรงกลางของ mesh ของตะแกรงต่อลงดินที่มีขนาดกว้างมาก ๆ

5.2 การวัดค่าความต้านทานของแท่งอิเล็กโทรด และระบบต่อลงดิน

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งระหว่างต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการวัดค่าต้านทานของระบบต่อลงดินเพื่อ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้คำนวณ เพื่อเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่า ค่า R_{Σ} ที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยพิจารณาระบบต่อลงดินที่ติดตั้งแล้วเสร็จ เสมือนเป็น แท่งอิเล็กโทรด ที่ต้องการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งวิธีการวัดสามารถวัดได้จากหลายวิธี เช่น

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

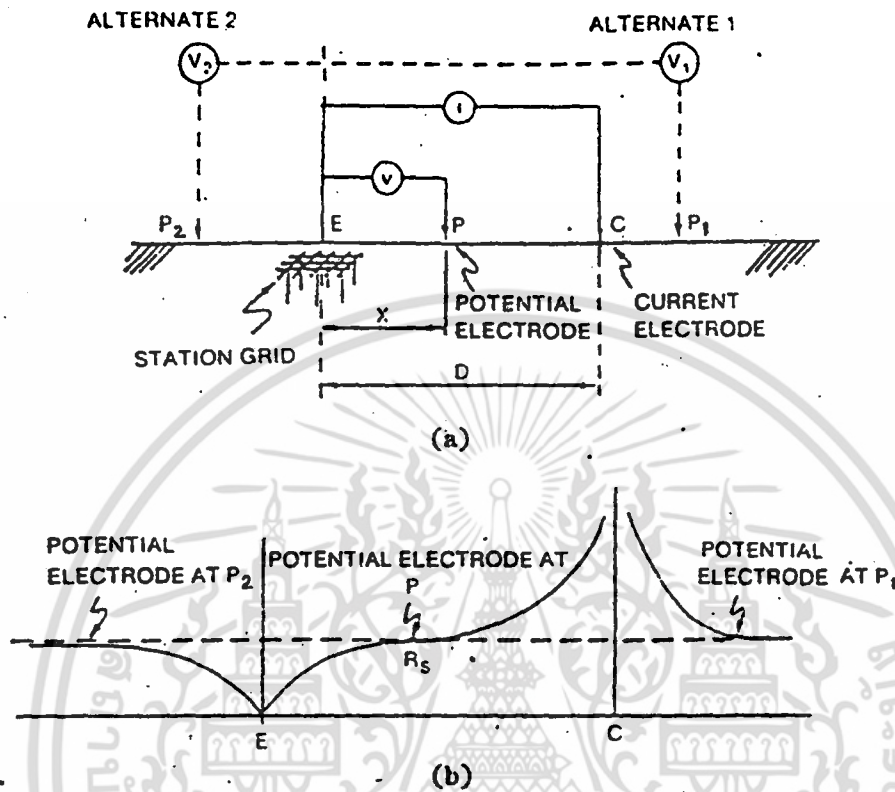
แต่วิธีที่นิยมและสามารถใช้กับการวัดค่า Ground Impedance ในทุกๆแบบ คือวิธี Fall-of-Potential ดังจะกล่าวต่อไป

5.2.1 วิธี Fall-of-Potential

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

การวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด E และจุด P ให้วัดในหลาย ๆ ตำแหน่งโดยการเลื่อนตำแหน่ง P ไปยังทิศทางตำแหน่ง C โดยการเพิ่มระยะทางเท่า ๆ กันในแต่ละครั้ง ซึ่งตำแหน่งของจุด P อาจจะมีตั้งแต่บริเวณใกล้ ๆ กับจุด E เลื่อนไปทางจุด C เรื่อย ๆ และทำการบันทึกข้อมูล ซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟควรจะได้ดังรูปที่ 5.5(b) ตาม curve ของ EPC จากจุด E ไปยังจุด P ค่าแรงดันต่อกระแสของกระแสทดสอบจะสูงขึ้นแต่ความแตกต่างของแรงดัน

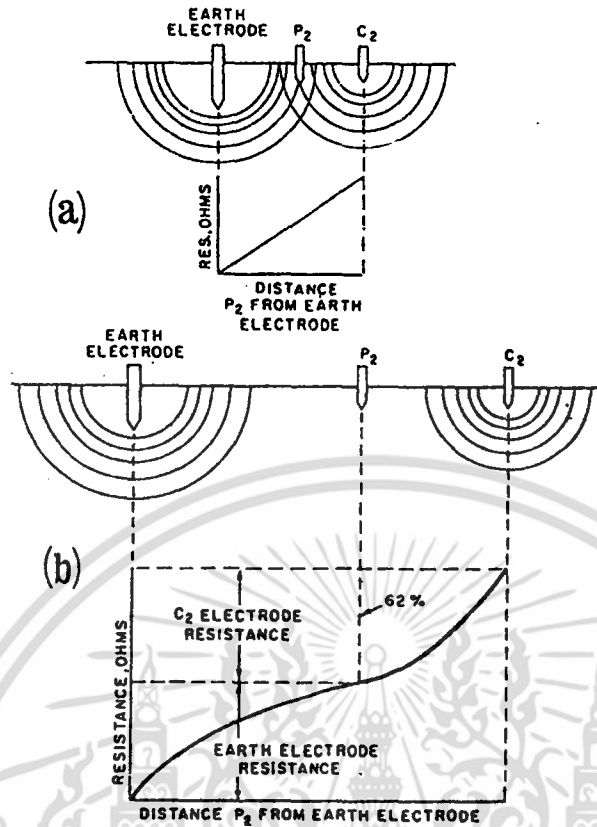
จะต่ำลงและเป็นศูนย์ที่จุด P ถัดจากตำแหน่งที่จุด P ไปยังจุด C ผลของกระแสที่ไหลไปยังแท่ง current electrode จะสูงขึ้นเรื่อยๆ และแอมแปร์เดียนท์ของแรงดันก็จะสูงขึ้น



รูปที่ 5.5 แสดงการวัดโดยวิธี Fall-of-Potential

จากกราฟในส่วนบริเวณจุด P ซึ่งเป็นบริเวณที่แอมแปร์เดียนท์ของแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นบริเวณที่ถือว่าผลของกระแสที่เคลื่อนไปยัง current electrode มีค่าน้อยมากและละเอียดได้ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ถูกรบกวนโดยศักย์ไฟฟ้าจากจุด E และ C ซึ่งค่าความต้านทานที่วัดได้ในช่วงนี้จะ เป็นค่าความต้านทานของอิเล็กโทรด (ระบบต่อลงดิน) (R_{EE})

เพื่อที่จะหาบริเวณจุด P ซึ่งถือว่าเป็นบริเวณที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้า จากขั้วอิเล็กโทรดที่จุด E และจุด C นั้น ระยะทาง X จะต้องมีความพอ ซึ่งโดยปกติแล้ว ค่าระยะทางระหว่าง E และ P ที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้ามักจะเป็น 62% ของระยะทางระหว่าง E กับ C และระยะทาง P กับ C จะเป็น 32% ของระยะทาง E กับ C ดัง รูปที่ 5.6(รายละเอียดหาได้จาก [8])



รูปที่ 5.6 แสดงระยะการวัดที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้าในวิธี Fall-of-Potential
 5.6 (a) แสดง ตำแหน่งของจุด P อยู่ในตำแหน่งที่มีการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้า
 5.6 (b) แสดง ตำแหน่งของจุด P อยู่ในตำแหน่งที่ปลอดภัยจากการรบกวนทางศักย์ไฟฟ้า

ในกรณีระบบต่อลงดินมีขนาดเล็ก ไม่ใหญ่เกินไป ระยะ X จะอยู่ในช่วง ประมาณ 50 เมตร

แต่

ในกรณีที่ระบบต่อลงดินมีขนาดใหญ่ ค่า R_s ในบริเวณจุด P (บริเวณที่แกรเดียนท์ของแรงดัน ถือว่ามีค่าเท่ากับ ศูนย์) อาจจะต้องใช้ระยะที่ไกลมาก ซึ่งรายละเอียด หาได้จาก [8]

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

ในการวัดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินด้วย วิธี Fall-of-Potential นี้ ค่าที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่าค่าจริงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลดีต่อค่าความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบ

5.2.2 วิธี DRIVEN ROD

(รายละเอียด เหมือนในหัวข้อ 5.1.2)



บทที่ 6

ผลการทดลองและ วิจัย

6.1 ผลการคำนวณ ตัวอย่างการออกแบบระบบต่อลงดิน ในสถานไฟฟ้าย่อย

การออกแบบระบบต่อลงดินในสถานีย่อยที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก (ขนาดพื้นที่ 20m * 45m)

ส่วนใหญ่แล้วสถานีย่อยที่มีพื้นที่ขนาดนี้มักจะเป็นสถานีย่อยขนาดเล็ก (SUBSTATION) หรือสถานีย่อยหน่วยย่อย (UNIT SUBSTATION) ในโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีไว้รับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้า และแปลงระดับแรงดัน เพื่อส่งจ่ายให้กับเครื่องจักรกลต่างๆภายในโรงงาน ซึ่งจะพบตามโรงงานทั่วไปที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก สามารถออกแบบได้ดังนี้

ขั้นตอนการออกแบบ (ในหัวข้อ 2.2)

1. ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความต้านทานของผิวดิน $\rho = 30 \text{ ohm-m}$.

ความต้านทานของผิวดินที่โรยหินกรวด $\rho_g = 3000 \text{ ohm-m}$.

ความหนาของผิวนหินกรวด $h_g = 0.1 \text{ m}$.

ความลึกของตะแกรงตัวนำ $h = 0.5 \text{ m}$.

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $D_2 = 0.0138 \text{ m}$.

ขนาดของกระแสชนิดปกติสูงสุด $I_g = 8000 \text{ A}$.

เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันแก้ไขขณะผิดปกติ (ขึ้นกับการออกแบบ) $t = 0.1 \text{ s}$.

2. คำนวณค่า $E_{\text{touch } 50}$, $E_{\text{step } 50}$ จากสมการ 2.13, 2.16 (กรณี 50 kg)

จาก

$$E_{\text{touch } 50} = \frac{(1000 + 1.5C_g(h_g, k)\rho_g)(0.116)}{\sqrt{t_g}} \quad (2.13)$$

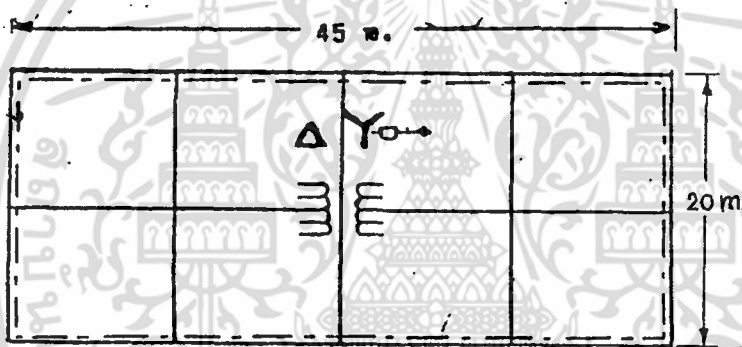
$$E_{\text{step } 50} = \frac{(1000+6C_{\text{u}}(h_{\text{u}},k)\rho_{\text{u}})(0.116)}{\sqrt{t_{\text{u}}}} \quad (2.16)$$

เมื่อแทนด้วยข้อมูลข้างต้น จะได้

$$E_{\text{touch}} = 1451.44 \quad E_{\text{step}} = 4705.28$$

3. สมมติการล่องวางตะแกรงตัวนำของระบบต่อลงดิน โดยการประมาณระยะห่างของตัวนำอย่างคร่าวๆ

เริ่มจากการล่องวางตะแกรงตัวนำโดยประมาณระยะห่างของตัวนำอย่างคร่าวๆดังรูปที่ 6.1 จากนั้นหาความยาวของตัวนำ ได้ $L = 235 \text{ m}$.



รูปที่ 6.1 แสดงการวางตะแกรงต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยในชั้นแรก

4. คำนวณค่าความยาวตัวนำสั้นที่สุดที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุด จากสมการที่ 2.26, 2.27

เมื่อได้ค่าความยาวตัวนำที่สั้นที่สุดแล้ว (L_{50}) นำไปเปรียบเทียบกับค่าความยาวตัวนำ จากที่ได้สมมติการวางตะแกรง

ถ้า ค่า L_{50} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า ค่า L ที่ได้สมมติการวางตัวนำลงไป สามารถ ลดค่าความยาวตัวนำที่สมมติการวางตะแกรง ลงจนมีขนาดเท่ากับค่า L_{50} ที่คำนวณได้

ถ้า ค่า L_{50} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า ค่า L ที่ได้สมมติการวางตัวนำลงไป จะต้องเพิ่มค่าความยาวตัวนำที่สมมติการวางตะแกรงจนมีขนาดเท่ากับค่า L_{50} ที่คำนวณได้ ในตำแหน่งที่คาดว่าจะมีความต่างศักย์สูงกว่าจุดอื่นๆ ในขณะเกิดกระแสผิดปกติ เช่น ที่บริเวณ ใกล้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อลงดิน

(จาก ผลการคำนวณที่ 1)

หาค่า L_{50} โดยแทนค่าจากข้อมูลข้างต้นได้ $L_{50} = 208.17 \text{ m}$ ซึ่งเป็นความยาวที่ปลอดภัยเพียงพอแต่จากการประมาณข้างต้นในรูปที่ 6.1 ได้ $L = 235 \text{ m}$ เราสามารถลดค่า L ได้ ดังรูปที่ 6.2 จะได้ $L_{50} = 215 \text{ m}$ ซึ่งมากพอสำหรับความปลอดภัย และระดับตะแกรงให้เหมาะสมในบริเวณที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงติดตั้งอยู่

5. คำนวณค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มขณะเกิดกระแสผิวดักติ (GPR), E_g

จาก

$$GPR, (E_g) = I_g R_g \quad (2.24)$$

เมื่อ ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน คำนวณได้จาก สมการที่

เปรียบเทียบค่า GPR กับค่า $E_{touch\ 50}$

ถ้าค่า $GPR < E_{touch}$ แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีความปลอดภัยเพียงพอ สามารถนำค่าที่ได้จากการสมมติวางตะแกรง ไปใช้ในการติดตั้งได้

ถ้าค่า $GPR > E_{touch}$ แสดงว่า ระบบที่ออกแบบมีความปลอดภัยไม่เพียงพอ ให้ทำตามขั้นตอนที่ 6

6. คำนวณค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด (E_m), แรงดันย่างก้าวสูงสุด (E_g) ที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน เทียบกับ ค่าขอบเขตความปลอดภัย E_{touch}, E_{step}

ถ้า $E_m < E_{touch\ 50}$ และ $E_g < E_{step\ 50}$ แสดงว่าปลอดภัย สามารถนำระบบต่อลงดินที่ได้จากการสมมติวางตะแกรง ไปใช้ในการติดตั้งได้

ถ้า $E_m > E_{touch\ 50}$ หรือ $E_g > E_{step\ 50}$ แสดงว่าไม่ปลอดภัย ให้ทำการสมมติการวางตะแกรงใหม่โดยเพิ่มตัวนำโดยการแบ่งตะแกรงให้มีขนาดเล็กลงอีก (กลับไปขั้นตอนการทำงานที่ 3)

คำนวณค่า E_m, E_g

$$E_m : \text{Mesh Voltage} = \frac{(\rho K_m K_f I_g)}{L} \quad (2.18)$$

และ

$$E_g : \text{Max. Step Voltage} = \frac{(\rho K_g K_f I_g)}{L} \quad (2.19)$$

โดยที่

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D_1^2}{15hD_2} + \frac{(D_1+2h)^2}{8D_1D_2} - \frac{h}{4D_2} \right] + \frac{K_{11}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{(2n-1)} \right] \right] \quad (2.20)$$

$$K_{11} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (2.21)$$

$$K_1 = 0.656 + 0.172 * n \quad (2.22)$$

$$K_h = \sqrt{1+h/h_0} ; h_0 = 1 \quad (2.23)$$

$$C_s(h_s, k) = 1 - a \left[\frac{1 - (\rho/\rho_s)}{2h_s + a} \right] ; a = 0.106 \text{ m.} \quad (2.24)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D_1+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right] ; \text{สำหรับ } 0.25\text{m} < h < 2.5\text{m} \quad (2.25)$$

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

เมื่อแทนด้วยข้อมูลข้างต้น จะได้

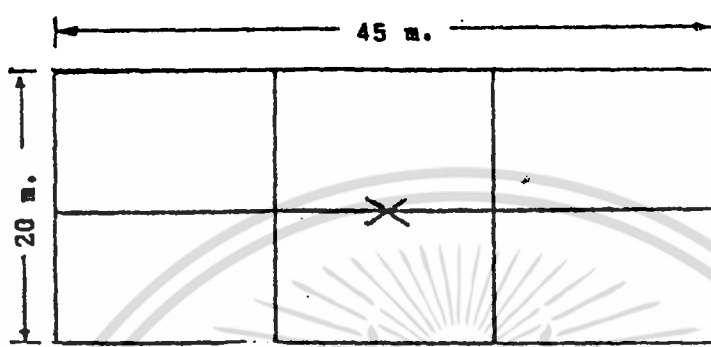
$$E_m = 1285.33597 \quad E_s = 436.3318 \quad (\text{จากผลการคำนวณที่ 1})$$

จากขั้นตอนที่ 2 ค่า $E_{\text{touch}} = 1451.44$ $E_{\text{step}} = 4705.28$

ค่าของ $E_m < E_{\text{touch}}$ แสดงว่า เมื่อวางตัวนำด้วยค่า $L = 235 \text{ m}$. ตัวระยะห่างของตะแกรงตั้งข้างต้น (ดังรูปที่ 6.1) จะให้ค่าความปลอดภัยเพียงพอ และยังสามารถลดความยาวตัวนำ L ลงได้อีกจนถึง 208.1068 m ($L_{50} = 208.1068$) ซึ่งจะทำให้ค่า $E_m = E_{\text{touch}}$ และเป็นค่าที่พอดีปลอดภัยเมื่อใช้ค่า L_{50} จากที่คำนวณได้ (จากผลการคำนวณที่ 2)

ดังนั้นเราสามารถลดความยาวตัวนำของระบบต่อลงดินได้ดังรูปที่ 6.2 โดยลดความยาวตัวนำต่อลงดินลงเหลือ 215 m ซึ่งจะได้ค่าความปลอดภัยต่างๆดังผลการคำนวณที่ 3

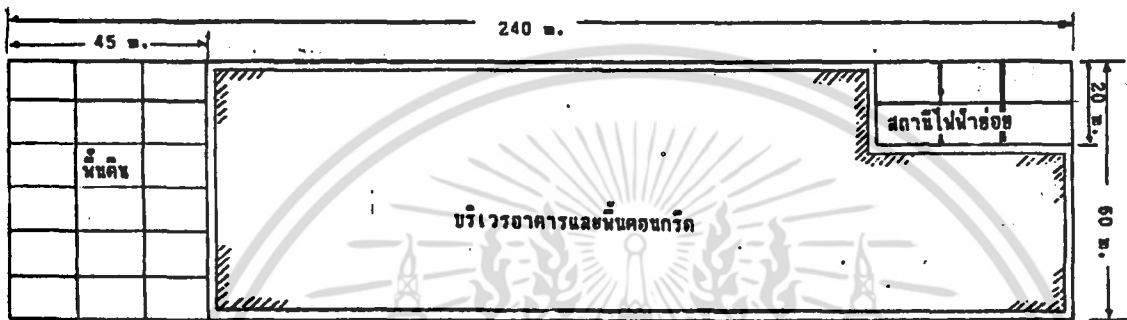
ปกติแล้ว เมื่อค่าของ E_m อยู่ในค่าที่ปลอดภัยแล้วค่าของ E_u มักจะปลอดภัยด้วยเสมอ ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินดังรูปที่ 6.2 จะสามารถทำให้ความปลอดภัยเพียงพอ



รูปที่ 6.2 แสดงการวางตะแกรงต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยชั้นสูงทำนเพื่อลดความยาวตัวนำ L

6.2 ผลการคำนวณ, ตัวอย่างการออกแบบการรวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย กับระบบต่อลงดินบริเวณอื่นๆ ใน โรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดพื้นที่ไม่กว้างขวางมาก

กรณีที่โรงงานอุตสาหกรรมมีขนาดพื้นที่ไม่กว้างขวางมากนักและ มีการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปในโรงงานที่มีขนาดพื้นที่ (240m * 60m) ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงการรวมระบบต่อลงดินของโรงงาน

ขั้นตอนการคำนวณ

พิจารณาในรูปที่ 6.3 จะเห็นว่า พื้นที่ต่างๆในโรงงาน จะแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ที่มีลักษณะการใช้งานแตกต่างกันสามารถแยกส่วนต่างๆของ โรงงานออกเป็นสามส่วนคือ

1. สถานีไฟฟ้าย่อย
2. อาคารหรือพื้นที่คอนกรีตที่มีการวาง โครงเหล็ก (พื้นที่ภายในส่วนนี้ไม่ต้องคำนึงถึง E_m, E_s เพราะมีโครงเหล็กวางบนผิวดินอยู่แล้ว เพียงแต่วางตัวนำโดยรอบก็เพียงพอ)
3. พื้นดินที่ไม่ได้โรยหินกรวด

แต่จากหลักการออกแบบระบบต่อลงดินแบบรวมนี้ จะต้องทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยให้รวมระบบต่อลงดินทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้วออกแบบร่วมกัน

จากหัวข้อ 2.2

1. บ่อยข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ความต้านทานของผิวดิน $\rho = 30 \text{ ohm-m}$.

ความต้านทานของผิวดินที่โรยหินกรวด $\rho_{\text{g}} = 30 \text{ ohm-m}$.

ความหนาของพื้นหินกรวด $h_{\text{g}} = 0.1 \text{ m}$.

ความลึกของตะแกรงตัวน้ำ $h = 0.5 \text{ m}$.

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวน้ำ $D_2 = 0.0138 \text{ m}$.

ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่สูงสุด $I_{\text{g}} = 8000 \text{ A}$.

เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันแก้ไขขณะผิดปกติ(ขึ้นกับการออกแบบ) $t = 0.1 \text{ s}$.

2. คำนวณค่า $E_{\text{touch } 50}$, $E_{\text{step } 50}$ จากสมการ 2.13, 2.16 (กรณี 50 kg)

เมื่อแทนด้วยข้อมูลข้างต้น จะได้ (จากผลการคำนวณที่ 4)

$$E_{\text{touch}} = 383.33130 \quad E_{\text{step}} = 432.8526$$

3. สมมติการลองวางตะแกรงตัวน้ำของระบบต่อลงดิน โดยการประมาณระยะห่างของตัวน้ำอย่างคร่าวๆ

เริ่มจากการลองวางตะแกรงตัวน้ำ โดยประมาณระยะห่างของตัวน้ำอย่างคร่าวๆดังรูปที่ 6.3

จากนั้นหาความยาวของตัวน้ำ

จะได้

$$L_{\text{รวม}} = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L_1 = 215 \text{ m: จากสถานีไฟฟ้าย่อย}$$

$$L_2 = 445 \text{ m: } (150+195+60+40) \text{: จากอาคารและพื้นคอนกรีต}$$

$$L_3 = 495 \text{ m: } ((45*7)+(60*3)) \text{: จากพื้นดินที่ไม่ได้โรยหินกรวด}$$

จะได้

$$L_{\text{รวม}} = 1155 \text{ m}$$

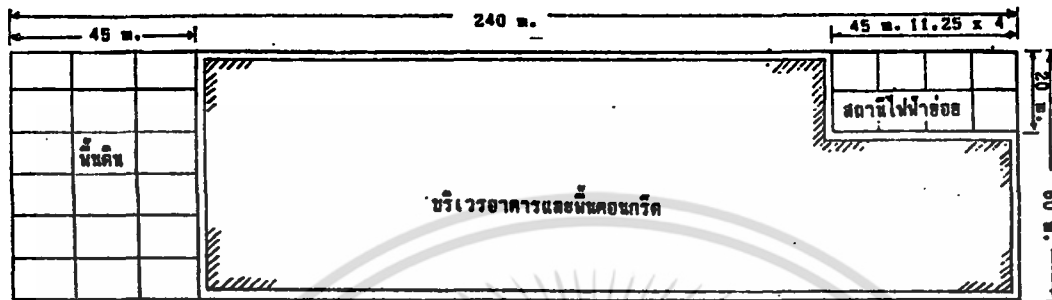
4. การคำนวณค่าความยาวตัวน้ำสั้นที่สุดที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุด จากสมการที่ 2.26, 2.27

หาค่า L_{50} โดยแทนค่าจากข้อมูลข้างต้นได้ $L_{50} = 1165.4$ (ใช้ค่า $\rho_{\text{g}} = 30, n=7, D1=10$)

เปรียบเทียบกับค่า $L_{\text{รวม}}$ จากขั้นตอนที่ 3 $L_{\text{รวม}} = 1155$ ซึ่งยังขาดอีก 10.4 m และผล

จาก ผลการคำนวณที่ 4 จะพบว่าระบบไม่ปลอดภัยเพียงพอ

ดังนั้น ต้องเพิ่มความยาวตัวนำเข้าให้มากกว่าค่า L_{EO} เดิมเข้าไปยังที่ใดก็ได้ที่คิดว่าเป็น บริเวณที่จะเกิดความต่างศักย์สูงขณะเกิดกระแสผิดปกติ ในความยาวที่เหมาะสม เราเลือกเติมที่ สถานีไฟฟ้าย่อย (ดังรูปที่ 6.4) ดังนั้นขณะนั้น $L_{EO} = 1175 \text{ m}$ ซึ่งมากพอ



รูปที่ 6.4 แสดงการรวมระบบต่อลงดินของ โรงงานเมื่อเพิ่มความยาวตัวนำที่สถานีไฟฟ้าย่อย

5. คำนวณค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มขณะเกิดกระแสผิดปกติ (GPR), E_g จากสมการที่ 2.24

6. คำนวณค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด (E_m), แรงดันย่างก้าวสูงสุด (E_g) ที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน ดังรูปที่ 6.4 เทียบกับ ค่าขอบเขตความปลอดภัย E_{touch} , E_{step} เมื่อแทนด้วยข้อมูลข้างต้น จากผลการคำนวณที่ 4 จะได้

$$E_m = 3386.77963 \text{ V.} \quad E_g = 146.6594 \text{ V.}$$

$$\text{จากขั้นตอนที่ 2 ค่า } E_{touch} = 383.33130 \text{ V.} \quad E_{step} = 432.8526 \text{ V.}$$

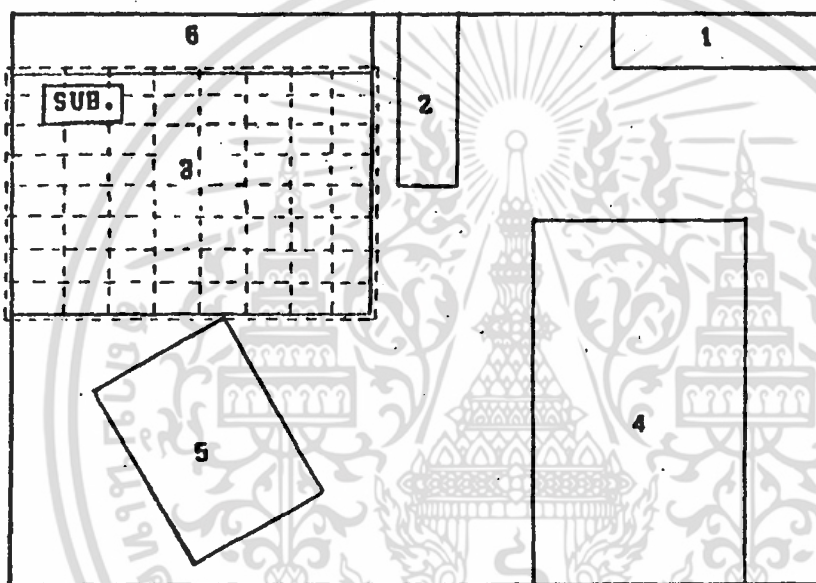
ค่าของ $E_m < E_{touch}$ แสดงว่า เมื่อวางตัวนำด้วยค่า $L=1175 \text{ m}$. ด้วยระยะห่างของ ตะแกรงตั้งข้างต้น (ดังรูปที่ 6.4) จะให้ค่าความปลอดภัยเพียงพอ จากผลการคำนวณที่ 5 (และ ยังสามารถลดความยาวตัวนำ L ลงได้อีกจนถึง 1165.39 m ซึ่งก็จะให้ค่าความปลอดภัยเพียงพอ จากผลการคำนวณที่ 6) แล้วเมื่อค่าของ E_m อยู่ในค่าที่ปลอดภัยแล้ว ค่าของ E_g มักปลอดภัยด้วยเสมอ

ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินดัง รูปที่ 6.4 จะสามารถให้ความปลอดภัยเพียงพอ

6.3 ผลการคำนวณ, ตัวอย่างการออกแบบการรวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย กับระบบต่อลงดินบริเวณอื่นๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดพื้นที่กว้างขวางมาก

ในกรณีของ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีเนื้อที่มาก (ประมาณ 3,800,000 m^2) และมีการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง เข้าไปภายในบริเวณโรงงาน

พิจารณา.ท. โรงงานร่วมกับสถานีไฟฟ้าย่อย ดังรูปที่ 6.5



1. OFFICE : A = 195,000 m^2 , L=854 W=229
2. WAREHOUSE : A = 168,000 m^2 , L=700 W=233
3. PLANT 1+SUBSTATION : A = 1,260,000 m^2 L=1400 W =900
4. PLANT 2 : A = 1,249,000 m^2 , L =855 w=1460
5. CAMP : A = 467,000 m^2 , L =800 w=580
6. LAY DOWN AREA : A = 460,000 m^2 , L=1800 W=330

รูปที่ 6.5 ระบบต่อลงดินของโรงงานที่ 1 และสถานีไฟฟ้าย่อย(8*8 mesh)

ขั้นตอนการคำนวณ

1. คำนวณพื้นที่ของบริเวณที่จะต่อระบบลงดิน : $A = 1,260,000 \text{ m}^2$

2. สมมติการวางตะแกรงต่อลงดิน : $8*8 \text{ mesh}$

3. คำนวณความยาวตัวนำรวม(L): $L = 20,700 \text{ m} ; (9*1400)+(9*900)$

4. หาความต้านทาน ของตะแกรง จาก(6): $R_g = 0.01339 ; (\rho=30, \rho_g=1)$

5. หาค่า GPR จาก(สมการ 2.30): $E_g = 401.7 \text{ V} ; (I_g=30,000)$

หาค่า $E_{\text{touch}} = 171.43097 \text{ V}$, $E_m = 180.54139 \text{ V}$ ในสมการ 2.13, 2.18
(จากผลการคำนวณที่ 7)

6. พิจารณาค่าอัตราส่วน ถ้า $E_m/E_g < E_t/E_g$ จะปลอดภัย

จากข้อ 5. จะได้ $0.4505 > 0.4155$ แสดงว่า ไม่ปลอดภัย

7. เพิ่มจำนวนตะแกรง: $16*16 \text{ mesh}$

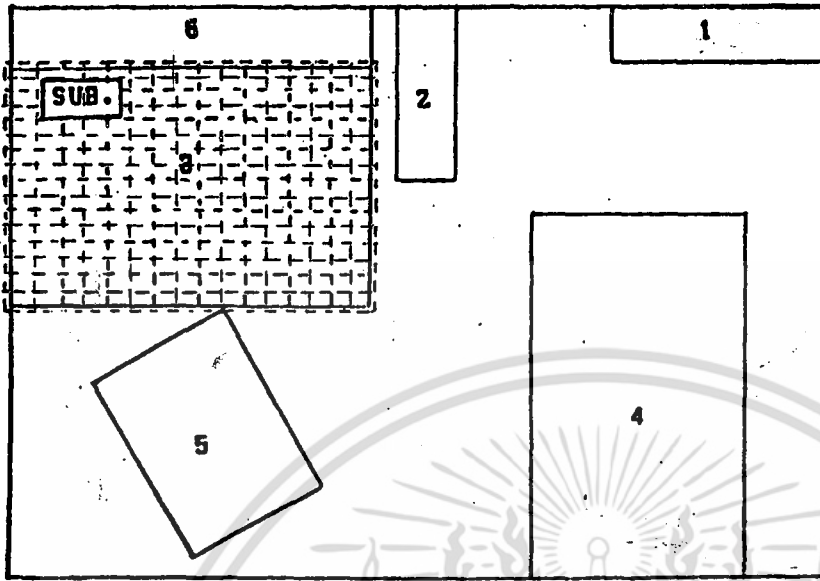
การเพิ่มจำนวน mesh ของตะแกรงเป็นสองเท่า (แบ่งตะแกรงแต่ละช่องเป็นสี่ส่วนเท่าๆกัน)

จะทำให้ ค่า E_m/E_g เปลี่ยนไปในอัตราส่วนประมาณ 2/3

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } E_m/E_g (16*16 \text{ mesh}) &= E_m/E_g (8*8 \text{ mesh}) * 2/3 \\ &= 0.4505 * 2/3 \\ &= 0.3003 \end{aligned}$$

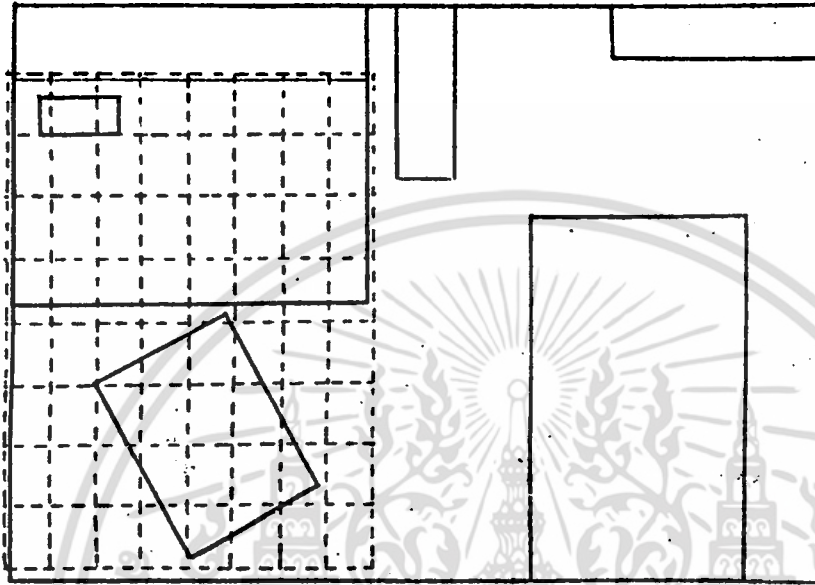
$$\begin{aligned} \text{จะได้ } E_m &= 0.3003 E_g \\ &= 120.6 \text{ V. (ค่า } E_m \text{ ที่ได้มีค่าใกล้กับผลการคำนวณที่ 8)} \end{aligned}$$

เมื่อ $E_m < E_{\text{touch}}$ แสดงว่า ระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยเพียงพอ ซึ่งจะต้องใช้ระบบต่อลงดินที่เป็นตะแกรง $16*16 \text{ mesh}$



รูปที่ 6.6 ระบบต่อลงดินของโรงงานที่ 1 และสถานีไฟฟ้าย่อย (16*16 mesh)

พิจารณาพื้นที่ โรงงานที่1+สถานีไฟฟ้าย่อย+บริเวณที่พัก (รูปที่ 6.7)



รูปที่ 6.7 แสดงการวางระบบต่อลงดินของ โรงงานที่1+สถานีไฟฟ้าย่อย+บริเวณที่พักในชั้นแรก

จากขั้นตอนการออกแบบแบบเดิม

1. $A = 1,740,000 \text{ m}^2$
2. สมมติ ให้เป็น 8*8 mesh
3. $L_{\text{รวม}} = 33,000 \text{ m} ; (9*1400)+(9*2266)$
4. $R_{\text{g}} = 0.011072$
5. $E_{\text{g}} = 332.16$

หาค่า E_m, E_{touch} จากสมการที่ 2.18, 2.13

ได้ $E_m = 122.42618$, $E_{\text{touch}} = 171.43097$ ตามผลการคำนวณที่ 9

6. จาก 5. $E_m/E_{\text{g}} = 0.367 < E_{\text{t}}/E_{\text{g}} = 0.502$ แสดงว่าปลอดภัย

จากนั้นลดลง จำนวน mesh เป็น 4*4 mesh

จะได้

$$E_m / E_g (4 \times 4 \text{ mesh}) = E_m / E_g (8 \times 8 \text{ mesh}) * 3/2$$

$$E_m / E_g (4 \times 4 \text{ mesh}) = 0.5505$$

ซึ่งมากกว่า E_c / E_g

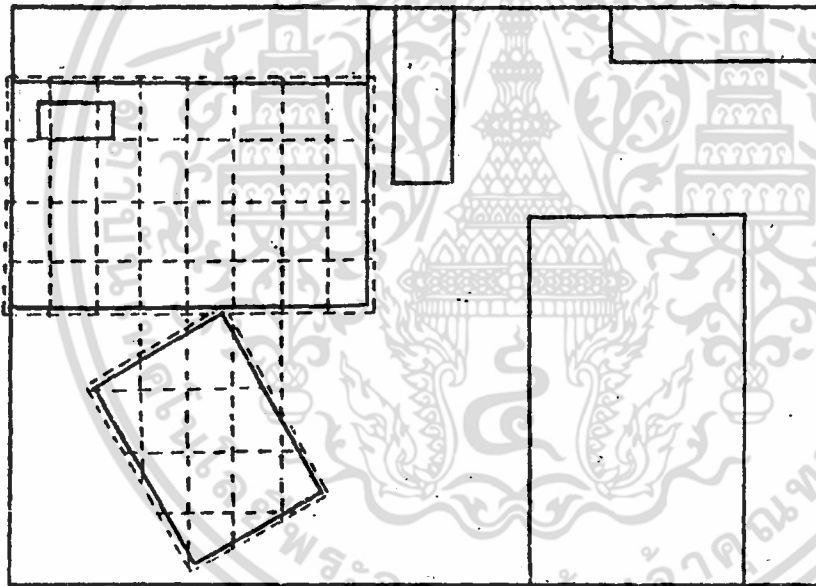
จะได้

$$E_m = 0.5505 * 332.16$$

$$= 182.854 \quad (\text{มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณที่ 10})$$

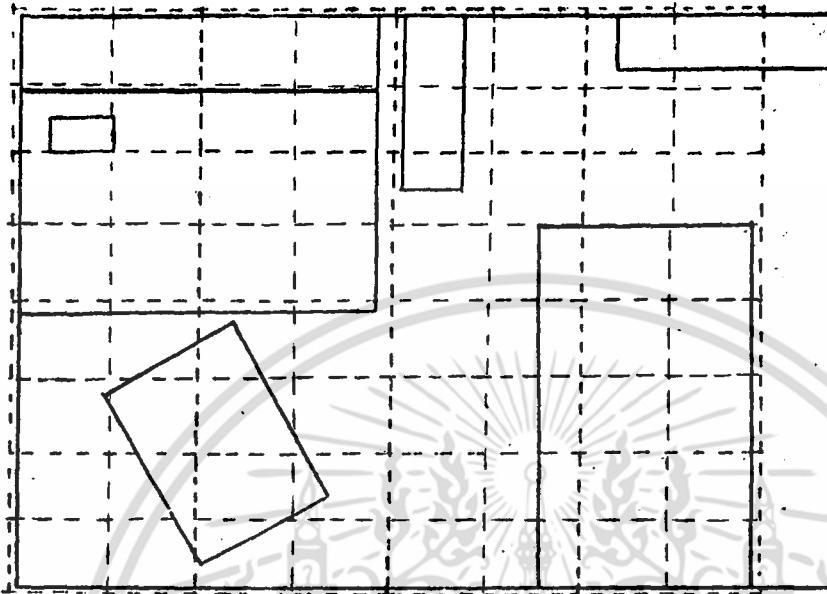
ซึ่งมากกว่า E_c แสดงว่า ไม่ปลอดภัย

ดังนั้น เลือกการวางตะแกรงแบบ 8*8 mesh จากนั้นให้วางตะแกรงตัวนำขนาด 8*8 mesh ลงบนพื้นที่ที่จะวางระบบต่อลงดินเท่านั้นและวางตัวนำโดยรอบ ดังรูปที่ 6.7 และสามารถลดการวางตะแกรงในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องได้ โดยเพิ่มความยาวตัวนำรอบบริเวณที่ปัก ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แสดงการวางระบบต่อลงดินของ โรงงานที่ 1+สถานีไฟฟ้าย่อย+บริเวณที่ปัก ในขั้นสุดท้าย

พิจารณาพื้นที่ โรงงานทั้งหมด ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดง การวางระบบต่อลงดินที่ โรงงานชิ้นแรก

จากขั้นตอนการคำนวณแบบเดิม

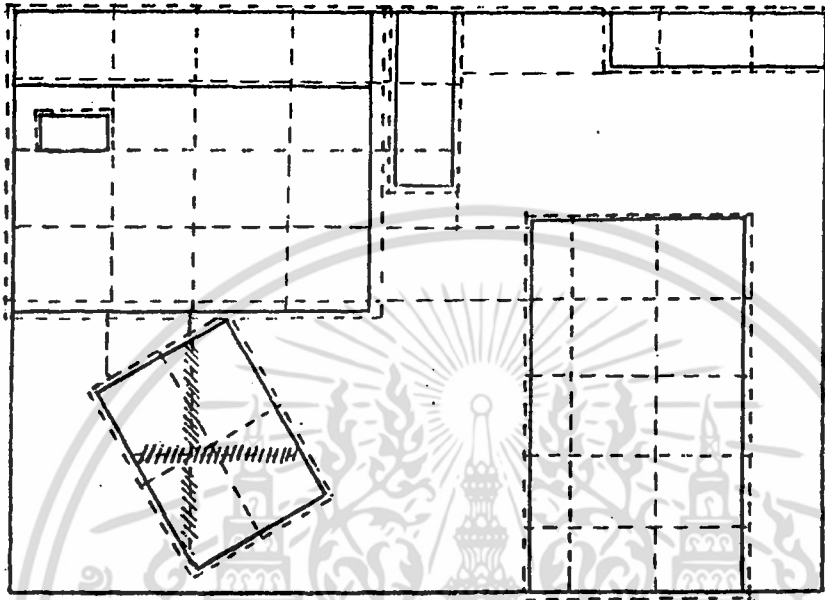
1. $A=3,800,000 \text{ m}^2$
2. สุ่มติ $8*8 \text{ mesh}$
3. $L_{\text{รวม}}=49,000 \text{ m} ; (9*2266)+(9*3177)$
4. $R_{\text{g}}=0.00749$
5. $E_{\text{g}}=224.7$ หาค่า $E_{\text{m}}, E_{\text{touch}}$ จากสมการ 2.18, 2.13
 $E_{\text{m}} = 116.80597$, $E_{\text{touch}} = 171.43097$ ดูในผลการคำนวณที่ 11
6. จาก 5.

$$E_{\text{m}}/E_{\text{g}} = 0.5198 < E_{\text{touch}}/E_{\text{g}} = 0.76293 \quad \text{แสดงว่าปลอดภัย}$$

จากนั้นลองลด mesh เป็น $4*4 \text{ mesh}$ ได้ $E_{\text{m}}/E_{\text{g}}=0.7797$ แสดงว่าไม่ปลอดภัย

จะได้ค่า $E_{\text{m}} = 175.198 \text{ V}$. (มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณที่ 12)

ตั้งใน เล็ก 8*8 mesh ดังรูปที่ 6.9 โดยวางตะแกรงเฉพาะบริเวณที่เป็นเนื้อที่โรงงานจริง จากนั้นให้ปรับ ระบบต่อลงดินในบริเวณที่พิกใหม่เพื่อให้สะดวกในการติดตั้งดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แสดง การวางระบบต่อลงดินทั้ง โรงงานชั้นสุดท้าย

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าในกรณีโรงงานใหญ่ ๆ สามารถพิจารณาแบบรวมพื้นที่ทั้งโรงงานเพียงครั้งเดียว ซึ่งสะดวกรวดเร็วกว่ามาก จากตัวอย่างของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในแต่ละขั้นตอน ชี้ให้เห็นว่าการรวมระบบต่อลงดินของทั้งโรงงานจะทำให้ค่า E_{th} , L มีค่าน้อยลง ซึ่งหลักการนี้ ได้นำไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของ โรงงานผลิตก๊าซธรรมชาติ [5] ที่มีพื้นที่มาก ๆ

ผลการคำนวณที่ 1-12 จะเป็นการคำนวณค่าความปลงภัยต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ และออกแบบระบบต่อลงดิน จากตัวอย่างการออกแบบในบทที่ 6



ผลการคำนวณที่ 1

ระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย (รูปที่ 6.1)

เงื่อนไขข้อมูล

soil resistivity $m\rho=30$

surface resistivity $m\rho_s=3000$

symmetrical F-current A $I_f=8000$

crushed rock layer thickness m $h_g=.1$

duration of shock current sec $T_g=.1$

No. of parallel conductor $n=3$

spacing between parallel conductor m $D_1=10$

Total Length of conductor m $L=235$

depth of ground grid m $h=.5$

diameter of grid conductor m $D_2=.0138$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11}=0.30285$

$K_h=1.22477$

$K_m=1.07386$

$K_f=1.17200$

$C_g=0.65706$

length of minimum conductor $L_{50}=203.10682$

$E_{touch}=1451.43708$

$E_m=1285.33597$

$E_{step}=4705.2757$

$E_g=436.3318$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 2

ระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยที่หาค่าความปลอดภัยพอดี

โอนข้อมูล

soil resistivity $m\rho=30$

surface resistivity $m\rho_s=3000$

symmetrical F-current A $I_g=8000$

crushed rock layer thickness m $h_g=.1$

duration of shock current sec $T_g=.1$

No. of parallel conductor $n=3$

spacing between parallel conductor m $D_1=10$

Total Length of conductor m $L=208.10682$

depth of ground grid m $h=.5$

diameter of grid conductor m $D_2=.0138$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11}=0.30285$

$K_h=1.22477$

$K_m=1.07386$

$K_1=1.17200$

$C_g=0.65706$

length of minimum conductor $L_{50}=208.1068$

$E_{touch}=1451.43708$

$E_m=1451.43706$

$E_{step}=4705.2757$

$E_g=492.7180$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 3

ระบบต่อลงดินในสถานไฟฟ้าย่อยเมื่อลดความยาวตัวนำ L (รูปที่ 6.2)

ป้อนข้อมูล

soil resistivity $m\rho=30$

surface resistivity $m\rho_s=3000$

symmetrical F-current A $I_F=8000$

crushed rock layer thickness m $h_s=.1$

duration of shock current sec $T_s=.1$

No. of parallel conductor $n=3$

spacing between parallel conductor m $D_1=10$

Total Length of conductor m $L=215$

depth of ground grid m $h=.5$

diameter of grid conductor m $D_2=.0138$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{i1}=0.30285$

$K_h=1.22477$

$K_m=1.07386$

$K_1=1.17200$

$C_s=0.65706$

length of minimum conductor $L_{50}=208.10682$

$E_{touch}=1451.43708$

$E_m=1404.90210$

$E_{step}=4705.2757$

$E_s=476.9208$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 4

การรวมระบบต่อลงดิน $\rho_{\text{e}}=30$ (รูปที่ 6.3)

ป้อนข้อมูล

soil resistivity $\rho_{\text{e}}=30$

surface resistivity $\rho_{\text{e}}=30$

symmetrical F-current A $I_{\text{e}}=8000$

crushed rock layer thickness m $h_{\text{e}}=.1$

duration of shock current sec $T_{\text{e}}=.1$

No. of parallel conductor $n=7$

spacing between parallel conductor m $D_1=10$

Total Length of conductor m $L=1155$

depth of ground grid m $h=.5$

diameter of grid conductor m $D_2=.0138$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11}=0.47047$

$K_h=1.22474$

$K_m=1.00074$

$K_1=1.86000$

$C_{\text{e}}=1.00000$

length of minimum conductor $L_{\text{e}0}=1165.39003$

$E_{\text{touch}}=383.33130$

$E_m=386.77963$

$E_{\text{step}}=432.8526$

$E_{\text{e}}=146.6594$

NOT SAFE

ผลการคำนวณที่ 5

การรวมระบบส่งลงดิน $\rho_s = 30$ (รูปที่ 6.4)

ข้อมูล

soil resistivity $m\rho = 30$

surface resistivity $m\rho_s = 30$

symmetrical F-current A $I_s = 8000$

crushed rock layer thickness $m h_s = .1$

duration of shock current sec $T_s = .1$

No. of parallel conductor $n=7$

spacing between parallel conductor $m D_1 = 10$

Total Length of conductor $m L = 1175$

depth of ground grid $m h = .5$

diameter of grid conductor $m D_2 = .0138$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11} = 0.47047$

$K_h = 1.22474$

$K_m = 1.00074$

$K_i = 1.86000$

$C_s = 1.00000$

length of minimum conductor $L_{50} = 1165.39003$

$E_{touch} = 383.33130$

$E_m = 380.19615$

$E_{step} = 432.8526$

$E_s = 144.1630$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 6

การรวมระบบต่อลงดิน ($\rho_s = 30$)

ข้อมูล

soil resistivity $m\rho = 30$

surface resistivity $m\rho_s = 30$

symmetrical F-current A $I_s = 8000$

crushed rock layer thickness m $h_g = .1$

duration of shock current sec $T_s = .1$

No. of parallel conductor $n = 7$

spacing between parallel conductor m $D_1 = 10$

Total Length of conductor m $L = 1165.39003$

depth of ground grid m $h = .5$

diameter of grid conductor m $D_2 = .0138$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11} = 0.47047$

$K_h = 1.22474$

$K_m = 1.00074$

$K_1 = 1.86000$

$C_s = 1.00000$

length of conductor = 1165.39003

$E_{touch} = 383.33130$

$E_m = 383.33130$

$E_{step} = 432.8526$

$E_g = 145.3518$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 7

การรวมระบบต่อลงดิน 8*8 mesh (รูปที่ 6.5)

ข้อมูล

soil resistivity $m \rho = 30$

surface resistivity $m \rho_s = 30$

symmetrical F-current A $I_g = 30000$

crushed rock layer thickness m $h_g = .1$

duration of shock current sec $T_g = .5$

No. of parallel conductor $n = 9$

spacing between parallel conductor m $D_1 = 175$

Total Length of conductor m $L = 20700$

depth of ground grid m $h = .437$

diameter of grid conductor m $D_2 = .0133$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11} = 0.52608$

$K_h = 1.20706$

$K_m = 1.88405$

$K_i = 2.20400$

$C_g = 1.00000$

length of minimum conductor $L_{50} = 21800.06847$

$E_{touch} = 171.43097$

$E_m = 180.54139$

$E_{step} = 193.5776$

$E_g = 33.7196$

NOT SAFE

ผลการคำนวณที่ 8

การรวมระบบต่อลง (เดิม 16*16 mesh (รูปที่ 6.6)

มีอนุข้อมูล

soil resistivity $m\rho=30$

surface resistivity $m\rho_s=30$

symmetrical F-current A $I_s=10000$

crushed rock layer thickness m $h_g=.1$

duration of shock current sec $T_g=.5$

No. of parallel conductor $n=17$

spacing between parallel conductor m $D_1=87.5$

Total Length of conductor m $L=39100$

depth of ground grid m $h=.457$

diameter of grid conductor m $D_2=.0133$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11}=0.66043$

$K_h=1.20706$

$K_m=1.57296$

$K_1=3.58000$

$C_g=1.00000$

length of minimum conductor $L_{50}=29561.57415$

$E_{touch}=171.43097$

$E_m=129.12646$

$E_{step}=193.5776$

$E_g=29.2960$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 9

การรวมระบบต่อลงดิน 8*8 mesh (รูปที่ 6.7)

ป้อนข้อมูล

soil resistivity $m\rho=30$

surface resistivity $m\rho_s=30$

symmetrical F-current A $I_{\Sigma}=30000$

crushed rock layer thickness m $h_{\Sigma}=.1$

duration of shock current sec $T_{\Sigma}=.5$

No. of parallel conductor $n=9$

spacing between parallel conductor m $D_1=283$

Total Length of conductor m $L=33000$

depth of ground grid m $h=.457$

diameter of grid conductor m $D_2=.0133$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11}=0.52608$

$K_h=1.20706$

$K_m=2.03673$

$K_1=2.20400$

$C_{\Sigma}=1.00000$

length of minimum conductor $L_{so}=23566.71046$

$E_{touch}=171.43097$

$E_m=122.42618$

$E_{step}=193.5776$

$E_{\Sigma}=21.0682$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 10

การรวมระบบต่อลงดิน 4*4 mesh

ป้อนข้อมูล

soil resistivity $m\rho = 30$

surface resistivity $m\rho_s = 30$

symmetrical F-current A $I_g = 30000$

crushed rock layer thickness m $h_g = .1$

duration of shock current sec $T_g = .5$

No. of parallel conductor $r = 5$

spacing between parallel conductor m $D_1 = 533.66$

Total Length of conductor m $L = 18330$

depth of ground grid m $h = .457$

diameter of grid conductor m $D_2 = .0133$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{i1} = 0.39811$

$K_h = 1.20706$

$K_m = 2.32290$

$K_1 = 1.51600$

$C_g = 1.00000$

length of minimum conductor $L_{so} = 18487.70384$

$E_{touch} = 171.43097$

$E_m = 182.90589$

$E_{step} = 193.5776$

$E_g = 26.0012$

NOT SAFE

ผลการคำนวณที่ 11

การรวมระบบต่อลงดิน 8*8 mesh

ป้อนข้อมูล

soil resistivity $m \rho = 30$

surface resistivity $m \rho_s = 30$

symmetrical F-current A $I_g = 30000$

crushed rock layer thickness m $h_g = .1$

duration of shock current sec $T_g = .5$

No. of parallel conductor $n = 9$

spacing between parallel conductor m $D_1 = 397$

Total Length of conductor m $L = 49000$

depth of ground grid m $h = .457$

diameter of grid conductor m $D_2 = .0133$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$K_{11} = 0.52608$

$K_h = 1.20706$

$K_m = 2.14433$

$K_1 = 2.20400$

$C_g = 1.00000$

length of minimum conductor $L_{50} = 24811.69221$

$E_{touch} = 171.43097$

$E_m = 116.80597$

$E_{step} = 193.5776$

$E_g = 14.1628$

SAFE

ผลการคำนวณที่ 12

การรวมระบบต่อลงดิน 4*4 mesh

ข้อมูล

soil resistivity $m\rho=30$

surface resistivity $m\rho_s=30$

symmetrical F-current A $I_s=30000$

crushed rock layer thickness m $h_s=.1$

duration of shock current sec $T_s=.5$

No. of parallel conductor $n=5$

spacing between parallel conductor m $D_1=794$

Total Length of conductor m $L=27215$

depth of ground grid m $h=.457$

diameter of grid conductor m $D_2=.0133$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$$K_{11}=0.39811$$

$$K_h=1.20706$$

$$K_m=2.43020$$

$$K_1=1.51600$$

$$C_s=1.00000$$

length of minimum conductor $L_{50}=19341.69225$

$$E_{touch}=171.43097$$

$$E_m=181.83594$$

$$E_{step}=193.5776$$

$$E_s=17.4974$$

NOT SAFE

6.4 ผลการวิจัยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความพลัดภัยสำคัญของระบบต่อลงดิน

6.4.1 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดินที่เปลี่ยนแปลง ไปตามความลึกที่วัดได้ จากบริเวณต่างๆในประเทศไทย โดยวิธี Driven Rod แสดงในตารางที่ 6.4.1

ตารางที่ 6.4.1 แสดงค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดินที่เปลี่ยนแปลงตามความลึก

ความลึก(m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

โรงงานปูนซีเมนต์ TPI จังหวัดสระบุรี

R_D (ohm) 640 500 440 380 360 340 300 250 230 210

ρ_D (ohm-m) 300 400 486 530 602 662 664 618 628 626

นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี

R_D (ohm) 550 505 490 370 305 235 185 150 125 110

ρ_D (ohm-m) 258 404 546 516 511 457 409 371 341 328

โรงพยาบาลลานานาจันทร์ จังหวัดนครปฐม

R_D (ohm) 110 90 75 65 59 55 55 55 53 53

ρ_D (ohm-m) 52 72 83 91 99 107 121 136 145 158

อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่

R_D (ohm) >1000 >1000 >1000 >1000 >1000 >1000 >1000 >1000 >1000 >1000

ρ_D (ohm-m) - - - - - - - - - - -

การเปรียบเทียบค่า ρ_{D1} ที่คำนวณจากค่า R_D กับ ค่า ρ_{D2} ที่คำนวณจากค่า R_a

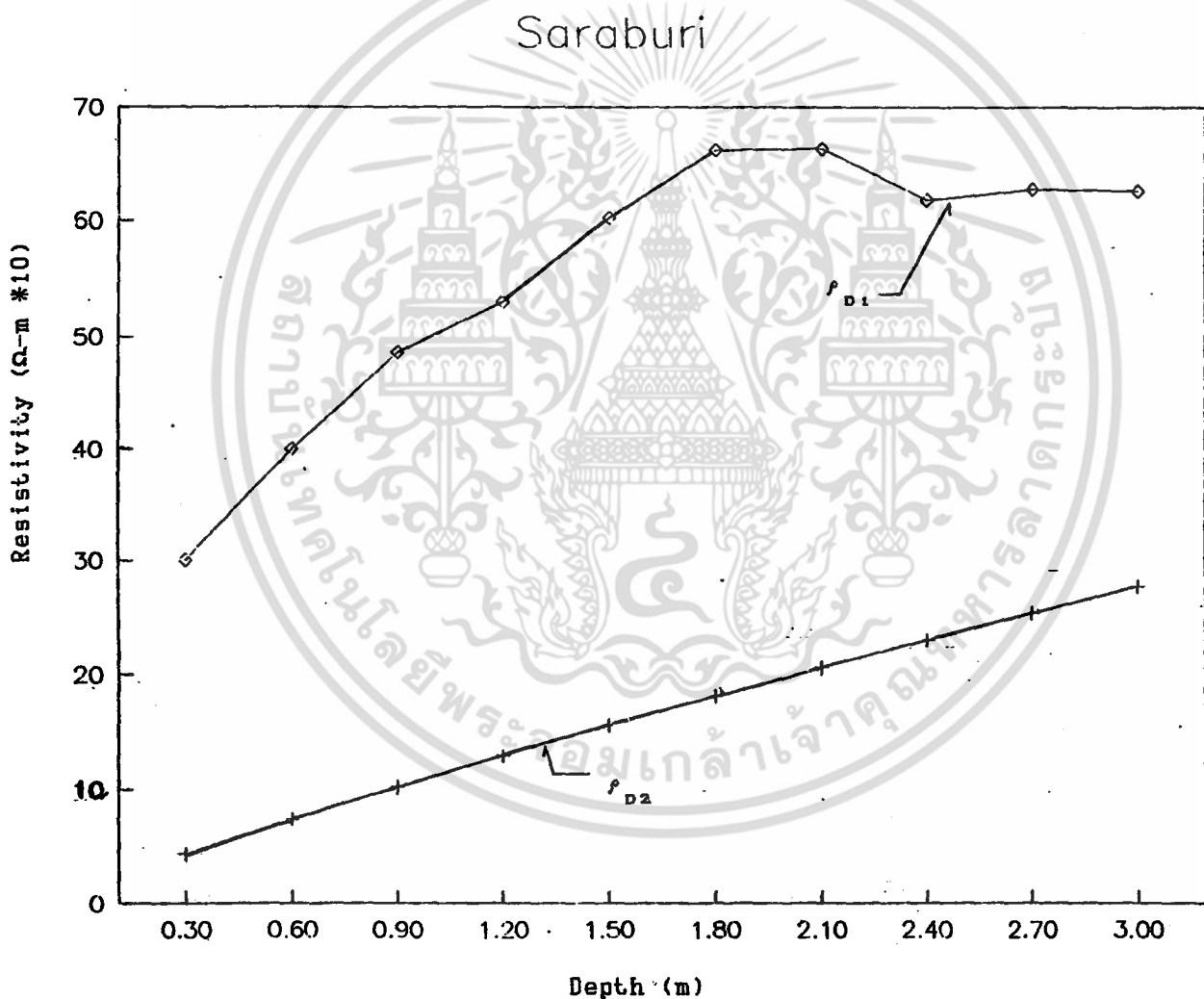
จังหวัดชลบุรี

เมื่อ ρ_{D1} คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณจาก R_D

R_D คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้จากบริ เวลจะทำการหิตติดตั้งระบบต่อลงดิน

ρ_{D2} คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณจาก R_a

R_a คือ ค่าความต้านทานเฉลี่ยของดิน (จากตารางที่ 3.1) โดยเลือกลักษณะดินที่ใกล้เคียงกับดินในบริ เวลจะทำการหิตติดตั้งระบบต่อลงดิน (ใช้ค่า 93 โอห์ม)



รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบค่า ρ_{D1} ที่คำนวณจากค่า R_D กับ ค่า ρ_{D2} ที่คำนวณจากค่า R_a ที่จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบค่า ρ_{D1} ที่คำนวณจากค่า R_D กับ ค่า ρ_{D2} ที่คำนวณจากค่า R_u

จังหวัดสระบุรี

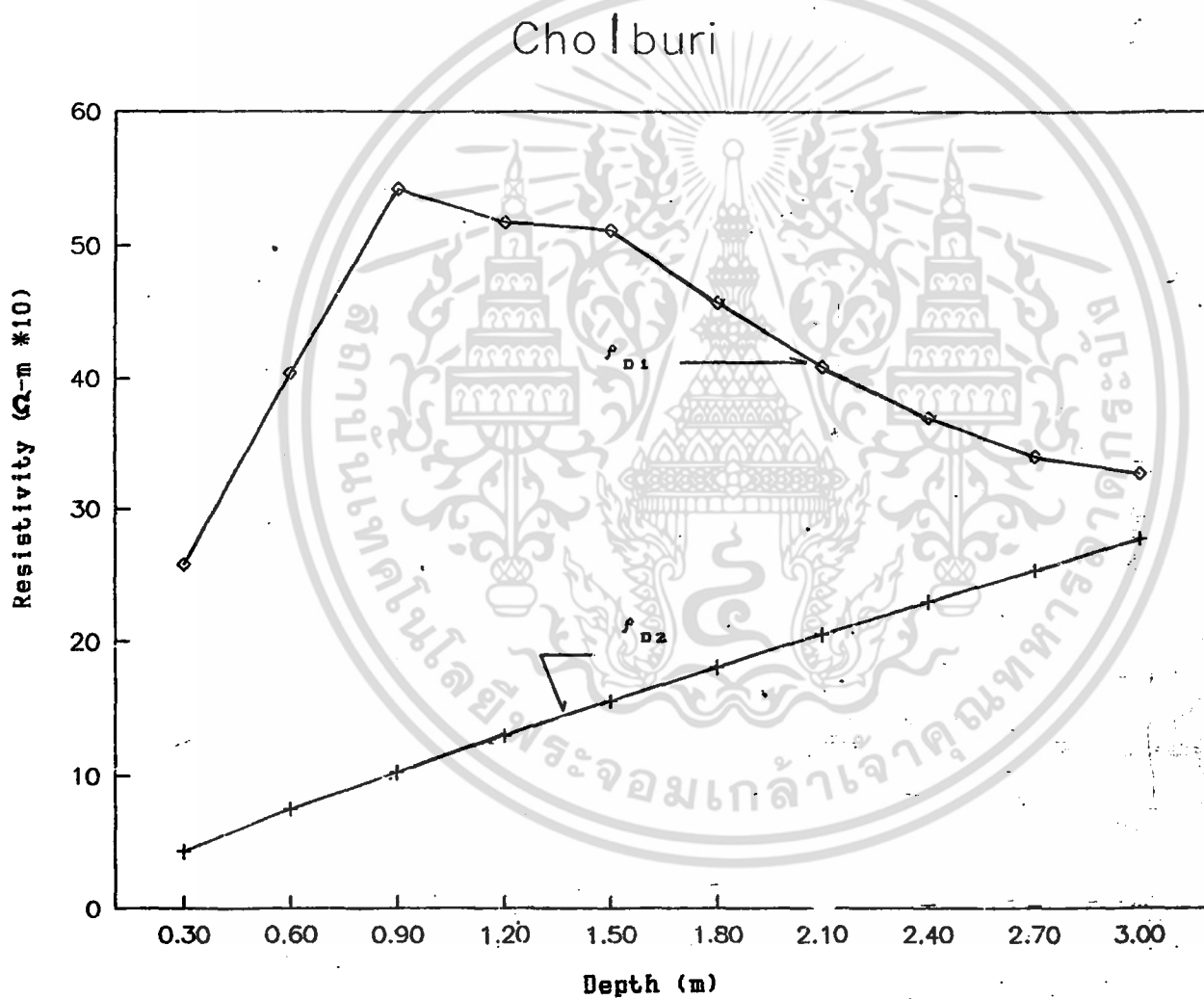
เมื่อ ρ_{D1} คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณจาก R_D

R_D คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้จากบรี: วมจะทำการที่ติดตั้งระบบต่อลงดิน

ρ_{D2} คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณจาก R_u

R_u คือ ค่าความต้านทานเฉลี่ยของดิน (จากตารางที่ 3.1) โดยเลือกลักษณะดินที่ใกล้เคียง

กับดินในบรี: วมจะทำการที่ติดตั้งระบบต่อลงดิน (ใช้ค่า 93 โอห์ม)



รูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบค่า ρ_{D1} ที่คำนวณจากค่า R_D กับ ค่า ρ_{D2} ที่คำนวณจากค่า R_u ที่จังหวัดสระบุรี

การเปรียบเทียบค่า ρ_{D1} ที่คำนวณจากค่า R_D กับ ค่า ρ_{D2} ที่คำนวณจากค่า R_u

จังหวัดนครปฐม

เมื่อ ρ_{D1} คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณจาก R_D

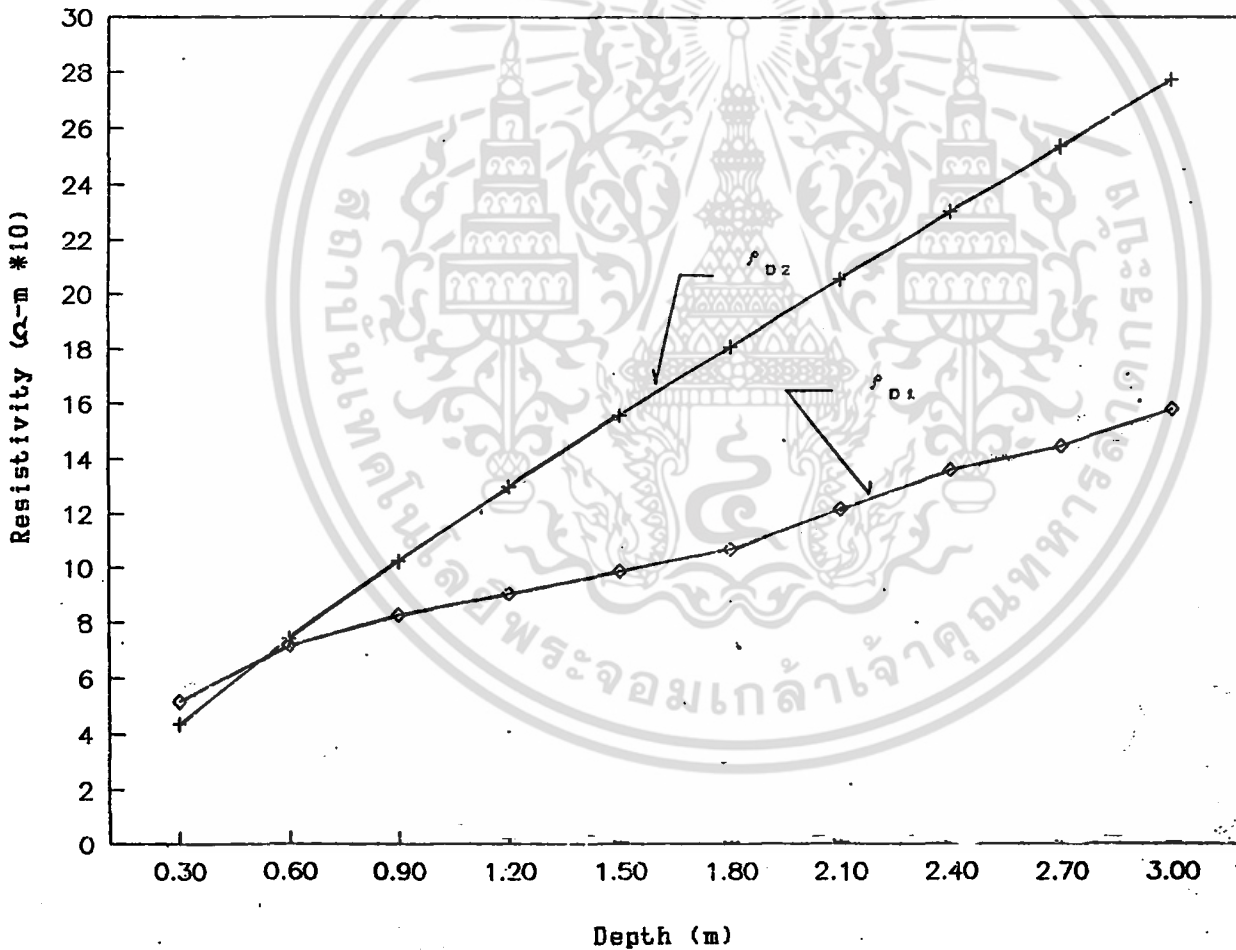
R_D คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้จากบริเวณทำการติดตั้งระบบต่อลงดิน

ρ_{D2} คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณจาก R_u

R_u คือ ค่าความต้านทานเฉลี่ยของดิน (จากตารางที่ 3.1) โดยเลือกลักษณะดินที่ใกล้เคียง

กับดินในบริเวณทำการติดตั้งระบบต่อลงดิน (ใช้ค่า 93 โอห์ม)

Nak on pratom



รูปที่ 6.13 แสดงการเปรียบเทียบค่า ρ_{D1} ที่คำนวณจากค่า R_D กับ ค่า ρ_{D2} ที่คำนวณจากค่า R_u ที่จังหวัดนครปฐม

6.4.2 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

ตารางที่ 6.4.2 แสดงผลของการหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน โดยวิธีต่างๆ

ข้อมูล

ความต้านทานจำเพาะของดิน = 100 ohm-m

ความลึกของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน = 0.5 m

รัศมีของตัวนำ = 5 mm

จำนวนของ mesh = n

ขนาดต่างๆของตะแกรงต่อลงดินแสดงในรูปที่ 3.2

EQ_1 = ค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 3.2 [8]

Sv = ค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการของ Sverak [6]

Sc = ค่าที่ได้จากการคำนวณในสมการของ Schwarz [7]

Fin = ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ Finite Element [8]

n	a	b	c	d	Ground Resis. ohms				% Error		
					EQ ₁	Sv	Sc	Fin	EQ ₁	Sv	Sc
<u>Square/Rectangular</u>											
4	20	20			2.77	2.96	2.56	2.63	5.3	12.5	-2.7
16	20	20			2.46	2.62	2.49	2.37	3.8	10.5	5.1
9	24	24			2.16	2.31	2.12	2.06	4.9	12.1	2.9
4	40	40			1.41	1.51	1.35	1.41	0	7.1	-4.3
16	40	40			1.25	1.34	1.29	1.25	0	7.2	3.2
64	40	40			1.15	1.23	1.23	1.15	0	7.0	6.1
16	60	60			0.84	0.90	0.88	0.86	-2.3	4.7	2.3
100	100	100			0.46	0.49	0.49	0.47	-2.1	4.3	4.3
144	120	120			0.38	0.40	0.41	0.39	-2.6	2.6	5.1
255	150	150			0.30	0.32	0.32	0.31	-3.2	3.2	3.2
16	80	5			1.80	2.53	1.42	1.64	9.8	54.3	-13.4
4	80	20			1.30	1.47	1.14	1.28	1.6	14.8	-10.9
16	80	20			1.17	1.33	1.11	1.13	3.5	17.7	-1.8
16	160	10			.92	1.29	0.75	0.87	5.7	48.3	-13.8
16	120	30			0.79	0.89	0.75	0.78	1.3	14.7	-2.6
16	240	15			0.62	0.87	0.52	0.60	3.3	45	-13.3
64	320	20			0.44	0.61	0.40	0.42	4.8	45.2	-4.8
144	480	30			0.28	0.39	0.26	0.27	3.7	44.4	-3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L Shaped

32	10	60	10	10	1.43	1.77	1.55	1.36	5.1	30.1	14.1
48	20	20	20	20	1.30	1.43	1.42	1.29	0.8	10.9	10.1
52	10	60	60	10	1.01	1.36	1.36	0.97	4.1	40.2	39.2
20	20	50	80	10	0.89	1.16	1.11	0.88	1.1	31.8	26.1
25	30	50	70	10	0.83	1.03	0.99	0.83	0	24.1	19.3
28	20	90	80	10	0.72	0.96	0.95	0.71	1.4	35.2	33.8
32	20	120	20	20	0.73	0.90	0.80	0.71	2.8	26.8	12.7
128	20	120	20	20	0.68	0.84	0.77	0.66	3.0	27.3	16.7
34	40	60	60	10	0.73	0.87	0.85	0.74	-1.4	17.6	14.9
36	20	80	80	20	0.67	0.84	0.84	0.66	1.5	27.3	27.3
51	30	70	70	30	0.60	0.70	0.70	0.60	0	16.7	16.7
56	20	120	20	80	0.54	0.66	0.57	0.53	1.9	24.5	7.5
88	70	40	30	60	0.48	0.52	0.53	0.50	-4.0	4.0	6.0
1	80	120	120	20	0.44	0.53	0.50	0.48	-8.3	10.4	4.2
34	80	120	120	20	0.37	0.44	0.44	0.38	-2.6	15.8	15.8
136	80	120	120	20	0.35	0.41	0.42	0.35	0	17.1	20.0

Triangular

20	40	20	1.98	2.29	2.12	1.93	2.6	18.7	9.8
40	80	20	1.27	1.57	1.36	1.21	5.0	29.8	12.4
63	90	30	1.03	1.26	1.16	1.01	2.0	24.8	14.9
30	100	50	0.78	0.91	0.88	0.82	-4.9	11.0	7.3
40	160	40	0.65	0.80	0.70	0.65	0	23.1	7.7
110	200	100	0.39	0.46	0.45	0.41	-4.9	12.2	9.8
45	150	50	0.62	0.75	0.69	0.63	-1.6	19.0	9.5
60	200	50	0.51	0.64	0.57	0.52	-1.9	23.1	9.6
60	100	100	0.54	0.60	0.60	0.58	-6.9	3.4	3.4
72	160	80	0.49	0.58	0.57	0.51	-3.9	13.7	11.8
144	320	80	0.32	0.40	0.36	0.33	-3.0	21.2	9.1

T-shaped

10	5	20	5	5	2.58	3.30	2.58	2.41	7.1	36.9	7.1
32	10	20	30	10	1.43	1.77	1.72	1.42	0.7	24.6	21.1
10	10	20	50	10	1.32	1.69	1.59	1.31	0.8	29.0	21.4
40	10	20	50	10	1.18	1.51	1.51	1.20	-1.7	25.8	25.8
30	20	40	40	20	0.76	0.93	0.91	0.74	2.7	25.7	23.0
1	20	40	60	20	0.85	1.05	0.97	0.90	-5.6	16.7	7.8
8	20	40	60	20	0.79	0.98	0.93	0.82	-3.7	19.5	13.4
32	20	40	60	20	0.73	0.90	0.89	0.74	-1.4	21.6	20.3
40	20	40	100	20	0.62	0.79	0.79	0.63	-1.6	25.4	25.4
44	20	60	80	20	0.58	0.75	0.75	0.59	-1.7	27.1	27.1
66	30	50	60	40	0.52	0.61	0.60	0.48	8.3	27.1	25.0
72	20	60	80	40	0.45	0.58	0.57	0.46	-2.2	26.1	23.9
108	60	20	80	60	0.42	0.47	0.47	0.44	-4.5	6.8	6.8
48	80	40	80	80	0.33	0.37	0.37	0.35	-5.7	5.7	5.7
8	100	200	300	100	0.17	0.24	0.25	0.18	-5.6	33.3	38.9

6.5 ผลการวิจัยการปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน

6.5.1 การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

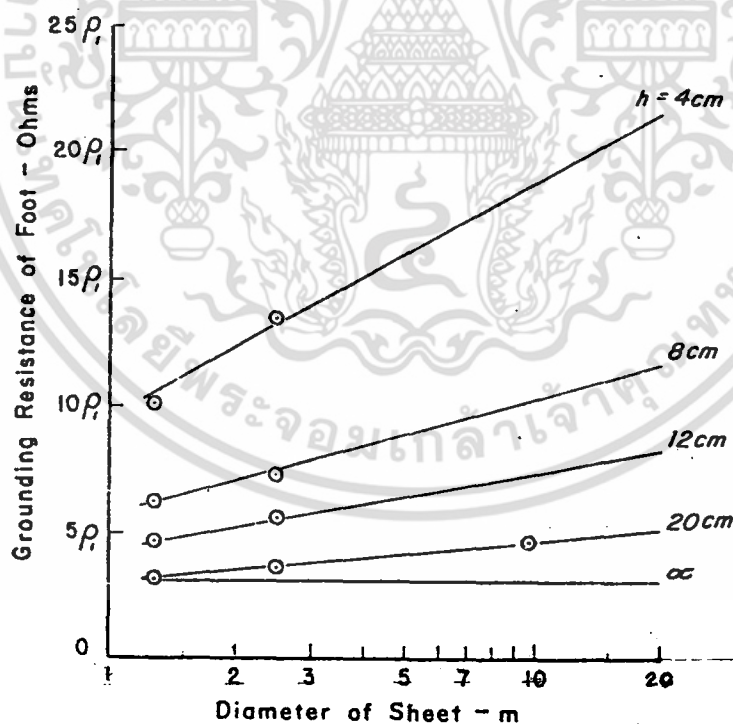
- โดยการเพิ่มความยาวของตัวนำต่อลงดิน

ใช้พิจารณาจากผลการคำนวณ, การออกแบบระบบต่อลงดินในหัวข้อ 6.1 ,6.2 ,6.3
จะพบว่า การเพิ่มความยาวตัวนำของตะแกรงต่อลงดินจะทำให้ระบบต่อลงดินมีค่าความต้านทาน
ต่ำลงและการเพิ่มความยาวตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน โดยการเพิ่มจำนวน mesh จะมีผลทำให้ค่า
ของ E_m มีค่าต่ำลง

6.5.2 การเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่า

- โดยใช้แผ่นพลาสติกวางเหนือตะแกรงต่อลงดิน

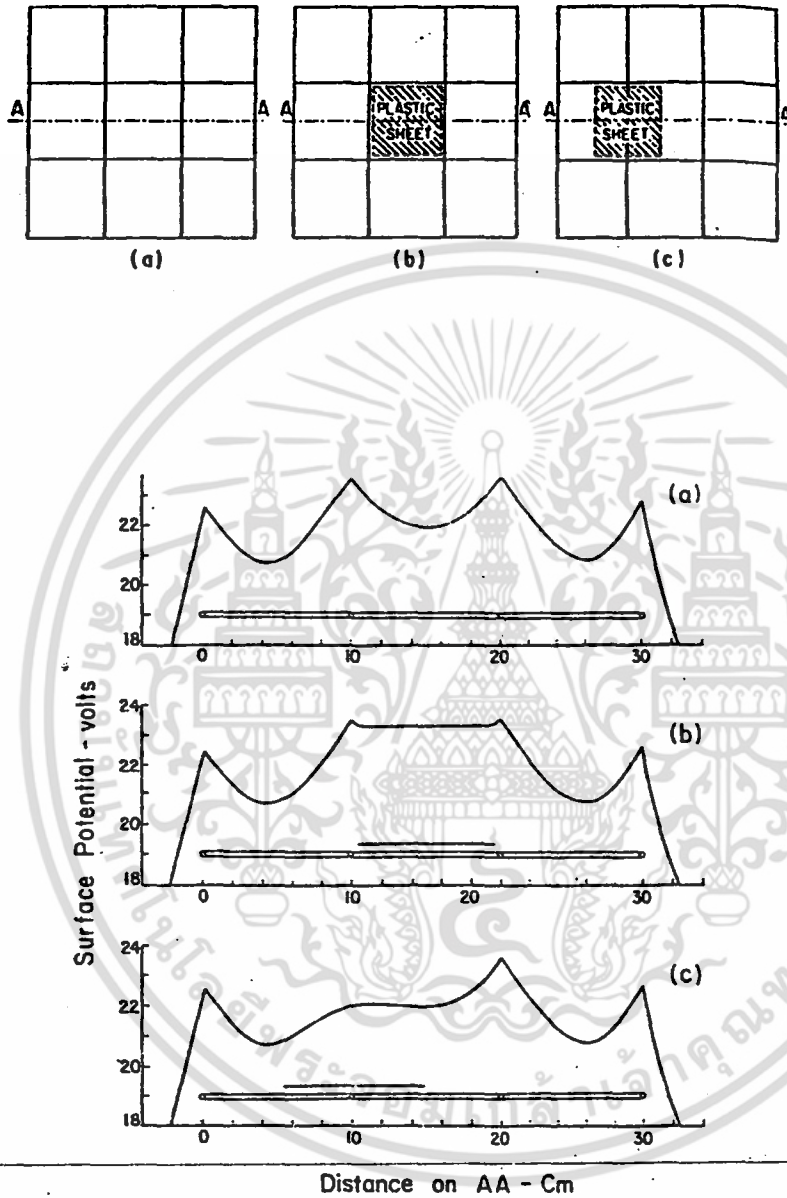
ค่าของความต้านทานที่เท่าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อรองด้วยแผ่นพลาสติกที่มีขนาดต่าง ๆ
กันแสดงในรูปของกราฟ



รูปที่ 6.14 แสดงค่าความต้านทานที่เท่าที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จาก Model test จาก[11]

ค่าความต่างศักย์ที่ผิวดินที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อวางแผ่นพลาสติกเหนือตะแกรงต่อลงดิน

ที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 6.15 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ที่ผิวดินเมื่อวางแผ่นพลาสติกลงบนตะ

แกรงต่อลงดินที่ตำแหน่งต่างๆ

(a) เมื่อไม่ได้วางแผ่นพลาสติก

(b) เมื่อวางแผ่นพลาสติกไว้ตรงกลางตะแกรง ดังรูป b

(c) เมื่อวางแผ่นพลาสติกไว้ในตำแหน่งดังรูป c

สรุป, วิเคราะห์ ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้น มีจุดประสงค์หลัก ก็เพื่อทำให้เกิดความปลอดภัยขึ้นขณะเกิดกระแสผิดปกติขึ้นในระบบ ซึ่งในการออกแบบระบบต่อลงดินที่ได้กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาถึงค่า E_m, E_u (ซึ่งเป็นค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินขณะเกิดกระแสผิดปกติ) ให้อยู่ในช่วงค่าที่ปลอดภัย ซึ่งปกติเมื่อค่า E_m อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยแล้วค่า E_u มักจะปลอดภัยด้วยเสมอ และการทำให้ระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยที่ได้นั้น นอกจากจะทำให้ค่า E_m, E_u อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยแล้ว ควรจะเลือกระบบต่อลงดินที่เหมาะสมกับลักษณะของความต้องการ, การใช้พลังงานไฟฟ้า และขนาดของพื้นที่ที่จะติดตั้งระบบต่อลงดิน เพื่อให้เกิดความปลอดภัยมากที่สุด และใช้ความยาวของตัวนำต่อลงดินสั้นที่สุด เพื่อก่อให้เกิดความปลอดภัยมากที่สุด ซึ่งการเลือกใช้ระบบต่อลงดินและวิธีการออกแบบที่เหมาะสมแล้วจะสามารถทำให้ออกแบบได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย

จากหลักการที่กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นว่า

ในกรณีพื้นที่ของระบบต่อลงดินมีขนาดไม่กว้างขวางนัก (สามารถใช้วิธีการออกแบบ ในหัวข้อ 2.2) ซึ่งเป็นการลองวางตะแกรง โดยประมาณระยะห่างระหว่างตัวนำ และคำนวณหาความยาว L ที่สั้นที่สุด จากนั้นทำการ เพิ่ม ลด L ให้เหมาะสม และคำนวณหาค่า E_m ต่ำสุดที่ก่อให้เกิดความปลอดภัย (เมื่อ E_m น้อยกว่าหรือเท่ากับ E_{touch})

ในกรณีพื้นที่ของระบบต่อลงดินมีขนาดกว้างขวางมาก (ควรจะใช้วิธีการออกแบบ ในหัวข้อ 2.3.3) โดยในขั้นแรกจะทำการประมาณจำนวน mesh แล้วคำนวณค่า L จากนั้นคำนวณค่า E_m, E_u ที่เกิดขึ้น แล้วทำการ เพิ่ม, ลด จำนวน mesh เป็น 2 เท่า ซึ่งจะทำให้ค่า E_m เปลี่ยนแปลงไปในอัตราส่วนที่กล่าวไว้ข้างต้น จนได้ค่า E_m น้อยกว่า E_{touch} ที่เหมาะสม จากวิธีการออกแบบทั้งสองวิธีสามารถเปรียบเทียบได้ดังนี้

แบบแรก

แบบหลัง

1. ค่า L ที่ได้จะพอดีทำให้เกิดความปลอดภัยทำให้ประหยัดค่า L กว่า

1. เปลี่ยนค่า L กว่าเพราะจะ เพิ่ม, ลด mesh ที่ละ 2 เท่า ค่า L จะไม่พอดีแต่จะมากกว่า ค่า $L_{50,70}$

2. เหมาะสำหรับการติดตั้งระบบต่อลงดินที่มีพื้นที่ไม่กว้างขวางมากนัก

2. เหมาะสำหรับการติดตั้งระบบต่อลงดินที่มีพื้นที่กว้างขวางมาก

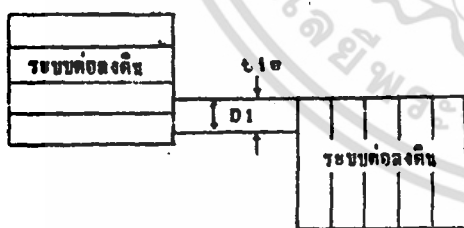
3. ซ้ำกว่า

3. เร็วกว่ามาก

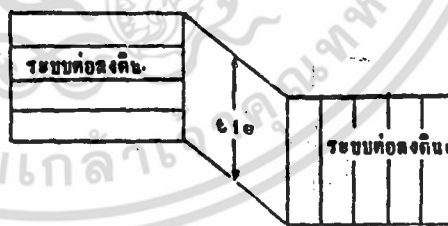
เมื่อพิจารณาจากหลักการและวิธีการออกแบบข้างต้น กับผลการคำนวณที่แสดงไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 6 แล้วจะเห็นว่าได้ผลเป็นอย่างดี ซึ่งจากผลการคำนวณจะพบว่าวิธีทั้งสองแบบจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และให้ความเชื่อถือได้เหมือนกัน เพราะใช้หลักการและทฤษฎีเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

1. ค่า E_m, E_u จะเป็นส่วนกลับ กับความยาว(L) การรวมระบบต่อลงดินของบริเวณต่างๆเข้าด้วยกันจะเป็นการเพิ่มค่า L จึงทำให้ค่า E_m, E_u ลดลง (ควรพิจารณาถึงผลดีและผลเสียของการรวมระบบต่อลงดินด้วย)
2. การนำเอา โครงเหล็กภายใต้อาคารและพื้นคอนกรีต เชื่อมต่อเข้ากับระบบต่อลงดิน จะช่วยลดความต้านทานของดินทำให้ลดความยาวของตัวนำ L ได้อีก
3. การลดระยะห่างระหว่างตัวนำ (D_1) และการเพิ่มจำนวนตัวนำในแนวขนาน (n) จะทำให้ค่า $L_{50,70}$ ลดลง
4. ค่าสัมประสิทธิ์ K_m ควรอยู่ในช่วง $0.5 < K_m < 1.5$
5. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะต้องใช้ค่าที่ถูกต้องของดินบริเวณนั้นๆ
6. ในกรณีที่มีค่า n มีค่ามากๆ ค่า K_1 ตูจาก Koch experiment [1]
7. การเชื่อมต่อระบบต่อลงดินสองชุดที่อยู่แยกกัน การเชื่อมต่อจะต้องมีระยะห่างระหว่างตัวนำไม่ควรเกินระยะ D_1 ดังรูปที่ 7.1 และไม่ควรเชื่อมต่อดังในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.1



รูปที่ 7.2

8. ความยาวของตัวนำ (L) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ค่ารากที่ 2 ของเวลาในการแก้ไขเหตุผิดปกติ (clearing time: t) จึงควรให้ t มีค่าน้อยๆ และตัดกระแสได้อย่างรวดเร็ว ค่ากระแส

ผลที่ควรถูกตรวจวัดได้ โดยอุปกรณ์ป้องกัน ควรมีขนาดดังนี้

$$I < \frac{(1000+1.5K_m)0.0009L}{K_m K_{1.5}}$$

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยสำคัญของระบบต่อลงดิน

ความต้านทานจำเพาะของดิน

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดิน

จากผลการวัดที่โรงงานปูนซีเมนต์ TPI จังหวัดสระบุรี

พบว่า ค่าความต้านทานของดินจะแปรผกผันกับความลึกที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะแปรตามความลึก โดยสังเกตได้ว่า ในช่วงแรกค่าความต้านทานของดินที่วัดได้จะลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของความยาวแท่งตัวนำซึ่งที่ระดับความลึกไม่มากนัก (ประมาณ 60 ซม.) ปริมาณความชื้นของดินจะไม่มากนัก และเมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานของดินก็จะลดลงอีก เนื่องจากบริเวณที่ทำการทดลองเป็นบริเวณเชิงเขา ระดับน้ำใต้ดินจึงค่อนข้างลึก แต่ที่ระดับหนึ่งดินจะมีความชื้นพอสมควร ซึ่งความชื้นของดินก็เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่ทำให้ ค่าความต้านทานของดินมีค่า เปลี่ยนแปลงไป แต่เนื่องจากดินในบริเวณนี้มีลักษณะดินเป็นดินเหนียวและบางบริเวณจะมีหินปูนมาก ดังนั้น ค่าความต้านทานของดินจึงไม่ต่ำนัก ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินค่อนข้างสูง

จากผลการวัดที่นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี

พบว่า ในช่วง 0.9 เมตรแรกค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จะเพิ่มขึ้นตามความลึก ในขณะที่ค่าความต้านทานจะลดลง แต่ที่ระดับความลึก 0.9-3.0 เมตร ค่าทั้งสองจะแปรผกผันกับความลึก เนื่องจากเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย มีความเป็นกรดจัด-กรดแก่ (PH=4.5-5.5) ที่ระดับดินชั้นบนจะมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าดินชั้นล่างและมีการระบายน้ำที่ดี มีระดับน้ำใต้ดินไม่ลึก และอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล ประกอบกับดินมีแร่ธาตุและสารละลายจำพวกเกลือเป็นจำนวนมากทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำและค่าความต้านทานจำเพาะมีขนาดไม่สูงนัก

จากผลการวัดที่โรงพยาบาลสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

พบว่า ค่าความต้านทานของดิน จะแปรผกผันกับความลึก ขณะที่ค่าความต้านทานจำเพาะจะแปรตามความลึก จะสังเกตได้ว่าค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำ เนื่องจาก ลักษณะดินเป็นดินเหนียวมีการระบายน้ำค่อนข้างต่ำ มีระดับน้ำใต้ดินไม่ลึก ประกอบกับในดิน มีส่วนผสมของ แร่จำพวกเหล็ก

และแมงกานีสในดินชั้นล่าง ทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำ และค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าต่ำด้วย

จากผลการวัดที่อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่

พบว่า ค่าความต้านทานมีค่าสูงมากไม่สามารถวัดค่าความต้านทานได้จาก วิธี Driven Rod ซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีนี้ แต่จะสามารถหาได้จากวิธี Four Point Test เนื่องจาก สภาพที่ทำการวัดนี้อยู่ในบริเวณเชิงเขาที่ค่อนข้างสูง มีส่วนผสมของหินจำนวนมาก และมีระดับน้ำใต้ดินที่ลึกมาก

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_D จากสมการที่ 5.3

$$\rho_D = \frac{2 L R_D}{\ln 8L/d - 1}$$

จะพบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะมีส่วนแปรตามความลึก เนื่องจากค่าความลึกพื้นที่ของ L และ $\ln L$ มีค่าแตกต่างกันมาก

จากผลการวิเคราะห์ที่ตั้งกล่าวมาจะสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดในประเทศไทยส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจาก

1. ชนิดและคุณสมบัติของดิน
2. ปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดิน
3. ปริมาณแร่ธาตุและสารเคมีในดิน
4. ความลึก

ซึ่งปัจจัยทั้ง 4 จะมีความเกี่ยวเนื่องกัน แต่จากการวัดค่าความต้านทานในบริเวณต่างๆ พอจะสรุปได้ว่า ในชนิดและคุณสมบัติของดิน ดินเหนียว ดินร่วนปนทราย ดินทราย จะมีค่าความต้านทานความต้านทานจำเพาะ เรียงจากน้อยไปหามาก และปริมาณความชื้นกับระดับน้ำใต้ดินจะมีผลต่อค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะมาก โดยเฉพาะในบริเวณที่ราบลุ่มและน้ำท่วมถึง นอกจากนี้ปริมาณแร่ธาตุ และสารเคมีในดิน ความลึก ก็จะมีผลต่อค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะมากพอสมควร

และเมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบระหว่าง ค่า ρ_D ที่คำนวณจาก R_D ที่วัดได้จากบริเวณที่ต้องการติดตั้งระบบต่อลงดิน กับค่า ρ_D ที่คำนวณจากการใช้ค่าความต้านทานเฉลี่ยในตารางที่ 3.1 ในกราฟรูปที่ 6.11 - 6.13 จะพบว่า มีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องมาจากการคำนวณค่า ρ_D โดยใช้

ค่าความต้านทานเฉลี่ยจากตารางที่ 3.1 จะแปรตามความลึกเท่านั้น (พิจารณา สมการที่ 5.3) ในขณะที่ค่า ρ_0 จะมีองค์ประกอบของ ชนิดและคุณสมบัติของดิน ปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดิน ปริมาณแร่ธาตุและสารเคมีในดิน และความลึกมาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งนอกจากองค์ประกอบดังกล่าวแล้ว ลักษณะการสะสมตัวของชั้นดินก็จะมีผลเป็นอย่างมากต่อค่าความต้านทานที่วัดได้ เนื่องจากดินในบริเวณต่างๆจะมีการสะสมตัวและชนิดของชั้นดินที่แตกต่างกัน

ดังนั้น การนำเอาค่าความต้านทานเฉลี่ยของดินมาคำนวณค่า ρ_0 เพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จะทำให้เกิดความผิดพลาดมาก ถึงแม้ว่าจะเลือกค่าความต้านทานเฉลี่ยของชนิดของดินได้ใกล้เคียงกับลักษณะของดินในบริเวณที่จะติดตั้งระบบต่อลงดินก็ตาม ดังนั้น เพื่อให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความผิดพลาดน้อยลง จึงควรจะใช้ค่า ρ_0 ที่คำนวณจาก ค่าความต้านทานที่วัดได้ในบริเวณที่จะทำการติดตั้งระบบต่อลงดินนั้นๆ

ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณในตารางที่ 6.4.2 พบว่าเมื่อรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีการแปลงไปจากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าความต้านทานของตะแกรงตัวนำต่อลงดิน R_{Σ} ที่คำนวณได้จะเปลี่ยนแปลงไป และการใช้สมการของ Sverak และ สมการของ Schwarz ในการหาค่า R_{Σ} จะให้ค่าที่ถูกต้องในกรณีที่มีรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่จะให้ค่าที่ผิดพลาดในกรณีที่ตะแกรงต่อลงดินมีลักษณะเป็นรูปตัว "T" รูปตัว "L", รูปสามเหลี่ยม ซึ่งอาจมากถึง 40% ในบางกรณี

พิจารณาสมาการหาค่า R_{Σ} ของ Severak ในสมการที่ 3.1

$$R_{\Sigma} = \rho \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20A}} \right) \right]$$

ค่า R_{Σ} จะขึ้นอยู่กับค่า L_c และค่า A (เมื่อ h, ρ คงที่) เมื่อรูปร่างของระบบต่อลงดินมีการเปลี่ยนแปลงไปจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะทำให้อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงในขนาดของพื้นที่ (A) กับความยาวของเส้นรอบรูป (L_c) มีขนาดไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นการนำแฟคเตอร์ของ (\sqrt{A}/L_c) เข้าไปร่วมกับสมการเดิมของ Sverak ทำให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินมีค่าถูกต้องยิ่งขึ้น ดังในสมการที่ 3.2 แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ 3.2 ก็จะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนักในกรณีที่รูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีลักษณะเป็น รูปตัว "V", รูปตัว "U", รูปตัว "O"

การปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน

การปรับปรุงระบบต่อลงดินเพื่อเพิ่มค่าการปลอดภัยของระบบต่อลงดิน สามารถทำได้อย่าง
ง่าย ๆ โดย - การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

- การเพิ่มค่าความต้านทานที่เข้า

การลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

จากผลการคำนวณในหัวข้อที่ 6.2 จะพบว่าไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มค่าความยาวตัวนำ L ใน
บางบริเวณที่คาดว่าจะมีค่าความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินสูงกว่าที่อื่นๆ
เช่น ในสถานีไฟฟ้าย่อยของโรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ หรือจากผลการคำนวณในหัวข้อ 6.3 ที่
มีการเพิ่มค่าความยาวตัวนำ L โดยการเพิ่มจำนวนช่องของตะแกรงตัวนำต่อลงดินให้มากขึ้น ล้วน
แล้วแต่ทำให้ ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน R_{Σ} มีค่าต่ำลงทั้งสิ้น

และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน R_{Σ} ทั้งจากสมการของ Severak และ
Schwarz แล้วก็จะพบว่า เมื่อค่าความยาวตัวนำ L เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า R_{Σ} มีค่าลดลงและมี
ผลทำให้ค่า GPR มีค่าลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การที่ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่า
ต่ำไม่ได้หมายความว่าระบบต่อลงดินจะให้ค่าความปลอดภัยเพียงพอ ทั้งนี้ต้องพิจารณาด้วยว่า
ค่า GPR และ E_m ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่า E_{touch} และค่า E_{step} ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่า E_{step}
หรือไม่

นอกจากการเพิ่มความยาวของตัวนำต่อลงดินแล้ว การใช้สารเคมีก็เป็นอีกวิธีที่สามารถทำได้
ซึ่งจะต้องคำนึงถึงการกัดกร่อนของสารเคมีที่มีผลต่อตัวนำต่อลงดิน และการเติมสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ
อันเนื่องมาจากการชะล้างจากน้ำตามธรรมชาติ และการลดลงของสารเคมีจะทำให้ค่าความ
ต้านทานของระบบต่อลงดินกลับสูงขึ้นมาดังเดิม ซึ่งผลจากการกัดกร่อนของสารเคมีที่มีต่อตัวนำและ
การลดลงของสารเคมีนั่นเอง จึงทำให้การใช้สารเคมี เป็นวิธีเลือกวิธีสุดท้ายที่จะใช้ในการลดค่า
ความต้านทานของระบบต่อลงดินแต่อย่างไรก็ตามการเติมสารเคมีมีข้อดีคือ ถ้ามีการเติมสารเคมี
อย่างสม่ำเสมอ จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความ
ชื้นของดินที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

การเพิ่มค่าความต้านทานที่เข้า

เมื่อพิจารณาค่า ความต้านทานของเท้าที่รองด้วยแผ่นพลาสติกหลายๆขนาด ที่ความลึกต่างๆ ใน
รูปที่ 6.14 จะพบว่าความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานของเท้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของ
แผ่นพลาสติกมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับขนาดความลึกด้วย ซึ่งผลของการวางแผ่นพลาสติก
ที่บนตะแกรงตัวนำต่อลงดิน นอกจากจะทำให้ค่าความต้านทานของเท้าเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ค่า

ควรที่จะใช้วิธีอื่นไปอีกร้อย และ เมื่อระบบตะแกรงตัวนำตกลงดิน อย่างเหมาะสมในรูปที่ 6.15b จะสามารถลด Mesh Voltage ที่เกิดขึ้นบนตะแกรงตกลงดิน ทำให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Mesh Voltage คือ ค่าสูงสุดของ touch Voltage ที่เกิดขึ้นบนตะแกรงตัวนำตกลงดินขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดิน) แต่ถ้าวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมดังในรูป 6.15c ก็อาจทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยขึ้นได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามการวางแผนพลาสติกในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยให้ระบบส่งลงดินมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นทั้งในแง่ของการเพิ่มความต้านทานที่เท้าและการลดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนผิวดินในตำแหน่งเหนือแผ่นพลาสติก ซึ่งจะช่วยให้มากในขณะที่มีความต้านทานของหินกรวด, พื้นซีเมนต์ลดลงอันเนื่องมาจากฝนตก อีกทั้งแผ่นพลาสติกที่ใช้เป็นวัสดุที่สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก



เอกสารอ้างอิง

1. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. ANSI/IEEE std.80-1986
2. IEEE Guide for Safety in Substation Grounding std80-1976
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 Industrial 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 Above a Ground Grid, Part I-How Good is the Present IEEE Method? 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.
8. BALDEV THAPAR AND PARTNER , " Evaluation of Ground Resistance of A Grounding Grid of any shape," IEEE Transaction on power delivery Vol.6, No.2, April 1991.
9. COPPERWELD STEEL," Practical grounding ," 1972
10. JAME G.BIDDLE COMPANY,"Getting Down to Earth,"MANUAL ON EARTH RESISTANCE TESTING, 1970.
11. B.THAPAR, "Increasing of Ground Resistance of Human Foot in Substation yard"IEEE Transaction on power delivery,Vol.4, No3, July 1989.
12. C. J. BLATTNER, " Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Tests," IEEE Transaction on power apparatus and system, Vol.PAS-101, No.8, August 1982.

ตัวอย่างที่ 21 (ประวัติผู้เขียน)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายอลงกรณ์ พรหมสวัสดิ์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 21 กันยายน 2510
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2532
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	- การออกแบบระบบต่อลงดินในโรงงานอุตสาหกรรม - ระบบต่อลงดินของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่าง ๆ - การวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน
รางวัลหรือทุนที่เคยได้รับ	-
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาชีพปัจจุบัน	วิศวกรไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบต่อลงดินของ สถานี่ไฟฟ้าย่อยและบริเวณอื่น ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรม

ศูนย์ บงชงวิจัย
ของคณะ พหุภชชาวรณ์
ภาควิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Grounding System of Substation and other areas in Industrial Plants)

คำตัยย่อ
การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานี่ไฟฟ้าย่อยและบริเวณอื่น ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีระบบต่อลงดินที่มีความเชื่อถือได้สูงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงาน ในบทความวิจัยฉบับนี้จะไ้ระแวงดัวว่าต่อลงดินทั้งเป็นแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ที่ปราศจากตัวนำต่อลงดินแนวตั้ง ในการออกแบบจะหาความยาวของตัวนำที่นำมาทำเป็นตะแวงรหส์สั้นที่สุด และมีความปลอดภัยมากที่สุด โดยหลักการคำนวณนี้อ้างอิงมาจาก IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING NSI-IEEE Std 80-1986 โดยได้รับการปรับปรุงแก้ไขให้มีความถูกต้อง และไ้ถือได้สูง การคำนวณทั้งหมดนี้เป็นแบบสุตรสำเร็จ (Close form) ซึ่งง่ายต่อการเข้าใจ และสะดวกต่อการใช้งาน โดยใช้ข้อมูลที่เหมาะสมกับประเทศไทยเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะต้องมีสถานี่ไฟฟ้าย่อย เพื่อรับไฟฟ้าแรงดันสูงและแปลงแรงดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงงาน กรณีที่เครื่องจักรไฟฟ้าภายในโรงงานต้องการพลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก การส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปภายในโรงงานก็จะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยภายในโรงงาน ดังนั้นในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสถานี่ไฟฟ้าย่อยของโรงงานจะรับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้ง 3 เฟสและจ่ายไปยังโรงงาน เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในบริเวณสถานี่ไฟฟ้าย่อยหรือในบริเวณโรงงาน ก็จะทำให้ศักดาไฟฟ้าที่จุดนั้นมีค่าสูงชัน (GPR) และกระแสลัดวงจรจะไหลจากจุดเกิดเหตุไปยังขั้ว neutral ของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานี่ไฟฟ้าย่อยโดยผ่านทางผิวดิน ดังนั้นภายในโรงงานจึงต้องมีระบบต่อลงดินเพื่อให้เป็นทางผ่านของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นแทนผิวดินเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

ในบทความวิจัยฉบับนี้จะไ้ระบบต่อลงดินที่ไ้ระแวงรหส์สั้น (Ground Grid) ที่ปราศจากแท่งตัวนำแนวตั้ง (Ground Rod)

การป้องกันอันตรายเนื่องมาจากกาเกิดความต่างศักย์ของผิวดินขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินทำได้หลายทาง

1. ไ้ระบบต่อลงดินเป็นทางเดินของกระแสลัดวงจรแทนผิวดิน
2. ลดกระแสลัดวงจรลงดินโดยติดตั้ง Resistance Grounding ให้มากกว่า Solid Grounding ที่ Neutral ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. โดยการแยกระบบต่อลงดินของสถานี่ไฟฟ้าย่อยในโรงงานออกจากระบบต่อลงดินของโรงงาน ในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดินในสถานี่ไฟฟ้าย่อย ค่า GPR ของสถานี่ไฟฟ้าย่อยจะสูงชัน ในขณะที่ศักดาของระบบต่อลงดินในโรงงานยังคงเหมือนเดิม เพราะมีระบบต่อลงดินที่แยกออกจากกัน
4. โดยการรวมระบบต่อลงดินของสถานี่ไฟฟ้าย่อยในโรงงานกับ

GPR : Grid Potential Rise คือศักดาของระบบต่อลงดินที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระแสลัดปกติ เมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระแวงรหส์สั้น ตามปกติแล้วขณะที่ไม่เกิดกระแสลัดปกติ ศักดาของระบบต่อลงดินจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ และถือว่าเท่ากับศักดาของดินที่ระแวงรหส์สั้น แต่ขณะเกิดกระแสลัดปกติศักดาของระบบต่อลงดินจะสูงชันมากเมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระแวงรหส์สั้น

ระบบต่อลงดินของบริเวณโรงงานเข้าด้วยกัน โดยออกแบบร่วมกัน

รูปแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (พิจารณา รูปที่ 1)

1. แรงดันสัมผัส (Touch Voltage: E_{touch}) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาพื้นของระบบต่อลงดิน (GPR) ขณะเกิดกระแสลัดปกติเทียบกับศักดาพื้นผิวดินแห่งที่คนยืนขณะไ้เอามือจับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

2. แรงดันย่างก้าว (Step Voltage: E_{step}) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาพื้นผิวสองจุดที่เท้าคนก้าวเดินขณะเกิดกระแสลัดปกติโดยไม่มีส่วนใดในร่างกายสัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

ในการออกแบบระบบต่อลงดินในโรงงานจะต้องให้ค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันย่างก้าวอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย โดยให้ $E_m < E_{touch}$ และ $E_s < E_{step}$

E_m : Mesh Voltage คือ ค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแวงรหส์สั้นของระบบต่อลงดิน

E_s : Max Step Voltage คือ ค่าแรงดันย่างก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในตะแวงรหส์สั้นของระบบต่อลงดิน

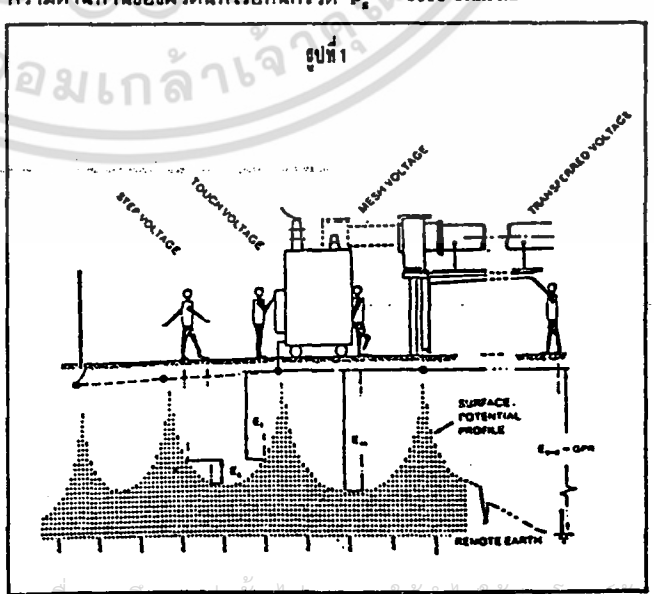
การแยกระบบต่อลงดินของสถานี่ไฟฟ้าย่อยออกจากระบบต่อลงดินของโรงงาน

เหมาะสำหรับโรงงานที่ไ้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไม่สูงนักเพราะในบริเวณสถานี่ไฟฟ้าย่อยเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูงกว่าในบริเวณโรงงานมาก จึงควรแยกระบบต่อลงออกจากกันโดยด้อยระวังไม่ให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างระบบต่อลงดินทั้งสองส่วนที่อาจเกิดจาก ท่อนำสาย โครงของ busduct busway

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

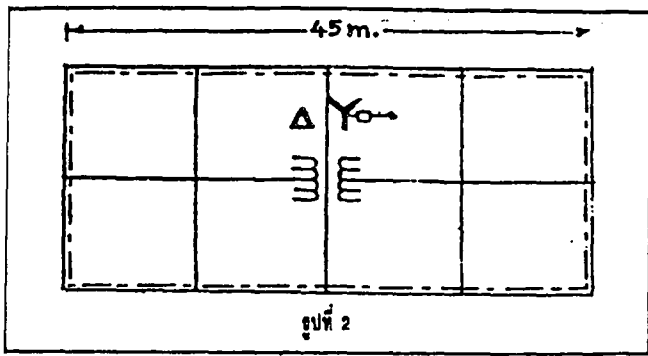
ความต้านทานของผิวดิน $\rho = 30 \text{ ohm-m}$

ความต้านทานของผิวดินที่โรยหินกรวด $\rho_s = 3000 \text{ ohm-m}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2

ความหนาของพื้นทึบกรวด $h_p = 0.1$ m.
 ความลึกของตะแกรงตัวนำ $h = 0.5$ m.
 ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $D_p = 0.0138$ m.
 ขนาดของกระแสไฟคิกสูงสุด $I_g = 8000$ A.
 เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันแก้ไขขณะผิดปกติ (ขึ้นกับการออกแบบ) $t = 0.1$ s.

เริ่มจากการล่องวางตะแกรงตัวนำโดยประมาณระยะห่างของตัวนำอย่างคร่าว ๆ ดังรูปที่ 2 จากนั้น หาความยาวของตัวนำ $L_{50,70}$ คือ ความยาวของตัวนำสั้นที่สุดที่ให้ความปลอดภัยมากที่สุดกับคนน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50.70 กิโลกรัม ตามลำดับ

$$L_{50,70} = \frac{(K_m K_1 p I_g \sqrt{t})}{((116, 157) + (0.174, 0.235) C_p (n_p, k) p_p)} \quad (1)$$

โดยที่ $K_1 = 0.656 + 0.172 \cdot n$

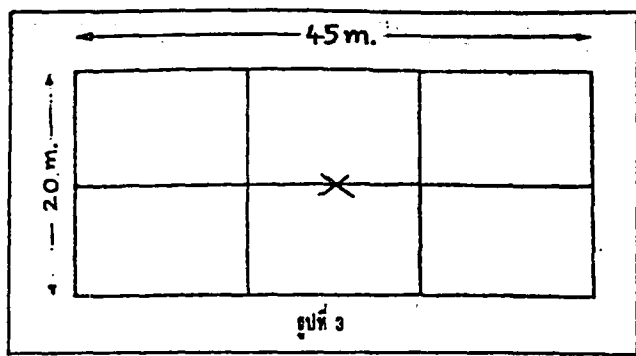
$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{D1^2 + (D1 + 2h)^2}{16hD2} - \frac{h}{4D2} \right] + \frac{K_{11}}{Kh} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad n = \text{ตัวนำในแนวขนาน}$$

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

$$C_p (n_p, k) = 1 - a \left[\frac{1 - (p/p_p)}{2h_p + a} \right]$$

หาค่า L_{50} โดยแทนค่าจากข้อมูลข้างต้นได้ = 208.17 m. ซึ่งเป็นความยาวที่ปลอดภัยเพียงพอ แต่จากการประมาณข้างต้นในรูปที่ 2 ได้ $L = 235$ m. เราสามารถลด L ได้ดังรูป 3 จะได้ $L_{50} = 215$ m. ซึ่งมากพอสำหรับความปลอดภัย และขยับตะแกรงให้เหมาะสมในบริเวณที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงติดตั้งอยู่ หรือถ้าค่า L_{50} มีค่ามากกว่าค่า L แล้วจะต้องเพิ่มความยาวตัวนำเข้าไป ให้ค่า $L = L_{50}$



รูปที่ 3

คำนวณค่า $E_m, E_{touch}, E_s, E_{step}$

$$E_m = \frac{(pK_m K_1 I_g)}{L} \quad (2)$$

$$E_{touch 50,70} = \frac{(1000 + 1.5C_p (n_p, k) p_p) (0.116, 0.157)}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

$$E_s = \frac{(pK_s K_1 I_g)}{L} \quad (4)$$

โดยที่
$$K_s = 1 \left[\frac{1}{\pi 2h} + \frac{1}{D1+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^n - 3) \right]$$

 : สำหรับ $0.25m < h < 2.5 m$

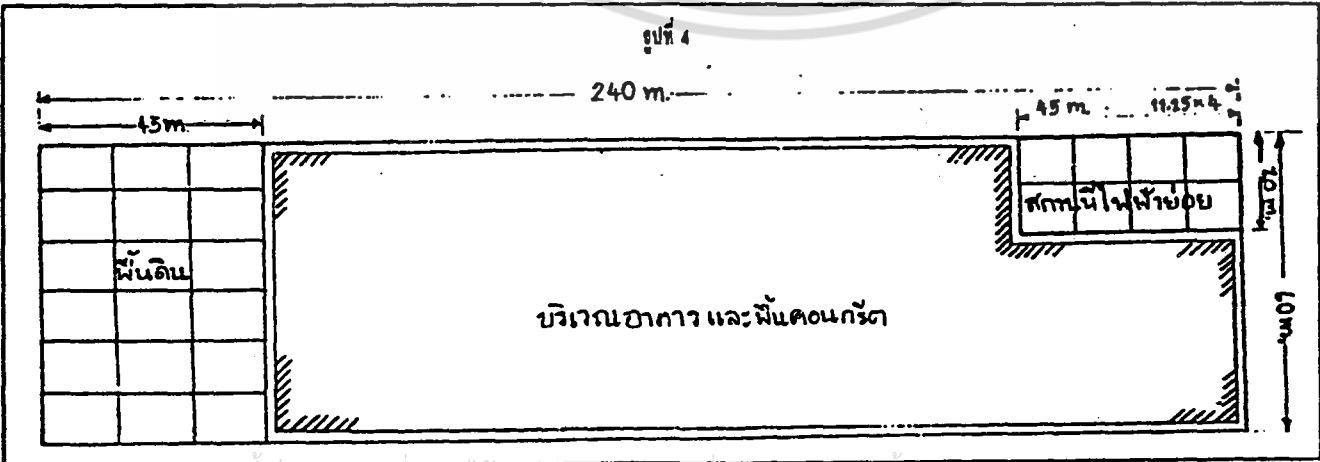
$$E_{step 50,70} = \frac{(1000 + 5C_p (n_p, k) p_p) (0.116, 0.157)}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

เมื่อแทนด้วยข้อมูลข้างต้น จะได้ $E_m = 1451.44$ $E_{touch} = 1451.44$ $E_s = 492.72$ $E_{step} = 4705.28$
 ค่าของ E_m, E_{touch} ที่เท่ากันหมายถึง ค่าที่พอดีปลอดภัยเมื่อใช้ L จากที่คำนวณได้ซึ่งเมื่อค่าของ E_m อยู่ในค่าที่ปลอดภัย ค่าของ E_s มักปลอดภัยด้วยเสมอ

บริเวณต่าง ๆ ที่เหลือ ก็ใช้หลักการเช่นเดียวกัน เพียงแต่ใช้ค่า P_p, I_g ที่เหมาะสม ยกเว้นบริเวณอาคารหรือพื้นคอนกรีตโครงเหล็ก

การรวมระบบต่อของดินของสถานนีไฟฟ้าชั่กกับระบบต่อของดินบริเวณอื่น ๆ ในโรงงานเหมาะสำหรับโรงงานที่ต่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปชั่เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์จำนวนมากในบริเวณโรงงาน เพราะเมื่อเกิดการลัดวงจรของดินจะเกิดกระแสลัดวงจรจำนวนมาก พิจารณารูป 4 ซึ่งแยกส่วนต่าง ๆ ของโรงงานออกเป็นสามส่วนคือ

1. สถานนีไฟฟ้าชั่ก
2. อาคารหรือพื้นคอนกรีตที่มีการวางโครงเหล็ก พ.ท.ภายในส่วนนี้



รูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง
 วันที่ 6 สิงหาคม 2534 วิศวกรรมสาร 69

ไม่ต้องคำนึงถึง E_m, E_s เพราะมีโครงเหล็กวางบนผิวดินอยู่แล้ว เพียงแต่วางตัวนำโดยรอบ ก็เพียงพอ

3. พื้นดินที่ไม่ได้โรยหินกรวด

การหาระยะต่อลงดินในแบบนี้ เริ่มจากการประมาณระยะห่างของตัวนำ
) บนพ.ท.ทั้งหมดของโรงงาน จาก (1) จะได้ $L_{รวม} = 1165.4$ m (ใช้ค่า
 $n=30, D1=10$)

$$L_{รวม} = L1 + L2 + L3$$

$$L1 = 215 : \text{จากสถานีไฟฟ้าย่อย}$$

$$L2 = 445 : (150 + 195 + 80 + 40) : \text{จากอาคารและพื้นที่คอนกรีต}$$

$$L3 = 495 : ((45 \cdot 7) + (60 \cdot 3)) : \text{จากพื้นที่ดินที่ไม่ได้โรยหินกรวด}$$

$L_{รวม} = 1155$ ยังขาดอีก 10.4 m ซึ่งเราสามารถเดินเข้าไปยังที่ใดก็ได้
 ความยาวที่เหมาะสม เราเลือกเดินที่สถานีไฟฟ้าย่อย ดังนั้นขณะนี้ $L_{รวม} =$
 1175 ซึ่งมากพอ

คำนวณหาค่า $E_m, E_{touch}, E_s, E_{step}$ จาก (2), (3), (4), (5) สามลำดับ
 จะได้ $E_m = 383.33$

$$E_{touch} = 383.33$$

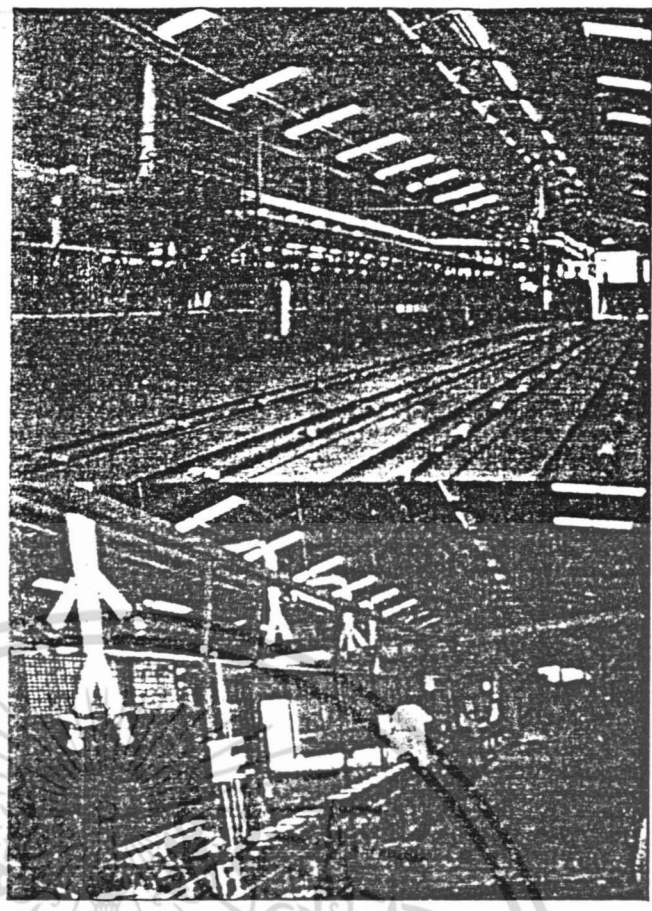
$$E_s = 145.35$$

$$E_{step} = 432.85$$

ตัวอย่าง การออกแบบที่สมบูรณ์ได้แสดงไว้ในบทแรกข้างท้าย ซึ่งจะเห็นว่า
 ากหลักการที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

1. ค่า E_m, E_s จะเป็นส่วนกลับกับความยาว (L) การรวมระยะต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยกับโรงงานเป็นการเพิ่มค่า L จึงทำให้ค่า E_m, E_s ลดลง
2. ถ้านำเอาโครงเหล็กภายใต้อาคารและพื้นที่คอนกรีตเชื่อมคือเข้ากับระบบต่อลงดินจะช่วยลด ค.ต.ท.ของดินทำให้ลดความยาวของตัวนำ L ได้อีก
3. การลดระยะห่างของตัวนำ (D1) และการเพิ่มจำนวนตัวนำในแนวระนาบ (n) จะทำให้ค่า L ลดลง
4. ค่าสัมประสิทธิ์ K_m ควรอยู่ในช่วง $0.5 < K_m < 1.5$
5. ในกรณีค่า n มีค่ามาก ๆ ค่า K_1 ดูจาก Koch experiments (1, Appendix A)
6. ค่าความต้านทานของดินจะต้องใช้ค่าที่ถูกต้องของดินบริเวณนั้น ๆ



7. ความยาวของตัวนำ (L) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ค่ารากที่ 2 ของ
 เวลาในการแก้ไขเหตุผิดปกติ (clearing time : t) จึงควรให้มีค่าน้อย ๆ และ
 ตัดกระแสได้อย่างรวดเร็ว ค่ากระแสที่ควรถูกตรวจวัดได้โดยอุปกรณ์ป้องกัน
 ความมีขนาดดังนี้

$$I < \frac{(1000 + 1.5p) \cdot 0.0009L}{K_m K_P}$$

การเชื่อมต่อระบบต่อลงดินสองชุดที่อยู่แยกกัน การเชื่อมต่อจะต้องมี
 ระยะห่างระหว่างตัวนำไม่ควรเกินระยะ D1 ดังรูป 5 ข.

ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินและศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนตะแกรง
 คำนวณได้จาก

$$R = \frac{\rho}{L} \left[\ln(10L) + 1.6 \left[\frac{L}{\sqrt{A}} \right] - 5.6 \right] : A = ft^2$$

ค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มขณะเกิดกระแสผิดปกติ (GPR)

คำนวณได้จาก

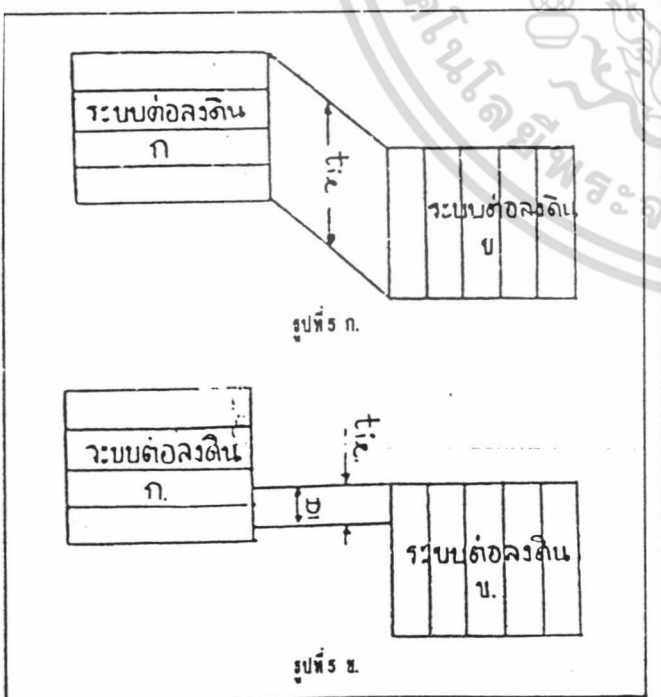
$$E = I \cdot R$$

สรุป

ในการออกแบบระบบต่อลงดินนี้จะพิจารณาถึงค่า E_m, E_s ให้อยู่ใน
 ช่วงค่าที่ปลอดภัยซึ่งปกติเมื่อค่า E_m อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยแล้วค่า E_s มักจะ
 ปลอดภัยด้วย และควรเลือกระยะต่อลงดินให้เหมาะสมกับลักษณะของโรงงาน
 เพื่อให้ได้ความยาวของตัวนำสั้นที่สุดที่มีความปลอดภัยมากที่สุด ซึ่งเมื่อ
 พิจารณาจากหลักการและวิธีการออกแบบข้างต้นกับผลที่แสดงไว้ในบทแรก
 ข้างท้ายแล้วจะเห็นว่าได้ผลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

1. IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING, ANSI-IEEE std. 80-1986
2. RALPH A. HARVIE, "Avoiding Hazards from Earth Currents in Industriall Plants," IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY App. MAY-JUNE 1977

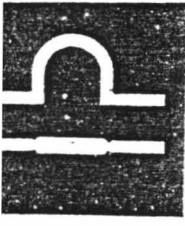


บทบทกที่ 1 สอการคำนวณ ในสถานะไฟฟ้าช๊อต

soil resistivity m P = 30
 sur face resistivity m Ps = 3000
 symetrical F-current A Ig = 8000
 crushed rock layer thickness m hs = .1
 duration of shock current sec Ts = .1
 No. of parallel conductor n = 3
 spacing between parallel conductor m D 1 = 10
 depth of ground grid m h = .5
 diameter of grid conductor m D2 = .0138
 Kii = 0.30285
 Kh = 1.22474
 Km = 1.07386
 Ki = 1.17200
 Cs = 0.65706
 lenght of conductor = 208.10682
 Etouch = 1451.43708
 Em = 1451.43708
 Estep = 4705.2757
 Es = 492.7180
 SAFE-1 + SAFE-2

บทบทกที่ 2 สอการคำนวณการรวมระบบค่อขดิน (p = 30)

soil resistivity m P = 30
 surface resistivity m Ps = 30
 symetrical F-current A Ig = 8000
 crushed rock layer thickness m hs = .1
 duration of shock current sec Ts = .1
 No. of parallel conductor n = 7
 spacing between parallel conductor m D1 = 10
 depth of ground grid m h = .5
 diameter of grid conductor m D2 = .0138
 Kii = 0.47047
 Kh = 1.22474
 Km = 1.00074
 Ki = 1.86000
 Cs = 1.00000
 length of conductor = 1165.39003
 Etouch = 383.33130
 Em = 383.33130
 Estep = 432.8526
 Es = 145.3518
 SAFE-1 + SAFE-2



ERIFLEX®

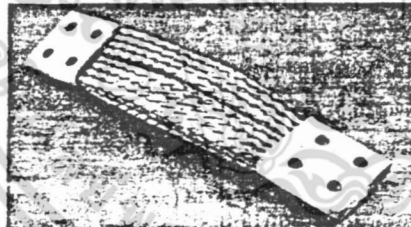
ELECTRICAL CONNECTION SPECIALIST

ERICO®

APPLIES ALL KIND OF SPECIAL ELECTRICAL CONNECTIONS, FLEXIBLE, RIGIDS, AMBIENT AIR, OR WATER COOLED. ALSO SUPPLIES ALL KIND OF BUSBARS, AS WELL AS EXTRUDED AND DRAWN COPPER PRODUCTS.



RESS-WELDED CONNECTION
 D OR TINNED COPPER SIZE 200-1500 MM²



FLEXIBLE CONNECTIONS IN BRAID
 RED OR TINNED COPPER SIZE 10-1200 MM²



Flat Braids/Round Braids
 RED OR TINNED COPPER SIZE 3-400 MM²



ARTHING BRAIDS
 REFABRICATED IN TINNED COPPER
 50 MM² LENGTH 100-300 MM.



CABLES AND CONNECTIONS FOR RESISTANCE WELDING



GLASS REINFORCED POLYESTER LOW VOLTAGE INSULATORS



GLASS REINFORCED POLYESTER BUSBAR SUPPORTS



บริษัท แกรนด์ไลท์ จำกัด
經綸貿易有限公司
GRANDLITE LIMITED

258/9-10 หมู่ 16 ถนนปู่เจ้าสมิงพราย ตำบลไฉ่ พระประแดง กรุงเทพฯ 10130
 258/9-10 Moo 16 Poochaosamingprai Rd., Samrongtai Phrapradang Bangkok 10130
 Tel : 384-0915, 384-2189 Tlx : 20846 TSC.TH Fax : (02) 384-1941

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบต่อลงดินของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆ (Grounding System of Industrial Plants)

ศลี บรรจงจิตร , อลงกรณ์ พรหมสวัสดิ์
คณบดีวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าอ็อกและบริเวอื่น ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีระบบต่อลงดินที่มีความเชื่อถือได้สูง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงาน ในบทความวิจัยฉบับนี้จะใช้ระบบกรวดนำ-ต่อลงดินทั้งเป็นแบบสมมาตรและไม่สมมาตรที่ปราศจากตัวนำคอลลิงดินในแนวตั้ง ในการออกแบบจะหาความยาวของตัวนำที่นำมาทำเป็นขั้วกรวดนำสั้นที่สุดและมีความปลอดภัยมากที่สุด โดยผลการคำนวณอ้างอิงมาจาก IEEE GUIDE FOR SAFTY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE-std 80-1986 ซึ่งได้รับการปรับปรุงแก้ไขให้มีความถูกต้อง และเชื่อถือได้สูง โดยใช้ข้อมูลที่เหมาะสมกับประเทศไทย เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง ตลอดจนได้ทราบการออกแบบระบบต่อลงดินของโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง ใหญ่ เพราะในการออกแบบระบบต่อลงดินของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆ จะมีวิธีการที่เหมาะสมต่างกัน ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทความฉบับนี้

ABSTRACT

The design of the grounding system must be very reliable so that it brings safety to whom it may concern. In this paper, the symmetrical and unsymmetrical ground grid without ground rods for the grounding system is used. In designing this system, the shortest conductor of the ground grid which brings the most safety is to be found. The calculation in here is based on the IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE std 80-1986 which is reliable and also the data employed, is suitable for practising in Thailand. The design of the grounding system in industrial plants is included. Moreover, it can be utilized very well.

บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะก่อกมมีสถานีไฟฟ้าอ็อก เพื่อรับไฟฟ้าแรงดันสูงและแปลงแรงดันให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ต่างๆในโรงงาน ในกรณีนี้เครื่องจักรไฟฟ้าภายในโรงงานต้องการพลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก การส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงเข้าไปภายในโรงงานจะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยขึ้นภายในโรงงาน ดังนั้นในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สถานีไฟฟ้าอ็อกของโรงงานจะรับพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้ง 3 เฟสและจ่ายไปยังโรงงาน เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในบริเวณสถานีไฟฟ้าอ็อก หรือในบริเวณโรงงานก็จะทำให้ศักดาไฟฟ้าที่จุดสัมผัสค่าสูง (GPR) และกระแสลัดวงจรก็จะไหลจากจุดเกิดเหตุ ไปยังตัว Neutral ของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าอ็อกโดยผ่านทางตัวดิน ดังนั้นภายในโรงงานจึงต้องมีระบบต่อลงดินเพื่อที่จะให้เป็นทางนำของกระแสลัดวงจรที่ก่อกมขึ้นตามตัวดินเพื่อให้เกิดความปลอดภัย ในบทความวิจัยฉบับนี้จะใช้ระบบต่อลงดินที่ใช้ระบบกรวดนำ (Ground Grid) ที่ปราศจากแท่งตัวนำแนวตั้ง (Ground Rod)

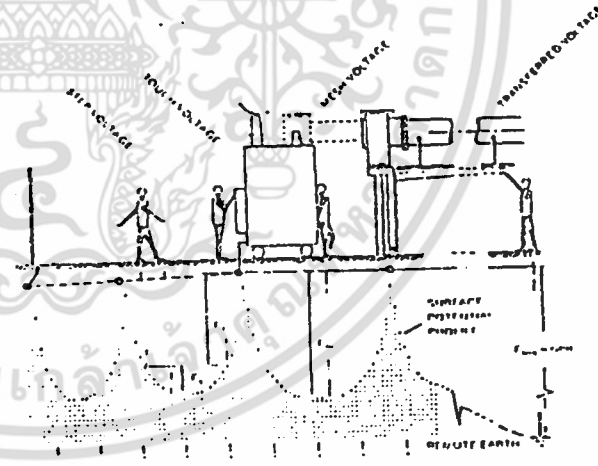
ทฤษฎี

การป้องกันอันตรายจากการเกิดความต่างศักย์ของตัวดินขณะเกิดกระแสลัดวงจรลงดินทำได้หลายทาง

1. ใช้ระบบต่อลงดินเป็นทางเดินของกระแสลัดวงจรแทนตัวดิน
2. ลดกระแสลัดวงจรลงดินโดยติดตั้ง Roof-lance Grounding ให้มากกว่า Solid Grounding ที่ Neutral ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. โดยการแยกระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าอ็อกในโรงงาน ออกจากระบบต่อลงดินของโรงงาน ในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดินในสถานีไฟฟ้าอ็อก ค่า GPR ของสถานีไฟฟ้าอ็อกจะสูงขึ้น ในขณะที่ศักดาของระบบต่อลงดินในโรงงานยังคงเหมือนเดิมเพราะมีระบบต่อลงดินที่แยกออกจากกัน
4. โดยการรวมระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าอ็อกในโรงงาน กับ ระบบต่อลงดินของบริเวณโรงงาน เข้าด้วยกัน โดยออกแบบบริเวณกรวดนำแบบที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน (พิจารณา รูปที่ 1)

1. แรงดันสัมผัส (Touch Voltage: E_{Touch} , E_{Touch}) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาเพิ่มของระบบต่อลงดิน (GPR) ขณะเกิดกระแสลัดปกติ เทียบกับศักดาพื้นผิวตำแหน่งที่คนยืนขณะที่เขามีมือจับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน
2. แรงดันก้าวก้าว (Step Voltage: E_{Step} , E_{Step}) คือ ความต่างศักย์ระหว่างศักดาพื้นผิวสองจุดที่เท้าคนก้าวเดิน ขณะเกิดกระแสลัดปกติ โดยมีส่วนใดในร่างกายนสัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดิน

GPR: Grid Potential Rise คือ ศักดาของระบบต่อลงดินที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระแสลัดปกติเมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ ตามปกติแล้วขณะที่ไม่เกิดกระแสลัดปกติ ศักดาของระบบต่อลงดินจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์และถือว่าเท่ากับศักดาของดินที่ระยะอนันต์ แต่ขณะเกิดกระแสลัดปกติศักดาของระบบต่อลงดินจะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับศักดาของดินที่ระยะอนันต์



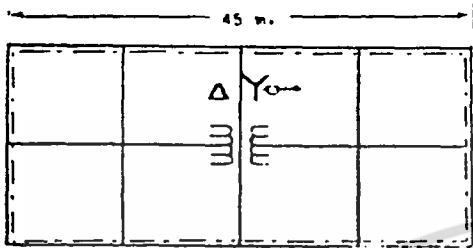
รูปที่ 1

ในการออกแบบระบบต่อลงดินในโรงงาน จะต้องให้ค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันก้าวก้าวอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย

- โดยให้ $E_{Touch} < E_{Touch}^{max}$ และ $E_{Step} < E_{Step}^{max}$
- E_{Touch}^{max} : Mesh Voltage คือ ค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นในขั้วกรวดของระบบต่อลงดิน
 - E_{Step}^{max} : Max. Step Voltage คือ ค่าแรงดันก้าวก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในขั้วกรวดของระบบต่อลงดิน

การรวมระบบต่อลงคานของสถานีไฟฟ้าอ้อมออกจากระบบต่อลงคานของโรงจ่าย

เหมาะสำหรับโรงจ่ายที่ใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ต้องการนำพลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไม่สูงนัก เพราะในบริเวณสถานีไฟฟ้าอ้อม เมื่อเกิดการระเบิดลงจากรวมคานจะมีค่าสูงกว่าในบริเวณโรงจ่ายมาก จึงควรแยกระบบต่อลงคานออกจากกัน โดยต่อระบบไม่ให้เกิดการเชื่อมคานระหว่างระบบต่อลงคานทั้งสองส่วนที่อาจเกิดจากท่อน้ำสาย, โคร่งของ busduct, busway



รูปที่ 2

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

- ความต้านทานของผิวคาน $p = 30 \text{ ohm-cm.}$
- ความต้านทานของผิวคานที่โรยหินกรวด $p_g = 3000 \text{ ohm-cm.}$
- ความหนาของชั้นหินกรวด $h_g = 0.1 \text{ m.}$
- ความลึกของคานระวางคาน $h = 0.5 \text{ m.}$
- ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของคาน $D_1 = 0.0128 \text{ m.}$
- ขนาดของกระแสคาน $I_g = 8000 \text{ A.}$
- เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันให้ระงับผิดปกติ (เช่นกับถาวรคาน) $t = 0.1 \text{ s.}$
- เริ่มจากการถอดวางคานระวางคานโดยประมาณระยะห่างของคาน

อย่างคร่าวๆดังรูปที่ 2 จากนั้น หาความยาวของคาน $L_{\text{รวม}}$ คือ ความยาวของคานที่ตัดให้ความปลอดภัยมากที่สุดกับคานหลักที่มากกว่า 50, 70 กิโลกรัม ตามลำดับ

$$L_{\text{รวม}} = \frac{(K_m K_1 p I_g \sqrt{t})}{((116, 157) + (0.174, 0.235) C_g (h_g, k) p_g)} \dots (1)$$

โดยที่

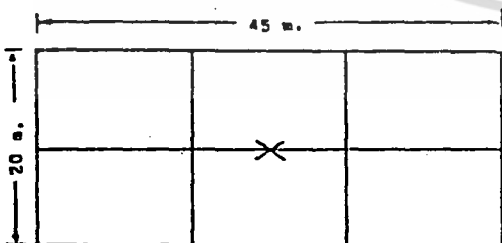
$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D_1^2 + (D_1 + 2h)^2}{16h^2} \right) + \frac{(D_1 + 2h)^2 - h^2}{4D_1^2} \right] + \frac{K_1}{K_h} \ln \left(\frac{8}{2n-1} \right)$$

$$K_1 = \frac{1}{(2n)^{0.25}} \text{ เท้าคานในแนวขนาน}$$

$$K_1 = 0.656 + 0.1728n$$

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

$$C_g (h_g, k) = 1 - \frac{[1 - (p/p_g)]}{2h_g + s} \text{ ; } s = 1$$



รูปที่ 3

หาค่า $L_{\text{รวม}}$ โดยแทนค่าจากข้อมูลข้างต้นได้ $L_{\text{รวม}} = 208.17 \text{ m}$ ซึ่งเป็นความยาวที่ปลอดภัยเพียงพอ แต่จากการประมาณข้างต้นในรูปที่ 2 ได้ $L = 225 \text{ m}$ เราสามารถลด ค่า L ได้ดังรูป 3 จะได้ $L_{\text{รวม}} = 215 \text{ m}$ ซึ่งมากกว่านำรั้วความปลอดภัยและรั้วคานระวางคานให้เหมาะสมในบริเวณที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้า

แรงยึดติดอยู่ หรือถ้าค่า $L_{\text{รวม}}$ มีค่ามากกว่าค่า L แล้ว จะต้องเพิ่มความยาวคานเข้าไว้ ให้ค่า L มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $L_{\text{รวม}}$

$$E_m = \frac{(p K_m K_1 I_g)}{L} \dots (2)$$

$$E_{\text{รวม}} = \frac{(1000 + 1.5 C_g (h_g, k) p_g) (0.116, 0.157)}{\sqrt{L}} \dots (3)$$

$$E_g = \frac{(p K_g K_1 I_g)}{L} \dots (4)$$

$$K_g = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D_1 + h} + \frac{1}{D_1} (1 - 0.5^{2n-1}) \right] \text{ สำหรับ } 0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$$

$$E_{\text{รวม}} = \frac{((1000 + 6 C_g (h_g, k) p_g) (0.116, 0.157))}{\sqrt{L}} \dots (5)$$

เมื่อแทนค่านวมข้างต้น จะได้

$$E_m = 1451.44 \text{ ; } E_{\text{รวม}} = 1451.44 \text{ ; } E_g = 492.72 \text{ ; } E_{\text{รวม}} = 4705.28$$

ค่าของ $E_m, E_{\text{รวม}}$ ที่เท่ากันหมายถึง ค่าที่ปลอดภัยเมื่อใช้ค่า L จากค่าที่ได้ จึงเมื่อค่าของ E_m อยู่ต่ำกว่าที่ปลอดภัยแล้ว ค่าของ E_g มีค่าปลอดภัยเสมอ

บริเวณคานทุกเฟสก็ใช้หลักการเช่นเดียวกัน เพียงแต่ใช้ค่า p_g ที่เหมาะสม ยกเว้นบริเวณอาคารหรือพื้นที่คอนกรีตที่วางโคร่งเหล็ก

การรวมระบบต่อลงคานของสถานีไฟฟ้าอ้อมกับระบบต่อลงคานบริเวณโรงจ่าย

เหมาะสำหรับโรงจ่ายที่ต่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์จำนวนมากในบริเวณโรงจ่าย เพราะเมื่อเกิดการระเบิดลงจะเกิดการระเบิดลงจากรวมคานจำนวนมาก จึงควรสรุป 4 ระยะคานคานระวางคานออกเป็นสามช่วงคือ

1. สถานีไฟฟ้าอ้อม
2. อาคารหรือพื้นที่คอนกรีตที่มีการวางโคร่งเหล็ก พื้นที่ภายในช่วงนี้ไม่ต้องคำนึงถึง E_m, E_g เพราะมีโคร่งเหล็กวางคานคานระวางคานแล้ว เพียงแต่ระวังคานไม่โคโรยหินกรวด

การหาระยะต่อลงคานในขั้นนี้ เริ่มจากการประมาณระยะห่างของคาน (L) บนท.ทั้งหมดของโรงจ่าย จาก(1)จะได้ $L_{\text{รวม}} = 1165.4 \text{ m}$

(ใช้ค่า $p_g = 20, n = 7, D_1 = 10$)

$$L_{\text{รวม}} = L_1 + L_2 + L_3$$

$L_1 = 215 \text{ m}$ จากสถานีไฟฟ้าอ้อม

$L_2 = 445 \text{ m}$; $(150 + 195 + 60 + 40)$ จากอาคารพื้นที่คอนกรีต

$L_3 = 495 \text{ m}$; $((45 \times 7) + (60 \times 3))$ จากพื้นที่ที่ไม่โคโรยหินกรวด

$L_{\text{รวม}} = 1155 \text{ m}$ ซึ่งขาดอีก 10.4 m จึงเราสามารถเติมเข้าไปถึงที่ได

ก็ได้ ในความยาวที่เหมาะสม เราเลือกเติมที่สถานีไฟฟ้าอ้อม ดังมีแผนผัง $L_{\text{รวม}} = 1175 \text{ m}$ ซึ่งขาด 0

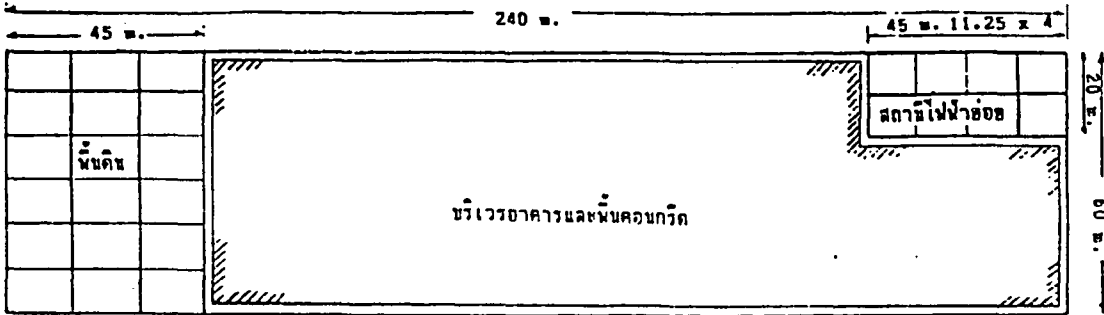
คำนวณค่า $E_m, E_{\text{รวม}}, E_g$ จาก (2), (3), (4), (5) ตามลำดับ ได้ $E_m = 888.88 \text{ ; } E_{\text{รวม}} = 888.88 \text{ ; } E_g = 145.85 \text{ ; } E_{\text{รวม}} = 432.85$

ค่าน้อยกว่า การออกแบบที่สมบูรณ์ได้แสดงไว้ในบทที่ 1, 2 ซึ่งถ้าจะเห็นว่าจากหลักการที่เสนอโรงงานจึงสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดี

ข้อแนะนำ

1. ค่า E_m, E_g จะเป็นส่วนกลับ กับ ความยาว(L) การรวมระบบต่อลงคานของสถานีไฟฟ้าอ้อมกับโรงจ่าย เป็นการเพิ่มค่า L จึงทำให้ค่า E_m, E_g ลดลง
2. ถ้านำเอาโคร่งเหล็กภายในอาคารและพื้นที่คอนกรีตเชื่อมต่อกับระบบต่อลงคานช่วยลด ค.ท.ท. ของคานให้ลดความยาวของคาน L ได้ก็
3. การลดระยะห่างระหว่างคาน (D_1) และการเพิ่มจำนวนคานในแนวขนาน (n) จะทำให้ค่า $L_{\text{รวม}}$ ลดลง
4. ค่าสัมประสิทธิ์ K_m ควรอยู่ในช่วง $0.5 < K_m < 1.5$
5. ค่าความต้านทานของคานจะต่อใช้ค่าที่ถูกต้องของคานบริเวณนี้ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

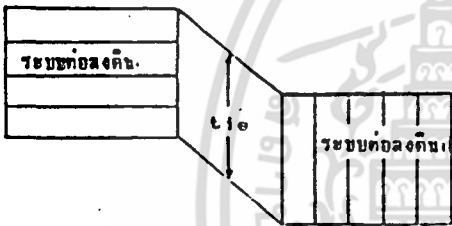


รูปที่ 4

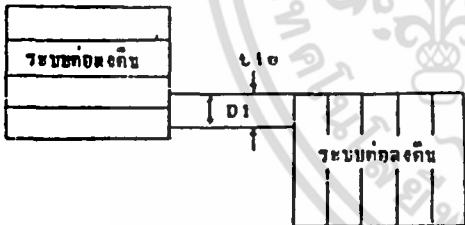
6. ในกรณีที่ค่า n มีค่ามากๆ ค่า K จาก Koch experiment (1)
 7. ความยาวของคาน้ำ (L) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ค่ารากที่ 2 ของ
 เวลาในการแก้ไขเขตคาน้ำ (clearing time) จึงควรหาค่าน้อยๆ
 และคค. กระแสโดยอ้างรวดเร็ว ค่ากระแสที่ควรตรวจสอบได้โดยอุปกรณ-
 ะป้องกัน ควรมีขนาดดังนี้

$$I < \frac{(1000 + 1.5 p_g) 0.0009 L}{K_m K_{ip}}$$

การเชื่อมต่อระบบของคาน้ำสองระบบที่แยกกัน การเชื่อมต่อจะต้องมีระ-
 ยะห่างระหว่างคาน้ำไม่ควรเกินระยะ D ดังรูป 5.1



รูปที่ 5



รูปที่ 5.1

ความต้านทานของคาน้ำและคาน้ำที่เพิ่มระบบคาน้ำ
 คาน้ำคำนวณได้จาก

$$R_g = p \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{20A} \left(1 + \frac{1}{1 + n/20A} \right) \right] \quad A = n^2 10.25 (n \ge 2.5) \quad \dots (6)$$

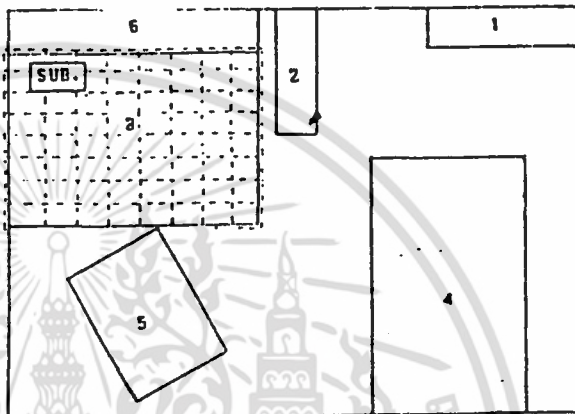
ค่าคาน้ำไฟฟ้าเพิ่มระบบเกิดกระแสคาน้ำ (OPR)
 คาน้ำคำนวณได้จาก

$$E_g = I_g R \quad \dots \dots \dots (7)$$

การรวมระบบของคาน้ำของสถานีไฟฟ้าออสกับระบบคาน้ำบริเวณอู่
 ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

เหมาะสำหรับโรงงานขนาดใหญ่ที่มีเนื้อที่มากและมีอาคารโรงงาน
 คาน้ำสูงเข้าไปภายในบริเวณโรงงาน เนื่องจากขนาดของน.ท. ของโรงงานมี
 ขนาดใหญ่มากการใช้วิธีที่กล่าวมานี้จะทำได้ช้า เพื่อความสะดวกรวดเร็ว
 จึงมีวิธีออกแนวอื่นดังนี้

พิจารณา.ท. โรงงานร่วมกับสถานีไฟฟ้าออส ดังรูปที่ 6



1. OFFICE : A = 195,000 m² , L = 854 W = 229
2. WARRHOUSE : A = 163,000 m² , L = 700 W = 233
3. PLANT 1+SUBSTATION : A = 1,260,000 m² L = 1400 W = 900
4. PLANT 2 : A = 1,249,000 m² , L = 855 W = 1460
5. CAMP : A = 467,000 m² , L = 800 W = 580
6. LAY DOWN AREA : A = 460,000 m² , L = 1800 W = 230

รูปที่ 6

1. คำนวณน.ท. ของบริเวณที่จะต่อระบบคาน้ำ : A = 1,260,000 m²
2. สมมติการวางคาน้ำของคาน้ำ : 888 m²
3. คำนวณความยาวคาน้ำรวม (L) : L = 20,700 m ; (9*1400) + (9*900)
4. หา ค.ค.ท. ของคาน้ำจาก (6) : E_g = 0.01229 ; (p=30, c_g=1)
5. หา ค่า OPR จาก (7) : E_g = 401.7 ; (I_g = 20,000)
 หา ค่า E_g = 166.766 E_g = 180.97 จาก (2, 3) และการคำนวณในบท-
 ทรรศ)

6. พิจารณาค่าอัตราส่วน ถ้า E_g / E_g < E_g / E_g จะปลอดภัย จากข้อ 5.
 จะได้ 0.4505 > 0.4155 แสดงว่า ไม่ปลอดภัย

7. เพิ่มจำนวนคาน้ำ : 16*16 m²
 การเพิ่มจำนวน คาน้ำ ของคาน้ำเป็นสองเท่า (แบ่งคาน้ำแต่ละช่อง
 เป็นสี่ส่วนเท่าๆกัน) จะทำให้ค่า E_g / E_g เปลี่ยนไปให้อัตราส่วนประมาณ 2/3
 ดังนี้ E_g / E_g = E_g / E_g * 2/3
 = 0.4505 * 2/3 = 0.3003

จะได้ E_g = 0.3003 E_g = 120.6 (ค่าที่คำนวณจาก (2, 3) แสดงในบททรรศ-
 = 129.6 โทล (เคจิ่งกัน)

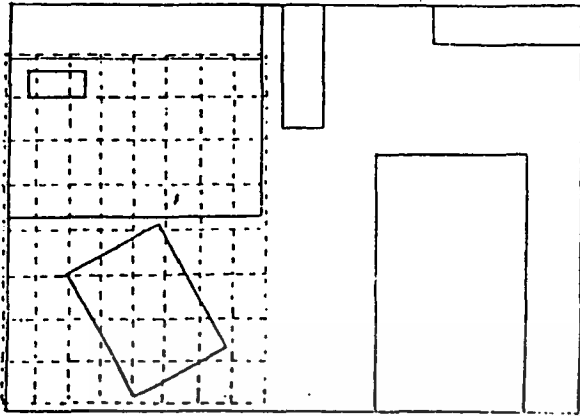
พิจารณา.ท. โรงงานที่ 1+สถานีไฟฟ้าออส+บริเวณที่พัก รูปที่ 7

1. A = 1,740,000 m²
2. สมมติ ให้เป็น 888 m²
3. L_{รวม} = 22,000 m ; (9*1400) + (9*2266)
4. R = 0.011072

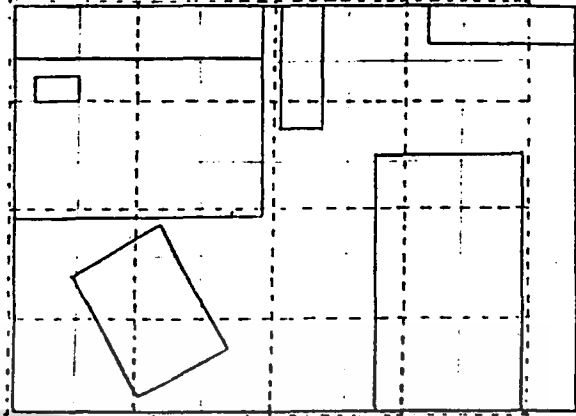
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

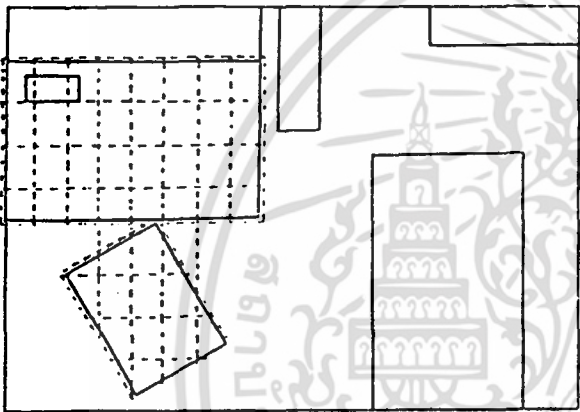
ดัชนีเลือกการวางคานาแบบ 8*8 mesh



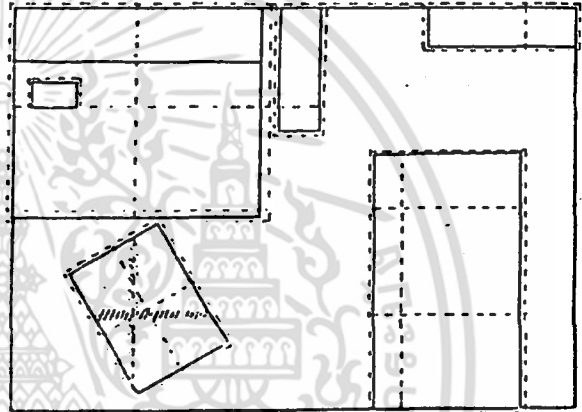
รูปที่ 7



รูปที่ 8



รูปที่ 7.1



รูปที่ 9

5. $E_s = 222.16$ พาค่า E_s/E_c จาก(2,3) = 122,166.76 คูณกับ
ผลกระทบ

6. จาก 5. $E_s/E_c = 0.267 < E_s/E_c = 0.502$ แสดงว่าปลอดภัย
จากข้อของคค mesh เป็น 464 mesh

$E_s/E_c = 0.267 < E_s/E_c = 0.502$ มากกว่า E_s/E_c
จะได้ $E_s = 0.5505 \times 222.16 = 122.3$ ซึ่งมากกว่า E_s แสดงว่า ไม่ปลอดภัย
จากนี้ให้วางคานาแนวตั้งยาวขนาด 8*8 mesh บนลงบนพื้นที่ที่จะวางระบบ
คองคินเท่านั้น และวางคานาโดยรอบคองรูปที่ 7.1

พิจารณา.ท. โรงงานทั้งหมด คองรูปที่ 8

1. $A = 2,800,000 \text{ m}^2$
2. รัศมี 888 mesh
3. $L_{รวม} = 49,000 \text{ m} = (9 \times 2266) + (9 \times 2177)$
4. $R = 0.00749$

5. $E_s = 224.7$ พาค่า E_s/E_c จาก(2,3) = 86.8, 166.76 คูณกับ
ผลกระทบ

6. จาก 5. $E_s/E_c = 0.2862 < E_s/E_c = 0.742$ แสดงว่า ปลอดภัย
จากข้อของคค mesh เป็น 464 mesh ได้ $E_s/E_c = 0.5749$ แสดงว่า ปลอดภัย
จากข้อของคค mesh เป็น 282 mesh ได้ $E_s/E_c = 0.869$ แสดงว่า ไม่ปลอดภัย
ดัชนีเลือก 484 mesh คองรูปที่ 8 โดยวางคานาแนวตั้งเฉพาะบริเวณที่เป็นเนื้อที่
โรงงานจริงจากนี้ให้ปรับระบบคองคินบริเวณที่ใหม่เพื่อให้สะดวกใน
การติดตั้งและให้ระยะโพรงเชื่อมคองของระบบคองคินไม่เกิน 0.8 คองรูป 9
จากนั้นก็วางคานาแนวตั้งไว้ตามโรงไฟฟ้า สามารถพิจารณาแบบรวม

พื้นที่ที่โรงงานเพียงครึ่งเดียวซึ่งสะดวกและรวดเร็วกว่ามาก จากตัวอย่าง
ของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในแต่ละชั้นคอง นี้ให้เห็นว่าการรวมระ
บบคองคินของทั้งโรงงานจะทำให้ค่า E_s/E_c มีค่าของสูง จึงหลักการนี้
ได้นำไปใช้ในการออกแบบระบบคองคินของโรงงานผลิตก๊าซธรรมชาติ 47
ทิว.ท. มากๆ

สรุป

ในการออกแบบระบบคองคินซึ่งมีจำนวนคองคิน E_s/E_c ให้อยู่ในช่วง
ค่าที่ปลอดภัยรูปที่ 8 เมื่อค่า E_s/E_c อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยแล้วค่า E_s/E_c ก็มักจะปลอดภัย
ด้วย และควรเลือกระบบคองคินที่เหมาะสมกับลักษณะของความต้องการ
ผลิตงานในน้ำและขนาดของโรงงานเพื่อให้ได้ความยาวของคานาที่สั้นที่สุดที่มี
ความปลอดภัยมากที่สุด ซึ่งเมื่อกำหนดจากหลักการและวิธีการออกแบบวาง
คองคินที่แสดงไว้ในบทแทรกข้างต้นแล้วจะเห็นว่าได้ผลเป็นอย่างดี

จากหลักการที่กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นว่า แบบแรกเป็นการวางคานา
แนวตั้ง โดยประมาณระยะห่างระหว่างคานา และคำนวณหาความยาว ให้สั้น
ที่สุดและให้ E_s/E_c ค่าสุดท้ายก็ให้เกิดความปลอดภัย (เมื่อ E_s/E_c น้อยกว่าหรือเท่ากับ
 E_s/E_c) จากข้อนี้, คค 1 ให้เหมาะสม ส่วนข้อนี้ซึ่งจะแสดงจากการ
ประมาณจำนวน คค และ คค L จากนี้คำนวณค่า E_s/E_c ก็เกิดขึ้น แล้ว
ทำการเพิ่ม, คคจำนวน คค เป็นสองเท่า โดยค่า E_s/E_c จะเปลี่ยนแปลงไป
โดยอัตราส่วนคองคินที่วางไว้ข้างต้น จนได้ค่า E_s/E_c น้อยกว่า E_s/E_c ที่เหมาะสม
จากวิธีการออกแบบของสองแบบ เราสามารถเปรียบเทียบได้ดังนี้

แบบแรก	แบบหลัง
1 ค่าเท่าใดจะน้อยกว่าให้เกิดความ	1 เปลี่ยนค่าเท่า เพราะจะหา, คค
ปลอดภัย ถ้าให้ประหยัดค่าเท่า	ปลอดภัย 2 เท่า ค่าจะไม่พอดี แต่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 เหมาะสำหรับโรงไฟฟ้าชนิดที่ 2 มากกว่าเล็กน้อย
 ไม่มากนัก 2 เหมาะสำหรับโรงงานที่มีเนื้อที่กว้าง
 3 รั่วอย่างมาก 3 เร็วกว่ามาก
 ทั้งสองแบบจะให้ความเชื่อถือได้เหมือนกัน เพราะใช้หลักการและทฤษฎี
 เหมือนกัน

เอกสารอ้างอิง

1. IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING. ANSI/IEEE Std.80-1986
2. IEEE GUIDE FOR SAFETY IN SUBSTATION GROUNDING Std 80-1976
3. RALPH A. HARVIE, "Avoiding Hazards from Earth Currents in Industrial Plants," IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY App. MAY/JUNE 1977
4. PETER A. ZOTOS, "Ground Grid Design in Large Industrial Plants," IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY App. Vol. 24 MAY/JUNE 1988

ภาคผนวก

บททบทวน 1 ผลการคำนวณโวลตาจิไฟฟ้าน้อย

soil resistivity $\rho = 30$
 surface resistivity $\rho_s = 3000$
 symmetrical F-current $I_g = 8000$
 crushed rock layer thickness $h_s = 1$
 duration of shock current sec $T_s = 1$
 No. of parallel conductor $n = 3$
 spacing between parallel conductor $\rho D1 = 10$
 depth of ground grid $h = 5$
 diameter of grid conductor $\rho D2 = 0.0138$
 $K_{II} = 0.302285$
 $K_h = 1.22477$
 $K_m = 1.07386$
 $K_I = 1.17200$
 $C_s = 0.65706$
 length of conductor $= 208.1068$
 $E_{Touch} = 1451.43708$
 $E_m = 1451.43708$
 $E_{step} = 4705.2757$
 $E_s = 492.7180$
 SAFE

บททบทวน 2 ผลการคำนวณการรวมระยะของดิน ($\rho = 30$)

soil resistivity $\rho = 30$
 surface resistivity $\rho_s = 30$
 symmetrical F-current $I_g = 8000$
 crushed rock layer thickness $h_s = 1$
 duration of shock current sec $T_s = 1$
 No. of parallel conductor $n = 7$
 spacing between parallel conductor $\rho D1 = 10$
 depth of ground grid $h = 5$
 diameter of grid conductor $\rho D2 = 0.0138$
 $K_{II} = 0.47047$
 $K_h = 1.22474$

$K_m = 1.00074$
 $K_I = 1.86000$
 $C_s = 1.00000$
 length of conductor $= 1165.39003$
 $E_{Touch} = 383.33130$
 $E_m = 383.33130$
 $E_{step} = 432.8526$
 $E_s = 145.3518$
 SAFE

บททบทวน 3 ผลการคำนวณโดยตรง

soil resistivity $\rho = 30$
 surface resistivity $\rho_s = 1$
 symmetrical F-current $I_g = 30000$
 crushed rock layer thickness $h_s = 1$
 duration of shock current sec $T_s = 5$
 No. of parallel conductor $n = 9$
 spacing between parallel conductor $\rho D1 = 175$
 depth of ground grid $h = 457$
 diameter of grid conductor $\rho D2 = 0.0133$
 $K_{II} = 0.52608$
 $K_h = 1.20706$
 $K_m = 1.88405$
 $K_I = 2.20400$
 $C_s = 11.04575$
 length of conductor $= 20700.00000$
 $E_{Touch} = 166.76684$
 $E_m = 180.54139$
 $E_{step} = 174.9210$
 $E_s = 33.7192$
 SAFE

บททบทวน 4 ผลการคำนวณโดยตรง

soil resistivity $\rho = 30$
 surface resistivity $\rho_s = 1$
 symmetrical F-current $I_g = 30000$
 crushed rock layer thickness $h_s = 1$
 duration of shock current sec $T_s = 5$
 No. of parallel conductor $n = 17$
 spacing between parallel conductor $\rho D1 = 87.5$
 depth of ground grid $h = 457$
 diameter of grid conductor $\rho D2 = 0.0133$
 $K_{II} = 0.66043$
 $K_h = 1.20706$
 $K_m = 1.57286$
 $K_I = 3.58000$
 $C_s = 11.04575$
 length of conductor $= 391000.00000$
 $E_{Touch} = 166.76684$
 $E_m = 129.61047$
 $E_{step} = 174.9210$
 $E_s = 29.2960$
 SAFE

บททบทวน 5 4x4 mesh ผลการคำนวณโดยตรง
soil resistivity ρ P=30
surface resistivity ρ Ps=1
symmetrical F-current A Ig=30000.00000
crushed rock layer thickness ρ hc=.1
duration of shock current sec Ts=.5
No. of parallel conductor n=5
spacing between parallel conductor ρ D1=566.66
depth of ground grid ρ h=.457
diameter of grid conductor ρ D2=.0133
Kli=0.39811
Kh=1.20706
Km=2.32290
Ki=1.51600
Cs=11.04575
length of conductor=183333.00000
Elouch=166.76
Em=172.87760
Estep=174.9210
Es=25.9970
SAFE

บททบทวน 5 : 8x8 mesh ผลการคำนวณโดยตรง
soil resistivity ρ P=30
surface resistivity ρ Ps=1
symmetrical F-current A Ig=30000
crushed rock layer thickness ρ hc=.1
duration of shock current sec Ts=.5
No. of parallel conductor n=9
spacing between parallel conductor ρ D1=283
depth of ground grid ρ h=.457
diameter of grid conductor ρ D2=.0133
Kli=0.52608
Kh=1.20706
Km=3.03673
Ki=2.20400
Cs=11.04575
length of conductor=23000.00000
Elouch=166.76684
Em=122.42618
Estep=174.9210
Es=21.0682
SAFE

บททบทวน 6 : 4x4 mesh ผลการคำนวณโดยตรง
soil resistivity ρ P=30
surface resistivity ρ Ps=1
symmetrical F-current A Ig=20000.00000
crushed rock layer thickness ρ hc=.1
duration of shock current sec Ts=.5
No. of parallel conductor n=5
spacing between parallel conductor ρ D1=794
depth of ground grid ρ h=.457
diameter of grid conductor ρ D2=.0133
Kli=0.39811

Kh=1.20706
Km=2.43020
Ki=1.51600
Cs=11.04575
length of conductor=27200.00000
Elouch=166.76
Em=121.81356
Estep=174.9210
Es=17.4942
SAFE

บททบทวน 6 : 0x8 mesh ผลการคำนวณโดยตรง
soil resistivity ρ P=30
surface resistivity ρ Ps=1
symmetrical F-current A Ig=30000.00000
crushed rock layer thickness ρ hc=.1
duration of shock current sec Ts=.5
No. of parallel conductor n=9
spacing between parallel conductor ρ D1=397
depth of ground grid ρ h=.457
diameter of grid conductor ρ D2=.0133
Kli=0.52600
Kh=1.20706
Km=2.14433
Ki=2.20400
Cs=11.04575
length of conductor=49000.00000
Elouch=166.076
Em=86.80597
Estep=174.9210
Es=14.1620
SAFE

ประวัติย่อ

ศลิ ขวรงค์จิตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า หนองบัว เมื่อปี พ.ศ. 2519 และจบการศึกษาระดับปริญญาโท จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2524 มีผลงานวิจัยที่ได้รับพิมพ์เผยแพร่ในวารสารต่างประเทศและในประเทศไทยมากกว่า 30 บทความ ปัจจุบัน รับผิดชอบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อलगันต์ นพผลลาภดี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า หนองบัว เมื่อปี พ.ศ. 2531 ปัจจุบันกำลังศึกษา ระดับปริญญาโท ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

(P-9) การวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน
Grounding System Analysis

ร.ศ. ศลิ บรรจงจิตร , อลงกรณ์ พรหมสวัสดิ์ , อารณ ปิยะชนวงศ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้จะวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบต่อลงดิน ได้แก่ ค่าความต้านทานของดินที่ซ่อนเร้นซึ่งจะเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จึงจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการออกแบบระบบต่อลงดิน และอีกปัจจัยหนึ่งก็คือรูปร่างของระบบต่อลงดิน ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบระบบต่อลงดินส่วนใหญ่จะมีลักษณะดังใน IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE Std. 80-1986 แต่จากหลักการดังกล่าวจะให้ค่าที่ผิดพลาดกับระบบต่อลงดินที่มีลักษณะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า อย่างเช่น รูปสามเหลี่ยม, ตัว "T", "L" ซึ่งในบางกรณีเกี่ยวกับการติดตั้งสถานีไฟฟ้า อาจจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของระบบต่อลงดินให้มีลักษณะดังกล่าวโดยบทความนี้จะกล่าวถึง วิธีการปรับปรุงค่าค่าต่อลงดินในกรณีรูปร่างของระบบต่อลงดินเป็นไปตามลักษณะดังกล่าวและต้องกล่าวถึงวิธีการเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับระบบต่อลงดิน โดยเมื่อวิเคราะห์ใช้กับกรณีปัจจุบัน ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกในการเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบ

ABSTRACT

Analysis of factors that effect the design of the grounding system will be shown in this paper. One of main factors is the frequent modification of soil resistivity that effect directly with the design of the grounding system. Another effect is the shape of the grounding installation system. Nowadays, most of the grounding system design refer to IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING ANSI/IEEE Std. 80-1986. However, the referring principles may provide mistake if the shape of ground grid is not square or rectangular, but is triangle or in the "T", "L" shape which determined the substation space. This paper will include method to find out the correct answer to the mentioned case and also the usage of common materials which is a convenient way to supply more security.

บทนำ

การออกแบบระบบต่อลงดิน มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในบริเวณที่มีการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง จึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก ในการออกแบบจะต้องทำให้ค่าความปลอดภัยต่างๆ เช่น E_m, E_c [2] ที่ได้จากการคำนวณค่าความต้านทานต่อดินที่สอดคล้องกับค่าที่แท้จริง ดังนั้นเพื่อให้ค่าความปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณค่าความต้านทานต่อดินที่สอดคล้องกับค่าที่แท้จริง การวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยดังกล่าวอันได้แก่ ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity) และ รูปร่างของระบบต่อลงดิน รวมถึงวิธีการเพิ่มค่าความปลอดภัยดังกล่าวให้กับระบบต่อลงดิน

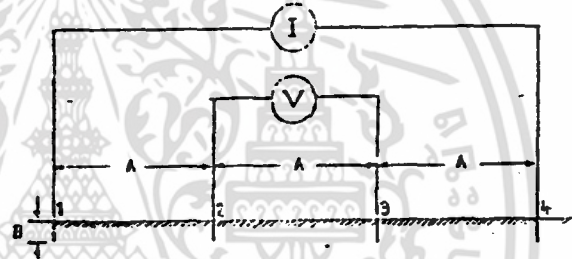
บทสรุป

1. ความต้านทานจำเพาะของดิน
เมื่อเราพิจารณาดัง Mesh Voltage (E_m), step Voltage (E_c) จาก [2] จะพบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) เป็นองค์ประกอบสำคัญในการคำนวณค่าดังกล่าวซึ่งค่า ค.ต.ท. จำเพาะของดินจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและของเหลวที่เป็นส่วนประกอบในดินนั้น ๆ โดยเฉพาะถ้าทั้งปริมาณของเหลวในดิน จะจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามฤดูกาล

นอกจากนี้ ในบริเวณเดียวกันนั้น ก็อาจจะมีเนื้อดินต่างชนิดปะปนกัน ซึ่งจะมีผลต่อค่า ค.ต.ท. ของดินทั้งมวล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้การวัดค่า ค.ต.ท. ของดินมีค่าคงที่ตลอดเพื่อให้ค่าความปลอดภัยต่างๆที่ได้จากการคำนวณค่าที่ถูกต้อง การหาค่า ค.ต.ท. จำเพาะของดิน สามารถหาได้จาก วิธี Four Point Test และ วิธี Driven Rod Test ซึ่งวิธีการวัดทั้งสองจะมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ดังจะกล่าวต่อไป

วิธี Four Point Test

เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยจะปักแท่งตัวนำ 4 แท่งลงในดินที่ระดับความลึก (B) เป็นระยะห่างเท่าๆกัน (A) เรียงเป็นเส้นตรง จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว 1, 4 และวัดความต่างศักย์ที่ขั้ว 2, 3 ค่าความต้านทานที่จะหาได้จาก ค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 2, 3 หารด้วย ค่ากระแสที่ขั้ว 1 ได้จาก ขั้ว 1, 4 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธี Four Point Test

และสามารถหาค่า ค.ต.ท. จำเพาะของดิน (ρ) ได้จาก [2]

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

เมื่อ R = ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องวัด (ค่าที่ได้จาก V) ในรูปที่ 1)

A = ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำ (เมตร)

B = ความลึกของแท่งตัวนำ (เมตร)

ถ้าค่า B มีค่าน้อยกว่า A มากๆ ($B < A/20$) สามารถลดสมการที่ 1 เป็น

$$\rho = 2\pi AR \dots (2)$$

วิธี Driven Ground Rod

วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีบริเวณที่ต้องการวัด ค.ต.ท. ของดินมีลักษณะดินแข็ง ไม่สามารถใช้วิธีแบบ Four Point Test ได้ เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็วกว่าวิธีอื่น ๆ แต่ค่าที่ได้จะมีความเที่ยงตรงน้อยกว่าวิธีแรก และไม่สามารถวัดได้ถ้าดิน ค.ต.ท. สูงมากๆ วิธีการวัดแบบ Driven Gnd Rod แสดงดังรูปที่ 2 (รายละเอียดหาได้จาก [5])

สามารถหาค่า ค.ต.ท. จำเพาะของดินได้จาก [2]

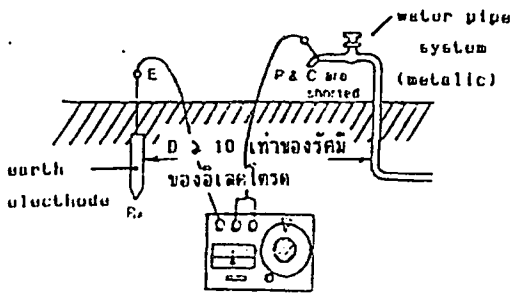
$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln BL/d - 1} \dots (3)$$

เมื่อ ρ = ค.ต.ท. จำเพาะของดินปรากฏที่ความลึก L (โอห์ม-เมตร)

L = ความยาวของโศร่เวทกราวหรือที่ลึกลงไปในดิน (เมตร)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของกราวหรือโศร่ (เมตร)

R = ค.ต.ท. ที่วัดได้จากเครื่องวัด (โอห์ม)



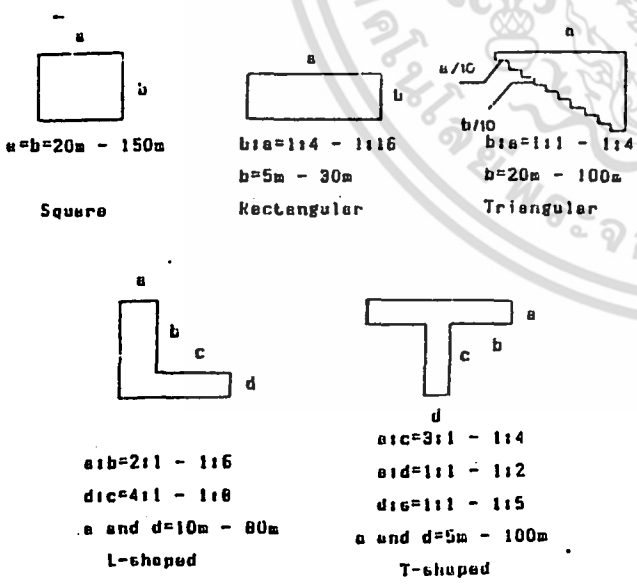
รูปที่ 2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยวิธี Driven Gnd Rod
 ที่น่าจะต้องเป็นเหล็กและมีความยาวพอที่จะทำให้ค่า R ต่ำมากและละเอียดได้

2. รูปร่างของขั้วแรงต่อลงดิน

หลังจากที่ได้ออกแบบระบบขั้วแรงต่อลงดินแล้วเราละเอียด, วิธีการออกแบบ
 (1) จำเป็นต้องคำนวณหาของ ค.ต.ท ของระบบต่อลงดิน (Rg) เมื่อให้ออก
 ในขอบเขตที่ปลอดภัย และนำไปสู่การหาค่า ความปลอดภัยอื่นๆ เช่น G.P.R.
 (1) (ในกรณี Large plants) ซึ่งรูปร่างของขั้วแรงต่อลงดิน จะมีผลกับ
 ค่า ค.ต.ท ดังกล่าว ในกรณีที่รูปร่างของ ขั้วแรงต่อลงดิน มีลักษณะเป็นสี่
 เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถคำนวณ หาค่า ค.ต.ท ของระบบ
 ต่อลงดิน (Rg) ได้หลายวิธีคือ

1. จากผลการของ Severak [2]
2. จากผลการของ Schwarz [2]
3. โดยการใช Finite element [3]

แต่ในกรณีที่รูปร่างของขั้วแรงต่อลงดิน ไม่ได้มีลักษณะดังกล่าว ซึ่งใน
 บางครั้งกำหนดหน้าตัดของขั้วที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม, รูปตัว "T", รูปตัว "L"
 ดังรูปที่ 3 การใช้สมการในวิธีที่ 1, 2 จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดมาก ส่วน
 ในวิธีที่ 3 จะเป็นวิธีที่ทำได้ถูกต้อง เพราะเป็นการคำนวณในทุกๆ จุด โดย
 จะต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก และต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย
 จึงเป็นวิธีที่ยุ่งยาก ในกรณีเช่นนี้ สามารถใช้วิธีที่ได้นี้มาได้จาก วิธีของ
 Severak โดยจะเพิ่มแม่เหล็กที่เพิ่มความต้านทานของขั้ว และความยาว
 ของเส้นรอบวงของขั้วแรงต่อลงดิน ($\sqrt{A/L}$) เข้าไป



รูปที่ 3 ขนาดและรูปร่างของขั้วแรงต่อลงดิน

จากผลการหาค่า Rg ของ Severak [2]
 $R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h/20A} \right) \right] \dots (4)$
 พบว่า เมื่อรูปร่างของขั้วแรงต่อลงดิน เปลี่ยนจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส,
 ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลี่ยมผืนผ้า ไปเป็น รูปตัว "L" หรือรูปตัว "T" จงพบว่า ค่าความยาวของ
 เส้นรอบวงจะเพิ่มมากขึ้นไม่มีผลกับขนาดของพ.ท (A) ดังนั้นค่า Rg ที่
 ได้ควรจะมีค่าลดลง แต่จากผลการของ Severak หาค่า Rg ที่คำนวณได้ยัง
 ลดลงน้อยกว่าที่ควรจะเป็นจึงต้องเริ่มค่า $1.52(2.1n(L/\sqrt{2A}) - 1)\sqrt{A/L}$
 เข้าไปในสมการเดิมเพื่อให้ค่าความต้านทานที่ได้ลดลงอย่างเหมาะสม [3]
 โดยจะได้

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h/20A} \right) \right] \times \left[1.52(2.1n(L/\sqrt{2A}) - 1)\sqrt{A/L} \right] \dots (5)$$

เมื่อ L คือ ความยาวเส้นรอบวงของขั้วแรงต่อลงดิน, เมตร
 L คือ ความยาวรวมของตัวนำในขั้วแรงต่อลงดิน, เมตร
 A คือ พื้นที่ของขั้วแรงต่อลงดิน ตารางเมตร
 h คือ ความลึกที่ฝังของขั้วแรงต่อลงดิน, เมตร
 ρ คือ ค่า ค.ต.ท จำเพาะของดิน โอห์ม-เมตร
 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า ปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวมานี้จะมีผลทำให้ค่า
 ที่ได้จากการออกแบบขั้วแรงต่อลงดิน มีค่าผิดพลาดไปบ้าง แต่การออกแบบจะ
 ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก ค่าความปลอดภัยต่าง ๆ จึงจำเป็นต้อง
 ทำให้มีค่าสูง ๆ ไว้ก่อน จึงสามารถทำให้ผลลัพท์ นอกเหนือจากการลดค่า
 ค.ต.ท ของขั้วแรงต่อลงดิน, การเพิ่มความยาวตัวนำต่อลงดิน, การลด
 Mesh Voltage และ step Voltage จากที่แสดงกล่าวไว้ขั้วความก่อน
 แล้ว [1] สามารถทำได้โดยการเพิ่ม ค.ต.ท ที่เท่า โดยใช้วัสดุที่นำได้
 ย่าง เช่น แผ่นพลาสติก ดังจะกล่าวต่อไป

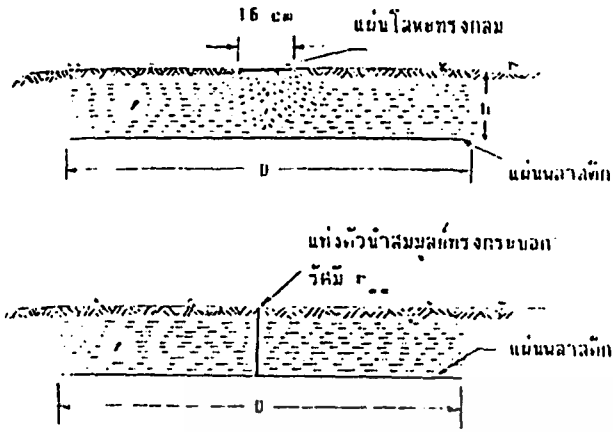
3. การเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับขั้วแรงต่อลงดินโดยการเพิ่ม ค.ต.ท ของเท้า

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าการโรยหินกรวด (crushed rock) หรือ หิน
 ซิเมนต์เป็นการเพิ่มค่า ค.ต.ท ให้กับเท้าของขั้ว เพื่อให้เกิดความปลอดภัย
 มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามยังสามารถที่จะเพิ่มค่าความต้านทานให้กับเท้าของ
 ขั้วได้ก็ โดยการใช้น้ำมันลวดลึกลงได้ตามท้องตลาด วางภายใต้หินกรวด
 อย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในบริเวณที่จำเป็นเพราะขั้วที่ฝนตก
 ใหม่ๆ ค่า ค.ต.ท ของขั้วจะลดลงเหลือ 30 โหมม/เมตร ทำให้
 ค.ต.ท ของเท้าลดลง

การเพิ่มค่า ค.ต.ท ให้กับเท้าของขั้วจะสามารถ เพิ่มค่าความปลอดภัย
 ได้ทั้ง $R_{\text{available touch}}$ และ $R_{\text{available step}}$ จาก [2]
 เมื่อ
 $R_{\text{available touch}} = (R_g + R_{\text{app}}) I$
 $R_{\text{available step}} = (R_g + R_{\text{app}}) I$
 เมื่อ
 R_g = ค่า ค.ต.ท ของขั้วที่ขุดขึ้นโดยไม่เป็นอันตราย
 R_{app} = ค่า ค.ต.ท ของเท้าที่ขุดขึ้นโดยไม่เป็นอันตราย
 R_g = ค่า ค.ต.ท ของขั้วแรงต่อลงดิน
 R_{app} = ค่า ค.ต.ท ของเท้าทั้ง 2 ข้างต่อขนานกัน
 R_{app} = ค่า ค.ต.ท ของเท้าทั้ง 2 ข้างต่ออนุกรมกัน
 ค่า ค.ต.ท ของเท้าเมื่อใช้แผ่นพลาสติกรอง

เมื่อพิจารณาเท้าของขั้วโดยไม่คิดค่า ค.ต.ท ของร่องเท้าและถาด
 เท้า สามารถแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมบางรัศมี 8 ซม. ในรูปที่ 4(a) เมื่อ
 ทำการวางแผ่นพลาสติก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 ซม. ที่ความลึก h จากผิว
 หน้าของดิน ถ้ากระแสและไหลผ่านไปยังแผ่นโลหะวงกลมในบริเวณพื้นแผ่น
 พลาสติก ที่ทิศทางไหลของกระแสจะเป็นดัง รูปที่ 4 เนื่องจากค่า ค.ต.ท
 ของพลาสติกสูงกว่าดินมาก แต่กระแสจะไหลได้ในแนวตั้งด้วย เมื่อนอกจาก
 ขอบของแผ่นพลาสติก ดังนั้น เราสามารถแทนลักษณะดังกล่าวได้ ด้วยรูปที่
 4(b) โดยใช้เท้าที่หน้าทรงกระบอกกลมมุม
 สามารถหาค่า ค.ต.ท ของการต่อลงดินของแท่งตัวนำทรงกระบอก ($R =$
 $= R_{\text{rod}}$) ได้
 โดย

$$R = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{D}{2r_c}$$



รูปที่ 4 แท่งตัวนำลมมุลล์

เมื่อ r_c = ค.ต.ท. จำเพาะของดินเหนียวแผ่นพลาสติก (โอห์ม-เมตร)
 b = เส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นพลาสติก, ($b > 6h$) (เมตร)
 h = ความลึกในการฝังของแผ่นพลาสติก ($4cm < h < 20cm$) (เมตร)
 r_c = ค่ารัศมีลมมุลล์ ของตัวนำทรงกระบอก จึงจะมีความสัมพันธ์กับ
 ค่า h โดยค่า r_c สามารถหาได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ารัศมีลมมุลล์ของตัวนำทรงกระบอกที่มีความลึกต่างๆ
 ที่ได้จากการศึกษา Model Test [4]

h (cm)	r_c (cm)
4	4.4
8	2.8
12	2.04
20	1.48

ผลการทดลอง

ความต้านทานจำเพาะของดิน

ค่าความต้านทาน, ความต้านทานจำเพาะของดินกับความลึกเมื่อหาโดยวิธี Driven Ground Rod ที่บริเวณต่างๆ แสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าค.ต.ท.จำเพาะของดินกับความลึก

ความลึก(m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

โรงสายฟ้าบริเวณ TPI จังหวัดนครราชสีมา

R_p (ohm-m)	640	500	440	380	360	340	300	250	230	210
r_c (ohm-m)	300	400	486	530	602	662	664	618	628	626

นิคมอุตสาหกรรมหนองบัว จังหวัดนครราชสีมา

R_p (ohm-m)	550	505	490	370	305	235	185	150	125	110
r_c (ohm-m)	258	404	546	516	511	457	409	371	341	328

โรงพยาบาลสนามจักรี จังหวัดนครราชสีมา

R_p (ohm-m)	110	90	75	65	59	55	55	55	53	53
r_c (ohm-m)	52	72	83	91	99	107	121	126	145	158

อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดเชียงใหม่

R_p (ohm-m)	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
r_c (ohm-m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

รูปร่างของตะกรงต่อลงดิน
 ค่าความต้านทานของตะกรงต่อลงดินรูปร่างต่างๆ ที่หาได้คลมกรати 5
 เทียบกับวิธีอื่นๆ และผลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงการหาค่าค.ต.ท.ของตะกรงต่อลงดินโดยวิธีต่างๆ

ขนาด
 ความต้านทานจำเพาะของดิน = 100 ohm-m
 ความลึกของตะกรงต่อลงดิน = 0.5 m
 รัศมีของตัวนำ = 5 mm
 จำนวนของ mesh = n
 ขนาดต่างๆของตะกรงต่อลงดินแสดงในรูปที่ 3
 EQ = ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการที่ 5
 Sv = ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการของ Sverat [2]
 Sc = ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการของ Schurz [2]
 Fin = ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการ Finite Element [3]

n	a	b	c	d	Ground Resist. ohms				% Error				
					EQ	Sv	Sc	Fin	EQ	Sv	Sc		
Square/Rectangular													
4	20	20			2.77	2.96	2.56	2.63	5.3	12.5	-2.7		
16	20	20			2.46	2.62	2.49	2.37	3.8	10.5	5.1		
9	24	24			2.16	2.31	2.12	2.06	4.9	12.1	2.9		
4	40	40			1.41	1.51	1.35	1.41	0	7.1	-4.3		
16	40	40			1.25	1.34	1.29	1.25	0	7.2	3.2		
64	40	40			1.15	1.23	1.23	1.15	0	7.0	6.1		
16	60	60			0.84	0.90	0.88	0.86	-2.3	4.7	2.3		
100	100	100			0.46	0.49	0.49	0.47	-2.1	4.3	4.3		
144	120	120			0.38	0.40	0.41	0.39	-2.6	2.6	5.1		
255	150	150			0.30	0.32	0.32	0.31	-3.2	3.2	3.2		
16	80	5			1.80	2.53	1.42	1.64	9.8	54.3	-13.4		
4	80	20			1.30	1.47	1.14	1.28	1.6	14.8	-10.9		
16	80	20			1.17	1.33	1.11	1.13	3.5	17.7	-1.8		
16	160	10			0.92	1.29	0.75	0.87	5.7	48.3	-13.8		
16	120	30			0.79	0.89	0.75	0.78	1.3	14.7	-2.6		
16	240	15			0.62	0.87	0.52	0.60	3.3	45	-13.3		
64	320	20			0.44	0.61	0.40	0.42	4.8	45.2	-4.8		
144	480	30			0.28	0.39	0.26	0.27	3.7	44.4	-3.7		
L Shaped													
32	10	60	10	10	1.43	1.77	1.55	1.36	5.1	30.1	14.1		
48	20	20	20	20	1.30	1.43	1.42	1.29	0.8	10.9	10.1		
52	10	60	60	10	1.01	1.26	1.36	0.97	4.1	40.2	29.2		
20	20	50	80	10	0.89	1.16	1.11	0.88	1.1	31.8	26.1		
25	30	50	70	10	0.83	1.03	0.99	0.83	0	24.1	19.3		
28	20	90	80	10	0.72	0.96	0.95	0.71	1.4	35.2	23.8		
32	20	120	20	20	0.73	0.90	0.80	0.71	2.8	26.8	12.7		
128	20	120	20	20	0.68	0.84	0.77	0.66	3.0	27.3	16.7		
34	40	60	60	10	0.73	0.87	0.85	0.74	-1.4	17.6	14.9		
26	20	80	80	20	0.67	0.84	0.84	0.66	1.5	27.3	27.3		
51	30	70	70	30	0.60	0.70	0.70	0.60	0	16.7	16.7		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

34	20	120	20	80	0.54	0.66	0.57	0.53	1.9	24.5	7.5
88	70	40	30	60	0.48	0.52	0.53	0.50	-4.0	4.0	6.0
1	80	120	120	20	0.44	0.53	0.50	0.48	-8.3	10.4	4.2
34	80	120	120	20	0.37	0.44	0.44	0.38	-2.6	15.8	15.8
136	80	120	120	20	0.35	0.41	0.42	0.35	0	17.1	20.0

Triangular

20	40	20			1.98	2.29	2.12	1.93	2.6	18.7	9.8
40	80	20			1.27	1.57	1.36	1.21	5.0	29.8	12.4
63	80	30			1.03	1.26	1.16	1.01	2.0	24.8	14.9
30	100	50			0.78	0.91	0.88	0.82	-4.9	11.0	7.3
40	160	40			0.65	0.80	0.70	0.65	0	23.1	7.7
110	200	100			0.39	0.46	0.45	0.41	-4.9	12.2	9.8
45	150	50			0.62	0.75	0.69	0.63	-1.6	19.0	9.5
60	200	50			0.51	0.64	0.57	0.52	-1.9	23.1	9.6
60	100	100			0.54	0.60	0.60	0.58	-6.9	2.4	3.4
72	160	80			0.49	0.58	0.57	0.51	-3.9	13.7	11.8
144	320	80			0.32	0.40	0.36	0.33	-3.0	21.2	9.1

T-shaped

10	5	20	5	5	2.58	3.30	2.58	2.41	7.1	36.9	7.1
32	10	20	30	10	1.43	1.77	1.72	1.42	0.7	24.6	21.1
10	10	20	50	10	1.32	1.69	1.59	1.31	0.8	29.0	21.4
40	10	20	50	10	1.18	1.51	1.51	1.20	-1.7	25.8	25.8
30	20	40	40	20	0.76	0.93	0.91	0.74	2.7	25.7	23.0
1	20	40	60	20	0.85	1.05	0.97	0.90	-5.6	16.7	7.8
8	20	40	60	20	0.79	0.98	0.93	0.82	-3.7	19.5	13.4
32	20	40	60	20	0.73	0.90	0.89	0.74	-1.4	21.6	20.3
40	20	40	100	20	0.62	0.79	0.79	0.63	-1.6	25.4	25.4
44	20	60	80	20	0.58	0.75	0.75	0.59	-1.7	27.1	27.1
66	30	50	60	40	0.52	0.61	0.60	0.48	8.3	27.1	25.0
72	20	60	80	40	0.45	0.58	0.57	0.46	-2.2	26.1	23.9
108	60	20	80	60	0.42	0.47	0.47	0.44	-4.5	6.8	6.8
48	80	40	80	80	0.39	0.37	0.37	0.35	-5.7	5.7	5.7
8	100	200	300	100	0.17	0.24	0.25	0.18	-5.5	33.3	38.9

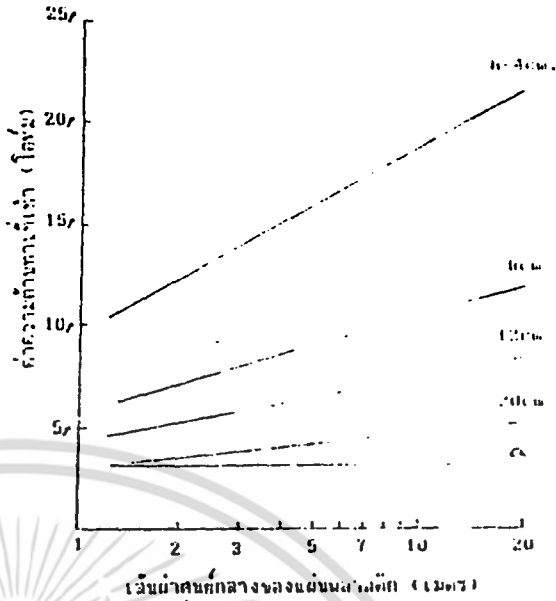
การเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้า
ค่าความต้านทานของเท้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของแผ่นพลาสติก
แสดงผลในรูปที่ 5

บทวิเคราะห์

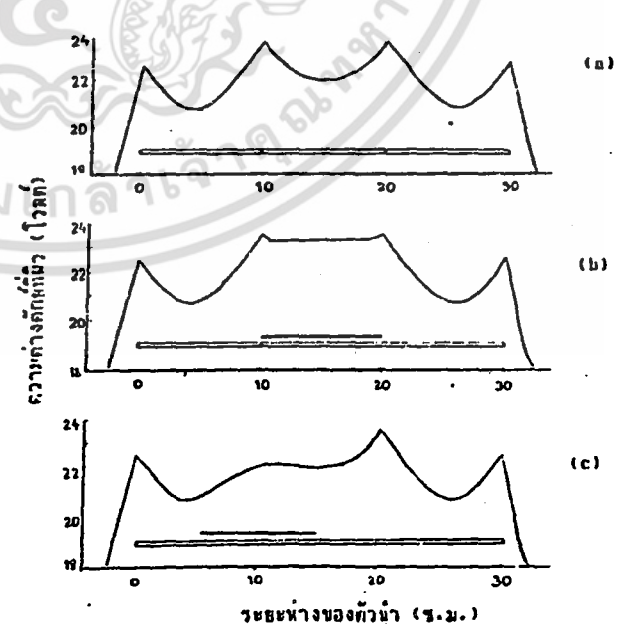
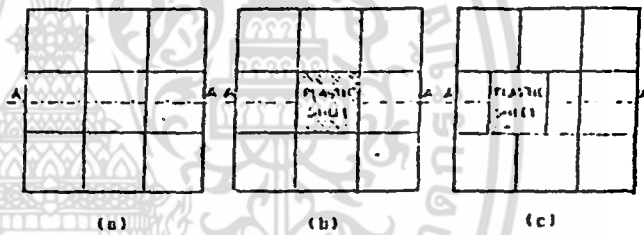
ความต้านทานจำเพาะของดิน

จากผลการวัดที่โรงงานปูนซีเมนต์ TPI จังหวัดสระบุรี

พบว่า ค่าความต้านทานของดินจะแปรผกผันกับความลึกที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะแปรตามความลึก โดยสังเกตได้ว่า ในช่วงแรกค่า ค.ต.ท. ของดินที่วัดได้จะลดลงเล็กน้อยเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของความชื้นของดิน และจะลดลงอีกเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น จึงคาดว่า เป็นผลจากความชื้นของดิน เนื่องจากบริเวณที่ทำการทดลอง เป็นบริเวณแจ้งเขาเรอต้นน้ำใต้ดินจึงค่อนข้างลึกแต่ระยะกับพื้นดินจะมีความชื้นพอสมควร



รูปที่ 5 แสดงค่า ค.ต.ท. ของเท้าที่ได้จากการคำนวณตลอดคดียกกับค่าที่วัดได้จาก Model Test



รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่หัวดินเมื่อวางแผ่นพลาสติกลงบนพื้นและทรงคองคดียกที่ตำแหน่งต่างๆ ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการก่อสร้าง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลสัมฤทธิ์เป็นกันเห็นความห่างบริเวณจะมีขึ้นมาก ดังนั้นค่าความต้านทานของดินจึงไม่ต่ำนัก ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินค่อนข้างสูง

จากผลการวัดที่หม้อลวดลายกรรมแหวนถึง จังหวัดชลบุรี พบว่า ในช่วง 0.9 เมตรแรกค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จะเพิ่มขึ้นตามความลึกในขณะที่ค่าความต้านทานจะลดลง แต่ที่ระยะความลึก 0.9-3.0 เมตร ค่าทั้งสองจะแปรผกผันกับความลึก เนื่องจากเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายมีความเป็นกรดด่าง-กรดแก่ (PH=4.5-5.5) ที่ระดับดินชั้นบนจะมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าดินชั้นล่างและมีกรรขรธาธาธาที่ ระดับน้ำใต้ดินไม่ลึก และอัตราเร็วของน้ำไหล ประกอบกับดินมีแร่ธาตุและสารละลายจำพวกเกลือเป็นจำนวนมากทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าและค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าต่ำลง

จากผลการวัดที่โรงพยาบาลสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม พบว่า ค่าความต้านทานของดินจะแปรผกผันกับความลึกขณะที่ค่าความต้านทานจำเพาะจะแปรตามความลึก จะสังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำเนื่องจากลักษณะดินเป็นดินเหนียว มีการระบายน้ำค่อนข้างต่ำ มีระดับน้ำใต้ดินไม่ลึก ประกอบกับในดินมีส่วนผสมของแร่ธาตุพวกเหล็กและแมงกานีสในดินชั้นล่าง ทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าต่ำ และค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าต่ำด้วย

จากผลการวัดที่ท่าเรืออ่าวบ้านดอน จังหวัดสงขลา พบว่า ค่าความต้านทานมีค่าสูงมากไม่สามารถวัดค่าความต้านทานได้จากวิธี Driven Grid Rod ซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีนี้ แต่จะสามารถหาได้จากวิธี Four Point Test เนื่องจากสถานะที่การวัดดินในบริเวณนี้บริเวณนี้จึงเขาที่ค่อนข้างสูง มีส่วนผสมของหินจำนวนมาก และมีระดับน้ำใต้ดินที่ลึกมาก

จากผลการวัดดังกล่าวพอจะสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ในประเทศไทยในเขตร้อนชื้นมีสาเหตุมาจาก

- 1. ชนิดและคุณสมบัติของดิน
- 2. ปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดิน
- 3. ปริมาณแร่ธาตุและสารเคมีในดิน
- 4. ความลึก

ซึ่งปัจจัยทั้ง 4 จะมีความเกี่ยวเนื่องกัน แต่จากการวัดค่าความต้านทานในบริเวณต่างๆของชลบุรีได้ว่า ในเขตร้อนชื้นของดิน ดินเหนียว ดินร่วนปนทราย ดินทราย จะมีค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะเรียงจากน้อยไปหามากเมื่อปริมาณความชื้นมีค่าใกล้เคียงกัน และปริมาณความชื้นกับระดับน้ำใต้ดินจะมีผลต่อค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะมากที่สุด โดยเฉพาะในบริเวณที่ราบลุ่มและน้ำท่วมถึง นอกจากนี้ ปริมาณแร่ธาตุและสารเคมีในดิน ความลึกก็จะมีผลต่อค่าความต้านทาน ความต้านทานจำเพาะมากพอสมควร

รูปร่างของขั้วแคบของคอลลิ่งดิน

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่าการใช้รูปทรงของ Sverak และรูปทรงของ Schwarz จะให้ค่าที่ถูกต้องในกรณีรูปร่างของขั้วแคบของคอลลิ่งดินมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่จะให้ค่าที่ผิดพลาดในกรณีขั้วแคบของคอลลิ่งดินมีลักษณะเป็นรูปตัว "T", รูปตัว "L", รูปสามเหลี่ยมอาจมากถึง 40% ในบางกรณี เนื่องจากอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงในขนาดของพื้นที่ (A) กับความยาวของเส้นรอบรูป (L) มีขนาดไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นการนำแฟกเตอร์ของ (JA/L) เข้าไปร่วมกับสมการเดิมของ Sverak ทำให้ค่าความต้านทานของขั้วแคบของคอลลิ่งดินมีค่าผิดเพี้ยนยิ่งขึ้น ดังในสมการที่ (5) แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ (5) ก็จะทำให้ค่าที่บอกหอนักในกรณีที่รูปร่างของขั้วแคบของคอลลิ่งดินมีลักษณะเป็น รูปตัว "V", รูปตัว "B", รูปตัว "O" ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะไม่นพบ

การเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่า

เมื่อพิจารณา ค่า ค.ต.ท ของแท่งที่วัดด้วยแผ่นลาดกึ่งหลายขนาด ที่ความลึกต่างๆในรูปที่ 5 จะพบว่าความลึกนั้นของค่า ค.ต.ท ของแท่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นลาดกึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลสัมพันธ์กับขนาดความลึกที่วัด ซึ่งผลของการวางแผ่นลาดกึ่งบนขั้วแคบของคอลลิ่งดิน นอกจากจะทำให้ค่า ค.ต.ท ของแท่งเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ค่าความต้านทานที่วัดด้วยแผ่นลาดกึ่ง และเมื่อวางบนขั้วแคบของคอลลิ่งดินที่แห้งแล้ง

เหมาะสมในรูปที่ 6 จะสามารถลด Mesh Voltage ที่เกิดขึ้นบนขั้วแคบของคอลลิ่งดินทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น (Mesh Voltage คือ ค่าลดลงของ Mesh Voltage ที่เกิดขึ้นบนขั้วแคบของคอลลิ่งดินและเกิดความไม่ปลอดภัย) แต่การวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมดังในรูป 6c ก็อาจทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยขึ้นได้เช่นกัน

สรุป

เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นกับปัจจัยต่างๆหลายประการ เช่น ชนิดของดิน ปริมาณความชื้นและระดับน้ำใต้ดิน วัสดุและสารเคมีที่ละลายในบริเวณนั้น ความลึก ฯลฯ ทำให้ค่าความต้านทานของดินเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และทำให้ค่าที่วัดได้ เปลี่ยนแปลงไปตามสถานที่และฤดูกาล ดังนั้น จึงต้องพยายามวัดค่าความต้านทาน ที่ดินต้องที่ลึกในระดับความลึกที่ต้องการ และควรคำนึงถึงปริมาณระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล และทำให้ค่าอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการใช้ในการคำนวณ หรือค่าที่ได้จากการคำนวณ เช่น R_s มีความถูกต้องมากที่สุดจึงได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่าความต้านทานที่เท่าก็เป็นวิธีหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับขั้วแคบของคอลลิ่งดินได้เป็นอย่างดีเมื่อวางในตำแหน่งที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

1. ศ.ล. บรรจงจิตร, อลงกรณ์ พรหมอวดดี, "ระบบคอลลิ่งของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดต่างๆ" วารสาร การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14, พ.ศ. 2534
2. IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING. ANSI/IEEE Std.80-1986
3. Donald A. Blank, "Evaluation of Ground Resistance of a Ground Grid of Any Shape" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.6, No.2, April 1991
4. B. Thapar, "Increasing of Ground Resistance of Human Foot in Substation Yards" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.4, No.3, July 1989
5. Getting Down to Earth, Manual on Earth Resistance Testing (25T), James G. Biddle Company, 1970.

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้