

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

DESIGNS OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEMS



เลขหม.....
เลขทะเบียน... 41495
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2545

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-517-2

DESIGNS OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEMS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

ISBN 974-648-517-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย
นักศึกษา	นายธิตี เอี่ยมมงคล
รหัสประจำตัว	42061084
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศุทธิ บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบต่อลงดินที่ดีของสถานีไฟฟ้านั้นจะเน้นไปที่ความปลอดภัยของมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก นอกจากนั้นจะต้องทำให้การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ สำหรับความปลอดภัยของระบบต่อลงดินนั้นจะพิจารณาจากค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ซึ่งในการออกแบบนี้จะทำการพิจารณาถึงผลของค่ากระแสแตรกริดที่เกิดขึ้นรวมถึงมีการพิจารณาถึงรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินในรูปแบบต่างๆกันอีกทั้งยังได้นำเสนอถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

Thesis Title Deigns of Substation Grounding Systems
Student Mr. Thiti Uemongkol
Student ID. 42061084
Degree Master of Engineering (Electrical Engineering)
Programme Electrical Engineering
Year 2001
Thesis Advisor Assoc.Prof. Sulee Banjongjit

ABSTRACT

The good design of a grounding system in a substation is to be safe for human. In addition, protective devices in the substation have to function properly during both normal operations and fault conditions. Safety conditions for grounding systems are measured in a term of the maximum step voltage and the maximum touch voltage.

This thesis presents designs of grounding systems of a substation. The grid current is used as a parameter for the designs. Various types of grounding system are discussed. Factors effecting on the grounding system are illustrated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี เพราะได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ. ศุติ บรรจงจิตร โดยตลอดผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ. มณฑล ลีลาจินดา ไกรฤกษ์.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร รวมถึงอาจารย์ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงทุกคนในครอบครัวเอื้อมงคลและอิทธิศิริเวชช์ สำหรับ ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำและกำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดเวลา

ขอขอบพระคุณ คุณ อนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช และ คุณ อารี มุตดาวรงค์ จากบริษัทศรีอุ ทองที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน

ขอขอบพระคุณ คุณ ลือชัย สุรพรพันธ์ คุณ พุทธิขจร บุญมี และคุณ สันติ ธรรมรักษ์ จาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยสำหรับข้อมูลที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน

ขอขอบคุณ คุณ พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง และคุณ สุนทร ฝ่ายหมื่น ไวย์ เพื่อนนักศึกษาที่ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธิตี เอื้อมงคล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 จุดประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดินและเกณฑ์การพิจารณาความปลอดภัย.....	4
2.1 จุดประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดิน.....	4
2.2 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย.....	4
2.3 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบต่อลงดิน.....	5
2.4 ค่าความต่างศักย์ที่เกิดในสภาวะผิดปกติ.....	6
2.5 ความสามารถในการทนต่อกระแสไฟฟ้าของมนุษย์.....	8
2.5.1 ผลเนื่องจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย.....	8
2.5.2 ผลเนื่องจากปริมาณกระแสและระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย.....	8
2.6 ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์.....	10
2.7 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ.....	10
2.8 ผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า.....	14
2.9 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและวัสดุที่โรยที่ผิวดิน.....	23
2.9.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.9.1.1	ค่าความเป็นกรดเบสหรือค่าความเค็มที่แสดงอยู่ในดิน...	23
2.9.1.2	อุณหภูมิ.....	23
2.9.1.3	ความชื้น.....	23
2.9.2	ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน.....	24
บทที่ 3	องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	26
3.1	คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน.....	26
3.2	โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน.....	26
3.2.1	ทองแดง.....	26
3.2.2	เหล็กชุบทองแดง.....	26
3.2.3	อลูมิเนียม.....	26
3.2.4	เหล็ก.....	27
3.3	การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน.....	27
3.4	ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน.....	29
3.5	ค่ากระแสกริด.....	30
3.6	การวิเคราะห์หาค่า rms ของกระแสกริดแบบสมมาตร.....	35
3.6.1	วิธีวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดของ Endrenyi.....	35
3.6.2	วิธีวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดของ Seedher.....	37
3.6.3	วิธีวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดโดยวิธี Decoupled.....	39
3.7	ค่า rms. ของกระแสลัดวงจรลงดินแบบสมมาตร.....	44
บทที่ 4	การออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า.....	47
4.1	หลักการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า.....	47
4.2	การพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุด.....	50
4.2.1	ค่าแรงดัน ไฟฟ้าเมฆสูงสุด.....	50
4.2.2	ค่าแรงดัน ไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุด.....	53
4.3	เปรียบเทียบค่าสมการที่ใช้หาค่า C_g โดยประมาณ.....	54
4.4	โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.1 หน้าต่างหลัก.....	55
4.4.2 หน้าต่างข้อมูลเบื้องต้น.....	56
4.4.3 หน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำ.....	57
4.4.4 หน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดิน	58
4.4.5 หน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอก.....	60
4.5 ตัวอย่างการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้โปรแกรม.....	61
บทที่ 5 ผลการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย.....	73
5.1 ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลองออกแบบ.....	73
5.2 ผลลัพธ์จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดิน.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	131
เอกสารอ้างอิง.....	137
ภาคผนวก:ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ.....	24
2.2 ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวดินกรณีเปียกกับไม่เปียก.....	25
3.1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำดิน.....	29
3.2 ค่า D_f ที่ความถี่ 50 Hz. ที่ค่า $X/R = 10-20$ และ $t_f = 0.01 - 1$ วินาที.....	32
4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของสมการที่ใช้หา C_u โดยประมาณ.....	54
5.1 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร.....	76
5.2 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร.....	78
5.3 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร.....	80
5.4 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร.....	82
5.5 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร.....	87
5.6 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร.....	89
5.7 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร.....	91
5.8 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร.....	93
5.9 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร.....	98
5.10 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร.....	100
5.11 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร.....	102

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.12 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร.....	104
5.13 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงตัวทีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร.....	109
5.14 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงตัวทีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร.....	111
5.15 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงตัวทีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร.....	113
5.16 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงตัวทีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร.....	115
5.17 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร.....	120
5.18 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร.....	122
5.19 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร.....	124
5.20 ผลการออกแบบตะแกรงตอลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร.....	126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตะแกรงต่อลงดินขนาด 16 เมช.....	4
2.2 การเชื่อมต่อระบบต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	5
2.3 ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน	5
2.4 รูปแบบการเกิดแรงดันต่างที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน.....	7
2.5 การเกิดแรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์.....	7
2.6 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดัน ไฟฟ้าสัมผัส.....	11
2.7 วงจรสมมูลของมนุษย์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันสัมผัส.....	11
2.8 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดัน ไฟฟ้าช่วงก้าว.....	13
2.9 วงจรสมมูลขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดัน ไฟฟ้าช่วงก้าว.....	13
2.10 การโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า.....	14
2.11 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า K เปลี่ยนแปลง จาก -0.1 ถึง -0.9 และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	18
2.12 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.91$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	18
2.13 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.92$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	19
2.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.93$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	19
2.15 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.94$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	20
2.16 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.95$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	20
2.17 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.96$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	21
2.18 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.97$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	21
2.19 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.98$ และทำ การเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.99$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร.....	22
2.21 กราฟค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในดิน.....	24
3.1 ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย I_F , I_r และค่า dc offset ที่เกิดขึ้น.....	31
3.2 การเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อไม่มีการต่อนิวทรัลลงดิน.....	33
3.3 การเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไม่มีการต่อนิวทรัลลงดินส่วนทางด้านทุติยภูมิและระบบภายนอกที่เชื่อมต่อมีการต่อนิวทรัลลงดิน.....	34
3.4 การเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรัลลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อมีการต่อนิวทรัลลงดิน.....	34
3.5 การเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ากับระบบต่อลงดินภายนอก.....	35
3.6 วงจรสมมูลแสดงการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดิน.....	36
3.7 วงจรสมมูลของระบบต่อลงดินที่เชื่อมต่อกันหลังจากแทนค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินภายนอกด้วยอิมพีแดนซ์สมมูล.....	36
3.8 วงจรขั้วบันได.....	37
3.9 วงจรสมมูลของ Seedher สำหรับคำนวณหาค่ากระแสกริดที่มีการเชื่อมต่อจำนวน n วงจร...38	
3.10 การเชื่อมต่อกันของสถานีไฟฟ้า 3 สถานีซึ่งประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้า A,B และ C.....	39
3.11 วงจรสมมูลของการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินระหว่างสถานีไฟฟ้าทั้ง 3 กับระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าเนื่องจากสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า.....	40
3.12 กระแสลำดับศูนย์ที่เกิดขึ้นภายในสายส่งขณะเกิดการลัดวงจรลงดินทางด้านปฐมภูมิของสถานีไฟฟ้า B.....	40
3.13 วงจรสมมูลแสดงการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินหลังจากทำการแทนกระแสลัดวงจรและกระแสนิวทรัลที่เกิดขึ้นด้วยแหล่งจ่ายกระแสแล้ว.....	41
3.14 ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าและค่ากระแสลำดับศูนย์ในสายส่ง ขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน.....	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรหลังจากทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างสายตัวนำกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายกระแส.....	42
3.16 วงจรสมมูลหลังจากทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายกระแส.....	42
3.17 วงจรสมมูลหลังจากทำการขุดวงจรขนานแล้ว.....	43
3.18 วงจรสมมูลหลังจากทำการรวมค่าแหล่งจ่ายกระแสที่ node ต่างๆ เข้าด้วยกันแล้ว.....	43
3.19 วงจรสมมูลหลังจากทำการแทนวงจรชั้นบันไดของสายส่งและระบบต่อลงดินของเสาส่งด้วยวงจรสมมูลพาย.....	43
3.20 วงจรสมมูลหลังจากทำการลดรูปจนสมบูรณ์แล้ว.....	44
4.1 แผนภาพของกระบวนการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	48
4.2 หน้าต่างหลักของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน.....	55
4.3 หน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน.....	56
4.4 หน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน.....	58
4.5 หน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน.....	59
4.6 หน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน.....	60
4.7 หน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	62
4.8 หน้าต่างข้อมูลสายตัวนำในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	63
4.9 หน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	63
4.10 หน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	65
4.11 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	66
4.12 หน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล.....	66
4.13 หน้าต่างข้อมูลสายตัวนำในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล.....	67
4.14 หน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล.....	68
4.15 หน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล.....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล.....	70
5.1 การเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าย่อยลาดพร้าวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต.....	73
5.2 ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร.....	74
5.3 ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร.....	74
5.4 ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลมีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร.....	75
5.5 ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวที่มีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร.....	75
5.6 ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมมีขนาดพื้นที่ 68,750 ตารางเมตร.....	75
5.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	84
5.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	85
5.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$	86
5.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	95
5.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	96
5.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$	97
5.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงตัวแอลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	106
5.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	107
5.15 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$	108
5.16 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงตัวที่มีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	117

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวทึ่เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	118
5.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวทึ่เมื่อมีการเปลี่ยนความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$	119
5.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	128
5.20 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$	129
5.21 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมที่เมื่อมีการเปลี่ยนความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$	130

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ หลายส่วนด้วยกัน รวมถึงสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมโยงระบบจากโรงไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ หรือเป็นการเชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าด้วยกัน ซึ่งในสถานีไฟฟ้าแต่ละสถานีนี้อาจต้องมีผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในดังนั้นความปลอดภัยของผู้ที่ปฏิบัติงานจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก โดยเฉพาะความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการลัดวงจรลงดินของระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีกระแสไหลผ่านร่างกายของผู้ที่ปฏิบัติงานเมื่อยืนระหว่างจุด 2 จุดที่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น และถ้ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าสูงมากเกิน ไปก็อาจมีอันตรายจนถึงแก่ชีวิตได้ จากประเด็นนี้จึงได้มีการนำระบบต่อลงดินมาใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อช่วยจำกัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันอันตรายให้แก่บุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้านั้นๆ ได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอหลักการที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินและปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดินซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน, ค่ากระแสกริด, ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน, ขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน, ความหนาของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน รวมไปถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการออกแบบระบบต่อลงดิน เพื่อนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความรวดเร็ว นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบได้จริงในทางปฏิบัติ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทำการศึกษาถึงหลักการออกแบบระบบต่อลงดินและการผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ, ขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินระบบต่อลงดิน และระดับความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดินว่ามีผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า โดยอาศัยโปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบต่อลงดินให้เกิดความปลอดภัย

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การลดระยะห่างระหว่างตัวนำของระบบต่อลงดิน, การเพิ่มขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน และการเพิ่มระดับความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินนั้นจะเป็นการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเพื่อเป็นการปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความปลอดภัย

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาเฉพาะตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า, ตัวแอล, ตัวที และรูปทรงสามเหลี่ยมโดยตะแกรงต่อลงดินที่ทำการศึกษานี้จะมีช่องตะแกรงต่อลงดิน หรือเมฆเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น สำหรับวิธีการพิจารณาหาค่ากระแสกริดนั้นจะใช้วิธีของ Seedher เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการตรวจสอบและยอมรับว่ามีความถูกต้องสำหรับและพิจารณาว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ใช้ในการออกแบบเป็นแบบสมน้ำเสมอ สำหรับข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการศึกษาคือไม่สามารถทำการทดลองในสถานที่จริงได้ แต่สามารถนำข้อมูลบางอย่างที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินและข้อมูลของสถานีไฟฟ้าที่มีอยู่จริงมาใช้ในการศึกษาและทดลองออกแบบระบบต่อลงดิน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ศึกษาถึงหลักการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ซึ่งจะใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ
2. ศึกษาถึงการพิจารณาเลือกขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน
3. ศึกษาถึงวิธีการพิจารณาหาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดิน
4. ศึกษาถึงการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า
5. ศึกษาการใช้โปรแกรมโปรแกรม Visual Basic เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน
6. ศึกษาถึงขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน
7. ทำการเขียนโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้โปรแกรม Visual Basic
8. ทดลองทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยนำข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าย่อยลาดพร้าวมาทำการทดลองออกแบบระบบต่อลงดิน

9. ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อค่าแรงดัน ไฟฟ้าเมฆเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างตัวนำ, ขนาดของของตัวนำและระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบต่อลงดิน
10. สรุปผลจากการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำโปรแกรมช่วยที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ และเข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ, ขนาดตัวนำและระดับความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดินเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินให้เกิดความปลอดภัย



บทที่ 2

จุดประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดินและเกณฑ์การพิจารณา ความปลอดภัย

ในบทนี้จะนำเสนอจุดประสงค์ของการออกแบบระบบต่อลงดินและนำเสนอหลักการ และทฤษฎีการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถ ทนได้เพื่อนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออก แบบ

2.1 จุดประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดิน [1]

1. เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าให้สามารถไหลลงดินได้สะดวก ทั้งในภาวะที่เกิด กระแสผิดปกติปริมาณสูงเนื่องจากฟ้าผ่า หรือการลัดวงจรลงดินในระบบ ให้สามารถไหลลงดินได้ โดยไม่สร้างผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในสถานีไฟฟ้า

2. เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้ผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ในสถานีไฟฟ้าได้รับอันตรายเนื่องจากกระแส ไฟฟ้าเมื่อมีกระแสปริมาณสูงไหลลงสู่ดิน

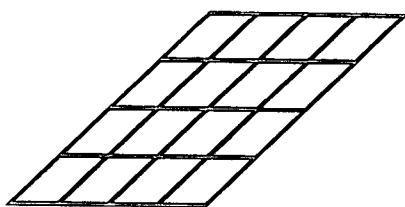
2.2 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าใช้เป็นแบบตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid) เนื่องจาก ระบบต่อลงดินแบบตะแกรงมีข้อดีดังต่อไปนี้

1. ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแบบตะแกรงต่อลงดินนี้ สามารถทนต่อปริมาณกระแส ที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดิน ได้มากกว่าระบบต่อลงดินแบบอื่น

2. ระบบต่อลงดินแบบตะแกรงต่อลงดินนี้จะมีค่าความต้านทานน้อย

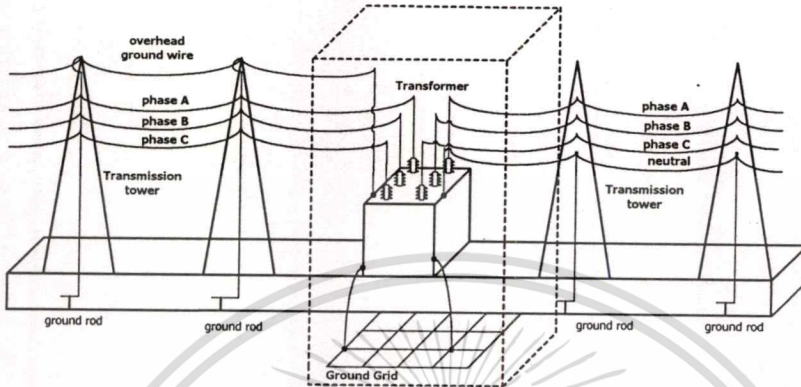
ดังนั้นสามารถแสดงลักษณะของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบตะแกรงต่อลงดิน ได้ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงตะแกรงต่อลงดินขนาด 16 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.1 นั้นเป็นตะแกรงต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี 16 เมช (Mesh) โดยที่เมชคือช่องสี่เหลี่ยมที่อยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน สำหรับการใช้งานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจะใช้เป็นจุดต่อลงดินของโครงสร้างที่เป็น โลหะที่ติดตั้งอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ตัวถังของอุปกรณ์ และยังใช้เป็นจุดต่อนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อระบบต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.3 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบต่อลงดิน

เมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติของลงดิน (Ground Fault Condition) ภายในสถานีไฟฟ้า จะส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ทำให้เกิดค่าศักดาไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอขึ้นที่ผิวดินภายในสถานีไฟฟ้า และบริเวณรอบๆ สถานีไฟฟ้าดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน [2]

(ก) ระบบต่อลงดินและเส้นสมศักย์ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบๆ

(ข) แนวเส้นสมศักย์ 3 มิติ (Equipotential Contour)

ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวดินมีค่าไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณข้างเคียง ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความปลอดภัยของมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้า ถ้าค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามีค่ามากเพียงพอจะทำให้ผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับอันตรายเนื่องจากกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องจำกัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถทำให้มนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับอันตรายถึงแก่ชีวิต สามารถสรุปสาเหตุที่อาจจะทำให้ถูกได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้าในขณะที่เกิดศักดาไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอขึ้นบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณข้างเคียงได้ดังนี้ [1,2]

1. กระแสผิดปกติ (Fault Current) ปริมาณมากไหลลงสู่ดินมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับขนาดของระบบต่อลงดิน และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการเทียบกับค่าความต้านทานของดินที่ตำแหน่งห่างจากสถานีไฟฟ้า(remote ground)
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงทำให้เกิดการกระจายของกระแสลงดินมีค่าต่ำเป็นสาเหตุให้เกิดค่าศักดาไฟฟ้าที่ผิวดินมีค่าไม่สม่ำเสมอซึ่งบางจุดอาจจะมีค่าศักดาไฟฟ้าสูงบางจุดอาจจะมีค่าศักดาไฟฟ้าต่ำเป็นต้น
3. มีส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายมนุษย์ทำหน้าที่เป็นสะพานไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุดที่มีค่าความต่างศักย์สูงตกรวมอยู่
4. ความต้านทานที่สัมผัสกับร่างกาย(Contact Resistance) หรือค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อยทำให้ไม่สามารถจำกัดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านร่างกายให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยได้
5. ช่วงระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจะมีผลต่อการเกิดอันตรายต่อมนุษย์ เช่น เมื่อกำหนดให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายด้วยปริมาณคงที่ค่าหนึ่ง อันตรายที่จะเกิดขึ้นต่อมนุษย์นี้จะแปรผันตามระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย

2.4 ค่าความต่างศักย์ที่เกิดในสภาวะผิดปกติ [1,2]

ค่าความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อยดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะทำอันตรายต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าขณะที่เกิดการลัดวงจรลงดินนั้นจะสามารถนิยามได้ดังต่อไปนี้ [1,2]

แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Ground Potential Rise, GPR) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเพิ่มขึ้นที่ผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างตะแกรงต่อลงดินเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้า (remote ground)

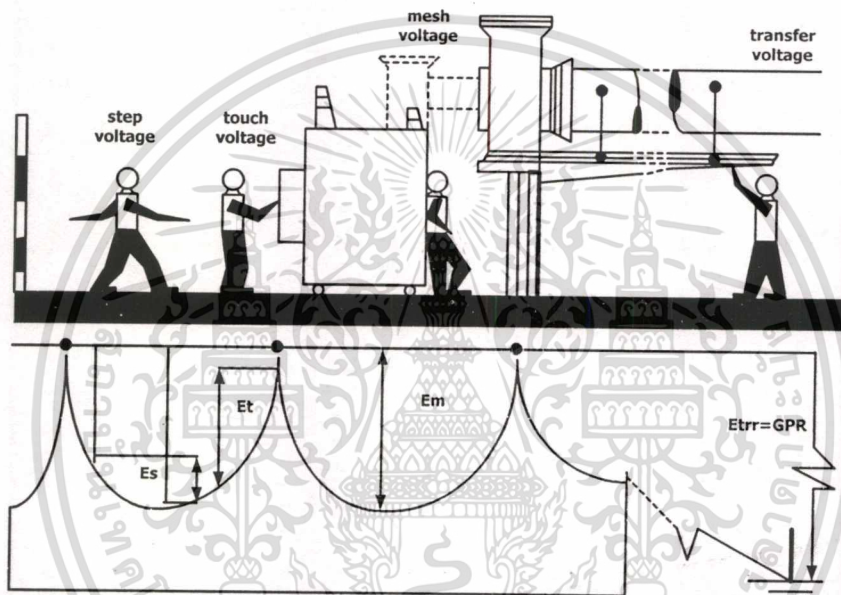
แรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว (Step Voltage, Es) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวดินระหว่างจุดสองจุดที่เท้าทั้งสองข้างสัมผัสพื้นซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ 1 เมตร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

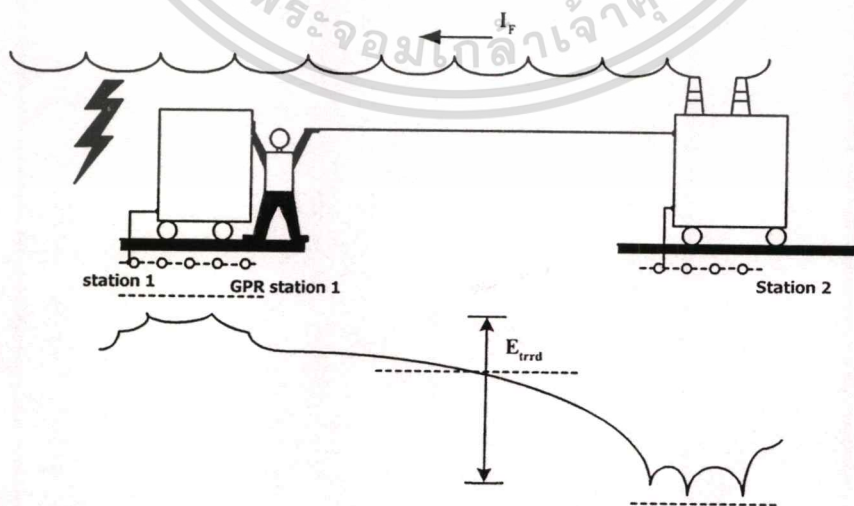
แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage, E_t) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดที่มนุษย์ยืนอยู่โดยที่มือมีการสัมผัสอยู่กับโครงสร้างที่เป็นโลหะหรือตัวถังของอุปกรณ์ที่ทำการต่อลงดินไว้

แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh Voltage, E_m) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในร่องตาข่ายของตะแกรงต่อลงดิน

แรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transferred Voltage, E_{trrd}) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้ามาหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งจะเป็นกรณีย่อยกรณีหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส สามารถแสดงรูปการเกิดศักดาไฟฟ้าทรานสเฟอร์ได้ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการเกิดแรงดันต่างที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน [2]



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ความสามารถในการทนต่อกระแสไฟฟ้าของมนุษย์ [1]

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายอาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย ถ้าหากร่างกายได้รับกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูงกว่าขีดจำกัดที่ร่างกายทนได้แล้วจะทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิต เนื่องจากจะทำให้เกิดอาการหัวใจเต้นผิดจังหวะ (Ventricular Fibrillation) และส่งผลให้การไหลเวียนของเลือดผิดปกติ [1]

2.5.1 ผลเนื่องจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย [1]

ที่ความถี่ 50-60 Hz. จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณเพียง 0.1 A. ไหลผ่านร่างกายสามารถที่จะทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ จากเอกสารอ้างอิง [1,2] พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 25 Hz มนุษย์สามารถทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายได้ในปริมาณที่มากกว่ากระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงถึง 5 เท่า และที่ความถี่ 3000-10000 Hz. มนุษย์จะสามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณที่มากกว่าที่ความถี่ 50-60 Hz. ดังนั้นจะพบว่าความถี่สูงๆ มนุษย์จะสามารถทนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายได้มากกว่าที่ความถี่ต่ำๆ

2.5.2 ผลเนื่องจากปริมาณกระแสและระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย [1]

เมื่อร่างกายได้รับกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 50-60 Hz. เข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่ต่างกันจะส่งผลกระทบต่อร่างกายในแบบต่างๆ กันดังนี้

กระแสไฟฟ้าปริมาณ 1 mA. จะเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มนุษย์จะเริ่มรู้สึกว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย โดยไม่สามารถทำอันตรายต่อมนุษย์ได้

กระแสไฟฟ้าปริมาณ 1-6 mA. เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สามารถไหลผ่านร่างกายมนุษย์ได้โดยที่ไม่สามารถทำอันตรายต่อมนุษย์ได้ และไม่มีผลกระทบต่อระบบประสาทในการควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อให้สามารถจับหรือปล่อยวัตถุได้

กระแสไฟฟ้าปริมาณ 9-25 mA. เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ผิวหนังไหม้ได้ และระบบประสาทไม่สามารถควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อให้จับ หรือปล่อยวัตถุได้และอาจจะทำให้การหายใจติดขัดเนื่องจากการหดตัวของกล้ามเนื้อ

กระแสไฟฟ้าปริมาณ 60-100 mA. เป็นกระแสไฟฟ้าปริมาณนี้สามารถที่จะทำให้เกิดอาการ Ventricular Fibrillation การหายใจติดขัด และอาจทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิตได้

สำหรับการพิจารณาถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิต นั้น Danziel [1,2] ได้เสนอสมการแสดงค่าความสัมพันธ์ของ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (I_B) ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (t_s) และค่าปริมาณพลังงานที่ร่างกายสามารถทนได้เมื่อถูกกระแสไฟฟ้าช็อต (S_B) ดังในสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ S_B = ค่าปริมาณพลังงานที่ร่างกายสามารถทนได้เมื่อถูกกระแสไฟฟ้าช็อต
 t_s = ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (s.)
 I_B = ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (A.)

สมการที่ (2.1) มีข้อจำกัดคือ ระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (t_s) ต้องอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 3.0 วินาที จากสมการที่ (2.1) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายได้ดังในสมการที่ (2.2) และ (2.3)

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

$$k = \sqrt{S_B} \quad (2.3)$$

Danzel ระบุว่าค่าพลังงานสะสมสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้ในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายมีค่าดังนี้ $S_B = 0.0135$ ซึ่งจะได้อ่า $k = 0.116$ [1] ซึ่งจากสมการที่(2.2) ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมและระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายดังในสมการที่ (2.4)

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.4)$$

สำหรับค่าพลังงานสะสมสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายนั้นมีค่าดังนี้ $S_B = 0.0246$ ซึ่งจะได้อ่า $k = 0.157$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์สัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมและระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายดังในสมการที่ (2.5)

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.5)$$

สำหรับสมการที่ (2.4) และ (2.5) นั้นจะมีค่าความปลอดภัยอยู่ที่ 99.5 % [1,2]

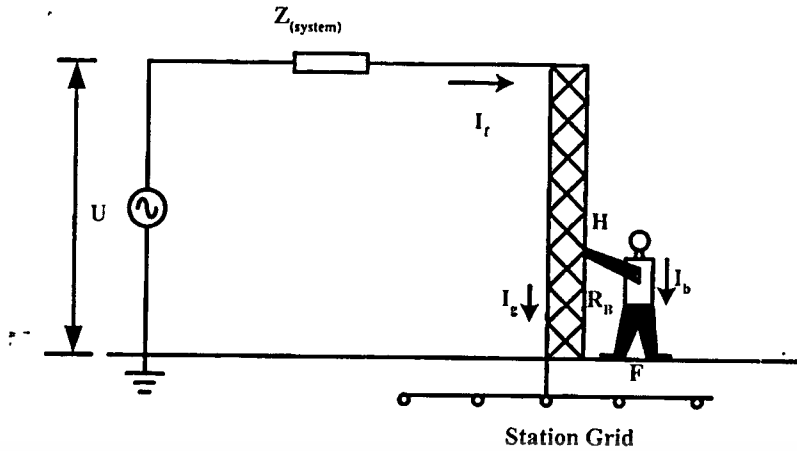
2.6 ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ [1,2]

ในสภาวะปกติร่างกายมนุษย์จะมีค่าความต้านทาน 500-3000 โอห์ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของร่างกาย เนื่องจากค่าความต้านทานของร่างกายจะแปรผกผันกับค่าความชื้นของร่างกาย สำหรับค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์นี้จะนำไปใช้ในการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิต เพื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ไปใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงความปลอดภัยของสถานีไฟฟ้าที่ทำการออกแบบ โดย IEEE Std 80-2000 และ IEEE Std 80-1986 [1,2] ได้กำหนดให้ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (R_B) มีค่าเท่ากับ 1000 โอห์ม

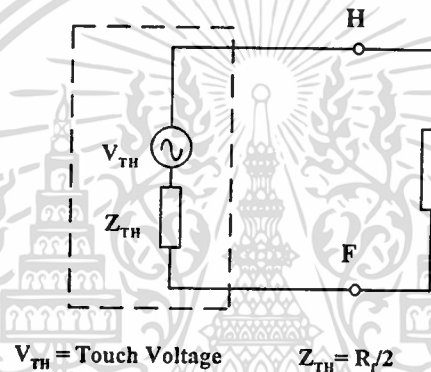
$$R_B = 1000 \quad \Omega \quad (2.6)$$

2.7 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

เมื่อเกิดค่าศักดาไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นบนพื้นผิวภายในสถานีไฟฟ้าเหนือระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบสถานีไฟฟ้า จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดหรือค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นในสถานีไฟฟ้าและรอบสถานีไฟฟ้า ผลของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะทำอันตรายต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบสถานีไฟฟ้าได้ ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้นจึงต้องทำการพิจารณาความปลอดภัยต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก จึงได้ค่าความต่างศักย์หรือค่าแรงดันระหว่างจุดสองจุดที่มักจะทำอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้ามาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงเกณฑ์ความปลอดภัยของระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าซึ่งก็คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ในรูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสตามลำดับ [1] ส่วนในรูปที่ 2.8 และ 2.9 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว [1] ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส [1]



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันสัมผัส [1]

มนุษย์ได้รับแรงดันสัมผัสเมื่อทำการสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินไว้กับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้างดังในรูปที่ 2.6 โดยค่าความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่มีสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ (H) กับตำแหน่งที่มนุษย์ยืน (F) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากมือข้างที่สัมผัสไปยังเท้าทั้งสองที่สัมผัสกับพื้นเพื่อใช้เป็นเส้นทางให้สำหรับไหลลงดินของกระแส จากรูปที่ 2.6 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดันได้ดังในรูปที่ 2.7 ดังนั้นจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสซึ่งก็คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรสมมูลนี้ ดังแสดงในสมการที่ (2.7)

$$I_b = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 นี้จะพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดได้เมื่อกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.4) และ (2.5) ซึ่งทำให้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.8)

$$E_{\text{touch}} = (R_B + \frac{R_f}{2})I_B \quad (2.8)$$

สำหรับค่าความต้านทานของเท้า นั้นสามารถแสดงได้ดังในสมการที่ (2.9)

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω/m)
 b คือ รัศมีของเท้าในที่นี้เท้าแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมรัศมี 8 เซนติเมตร

จากสมการที่ (2.9) ทำให้ได้ค่าความต้านทานของเท้าโดยประมาณดังในสมการที่ (2.10)

$$R_f \approx 3\rho \quad (2.10)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.4), (2.6), (2.8) และ (2.10) จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.11)

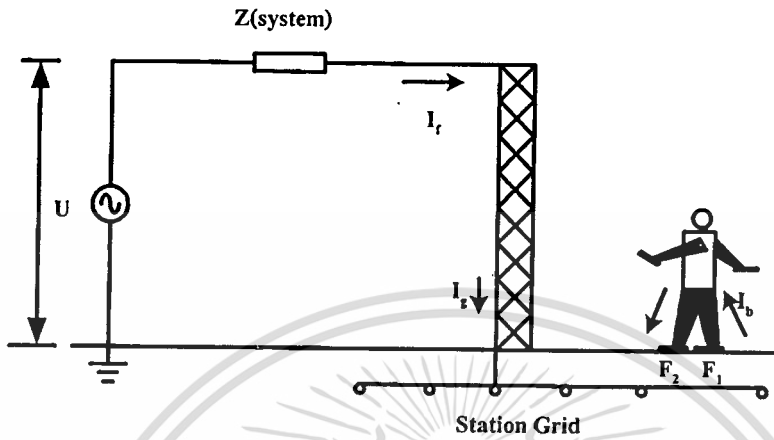
$$E_{\text{touch } 50} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.11)$$

และจากสมการที่ (2.5), (2.6), (2.8) และ (2.10) จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.12)

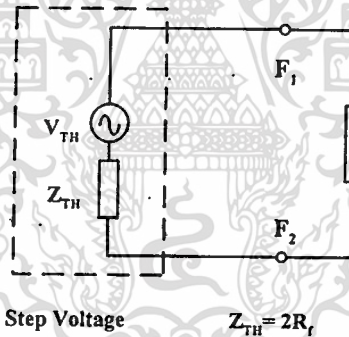
$$E_{\text{touch } 70} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าแรงดันช่วงก้าวนั้นเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้าสองเท้า ซึ่งผลของค่าต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจากเท้าข้างหนึ่ง (F_1) ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง (F_2) เพื่อใช้เป็นเส้นทางให้กระแสไหลลงดินได้ ดังในรูปที่ (2.8)



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว [1]



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสมมูลขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว [1]

ดังนั้นในกรณีที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายได้จากสมการที่ (2.8) เนื่องจากค่า V_{TH} นำเสนอในวงจรสมมูลรูปที่ 2.9 นี้คือค่าแรงดันช่วงก้าว ดังนั้นจะได้สมการของแรงดันช่วงก้าวสูงสุดเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (I_b) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังในสมการ(2.4) และ(2.5) สามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวได้ดังในสมการที่ (2.13)

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (2.13)$$

และจากสมการที่ (2.4), (2.6), (2.8) และ (2.13) ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.14)

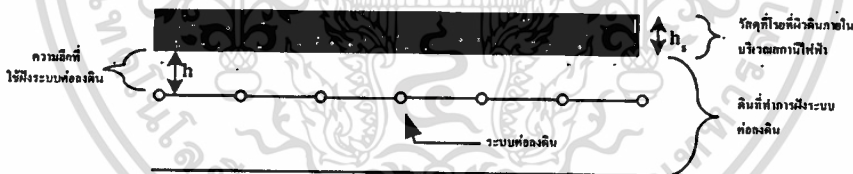
$$E_{\text{step}50} = (1000 + 6\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.5), (2.6), (2.8) และ (2.13) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดสำหรับมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถแสดงได้ดังในสมการที่ (2.15)

$$E_{\text{step}70} = (1000 + 6\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.15)$$

สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินในประเทศไทยนั้นจะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดของมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าความปลอดภัย

2.8 ผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 แสดงการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า

การโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้านี้จะใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดิน เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้าของมนุษย์ซึ่งปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันอันตรายให้กับมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าจากการได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นสามารถแสดงลักษณะการโรยวัสดุบนพื้นผิวภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าดังรูปที่ 2.10 โดยส่วนมากวัสดุที่ใช้ในการโรยที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้าของมนุษย์นั้น มักจะใช้หินกรวดที่มีความหนาระหว่าง 8 – 15 เซนติเมตร[1,2] และผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินนี้จะทำให้

ค่าความต้านทานของเท้าที่หาได้จากสมการที่(2.9) เปลี่ยนไปซึ่งสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (2.16)

$$R_f = (\rho_s/4.b).C_s \quad (2.16)$$

โดยที่ C_s คือ ค่าตัวคูณลดที่เกิดเนื่องจากความหนาของวัสดุที่โรยบนผิวดิน

การคำนวณหาค่าในการคำนวณหา C_s นี้ในปี 1986 [1] ได้ระบุสมการที่ใช้สำหรับหา C_s ไว้ดังในสมการที่ (2.17)

$$C_s = 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad (2.17)$$

$$Q = \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nX)^2}} \quad (2.18)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.19)$$

$$X = h_s / b \quad (2.20)$$

ต่อมาในปี 1994 Thapar, Gerez และ Kejrival [3] ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่า C_s ขึ้นมาใหม่เนื่องจากสมการเดิมที่ใช้อยู่ นั้นหาได้จากการทดลองแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลมรัศมี 8 เซนติเมตร แต่เท้าจะประพุดตัวคล้ายกับแผ่นโลหะกลมรัศมี 8 เซนติเมตร โดยสมการที่นำเสนอขึ้นมาใหม่ นี้ได้กำหนดไว้ ใน [2] ดังแสดงไว้ในสมการที่ (2.21)

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} K^n R_{m(2nh_s)} \quad (2.21)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.22)$$

$$R_{m(2nh_s)} = \frac{V_{D2}}{I} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{D2} = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b (2\pi x \cdot V_{r,z}) dx \quad (2.24)$$

$$V_{r,z} = \frac{I \cdot \rho_s}{4\pi b} \sin^{-1} \left[\frac{2b}{\sqrt{(r-b)^2 + z^2} + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (2.25)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.26)$$

$$z = 2nh_s \quad (2.27)$$

โดยที่ $R_{m(2nh_s)}$ คือ ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างแผ่นโลหะที่ใช้แทนเท้าทั้งสองข้างที่เกิดขึ้นเป็นระยะทาง $(2nh_s)$ ในตัวนำที่มีค่าความหนาแน่นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s

จากสมการที่ (2.21) ค่า C_s จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) กับค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยที่ผิวดิน (ρ_s) มีค่าเท่ากันในรูปแบบที่ 2.11-2.20 นำเสนอค่า C_s ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.21) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า K ตั้งแต่ -0.1 ถึง -0.99 และค่าความหนาของของชั้นหินที่โรยตั้งแต่ 0 ถึง 30 เซนติเมตร แต่เนื่องจากการพิจารณาหาค่า C_s จากสมการที่ (2.21) นั้นเป็นวิธีที่ไม่สะดวกเพราะมีการคำนวณที่ยุ่งยาก จึงได้มีการนำเสนอสมการเพื่อใช้หาค่าโดยประมาณของค่า C_s ขึ้นมาใช้งานเพื่อให้มีความรวดเร็วในการคำนวณด้วยมือได้ โดยในปี 1994 Thapar, Gerez และ Kejriwal [3] ได้นำเสนอ สมการที่ (2.28) ขึ้นมาเพื่อใช้คำนวณหาค่า C_s โดยประมาณดังในสมการที่ (2.28)

$$C_s = \frac{1+K}{1-K} - \frac{4K}{\pi(1-K)} \tan^{-1}(2h/b) - 0.21K^2(e^{-7h} - e^{-30h}) \quad (2.28)$$

ต่อมาในปี 2000 [2] ได้นำเสนอสมการที่จะใช้ในการคำนวณหาค่า C_s โดยประมาณขึ้นดังในสมการที่ (2.29)

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความต้านทานของแท่งนี้ จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมการที่ (2.11) และ (2.12) ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนสำหรับมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัมเมื่อมีการโรยวัสดุที่ผิวดินได้ตั้งในสมการที่ (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$E_{\text{touch}50} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.30)$$

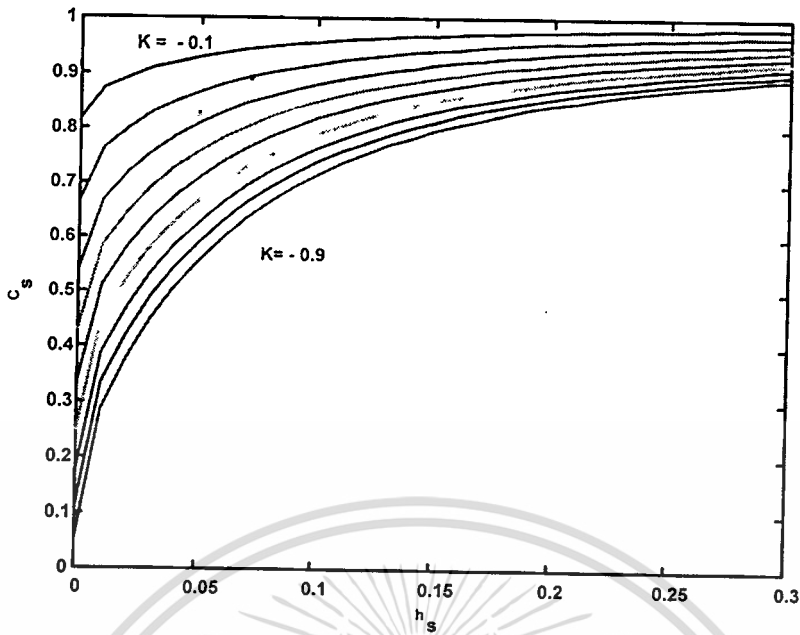
$$E_{\text{touch}70} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ เมื่อมีการโรยวัสดุที่ผิวดินได้ตั้งสมการที่ (2.32) และ (2.33) ตามลำดับ

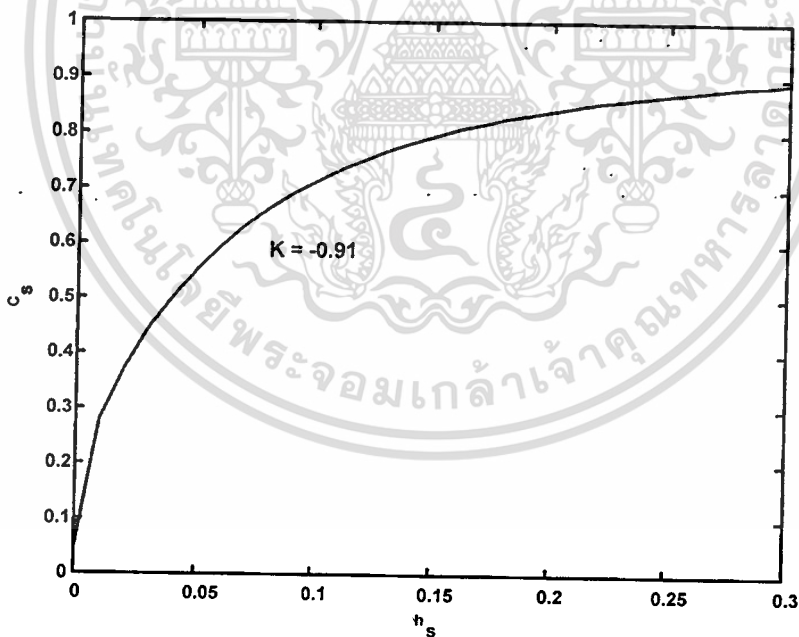
$$E_{\text{step}50} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.32)$$

$$E_{\text{step}70} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.33)$$

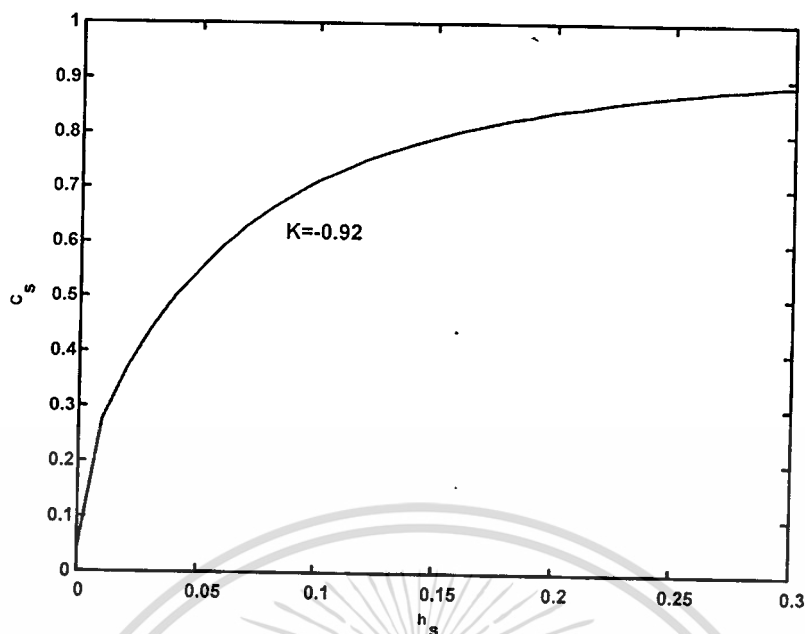
สมการที่ (2.30) ถึง (2.33) ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงค่าความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินในกรณีที่มีการโรยวัสดุที่ผิวดิน



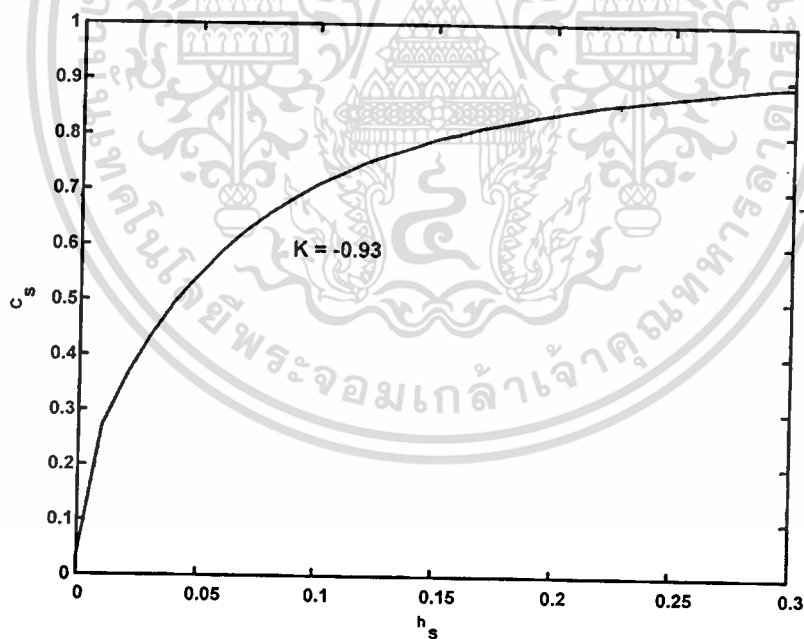
รูปที่ 2.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า K เปลี่ยนแปลงจาก -0.1 ถึง -0.9 และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร



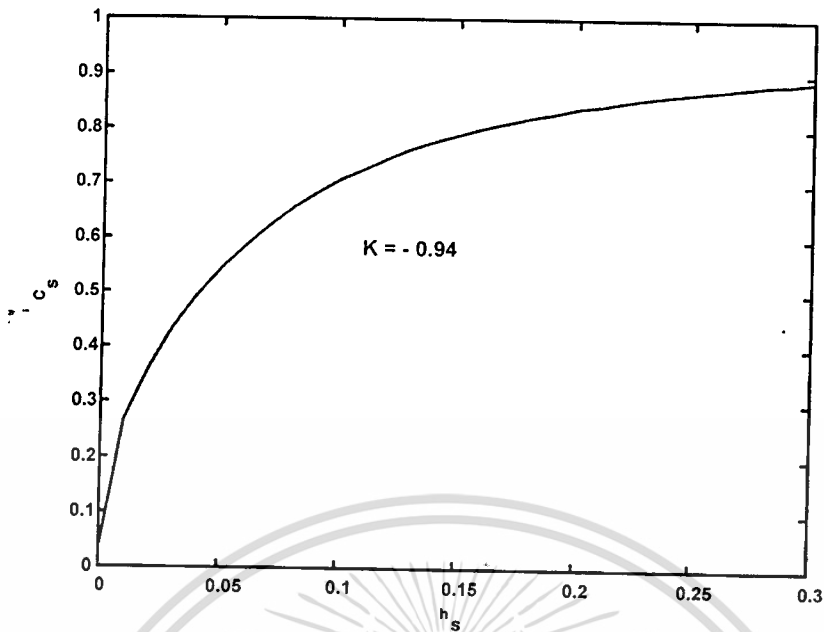
รูปที่ 2.12 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.91$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร



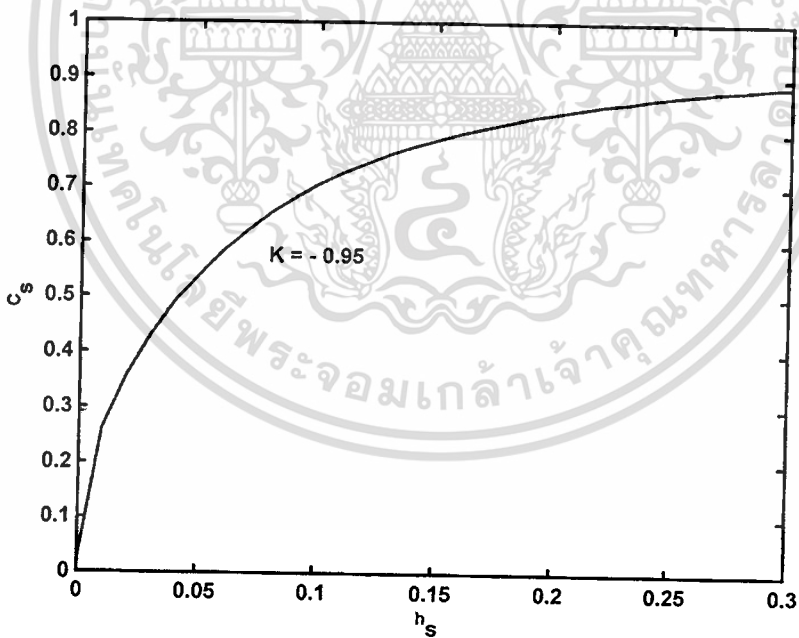
รูปที่ 2.13 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.92$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร



รูปที่ 2.14 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.93$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร

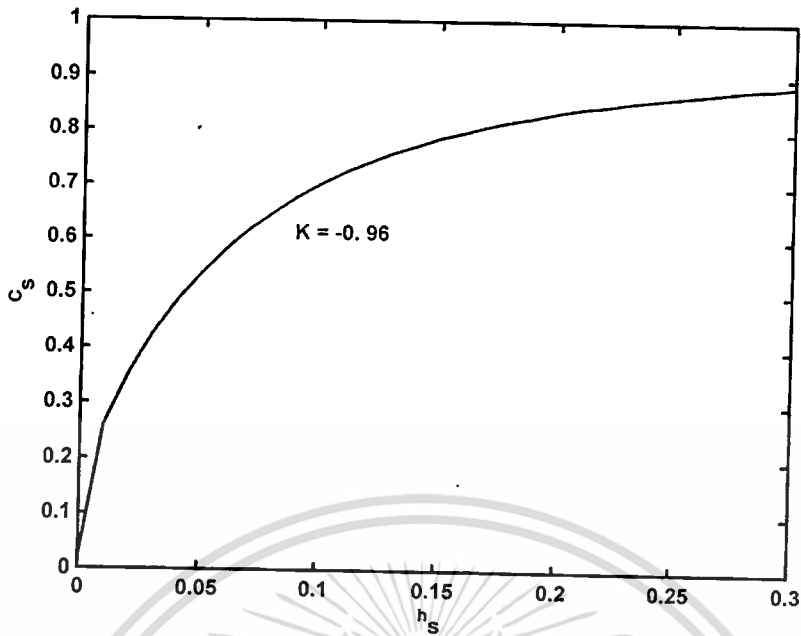


รูปที่ 2.15 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.94$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร

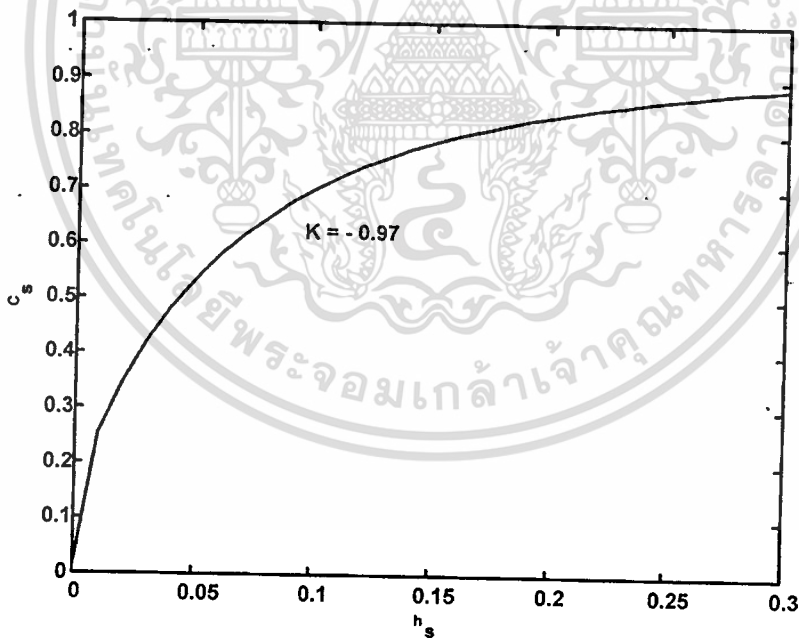


รูปที่ 2.16 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.95$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

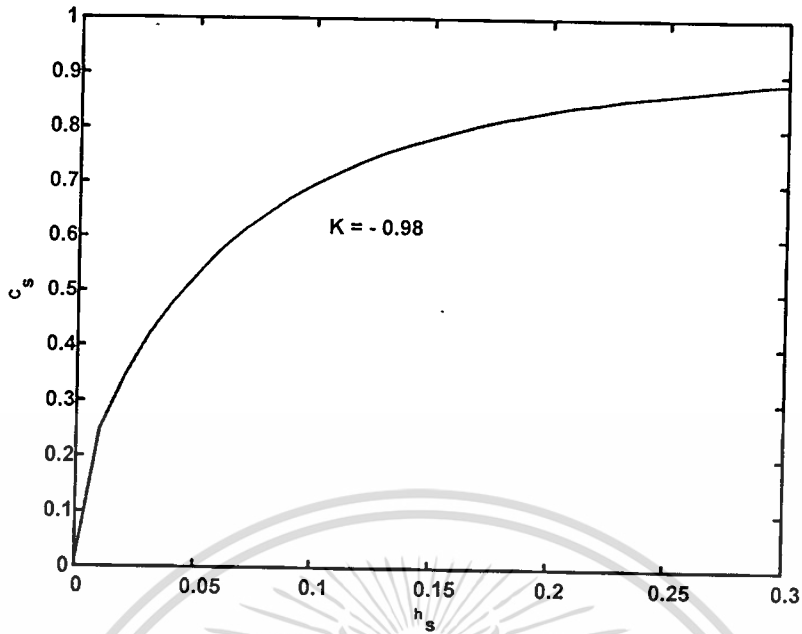


รูปที่ 2.17 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.96$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร

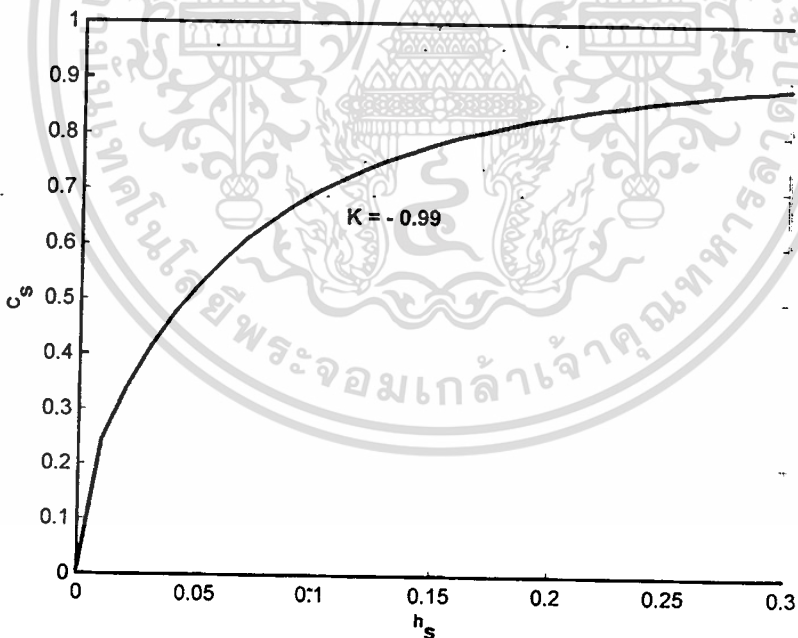


รูปที่ 2.18 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.97$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.98$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร



รูปที่ 2.20 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า h_s กับค่า K ที่มีผลต่อค่า C_s ค่า $K = -0.99$ และทำการเปลี่ยนแปลง h_s จาก 0 จนถึง 30 เซนติเมตร

2.9 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและวัสดุที่ใช้โรยที่ผิวดิน

2.9.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นจะมีค่าไม่คงที่[1] ทั้งที่ระดับความลึกเดียวกันและที่ความลึกต่างกันซึ่งในการนำค่าความต้านทานจำเพาะของดินไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน จำเป็นต้องมีการทดลองวัดค่าความต้านทานดินที่สถานที่ที่จะทำการก่อสร้างเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมและถูกต้องเพื่อควรรนำไปใช้งาน องค์กรประกอบที่มีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นได้แก่

2.9.1.1 ค่าความเป็นกรด เบส หรือค่าความเค็มที่แสดงอยู่ในดิน

จะมีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ดังในรูปที่ 2.21 เส้นกราฟที่ 1 แสดงปริมาณเกลือ (Sodium chloride) ที่ละลายอยู่ในดิน โดยเทียบกับน้ำหนักของดิน[1] ซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยพบว่าเมื่อมีปริมาณของเกลือละลายอยู่ในดินมากๆ แล้วจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลง ซึ่งค่าที่แสดงในกราฟนี้ได้จากการทดลองในดินที่มีค่าความชื้น 30% เมื่อเทียบกับน้ำหนักดิน

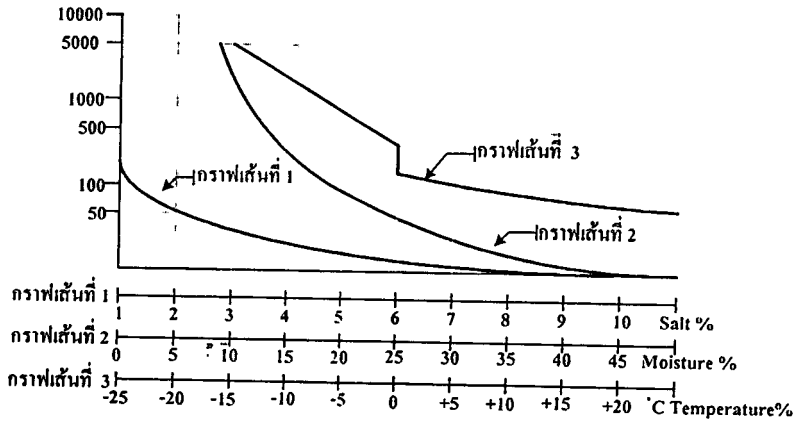
2.9.1.2 อุณหภูมิ (Temperature)

สำหรับค่าอุณหภูมินี้จะไม่ค่อยมีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินมากนักเมื่อค่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง(0°C) แต่จะมีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินอย่างมากเมื่ออุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมมีค่าต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเพราะจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำภายในดินกลายเป็นน้ำแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เส้นกราฟที่ 3 โดยกราฟเส้นที่ 3 นี้ทดลองกับดินร่วนปนทราย (sandy loam) ที่มีค่าความชื้น 15.2%

2.9.1.3 ความชื้น (Moisture)

สำหรับค่าความชื้นจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณความชื้นของดินมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในกราฟเส้นที่ 2 ภายในรูปที่ 2.21

นอกจากองค์ประกอบที่กล่าวมาเบื้องต้นจะมีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินแล้ว ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงสู่ดินก็อาจจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนไปได้ด้วย เนื่องจากเมื่อมีกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลลงสู่ดินจะทำให้ดินมีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียความชื้นภายในดินและจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินสูงขึ้นดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องจำกัดให้กระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดินในปริมาณที่ไม่เกิน 200 A/m^2 [2] .สามารถแสดงค่าช่วงความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ ได้ดังในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในดิน [1]

2.9.2 ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน

สำหรับวัสดุที่โรยที่ผิวดินนั้นนอกจากจะช่วยลดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ร่างกาย เมื่อเกิดค่าความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวดินแล้วยังช่วยในการป้องกันการระเหยของน้ำที่ผิวดินอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปนั้นจะนิยมทำการ โรยวัสดุที่ผิวดินให้หนาประมาณ 8-15 เซนติเมตร.(3-6 นิ้ว) สำหรับค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ทำการ โรยที่ผิวดินจะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น ชนิดของวัสดุ, ขนาดของวัสดุ, ปริมาณความชื้น และฝุ่นหรือสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในอากาศ โดยทั่วไปนั้นจะนิยมใช้หินในการ โรยที่ผิวดิน ในตารางที่ 2.2 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุต่างๆที่ใช้โรยผิวดินขณะที่เปียกกับไม่เปียก [1]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ [1]

Type of earth	Average resistivity (ohm-m)
Wet organic soil	10
Moist soil	10^2
Dry soil	10^3
Bedrock	10^4

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวดินกรณีเปียกกับไม่เปียก [1]

Number	Description of Surface material (U.S. state where found)	Resistivity of sample $\Omega.m$	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	140×10^6	1300 (ground water, 45 $\Omega.m$)
2	1.5 in(0.04 m) crusher run granite (Ga.) with fine	4000	1200 (rain water, 100W)
3	0.75-1 in (0.02-0.025 m) granite (Calif.) with fines	-	6513 (10 min after 45 $\Omega.m$ water drained)
4	#4 (1-2 in)(0.025-0.05 m) washed granite (Ga.)	1.5×10^6 to 4.5×10^6	5000 (rain water, 100 $\Omega.m$)
5	#3 (2-4 in)(0.05-0.10 m) washed granite (Ga.)	2.6×10^6 to 3×10^6	10000 (rain water, 100 $\Omega.m$)
6	Size unknown, washed Limestone (Mich.)	7×10^6	2000-3000 (ground water, 45 $\Omega.m$)
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02 m.) gravel	2×10^6	10000
8	Washed granite, similar to pea gravel	40×10^6	5000
9	#57 (0.75 in) (0.02 m) washed granite (N.C.)	190×10^6	8000 (ground water, 45 $\Omega.m$)
10	Asphalt	2×10^6 to 30×10^6	10000 to 6×10^6
11	Concrete	1×10^6 to 1×10^9	21 to 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้นจะต้องทำการพิจารณาเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินให้มีความเหมาะสมและจะต้องทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงและดินค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติของสายตัวนำที่จะนำไปใช้สร้างระบบต่อลงดิน นำเสนอสมการที่ใช้ในการเลือกขนาดของสายตัวนำที่จะนำไปใช้ในระบบต่อลงดิน การคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและการพิจารณาหาค่ากระแสกริด

3.1 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน [1,2]

ตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) สูง เพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าภายในบริเวณที่ทำการติดตั้งตัวนำนั้น
2. สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการหลอมละลาย เนื่องจากจะต้องทนต่อกระแสไฟฟ้าปริมาณมากที่ไหลผ่านในช่วงระยะเวลาสั้นๆ
3. มีความแข็งแรงทางกลสามารถทนต่อการถูกร่อน
4. สามารถใช้งานได้อย่างปกติ เมื่อได้มีการถูกร่อนที่ผิวของวัสดุและอยู่ในสถานะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

3.2 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน [1]

3.2.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี และไม่มีปัญหาในเรื่องของการถูกร่อนเพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบ (Cathodic) เมื่อนำมาฝังในดิน โดยทำการเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆที่ฝังอยู่โดยรอบ

3.2.2 เหล็กชุบทองแดง (Copper-Clad Steel)

เหล็กชุบทองแดงนั้นนิยมใช้เป็นแท่งหลักดิน (Ground rod) และเป็นตะแกรงต่อลงดินเพื่อทำการหลีกเลี่ยงการถูกกัดขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินออกไปขาย

3.2.3 อลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบธรรมดา เนื่องจากมีข้อเสียดังต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อลูมิเนียมจะมีการผุกร่อน เมื่อมีการฝังลงในดิน และจะไม่สามารถใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้เมื่อเกิดการผุกร่อน
2. เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการผุกร่อนที่ผิวของอลูมิเนียม ทั้งนี้เพราะว่าอลูมิเนียมประพุดิตัวเป็นขั้วบวก (anodic) เมื่อทำการฝังดินโดยเทียบกับโลหะอื่นฝังอยู่ภายในบริเวณเดียวกัน โดยส่วนมากแล้วอลูมิเนียมจะใช้เป็นเปลือกหุ้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS (Gas Insulated Substation)

3.2.4 เหล็ก (Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินและใช้เป็นแท่งหลักดิน แต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องทำการแก้ปัญหาเรื่องการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวของเหล็กหรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็กเพื่อให้ประพุดิตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดินในระบบต่อลงดินถึงแม้จะทำการเลือกใช้ ทองแดง หรือ เหล็กชุบทองแดงเป็น ตัวนำในระบบต่อลงดินเพื่อแก้ปัญหการเกิดการผุกร่อนที่ผิวตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน แต่ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากการผุกร่อนของโลหะและโลหะผสมที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดิน เพราะว่าทองแดงและเหล็กนั้นจะประพุดิตัวเสมือน Galvanize Cell โดยมีดินทำหน้าที่เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า โดยที่เหล็กจะประพุดิตัวเสมือนขั้วบวก และทองแดงจะประพุดิตัวเสมือนขั้วลบ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหการผุกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินได้ดังนี้

1. ทำการเคลือบผิววัสดุของที่ประพุดิตัวเป็นขั้วบวกเมื่อฝังลงในดินโดยการพันเทปพลาสติก หรือใช้ Asphalt ผสมเคลือบที่ผิวของวัสดุ
2. การกำหนดวางแนวท่อในบริเวณที่มีการฝังระบบต่อลงดินนั้นจะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีการเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการผุกร่อน
3. ใช้คุณสมบัติของขั้วลบในการป้องกันการผุกร่อนหรือควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบ
4. หลีกเลี่ยงการใช้ท่อเหล็กโดยเลือกใช้ท่อพลาสติกแทน

3.3 การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

การเลือกขนาดของสายตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดินนั้นมีความสำคัญต่อการออกแบบเนื่องจากตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะต้องมีขนาดที่จะสามารถทนต่อกระแสปริมาณมากที่สุดลงสู่ระบบต่อลงดินได้ภายในระยะเวลาสั้นๆ โดยไม่เกิดการหลอมละลายและการเลือกขนาดสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนี้จะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.1)

$$I = A_{\text{mm}^2} \sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad (3.1)$$

โดยที่	I	คือ	ค่า rms. ของกระแสตรงลงดินสูงสุดแบบสมมาตร (kA)
	A_{mm^2}	คือ	ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ (mm^2)
	T_m	คือ	อุณหภูมิสูงสุดที่สายตัวนำสามารถทนได้ ($^{\circ}\text{C}$)
	T_a	คือ	อุณหภูมิที่สายตัวนำใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)
	T_r	คือ	อุณหภูมิอ้างอิงเป็นค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิด ($^{\circ}\text{C}$)
	α_r	คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิอ้างอิง ($1/^{\circ}\text{C}$)
	α_0	คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิ 0°C ($1/^{\circ}\text{C}$)
	ρ_r	คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง ($\mu\Omega - \text{cm}$)
	K_0	คือ	$1/\alpha_0$ หรือ $(1/\alpha_r) - T_r$ ($^{\circ}\text{C}$)
	t_c	คือ	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลสู่ระบบต่อลงดิน (วินาที)
	TCAP	คือ	thermal capacity per unit volume ($\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

จากสมการที่ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำเป็นตารางมิลลิเมตรได้ดังในสมการที่ (3.2)

$$A_{\text{mm}^2} = I \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (3.2)$$

และสามารถหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำเป็น kcmils ได้ดังในสมการที่ (3.3)

$$A_{\text{kcmils}} = I \cdot \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (3.3)$$

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำต่อลงดินที่คำนวณได้นั้นจะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต่อลงดินนั้นสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำดิน [1]

Description	Material Conductivity (%)	α_r factor at 20 °C (1/°C)	K_r at 0 °C (°C)	Fusing Temperature T_m (°C)	ρ_r 20 °C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCAP thermal capacity ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$)
Copper, Annealed soft-draw	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, Commercial hard-draw	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad Steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad Steel wire	30	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod	30.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93

3.4 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grounding system resistance)

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินในทางอุดมคติควรจะมีความใกล้เคียงศูนย์ แต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากมาก ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ควรจะมีความต้านทานไม่เกิน 1 Ω และค่าความต้านทานภายในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิชาสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำเพื่อเผยแพร่เชิงวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1 Ω ถึง 5 Ω ซึ่งการจะทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีค่าความต้านทานจริงเท่าใด จะต้องทำการวัดจากระบบต่อลงดินหลังจากทำการก่อสร้างเสร็จแล้ว แต่ในการออกแบบนั้นจะอาศัยการประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินโดยใช้สมการที่มีการนำเสนอไว้ต่อไปนี้ โดยค่าความต้านทานต่ำสุดที่สุดของสถานีไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ (3.4) ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลองวางแผ่นโลหะกลมบนผิวดินและหาค่าความสัมพัทธ์

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (3.4)$$

ต่อมา Laurent และ Niemann ได้เสนอสมการที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินซึ่งโดยพิจารณาถึงผลจากความยาวของตัวนำที่ใช้เป็นระบบต่อลงดินดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (3.5)$$

ต่อมา Sverak ก็ได้เสนอสมการที่ใช้ในการประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยสมการนี้ถูกกำหนดให้เป็นสมการที่ใช้ประมาณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินซึ่งกำหนดอยู่ใน IEEE-Std 80-2000 ซึ่งแสดงอยู่ในสมการที่ (3.6)

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (3.6)$$

โดยที่ R_g คือ ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า (Ω)

L_T คือ ค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m.)

h คือ ความลึกจากผิวดินที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน (m.)

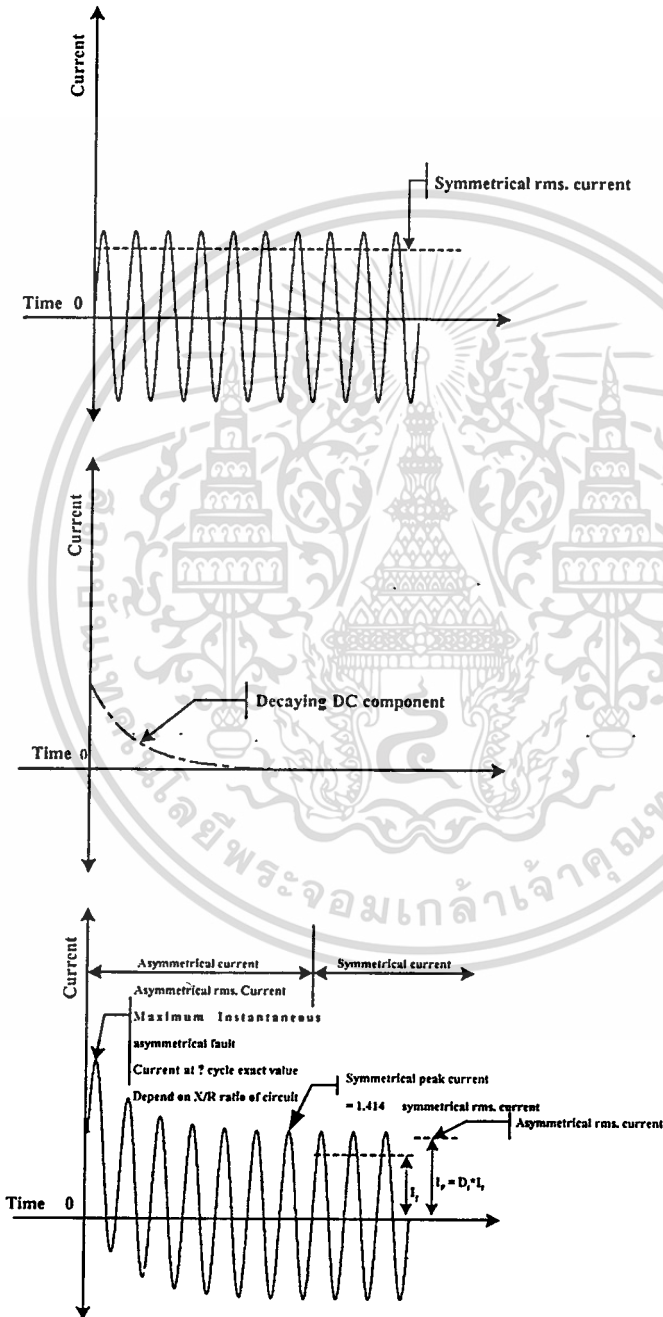
A คือ ขนาดพื้นที่ของระบบต่อลงดิน (m^2)

3.5 ค่ากระแสกริด (Grid Current)

ค่ากระแสกริด คือกระแสลัดวงจรลงดินที่ไหลสู่ดินโดยผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ค่ากระแสกริดนี้จะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้น, ตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร, การเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกเป็นต้น สำหรับค่ากระแสกริดที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนี้จะต้องพิจารณาจากค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร เนื่องจากขณะเกิดการลัดวงจรลงดินนั้นค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรนั้นจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรเพราะมีผลของค่า dc-offset เข้ามาเกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนั้นในการพิจารณาหาค่ากระแสกริดแบบไม่สมมาตรจะหาได้จากสมการที่ (3.7)



รูปที่ 3.1 แสดงค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย I_p , I_f และค่า dc offset ที่เกิดขึ้น[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_G = I_g \cdot D_f \quad (3.7)$$

โดยที่ I_G คือ ค่า rms. ของ กระแสกริดแบบไม่สมมาตร (rms. Asymmetrical grid current, A)

I_g คือ ค่า rms. ของกระแสกริดแบบสมมาตร (rms. Symmetrical grid current, A)

D_f คือ ค่า Decrement factor ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ dc-offset

จากสมการที่ (3.7) ค่า D_f จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเกิดการลัดวงจรลงดินก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน (t_f) ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า (f) และค่า X/R ของระบบขณะเกิดการลัดวงจรดังแสดงในสมการที่ (3.8) และแสดงค่า D_f ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.8) ดังในตารางที่ 3.2

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}})} \quad (3.8)$$

$$T_a = \frac{X}{2\pi fR} \quad (3.9)$$

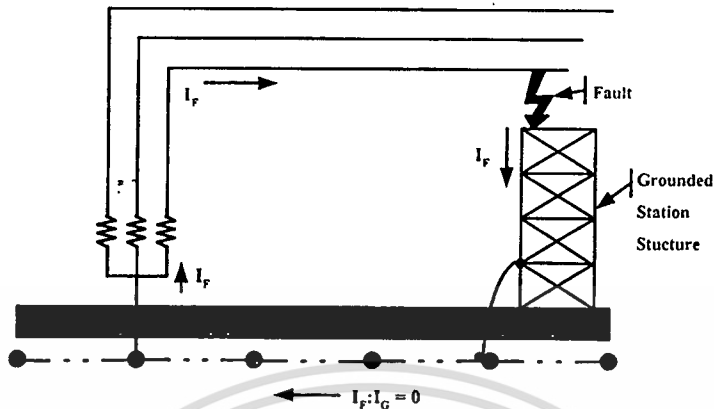
ตารางที่ 3.2 ค่า D_f ที่ความถี่ 50 Hz. ที่ค่า $X/R = 10-20$ และ $t_f = 0.01 - 1$ วินาที

ระยะเวลาที่เกิดกระแสลัดวงจร, t_f		Decrement factor, D_f			
เวลา(วินาที)	cycles ที่ 50Hz	$X/R = 10$	$X/R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.01	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	2.5	1.269	1.417	1.497	1.545
0.1	5	1.148	1.269	1.356	1.417
0.2	10	1.077	1.148	1.213	1.269
0.3	15	1.052	1.101	1.148	1.192
0.4	20	1.039	1.077	1.113	1.148
0.5	25	1.031	1.062	1.091	1.120
0.6	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.7	35	1.023	1.045	1.066	1.087
0.8	40	1.020	1.039	1.058	1.077
0.9	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1	50	1.016	1.031	1.047	1.062

การพิจารณาค่ากระแสกริดนั้นจะต้องทราบถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าและตำแหน่งที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดิน ซึ่งตำแหน่งที่จะทำให้เกิดค่ากระแสกริดสูงสุดจะเป็นการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

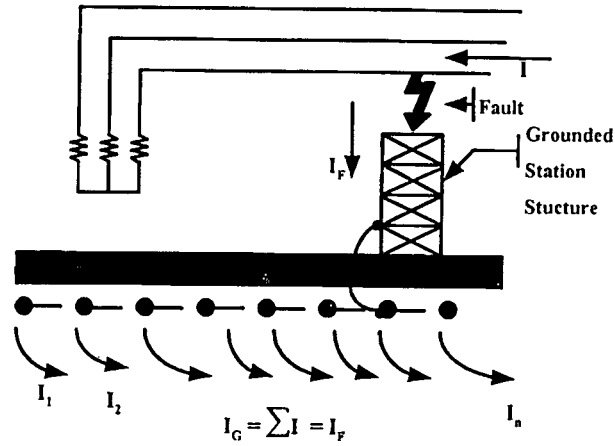
การลัดวงจรลงดินภายในสถานีไฟฟ้า สำหรับลักษณะการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากับระบบภายนอกจะมีผลต่อค่ากระแสกริดโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยที่มีทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อไม่มีการต่อนิวทรอลลงดิน[1]

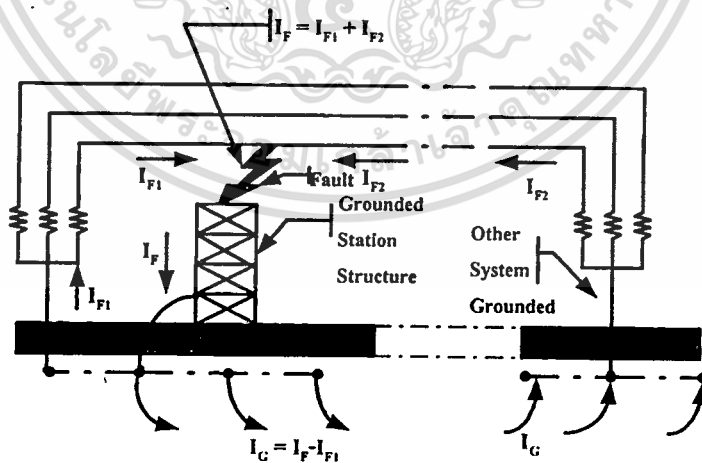
กรณีที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดินและไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินที่ภายนอกสถานีไฟฟ้างี้ดังในรูปที่ 3.2 แล้วจะพบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแล้วจะทำให้ไม่มีกระแสกริดเกิดขึ้น เพราะปริมาณกระแสลัดวงจรจะอาศัยระบบต่อลงดินเป็นทางเดินของกระแส เพื่อไหลกลับไปยังหม้อแปลง

กรณีที่ 2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดินและมีการต่อนิวทรอลลงดินที่ภายนอกสถานีไฟฟ้าแล้ว ในกรณีนี้ไม่พิจารณาการเกิดการลัดวงจรลงดินทางด้านทุติยภูมิเพราะไม่ทำให้เกิดกระแสกริดแต่จะพิจารณาการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าขึ้นทางด้านปฐมภูมิขึ้นกระแสลัดวงจรทั้งหมด (I_f) ที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าและกระจายออกสู่ดินเพื่อใช้ดินเป็นตัวนำเพื่อเดินทางกลับไปยังนิวทรอลของระบบภายนอกที่ต่อลงดินไว้ ซึ่งค่ากระแสกริด(I_G)จะเท่ากับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด (I_f) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงและระบบภายนอกที่เชื่อมต่อการต่อนิวทรอลลงดิน[1]

กรณีที่ 3 หม้อแปลงที่ติดตั้งภายในสถานีจ่ายไฟฟ้ามีการต่อนิวทรอลลงดินทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทางด้านทุติยภูมิและภายนอกสถานีไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิจะทำให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด (I_F) แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยกระแสลัดวงจรส่วนหนึ่ง (I_{F2}) ซึ่งก็คือกระแสกริดกระแสกริด (I_G) ไหลผ่านดินไปยังระบบภายนอกที่มีการต่อนิวทรอลลงดินไว้และกระแสลัดวงจรอีกส่วนหนึ่ง (I_{F1}) ไหลไปยังนิวทรอลของหม้อแปลงภายในสถานีไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อการต่อนิวทรอลลงดิน[1]

3.6 การวิเคราะห์หาค่า rms. ของกระแสกริดแบบสมมาตร

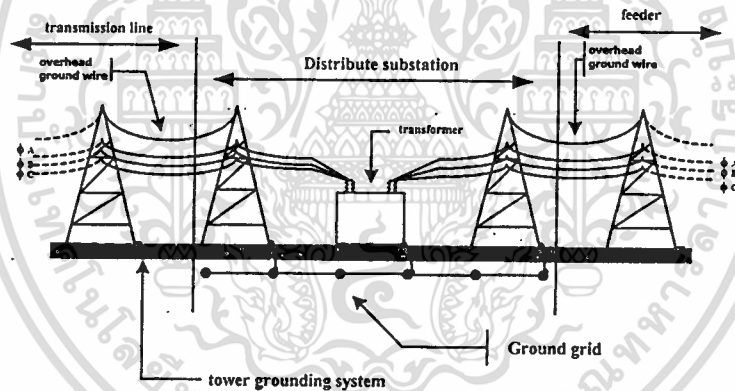
3.6.1 วิธีวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดของ Endernyi [1]

วิธีการวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดโดยวิธีนี้เป็นการประมาณหาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้น ซึ่ง จะทำการพิจารณาอัตราส่วนของกระแสกริดที่เกิดขึ้น (S_f) จะสามารถหาค่ากระแสกริดได้ดังสมการ ที่ (3.10)

$$I_g = I_f \cdot S_f \quad (3.10)$$

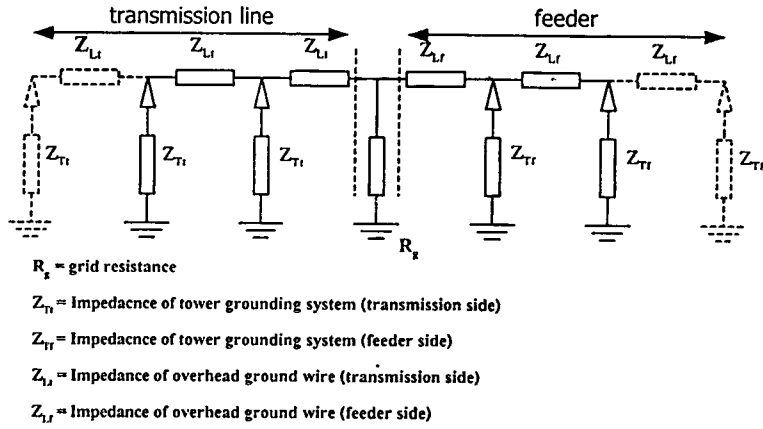
โดยที่ S_f คือ ค่าอัตราส่วนของกระแสกริดต่อค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (Current Division factor)

สำหรับค่าอัตราส่วนของกระแสกริดต่อค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (S_f) นี้พิจารณาจากผลของ การที่กระแสลัดวงจรแบ่งไหล ไปยังระบบต่อลงดินภายนอกซึ่งก็คือระบบต่อลงดินของเสาสูงที่ เชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยสายล่อฟ้าของระบบ ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.5



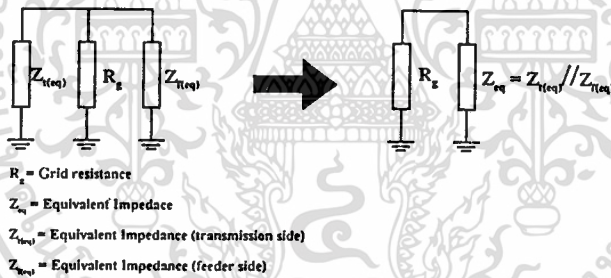
รูปที่ 3.5 แสดงการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ากับระบบต่อลงดินภายนอก

จากรูปที่ 3.5 นี้จะสามารถพิจารณาการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูล ขึ้นบนใดได้ดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรสมมูลแสดงการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดิน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.6 นี้จะพบว่าระบบต่อลงดินภายนอกจะเชื่อมต่อแบบขนานกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินภายนอกด้วยค่าอิมพีแดนซ์สมมูลจะทำให้ได้วงจรสมมูลดังในรูปที่ 3.7 ซึ่งจะสามารถหาอัตราส่วนของค่ากระแสกริดต่อค่ากระแสลัดวงจรลงดินทั้งหมดได้ โดยการนำกฎการไหลของกระแสของ Kirchoff ดังในสมการที่ (3.11)

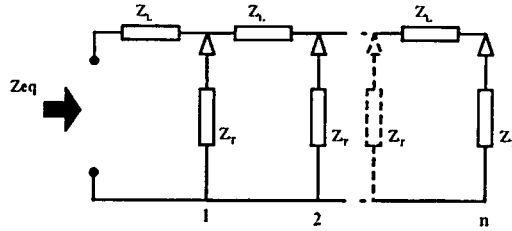


รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสมมูลของระบบต่อลงดินที่เชื่อมต่อกันหลังจากแทนค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินภายนอกด้วยอิมพีแดนซ์สมมูล

$$S_f = \left| \frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq} + R_g} \right| \quad (3.11)$$

การพิจารณาค่ากระแสกริดของ Endemyi ไม่พิจารณาถึงผลของค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า สำหรับการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบต่อลงดินภายนอกที่เชื่อมต่อกันดังวงจรข้างบนใดในรูปที่ 3.8 นั้นสามารถใช้สมการที่ (3.12) โดยจะต้องเป็นวงจรชั้นบันไดตั้งแต่ 20 วงจรขึ้นไป ($n > 20$)

$$Z_{eq} = \frac{Z_L}{2} + \sqrt{Z_L \cdot Z_T} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรขั้วบนใด

โดยที่ Z_{eq} คือ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล (Ω)

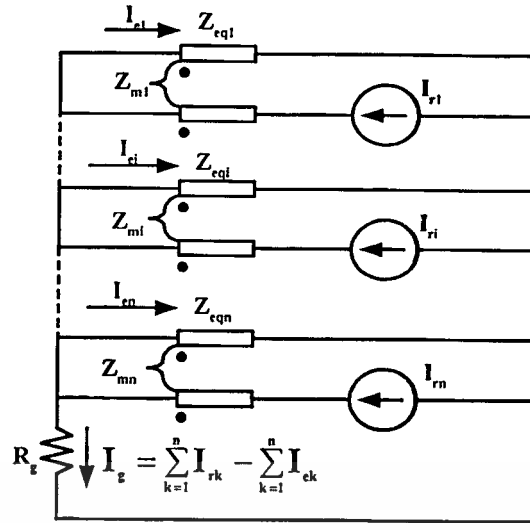
Z_L คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าใน 1 ช่วงเสา (Ω/span)

Z_T คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินของเสาส่ง (Ω)

3.6.2 วิธีวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดของ Seedher [4]

วิธีของ Seedher [4] นี้จะมีการวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดคล้ายกับวิธีของ Endrenyi โดยวิธีนี้จะทำการพิจารณาถึงผลค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำและสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบด้วยซึ่งในรูปที่ 3.9 แสดงวงจรสมมูลเพื่อใช้ในการพิจารณาหาค่ากระแสกริดของสถานีไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับสายตัวนำจำนวน n วงจร

ในรูปที่ 3.9 แสดงถึงองค์ประกอบที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่ากระแสกริดโดยที่ค่า Z_{eq} เป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของค่าอิมพีแดนซ์สายล่อฟ้าในระบบไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินของเสาส่งในวงจรที่ i ค่า Z_m คือค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า ค่า R_g เป็นค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า I_{cg} คือ ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใหญ่อยู่ในสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน และค่า I_{ln} คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้นในแต่ละวงจรของสายตัวนำขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน สำหรับการพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินของเสาส่งและค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าจะสามารถหาได้จากสมการที่ (3.18) ส่วนค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าและสายตัวนำนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (3.13)



รูปที่ 3.9 แสดงวงจรสมมูลของ Seedher สำหรับคำนวณหาค่ากระแสกริดที่มีการเชื่อมต่อจำนวน n วงจร[4]

$$Z_m = Z_{gm} \left(\frac{Z_{eq}}{Z_L} \right) \quad (3.13)$$

- โดยที่ Z_m คือ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายนำ กับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า(Ω/m)
- Z_{gm} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำกับสายล่อฟ้าของ ระบบไฟฟ้า(Ω/m)
- Z_{eq} คือ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายล่อฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินของ เสาส่งที่เชื่อมต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้า (Ω)
- Z_L คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในหนึ่งช่วงเสา($\Omega/span$)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.9 จะสามารถนำเสนอสสมการของใช้ตัวนำที่วงจรที่ i ได้ดังสมการที่ (3.14)

$$Z_{eqi} I_{ci} - Z_{mi} I_{ri} - R_g \left(\sum_{k=1}^n I_{rk} - \sum_{k=1}^n I_{ck} \right) = 0 \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A \cdot I = B \quad (3.15)$$

โดยที่ A เป็นเมตริกซ์มีขนาด $n \times n$ และสมาชิกที่ตำแหน่งต่างๆ ของเมตริกซ์ A จะเป็นดังนี้

$$a_{ij} = R_g \text{ เมื่อ } i \neq j$$

$$a_{ij} = R_g + Z_{ci} \text{ เมื่อ } i = j$$

B เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times 1$ โดยสมาชิกที่ตำแหน่งต่างๆเป็นดังนี้

$$b_{il} = R_g \cdot \sum_{k=1}^n I_{rk} + Z_{mi} \cdot I_{ni}$$

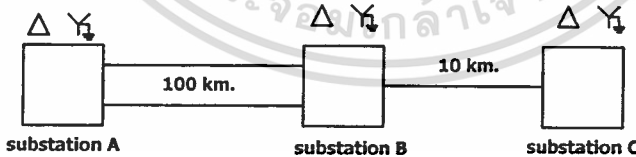
I_c เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times 1$ โดยสมาชิกที่ตำแหน่งต่างๆเป็นดังนี้

$$I_{il} = I_{ci}$$

หลังจากที่ทำการพิจารณาหาค่ากระแสลัดวงจรที่แบ่งไหลภายในสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในสายส่งแต่ละวงจร (I_{ci}) แล้วจะสามารถหาค่ากระแสกริดได้จากสมการที่ (3.16)

$$I_g = \sum_{k=1}^n I_{rk} - \sum_{k=1}^n I_{ck} \quad (3.16)$$

3.6.3 วิธีหาค่ากระแสกริดโดยวิธี Decoupled [10,11,12]

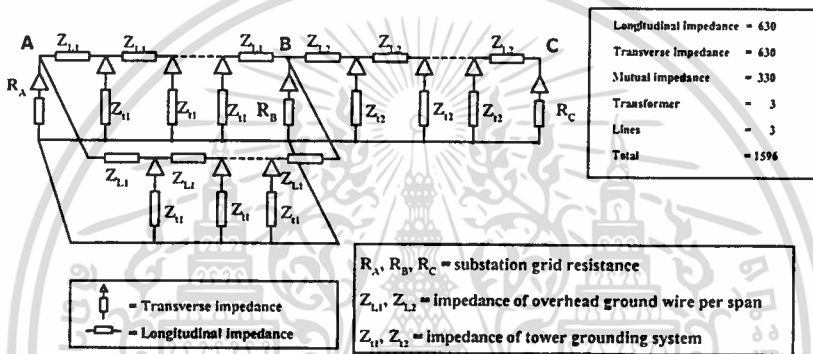


รูปที่ 3.10 แสดงการเชื่อมต่อกันของสถานีไฟฟ้า 3 สถานีซึ่งประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้า A, B และ C

สำหรับการพิจารณาหาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นโดยวิธีนี้นั้นจะคล้ายกับวิธีของ Endrenyi และ Seedher เพียงแต่ในวิธี Decoupled นี้จะทำการพิจารณาถึงผลของค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าที่อยู่ข้างเคียงและอาศัยการยุบวงจรอย่างง่ายเข้ามาใช้ในการคำนวณซึ่งจะมีข้อกำหนดดังนี้ คือค่าแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ซึ่งจะสามารถอธิบายการนำวิธี Decoupled ไปใช้ในการพิจารณาหาค่าด้านการคำนวณได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

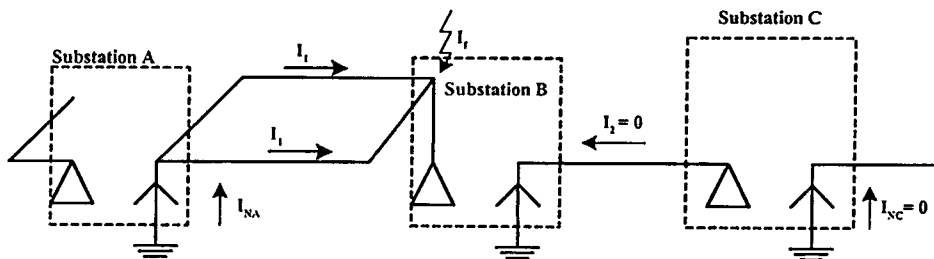
กระแสกริดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ โดยนำเสนอการเชื่อมต่อกันของสถานีไฟฟ้าทั้ง 3 สถานีคือ สถานีไฟฟ้า A, B และ C ดังในรูปที่ 3.10 มาใช้ร่วมในการประกอบการอธิบายและจะทำการพิจารณาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า B

จากรูปที่ 3.10 จากสถานีไฟฟ้า A ไปยัง B นี้มีการเชื่อมต่อกันด้วยสายส่ง 2 วงจรขนานกันเป็นระยะทาง 100 กิโลเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 0.33 km. ส่วนกรณีจากสถานีไฟฟ้า B ไปยัง C นั้นมีระยะทาง 10 km. โดยมีระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้าเท่ากับ 0.33 km ซึ่งจะสามารถแทนการเชื่อมต่อกันระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าทั้ง 3 กับระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าเนื่องจากสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าได้ดังวงจรในรูปที่ 3.11 มีหลักการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรสมมูลของการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินระหว่างสถานีไฟฟ้าทั้ง 3 กับระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าเนื่องจากสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า

ขั้นที่ 1 พิจารณาดำเนินการเกิดการลัดวงจรที่ทำให้เกิดค่ากระแสกริดสูงสุด โดยในกรณีนี้ตำแหน่งที่ทำให้เกิดกระแสกริดสูงสุดนั้นมักจะเกิดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการพิจารณาดำเนินการที่ทำให้เกิดค่ากระแสกริดนั้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.7 ซึ่งสำหรับระบบตัวอย่างนี้สมมติให้การเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้า B ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงให้ค่ากระแสกริดสูงสุด

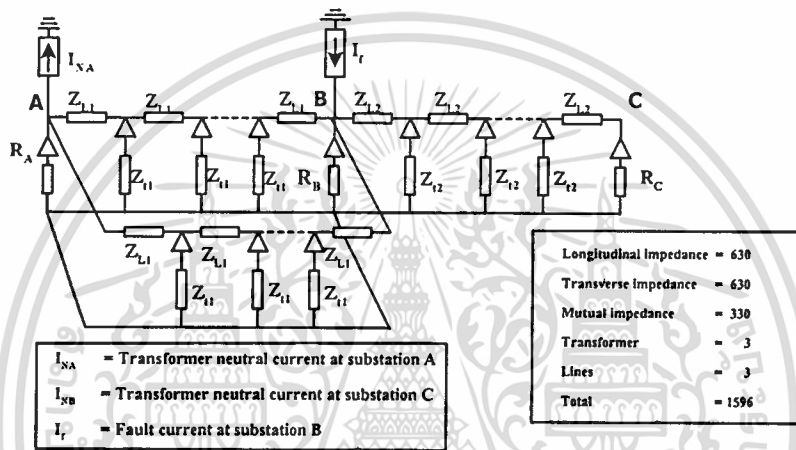


รูปที่ 3.12 แสดงกระแสลำดับศูนย์ที่เกิดขึ้นภายในสายส่งขณะเกิดการลัดวงจรลงดินทางด้านปฐมภูมิของสถานีไฟฟ้า B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

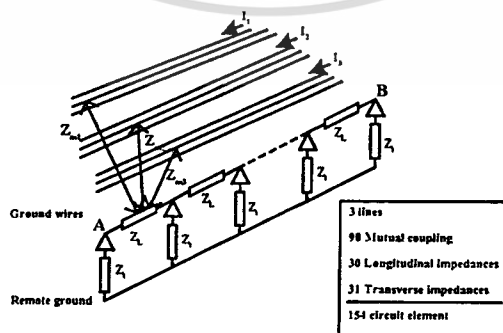
ขั้นที่ 2 ทำการพิจารณาค่ากระแสลำดับศูนย์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งสำหรับระบบตัวอย่างที่นำมาประกอบการอธิบายนี้จะมีการกระจายของกระแสลำดับศูนย์ดังในรูปที่ 3.12

ขั้นที่ 3 ทำการแทนค่ากระแสลัดวงจรลงดินและค่ากระแสนิวทรอลด้วยแหล่งจ่ายกระแสดังในรูปที่ 3.13 สำหรับค่าปริมาณกระแสลัดวงจรและค่ากระแสนิวทรอลของหม้อแปลงนี้จะสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรลงดิน และค่ากระแสนิวทรอลของหม้อแปลงมาช่วยในการวิเคราะห์หาก็ได้เพื่อความสะดวกสบาย



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรสมมูลแสดงการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินหลังจากทำการแทนกระแสลัดวงจรและกระแสนิวทรอลที่เกิดขึ้นด้วยแหล่งจ่ายกระแสแล้ว

ขั้นที่ 4 ทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งจากกระแส ซึ่งเป็นหลักการของวิธีการ Decoupled ซึ่งจะมีหลักการคิดดังนี้



รูปที่ 3.14 แสดงค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าและค่ากระแสลำดับศูนย์ในสายส่ง ขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน

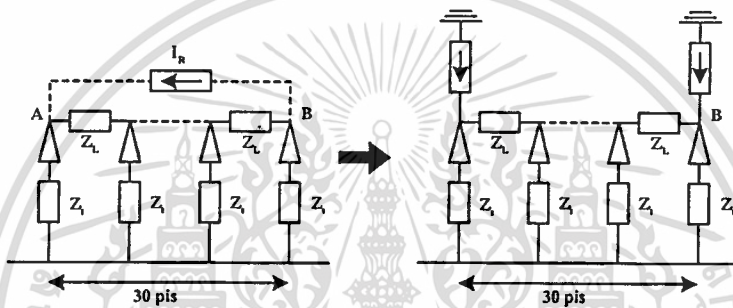
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 จะสามารถแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแส(I_R)ได้โดยใช้สมการที่ 3.17 และ 3.18 ดังต่อไปนี้

$$V = I_1(Z_{m1}) + I_2(Z_{m2}) + I_3(Z_{m3}) \text{ V/km.} \tag{3.17}$$

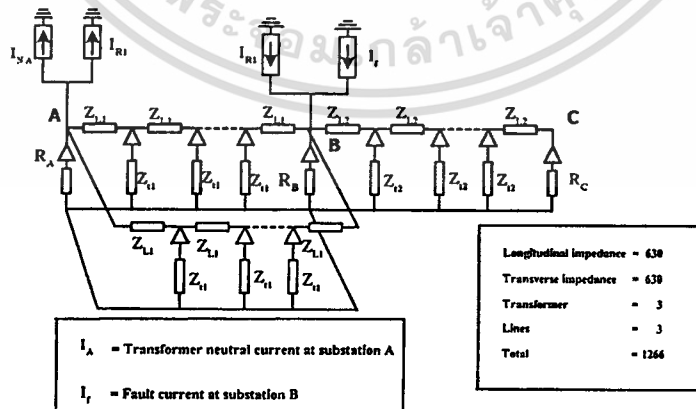
$$I_R = V/Z_L \text{ A.} \tag{3.18}$$

เมื่อทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายกระแสแล้วจะได้วงจรสมมูลดังในรูปที่ 3.15



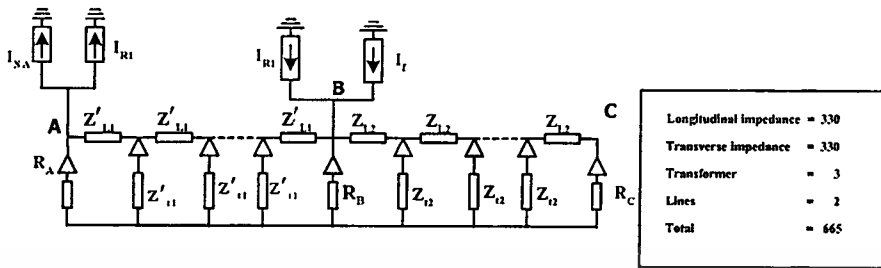
รูปที่ 3.15 แสดงวงจรหลังจากทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายกระแส

เมื่อทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นด้วยแหล่งจ่ายกระแสแล้วจะได้วงจรสมมูลดังในรูปที่ 3.16



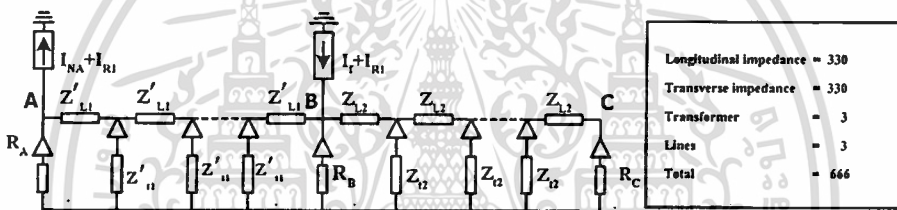
รูปที่ 3.16 แสดงวงจรสมมูลหลังจากทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายกระแส

ขั้นที่ 5 ถ้าในวงจรที่ทำการพิจารณานั้นมีวงจรขนาน ให้ทำการวงจรถนนานเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งการยุบวงจรถนนาน



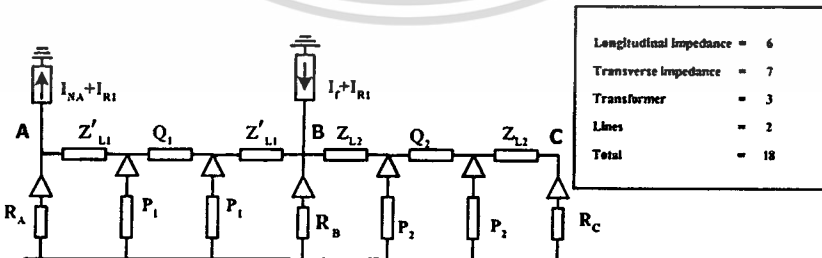
รูปที่ 3.17 แสดงวงจรสมมูลหลังจากทำการยุบวงจรถนนานแล้ว

ขั้นที่ 6 หลังจากนั้นทำการรวมค่าแหล่งจ่ายกระแสเข้าด้วยกันซึ่งจะได้วงจรสมมูลดังในรูปที่ 3.18



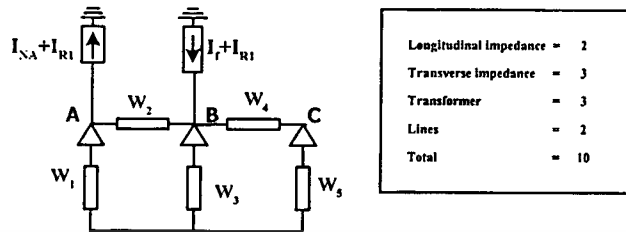
รูปที่ 3.18 แสดงวงจรสมมูลหลังจากทำการรวมค่าแหล่งจ่ายกระแสที่ node ต่างๆ เข้าด้วยกันแล้ว

ขั้นที่ 7 ทำการยุบวงจรขึ้นบันไดที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้าในแต่ละช่วงเสากับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินของเสาส่งให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลพาย ซึ่งจะได้วงจรสมมูลดังในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงวงจรสมมูลหลังจากทำการแทนวงจรขึ้นบันไดของสายส่งและระบบต่อลงดินของเสาส่งด้วยวงจรสมมูลพาย

ขั้นที่ 8 ทำการลดรูปวงจรให้ องค์ประกอบที่เชื่อมต่อยู่ทางด้าน A-B และ B-C ให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลพาย ดังที่แสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงวงจรสมมูลหลังจากทำการลดรูปจนสมบูรณ์แล้ว

ขั้นที่ 9 ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ node B ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการหาค่ากระแสกริด โดยใช้ KCL ในการพิจารณาหาค่าแรงดัน หลังจากทราบค่าแรงดันที่ตำแหน่ง B แล้วจะสามารถหาค่ากระแสกริดได้จากการนำค่าแรงดันที่ node B ซึ่งหาได้ไปหารกับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า B

3.7 ค่า rms. ของกระแสลัดวงจรลงดินแบบสมมาตร (rms. Symmetrical fault current) [1]

สำหรับการพิจารณาหาค่ากระแสลัดวงจรนั้นจะเลือกใช้การลัดวงจรแบบ Single line to ground fault และ Double line to ground fault [1] ซึ่งจะสามารถหาค่าปริมาณค่ากระแสลัดวงจรลงดินสามารถหาได้จากสมการที่ (3.19)

$$I_f = 3 \cdot I_0 \quad (3.19)$$

โดยที่ I_f คือ ค่า rms. ของกระแสลัดวงจรแบบสมมาตร (rms. Symmetrical fault current)

I_0 คือ ค่า rms. ของกระแสลำดับศูนย์ (rms. Zero sequence current)

สำหรับการเกิดการลัดวงจรแบบ Single line to ground fault สามารถหาค่า rms. ของกระแสลำดับศูนย์ (rms. Zero sequence current) โดยใช้สมการที่ (3.20)

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + R_0 + R_1 + R_2 + j(X_0 + X_1 + X_2)} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.8) ค่าความต้านทาน R_0 , R_1 และ R_2 มีค่าน้อยมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ คือ X_0 , X_1 และ X_2 ทำให้สามารถหาค่า rms. ของกระแสลำดับศูนย์โดยประมาณได้ดังในสมการที่ (3.21)

$$I_0 = \frac{E}{X_0 + X_1 + X_2} \quad (3.21)$$

สำหรับการเกิดการลัดวงจรลงดินแบบ Double line to ground fault นั้นสามารถพิจารณาหาค่า rms. ของกระแสลำดับศูนย์ได้โดยใช้สมการที่ (3.22)

$$I_0 = \frac{E \cdot (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) + [R_0 + R_2 + 3 \cdot R_f + j(X_0 + X_2)] + [(R_2 + jX_2) \cdot (R_0 + 3R_f + jX_1)]} \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.22) เนื่องจากผลของค่าความต้านทานมีค่าน้อยมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์จะทำให้สามารถหาค่า rms. ของกระแสลำดับศูนย์ได้โดยใช้สมการที่ (3.23)

$$I_0 = \frac{E \cdot X_2}{X_1 \cdot (X_0 + X_2) + (X_2 + X_0)} \quad (3.23)$$

- โดยที่ I_0 คือ ค่า rms. ของกระแสลัดวงจรลำดับศูนย์ (rms. Zero sequence current, A)
 E คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำและสายนิวทรัล (phase-neutral voltage, V)
 R_f คือ ค่า estimated-resistance of fault (Ω)
 R_1 คือ ค่าความต้านทานลำดับบวกของระบบ (Positive sequence resistance, Ω)
 R_2 คือ ค่าความต้านทานลำดับลบของระบบ (Negative sequence resistance, Ω)
 R_0 คือ ค่าความต้านทานลำดับลบของระบบ (Zero sequence resistance, Ω)
 X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของระบบ (Positive sequence reactance, Ω)
 X_2 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับลบของระบบ (Negative sequence reactance, Ω)
 X_0 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ของระบบ (Zero sequence reactance, Ω)
 Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของระบบ (Positive sequence impedance, Ω)
 Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบของระบบ (Negative sequence impedance, Ω)
 Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของระบบ (Zero sequence impedance, Ω)

ซึ่งในการออกแบบระบบต่อลงดินค่ากระแสลัดวงจรที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จะพิจารณาจากปริมาณกระแสลัดวงจรลงดินที่สูงที่สุด ดังนั้นในการพิจารณาว่าค่ากระแสลัดวงจรลงดินแบบ Single line to ground fault หรือแบบ Double line to ground fault ว่าแบบใดให้ค่ามากกว่านั้นจะสามารถพิจารณาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ของระบบถ้าค่า $Z_1 \cdot Z_0 > Z_2^2$ หรือ $Z_0 > Z_2$ ในกรณีที่ค่า $Z_1 = Z_2$ แล้วการเกิดการลัดวงจรลงดินแบบ Single line to ground fault จะมีค่ามากกว่าการลัดวงจรลงดินแบบ Double line to ground fault แต่ถ้าค่า กรณีที่ $Z_1 \cdot Z_0 < Z_2^2$ หรือ $Z_0 < Z_2$ ในกรณีที่ค่า $Z_1 = Z_2$ แล้วการเกิดการลัดวงจรลงดินแบบ Double line to ground fault จะให้ค่ามากกว่าการเกิดการลัดวงจรลงดินแบบ Single line to ground fault



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า

ในบทนี้จะนำเสนอกระบวนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและหลัก การพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดิน จาก ทฤษฎีและกระบวนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความรวดเร็วและสะดวกสบาย

4.1 หลักการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า

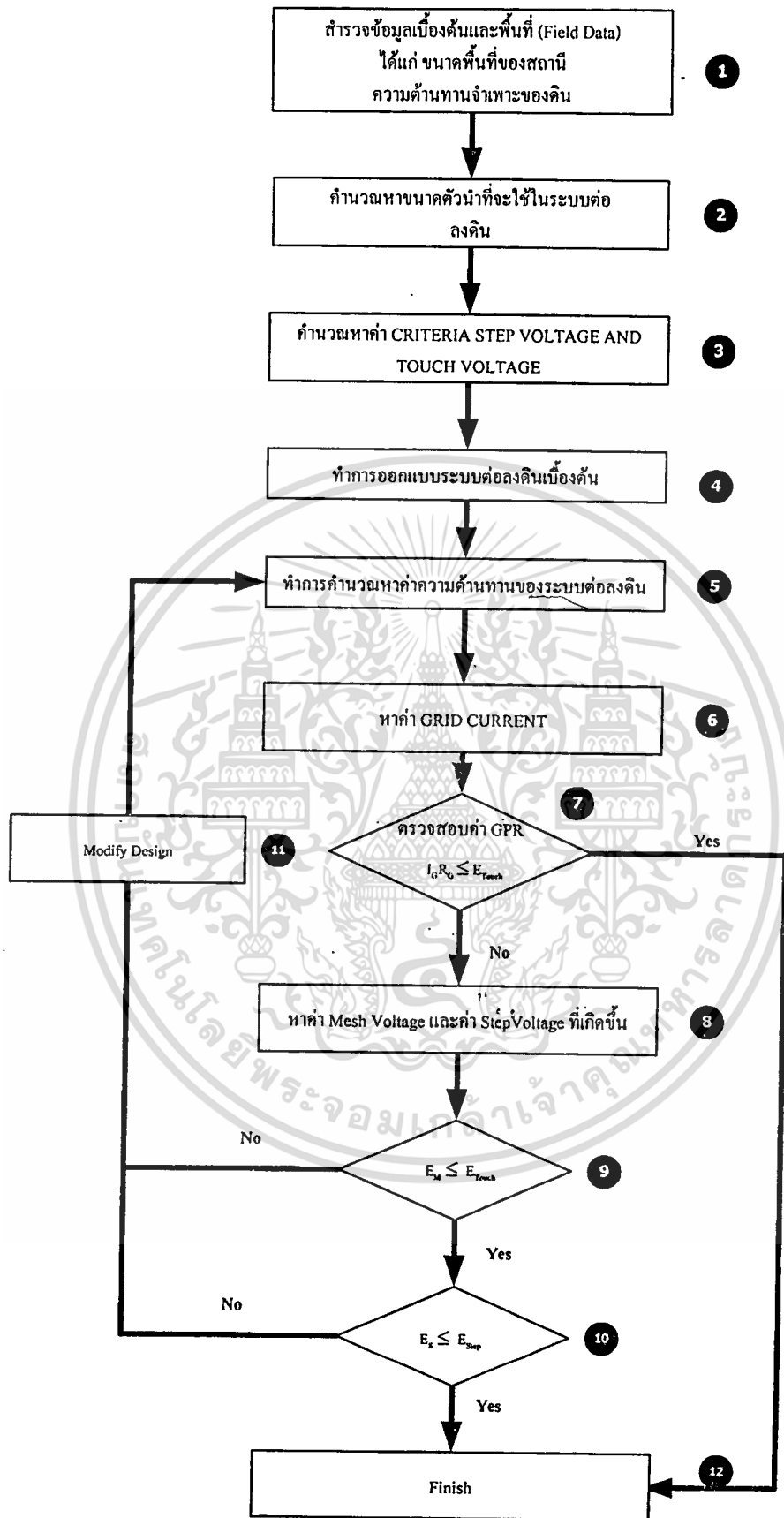
การออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าจะมีหลักการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่ง จะสามารถนำเสนอได้ดังแผนภาพดังในรูปที่ 4.1 และสามารถอธิบายหลักการออกแบบระบบต่อลง ดินของสถานีไฟฟ้า[1,2]ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 หาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ ต้องการออกแบบ ซึ่งจะ ได้แก่ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินของสถานที่ที่ต้องการก่อสร้างสถานี ไฟฟ้า(ρ) ความกว้าง (L_x) ความยาว (L_y) ของสถานีไฟฟ้า และขนาดของสถานีไฟฟ้า(A)ที่ ต้องการก่อสร้าง

ขั้นที่ 2 ทำการคำนวณหาขนาดตัวนำที่ต้องการใช้ในการก่อสร้างระบบต่อลงดินภายใน สถานีไฟฟ้า เพื่อให้สามารถทนต่อปริมาณกระแสสูงที่จะไหลลงสู่ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า สำหรับวิธีการคำนวณหาขนาดตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดินนั้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 โดย วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สมการที่ (3.2) ในการพิจารณาหาขนาดตัวนำ

ขั้นที่ 3 พิจารณาค่าแรงดันสัมผัสสูงสุด(E_{touch}) และค่าแรงดันช่วงก้ำวสูงสุด (E_{step}) ที่มนุษย์สามารถทนได้ เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบ ต่อลงดินที่จะทำการออกแบบ ซึ่งมักจะใช้ค่าที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้เป็น เกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัย สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกสมการที่ (2.30) และ (2.32) ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.7 และ 2.8 สำหรับค่า C_s โดยประมาณที่ใช้ในการคำนวณนี้หาค่าแรงดัน ไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดัน ไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้นั้นจะใช้สมการที่ (2.29) ถึง แม้ว่าจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า C_s ที่ได้จากสมการที่ (2.21) น้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ (2.28) ทั้งนี้ เพื่อเป็นการเผื่อค่าความปลอดภัยซึ่งผลการเปรียบเทียบค่า C_s นี้แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 4.3

ขั้นที่ 4 ทำการออกแบบระบบต่อลงดินเบื้องต้น โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างตัว นำภายในตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า รูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน



รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพของกระบวนการออกแบบระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 5 ทำการพิจารณาหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินต่อลงดินที่ทำกรออกแบบเบื้องต้นในขั้นตอนที่ 4 โดยใช้สมการที่ (3.14)

ขั้นที่ 6 พิจารณาหาค่ากระแสกริดสูงสุดที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้วิธีการคำนวณหาค่ากระแสกริดของ Seedher ที่นำเสนออยู่ในหัวข้อที่ 3.8.2

ขั้นที่ 7 คำนวณหาค่า GPR ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าที่ทำกรออกแบบซึ่งค่า GPR นี้สามารถหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (4.1)$$

และนำค่า GPR ที่หาได้ไปทำการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทน (E_{touch}) ได้ ถ้าค่า GPR ที่หาได้นั้นมีค่าน้อยกว่าแสดงว่าการออกแบบเบื้องต้นที่ทำไว้ปลอดภัยสามารถข้ามไปยังขั้นตอนที่ 12 ได้เลย แต่ถ้าค่า GPR นั้นมีค่ามากกว่า ต้องทำการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และค่าแรงดันช่วงก้ำวสูงสุด (E_s) ที่สามารถเกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าต่อไป

ขั้นที่ 8 ทำการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และค่าแรงดันช่วงก้ำวสูงสุด (E_s) ที่สามารถเกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2

ขั้นที่ 9 ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) กับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (E_{touch}) ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆมีค่ามากกว่าต้องทำการปรับปรุง โดยไปที่ขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆมีค่าน้อยกว่าก็จะไปตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด (E_s) ที่สามารถเกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 10 ต่อไป

ขั้นที่ 10 ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด (E_s) ที่สามารถเกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด (E_s) ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามีค่ามากกว่า ต้องไปทำขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าแสดงว่าการออกแบบระบบต่อลงดินนั้นมีค่าความปลอดภัยให้ไปยังขั้นตอนที่ 12

ขั้นตอนที่ 11 เป็นการปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยการเพิ่มปริมาณตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดินให้มากขึ้น เพื่อทำการลดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ผิวดิน ซึ่งอาจจะทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำ(D) หรือทำการติดตั้งแท่งตัวนำต่อลงดินเพิ่มเข้าไปในระบบต่อลงดินอีกก็ได้

ขั้นที่ 12 หลังจากทำการออกแบบระบบต่อลงดินและทำการตรวจสอบระบบต่อลงดินที่ออกแบบว่าปลอดภัยแล้ว จะได้รายละเอียดเบื้องต้นของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าและหลังจากนี้จะเป็นการจัดวางอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

4.2 การพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุด[1,5]

เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินเบื้องต้นไปแล้ว จะต้องทำการพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเพื่อที่จะนำมาตรวจสอบถึงความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ

4.2.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด (E_m)

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด[2,5]สามารถหาได้จากสมการที่ (4.2) โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆนี้มีผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ), ค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าเมฆ (K_m), ค่าตัวคูณเนื่องจากรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน (K_i) และค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากระแสกริดกับค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (I_G / L_M)

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (4.2)$$

สำหรับค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (K_m) นั้นจะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.3)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \quad (4.3)$$

- โดยที่
- D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน(m.)
 - h คือ ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน (m.)
 - d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่เลือกใช้ในระบบต่อลงดิน (m.)
 - K_{ii} คือ ค่าตัวคูณเนื่องจากการจัดวางของตัวนำ
 - K_h คือ ค่าตัวคูณที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการฝังตะแกรงต่อลงดิน
 - K_m คือ ค่าตัวคูณที่เกิดขึ้นเนื่องจากรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน
 - n คือ จำนวนตัวนำที่วางขนานกันอยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน

สำหรับการเลือกใช้ค่า K_{ii} นั้นจะต้องพิจารณาจากการจัดเรียงกันของตะแกรงต่อลงดิน ถ้าตะแกรงต่อลงดินมีการเชื่อมต่อกับแท่งตัวนำต่อลงดิน (Ground rod) บริเวณรอบนอกของตะแกรงต่อลงดินหรือ ที่มุมของตะแกรงต่อลงดิน หรือบริเวณรอบของตะแกรงต่อลงดินและกระจายทั่วตะแกรงต่อลงดินนั้น จะกำหนดให้ $K_{ii} = 1$ แต่ถ้าไม่มีการติดตั้งของแท่งตัวนำต่อลงดินหรือมีการเอกลากรนี้เป็นเอกลากรที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งแท่งตัวนำต่อลงดินเพียงเล็กน้อยที่ไม่ใช่บริเวณรอบนอกของตะแกรงต่อลงดินแล้วจะสามารถหาค่า K_{ii} ได้จากสมการที่ (4.4)

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^2} \quad (4.4)$$

สำหรับค่า K_h นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (4.5)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (4.5)$$

โดยที่ h_0 คือ ระดับอ้างอิงที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินซึ่งเท่ากับ 1 m.

ส่วนจำนวนตัวนำที่วางขนานกันอยู่ภายในตะแกรงต่อลงดิน (n) นั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งจะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.6)

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (4.6)$$

สำหรับค่า n_a นั้นจะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.7)

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (4.7)$$

ส่วนค่า n_b จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อตะแกรงต่อลงดินที่ออกแบบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่ถ้าค่าตะแกรงต่อลงดินที่ออกแบบมีรูปร่างอื่นจะสามารถหาค่า n_b ได้จากสมการที่ (4.8)

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (4.8)$$

ค่า n_c นั้นจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อตะแกรงต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้ามีรูปทรงอื่นนอกจากนี้จะสามารถหาค่า n_c ได้จากสมการที่ (4.8)

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7 \cdot A} \quad (4.9)$$

สำหรับค่า n_d นั้นจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อตะแกรงต่อลงดินมีรูปทรงเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปตัวแอล ถ้าตะแกรงต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีรูปทรงนอกจากนี้จะสามารถพิจารณาหาค่า n_d ได้จากสมการที่ (4.10)

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (4.10)$$

- โดยที่ L_c คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำที่ใช้ในแนวระนาบ (m.)
 L_p คือ ความยาวเส้นรอบรูปของของตะแกรงต่อลงดินที่ทำการออกแบบ (m.)
 L_x คือ ค่าความยาวของตัวนำตามแนวแกน x ที่ยาวที่สุด (m.)
 L_y คือ ค่าความยาวของตัวนำตามแนวแกน y ที่ยาวที่สุด (m.)
 D_m คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดภายในตะแกรงต่อลงดินที่มีค่ามากที่สุด (m.)

สำหรับการพิจารณาหาค่า K_i นั้นจะเกี่ยวข้องกับจำนวนตัวนำที่วางขนานกัน (n) อยู่ในตะแกรงต่อลงดินซึ่งจะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.11)

$$K_i = 0.6444 + 0.148 \cdot n \quad (4.11)$$

และในกรณีที่ตะแกรงต่อลงดินมีการติดตั้งแท่งตัวนำต่อลงดินลงที่บริเวณรอบนอกของตะแกรงต่อลงดิน, ที่มุมของตะแกรงต่อลงดินหรือติดตั้งภายในตะแกรงต่อลงดินทั้งหมด จะสามารถพิจารณาหาค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินที่มีผลต่อค่าแรงดันดินไฟฟ้าเมฆสูงสุด (L_M) ของตะแกรงต่อลงดินได้ดังในสมการที่ (4.12)

$$L_M = L_c + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตะแกรงที่ไม่มีการติดตั้งแท่งตัวนำต่อลงดินนั้น หรือมีการติดตั้งแท่งตัวนำต่อลงดินที่ไม่ใช่บริเวณรอบนอกของตะแกรงต่อลงดินแล้วจะสามารถหาค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินที่มีผลต่อค่าแรงดันดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด (L_M) ของตะแกรงต่อลงดินได้จากสมการที่ (4.13)

$$L_M = L_C + L_R \quad (4.13)$$

สำหรับค่าความยาวทั้งหมดของแท่งตัวนำต่อลงดิน (L_R) นั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.14)

$$L_R = L_r \cdot n_r \quad (4.14)$$

โดยที่ L_r คือ ค่าความยาวของแท่งตัวนำต่อลงดินแต่ละแท่ง (m.)

n_r คือ จำนวนของแท่งตัวนำต่อลงดินที่ติดตั้งภายในตะแกรงต่อลงดิน

L_R คือ ค่าความยาวทั้งหมดของแท่งตัวนำต่อลงดินที่ติดตั้งในตะแกรงต่อลงดิน (m.)

4.2.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวสูงสุด(E_s)

การพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวสูงสุด(E_s)ที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในสถานีไฟฟ้า [2,5] นี้จะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.15) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวสูงสุดนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ), ค่าตัวคูณเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าช่วงกาว (K_s), ค่าตัวคูณเนื่องจากรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน (K_i) และค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากระแสกริดกับค่าความยาวของที่ใช้ในตะแกรงต่อลงดินที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาว (I_G / L_S)

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (4.15)$$

สำหรับค่า L_S ที่มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวนั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่(4.16)

$$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (4.16)$$

ค่า K_s ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตะแกรงต่อลงดินและลักษณะการจัดวางของตัวนำดังแสดงในสมการที่ (4.17) แต่สมการนี้จะมีข้อจำกัดเนื่องจากการฝังตะแกรงต่อลงดิน โดยที่ค่าความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินควรจะอยู่ในช่วง 0.25 m.-2.5 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (4.17)$$

4.3 เปรียบเทียบค่าสมการที่ใช้หาค่า C_s โดยประมาณ

หัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอผลจากการเปรียบเทียบสมการที่ใช้ประมาณหาค่า C_s สมการที่ (2.28) และสมการที่ (2.29) ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการที่ (2.21) มากน้อยเพียงใด (สำหรับสมการที่ (2.21) ใช้ค่า $n = 10000$ เพราะเมื่อทำการพิจารณาที่ค่า n มากกว่านี้ค่า C_s ที่คำนวณได้มีค่าเท่าเดิม) เพื่อจะได้เลือกใช้สมการสำหรับหาค่า C_s โดยประมาณสำหรับนำไปใช้ในการพิจารณาหาค่า C_s แทนสมการที่ (2.21) ซึ่งมีความยุ่งยากในการใช้งาน การเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของวัสดุที่ใช้โรยบนผิวดินตั้งแต่ 1 ถึง 30 เซนติเมตรและค่า K ตั้งแต่ -0.1 ถึง -0.99 ดังนั้นสามารถแสดงการค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของสมการที่ใช้หา C_s โดยประมาณ

ค่า K	ค่า error เมื่อ (2.28) เทียบกับ(2.21)	ค่า error เมื่อ (2.29) เทียบกับ(2.21)
-0.10	-3% ถึง 0%	-3% ถึง 0%
-0.20	-7% ถึง 0%	-5% ถึง 0%
-0.30	-10% ถึง 0%	-7% ถึง 0%
-0.40	-13% ถึง 0%	-10% ถึง 0%
-0.50	-17% ถึง 0%	-12% ถึง 0%
-0.60	-21% ถึง 0%	-14% ถึง 0%
-0.70	-27% ถึง 0%	-16% ถึง 0%
-0.80	-33% ถึง 0%	-19% ถึง 0%
-0.90	-42% ถึง 0%	-21% ถึง 0%
-0.91	-43% ถึง 0%	-22% ถึง 0%
-0.92	-43% ถึง 0%	-22% ถึง 0%
-0.93	-44% ถึง 0%	-22% ถึง 0%
-0.94	-46% ถึง 0%	-23% ถึง 0%
-0.95	-47% ถึง 0%	-23% ถึง 0%
-0.96	-48% ถึง 0%	-23% ถึง 0%
-0.97	-49% ถึง 0%	-24% ถึง 0%
-0.98	-50% ถึง 0%	-24% ถึง 0%
-0.99	-51% ถึง 0%	-25% ถึง 0%

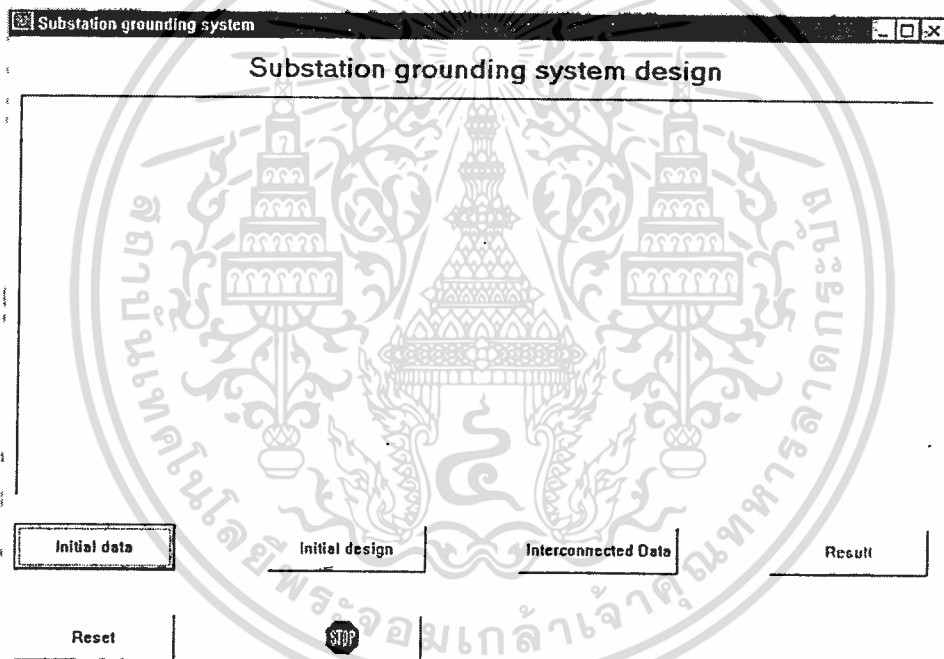
จากการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากสมการที่ (2.28) นั้นจะมีช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมมากกว่าค่าที่ได้จากสมการที่(2.29) ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการที่ (2.29) เป็นสมการเพื่อใช้หาค่า (C_s) โดยประมาณ

4.4 โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

จากแผนภาพในรูปที่ 4.1 นั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบระบบต่อลงดินเพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วซึ่งจะนำเสนอการใช้งานโปรแกรมดังต่อไปนี้

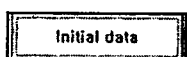
4.4.1 หน้าต่างหลัก

สำหรับโปรแกรมจะเริ่มต้นการทำงานที่หน้าต่างหลัก (Main menu) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

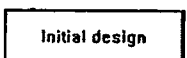


รูปที่ 4.2 แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน

จากรูปที่ 4.2 นั้นจะมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้



คือ ปุ่มที่ใช้สำหรับเข้าสู่หน้าต่างข้อมูลเพื่อป้อนข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบระบบต่อลงดิน



คือ ปุ่มที่ใช้สำหรับเข้าสู่หน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินเพื่อทำการป้อนข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Interconnected Data** คือ ปุ่มที่ใช้สำหรับเข้าสู่หน้าต่างเพื่อป้อนข้อมูลเกี่ยวกับระบบต่อลงดินภายนอกที่เชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ทำการออกแบบ
- Result** คือ ปุ่มที่ใช้แสดงผลลัพธ์จากการออกแบบ
- Reset** คือ ปุ่มที่คลิกเมื่อต้องการลบข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน
- STOP** คือ ปุ่มที่ใช้ยกเลิกการทำงานของโปรแกรม

4.4.2 หน้าต่างข้อมูลเบื้องต้น(Input data)

สำหรับหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรมนี้อาจสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ใช้งานจะต้องทำการป้อนข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบต่อลงดินดังต่อไปนี้

1. ขนาดของสถานีไฟฟ้า (Substation Area, m^2)
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity, $\Omega \cdot m$)
3. ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน (Surface layer resistivity, $\Omega \cdot m$)
4. ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน (Depth of ground grid, m.)

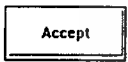
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความหนาของวัสดุที่ใช้โรยที่ผิวดิน (Surface layer thickness, m.)
6. ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย(Duration of shock current, second)
7. ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดตัวนำ (I_f for find conductor size, kA.)
8. ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใช้ทำให้เกิดกระแสกริดสูงสุด (I_f for find grid current, A)
9. ค่า X/R ขณะเกิดการลัดวงจร
10. นำหนักเฉลี่ยที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่า E_{touch} , E_{step}

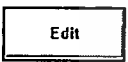
มีองค์ประกอบที่ใช้งานในหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นนี้



คือ ปุ่มเพื่อคลิกสำหรับย้อนกลับไปยังหน้าต่างหลัก



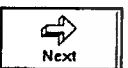
คือ ปุ่มเพื่อคลิกสั่งให้โปรแกรมทำการรับข้อมูลที่ป้อนในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อทำการแก้ไขข้อมูลที่ป้อนให้กับ โปรแกรม



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อทำการกลับข้อมูลที่ป้อนให้กับ โปรแกรมในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อ ไปยังหน้าต่าง Conductor data

4.4.3 หน้าต่าง ข้อมูลของสายตัวนำ(Conductor data)

สำหรับหน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำนี้จะให้ผู้ใช้โปรแกรมทำการเลือกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ข้อมูลที่ผู้โปรแกรมต้องป้อนให้กับ โปรแกรมมีดังนี้

1. ชนิดของตัวนำที่เลือกใช้ (Conductor type)
2. อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม(T_a , °C)
3. ระยะเวลาที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดิน (Duration of current, วินาที)

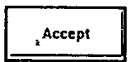
สำหรับค่า TCAP, K_0 , α_r , p_r และค่า T_m จะเป็นค่าคงที่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเลือกชนิดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ซึ่ง โปรแกรมจะกำหนดให้เมื่อมีการเลือกชนิดของตัวนำที่ใช้งาน แต่ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ถ้าไม่ต้องการใช้ค่าที่โปรแกรมกำหนดให้

รูปที่ 4.4 แสดงหน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน

องค์ประกอบที่ใช้งานในหน้าต่างนี้จะมีดังนี้



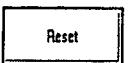
คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อกลับไปยังหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้น



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อให้โปรแกรมรับค่าที่ป้อนในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อต้องการแก้ไขข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรมในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อต้องการลบข้อมูลทั้งหมดที่ป้อนให้กับโปรแกรมในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่ยืนยันว่าข้อมูลที่ป้อนในหน้าต่าง Input data และ Conductor data นั้น

4.4.4 หน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดิน(Initial design ground grid)

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องทำการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับระบบตะแกรงต่อลงดิน ที่ทำการออกแบบว่ามีลักษณะอย่างไร โดยสามารถแสดงหน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินได้ ดังในรูปที่ 4.5 และข้อมูลที่ใช้จะต้องป้อนนั้นภายในหน้าต่างนี้จะมีดังต่อไปนี้

1. รูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน(Grid shape) ในโปรแกรมนี้จะนำเสนอเพียง 5 รูปแบบคือ รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า, รูปทรงดาวแอล, รูปทรงตัวที และ รูปสามเหลี่ยม
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Initial design ground grid

Grid shape

Grid type

no ground rod

use ground rod

position of ground rod

along perimeter or throughout grid

not located along perimeter

L_{x1}

L_{y1}

L_{x2}

L_{y2}

D

$L_{x1} = L_{x2} = L_{y1} = L_{y2}$

L_{x1} m.

L_{x2} m.

L_{y1} m.

L_{y2} m.

D m.

L_r m.

N_r rods

Back Accept Edit Reset Finish

รูปที่ 4.5 แสดงหน้าต่างการออกแบบแบบตะแกรงต่อลงดินของ โปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน

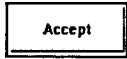
- ลักษณะของตะแกรงต่อลงดิน (Grid type) โดยผู้ใช้งานจะต้องเลือกว่าที่ตะแกรงต่อลงดินมีการติดตั้งแท่งตัวนำดิน (use ground rod) หรือ ไม่มีการติดตั้งแท่งตัวนำดิน(no ground rod)
- ตำแหน่งที่ติดตั้งแท่งตัวนำดิน (Position of ground rod) ผู้ใช้งานจะต้องระบุถึงตำแหน่งที่ติดตั้งแท่งตัวนำดินว่ามีการติดตั้งแบบใดเมื่อมีการติดตั้งแท่งตัวนำดินซึ่งมีให้เลือก 2 กรณีคือ บริเวณขอบของตะแกรงต่อลงดินหรือทั่วทั้งตะแกรงต่อลงดิน (along perimeter or through out grid) และอีกกรณีคือ บริเวณที่ไม่ใช่ขอบของตะแกรงต่อลงดิน (not located in perimeter)
- L_{x1} คือ ความยาวของตะแกรงต่อลงดินในแกน X ตามรูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน (m.)
- L_{x2} คือ ความยาวของตะแกรงต่อลงดินในแกน X ตามรูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน (m.)
- L_{y1} คือ ความยาวของตะแกรงต่อลงดินในแกน Y ตามรูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน (m.)
- L_{y2} คือ ความยาวของตะแกรงต่อลงดินในแกน Y ตามรูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน (m.)
- D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวเดียวกัน (m.)
- L_r คือ ความยาวของแท่งตัวนำดิน(m.)
- N_r คือ จำนวนแท่งตัวนำดิน(m.)

องค์ประกอบที่ใช้งานในหน้าต่างนี้จะมีดังต่อไปนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อกลับไปยังหน้าต่างหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อให้โปรแกรมรับค่าที่ป้อนในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อต้องการแก้ไขข้อมูลที่ป้อนให้กลับโปรแกรมในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อต้องการลบข้อมูลทั้งหมดที่ป้อนให้กับโปรแกรมในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่ยืนยันว่าข้อมูลที่ป้อนในหน้าต่างนี้

4.4.5 หน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอก (Interconnected data)

ภายในหน้าต่างนี้ผู้ใช้งานจะต้องป้อนข้อมูลเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกเพื่อพิจารณาหาค่ากระแสกริด โดยสามารถแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 แสดงหน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดิน

สำหรับการป้อนข้อมูลนั้นผู้ใช้งานจะต้องป้อนจำนวนสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าที่จะทำการออกแบบว่าแล้วคลิกที่ปุ่ม เครื่องถูกเพื่อให้โปรแกรมทราบถึงจำนวนสายส่งและต่อมาโปรแกรมก็จะให้ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาหาค่ากระแสกริดของสายส่งแต่ละวงจร ซึ่งข้อมูลที่ผู้ใช้งานจะต้องป้อนให้กับโปรแกรมมีดังนี้

1. ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า ($Z_g, \Omega/m$)
2. ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งกับสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า ($Z_{gn}, \Omega/m.$)
3. ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่ง (R_r, Ω)
4. ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลในแต่ละสายส่งขณะเกิดการลัดวงจรลงดิน (I_f in line, A.)
5. ระยะห่างระหว่างเสาส่ง (Span between tower, m.)

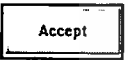
องค์ประกอบที่ใช้งานในหน้าดังนี้



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อให้โปรแกรมรับทราบถึงจำนวนสายส่งและจะสามารถป้อนข้อมูลของสายส่งในแต่ละวงจรให้กับโปรแกรม



คือ ปุ่มที่คลิกเพื่อกลับไปยังหน้าต่างหลัก



คือปุ่มที่คลิกเพื่อให้โปรแกรมรับข้อมูลของสายส่งที่ผู้ใช้ป้อน



คือปุ่มที่คลิกเพื่อแก้ไขข้อมูลของสายส่งแต่ละวงจรที่ป้อนให้กับโปรแกรม



คือปุ่มที่คลิกเพื่อต้องการลบข้อมูลที่ป้อนให้กับ โปรแกรมในหน้าต่างนี้



คือ ปุ่มที่ยืนยันว่าข้อมูลที่ป้อนในหน้าต่างนี้

4.5 ตัวอย่างการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้โปรแกรม

1. ตัวอย่างที่ 1 ทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ขั้นที่ 1 ทำการป้อนข้อมูลเบื้องต้นในหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 4.7

กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ขนาดของสถานีไฟฟ้า=62,500 ตารางเมตร
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน=150 โอห์ม-เมตร
3. ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน=3,000 โอห์ม-เมตร
4. ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน=0.5 เมตร
5. ความหนาของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน=0.1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย=1วินาที
7. ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใช้พิจารณาเลือกขนาดตัวนำ=32kA. [18]
8. ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใช้พิจารณาหาค่ากระแสกริด=22,117.5 A. [18]
9. ค่า $X/R = 26.5$ [18]

Parameter	Value	Unit
Substation Area	62500	squre m.
Soil resistivity	150	ohm-m.
Surface layer resistivity	3000	ohm-m.
Depth of ground grid	0.5	m.
Surface layer thickness	0.1	m.
Duration of shock current	1	seconds
If for find conductor size	32	kA.
If for find grid current	22117.5	A.
X/R	26.5	

รูปที่ 4.7 แสดงหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ขั้นที่ 2 ทำการป้อนข้อมูลให้กับหน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำดังแสดงในรูปที่ 4.8

กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ชนิดของตัวนำ= Copper, commercial hard drawn (Material conductivity = 97%)
2. $TCAP=3.42 J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$ [1]
3. $K_0=242$ [1]
4. $\alpha_r=0.003811/^\circ C$ [1]
5. $p_r=1.78 \mu\Omega \cdot cm.$ [1]
6. $T_m = 1084 ^\circ C$ [1]
7. $T_a = 40^\circ C$
8. ระยะเวลาที่เกิดการลัดวงจร(t_f)= 1 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

conductor data

Conductor type: copper, commercial hard drawn, [Material conductivity = 97%]

TCAP: 3.42 J/(cubic c.m.)(°C)

K0: 242 °C

or: 0.00381 1/°C

ρ : 1.78 Micro ohm-cm.

Tm: 1084 °C

Ta: 40 °C

Duration of current: 1 seconds

Back Accept Edit Reset Finish

รูปที่ 4.8 แสดงหน้าต่างข้อมูลสายตัวนำในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ขั้นที่ 3 ทำการป้อนข้อมูลในหน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 4.9

Initial design ground grid

Grid shape: Square grid

Grid type:

- no ground rod
- use ground rod

position of ground rod:

- along perimeter or throughout grid
- not located along perimeter

Diagram: A square grid with dimensions L_{x1} and L_{x2} (where $L_{x1} = L_{x2} = L_{y1} = L_{y2}$), and spacing D between rods.

Parameters:

- L_{x1} : 250 m
- L_{x2} : 250 m
- L_{y1} : 250 m
- L_{y2} : 250 m
- D : 12.5 m
- L_r : m
- N_r : rods

Back Accept Edit Reset Finish

รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังนี้

1. $L_{x1} = 250 \text{ m.}$
2. $L_{x2} = 250 \text{ m.}$
3. $L_{y1} = 250 \text{ m.}$
4. $L_{y2} = 250 \text{ m}$
5. $D = 12.5 \text{ m.}$

ขั้นที่ 4 ป้อนข้อมูลในหน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.10

กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

สายส่งที่เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้ามี 4 วงจร [18]

1. สายส่งวงจรที่ 1

1.1 $Z_g = 0.00395 \ \Omega \cdot \text{m.}$

1.2 $Z_{g,m} = 0.00067 \ \Omega \cdot \text{m.}$

1.3 $R_t = 10 \ \Omega$

1.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f1}) = 4,728.3 A.

1.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

2. สายส่งวงจรที่ 2

2.1 $Z_g = 0.00395 \ \Omega \cdot \text{m}$

2.2 $Z_{g,m} = 0.00067 \ \Omega \cdot \text{m}$

2.3 $R_t = 10 \ \Omega$

2.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f2}) = 4,541.2 A.

2.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

3. สายส่งวงจรที่ 3

3.1 $Z_g = 0.00395 \ \Omega \cdot \text{m}$

3.2 $Z_{g,m} = 0.00067 \ \Omega \cdot \text{m}$

3.3 $R_t = 10 \ \Omega$

3.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f3}) = 6,424 A.

3.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

4. สายส่งวงจรที่ 4

4.1 $Z_g = 0.00395 \Omega \cdot \text{m}$

4.2 $Z_{gm} = 0.00067 \Omega \cdot \text{m}$

4.3 $R_t = 10 \Omega$

4.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{r2}) = 6,424 A.

4.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

parameter in line

Number of lines lines

Line number 1	$Z_g = 0.00395 \text{ ohms/m}$	$Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$	$R_t = 10 \text{ ohm}$	span between tower	40 m.	$I_0 = 4778.3 \text{ A}$
Line number 2	$Z_g = 0.00395 \text{ ohms/m}$	$Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$	$R_t = 10 \text{ ohm}$	span between tower	40 m.	$I_0 = 4541.2 \text{ A}$
Line number 3	$Z_g = 0.00395 \text{ ohms/m}$	$Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$	$R_t = 10 \text{ ohm}$	span between tower	40 m.	$I_0 = 6424 \text{ A}$
Line number 4	$Z_g = 0.00395 \text{ ohms/m}$	$Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$	$R_t = 10 \text{ ohm}$	span between tower	40 m.	$I_0 = 6424 \text{ A}$

Finish input Parameter

Z_g ohm/m. R_t ohm

Z_{gm} ohm/m. If in line A.

span between tower m.

Back Accept Edit Reset Finish

รูปที่ 4.10 แสดงหน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ขั้นที่ 5 หลังจากการป้อนข้อมูลทั้งหมดให้กับโปรแกรมแล้วจะได้ผลของการออกแบบระบบต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 4.11

จากผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินพบว่าค่า GPR เท่ากับ 2,920.98 V. ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเท่ากับ 518.79 V. และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเท่ากับ 273.17 V. ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดินมีค่าเท่ากับ 484.10 V. และ 1,588.48 V. ตามลำดับซึ่งจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบเบื้องต้นนี้ไม่มีความปลอดภัยเพราะว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามียิ่งกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

Substation grounding system design

rms. fault current for find grid current = 22117.50A.
 rms. grid current = 9967.39 A.
 IGI/F = 45.07 %
 n = 21.00
 na = 21.00
 nb = 1.00
 nc = 1.00
 nd = 1.00
 Km = 0.93
 Ks = 0.37
 Ki = 3.75
 Kli = 0.70
 Ground potential rise [GPR] = 2920.98 V.
 Mesh voltage = 518.79 V.
 Step voltage = 273.17 V.

Check result of design
 [Gpr] 2920.98 V. > [Etouch] 484.10 V.
 [Em] 518.79 V. > [Etouch] 484.10 V.
 [Es] 273.17 V. < [Estep] 1588.40 V.

Design is not safe

Initial data Initial design Interconnected Data Result

Reset STOP

รูปที่ 4.11 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2. ตัวอย่างที่ 2 ทำการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล
 ขั้นที่ 1 ทำการป้อนข้อมูลเบื้องต้นในหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 4.12

Input Data

Substation Area.	62500	square m.
Soil resistivity	150	ohm-m.
Surface layer resistivity	3000	ohm-m.
Depth of ground grid	1.5	m.
Surface layer thickness	0.1	m.
Duration of shock current	1	seconds
If for find conductor size	32	kA.
If for find grid current	22117.5	A.
X/R	26.5	

Weight
 50 kg.
 70 kg.

Back Accept Edit Reset Next

รูปที่ 4.12 แสดงหน้าต่างข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล

กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ขนาดของสถานีไฟฟ้า=62,500 ตารางเมตร
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน=150 โอห์ม-เมตร
3. ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน=3,000 โอห์ม-เมตร
4. ความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน=1.5 เมตร
5. ความหนาของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน=0.1 เมตร
6. ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย=1 วินาที
7. ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใช้พิจารณาเลือกขนาดตัวนำ=32 kA. [18]
8. ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ใช้พิจารณาหาค่ากระแสกริด=22,117.5 A. [18]
9. ค่า $X/R = 26.5$ [18]

ขั้นที่ 2 ทำการป้อนข้อมูลให้กับหน้าต่างข้อมูลของสายตัวนำดังแสดงในรูปที่ 4.13

Parameter	Value	Unit
Conductor type	copper, commercial hard drawn. (Material conductivity = 97%)	
TCAP	3.42	J/(cubic c.m.)[°C]
K_0	242	°C
α_r	0.00381	1/°C
R_r	1.78	Micro ohm-cm.
T_m	1084	°C
T_0	40	°C
Duration of current	1	seconds

รูปที่ 4.13 แสดงหน้าต่างข้อมูลสายตัวนำในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล

กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ชนิดของตัวนำ= Copper, commercial hard drawn (Material conductivity = 97%)
2. $TCAP=3.42$ [1] J/($cm^3 \cdot ^\circ C$)
3. $K_0=242$ [1]
4. $\alpha_r=0.00381$ [1] 1/°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. $p_r = 1.78 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. [1]
6. $T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]
7. $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]
8. ระยะเวลาที่เกิดการลัดวงจร(t_f)= 1 sec

ขั้นที่ 3 ทำการป้อนข้อมูลในหน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 4.14 กำหนดให้ใช้ข้อมูลดังนี้

1. รูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่ใช่แท่งตัวนำดิน
2. $L_{x1} = 100 \text{ m}$.
3. $L_{x2} = 500 \text{ m}$.
4. $L_{y1} = 225 \text{ m}$.
5. $L_{y2} = 125 \text{ m}$
6. $D = 5 \text{ m}$.

รูปที่ 4.14 แสดงหน้าต่างการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล

ขั้นที่ 4 ป้อนข้อมูลในหน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 กำหนดให้สายส่งที่เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้ามี 4 วงจรซึ่งมีข้อมูลดังนี้ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สายส่งวงจรที่ 1

1.1 $Z_g = 0.00395 \Omega \cdot m$

1.2 $Z_{g_m} = 0.00067 \Omega \cdot m$

1.3 $R_t = 10 \Omega$

1.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f1}) = 4,728.3 A.

1.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

2. สายส่งวงจรที่ 2

2.1 $Z_g = 0.00395 \Omega \cdot m$

2.2 $Z_{g_m} = 0.00067 \Omega \cdot m$

2.3 $R_t = 10 \Omega$

2.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f2}) = 4,541.2 A.

2.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

3. สายส่งวงจรที่ 3

3.1 $Z_g = 0.00395 \Omega \cdot m$

3.2 $Z_{g_m} = 0.00067 \Omega \cdot m$

3.3 $R_t = 10 \Omega$

3.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f3}) = 6,424 A.

3.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

4. สายส่งวงจรที่ 4

4.1 $Z_g = 0.00395 \Omega \cdot m$

4.2 $Z_{g_m} = 0.00067 \Omega \cdot m$

4.3 $R_t = 10 \Omega$

4.4 กระแสลัดวงจรในสายส่งวงจรที่ 1 ขณะเกิดการลัดวงจร (I_{f2}) = 6,424 A.

4.5 ระยะห่างระหว่างเสาส่ง = 40 m.

parameter in line

Number of lines lines

Line number 1 $Z_g = 0.00395 \text{ ohm/m}$, $Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$, $R_t = 10 \text{ ohm}$ span between tower = 40 m. $I_0 = 4728.3 \text{ A}$.
 Line number 2 $Z_g = 0.00395 \text{ ohm/m}$, $Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$, $R_t = 10 \text{ ohm}$ span between tower = 40 m. $I_0 = 4541.2 \text{ A}$.
 Line number 3 $Z_g = 0.00395 \text{ ohm/m}$, $Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$, $R_t = 10 \text{ ohm}$ span between tower = 40 m. $I_0 = 5424 \text{ A}$.
 Line number 4 $Z_g = 0.00395 \text{ ohm/m}$, $Z_{gm} = 0.00067 \text{ ohm/m}$, $R_t = 10 \text{ ohm}$ span between tower = 40 m. $I_0 = 5424 \text{ A}$.

Finish input Parameter

Z_g ohm/m. R_t ohm
 Z_{gm} ohm/m. If in line A.
 span between tower m.

Back Accept Edit Reset Finish

รูปที่ 4.15 แสดงหน้าต่างข้อมูลการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกในการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล

ขั้นที่ 5 หลังจากการป้อนข้อมูลทั้งหมดให้กับโปรแกรมแล้วจะได้ผลของการออกแบบระบบต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 4.16

Substation grounding system

Substation grounding system design

rms. fault current for find grid current = 22117.50A.
 rms. grid current = 10144.95 A.
 IG/IF = 45.87 %
 n = 53.70
 na = 35.48
 nb = 1.20
 nc = 1.26
 nd = 1.00
 Km = 0.51
 Ks = 0.22
 Kj = 8.59
 Kii = 0.84
 Ground potential rise (GPR) = 2859.23 V.
 Mesh voltage = 271.91 V.
 Step voltage = 154.35 V.

Check result of design
 [Gpr] 2859.23 V. > [Etouch] 484.10 V.
 [Em] 271.91 V. < [Etouch] 484.10 V.
 [Es] 154.35 V. < [Estep] 1588.40 V.

Design is safe

Initial data Initial design Interconnected Data Result

Reset STOP

รูปที่ 4.16 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินพบว่าค่า GPR เท่ากับ 2,859.23 V.ค่าแรงดันไฟฟ้า
 เมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเท่ากับ 271.91 V. และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น
 ภายในสถานีไฟฟ้าเท่ากับ 154.35 V. ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนและค่า
 แรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัย
 ของระบบต่อลงดินมีค่าเท่ากับ 484.10 V. และ 1,588.48 V. ตามลำดับซึ่งจะพบว่าระบบต่อลงดินที่
 ทำการออกแบบเบื้องต้นนี้มีความปลอดภัยเพราะว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานี
 ไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าว
 สูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถ
 ทนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ในบทนี้นำเสนอผลการทดลองทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำ(D),ค่าความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดิน(h) และขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน(A^2_{mm}) เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบ

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลองออกแบบ

ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินมีดังต่อไปนี้

- 1.รูปแบบของตะแกรงต่อลงดิน จะทดลองทำการออกแบบตะแกรงต่อลงดิน 5 รูปทรงคือ
 - 1.1 รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส
 - 1.2 รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
 - 1.3 รูปทรงตัวแอล
 - 1.4 รูปทรงตัวที
 - 1.5 รูปทรงสามเหลี่ยม
- 2.ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าจะกำหนดให้เท่ากับ 62,500 ตารางเมตร ยกเว้นตะแกรงต่อลงดินแบบสามเหลี่ยมจะกำหนดให้เท่ากับ 68,750 ตารางเมตร
- 3.ระยะเวลาที่เกิดกระแสลัดวงจร (t_f) และระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (t_s) กำหนดให้เท่ากับ 1 วินาที
- 4.น้ำหนักเฉลี่ยของมนุษย์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยกำหนดให้ใช้เท่ากับ 50 กิโลกรัม
- 5.ชนิดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินกำหนดให้ใช้ ตัวนำทองแดงชนิด Commercial hard drawn
- 6.อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม (T_a) เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส
- 7.ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(ρ)ทำการทดลองออกแบบที่ค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร
- 8.ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน(ρ_s)กำหนดให้เท่ากับ 3,000 โอห์ม-เมตร
- 9.ความหนาของวัสดุที่โรยที่ผิวดิน(h_s)หนา0.1 เมตร
- 10.ระยะห่างระหว่างตัวนำ (D) กำหนดให้ใช้เท่ากับ 25, 12.5,5 และ2.5 เมตร

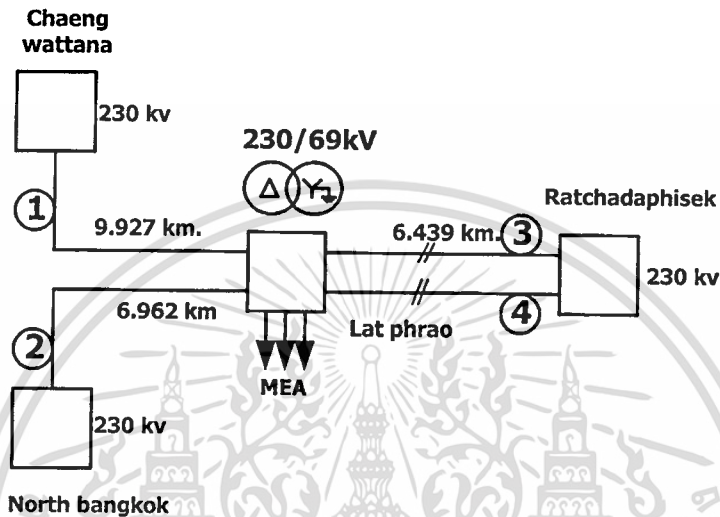
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นชอบใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน (h) กำหนดให้ใช้เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตร

12. ขนาดตัวนำที่เลือกใช้ในระบบต่อลงดิน (A^2_{mm}) กำหนดให้เท่ากับ 95, 120, 150 และ 185 ตารางมิลลิเมตร

13. ข้อมูลของกระแสลัดวงจรที่ใช้ในการพิจารณาค่ากระแสกริดใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าย่อยลาดพร้าวซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แสดงการเชื่อมต่อของสถานีไฟฟ้าย่อยลาดพร้าวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

ข้อมูลของกระแสลัดวงจรลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อยลาดพร้าว [18]

กำหนดให้

ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน = 22,117.5A.

สายส่งวงจรที่ 1

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า = $0.00395 \Omega \cdot m$

ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้ากับสายส่ง = $0.00067 \Omega \cdot m$

ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดในสายส่ง 4,728.3 A.

ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาส่ง 10 Ω

ระยะห่างระหว่างเสาส่ง 40 m.

สายส่งวงจรที่ 2

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า = $0.00395 \Omega \cdot m$

ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้ากับสายส่ง = $0.00067 \Omega \cdot m$

ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดในสายส่ง 4,541.2 A.

ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาส่ง 10 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างเสาสูง 40 m.

สายส่งวงจรที่ 3

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า = $0.00395 \Omega \cdot m$

ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้ากับสายส่ง = $0.00067 \Omega \cdot m$

ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดในสายส่ง 6,424 A.

ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาสูง 10 Ω

ระยะห่างระหว่างเสาสูง 40 m.

สายส่งวงจรที่ 4

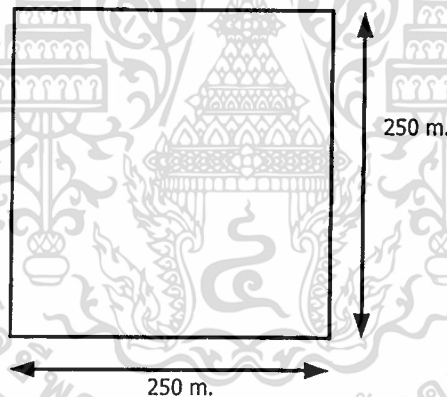
ค่าอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า = $0.00395 \Omega \cdot m$

ค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำระหว่างสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้ากับสายส่ง = $0.00067 \Omega \cdot m$

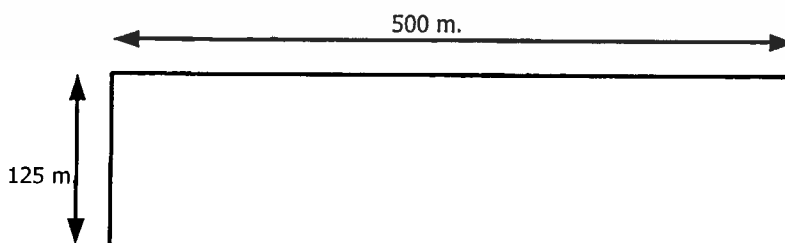
ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดในสายส่ง 6,424 A.

ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาสูง 10 Ω

ระยะห่างระหว่างเสาสูง 40 m.

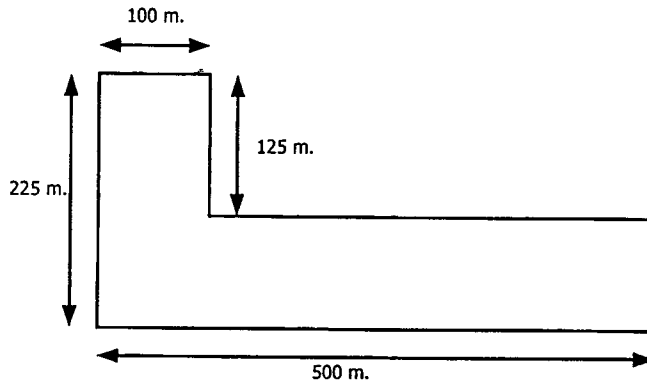


รูปที่ 5.2 แสดงตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร

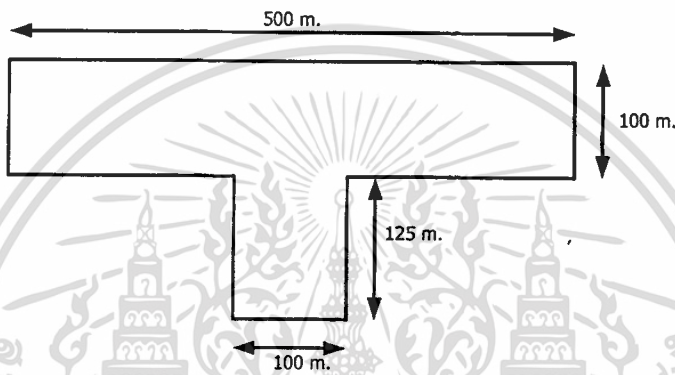


รูปที่ 5.3 แสดงตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร

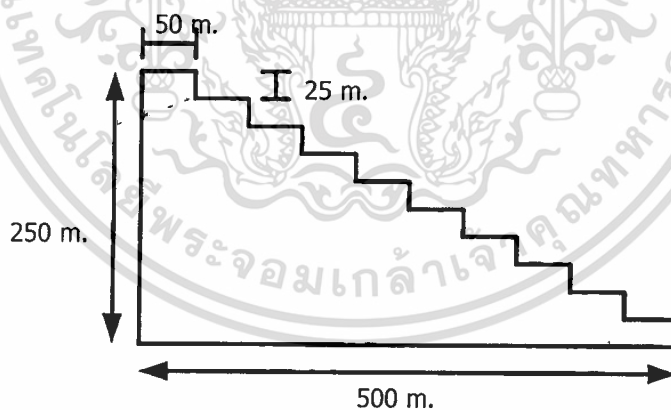
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลมีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร



รูปที่ 5.5 แสดงตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวทีมีขนาดพื้นที่ 62,500 ตารางเมตร



รูปที่ 5.6 แสดงตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมมีขนาดพื้นที่ 68,750 ตารางเมตร

5.2 ผลลัพธ์จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดิน

ทำการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินตามข้อมูลเบื้องต้นที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 5.1 ซึ่งจะได้ผลการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 5.1 - 5.20

ตารางที่ 5.1-5.4 เป็นการทดลองออกแบบตะแกรงต่อลงดินเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _c /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
95	0.25	25.00	0.197	52.26%	2367.31	673.14	481.40	438.85	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.13%	2300.62	450.60	481.40	400.56	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.29	234.13	481.40	403.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.70	101.30	481.40	449.64	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.30%	2364.31	627.80	481.40	227.90	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.17%	2297.53	416.20	481.40	214.86	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2253.13	212.94	481.40	233.22	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.51	93.85	481.40	282.23	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.38%	2358.39	587.56	481.40	122.23	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.25%	2291.42	389.63	481.40	121.65	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.88	207.31	481.40	146.50	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.21	114.46	481.40	193.36	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.195	52.46%	2352.56	566.85	481.40	87.05	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.33%	2285.39	378.83	481.40	90.30	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.72	215.00	481.40	116.33	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2225.01	144.40	481.40	160.59	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.194	52.53%	2346.81	553.72	481.40	69.35	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.41%	2279.44	374.04	481.40	74.42	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.64	227.17	481.40	100.51	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.89	173.67	481.40	142.66	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินในตารางที่ 5.1 เป็นการออกแบบตะแกรงต่อลงดินในรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (D) และระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน (h) จะพบว่าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะมีค่าลดลง และจากการที่ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าลดลงจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่ค่าเกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆจากการทดลองออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ฝังระบบต่อลงดินที่ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตร โดยทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า

เมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระดับความลึกในช่วง 1-1.5 เมตร แต่ที่ระยะห่าง 2.5 เมตรจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเพิ่มระดับความลึกถึงในช่วง 0.5 - 1 เมตร

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านนั้นทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการทดลองใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำจะพบว่าที่ระดับความลึก 0.25 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างระหว่างตัวนำอยู่ในช่วง 25-5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 25-12.5 เมตร ส่วนที่ระดับความลึก 1 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึก 1.5 และ 2 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดระยะห่าง

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้านสูงสุดที่เกิดขึ้น



ตารางที่ 5.2 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _c /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _t (V.)	E _{step} (V.)	Design result
120	0.25	25.00	0.197	52.26%	2367.31	663.90	481.40	438.85	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.13%	2300.62	442.47	481.40	400.56	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.29	226.75	481.40	403.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.70	94.17	481.40	449.64	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.30%	2364.31	618.55	481.40	227.90	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.17%	2297.53	408.06	481.40	214.86	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2253.13	205.55	481.40	233.22	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.51	86.72	481.40	282.23	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.38%	2358.39	578.30	481.40	122.23	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.25%	2291.42	381.48	481.40	121.65	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.88	199.90	481.40	146.50	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.21	107.31	481.40	193.36	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.195	52.46%	2352.56	557.58	481.40	87.05	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.33%	2285.39	370.67	481.40	90.30	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.72	207.58	481.40	116.33	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2225.01	137.24	481.40	160.59	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.194	52.53%	2346.81	544.42	481.40	69.35	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.41%	2279.44	365.86	481.40	74.42	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.64	219.74	481.40	100.51	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.89	166.51	481.40	142.66	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.2 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.1 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 95 ตารางมิลลิเมตรเป็น 120 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.1 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชจากการทดลองออกแบบใช้ระดับความลึกที่ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องแต่เมื่อทำการทดลองออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ระยะ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตร โดยทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินจะพบว่าที่ระยะห่าง 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรจะพบว่าที่ระดับความลึก 0.25 – 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆจะมีค่าลดลงและที่ระยะห่าง 2.5 เมตรจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงที่ระดับความลึก 0.25 – 0.5 เมตร

ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างตัวนำ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตร โดยการเพิ่มระดับความลึกที่ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกที่ฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึก 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวจะลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 – 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวจะลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25-12.5 เมตร ที่ระดับความลึก 1.5 และ 2 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดระยะห่างระหว่างตัวนำ

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _c /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _v (V.)	E _{step} (V.)	Design result
150	0.25	25.00	0.197	52.26%	2367.31	655.07	481.40	438.85	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.13%	2300.62	434.71	481.40	400.56	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.29	219.69	481.40	403.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.70	87.37	481.40	449.64	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.30%	2364.31	609.72	481.40	227.90	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.17%	2297.53	400.29	481.40	214.86	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2253.13	198.49	481.40	233.22	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.51	79.90	481.40	282.23	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.38%	2358.39	569.45	481.40	122.23	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.25%	2291.42	373.70	481.40	121.65	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.88	192.83	481.40	146.50	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.21	100.49	481.40	193.36	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.195	52.46%	2352.56	548.71	481.40	87.05	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.33%	2285.39	362.88	481.40	90.30	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.72	200.50	481.40	116.33	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2225.01	130.41	481.40	160.59	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.194	52.53%	2346.81	535.35	481.40	69.35	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.41%	2279.44	358.06	481.40	74.42	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.64	212.65	481.40	100.51	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.89	159.66	481.40	142.66	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.3 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.2 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 120 ตารางมิลลิเมตรเป็น 150 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.2 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมซนั้นเมื่อทำการทดลองออกแบบโดยใช้ระดับความลึกในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบต่อลงดินจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการทดลองออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ความลึก 0.25 และ 5 เมตร เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆจะลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินอยู่ในช่วง 0.25 – 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตร

ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระยะห่างระหว่างตัวนำอยู่ในช่วง 25 – 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อปรับระยะห่างระหว่างตัวนำอยู่ในช่วง 25 – 12.5 เมตร ที่ระดับความลึก 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว้นสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ค่าความต้านทานจำ

เพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตรและ ขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _c /I _r (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _p (V.)	E _{step} (V.)	Design result
185	0.25	25.00	0.197	52.26%	2367.31	646.77	481.40	438.85	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.13%	2300.62	427.41	481.40	400.56	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.29	213.06	481.40	403.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.70	80.97	481.40	449.64	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.30%	2364.31	601.41	481.40	227.90	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.17%	2297.53	392.99	481.40	214.86	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2253.13	191.85	481.40	233.22	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.51	73.50	481.40	282.23	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.38%	2358.39	561.13	481.40	122.23	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.25%	2291.42	366.38	481.40	121.65	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.88	186.18	481.40	146.50	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.21	94.08	481.40	193.36	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.195	52.46%	2352.56	540.39	481.40	87.05	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.33%	2285.39	355.55	481.40	90.30	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.72	193.84	481.40	116.33	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2225.01	123.99	481.40	160.59	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.194	52.53%	2346.81	512.63	481.40	69.35	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.41%	2279.44	345.11	481.40	74.42	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.64	209.51	481.40	100.51	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.89	160.40	481.40	142.66	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.4 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.3 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 150 ตารางมิลลิเมตรเป็น 185 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.3 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

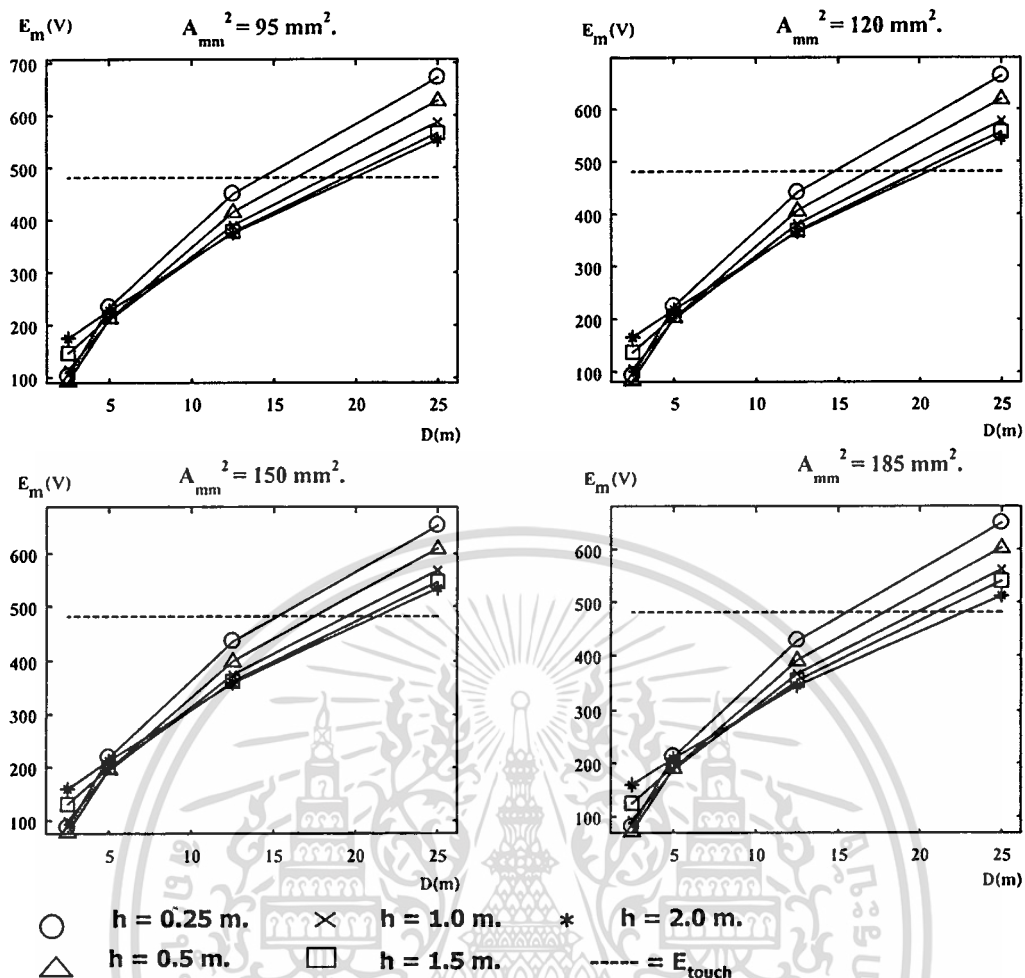
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึก 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น

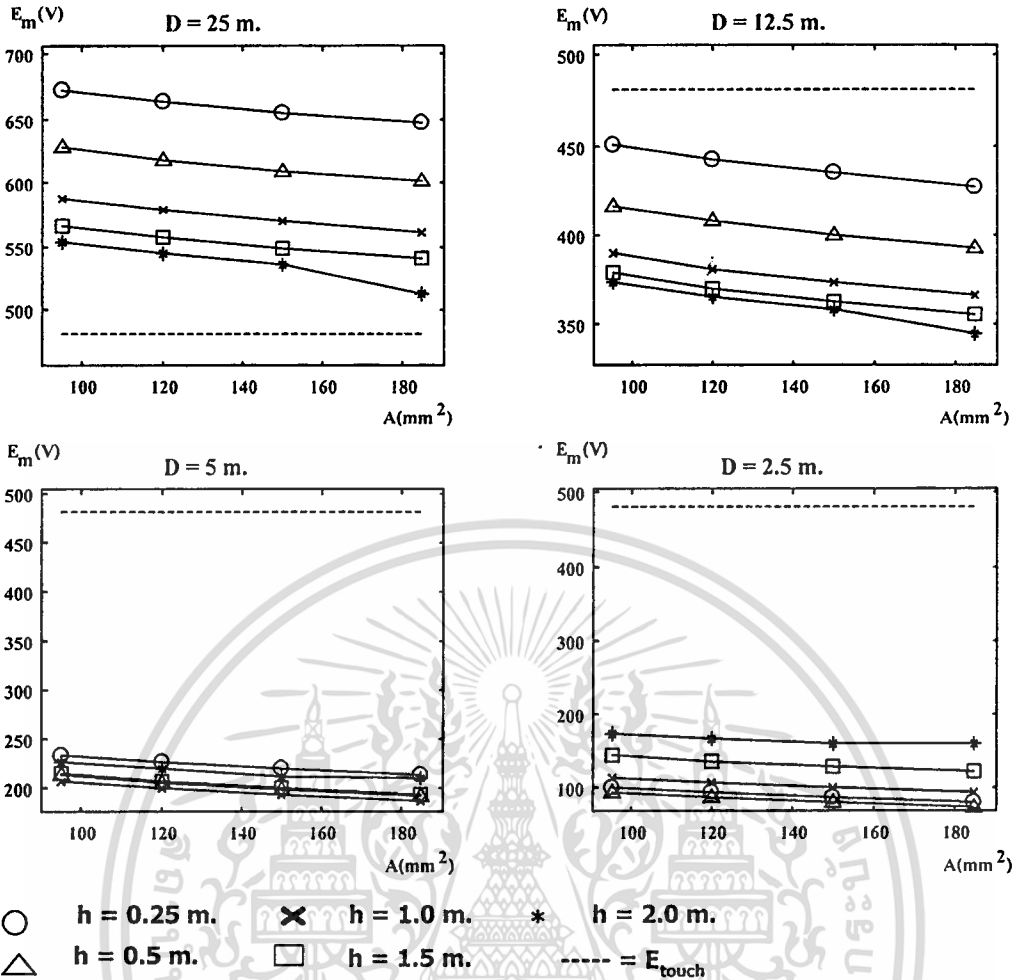
จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

จากผลการออกแบบในตารางที่ 5.1 - 5.4 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบดังนั้นจึงได้นำเสนอผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน และขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินไว้ในกราฟรูปที่ 5.7-5.9



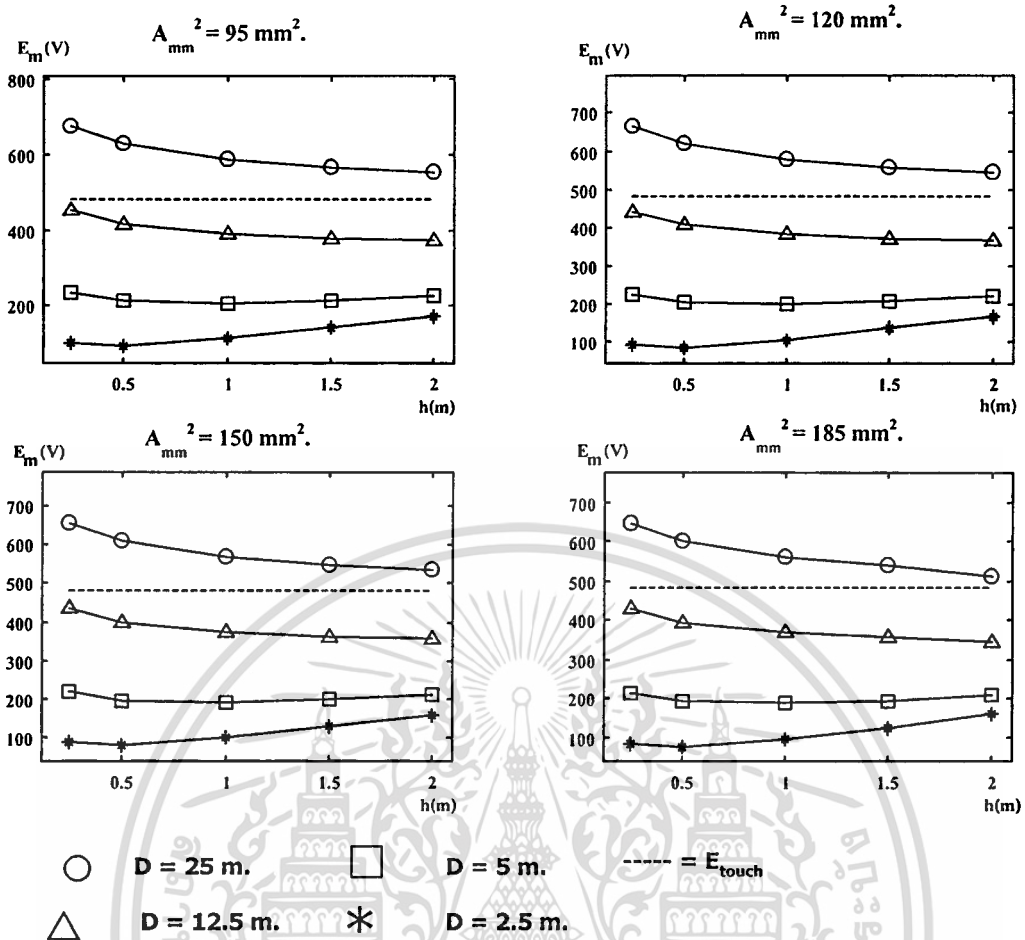
รูปที่ 5.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟรูปที่ 5.7 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 25 – 12.5 เมตรจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากกว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 12.5 – 2.5 เมตร



รูปที่ 5.8 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot \text{m}$

จากกราฟในรูปที่ 5.8 เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะพบว่า การเพิ่มขนาดตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5.9 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อมีการเปลี่ยนความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot \text{m}$

จากกราฟในรูปที่ 5.9 จะพบว่า การเพิ่มระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25–0.5 เมตรนั้นจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด แต่เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินไปอีกจะไม่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดเท่าใดนัก และยังคงจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวอีกถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำที่ออกแบบมีค่าไม่มาก

ในตารางที่ 5.5 – 5.8 เป็นการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _f (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _f (V.)	E _{step} (V.)	Design result
95	0.25	25.00	0.196	52.30%	2364.24	624.47	481.40	403.18	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.14%	2299.75	417.25	481.40	394.80	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.13	218.24	481.40	363.80	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.66	97.70	481.40	404.09	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.34%	2361.25	582.29	481.40	209.37	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.18%	2296.65	385.32	481.40	195.68	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.97	198.52	481.40	210.45	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.47	90.42	481.40	253.64	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.42%	2355.32	544.59	481.40	112.38	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.26%	2290.53	360.29	481.40	110.79	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.72	192.59	481.40	132.20	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.18	108.14	481.40	173.77	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.50%	2349.48	525.07	481.40	79.96	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.34%	2284.5	349.89	481.40	82.23	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.56	198.96	481.40	104.97	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.97	134.49	481.40	144.32	1577.60	safe
2.00	25.00	0.194	52.57%	2343.72	512.63	481.40	63.70	1577.60	not safe	
	12.50	0.185	53.42%	2278.56	345.11	481.40	67.78	1577.60	safe	
	5.00	0.180	53.99%	2234.49	209.51	481.40	90.70	1577.60	safe	
	2.50	0.178	54.19%	2218.85	160.40	481.40	128.20	1577.60	safe	

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.5 นี้เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ออกแบบมีค่าน้อยลง เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าน้อยลงแล้วจะส่งผลต่อค่ากระแสกริดให้มีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงด้วย

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _f (ohm)	I _c /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _f (V.)	E _{step} (V.)	Design result
120	0.25	25.00	0.196	52.30%	2364.24	615.97	481.40	403.18	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.14%	2299.75	409.85	481.40	394.80	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.13	211.58	481.40	363.80	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.66	91.29	481.40	404.09	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.34%	2361.25	573.79	481.40	209.37	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.18%	2296.65	377.91	481.40	195.68	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.97	191.85	481.40	210.45	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.47	84.02	481.40	253.64	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.42%	2355.32	536.08	481.40	112.38	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.26%	2290.53	352.37	481.40	110.79	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.72	185.91	481.40	132.20	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.18	101.72	481.40	173.77	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.50%	2349.48	516.54	481.40	79.96	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.34%	2284.50	342.46	481.40	82.23	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.56	192.27	481.40	104.97	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.97	128.06	481.40	144.32	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.194	52.57%	2343.72	504.10	481.40	63.70	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.42%	2278.56	337.66	481.40	67.78	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.49	202.81	481.40	90.70	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.85	153.96	481.40	128.20	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.6 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.5 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 95 ตารางมิลลิเมตรเป็น 120 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.5 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบ โดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _c /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
150	0.25	25.00	0.196	52.30%	2364.24	607.86	481.40	403.18	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.14%	2299.75	402.78	481.40	394.80	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.13	205.21	481.40	363.80	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.66	85.71	481.40	404.09	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.34%	*2361.25	565.67	481.40	209.37	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.18%	2296.65	370.84	481.40	195.68	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.97	185.48	481.40	210.45	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.47	77.89	481.40	253.64	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.42%	2355.32	527.95	481.40	112.38	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.26%	2290.53	345.78	481.40	110.79	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.72	179.53	481.40	132.20	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.18	95.59	481.40	173.77	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.50%	2349.48	508.4	481.40	79.96	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.34%	2284.50	335.36	481.40	82.23	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.56	185.87	481.40	104.97	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.97	121.92	481.40	144.32	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.194	52.57%	2343.72	495.94	481.40	63.70	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.42%	2278.56	330.56	481.40	67.78	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.49	196.41	481.40	90.70	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.85	147.81	481.40	128.2	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.7 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.6 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 120 ตารางมิลลิเมตรเป็น 150 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.6 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _c /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
185	0.25	25.00	0.196	52.30%	2364.24	600.24	481.40	403.18	1577.6	not safe
		12.50	0.188	53.14%	2299.75	396.13	481.40	394.80	1577.6	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.13	199.23	481.40	363.80	1577.6	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.66	79.43	481.40	404.09	1577.6	safe
	0.50	25.00	0.196	52.34%	2361.25	558.04	481.40	209.37	1577.6	not safe
		12.50	0.188	53.18%	2296.65	364.19	481.40	195.68	1577.6	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.97	179.49	481.40	210.45	1577.6	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.47	72.14	481.40	253.64	1577.6	safe
	1.00	25.00	0.195	52.42%	2355.32	520.31	481.40	112.38	1577.6	not safe
		12.50	0.187	53.26%	2290.53	339.12	481.40	110.79	1577.6	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.72	173.53	481.40	132.20	1577.6	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.18	89.82	481.40	173.77	1577.6	safe
	1.50	25.00	0.194	52.50%	2349.48	500.75	481.40	79.96	1577.6	not safe
		12.50	0.186	53.34%	2284.5	328.69	481.40	82.23	1577.6	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.56	179.87	481.40	104.97	1577.6	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.97	116.15	481.40	144.32	1577.6	safe
	2.00	25.00	0.194	52.57%	2343.72	488.28	481.40	63.70	1577.6	not safe
		12.50	0.185	53.42%	2278.56	323.88	481.40	67.78	1577.6	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.49	190.40	481.40	90.70	1577.6	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.85	142.03	481.40	128.2	1577.6	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.8 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.7 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 150 ตารางมิลลิเมตรเป็น 185 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.7 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

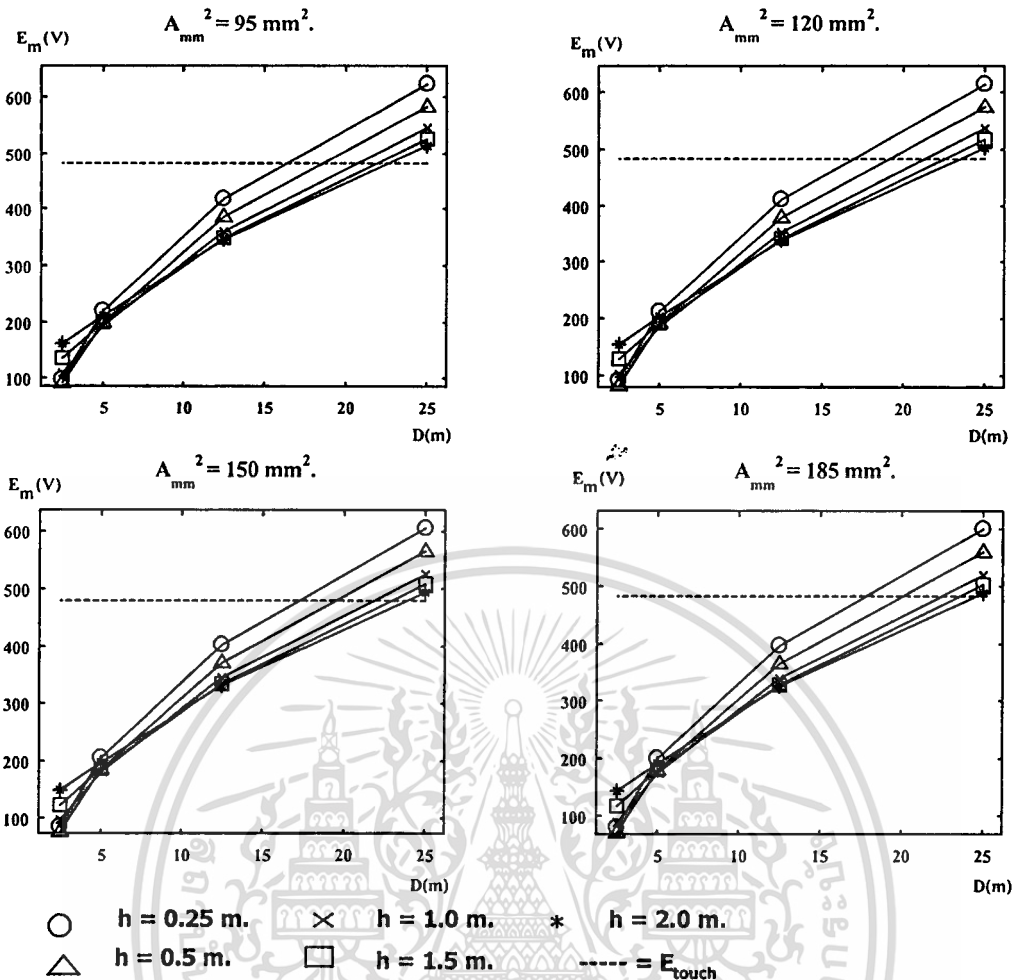
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

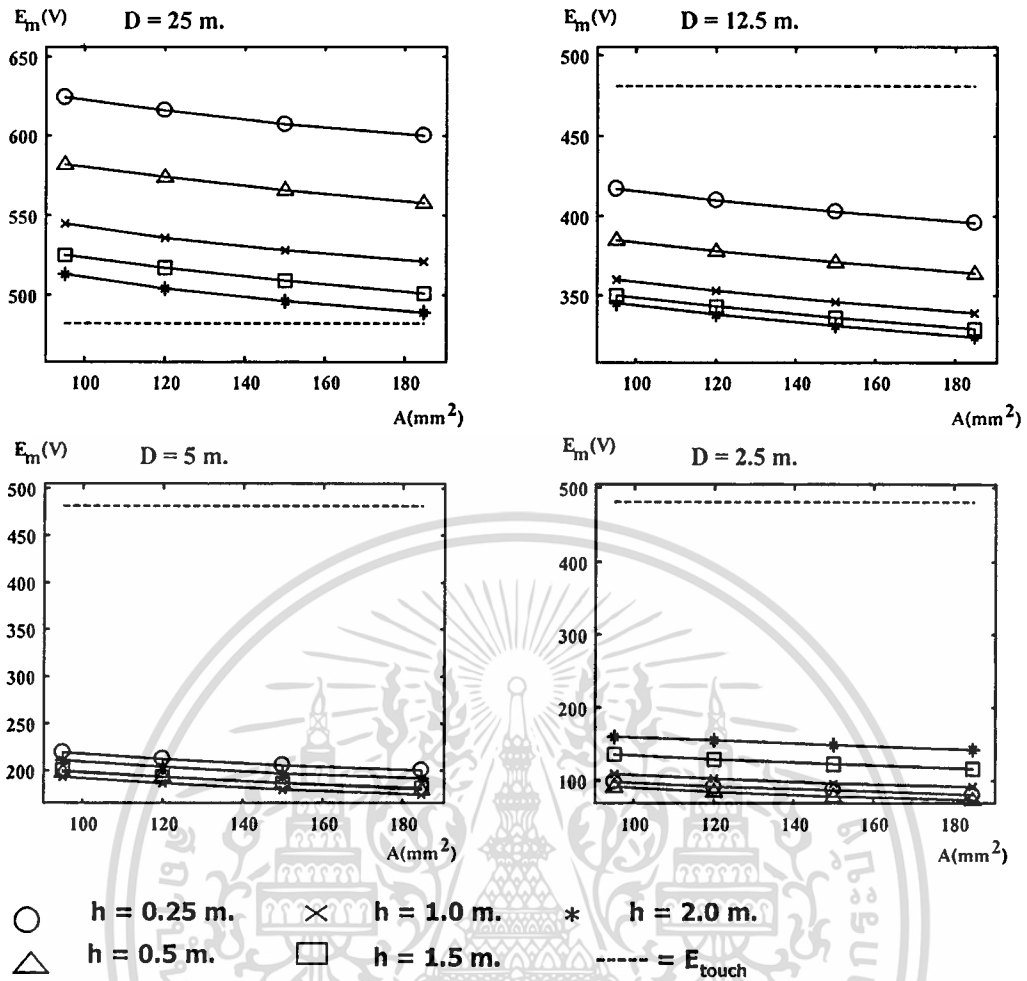
จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าลัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

จากผลการออกแบบในตารางที่ 5.5 - 5.8 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบดังนั้นจึงได้นำเสนอผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน และขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินไว้ในกราฟรูปที่ 5.10-5.12



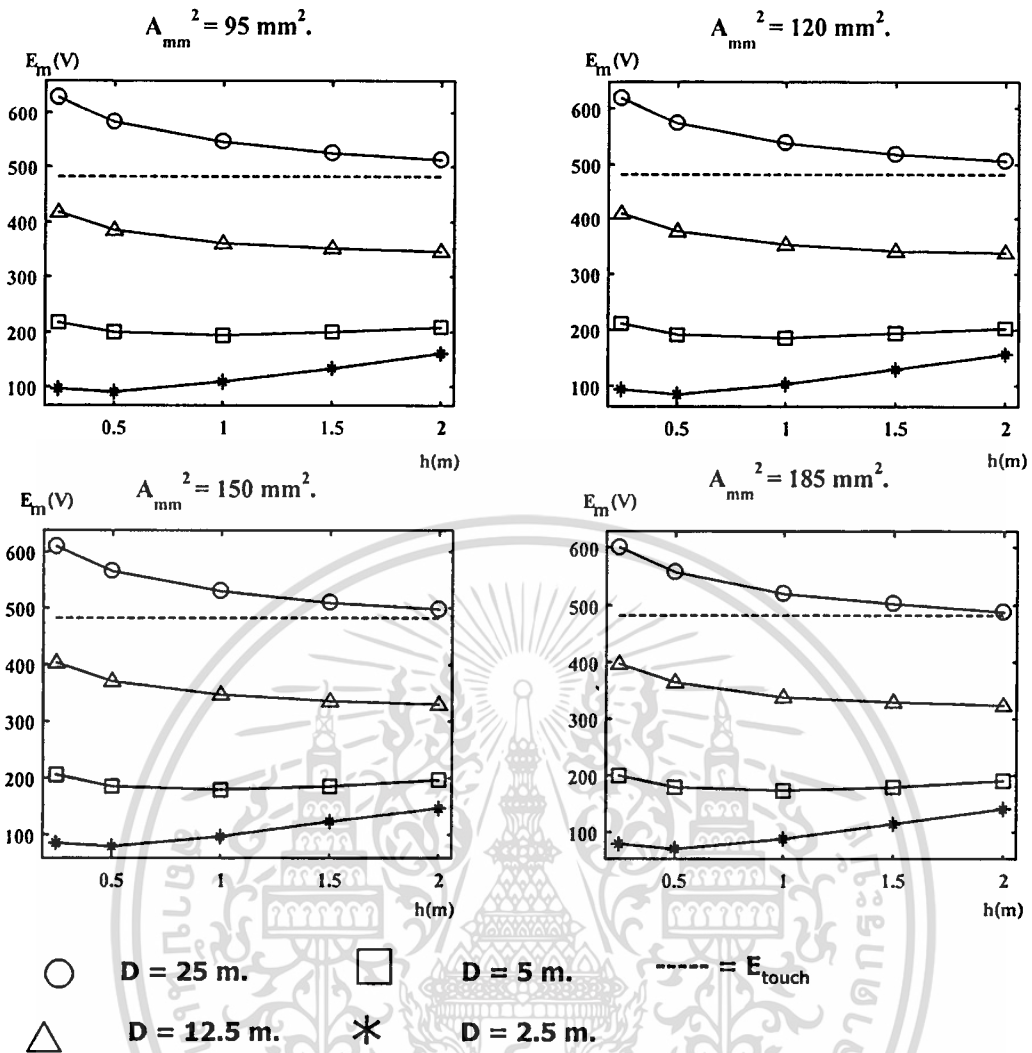
รูปที่ 5.10 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมกซ์ที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟรูปที่ 5.10 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 25 – 12.5 เมตรจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมกซ์สูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากกว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 12.5 – 2.5 เมตร



รูปที่ 5.11 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot \text{m}$

จากกราฟในรูปที่ 5.11 เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะพบว่า การเพิ่มขนาดตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5.12 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อมีการเปลี่ยนความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟในรูปที่ 5.12 จะพบว่า การเพิ่มระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตรนั้นจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด แต่เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินไปอีกจะไม่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดเท่าใดนัก และยังจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวอีกถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำที่ออกแบบมีค่าไม่มาก

ในตารางที่ 5.9 – 5.12 นั้นเป็นการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอล

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _g (ohm)	I _g /I _p (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
95	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	681.25	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	460.42	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	239.54	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	102.21	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	635.49	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	425.31	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	217.85	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	94.73	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	595.16	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	398.48	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	212.46	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	116.60	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	574.54	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	387.75	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	220.78	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	148.06	481.40	167.3	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	561.51	481.40	70.86	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.43%	2277.86	383.10	481.40	76.08	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.37	233.67	481.40	104.50	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.82	178.76	481.40	148.61	1577.6	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.9 นี้เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ออกแบบมีค่าน้อยลง เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าน้อยลงแล้วจะส่งผลต่อค่ากระแสกริดให้มีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงด้วย

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _e (ohm)	I _g /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _t (V.)	E _{step} (V.)	Design result
120	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	671.81	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	452.02	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	231.86	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	94.78	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	626.04	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	416.91	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	210.16	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	87.30	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	585.69	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	390.06	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	204.76	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	109.16	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	565.06	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	379.32	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	213.07	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	140.61	481.40	167.3	1577.60	safe
2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	552.01	481.40	70.86	1577.60	not safe	
	12.50	0.185	53.43%	2277.86	374.66	481.40	76.08	1577.60	safe	
	5.00	0.180	53.99%	2234.37	225.95	481.40	104.50	1577.60	safe	
	2.50	0.178	54.19%	2218.82	171.30	481.40	148.61	1577.60	safe	

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.10 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.9 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 95 ตารางมิลลิเมตรเป็น 120 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.9 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
150	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	662.79	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	444.00	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	224.53	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	87.69	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	617.02	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	408.88	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	202.82	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	80.20	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	576.65	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	382.02	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	197.41	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	102.05	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	556.00	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	371.27	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	205.70	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	133.49	481.40	167.3	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	542.95	481.40	70.86	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.43%	2277.86	366.60	481.40	76.08	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.37	218.57	481.40	104.50	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.82	164.17	481.40	148.61	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.11 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.10 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 120 ตารางมิลลิเมตรเป็น 150 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.6 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _g (ohm)	I _g /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _f (V.)	E _{step} (V.)	Design result
185	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	654.51	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	436.46	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	217.63	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	81.02	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	608.53	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	401.34	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	195.92	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	73.53	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	568.16	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	374.47	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	190.50	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	95.37	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	547.50	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	363.70	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	198.78	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	126.80	481.40	167.30	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	534.43	481.40	70.86	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.43%	2277.86	359.02	481.40	76.08	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.37	211.64	481.40	104.50	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.82	157.47	481.40	148.61	1577.6	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.12 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.11 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 150 ตารางมิลลิเมตรเป็น 185 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.11 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

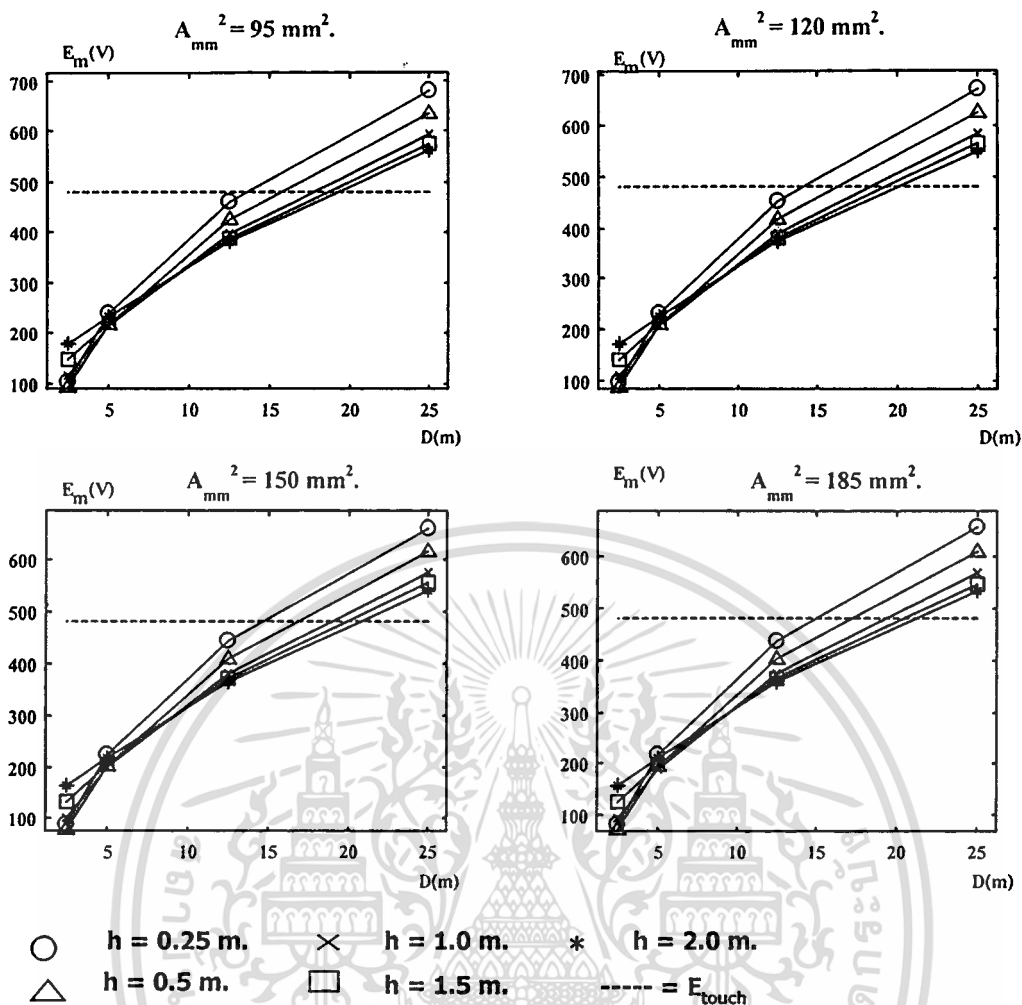
สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

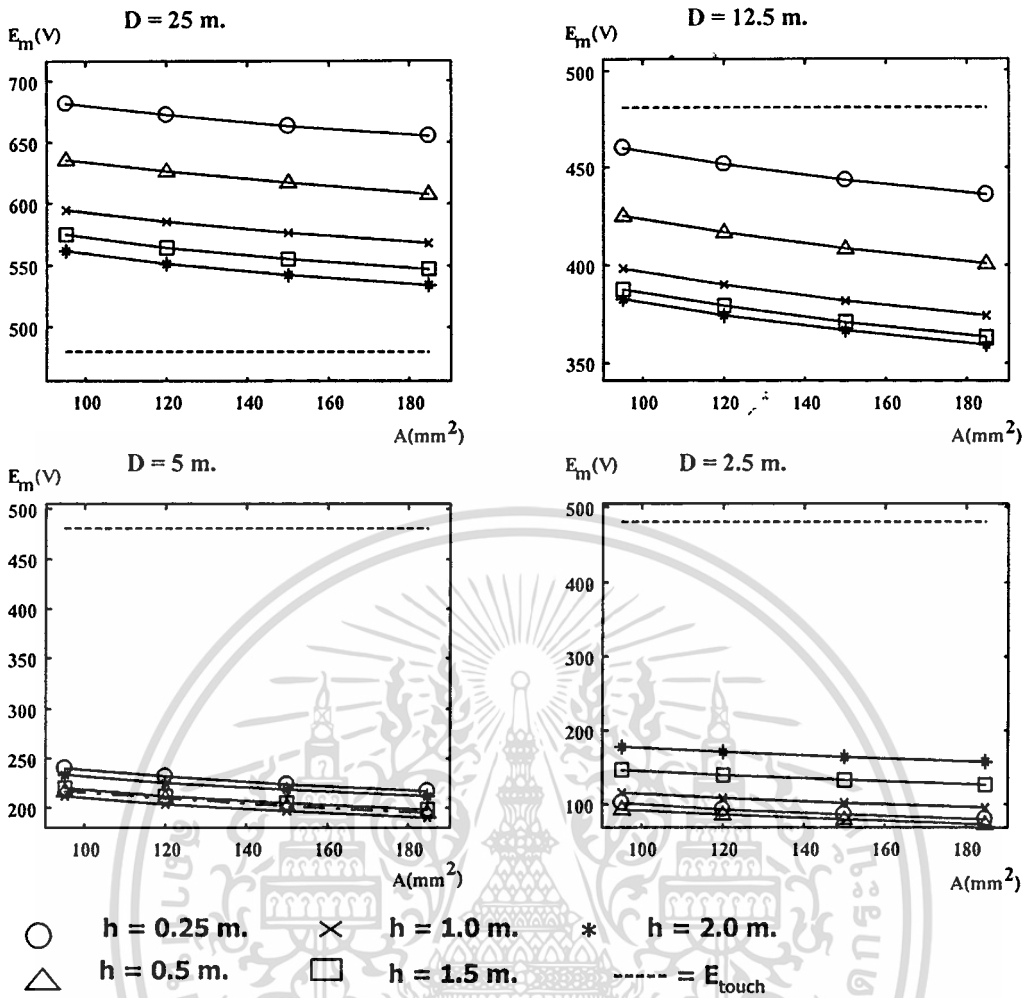
จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีควมปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้น

จากผลการออกแบบในตารางที่ 5.9 - 5.12 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบดังนั้นจึงได้นำเสนอผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน และขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินไว้ในกราฟรูปที่ 5.13-5.15



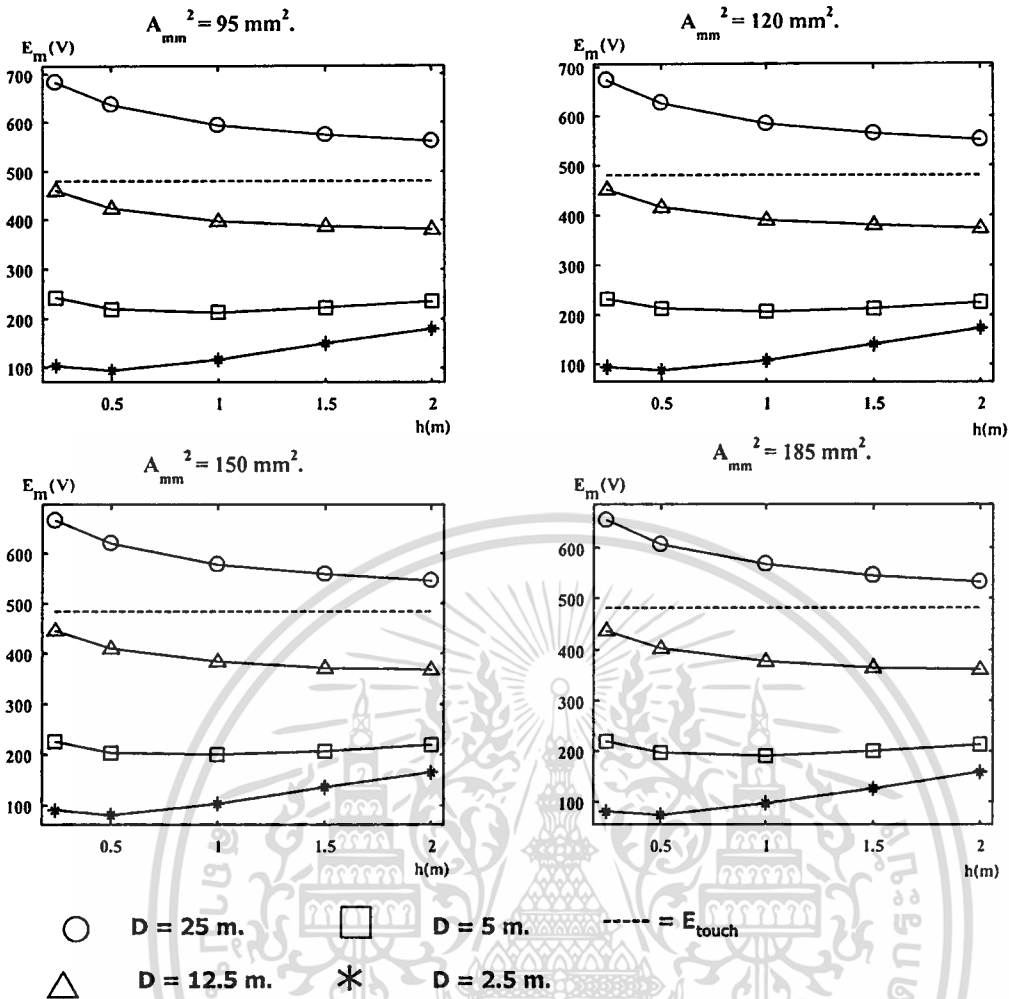
รูปที่ 5.13 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงตัวแอลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟรูปที่ 5.13 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 25 – 12.5 เมตรจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากกว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 12.5 – 2.5 เมตร



รูปที่ 5.14 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 Ω·m

จากกราฟในรูปที่ 5.14 เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะพบว่า การเพิ่มขนาดตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5.15 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวแอลเมื่อมีการปรับความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟในรูปที่ 5.15 จะพบว่าการเพิ่มระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตรนั้นจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดแต่เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินไปอีกจะไม่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดเท่าใดนักและยังจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวอีกถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำที่ออกแบบมีค่าไม่มาก

ในตารางที่ 5.13 – 5.16 นั้นเป็นการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวที

ตารางที่ 5.13 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวทีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
95	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	681.25	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	460.42	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	239.54	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	102.21	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	635.49	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	425.31	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	217.85	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	94.73	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	595.16	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	398.48	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	212.46	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	116.60	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	574.54	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	387.75	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	220.78	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	148.06	481.40	167.3	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	561.51	481.40	70.86	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.43%	2277.86	383.10	481.40	76.08	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.37	233.67	481.40	104.50	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.82	178.76	481.40	148.61	1577.6	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.13 นี้เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ออกแบบมีค่าน้อยลง เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าน้อยลงแล้วจะส่งผลต่อค่ากระแสกริดให้มียิ่งมากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงด้วย

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
120	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	671.81	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	452.02	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	231.86	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	94.78	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	626.04	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	416.91	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	210.16	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	87.30	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	585.69	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	390.06	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	204.76	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	109.16	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	565.06	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	379.32	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	213.07	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	140.61	481.40	167.3	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	552.01	481.40	70.86	1577.60	not safe
		12.50	0.185	53.43%	2277.86	374.66	481.40	76.08	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.99%	2234.37	225.95	481.40	104.50	1577.60	safe
		2.50	0.178	54.19%	2218.82	171.30	481.40	148.61	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.14 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.13 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 95 ตารางมิลลิเมตรเป็น 120 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.13 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _p (ohm)	I _G /I _p (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _t (V.)	E _{step} (V.)	Design result
150	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	662.79	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	444.00	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	224.53	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	87.69	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	617.02	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	408.88	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	202.82	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	80.20	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	576.65	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	382.02	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	197.41	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	102.05	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	556.00	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	371.27	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	205.70	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	133.49	481.40	167.3	1577.60	safe
2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	542.95	481.40	70.86	1577.60	not safe	
	12.50	0.185	53.43%	2277.86	366.60	481.40	76.08	1577.60	safe	
	5.00	0.180	53.99%	2234.37	218.57	481.40	104.50	1577.60	safe	
	2.50	0.178	54.19%	2218.82	164.17	481.40	148.61	1577.60	safe	

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.15 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.14 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 120 ตารางมิลลิเมตรเป็น 150 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.14 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _s (ohm)	I _g /I _f (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
185	0.25	25.00	0.196	52.33%	2361.88	654.51	481.40	448.23	1577.60	not safe
		12.50	0.188	53.15%	2299.06	436.46	481.40	413.78	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.71%	2256.01	217.63	481.40	419.15	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.91%	2240.63	81.02	481.40	468.42	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.196	52.37%	2358.88	608.53	481.40	232.83	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.19%	2295.97	401.34	481.40	221.96	1577.60	safe
		5.00	0.182	53.75%	2252.85	195.92	481.40	242.48	1577.60	safe
		2.50	0.180	53.95%	2237.44	73.53	481.40	294.01	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.195	52.45%	2352.95	568.16	481.40	124.98	1577.60	not safe
		12.50	0.187	53.27%	2289.84	374.47	481.40	125.67	1577.60	safe
		5.00	0.181	53.83%	2246.6	190.50	481.40	152.31	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.03%	2231.14	95.37	481.40	201.43	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.194	52.53%	2347.1	547.50	481.40	88.94	1577.60	not safe
		12.50	0.186	53.35%	2283.81	363.70	481.40	93.28	1577.60	safe
		5.00	0.180	53.91%	2240.44	198.78	481.40	120.95	1577.60	safe
		2.50	0.179	54.11%	2224.94	126.80	481.40	167.30	1577.60	safe
2.00	25.00	0.193	52.60%	2341.34	534.43	481.40	70.86	1577.60	not safe	
	12.50	0.185	53.43%	2277.86	359.02	481.40	76.08	1577.60	safe	
	5.00	0.180	53.99%	2234.37	211.64	481.40	104.50	1577.60	safe	
	2.50	0.178	54.19%	2218.82	157.47	481.40	148.61	1577.6	safe	

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.16 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.15 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 150 ตารางมิลลิเมตรเป็น 185 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.15 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกั้วสูงสุดที่เกิดขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

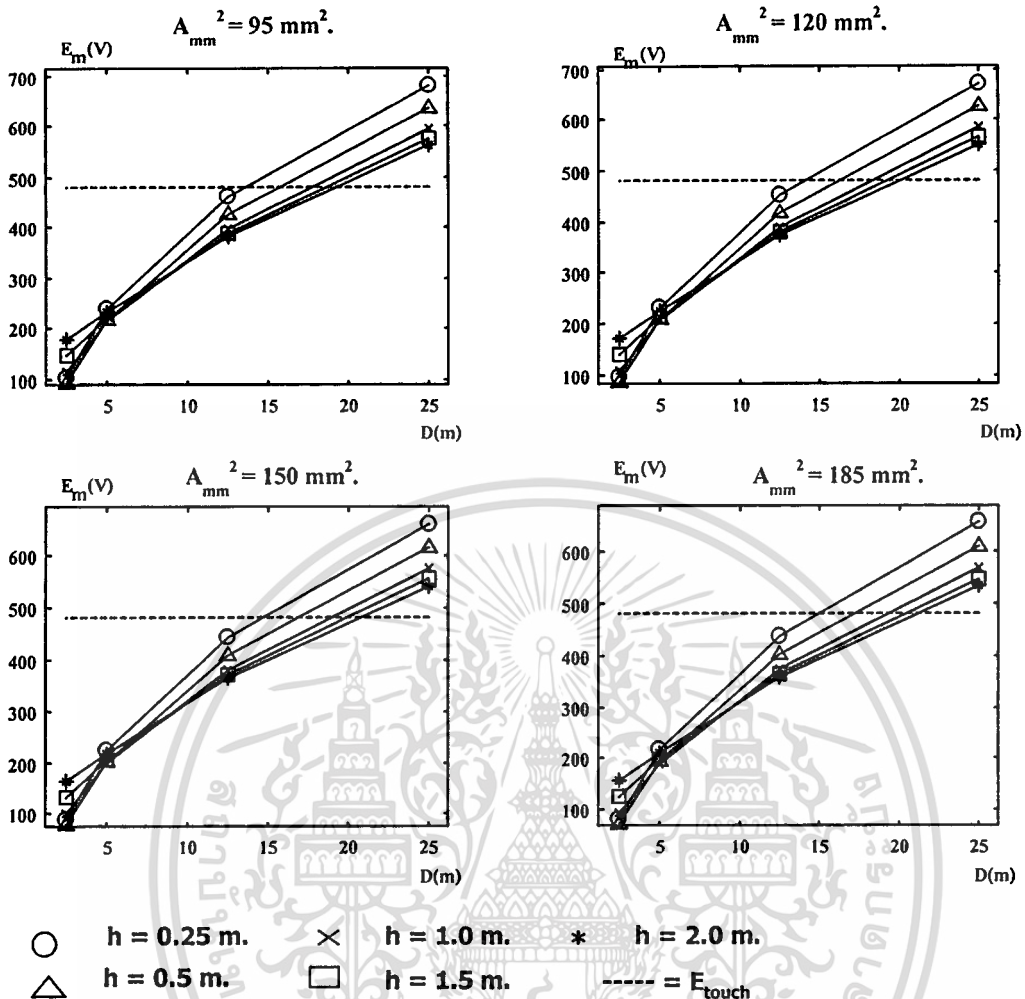
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 5 เมตร ที่ระดับความลึก 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

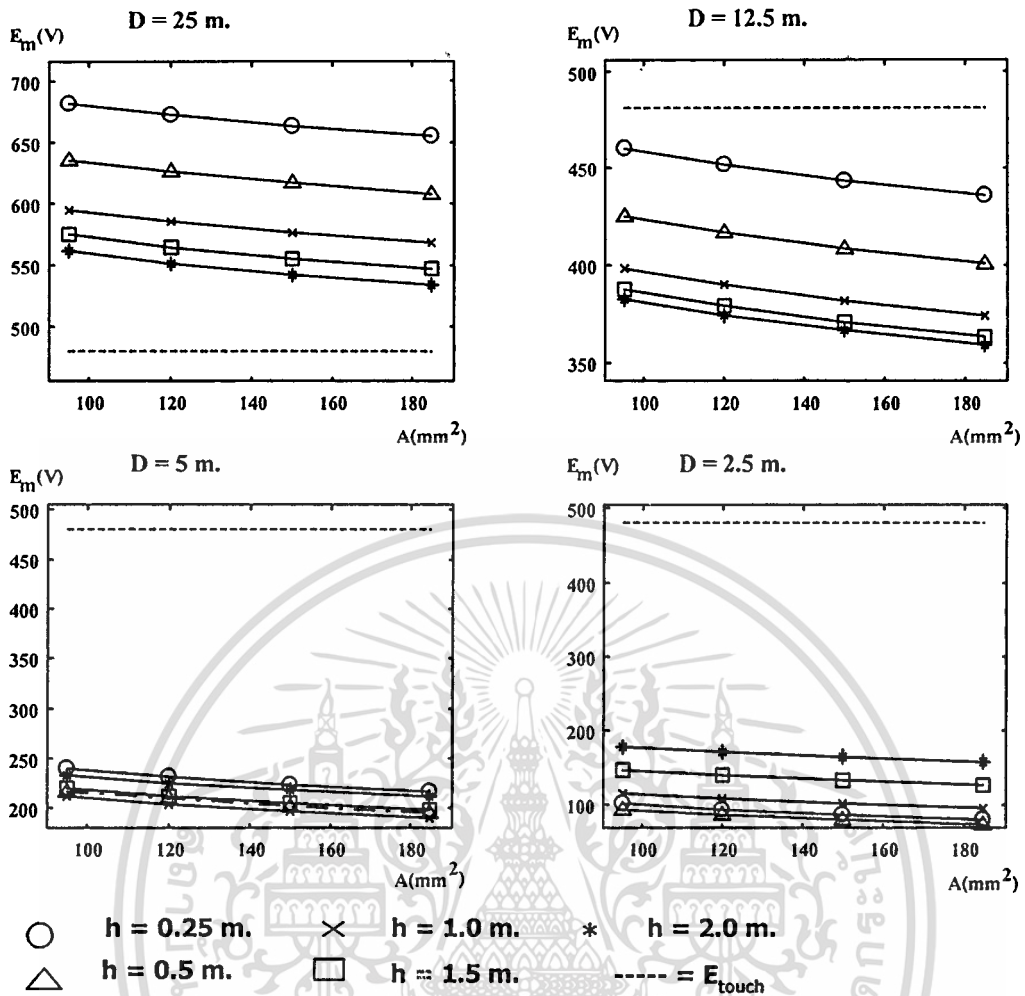
จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้น

จากผลการออกแบบในตารางที่ 5.13 - 5.16 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบดังนั้นจึงได้นำเสนอผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน และขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินไว้ในกราฟรูปที่ 5.16-5.18



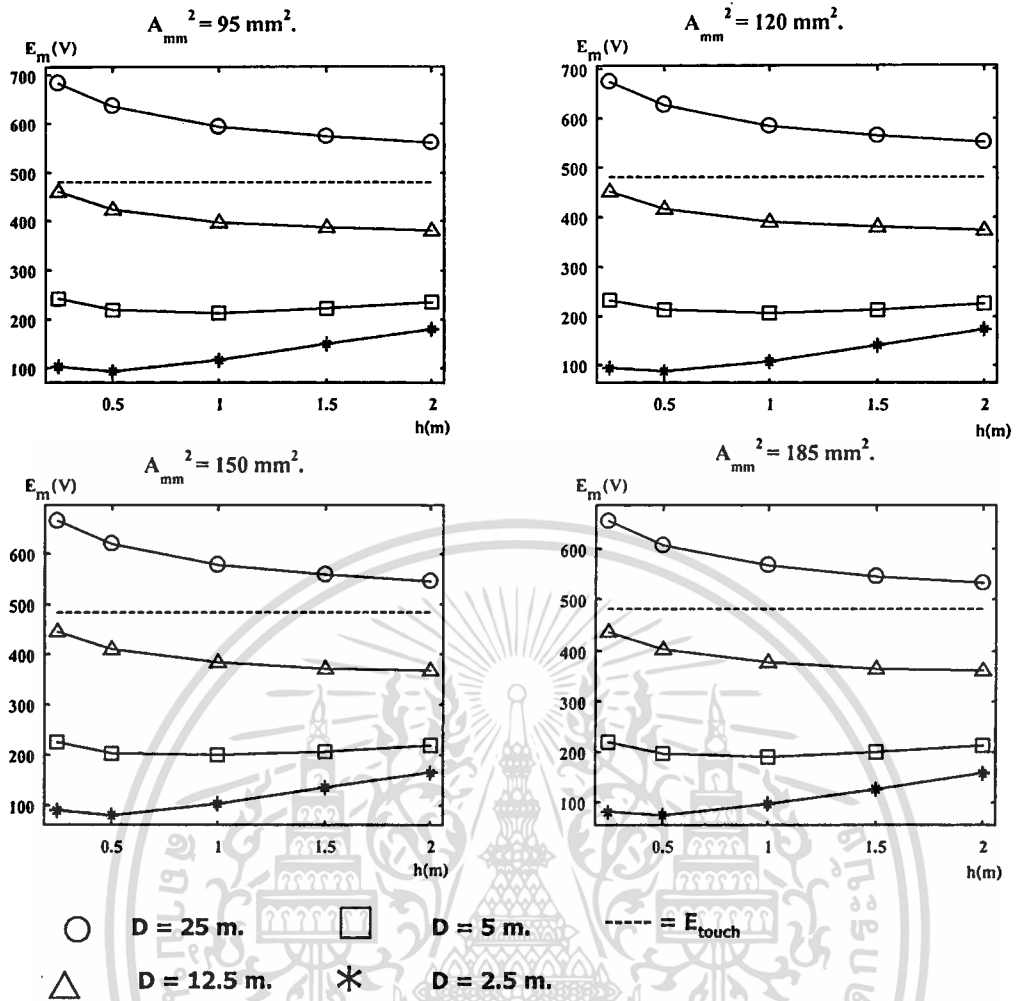
รูปที่ 5.16 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในระบบต่อลงดินรูปทรงตัวทึบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot \text{m}$

จากกราฟรูปที่ 5.16 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 25 – 12.5 เมตรจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากกว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 12.5 – 2.5 เมตร



รูปที่ 5.17 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวทึ่เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot \text{m}$

จากกราฟในรูปที่ 5.17 เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะพบว่า การเพิ่มขนาดตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5.18 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงตัวทึ่เมื่อมีการเปลี่ยนความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot \text{m}$

จากกราฟในรูปที่ 5.18 จะพบว่าการเพิ่มระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตรนั้นจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดแต่เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินไปอีกจะไม่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดเท่าใดนักและยังจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกั้วอีกถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำที่ออกแบบมีค่าไม่มาก

ในตารางที่ 5.17 – 5.20 นั้นเป็นการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยม

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 95 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _x (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _t (V.)	E _{step} (V.)	Design result
95	0.25	25.00	0.186	53.32%	2286.38	655.21	481.40	433.63	1577.60	not safe
		12.50	0.179	54.09%	2226.48	442.83	481.40	401.60	1577.60	safe
		5.00	0.174	54.62%	2185.74	229.34	481.40	408.27	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.81%	2171.24	95.93	481.40	456.98	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.186	53.35%	2283.55	611.23	481.40	225.18	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.13%	2223.56	409.09	481.40	215.41	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.66%	2128.76	208.54	481.40	236.17	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.85%	2168.24	88.96	481.40	286.82	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.185	53.42%	2277.95	572.61	481.40	128.86	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.21%	2217.79	383.44	481.40	121.95	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.74%	2176.88	203.75	481.40	148.33	1577.60	safe
		2.50	0.171	54.93%	2162.32	110.74	481.40	196.48	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.184	53.50%	2272.42	552.92	481.40	86.00	1577.60	not safe
		12.50	0.177	54.28%	2212.1	373.37	481.40	90.51	1577.60	safe
		5.00	0.172	54.81%	2171.08	212.16	481.40	117.77	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.00%	2156.48	141.72	481.40	163.17	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.184	53.57%	2266.97	540.49	481.40	68.51	1577.60	not safe
		12.50	0.176	54.85%	2206.49	369.07	481.40	74.59	1577.60	safe
		5.00	0.171	54.89%	2165.35	224.93	481.40	101.74	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.08%	2150.71	171.88	481.40	144.93	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.17 นี้เมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ออกแบบมีค่าน้อยลง เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าน้อยลงแล้วจะส่งผลต่อค่ากระแสแอมป์ให้มีความมากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงด้วย

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมซที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 – 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมซสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _t (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
120	0.25	25.00	0.186	53.32%	2286.38	646.07	481.40	433.63	1577.60	not safe
		12.50	0.179	54.09%	2226.48	434.68	481.40	401.6	1577.60	safe
		5.00	0.174	54.62%	2185.74	221.86	481.40	408.27	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.81%	2171.24	88.68	481.40	456.98	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.186	53.35%	2283.55	602.09	481.40	225.18	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.13%	2223.56	400.93	481.40	215.41	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.66%	2128.76	201.06	481.40	236.17	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.85%	2168.24	81.71	481.40	286.82	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.185	53.42%	2277.95	563.46	481.40	128.86	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.21%	2217.79	375.32	481.40	121.95	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.74%	2176.88	196.26	481.40	148.33	1577.60	safe
		2.50	0.171	54.93%	2162.32	103.48	481.40	196.48	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.184	53.50%	2272.42	543.75	481.40	86.00	1577.60	not safe
		12.50	0.177	54.28%	2212.10	365.19	481.40	90.51	1577.60	safe
		5.00	0.172	54.81%	2171.08	204.65	481.40	117.77	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.00%	2156.48	134.46	481.40	163.17	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.184	53.57%	2266.97	531.31	481.40	68.51	1577.60	not safe
		12.50	0.176	54.85%	2206.49	360.88	481.40	74.59	1577.60	safe
		5.00	0.171	54.89%	2165.35	217.41	481.40	101.74	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.08%	2150.71	164.60	481.40	144.93	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.18 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.17 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 95 ตารางมิลลิเมตรเป็น 120 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.17 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกั้วสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบ โดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 5.19 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 150 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _f (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
150	0.25	25.00	0.186	53.32%	2286.38	637.35	481.40	433.63	1577.60	not safe
		12.50	0.179	54.09%	2226.48	426.90	481.40	401.60	1577.60	safe
		5.00	0.174	54.62%	2185.74	214.72	481.40	408.27	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.81%	2171.24	81.77	481.40	456.98	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.186	53.35%	2283.55	593.36	481.40	225.18	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.13%	2223.56	393.14	481.40	215.41	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.66%	2128.76	193.91	481.40	236.17	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.85%	2168.24	74.78	481.40	286.82	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.185	53.42%	2277.95	554.72	481.40	128.86	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.21%	2217.79	367.52	481.40	121.95	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.74%	2176.88	189.10	481.40	148.33	1577.60	safe
		2.50	0.171	54.93%	2162.32	96.54	481.40	196.48	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.184	53.50%	2272.42	535.00	481.40	86.00	1577.60	not safe
		12.50	0.177	54.28%	2212.1	357.38	481.40	90.51	1577.60	safe
		5.00	0.172	54.81%	2171.08	197.48	481.40	117.77	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.00%	2156.48	127.51	481.40	163.17	1577.60	safe
	2.00	25.00	0.184	53.57%	2266.97	522.55	481.40	68.51	1577.60	not safe
		12.50	0.176	54.85%	2206.49	353.06	481.40	74.59	1577.60	safe
		5.00	0.171	54.89%	2165.35	210.23	481.40	101.74	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.08%	2150.71	157.65	481.40	144.93	1577.60	safe

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.19 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.18 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 120 ตารางมิลลิเมตรเป็น 150 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.18 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น.

ตารางที่ 5.20 แสดงผลการออกแบบตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร และขนาดตัวนำเท่ากับ 185 ตารางมิลลิเมตร

A(mm ²)	h(m.)	D(m.)	R _k (ohm)	I _G /I _F (%)	GPR(V.)	E _m (V.)	E _{touch} (V.)	E _s (V.)	E _{step} (V.)	Design result
185	0.25	25.00	0.186	53.32%	2286.38	629.15	481.40	433.63	1577.60	not safe
		12.50	0.179	54.09%	2226.48	419.58	481.40	401.60	1577.60	safe
		5.00	0.174	54.62%	2185.74	208.00	481.40	408.27	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.81%	2171.24	75.26	481.40	456.98	1577.60	safe
	0.50	25.00	0.186	53.35%	2283.55	585.16	481.40	225.18	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.13%	2223.56	385.82	481.40	215.41	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.66%	2128.76	187.19	481.40	236.17	1577.60	safe
		2.50	0.172	54.85%	2168.24	68.28	481.40	286.82	1577.60	safe
	1.00	25.00	0.185	53.42%	2277.95	546.50	481.40	128.86	1577.60	not safe
		12.50	0.178	54.21%	2217.79	360.19	481.40	121.95	1577.60	safe
		5.00	0.173	54.74%	2176.88	182.37	481.40	148.33	1577.60	safe
		2.50	0.171	54.93%	2162.32	90.03	481.40	196.48	1577.60	safe
	1.50	25.00	0.184	53.50%	2272.42	526.77	481.40	86.00	1577.60	not safe
		12.50	0.177	54.28%	2212.10	350.04	481.40	90.51	1577.60	safe
		5.00	0.172	54.81%	2171.08	190.74	481.40	117.77	1577.60	safe
		2.50	0.170	55.00%	2156.48	120.99	481.40	163.17	1577.60	safe
2.00	25.00	0.184	53.57%	2266.97	514.31	481.40	68.51	1577.60	not safe	
	12.50	0.176	54.85%	2206.49	345.71	481.40	74.59	1577.60	safe	
	5.00	0.171	54.89%	2165.35	203.48	481.40	101.74	1577.60	safe	
	2.50	0.170	55.08%	2150.71	151.11	481.40	144.93	1577.60	safe	

จากผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.20 นี้มีการเปลี่ยนแปลงจากตารางที่ 5.19 คือเปลี่ยนขนาดของตัวนำที่ใช้จาก 150 ตารางมิลลิเมตรเป็น 185 ตารางมิลลิเมตรส่วนความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินและระยะห่างระหว่างตัวนำนั้นใช้เหมือนกับตารางที่ 5.19 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดตัวนำแล้วไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจึงทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นและค่า GPR ไม่เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สำหรับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีค่าลดลงแล้วจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นและค่า GPR ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อทำการออกแบบโดยให้ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรตามลำดับและทดลองปรับเปลี่ยน

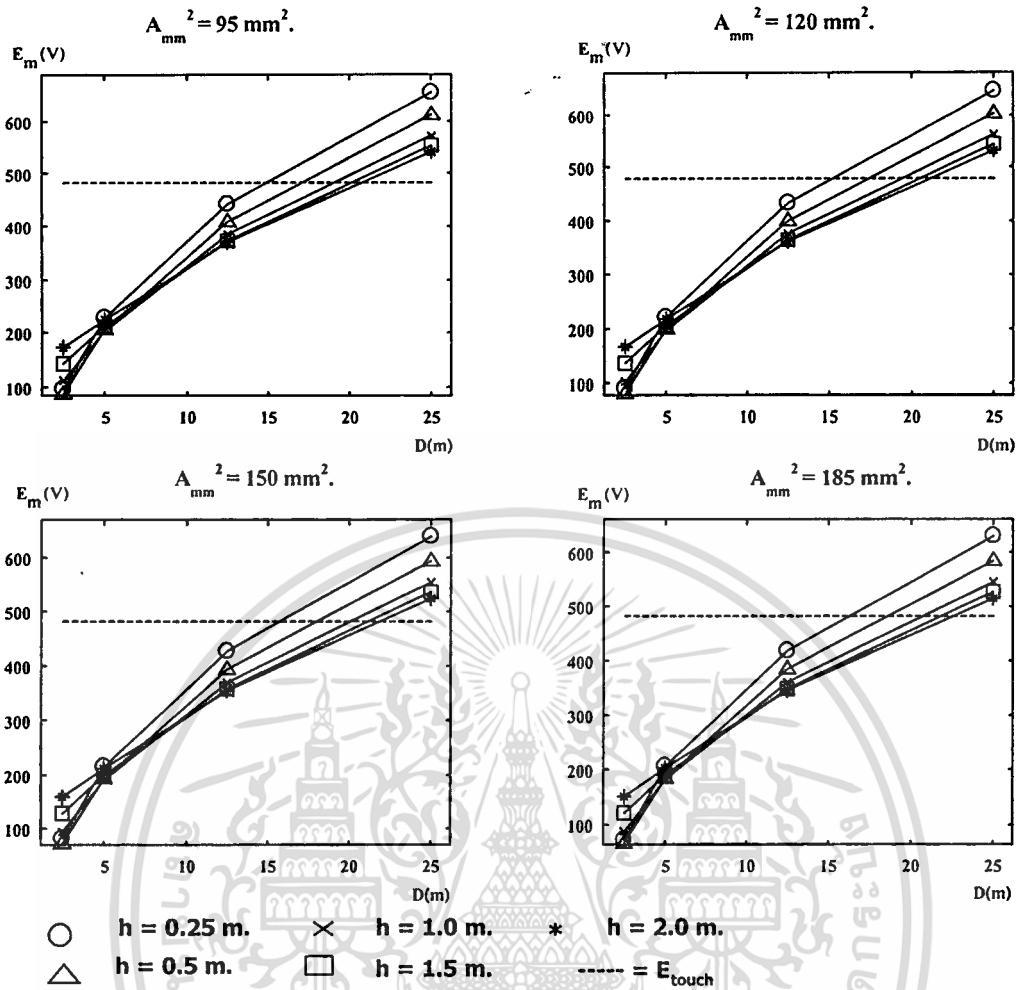
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างตัวนำในระบบต่อลงดินจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำลงจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินนั้นจะพบว่าที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25 และ 12.5 เมตรเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 5 เมตรแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความลึกในช่วง 0.25 - 1 เมตร ที่ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 เมตรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการปรับระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 - 0.5 เมตร

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 25, 12.5, 5 และ 2.5 เมตรตามลำดับและทำการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินแล้วค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้ระดับความลึกเท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรแล้วทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าที่ระดับความลึกเท่ากับ 0.25 และ 0.5 เมตรค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดระยะห่างอยู่ในช่วง 25 - 12.5 เมตร ที่ระดับความลึก 1, 1.5 และ 2 เมตรเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้น

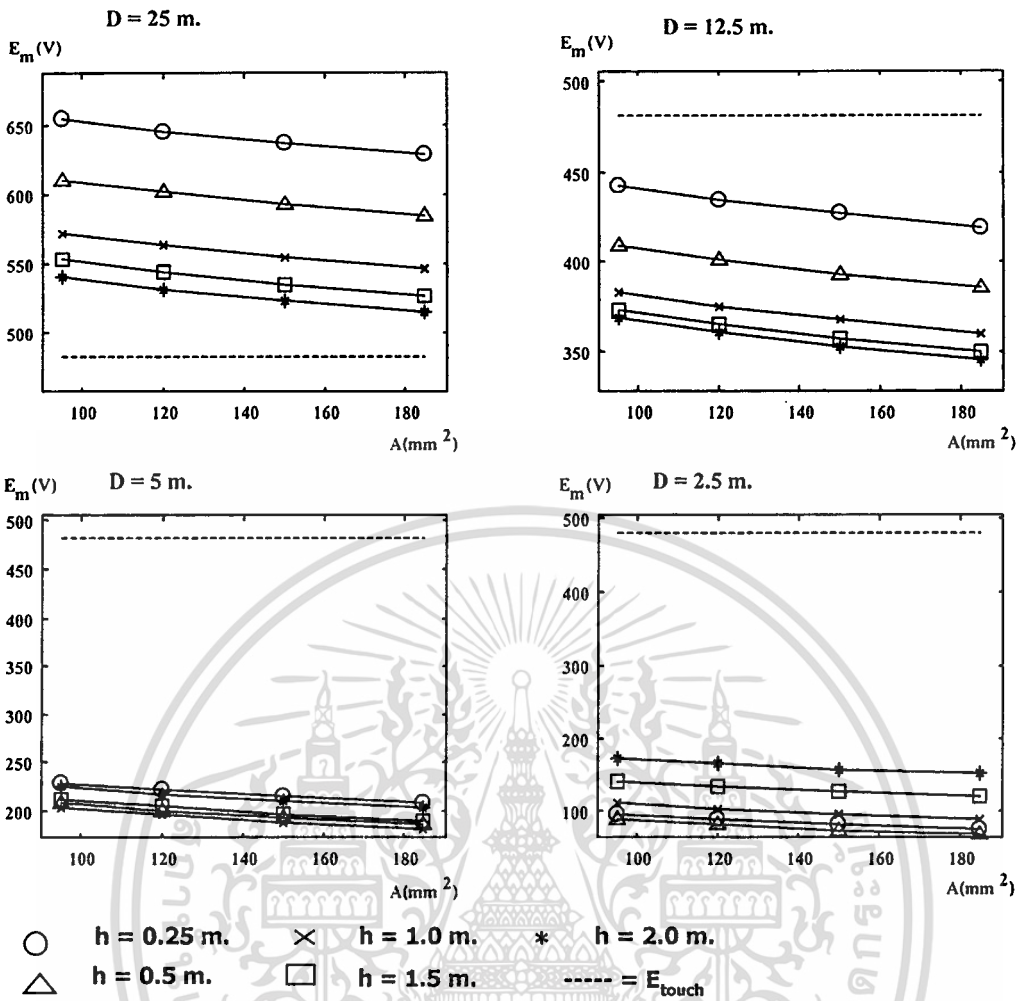
จากระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบจะพบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้น

จากผลการออกแบบในตารางที่ 5.17 - 5.20 จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบดังนั้นจึงได้นำเสนอผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน และขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินไว้ในกราฟรูปที่ 5.19 - 5.21



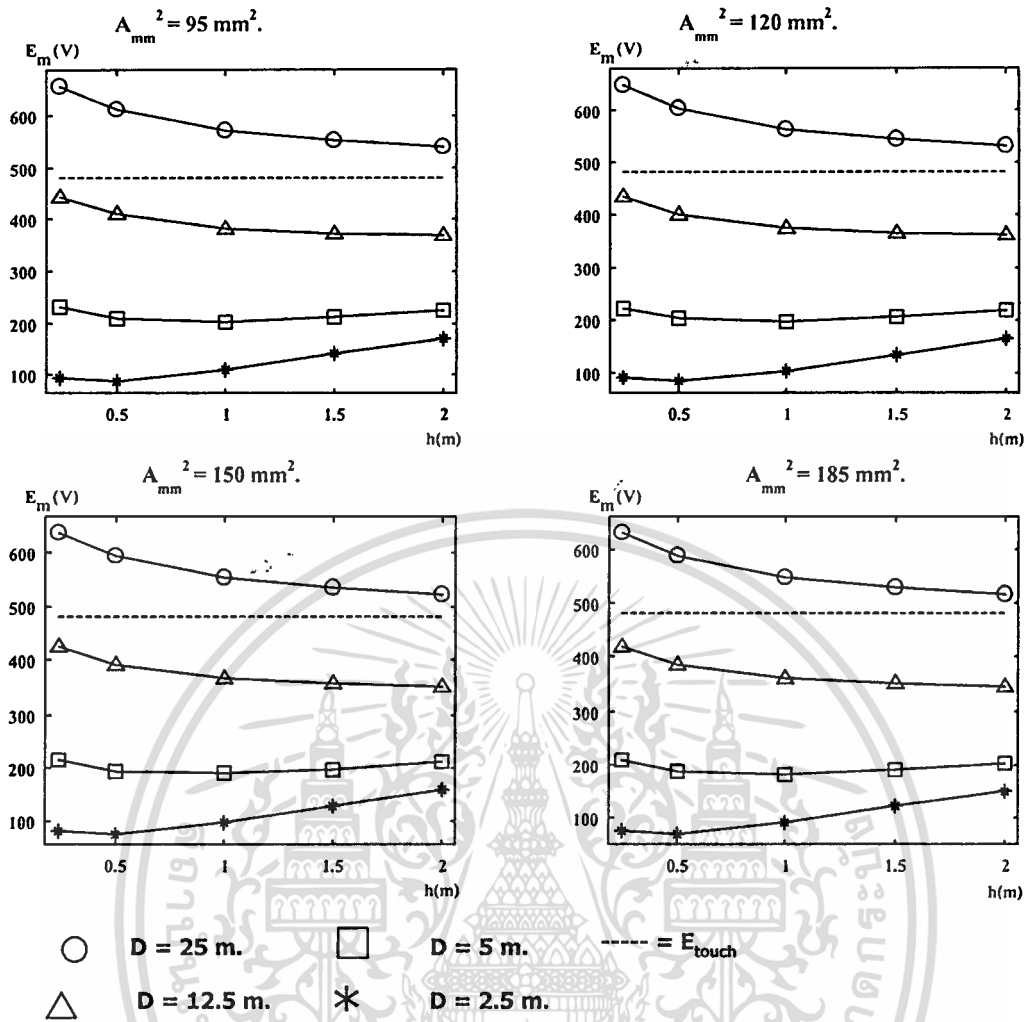
รูปที่ 5.19 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นภายในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟรูปที่ 5.19 จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจะพบว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 25 – 12.5 เมตรจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากกว่าการลดระยะห่างระหว่างตัวนำในช่วง 12.5 – 2.5 เมตร



รูปที่ 5.20 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของสายตัวนำที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟในรูปที่ 5.20 เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะพบว่า การเพิ่มขนาดตัวนำจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 5.21 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสามเหลี่ยมที่เมื่อมีการเปลี่ยนความลึกที่ฝังตะแกรงต่อลงดินที่ค่าความต้านทานจำเพาะ $100 \Omega \cdot m$

จากกราฟในรูปที่ 5.21 จะพบว่า การเพิ่มระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.25 – 0.5 เมตรนั้นจะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุด แต่เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินไปอีกจะไม่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดเท่าใดนัก และยังคงจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวอีกถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำที่ออกแบบมีค่าไม่มาก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

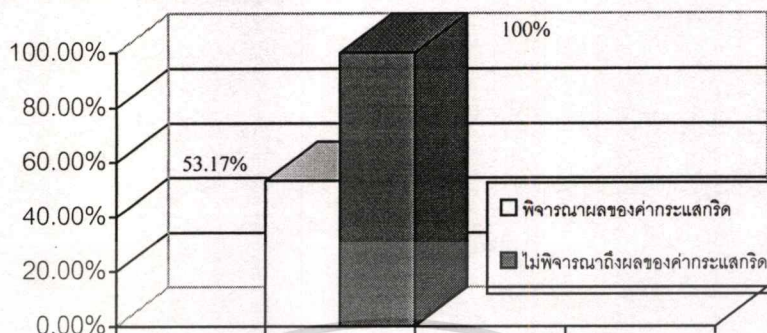
ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ทำการออกแบบนั้นจะต้องทำการพิจารณาถึงผลของค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดิน เพราะวาระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นจะมีการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอกด้วยสายล่อฟ้าของระบบไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินจะทำให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรบางส่วนแบ่งไหลไปยังระบบต่อลงดินภายนอกจึงเป็นผลให้ค่ากระแสแตรกิดหรือค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่ไหลผ่านระบบต่อลงดินลงสู่ดินมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรทั้งหมดที่เกิดขึ้นทั้งหมด [1, 4, 10, 11, 12]

สำหรับค่ากระแสลัดวงจรที่ทำให้เกิดค่ากระแสแตรกิดสูงสุดนั้นจะเป็นการลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นภายในสถานไฟฟ้า โดยในประเทศไทยนั้นระบบไฟฟ้าจะมีการต่อนิวทรอลของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิลงดิน ส่วนทางด้านปฐมภูมินั้นไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินทั้งนี้เพื่อให้กระแสลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นไหลกลับไปยังแหล่งจ่าย ดังนั้นในการคิดค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นจะใช้ค่ากระแสลัดวงจรลงดินทางด้านปฐมภูมิมาใช้ในการพิจารณาหาค่ากระแสแตรกิดเพราะทางด้านทุติยภูมิจะไม่ทำให้เกิดค่ากระแสแตรกิดเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.5 และประเภทของการเกิดการลัดวงจรลงดินที่นำมาใช้ในการพิจารณาหาค่ากระแสแตรกิดนี้จะใช้กระแสลัดวงจรแบบ Single line to ground fault หรือ Double line to ground fault โดยเลือกใช้การลัดวงจรลงดินที่มีปริมาณกระแสมากที่สุด

ค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าไม่คงที่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยที่ค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากถ้าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ามีค่าน้อยแต่ถ้าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ามีค่ามากแล้วจะทำให้ค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย โดยค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นนี้จะแปรผกผันกับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นจะพบว่าค่ากระแสแตรกิดที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลต่อปริมาณตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานไฟฟ้า ดังนั้นจะสามารถยกตัวอย่างเปรียบเทียบถึงปริมาณตัวนำที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินอย่างต่ำเพื่อให้เกิดความปลอดภัย โดยทดลองทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลในการออกแบบตามบทที่ 5 ใช้ตะแกรงต่อลงดินรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดตัวนำที่ใช้เท่ากับ 120 ตารางมิลลิเมตร ความลึกที่ฝังระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.5 เมตร ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินเท่ากับ 12.50 เมตรซึ่งจะได้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเท่ากับ 0.188 โอห์ม และทำการออกแบบโดยไม่พิจารณาถึงผลของค่า

กระแสกริดที่เกิดขึ้นและพิจารณาถึงผลค่ากระแสกริด ซึ่งจะสามารถแสดงปริมาณกระแสกริดใช้ในการออกแบบในระบบต่อลงดินทั้งสองแบบ ได้ดังกราฟในรูปที่ 6.1

ปริมาณกระแสกริดเมื่อเทียบกับกระแสลัดวงจรลงดิน(%)



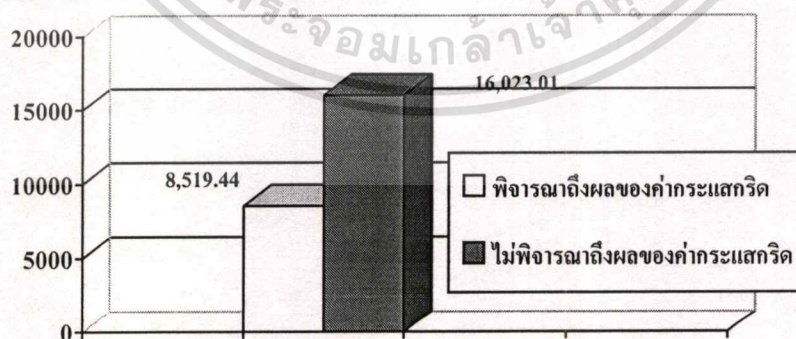
$$R_g = 0.188 \text{ ohm}$$

รูปที่ 6.1 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณกระแสกริดที่ใช้ในการออกแบบ

จากการออกแบบ โดยการพิจารณาค่ากระแสกริดจะพบว่าถ้าพิจารณาถึงผลของค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นจะมีค่ากระแสกริดเกิดขึ้นเพียง 53.17% ของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด แต่ถ้าไม่พิจารณาถึงผลของค่ากระแสกริดแล้วจะต้องใช้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นทั้งหมด จากปริมาณกระแสกริดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 6.1 จะส่งผลต่อปริมาณตัวนำอย่างต่ำที่ใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัยดังแสดงอยู่ในแผนภูมิรูปที่

6.2

ปริมาณตัวนำอย่างต่ำที่ต้องใช้ในการออกแบบ(m.)



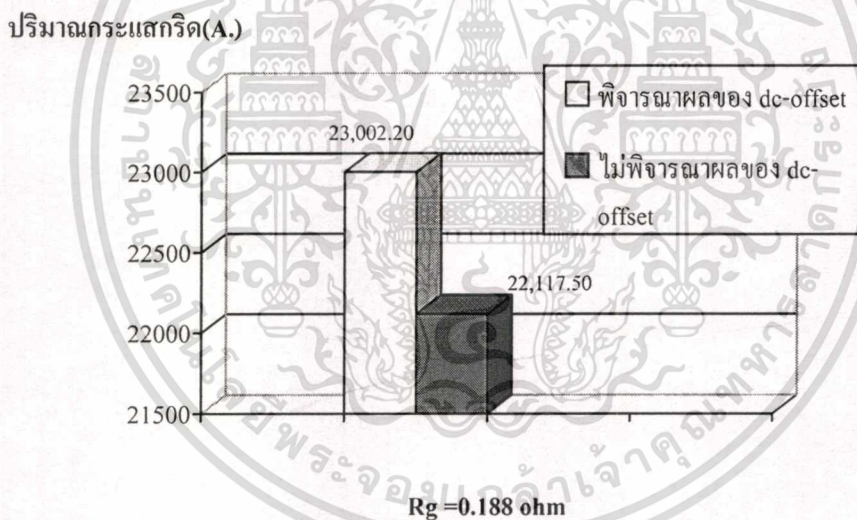
$$R_g = 0.188 \text{ ohm}$$

รูปที่ 6.2 แผนภูมิแสดงปริมาณตัวนำอย่างต่ำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

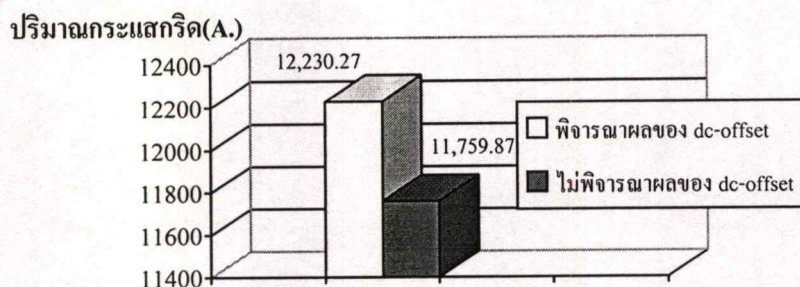
จากรูปที่ 6.2 จะพบว่าจากการออกแบบระบบต่อลงดินโดยทำการพิจารณาถึงผลของค่ากระแสกริดนั้นจะใช้ตัวนำอย่างต่ำ 8,519.44 เมตรแต่ในแบบไม่พิจารณาผลของค่ากระแสกริดต้องใช้ตัวนำอย่างต่ำ 16,023.01 เมตร ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นควรที่จะต้องพิจารณาถึงผลของค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นเพราะจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นต่อการก่อสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าอย่างมาก

เนื่องจากขณะเกิดการลัดวงจรลงดินนั้นจะมีผลของค่ากระแส dc-offset เข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 ซึ่งค่า dc-offset ที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า, ระยะเวลาการเกิดการลัดวงจรลงดินก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงานและอัตราส่วน X/R ของระบบไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินจึงควรที่จะพิจารณาถึงผลของค่า dc-offset ที่เกิดขึ้นด้วยเพราะถ้าไม่พิจารณาจะทำค่ากระแสลัดวงจรที่นำมาใช้ในการออกแบบมีค่าต่ำกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าลาดพร้าวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต



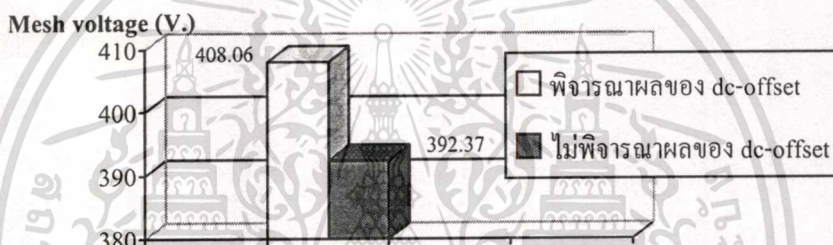
รูปที่ 6.3 แผนภูมิแสดงปริมาณค่ากระแสลัดวงจรลงดินเมื่อพิจารณาผลของ dc-offset และไม่พิจารณาผลของ dc-offset

จากรูปที่ 6.3 เมื่อไม่พิจารณาผลของค่า dc-offset ที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่นำไปใช้ในการออกแบบมีค่าต่ำกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงซึ่งจะส่งผลให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้น, ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงเมื่อพิจารณาถึงผลของค่า dc-offset ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยต่อระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ทำการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 6.4, 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ



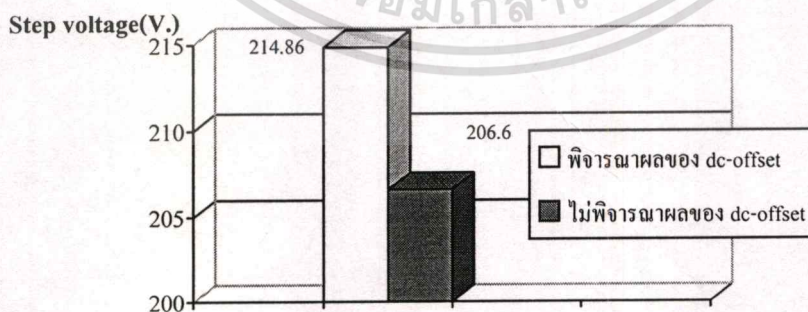
$R_g = 0.188 \text{ ohm}$

รูปที่ 6.4 แผนภูมิแสดงปริมาณกระแสกริดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาผลของ dc-offset และ ไม่พิจารณาผลของ dc-offset



$R_g = 0.188 \text{ ohm}$

รูปที่ 6.5 แผนภูมิแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาผลของ dc-offset และ ไม่พิจารณาผลของ dc-offset



$R_g = 0.188 \text{ ohm}$

รูปที่ 6.6 แผนภูมิแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาผลของ dc-offset ที่เกิดขึ้น และ ไม่พิจารณาผลของ dc-offset

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินจะพบว่าถ้าสามารถจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าให้มีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้แล้ว จะทำให้ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ทำการออกแบบมีความปลอดภัยโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าเลยเพราะค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้อยู่แล้ว ดังนั้นจึงได้นำเสนอถึงผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าซึ่งได้แก่ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน, ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน และขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินไว้ดังต่อไปนี้

1. การปรับระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นจะพบว่าเมื่อทำการลดระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินลงจะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวนำที่ใช้อยู่ในระบบต่อลงดิน นอกจากนี้ยังเป็นการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าลงอย่างต่อเนื่อง แต่สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวนั้นจะมีค่าลดลงในช่วงแรกที่ทำให้การลดระยะห่างระหว่างตัวนำลง เมื่อลดระยะห่างระหว่างตัวนำต่อไปอีกจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นแทน จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจะพบว่า การปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนั้นควรจะอยู่ในช่วง 25-12.5 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากที่สุด อีกทั้งยังเป็นระยะที่เหมาะสมต่อการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเข้ากับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

2. การปรับระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นจะพบว่า เมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแล้วจะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้านั้นจะมีค่าลดลงในช่วงแรกของการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินและเมื่อทำการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดินไปอีกจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแทน จากการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นจะพบว่าที่ระดับความลึกที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าควรจะอยู่ในช่วง 0.25-0.5 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามากที่สุด

3. การปรับเปลี่ยนขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นจะพบว่า เมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินจะไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า แต่จะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าแทน โดยเมื่อขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง จากการทดลองออกแบบระบบต่อลง

ค้นพบว่า การเพิ่มขนาดตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนั้น จะส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อเทียบกับการลดระยะห่างระหว่างตัวนำและการเพิ่มระดับความลึกที่ใช้ฝังระบบต่อลงดิน

สำหรับข้อจำกัดของโปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้น มีข้อจำกัดคือ ปริมาณจำนวนสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้านั้นสามารถคิดได้สูงสุดที่ 100 วงจร และไม่สามารถวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรมได้ ดังนั้น ผู้ใช้จะต้องเป็นผู้ทำการวิเคราะห์ถึงค่าความถูกต้องของข้อมูลที่จะทำการป้อนให้กับโปรแกรมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง

นอกจากการวิเคราะห์ถึงผลขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดินแล้ว ควรที่จะมีการพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยมีการปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความปลอดภัยและมีค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบต่อลงดินมีค่าใช้จ่ายต่ำสุดสำหรับค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น ควรที่จะมีการเก็บข้อมูลของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ฤดูกาลต่างๆ เพราะว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นมีค่าไม่คงที่เนื่องจากองค์ประกอบภายในดินจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม ดังนั้น ก่อนที่จะสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ควรที่จะมีการเก็บข้อมูลของค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่ฤดูกาลต่างๆ แล้วเลือกใช้ค่าความต้านทานจำเพาะสูงสุดที่เกิดขึ้นมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน และควรที่จะมีการพิจารณาถึงการลดค่าความต้านทานจำเพาะของดินเพื่อช่วยให้การออกแบบระบบต่อลงดินใช้ตัวนำน้อยลง ในกรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ANSI/IEEE Std 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding." 2000
- [2] ANSI/IEEE Std 80-1986 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding." 1986
- [3] B. Thapar, V.Gerez, P. Emmanuel, "Ground Resistance of Foot in Substation Yard." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993. pp. 1 – 6.
- [4] H.R. Seedher, J.K. Arora, S.K. Soni, "A Practical Approach for Computation of Grid Current." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999. pp. 897-902.
- [5] B. Thapar, V. Gerez, A. Balakrishnan, "Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in AC Substation." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April 1991. pp. 601 – 607.
- [6] Y.L. Chow, M.M.A. Salama, "A Simplified Method for Calculating the Substation Grounding Grid Resistance." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994. pp. 736 – 742.
- [7] K. D. Pham, "Design a Safe Grounding System for Rural Electric Power Distribution Substations." Rural Electric Power Conference, 1990. pp. C1-1 – C1-4 .
- [8] B. Thapar, V. Gerez, H. Kejriwal, "Reduction Factor for the Ground Resistance of Foot in Substation Yards." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 1, January 1994. pp. 360- 368.
- [9] B. Thapar, V. Gerez, A. Balakrishnan, "Finite Expression and models for Footing Resistance in Substations." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992. pp.219 – 224.
- [10] S.T. Sobral, V. Flenry, J.R. Villalba, D. Mukhedkar, "Decoupled Method for Studying Large Interconnected Ground system Using Microcomputer – Part I – Fundamental." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988. pp.1536 – 1544.
- [11] S.T. Sobral, V. Flenry, J.R. Villaba, D. Mukhedkar, "Decoupled Method for Studying Large Interconnected Ground System Using Microcomputer- Part II- Utilization on the Itaipu Ground System." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988. pp. 1545-1551.

- [12] S.T. Sobral, V.S. Costa, M.S. Campos, D. Mukhedkar, "Dimensioning of Nearby Substations Interconnected Ground System." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988. pp. 1605 – 1613
- [13] L. M. Popovic, "Practical Method Evaluating Ground Fault Current Distribution in Substation Supplied by an Unhomogeneous Line." IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997 pp. 722 – 727
- [14] J.M. Nahman, "Proximity Effects on The Ground Fault Current Distribution within The Earthing system Formed by a Substation and The Associated Transmission Lines." IEE Proceedings, Vol. 135,Pt. C, No. 6., November 1988
- [15] L.M. Popovic, "Practical Method for The Analysis of Earthing systems with long External Electrodes." IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 3, May 1993
- [16] William D. Stevenson, Jr., "Elements of Power System Analysis." Fourth Edition, McGraw-Hill international book company. 1982.
- [17] Rommer I. Brown. "Solution of Large Network by Matrix Methods." Fourth Edition, McGraw-Hill international book company. 1982.
- [18] กองระบบป้องกัน ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย "ข้อมูลกระแสลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าย่อยลาดพร้าวของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย"
- [19] William D. Stevenson, Jr. **Elements of Power System Analysis.** 4 th Ed. Singapore: Mcgraw -Hill, Inc. 1982
- [20] A. P. Sakis Meliopoulos. **Power System Grounding and Transients.** United States of America: Marcel Dekker, Inc. 1988

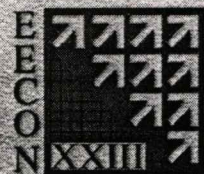
ภาคผนวก
ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



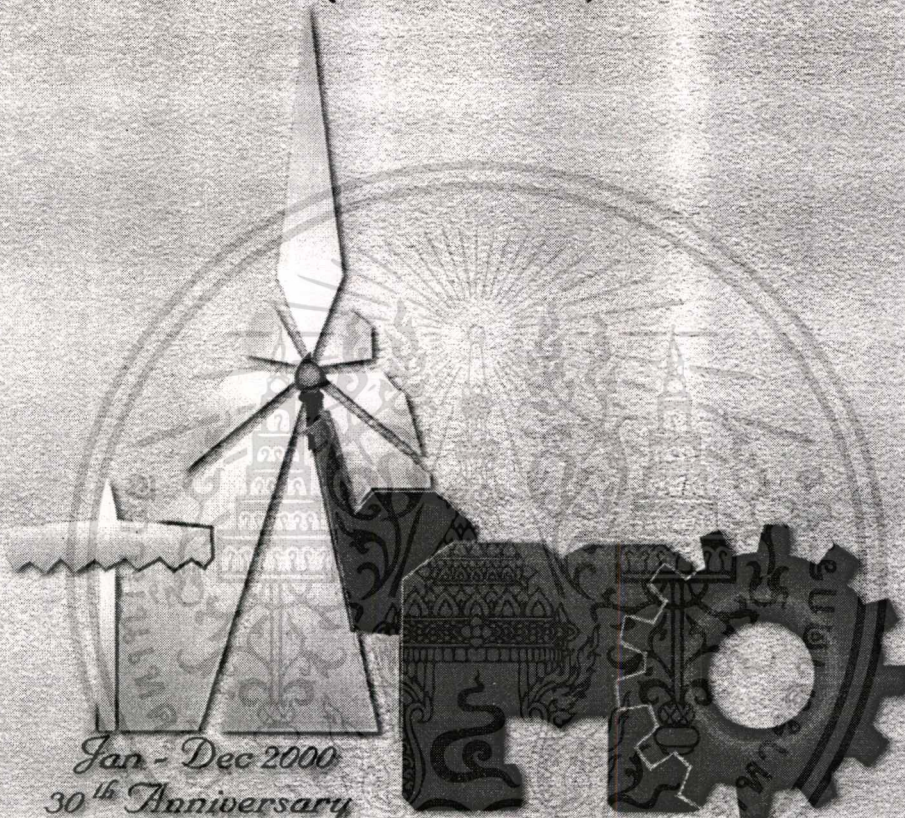
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23



23rd Electrical Engineering Conference
(EECON-23)



*Jan - Dec 2000
30th Anniversary
Faculty of Engineering, Chiang Mai University*

วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543 โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินที่มีการเชื่อมต่อกัน

Determination Grid Current in Interconnected Grounding System

ธิดิ เอี่ยมมงคล วิพงษ์ศิริพานิช สุทธิ บรรจงจิตร นิตศน์ กฤษณจินดา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
บึงฉุรุ พัทธ์กษัตริย์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เซนต์จอห์น
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร (02) 3269902 โทรสาร (02) 3269902 E-mail : s2061084@kmitl.ac.th

A16

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่ากระแสกริดหรือค่ากระแสที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินขณะเกิดกระแสลัดวงจรในระบบ โดยนำวิธี decoupled มาใช้ ค่ากระแสกริดนี้จะมีผลต่อค่าศักดาไฟฟ้าอย่างก้าวและค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่ายจึงจำเป็นต้องทราบค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรในระบบ จากการใช้วิธี decoupled ในการคำนวณหาค่ากระแสกริดนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่า 2%-40% ของค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบและทำการเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ที่ได้กับค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่ากระแสกริดโดยวิธีกราฟพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

คำสำคัญ: กระแสกริด, ระบบต่อลงดิน, วิธีการตีคัปเปิล, สถานีไฟฟ้า

Abstract

This paper presents a decoupled method for calculating the grid current. The grid current is the current flowing through a grounding system when a fault occurs. The grid current has an effect on the step voltage and the touch voltage. As a result, the grid current has to be taken into account in a design of an efficient as well as economical grounding system. It is found that the grid current calculated is around 2% - 40% of the fault in a power system. The result obtained from calculation has a slight difference comparing with that from the conventional approach the graphical method.

Keywords: Grid current, Grounding system, Decoupled method,

Electrical substation

1. คำนำ

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นสถานีไฟฟ้านั้นจะมีการเชื่อมต่อกันด้วยสาย Overhead line หรือ Underground power cable เช่นระบบสายส่งที่จ่ายให้ชุมชน, สถานีผลิตไฟฟ้า, สถานีลดแรงดันและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสาย Overhead ground wire, Power cable Sheaths หรือสายตัวนำต่อลงดินที่เพิ่มเข้าไป การเชื่อมต่อกันระหว่างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ค่ากระแสกริดที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากับค่ากระแสลัดวงจรเพราะว่าค่ากระแสลัดวงจรส่วนหนึ่งไหลไปยังระบบต่อลงดินภายนอก จึงทำให้ปริมาณกระแสกริดที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินมีค่าอยู่ระหว่าง 2% ถึง 40% ของค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น [1-3]

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาถึงการเชื่อมต่อนั้นจึงได้นำวงจรขั้นบันได (Ladder circuit) ที่ประกอบไปด้วยวงจรไพ (Pi circuit) หลายๆวงจรมานำเสนอแทนวงจรต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าเพื่อนำมาแทนวงจรต่อลงดินของสายตัวนำต่อลงดินและวงจรต่อลงดินของเสาไฟฟ้า

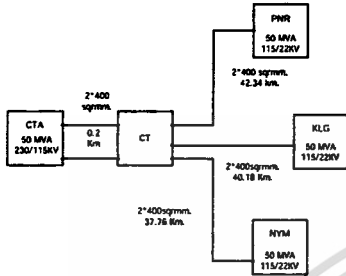
วิธีการ Decoupled นั้นจะเป็นการพิจารณาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจรโดยอาศัยการสรุปของวงจรสมมูลลงเพื่อให้ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและหลักการแทนผลของสภาพแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างระบบต่อลงดินและระบบจำหน่ายด้วยแหล่งจ่ายกระแส

2. ทฤษฎีวิธีการ Decoupled

การใช้วิธีการ Decoupled นั้นจะมีขั้นตอนการนำมาใช้ดังนี้

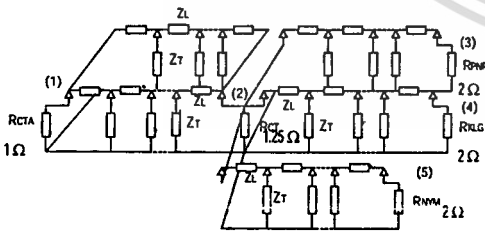
ขั้นที่ 1 แทนระบบต่อลงดินที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยสายตัวนำต่อลงดินด้วยวงจรขั้วบันได (Ladder Circuit)

แทนระบบต่อลงดินที่จะทำการหาค่ากระแสกริดด้วยวงจรขั้วบันได ซึ่งระบบตัวอย่างที่จะนำมาอธิบายนี้คือระบบต่อลงดินที่แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบต่อลงดินที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยสายตัวนำต่อลงดิน

ในรูปที่ 1 นี้เป็นระบบตัวอย่างที่ประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์จำนวน 5 สถานีเชื่อมต่อกันซึ่งประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CTA) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งเป็นสถานีสวิทช์ซึ่งด้วยสายส่ง 2 วงจรระยะทาง 0.2 กิโลเมตร และจากสถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเชื่อมโยงไปยังสถานีไฟฟ้าปึงน้ำร้อน (PNR) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, สถานีไฟฟ้านายอาม (NYM) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและสถานีไฟฟ้าขลุ (KLG) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยระบบสายส่ง 1 วงจรซึ่งห่างจากสถานีไฟฟ้าจันทบุรีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นระยะทาง 42.34 กิโลเมตร, 40.18 กิโลเมตรและ 37.76 กิโลเมตรตามลำดับ สามารถที่จะเขียนระบบต่อลงดินตามรูปที่ 1 ให้อยู่ในรูปของวงจรขั้วบันไดได้ดังรูปที่ 2 นี้



รูปที่ 2 วงจรขั้วบันไดของระบบต่อลงดินที่มีการเชื่อมต่อกัน

ในรูปที่ 2 นี้ใช้ระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้าของระบบจำหน่าย 115 kV เท่ากับ 80 เมตร ดังนั้นจะได้วงจรที่แทนแทนค่าอิมพีแดนซ์ของสาย Overhead ground wire (Z_L) และค่าอิมพีแดนซ์ของเสาส่งไฟฟ้า(Z_T) ด้วยระหว่าง CTA กับ CT เท่ากับ 3 วงจรไฟ, ระหว่าง CT กับ PNR เท่ากับ

กับ 530 วงจรไฟ, ระหว่าง CT กับ KLG 503 วงจรไฟ, ระหว่าง CT กับ NYM เท่ากับ 472 วงจรไฟ

ข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณมีดังนี้

Z_T = Impedance of footing tower = 5 Ω

Z_L = Impedance of overhead ground wire = 9.4+6.1j Ω / km.

R_{CT} = Ground grid resistance = 1 Ω

$R_{PNR}, R_{KLG}, R_{NYM}$ = Ground grid resistance = 2 Ω

R_{CT} = Ground grid resistance = 1.25 Ω

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าแห่งการเกิดกระแสลัดวงจรที่ทำให้เกิดกระแสกริดสูงสุด

ตำแหน่งของกระแสลัดวงจรที่อาจจะทำให้เกิดค่ากระแสกริดสูงสุดที่ไหลลงระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าสูงที่สุดนั้นมีโอกาสจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งระหว่างสายส่งที่ทำการเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าและที่สถานีไฟฟ้า โดยในกรณีของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งนั้นถ้าระยะทางระหว่างสายส่งมีค่ามากกว่า 3.SC จะไม่พิจารณากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งนั้น แต่ถ้าระยะทางของสายส่งน้อยกว่า 3.SC นั้นจะทำการพิจารณากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่ออยู่ด้วยจากรูปที่ 1 ทำการหาค่ากระแสกริดที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจันทบุรีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (CT) ค่าแห่งที่จะทำการพิจารณากระแสลัดวงจรที่ทำให้เกิดกระแสกริดสูงสุดคือตำแหน่งต่อไปนี้

1. กระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (CT)
2. กระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรีของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (CTA)

แต่เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิกานั้นทำให้เกิดค่ากระแสกริดสูงสุดที่ไหลลงระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิก ดังนั้นจึงทำการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเท่านั้นซึ่งมีค่า โดยมีค่ากระแสลัดวงจรที่เป็น Single line to ground fault มีค่าเท่ากับ 2204.44 A.

ถ้าระยะทาง Space Constant (SC) หรือค่า Characteristic Length (CL) [1] นี้สามารถหาได้จากสมการที่ 1 ต่อไปนี้

$$SC = \frac{-S}{I_n(K)} \tag{1}$$

$$K = \frac{Z_T}{Z_L + Z_E} \tag{2}$$

$$Z_E = \frac{Z_S}{2} + \sqrt{\frac{Z_S^2}{4} + Z_S Z_T} \quad (3)$$

- เมื่อ K = Module of complex
 s = Ladder circuit regular span (m)
 Z_L = Longitudinal impedance (Ω)
 Z_T = Transverse impedance (Ω)

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่ากระแส Zero sequence ที่ไหลในระบบ และค่ากระแสนิวทรอลของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจร

คำนวณหาค่ากระแส Zero sequence และค่ากระแสนิวทรอลของหม้อแปลงโดยที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระแสลัดวงจร ในการเชื่อมต่อกันของระบบต่อลงดินดังในรูปที่ 1 นั้นทำให้เกิดค่ากระแส Zero sequence เท่ากับ 367.5 A. และค่ากระแสนิวทรอลของหม้อแปลงเท่ากับ 734.8 A. ขณะเกิดกระแสลัดวงจรขึ้นที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ขั้นที่ 4 กำหนดช่วงที่เราจะทำการพิจารณาให้เป็น Uniform Section

กำหนดให้ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ Longitudinal impedance มีค่าศักดาไฟฟ้าสม่ำเสมอ (V/km.) เท่ากัน จากรูปที่ 2 นั้นกำหนดให้จาก node ที่ (1)-(2), (2), (2)-(3), (2)-(4) และ (2)-(5) เป็น Uniform section

ขั้นที่ 5 แทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่งกับสายตัวนำต่อลงดินด้วยแหล่งจ่ายกระแส

ในรูปที่ 3 เป็นวงจรต่อลงดินต่อจากจุด A มายังจุด B ประกอบไปด้วยวงจรชั้นบันได 30 span ทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งวิธีการนี้ก็คือหลักการของวิธี Decoupled หลังจากทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นด้วยแหล่งจ่ายกระแสแล้วจะได้ดังในรูปที่ 4 และสามารถหาค่าของแหล่งจ่ายกระแส $I_x [1]$ ได้ดังนี้

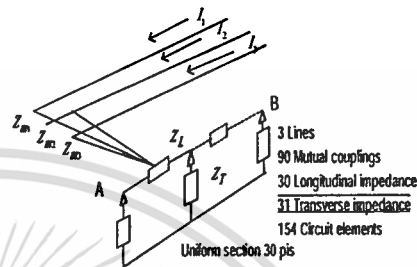
$$V = I_1 Z_{m1} + I_2 Z_{m2} + I_3 Z_{m3} \text{ V/Km.} \quad (4)$$

$$I_R = \frac{V}{Z_L} \text{ A.} \quad (5)$$

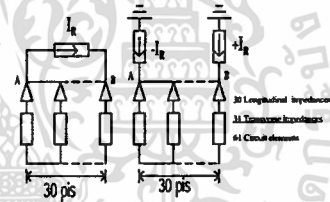
เมื่อ I_1, I_2, I_3 = กระแส Zero sequence ที่ไหลในสายส่งในเฟส a, b, c

Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3} = ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำระหว่างสายส่ง และสายตัวนำต่อลงดิน

จากรูปที่ 2 หลังจากทำการแทนค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการเหนี่ยวนำด้วยแหล่งจ่ายกระแสแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



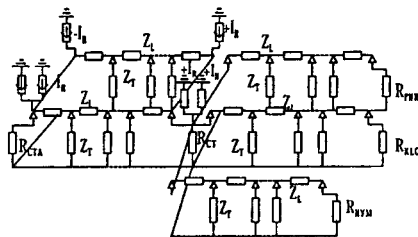
รูปที่ 3 วงจรชั้นบันได



รูปที่ 4 วงจรชั้นบันไดหลังจากแทนค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นด้วยแหล่งจ่ายกระแส

ขั้นที่ 6 แทนกระแสลัดวงจรและค่ากระแสนิวทรอลของหม้อแปลงขณะเกิดกระแสลัดวงจรด้วยแหล่งจ่ายกระแส

แทนกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นและกระแสนิวทรอลของหม้อแปลงด้วยแหล่งจ่ายกระแส จากวงจรดังรูปที่ 2 สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5

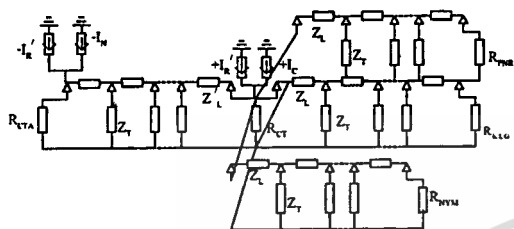


รูปที่ 5 วงจรชั้นบันไดหลังจากทำตามขั้นตอนที่ 5 และ 6

A16

ขั้นที่ 7 ทำการลดรูปวงจรขนานให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลย์นั้น และทำการลดรูปวงจรขั้วมันโคให้เหลือเพียงวงจรสมมูลย์ไฟ

หลังจากทำการลดรูปวงจรขนานให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลย์นั้น แล้วให้ทำการลดรูปวงจรขั้วมันโคให้เหลือเพียงวงจรสมมูลย์ไฟ จากรูปที่ 5 นั้นหลังจากกระทำตามขั้นตอนที่ 7 แล้วจะได้รูปวงจรงดในรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรขั้วมันโคหลังจากกระทำตามขั้นตอนที่ 7

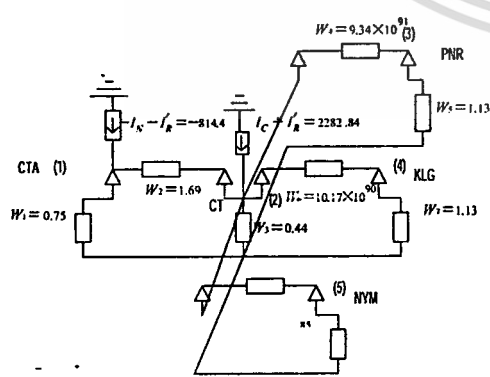
ขั้นที่ 8 รวมค่าแหล่งจ่ายกระแสและทำการหาค่ากระแสกริด

ทำการรวมค่าแหล่งจ่ายกระแสซึ่งจะได้วงจรขั้วมันโคดังที่แสดงในรูปที่ 7 และทำการคำนวณหาค่ากระแสกริด โดยจากรูปที่ 7 สามารถตั้งสมการโดยใช้ Node analysis ได้สมการที่ 6 และ 7 ดังนี้

$$\text{Node 1, } 1.42V_1 - 0.59V_2 = -814.4 \quad (6)$$

$$\text{Node 2, } -0.59V_1 + 2.86V_2 = 2282.84 \quad (7)$$

จากสมการข้างต้นสามารถที่จะหาค่าศักดาไฟฟ้าที่ Node1 ได้เท่ากับ -264.53 volts และ ที่ Node 2 มีค่าศักดาไฟฟ้าเท่ากับ 743.62 volts และสามารถที่จะคำนวณหาค่ากระแสกริดได้เท่ากับ 594.89 Amperes ซึ่งคิดเป็น 27% ของค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น



รูปที่ 7 วงจรขั้วมันโคหลังจากที่ทำการลดรูปแล้ว

3. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ

ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนของกระแสกริดต่อค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณโดยน่ววิธีกร Decoupled มาใช้กับค่าที่อ่านได้จากกราฟ [4] ซึ่งจะได้ผลดังนี้

	ค่าที่คำนวณจากวิธี Decoupled	ค่าจากกราฟ
I_g/I_{fault}	27%	22%

4. สรุป

ในการคำนวณหาค่ากระแสกริดโดยการใช้วิธี Decoupled นั้น สามารถหาค่ากระแสกริดได้โดยใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับระบบโดยตรง ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้และค่าผลลัพธ์ที่ได้ นั้นมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย แต่ในวิธีกราฟนั้นการวิเคราะห์หาค่ากระแสกริดนั้นจะต้องมีเงื่อนไขตามที่กราฟกำหนดทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานซึ่งต่างจากวิธี Decoupled ที่ไม่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

[1] S.T. Sobal, V. Fleury, J.R. Villalba, D. Mukhedkar "Decoupled Method For Studying Large Interconnected Ground Systems Using Microcomputers-Part I-Fundamentals "-IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No.4, October 1988, pp.1536-1544

[2] S.T. Sobal, V. Fleury, J.R. Villalba, D. Mukhedkar "Decoupled Method For Studying Large Interconnected Ground Systems Using Microcomputers-Part II-Utilization on Itaipu Ground System and Complementary Aspects "-IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No.4, October 1988, pp.1545-1552

[3] S.T. Sobal, V. Fleury, J.R. Villalba, D. Mukhedkar "Dimensioning of Nearby Substation Interconnected Ground System "-IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No.4, October 1988, pp.1545-1552

[4] D.L. Garrett, J.G. Myers, S.G. Patel "Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current Using Graphical Analysis "-IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987, pp 725-732

ประวัติผู้เขียน

นายธิตี เอี่ยมมงคล เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม 2520 ที่จังหวัดตาก สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2542 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษาปริญญาโท ในวารสารประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 จำนวน 1 เรื่อง

ผลงานทางวิชาการ

1. ธิตี เอี่ยมมงคล, รวี พงษ์ศิริพานิช, ศุภิตี บรรจงจิตร, นิตศน์ กฤษณจินดา, บัณฑิต พัทธกษัตริย์วงศ์. “การวิเคราะห์หาค่ากระแสแฉกริดที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดินที่มีการเชื่อมต่อกัน.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 ปี 2543

