



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้า ใช้สวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซ ติดตั้งในอาคาร
ที่มีพื้นที่จำกัด

Grounding Design Analysis for Limited Area Gas-Insulated Switchgear Indoor
Substation

นามผู้วิจัย นายสิริธร พลับเล็ก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงศ์ธร, M.Eng.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้า
ใช้สวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซ ติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด

Grounding Design Analysis for Limited Area
Gas-Insulated Switchgear Indoor Substation

โดย

นายสิริธร พลับเล็ก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

สิริธร พลับเล็ก 2555: การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้า ใช้สวิตซ์เกียร์
ฉนวนก๊าซ ติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สันติ อัสวศรีพงษ์ศรี, M.Eng.Sc. 97 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบกราวด์กริดโดยการใช้โปรแกรม
Current, Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding And Soil Structure Analysis (CDEGS)
และการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้าชนิด GAS-Insulated
Switchgear (GIS) Indoor Substation ติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดย
วิธีการเปลี่ยนแปลงวัสดุบุผนังดิน เพื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่
มนุษย์ทนได้ และพิจารณาถึงผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินเชิงอากาศของ
ระบบสายส่ง เพื่อลดศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อชีวิต ซึ่งอ้างอิงการ
ออกแบบตามมาตรฐาน IEEE std.80-2000 โปรแกรม Ground Grid Tool (GGT) ถูกสร้างและ
พัฒนามาเป็นโปรแกรม Excel-VBA มีลักษณะการใช้งานง่ายและเหมาะสมกับผู้ใช้งาน สามารถแสดง
ผลลัพธ์ และพิมพ์เป็นข้อมูลรายงานได้

ผลของการออกแบบตามข้อกำหนดสรุปได้ว่ากราวด์กริดที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อ
ค่าแรงดันไฟฟ้าเมกซ์สูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้
และสามารถกำหนดรูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริดที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐาน
IEEE std.80-2000

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Siritorn Plublek 2012: Grounding Design Analysis for Limited Area Gas-Insulated Switchgear Indoor Substation. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Santi Asawasripongtorn, M.Eng.Sc. 97 pages.

This thesis presents the method of ground grid design by using Current, Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding And Soil Structure Analysis (CDEGS) software and the development of computer software for ground grid design of Gas-Insulated Switchgear (GIS) Indoor Substation in the limited area for Provincial Electricity Authority (PEA), Thailand. The design shall be improved by selecting the various types of material covered on the surface to increase tolerable touch and step voltage. Moreover, the effect of the grid current distributing to overhead ground wire of the transmission line shall be considered in order to reduce ground potential rise for safety. This design method refers to IEEE std. 80-2000. The Ground Grid Tool (GGT) is created and developed by using Excel-VBA. This tool is easy to use and appropriate for all users. Also the report of a result can be printed out as well.

The result of the ground grid design by using the criteria in this report shows that the ground grid will be safe when the maximum mesh voltage is lower than the maximum tolerable touch voltage. It also shows that the alignment of grounding conductors can be designed to provide grid safety according to IEEE std. 80-2000.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.สันติ อัสวศรีพงศ์ธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา สนับสนุนด้านการเรียน และวางแผนงานการศึกษาค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.คมสันต์ หงษ์สมบัติ ประธานกรรมการสอบ ดร.ประดิษฐ์ เพื่องฟู ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ และเสนอแนะให้คำแนะนำการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ผู้ประสานงาน โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การส่งเสริม สนับสนุน และเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัย

สิริธร พลับเล็ก

กันยายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	50
อุปกรณ์	50
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	52
ผล	52
วิจารณ์	80
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของ	
สถานีไฟฟ้า Type A ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย	90
ภาคผนวก ข รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของ	
สถานีไฟฟ้า Type B ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย	94
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	7
2	ค่าคงที่ของวัสดุ	14
3	ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูบนผิวดิน	20
4	Modulus and Phase of Modified Bessel Function	28
5	ผลการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้	62
6	ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type A	65
7	ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A	67
8	ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type B	73
9	ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type B	75
10	ความยาวของสายตัวนำกราวด์กริด จากการคำนวณโดยโปรแกรม GGT และโปรแกรม CDEGS สำหรับสถานีไฟฟ้า Type A	81
11	ความยาวของสายตัวนำกราวด์กริด จากการคำนวณโดยโปรแกรม GGT และโปรแกรม CDEGS สำหรับสถานีไฟฟ้า Type B	82
12	รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้า Type A	84
13	รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้า Type B	84

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่จุด	7
2	เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าๆของระบบกราวด์กริด	9
3	วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	16
4	วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	16
5	วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว	18
6	วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	19
7	การกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินขึ้นอากาศ	25
8	การสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะใน GIS	36
9	แผนภูมิการออกแบบระบบกราวด์กริด	39
10	ระบบการต่อลงดินของอาคาร	42
11	การกำหนดชื่องานของโปรแกรม CDEGS	45
12	การใช้งานโมดูล MALT	45
13	การป้อนข้อมูลค่าความต้านทานจำเพาะของดินของโมดูล MALT	46
14	การป้อนข้อมูลในการออกแบบระบบกราวด์กริดของโมดูล MALT	46
15	การ PLOT/REPORT/PRINT โมดูล MALT	47
16	การจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type A	53
17	การจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type B	54
18	วินโดว์แรกของการออกแบบระบบกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT	55
19	วินโดว์การคำนวณหาขนาดสายตัวนำกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT	56
20	วินโดว์การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ด้วยโปรแกรม GGT	57
21	วินโดว์การคำนวณและการออกแบบระบบกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT	58
22	รายงานผลการคำนวณการออกแบบระบบกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT	60
23	ผลการคำนวณขนาดสายตัวนำกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT และ CDEGS	61
24	การจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type A	64
25	การจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 20 โอห์ม.เมตร	69
27	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 20 โอห์ม.เมตร	69
28	ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 40 โอห์ม.เมตร	70
29	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 40 โอห์ม.เมตร	70
30	ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร	71
31	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร	71
32	รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type B	72
33	รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A	72
34	ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 30 โอห์ม.เมตร	77
35	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 30 โอห์ม.เมตร	77
36	ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 60 โอห์ม.เมตร	78
37	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 60 โอห์ม.เมตร	78
38	ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร	79
39	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 โอห์ม.เมตร	91
ก2 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 21-40 โอห์ม.เมตร	91
ก3 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 41-65 โอห์ม.เมตร	91
ก4 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 66-85 โอห์ม.เมตร	92
ก5 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 86-120 โอห์ม.เมตร	92
ก6 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 121-180 โอห์ม.เมตร	92
ก7 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 181-200 โอห์ม.เมตร	93
ข1 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วงไม่เกิน 30 โอห์ม.เมตร	95
ข2 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 31-60 โอห์ม.เมตร	95
ข3 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 61-100 โอห์ม.เมตร	95
ข4 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 101-125 โอห์ม.เมตร	96
ข5 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 126-170 โอห์ม.เมตร	96
ข6 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินอยู่ในช่วง 171-200 โอห์ม.เมตร	96

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CDEGS	=	Current, Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding And Soil Structure Analysis Software
GGT	=	Ground Grid Tool Software
GIS	=	GAS-Insulated Switchgear
IEEE	=	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
No	=	จำนวน
Std.	=	Standard
VBA	=	Visual Basic for Application

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้า ใช้สวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซ ติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด

Grounding Design Analysis for Limited Area Gas-Insulated Switchgear Indoor Substation

คำนำ

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นหน่วยงานที่มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ การจัดหา ผลิต จัดส่ง และจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับประชาชน ธุรกิจ และอุตสาหกรรมทั่วทุกจังหวัด ยกเว้น จังหวัด กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งปัจจุบันความต้องการการใช้ไฟฟ้ามีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตลอดเวลา ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ต้องขยายขอบเขตการกระจายกระแสไฟฟ้าออกไปให้ครอบคลุมพื้นที่ที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต้องมีโครงการที่จะสร้างสถานีไฟฟ้าอีกหลายแห่งกระจายทั่วทุกภูมิภาค เพื่อตอบสนองความต้องการการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าให้ได้อย่างทั่วถึงและเพียงพอ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าในขณะเกิดฟลัด เพราะในขณะที่เกิดฟลัด กระแสที่ไหลลงสู่กราวด์กริดจะมีขนาดสูงมากทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าของจุดต่อลงดินสูงกว่าสภาวะปกติ และเกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองข้างในขณะที่มนุษย์เดินอยู่ในสถานีไฟฟ้า (Step Voltage) หรือเกิดขึ้นระหว่างเท้าและแขนในขณะที่มนุษย์สัมผัสกับอุปกรณ์ (Touch Voltage) จึงมีกระแสไหลเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ถ้ากระแสที่ไหลเข้าสู่ร่างกายนี้มีค่ามากกว่ากระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ก็จะทำให้เกิดช็อกหรือเสียชีวิตได้

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สาเหตุเนื่องมาจากข้อจำกัดของพื้นที่ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า และราคาที่ดินที่มีราคาสูง เช่น เขตพื้นที่ท่องเที่ยว หรือในเขตอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ดังนั้นสถานีไฟฟ้าชนิด Gas-Insulated Switchgear (GIS) Indoor Substation จึงเป็นทางเลือกสำหรับการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของความต้องการการใช้ไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขในการตอบสนองความต้องการการใช้

พลังงานไฟฟ้าของพื้นที่ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ และความมั่นคงในระบบไฟฟ้า ซึ่งการก่อสร้างจะใช้พื้นที่ขนาดเล็กทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อที่ดินได้

ดังนั้น การออกแบบกราวด์กริดของสถานี่ไฟฟ้าแบบ GIS Indoor จะแตกต่างจากการออกแบบกราวด์กริดของสถานี่ไฟฟ้าแบบ AIS Outdoor (Air Insulated Switchgear Outdoor Substation) เนื่องจากพื้นที่ในการก่อสร้างสถานี่ไฟฟ้าแบบ GIS Indoor มีขนาดเล็ก ซึ่งทำให้ระบบกราวด์กริดของสถานี่ไฟฟ้าอยู่ในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด อีกทั้งยังต้องออกแบบกราวด์กริดในอาคารควบคุมและบริเวณขอบของกราวด์กริดด้วยเป็นพิเศษเพื่อจำกัดศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (Ground Potential Rise, GPR) ขณะเกิดฟอลต์โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อบุคลากรและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน หรือทำให้อุปกรณ์เสียหายในสภาวะผิดปกติ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานี่ไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้นคว้ามามาตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานที่นิยมและเป็นมาตรฐานสากลมาตรฐานหนึ่งคือ มาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 กล่าวถึง การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานี่ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่สถานี่ไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์การออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งประกอบด้วย การออกแบบระบบต่อลงดินของอาคาร การออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม Current, Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding And Soil Structure Analysis (CDEGS) และการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบกราวด์กริด สำหรับสถานี่ไฟฟ้าชนิด GIS Indoor โดยใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงวัสดุบุผนังดิน เพื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ และพิจารณาถึงผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินจึงอากาศของระบบสายส่งเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อชีวิต ซึ่งอ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000

วัตถุประสงค์

เพื่อการศึกษาถึงการออกแบบระบบการต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าแบบ 115-22 เควี ชนิด GAS-Insulated Switchgear Indoor Substation ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด โดยคำนึงถึงการออกแบบที่มีความปลอดภัยต่อบุคคลที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้า โดยการใช้โปรแกรม Current, Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding And Soil Structure Analysis (CDEGS) ในการวิเคราะห์ และโปรแกรมการออกแบบกราวด์กริดที่ได้ทำการพัฒนาบนโปรแกรม Excel-VBA

การตรวจเอกสาร

นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน

กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548) ในการศึกษาหลักการ และทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจความหมาย การนิยาม คำศัพท์เฉพาะ เพื่อให้ผู้ศึกษามีมาตรฐานความเข้าใจที่ตรงกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการศึกษาและการวิจัยที่แพร่หลาย และไปในทางทิศเดียวกัน ดังนี้

1. กระแสฟอลต์ (Fault current) หมายถึง สภาวะผิดปกติของระบบไฟฟ้าซึ่งเกิดจากความผิดปกติโดยอุบัติเหตุหรือความไม่ตั้งใจ ส่งผลให้มีปริมาณของกระแสไหลมากกว่าปกติ
2. กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หมายถึง กระแสที่ไหลผ่านกราวด์กริดลงสู่ดิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระแสฟอลต์
3. กราวด์กริด (Ground grid) หมายถึง ระบบแท่งรากสายดินในแนวนอนที่ประกอบด้วยตัวนำเปลือยหลายๆ เส้นต่อรวมกันและฝังใต้ดินเพื่อเป็นจุดต่อลงดินร่วมสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างที่เป็นโลหะในตำแหน่งที่กำหนดให้
4. การประสานให้ศักย์เท่ากัน (Equipotential bonding) หมายถึง การต่อกันทางไฟฟ้าของชิ้นส่วนตัวนำเปิดโล่งต่างๆ และชิ้นส่วนตัวนำที่ไม่เกี่ยวข้องเพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน
5. ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity) หมายถึง เป็นตัวประกอบที่แสดงความสามารถในการนำกระแสของดิน ซึ่งมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าในดินหารด้วยค่าความต้านทานจำเพาะ
6. ความต้านทานเริ่มต้นของร่างกายมนุษย์ (Initial resistance of the human body) หมายถึง ค่าความต้านทานที่จำกัดกระแสนอกในขณะที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

7. ตัวประกอบแบ่งกระแสฟอลต์ (Fault current division factor) หมายถึง แฟกเตอร์ที่ใช้แทนอัตราส่วนของกระแสฟอลต์แบบสมมาตรกับกระแสบางส่วนที่ไหลระหว่างกราวด์กริดกับดินที่อยู่รอบๆ

8. ตัวประกอบการลดลง (Decrement factor) หมายถึง แฟกเตอร์เพื่อใช้ปรับค่ากระแสฟอลต์แบบสมมาตรเป็นแบบไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการคำนวณระบบกราวด์กริดให้เกิดความปลอดภัย

9. ระบบต่อลงดิน (Grounding system) หมายถึง ระบบ ตัวนำไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งถูกใช้สำหรับนำกระแสฟอลต์โดยการเชื่อมต่อเป็นระบบเดียวกันในพื้นที่ที่พิจารณาให้ต้องมีการสร้างระบบต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

10. รากสายดิน (Ground electrode) หมายถึง ตัวนำที่ฝังใต้ดินและใช้สำหรับรวมกระแสลงดินแล้วกระจายกระแสไปสู่ดิน

11. แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าบนผิวดินที่มีระยะห่างกันหนึ่งเมตรของก้าวมนุษย์โดยไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดินเลย

12. แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสัมผัสที่สูงสุดที่เป็นไปได้ภายในเมชของกราวด์กริด

13. แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม และศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่คนยืนอยู่ และมือสัมผัสไปที่โครงสร้างหรืออุปกรณ์ที่ต่อลงดินไว้

14. แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Metal-to-metal touch voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างโลหะกับโครงสร้างภายในสถานีไฟฟ้าที่อาจมีมือผู้ถือหรือมือผู้เท้าไปสัมผัสเป็นสะพาน

15. วัสดุปูผิวดิน (Surface material) หมายถึง วัสดุที่ใช้ปูผิวดิน ซึ่งไม่จำกัดว่าจะเป็นหินบด (Crushed rock) แอสฟัลท์ (Asphalt) หรือวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งวัสดุผิวดินจะขึ้นอยู่กับค่าความ

ด้านทานจำเพาะของวัสดุที่อาจจะมีส่วนสำคัญต่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์จากเท้าทั้งสองข้างที่จะทำให้ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

16. ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (Ground Potential Rise-GPR หรือ Earth Potential Rise-EPR) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าที่เป็นไปได้เมื่อเทียบกับดินที่อยู่ห่างออกไป ค่า GPR สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับค่าความต้านทานกราวด์กริด

17. สถานีไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ที่มีก๊าซเป็นฉนวน (Gas-Insulated Substation) หมายถึง สถานีไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่มีขนาดกะทัดรัด อุปกรณ์ทั้งหมด เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน สวิตช์ต่อลงดิน บัสบาร์ เหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ในเปลือกหุ้ม (Enclosure) ที่ถูกต่อลงกราวด์ และภายในเปลือกหุ้มจะใช้ก๊าซเป็นฉนวน

18. ออฟเซตดีซี (DC offset) หมายถึง ค่าแตกต่างระหว่างคลื่นกระแสที่สมมาตร (Symmetrical current wave) และคลื่นกระแสที่แท้จริง (Actual current wave) ในระหว่างที่ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในภาวะชั่วคราว กระแสฟอลต์ที่แท้จริง (Actual fault current) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับสมมาตร (Symmetrical alternating component) และองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง [Unidirectional (DC) component] องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเป็นชั่วใดชั่วหนึ่ง แต่จะไม่เปลี่ยนชั่วไฟฟ้า และจะลดลงที่อัตราการลดลงบางอัตราที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า

19. อัตราส่วน X/R (X/R ratio) หมายถึง อัตราส่วนของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของระบบ เป็นตัวบ่งบอกถึงอัตราการลดลงของ DC offset เมื่ออัตราส่วน X/R มีค่าสูง จะทำให้มีค่าคงที่ของเวลาสูงและอัตราการลดลงช้าลง

20. อิเล็กโทรดต่อลงดินแบบวงแหวน (Ring earth electrode) หมายถึง รากสายดินที่มีลักษณะเป็นวงปิดรอบสิ่งปลูกสร้าง ติดตั้งบนผิวดินหรือใต้ดิน

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

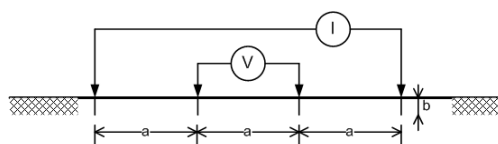
IEEE Std 81-1983 (1983) ดินเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดินมาก เพราะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้ต้องใช้ตัวนำกราวด์กริดมากขึ้นเพียงใด และมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดและแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่เกิดเมื่อมีกระแสฟอลต์เกิดขึ้น ดังนั้นการออกแบบระบบกราวด์กริด จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานดินเพื่อนำไปหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เพื่อใช้ในการออกแบบต่อไป

การพิจารณาคุณสมบัติของดินว่าดีหรือไม่นั้น จะพิจารณาจากค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity, ρ) มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$) โดยค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความลึกของดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นภายในดิน อุณหภูมิ ฯลฯ ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดิน (โอห์ม.เมตร)
ดินเปียก (Wet Soil)	10
ดินชื้น (Moist Soil)	100
ดินแห้ง (Dry Soil)	1,000
หินแข็ง (Bed Rock)	10,000

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)



ภาพที่ 1 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินแบบสี่จุด

ที่มา: IEEE Std 81-1983 (1983)

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินสำหรับสถานีไฟฟ้าคือ Wenner method หรือแบบ 4 จุด (Four point method)

วิธีการวัดจะประกอบด้วยโพรบ 4 แท่ง ปักลงบนพื้นดินในแนวเส้นตรง และให้ระยะห่างของแต่ละโพรบเท่าๆ กัน ตามภาพที่ 1 ความลึกของโพรบแต่ละแท่งไม่ควรเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของระยะห่างของโพรบแต่ละแท่ง เพื่อให้ตำแหน่งที่โพรบปักอยู่เหมือนแหล่งจ่ายกระแสและแรงดันที่เป็นจุด (Point source) และความลึกของโพรบจะได้ไม่มีผลต่อสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน การวัดที่ระยะห่างของโพรบใดๆ ก็คือการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ความลึกที่มีค่าเท่ากับระยะห่างของโพรบนั่น

ค่าที่ได้จากการวัดจะเป็นค่าความต้านทานของดิน (Soil resistance) ที่ระยะห่างของโพรบนั่น ซึ่งได้จากการสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างโพรบคู่ในกับกระแสที่ไหลระหว่างโพรบคู่นอก การวัดจะต้องเพิ่มระยะห่างของโพรบไปจนเกือบครอบคลุมพื้นที่ภายในขอบเขตของสถานีไฟฟ้า และสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังสมการที่ (1)

$$\rho = 2\pi a R \quad (1)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)

R คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

a คือ ระยะห่างระหว่างโพรบคู่หนึ่ง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

กรณีที่โครงสร้างของดินเป็นดินชั้นเดียวหรือเป็นดินชนิดที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous soil) หรือดินชั้นเดียว (Uniform soil) ที่ระยะห่างโพรบใดๆ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้จะต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าโครงสร้างของดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-homogeneous soil) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้จะเปลี่ยนไปตามระยะห่างของโพรบ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบดินชั้นเดียวโดยประมาณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

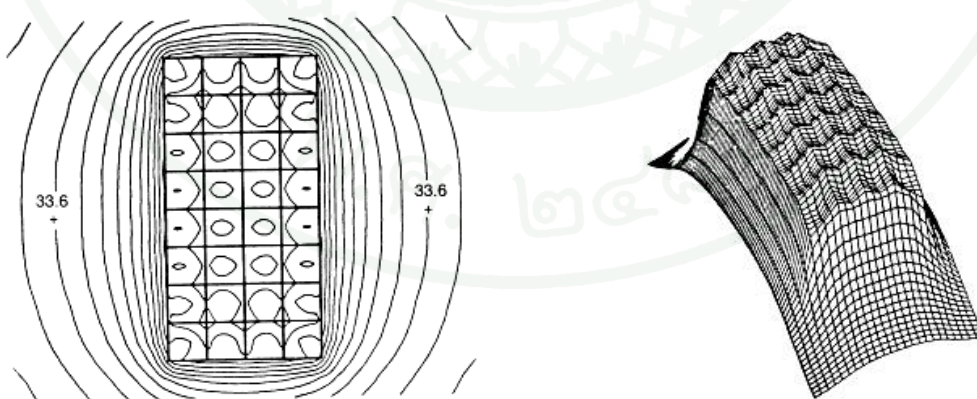
$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (2)$$

โดยที่ $\rho_{a(1)}, \rho_{a(2)}, \dots$ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ ที่ระยะห่างของโพรบต่างๆ กันด้วย
 วิธีการวัดแบบ 4 จุด
 n คือ จำนวนครั้งในการวัด

การออกแบบกราวด์กริดในสถานี่ไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE Std 80-2000

IEEE Std 80-2000 (2000) เป็นมาตรฐานในการออกแบบกราวด์กริดเพื่อให้เกิดความ
 ถูกต้องปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานี่ไฟฟ้า และมีขั้นตอนการออกแบบตามข้อกำหนดอย่าง
 ง่ายในการคำนวณ

กราวด์กริดของสถานี่ไฟฟ้ามีรูปแบบเป็นตัวนำกราวด์กริด (Ground grid) ในแนวนราบ และ
 เสริมด้วยแท่งรากสายดิน (Ground electrode) หรือเรียกว่า กราวด์รูด (Ground rod) โดยส่วนที่เป็น
 กราวด์กริดประกอบด้วยสายตัวนำที่ถูกจัดวางอยู่ใต้พื้นผิวของสถานี่ไฟฟ้าในรูปแบบของตาราง
 ครอบคลุมพื้นที่ของสถานี่ไฟฟ้า โดยบริเวณจุดที่ตัดกันของตารางจะทำการหลอมให้เป็นเนื้อ
 เดียวกันโดยใช้ความร้อนสูง (Exothermic welding) ดังนั้น การใช้ปริมาณสายตัวนำจึงเป็นสิ่งสำคัญ
 เพราะใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งค่าวัสดุ และค่าแรง แต่ถ้าใช้น้อยเกินไปจะเกิด
 ความไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานี่ไฟฟ้า ดังนั้นในการ
 ออกแบบระบบกราวด์กริดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นด้วย



ภาพที่ 2 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของระบบกราวด์กริด

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)

กระแสฟอลต์จะทำให้เกิดเกรเดียนท์ศักย์ไฟฟ้าทั้งในและรอบๆ สถานีไฟฟ้า กล่าวคือ จะมีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างจุดใดๆ สองจุดทั้งภายในและรอบๆ สถานีไฟฟ้า แสดงในภาพที่ 2 โดยภาพด้านซ้ายแสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าเมื่อมองจากด้านบน ส่วนภาพด้านขวาแสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าแบบ 3 มิติ

1. ขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ได้

ผลของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์จะขึ้นอยู่กับความถี่ ขนาดกระแส และช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ โดยอันตรายที่เกิดขึ้นส่วนมากคือ การทำงานของหัวใจผิดปกติ การหายใจขัดข้องและเมื่อกระแสสูงมากก็จะเกิดการเผาไหม้

1.1 ความถี่

สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ 50–60 เฮิร์ตซ์ ร่างกายมนุษย์สามารถทนด้วยความต้านทาน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปพิจารณาถึงขีดจำกัดของกระแสหรือแรงดันที่มนุษย์สามารถทนได้ กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนอาจพิจารณาได้สองกรณี คือ จากแขนไปที่เท้าทั้งสองข้าง หรือจากเท้าข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่ง โดยทั่วไปค่าความต้านทานเฉลี่ยของร่างกายมนุษย์มีค่าประมาณ 1,000 โอห์ม

1.2 ขนาดกระแสและช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์

กระแสฟอลต์เกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ การเสื่อมสภาพของฉนวนป้องกัน หรือปรากฏการณ์ธรรมชาติ ฯลฯ โดยจะคำนึงถึงกระแสฟอลต์ที่มีความรุนแรงที่สุด เมื่อมีการผิดปกติขึ้นจะมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดินในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้องกันว่าสามารถตัดกระแสได้เร็วเท่าไร โอกาสที่จะเกิดอันตรายก็จะมีน้อยลงเท่านั้น

กระแสฟอลต์ที่ไหลลงดินจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นรอบๆ สถานีไฟฟ้า แรงดันที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวดินอาจมีขนาดสูงทำให้เกิดอันตรายกับคน ซึ่งเกิดจากความต้านทานจำเพาะของดิน และกระแสที่ไหลลงสู่ดินที่มีค่าสูงจึงทำให้เกิดแรงดันสูงที่พื้นผิวของสถานีไฟฟ้า ถ้ามีส่วนของ

ร่างกายไปสัมผัสระหว่างสองจุดที่มีความต่างศักย์สูงในระหว่างที่เกิดฟอลต์ ก็จะทำให้มีกระแสไหลผ่านร่างกาย ถ้าระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมีระยะเวลานานก็จะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิต ขนาดกระแสที่ให้ผลหรือเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์สามารถแบ่งเป็นระดับได้ ดังนี้

1) 1 มิลลิแอมป์ จุดเริ่มต้นรู้สึกว่ามีกระแสไหลผ่าน (Perception current) ซึ่งรู้สึกได้จากการไหลผ่านมือหรือนิ้วมือ

2) 1-6 มิลลิแอมป์ เป็นขนาดกระแสที่ยังสามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้ (Let-go current)

3) 9-25 มิลลิแอมป์ รู้สึกเจ็บปวดและอาจไม่สามารถปล่อยมือได้ถ้าจับวัตถุที่มีไฟฟ้า

4) 60-100 mA หัวใจทำงานผิดปกติและการหายใจติดขัด (Ventricular fibrillation)

ขีดจำกัดสูงสุดของกระแสที่มนุษย์สามารถทนได้จะพิจารณาขณะที่กระแสไหลผ่านร่างกายในช่วงเวลา 0.03 - 3 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ไมทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายถึงขั้นหัวใจทำงานผิดปกติ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3) สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม และสมการที่ (4) สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม

สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

โดยที่ I_B คือ กระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

t คือ ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์ มีหน่วยเป็น วินาที (s)

2. ขนาดและวัสดุของสายตัวนำกราวด์กริด

สายตัวนำสำหรับทำกราวด์กริดเพื่อต่อลงดิน มีหน้าที่นำกระแสฟอลต์ลงสู่ดิน ดังนั้นสายตัวนำที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) มีค่าความนำจำเพาะเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์สูงเมื่อกระแสฟอลต์ไหลผ่าน
- 2) ต้องไม่หลอมละลายและทนต่อแรงทางกลที่เกิดจากขนาดของกระแสฟอลต์ และช่วงเวลาในการไหล
- 3) มีความแข็งแรงทางกลและทนทานและการผุกร่อนตลอดอายุการใช้งาน
- 4) สามารถรักษาสภาพไว้ได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีการผุกร่อนหรือถูกกระแทกจากแรงภายนอก

2.1 โลหะที่ใช้เป็นสายตัวนำในระบบกราวด์กริด

1) ทองแดง (Copper) ถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี มีค่าความนำจำเพาะสูงและไม่มีปัญหาในเรื่องของการผุกร่อน เพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบเมื่อนำมาฝังในดิน โดยทำการเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

2) เหล็กกล้าหุ้มทองแดง (Copper-Clad Steel) นิยมใช้เป็นแท่งหลักดิน เนื่องจากทนต่อการตอกลงใต้ดิน และเพื่อหลีกเลี่ยงการลักขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

3) เหล็ก (Steel) ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินและใช้เป็นแท่งกราวด์รูด แต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาถึงการป้องกันการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไป

หุบลึงกะสีที่ผิวของเหล็กหรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็ก เพื่อให้ประพุดตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดิน

2.2 ขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำกราวด์กริดจะขึ้นอยู่กับ

- ขนาดกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน
- ช่วงเวลาตัดกระแส
- คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิแวดล้อม
- อุณหภูมิที่ยอมรับได้

การหาขนาดของตัวนำกราวด์กริดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left[\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right] \ln \left[\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right]}} \quad (5)$$

- โดยที่ A_{mm^2} คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร (mm^2)
- I คือ ขนาดของกระแสฟอลต์ มีหน่วยเป็น กิโลแอมแปร์ (kA)
- T_m คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำทนได้ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
- T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
- T_r คือ อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
- α_0 คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็น หนึ่งต่อองศาเซลเซียส ($1/^{\circ}C$)
- α_r คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ T_r มีหน่วยเป็น หนึ่งต่อองศาเซลเซียส ($1/^{\circ}C$)
- ρ_r คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ T_r มีหน่วยเป็น ไมโครโอห์มต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($\mu\Omega/cm^3$)
- t_c คือ ช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ มีหน่วยเป็น วินาที (s)

TCAP คือ ค่าความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น

จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร.องศาเซลเซียส ($\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)

K_0 มีค่าเท่ากับ $1/\alpha_0$ หรือ $1/\alpha_r - T_r$

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำกรวดกริดที่คำนวณได้จะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต่อลงดินนั้นสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของวัสดุ

Description	α_r ($1/^\circ\text{C}$)	K_0 (0°C)	T_m ($^\circ\text{C}$)	ρ_r ($\mu\Omega/\text{cm}^3$)	TCAP ($\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)
Copper, annealed soft-drawn (100% conductivity)	0.00393	234	1,083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)	0.00381	242	1,084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire (40% conductivity)	0.00378	245	1,084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire (30% conductivity)	0.00378	245	1,084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod (20% conductivity)	0.00378	245	1,084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade (61% conductivity)	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy (53.5% conductivity)	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy (52.5% conductivity)	0.00347	268	654	3.28	2.60

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Description	α_r (1/°C)	K_0 (0°C)	T_m (°C)	ρ_r ($\mu\Omega/\text{cm}^3$)	TCAP (J/cm ³ /°C)
Aluminum-clad steel wire (20.3% conductivity)	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020 (10.8% conductivity)	0.00160	605	1,510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod (9.8% conductivity)	0.00160	605	1,400	17.5	4.44
Zinc-coated steel rod (8.6% conductivity)	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304 (2.4% conductivity)	0.00130	749	1,400	72.00	4.03

ที่มา: IEEE Std.80 (2000)

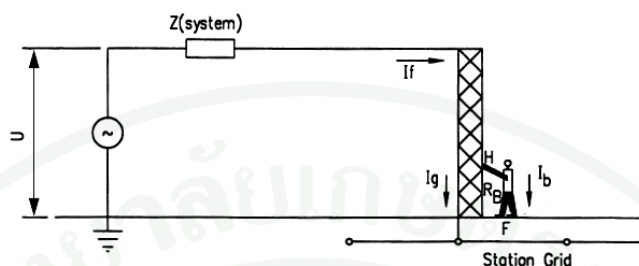
3. แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์ จะต้องพิจารณาค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ และผลของวัสดุบุผิวดินที่อยู่ด้านบนของพื้นสถานีไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

3.1 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้

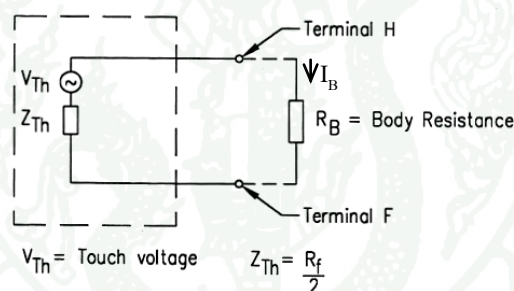
มนุษย์จะได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเมื่อทำการสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินไว้กับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้างานที่ 3 ค่าความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นระหว่าง

ตำแหน่งที่มือสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ (H) กับตำแหน่งที่มนุษย์ยืน (F) ทำให้เกิดกระแสไหลจากมือไปยังเท้าทั้งสอง และเขียนวงจรสมมูลได้ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)

ดังนั้นสามารถหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่ได้รับแรงดันสัมผัสซึ่งก็คือค่ากระแสที่ไหลในวงจรสมมูลนี้ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (6)

$$I_B = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \quad (6)$$

โดยที่ I_b คือ กระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

V_{TH} คือ แรงดันไฟฟ้าเทวินิน มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

Z_{TH} คือ อิมพีแดนซ์เทวินิน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R_B คือ ความต้านทานร่างกายมนุษย์ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่ง สามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (7)

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (7)$$

โดยที่ R_f คือ ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่ง มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega.m$)

b คือ รัศมีของเท้า ที่แทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมรัศมี 0.08 เมตร

จากสมการที่ (7) จะได้ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดินข้างหนึ่งโดยประมาณ ดังสมการที่ (8)

$$R_f \approx 3\rho \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) พิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดได้เมื่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าเท่ากับกระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ดังสมการที่ (9)

$$E_{touch} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B \quad (9)$$

โดยที่ E_{touch} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์ทนได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$E_{\text{touch50}} = (1000 + 1.5p) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

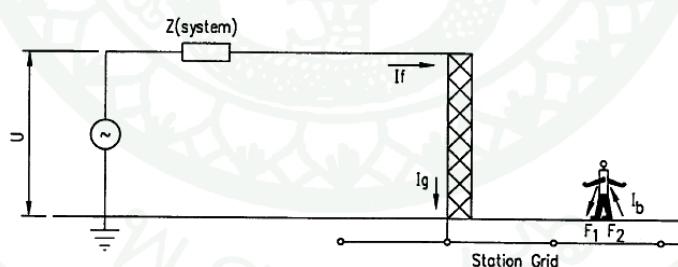
สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์ทนได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$E_{\text{touch70}} = (1,000 + 1.5p) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (11)$$

โดยที่ t_s คือ ระยะเวลาที่กระแสฟอลต์ไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มีได้ มีหน่วยเป็น วินาที (s)

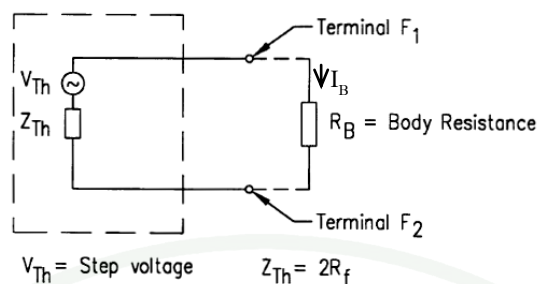
3.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

แรงดันช่วงก้าวเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้า ผลของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดกระแสไหลผ่านร่างกายจากเท้าข้างหนึ่ง (F_1) ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง (F_2) เพื่อใช้เป็นทางให้กระแสไหลลงดินได้ ดังภาพที่ 5 และเขียนวงจรสมมูลเมื่อมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดันช่วงก้าวได้ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)



ภาพที่ 6 วงจรสมมูลเมื่อนุชย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)

พิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดได้เมื่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าเท่ากับ กระแสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ดังสมการที่ (12)

$$E_{\text{step}} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (12)$$

โดยที่ E_{step} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13)

$$E_{\text{step}50} = (1000 + 6\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$E_{\text{step}70} = (1,000 + 6\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (14)$$

โดยที่ t_s คือ ระยะเวลาที่กระแสฟลัดไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มีได้ มีหน่วยเป็น วินาที (s)

3.3 ผลของการปูวัสดุบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้า

วัสดุปูผิวดิน หมายถึง วัสดุที่อยู่บนพื้นผิวของสถานีไฟฟ้า โดยจะใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานสูงกว่าดิน เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มความต้านทานที่เท้าของมนุษย์ให้สูงขึ้น จึงสามารถจำกัดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายในขณะเกิดฟลัดได้

วัสดุที่ใช้ปูผิวดินในบริเวณสถานีไฟฟ้า โดยปกติแล้วจะใช้หินกรวดโรยที่ความหนา ระหว่าง 8-15 เซนติเมตร โดยทั่วไปค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวดในสภาพเปียกจะมีค่าเท่ากับ 3,000 โอห์ม.เมตร วัสดุที่ใช้ปูผิวดินแต่ละประเภทจะมีค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูบนผิวดิน

ประเภทของวัสดุปูบนผิวดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม.เมตร)	
	แห้ง	เปียก
คอนกรีต	1×10^6 ถึง 1×10^9	21 ถึง 100
หินกรวด	40×10^6	5,000
ยางมะตอย	2×10^6 ถึง 30×10^6	10,000 ถึง 6×10^6

ที่มา: IEEE Std 80-2000 (2000)

ค่าความต้านทานระหว่างเท้ากับดิน เมื่อพิจารณาวัสดุที่ปูบนผิวดินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$R_f = \left(\frac{\rho}{4b} \right) \cdot C_s \quad (15)$$

โดยที่ C_s คือ แฟกเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูบนผิวดิน

แฟกเตอร์ลดที่เกิดเนื่องจากการปูวัสดุบนผิวดินซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (16)

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (16)$$

โดยที่ C_s คือ แฟกเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูบนผิวดิน

h_s คือ ความหนาของวัสดุปูผิวดิน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)

สมการแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ เมื่อคิดผลของวัสดุปูผิวดิน โดยใช้สมการที่ (17) สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม และใช้สมการที่ (18) สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$E_{\text{touch}50} = (1,000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (17)$$

$$E_{\text{touch}70} = (1,000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (18)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ เมื่อคิดผลของวัสดุปูผิวดิน โดยใช้สมการที่ (19) สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม และใช้สมการที่ (20) สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม

$$E_{\text{step}50} = (1,000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (19)$$

$$E_{\text{step}70} = (1,000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (20)$$

4. ความต้านทานระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า

ค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มมีค่าน้อยลง ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวมีค่าลดลงอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มจะขึ้นอยู่กับผลคูณของความต้านทานของระบบกราวด์กริดและกระแสกริดสูงสุด กระแสฟอลต์ยิ่งสูงมากความต้านทานของระบบกราวด์กริดควรมีค่าน้อยๆ แต่ในบางครั้งในทางปฏิบัติอาจทำได้ยาก ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินสำหรับสายส่งและสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ควรมีค่าไม่เกิน 1 โอห์ม ส่วนในสถานีไฟฟ้าขนาดเล็กหรือในระบบจำหน่ายควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1 - 5 โอห์ม ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่

การประมาณค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดเป็นสิ่งที่จำเป็นในการกำหนดรูปแบบของระบบกราวด์กริด ค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า โดยในขั้นต้นค่าต่ำสุดของค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด (R_g) ของสถานีไฟฟ้า ที่อยู่ในดินชั้นเดียวที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ สามารถประมาณได้จากสูตรที่ใช้แผ่นโลหะกลมซึ่งมีพื้นที่เท่ากับกราวด์กริดที่วางบนผิวดินดังสมการที่ (21)

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (21)$$

ความต้านทานของระบบกราวด์กริดในสมการที่ (21) จะมีค่าต่ำ เพราะคำนวณจากระบบต่อลงดินที่เป็นแผ่นโลหะวางบนผิวดิน เมื่อพิจารณาถึงค่าสูงสุดของค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเราจะเพิ่มเทอมที่สองให้กับสมการที่ (21) นั่นคือจะพิจารณาความยาวตัวนำทั้งหมดของระบบกราวด์กริดเข้าไปด้วย ความต้านทานของระบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าจึงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (22)

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (22)$$

โดยที่ R_g คือ ความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega.m$)

A คือ พื้นที่ของกราวด์กริด มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

L_T คือ ความยาวตัวนำทั้งหมดของระบบกราวด์กริด มีหน่วยเป็นเมตร (m)

เทอมที่สองของสมการที่ (22) ที่เพิ่มเข้าไปนั้นเพื่อให้มีความหมายว่า ค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดที่มีตัวนำยาว L_T ฟังอยู่จะมีค่าสูงกว่าระบบต่อลงดินที่แทนด้วยโลหะแผ่นกลม และถ้า L_T มีค่าสูงมากๆ จนถึงอนันต์ก็จะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินนั้นมีค่าเท่ากับของแผ่นโลหะกลม

ค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดที่หาได้จากสมการที่ (22) มีความถูกต้องพอสมควรสำหรับกราวด์กริดต่อลงดินที่ฝังลึกไม่เกิน 25 เซนติเมตร เมื่อพิจารณากราวด์กริดที่ต่อลงดินฝังลึกระหว่าง 0.25 - 2.5 เมตร ค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด จะหาได้จากสมการของ Srevaak ดังสมการที่ (23)

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \right] \quad (23)$$

โดยที่ h คือ ความลึกของกราวด์กริด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

5. กระแสกริดสูงสุด

คือ กระแสที่ไหลผ่านกราวด์กริดลงสู่ดิน กระแสกริดสูงสุดนี้จะมีค่าน้อยกว่ากระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากมีกระแสฟอลต์บางส่วนไหลผ่านสายดินชิงอากาศของสายส่งและสายจำหน่ายที่ต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (24)

$$I_G = D_f \times I_g \quad (24)$$

โดยที่ I_G คือ กระแสกริดสูงสุด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

D_f คือ แฟกเตอร์เพื่อใช้ในการคูณกระแสกริดเฉลี่ยเพื่อหากระแสผิดพร่องที่รวมกระแสตรงด้วย

I_g คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสกริดสมมาตร (Grid current) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

แฟกเตอร์เพื่อใช้ในการคูณกระแสกริดเฉลี่ยเพื่อหากระแสผิดพลาดที่รวมกระแสตรง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) และสมการที่ (26)

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}} \right)} \quad (25)$$

$$T_a = \frac{X}{2\pi f R} \quad (26)$$

โดยที่ T_a คือ ค่าคงที่ทางเวลาเพื่อหาค่ากระแสตรง มีหน่วยเป็น วินาที (s)

T_f คือ ช่วงเวลาที่เกิดกระแสผิดพลาด มีหน่วยเป็น วินาที (s)

f คือ ความถี่ของระบบ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

X คือ รีแอกแตนซ์ของระบบ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R คือ รีซิสแตนซ์ของระบบ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสกริดสมมาตร (Grid current) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (27)

$$I_g = S_f \times I_f \quad (27)$$

โดยที่ S_f คือ แฟกเตอร์แบ่งกระแส

I_f คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสฟอลต์สมมาตรสูงสุด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

5.1 กระแสฟอลต์

กระแสฟอลต์ที่มีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดในระบบไฟฟ้าคือ กระแสฟอลต์เฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ดังนั้นการออกแบบระบบกราวด์กริดจะใช้ค่ากระแส

ฟอลต์เฟสลงดินในการออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยมากที่สุด โดยจะพิจารณาจากกระแสที่ไหลในซีเควนซ์ศูนย์ และค่ากระแสฟอลต์มีค่าเท่ากับ $3I_0$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (28)

$$3I_0 = \frac{3E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} = I_f \quad (28)$$

โดยที่ I_0 คือ กระแสผิดปกติของซีเควนซ์ศูนย์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

E คือ แรงดันไฟฟ้าเฟส-นิวทรัล มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

R_f คือ ความต้านทานของจุดผิดปกติ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R_1 คือ ความต้านทานของซีเควนซ์บวก มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R_2 คือ ความต้านทานของซีเควนซ์ลบ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R_0 คือ ความต้านทานของซีเควนซ์ศูนย์ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

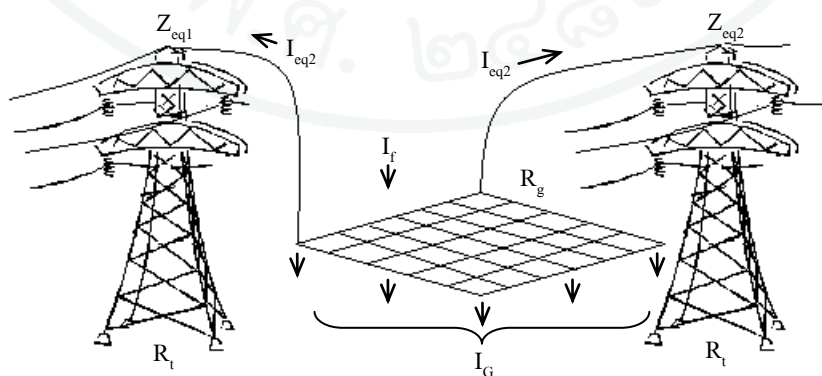
X_1 คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของซีเควนซ์บวก มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

X_2 คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของซีเควนซ์ลบ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

X_0 คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของซีเควนซ์ศูนย์ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

5.2 แฟกเตอร์แบ่งกระแส

แฟกเตอร์แบ่งกระแส (Current Division Factor, S_p) เป็นการพิจารณาถึงผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินชิงอากาศของระบบสายส่งที่เชื่อมต่อกับกราวด์กริด เพื่อนำมาคำนวณกระแสกริดที่ไหลลงดิน แสดงดังภาพที่ 7 และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 29



ภาพที่ 7 การกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินชิงอากาศ

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{[Z_{eq} + R_g]} \quad (29)$$

โดยที่ Z_{eq} คือ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายดินจึงอากาศของระบบสายส่ง

มีหน่วยเป็นโอห์มต่อกิโลเมตร (Ω / km)

R_g คือ ค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายดินจึงอากาศของระบบสายส่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (30)

$$Z_{eq} = \frac{Z_s}{2} + \sqrt{R_t + Z_s} \quad (30)$$

โดยที่ Z_s คือ ค่า Self Impedance ของสายดินจึงอากาศในระบบสายส่ง มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

R_t คือ ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาส่ง มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ค่า Self Impedance ของสายดินจึงอากาศในระบบสายส่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (31) สมการที่ (32) สมการที่ (33) และสมการที่ (34)

$$Z_s = r_a + \frac{r_e}{3} + jx_a + \frac{jx_e}{3} \quad (31)$$

$$r_e = 0.00477 f \quad (32)$$

$$x_a = 4.657 \times 10^{-3} f \log \left[\frac{1}{\text{GMR}} \right] \quad (33)$$

$$x_e = 0.006985 f \log \left[\frac{4.6655 \times 10^6 \rho}{f} \right] \quad (34)$$

โดยที่ r_a คือ ค่าความต้านทานกระแสลับของตัวนำสายดินจึงอากาศที่ความถี่ระบบ
มีหน่วยเป็นโอห์มต่อเมตร (Ω/m)

x_a คือ ค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำของตัวนำห่างกัน 1 ฟุต ของสายดินที่ความถี่ระบบ
มีหน่วยเป็นโอห์มต่อเมตร (Ω/m)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega.m$)

f คือ ความถี่ของระบบ มีหน่วยเป็น เฮิรต์ (Hz)

GMR คือ รัศมีเฉลี่ยของตัวนำสายดินจึงอากาศ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

A.P. Sakis Meliopoulos (1988) ค่าความต้านทานกระแสลับของตัวนำสายดินจึงอากาศที่ความถี่ระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (35)

$$r_a = \frac{K}{2\pi a \sigma} \times \frac{M_0}{M_1} \sin \left[\theta_1 - \theta_0 - \frac{\pi}{4} \right] \quad (35)$$

โดยที่ K คือ $\sqrt{\mu_r \mu_0 2\pi f \sigma}$

μ_r คือ ค่าคงตัวของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของสุญญากาศ (Magnetic Permeability of Free Space) มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H/m)

f คือ ความถี่ของระบบ มีหน่วยเป็น เฮิรต์ (Hz)

σ คือ Electric Conductivity ของตัวนำสายดินจึงอากาศ มีหน่วยเป็น ซีเมนต์ต่อเมตร (S/m)

M_0, θ_0 คือ Modulus and Phase of Modified Bessel Function

M_1, θ_1 คือ Modulus and Phase of Modified Bessel Function of first kind and first order

ค่าคงตัวของสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กสัมพัทธ์ คำนวณได้จากสมการที่ (36)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (36)$$

โดยที่ μ คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) ของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำ
สายดินจึงอากาศ มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H/m)

Electric Conductivity ของตัวนำสายดินจึงอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (37)

$$\sigma = \frac{1}{\rho_m} \quad (37)$$

โดยที่ ρ_m คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำสายดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)

ค่า Modulus and Phase of Modified Bessel Function สามารถหาได้จากตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Modulus and Phase of Modified Bessel Function

Z	$M_0(Z)$	$\theta_0(Z)$	$M_1(Z)$	$\theta_1(Z)$	Z	$M_0(Z)$	$\theta_0(Z)$	$M_1(Z)$	$\theta_1(Z)$
0.000	1.0000	0.00	0.0000	135.00	1.300	1.0438	23.75	0.6548	147.07
0.025	1.0000	0.01	0.0125	135.00	1.350	1.0508	25.54	0.6808	148.02
0.050	1.0000	0.04	0.0250	135.02	1.400	1.0586	27.37	0.7070	148.99
0.075	1.0000	0.08	0.0375	135.04	1.450	1.0672	29.26	0.7333	150.00
0.100	1.0000	0.14	0.0500	135.07	1.500	1.0767	31.19	0.7598	151.04
0.125	1.0000	0.22	0.0625	135.11	1.550	1.0871	33.16	0.7866	152.12
0.150	1.0000	0.32	0.0750	135.16	1.600	1.0984	35.17	0.8136	153.23
0.175	1.0000	0.44	0.0875	135.22	1.650	1.1108	37.22	0.8408	154.38
0.200	1.0000	0.57	0.1000	135.29	1.700	1.1242	39.30	0.8684	155.55
0.225	1.0000	0.73	0.1125	135.36	1.750	1.1387	41.41	0.8962	156.76
0.250	1.0001	0.90	0.1250	135.45	1.800	1.1544	43.54	0.9244	158.00
0.275	1.0001	1.08	0.1375	135.54	1.850	1.1712	45.70	0.9530	159.27
0.300	1.0001	1.29	0.1500	135.64	1.900	1.1892	47.88	0.9819	160.57
0.325	1.0002	1.51	0.1625	135.76	1.950	1.2085	50.08	1.0113	161.90
0.350	1.0002	1.75	0.1750	135.88	2.000	1.2290	52.29	1.0412	163.27

ตารางที่ 4 (ต่อ)

z	$M_0(z)$	$\theta_0(z)$	$M_1(z)$	$\theta_1(z)$	z	$M_0(z)$	$\theta_0(z)$	$M_1(z)$	$\theta_1(z)$
0.375	1.0003	2.01	0.1875	136.01	2.050	1.2509	54.51	1.0715	164.66
0.400	1.0004	2.29	0.2000	136.15	2.100	1.2741	56.74	1.1024	166.08
0.425	1.0005	2.59	0.2125	136.29	2.150	1.2986	58.98	1.1339	167.53
0.450	1.0006	2.90	0.2250	136.45	2.200	1.3246	61.22	1.1659	169.00
0.475	1.0008	3.23	0.2375	136.62	2.250	1.3520	63.46	1.1987	170.50
0.500	1.0010	3.58	0.2500	136.79	2.300	1.3808	65.71	1.2321	172.03
0.525	1.0012	3.95	0.2626	136.97	2.350	1.4111	67.95	1.2663	173.58
0.550	1.0014	4.33	0.2751	137.17	2.400	1.4429	70.19	1.3012	175.16
0.575	1.0017	4.73	0.2876	137.37	2.500	1.5111	74.65	1.3736	178.39
0.600	1.0020	5.15	0.3001	137.58	2.600	1.5855	79.09	1.4498	181.70
0.625	1.0024	5.59	0.3126	137.80	2.700	1.6665	83.50	1.5300	185.10
0.650	1.0028	6.04	0.3252	138.03	2.800	1.7541	87.87	1.6148	188.57
0.675	1.0032	6.52	0.3377	138.26	2.900	1.8486	92.21	1.7046	192.11
0.700	1.0037	7.01	0.3502	138.51	3.000	1.9502	96.52	1.7999	195.71
0.725	1.0043	7.51	0.3628	138.76	3.100	2.0593	100.79	1.9011	199.37
0.750	1.0049	8.04	0.3753	139.03	3.200	2.1760	105.03	2.0088	203.08
0.775	1.0056	8.58	0.3879	139.30	3.300	2.3009	109.25	2.1236	206.83
0.800	1.0064	9.14	0.4004	139.58	3.400	2.4342	113.43	2.2458	210.62
0.825	1.0072	9.72	0.4130	139.87	3.500	2.5764	117.60	2.3763	214.44
0.850	1.0081	10.31	0.4256	140.17	3.600	2.7280	121.75	2.5155	218.30
0.875	1.0091	10.92	0.4382	140.48	3.700	2.8894	125.87	2.6640	222.17
0.900	1.0102	11.55	0.4508	140.80	3.800	3.0613	129.99	2.8227	226.07
0.925	1.0114	12.19	0.4634	141.12	3.900	3.2443	134.10	2.9920	229.98
0.950	1.0127	12.86	0.4760	141.46	4.000	3.4391	138.19	3.1729	233.90
0.975	1.0140	13.53	0.4886	141.80	4.500	4.6179	158.59	4.2783	253.67
1.000	1.0155	14.23	0.5013	142.16	5.000	6.2312	178.93	5.8091	273.55
1.025	1.0171	14.94	0.5140	142.52	5.500	8.4473	199.28	7.9253	293.48

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Z	M ₀ (Z)	θ ₀ (Z)	M ₁ (Z)	θ ₁ (Z)	Z	M ₀ (Z)	θ ₀ (Z)	M ₁ (Z)	θ ₁ (Z)
1.050	1.0188	15.66	0.5267	142.89	6.000	11.5008	219.62	10.8502	313.45
1.075	1.0207	16.40	0.5394	143.27	6.500	15.7170	239.96	14.8961	333.46
1.100	1.0227	17.16	0.5521	143.66	7.000	21.5479	260.29	20.5003	353.51
1.125	1.0248	17.93	0.5648	144.05	7.500	29.6223	280.61	28.2737	373.59
1.150	1.0270	18.72	0.5776	144.46	8.000	40.8176	300.92	39.0697	393.69
1.175	1.0294	19.52	0.5904	144.87	8.500	56.3586	321.22	54.0807	413.82
1.200	1.0320	20.34	0.6032	145.29	9.000	77.9565	341.52	74.9740	433.96
1.225	1.0347	21.17	0.6161	145.73	9.500	108.0039	361.81	104.0822	454.11
1.250	1.0376	22.02	0.6290	146.17	10.000	149.8476	382.10	144.6705	474.28

ที่มา: A.P. Sakis Meliopoulos (1988)

รัศมีเฉลี่ยของตัวนำสายดินจึงอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (38)

$$GMR = ae^{-\mu_r \xi / 4} \quad (38)$$

โดยที่ ξ คือ Internal Magnetic Flux Linkage of Conductor Assume Nonuniform Current Distribution ทารด้วย Internal Magnetic Flux Linkage of Conductor Uniform Current Distribution สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (39)

$$\xi = \frac{4}{Ka} \times \frac{M_0}{M_1} \sin \left[\theta_0 - \theta_1 + \frac{3}{4} \pi \right] \quad (39)$$

โดยที่ a คือ รัศมีของตัวนำสายดินจึงอากาศ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

6. ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม

ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (Ground Potential Rise, GPR) หาได้จากผลคูณของความต้านทานของระบบกราวด์กริดและกระแสกริดสูงสุด คำนวณได้จากสมการที่ (40)

$$GPR = R_g \times I_g \quad (40)$$

โดยที่ GPR คือ ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

R_g คือ ความต้านทานของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

I_g คือ กระแสกริดสูงสุด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

7. แรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด

เมื่อทำการออกแบบระบบกราวด์กริดแล้วจะต้องพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงภายในสถานีไฟฟ้าเพื่อนำมาตรวจสอบความปลอดภัยของระบบกราวด์กริด โดยแรงดันไฟฟ้าเมชที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่มากเกินไปกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่เกิดขึ้นต้องมีค่าไม่เกินค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

7.1 แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage)

ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (41)

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_g}{L_m} \quad (41)$$

โดยที่ E_m คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน มีหน่วยเป็น โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)

K_m คือ แฟกเตอร์ระยะห่างสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมช

K_i คือ แฟกเตอร์ที่ใช้ในการปรับรูปแบบของกราวด์กริด

I_G คือ กระแสกริดสูงสุด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

L_m คือ ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งกราวด์รูด สำหรับ
แรงดันไฟฟ้าเมฆ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

แฟกเตอร์ระยะห่างสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมฆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (42)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (42)$$

โดยที่ h คือ ความลึกของกราวด์กริด มีหน่วยเมตร (m)

D คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำของกราวด์กริด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

K_{ii} คือ สัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะการวางกราวด์กริด

K_h คือ สัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของความลึกของตัวนำกราวด์กริด

n คือ แฟกเตอร์เนื่องจากผลของรูปแบบของกราวด์กริด โดยมีองค์ประกอบของแฟกเตอร์ n_a, n_b, n_c และ n_d

แฟกเตอร์เนื่องจากผลของรูปแบบของกราวด์กริด คำนวณได้จากสมการที่ (43) และสมการที่ (44)

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (43)$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (44)$$

โดยที่ $n_b = 1$ กรณีกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_c = 1$ กรณีกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$n_d = 1$ กรณีกราวด์กริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปตัวแอล (L)

สำหรับรูปแบบอื่นค่า n_b , n_c และ n_d คำนวณได้จากสมการที่ (45) สมการที่ (46) และสมการที่ (47)

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (45)$$

$$n_c = \left(\frac{L_x L_y}{A} \right)^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \quad (46)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (47)$$

โดยที่ L_c คือ ความยาวทั้งหมดของตัวนำแนวนอน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_p คือ เส้นรอบรูปของกราวด์กริด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

A คือ พื้นที่ของกราวด์กริด มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

L_x คือ ความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง x มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_y คือ ความยาวมากที่สุดของกราวด์กริดในทิศทาง y มีหน่วยเป็น เมตร (m)

D_m คือ ระยะห่างสูงสุดระหว่างจุดสองจุดใด ๆ บนกราวด์กริด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

สัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของความลึกของตัวนำกราวด์กริด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (48)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (48)$$

โดยที่ h_0 คือ ความลึกอ้างอิงของกราวด์กริด มีค่าเท่ากับ 1 เมตร

h คือ ความลึกของกราวด์กริด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

แฟคเตอร์ที่ใช้ในการปรับรูปแบบของกราวด์กริด คำนวณได้จากสมการที่ (49)

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (49)$$

โดยที่ n คือ แฟกเตอร์เนื่องจากผลของรูปแบบของกราวด์กริด

สำหรับกราวด์กริดที่ไม่มีแท่งกราวด์รูดหรือมีแท่งกราวด์รูดจำนวนน้อย (ไม่มีที่มุมหรือที่เส้นรอบกราวด์กริด) ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งกราวด์รูด สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมฆ สมการคำนวณได้จากที่ (50)

$$L_m = L_c + L_R \quad (50)$$

สำหรับกราวด์กริดที่มีแท่งกราวด์รูดที่มุม ที่เส้นรอบกราวด์กริด หรือกระจายทั่วพื้นกราวด์กริด ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งกราวด์รูด สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมฆ สมการคำนวณได้จากที่ (51)

$$L_m = L_c + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (51)$$

โดยที่ L_R คือ ความยาวรวมของแท่งกราวด์รูดทั้งหมด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

L_r คือ ความยาวของแท่งกราวด์รูดแต่ละแท่ง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

7.2 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage)

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (52)

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (52)$$

โดยที่ K_s คือ แฟกเตอร์ระยะห่าง สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

L_s คือ ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งกราวด์รูดสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว มีหน่วยเป็น เมตร (m)

แฟกเตอร์ระยะห่าง สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (53)

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (53)$$

ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งกรวดรูดสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (54)

$$L_s = 0.75L_c + 0.85L_R \quad (54)$$

8. การต่อลงดินของ GIS

8.1 สภาวะการเกิดช้อคในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS

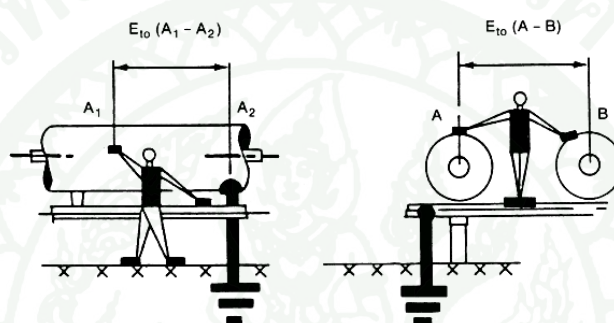
ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแบบ GIS แรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดปัญหามากกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว เนื่องจากอุปกรณ์ GIS จะมีเปลือกหุ้ม (Enclosure) ที่เป็นโลหะและมีก๊าซเป็นฉนวนอยู่ภายใน โดยจะทำการต่อลงดินที่เปลือกหุ้ม ในขณะที่มีกระแสไหลในตัวนำที่อยู่ภายในเปลือกหุ้มแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะเกิดขึ้นบนเปลือกหุ้มด้านนอก ซึ่งแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดความต่างศักย์ที่จุดต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมื่อเทียบกับระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้า การประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่จะเกิดขึ้นบนเปลือกหุ้มขณะมีกระแสฟลัดไหลผ่าน จะต้องหาค่าอินตีกแตนระหว่างด้านนอกของเปลือกหุ้มกับดิน ค่าอินตีกแตนซ์ของตัวนำภายในและค่าอินตีกแตนซ์ร่วมระหว่างตัวนำของแต่ละเฟส

มนุษย์ที่สัมผัสกับเปลือกหุ้มด้านนอกของ GIS อาจจะได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการลัดวงจรใน 2 ลักษณะ ดังนี้

- 1) การเกิดฟลัดภายในเปลือกหุ้มของ GIS เช่น การวาวไฟระหว่างตัวนำในเปลือกหุ้มกับผิวด้านในของเปลือกหุ้ม

2) การเกิดฟอลต์ภายนอกเปลือกหุ้มของ GIS ซึ่งกระแสฟอลต์ที่ไหลในตัวนำในเปลือกหุ้มจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลในเปลือกหุ้ม ที่เรียกว่ากระแสไหลวน (Circulating current)

ถ้ามนุษย์ยืนอยู่บนตะแกรงโลหะ วงจรไฟฟ้าจำลองการเกิดอุบัติเหตุก็จะประกอบด้วยทางเดินของกระแสระหว่างมือกับมือและมือกับเท้า ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของ GIS จะพิจารณาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะใน GIS

ที่มา: IEEE Standard 80-2000 (2000)

ผู้ผลิต GIS จะพิจารณาว่าเปลือกหุ้มได้ถูกออกแบบได้อย่างเหมาะสมและมีการต่อลงดินเพียงพอสำหรับความต่างศักย์ระหว่างแต่ละเปลือกหุ้มและระหว่างเปลือกหุ้มกับโครงเหล็กที่ต่อลงดินอื่นๆ มีค่าไม่เกิน 65 - 130 โวลต์ ขณะเกิดฟอลต์ ถ้าค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดินมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้าก็จะเหลือเพียงค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ สมการหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (55) และสมการที่ (56)

$$E_{\text{mm-touch50}} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad (55)$$

$$E_{\text{mm-touch70}} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (56)$$

โดยที่ $E_{\text{mm-touch}}$ คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 t_s คือ ระยะเวลาที่กระแสฟลัดไหลผ่านร่างกายที่ขอมให้มีได้ มีหน่วยเป็น วินาที (s)

ขนาดของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะจะมีค่าอยู่ระหว่าง 65 - 130 โวลต์ เวลาตัดกระแสอยู่ในช่วง 0.8 - 3.2 วินาที สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม และเวลาตัดกระแสอยู่ในช่วง 1.46 - 5.8 วินาที สำหรับมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม

8.2 ความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS

ในกรณีที่มนุษย์สัมผัสกับเปลือกหุ้มของ GIS เราจะสมมุติว่าความต่างศักย์ทั้งหมดที่จุดสัมผัสไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่มีกระแสไหลผ่านส่วนต่างๆ ซึ่งรวมทั้งร่างกายมนุษย์ด้วย แล้วหาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างสองจุดที่สัมผัสตามความยาวของเปลือกหุ้มหรือระหว่างสองเปลือกหุ้มกับจุดต่อลงดินร่วมกัน (Common ground) ดังภาพที่ 8 กรณีการสัมผัสระหว่างมือกับเท้าโดยที่มนุษย์ยืนอยู่บนพื้นที่ไม่เป็นโลหะ สมการที่ (55) และ (56) จะปรับแก้เพื่อรวมเอาแรงดันตกของอินดักแตนซ์ที่เกิดขึ้นภายใน GIS เข้าไปด้วย ดังนั้นเกณฑ์ความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (57)

$$\sqrt{E_t^2 + (E'_{\text{to max}})^2} < E_{\text{touch}} \quad (57)$$

โดยที่ E_t คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่คำนวณจากจุดที่อยู่ได้เท้า มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 $E'_{\text{to max}}$ คือ ความต่างศักย์สูงสุดบนเปลือกหุ้ม GIS (หรือระหว่างเปลือกหุ้ม GIS) หรือระหว่างเปลือกหุ้มกับโครงสร้าง มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

8.3 การต่อเปลือกหุ้ม GIS ลงดิน

การต่อเปลือกหุ้ม GIS ลงดินเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการลดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงกาว ภายในพื้นที่ติดตั้งของ GIS นอกจากนั้นอาจใช้โครงเหล็กที่ติดตั้ง GIS เป็นตะแกรงต่อลงดิน (Ground mat) ต่อเข้ากับโครงสร้างของ GIS และต่อลงดินด้วย

เพื่อจำกัดผลกระทบที่จะเกิดจากกระแสไหลวน ควรมีมาตรการดังนี้

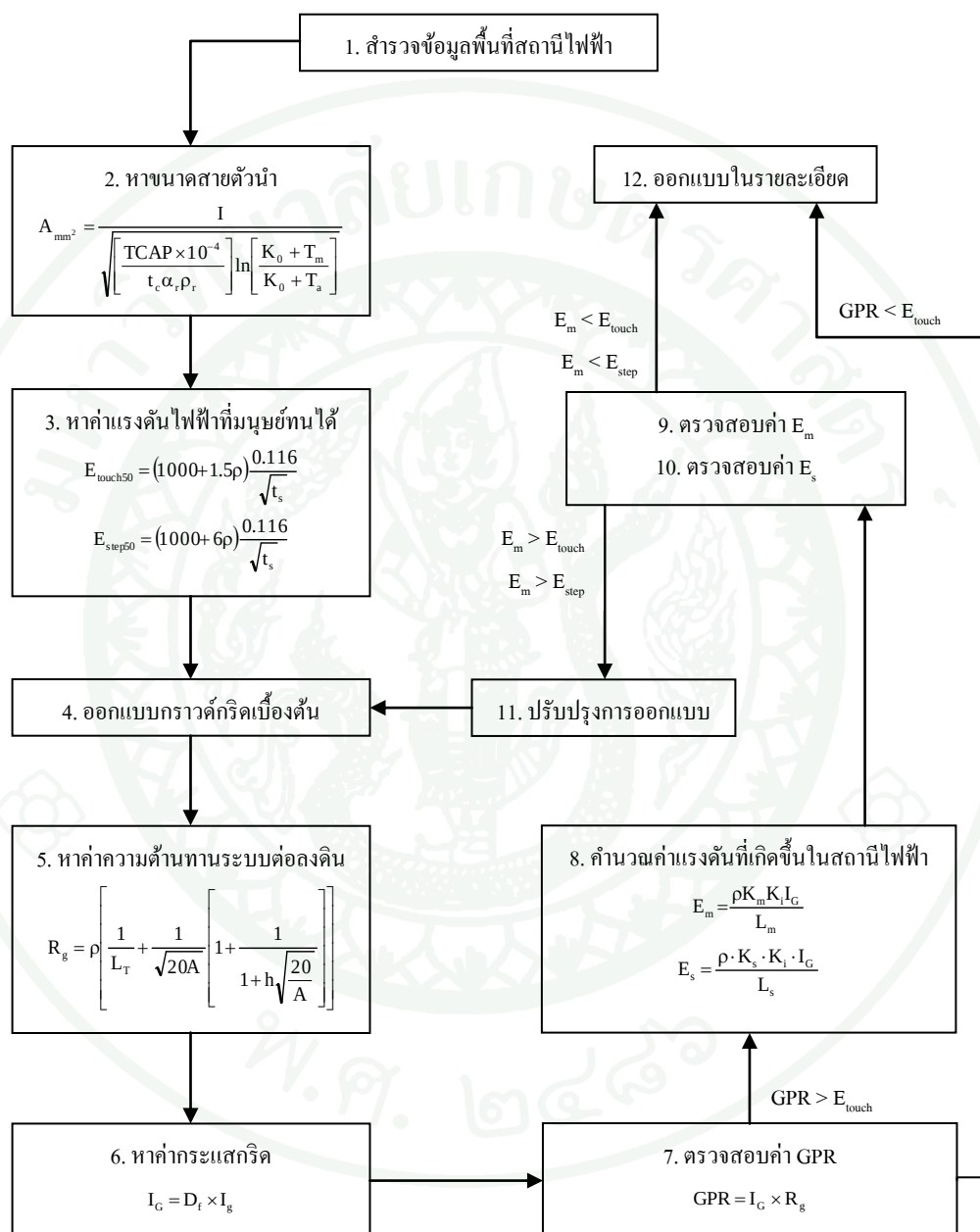
- 1) เปลือกหุ้มโลหะทั้งหมดควรมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับดินในภาวะปกติ
- 2) เมื่อกำหนดจุดต่อลงดิน ต้องแน่ใจว่าการออกแบบเปลือกหุ้มจะไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์สูงเกินไประหว่างแต่ละเปลือกหุ้ม และกระแสเหนี่ยวนำต้องไม่มีผลต่อโครงเหล็กที่รองรับหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบต่อลงดิน
- 3) เพื่อไม่ให้กระแสไหลวนในเปลือกหุ้มของ GIS ไหลในทิศทางผิดปกติ เปลือกหุ้มของสายเคเบิล (Sheath) ควรต่อกับระบบต่อลงดิน โดยผ่านจุดต่อที่แยกจากเปลือกหุ้มของ GIS เพื่อให้ง่ายต่อการแยกหัวต่อสายเคเบิล (Cable termination) ควรแยกด้วยช่องว่างอากาศ (Air gap) หรือมีฉนวนที่เหมาะสม แต่แรงดันไฟฟ้าชั่วคราวที่มีหน้าคลื่นชันมาก ที่เกิดจากสวิตช์ชิ่งหรือการลัดวงจรใน GIS อาจจะเป็นเหตุให้ฉนวนเกิดการวาวไฟตามผิว ซึ่งต้องนำมาพิจารณาด้วย
- 4) ต้องกันไม่ให้กระแสที่ไหลในเปลือกหุ้มไหลไปยังหม้อแปลงกระแส (Current transformer) ที่ติดตั้งอยู่

8.4 การต่อลงดินของฐานคอนกรีตของ GIS

โดยปกติ GIS มักจะติดตั้งบนพื้นคอนกรีต ซึ่งถ้าเป็นพื้นคอนกรีตแบบต่อเนื่อง เหล็กเสริมของพื้นคอนกรีตที่มัดกันเป็นคาน้ำหรือเมชนั้นสามารถที่จะต่อกับกราวด์บัสหลักได้ เพื่อให้ทั้งเปลือกหุ้มของ GIS และเหล็กโครงสร้าง (Structural steel) ทั้งในและนอกฐานคอนกรีตมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันโดยประมาณ ซึ่งการทำอย่างนี้จะทำให้ระบบต่อลงดินดีขึ้นเพราะเหล็กเสริมอยู่ชิดกันมากกว่าสายดินของกราวด์กริดมาก ศักย์ไฟฟ้าที่พื้นคอนกรีตจึงสม่ำเสมอมากขึ้น

ฐานคอนกรีตของ GIS ซึ่งจะประกอบด้วยเหล็กเสริมและเหล็กอื่นๆสามารถที่จะทำเป็นรากสายดินช่วยได้และอาจจะเป็นทางผ่านของกระแสได้ แต่ต้องไม่ทำความเสียหายให้กับคอนกรีตเนื่องจากความร้อนหรือการเกิดสนิมของเหล็กที่ต่อกันในคอนกรีต

การออกแบบกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้า มีหลักการออกแบบแสดงตามภาพที่ 9 โดยขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 9 แผนภูมิการออกแบบระบบกราวด์กริด

ที่มา: IEEE Std. 80-2000 (2000)

ขั้นตอนที่ 1 สํารวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า คือ การหาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบกราวด์กริด ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้เพื่อกํานวณในขั้นตอนอื่นต่อไป เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่จะมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งโดยมากสามารถหาข้อมูลได้จากแบบก่อสร้างของสถานีไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ การหาขนาดสายตัวนำจะใช้กระแสฟอลต์สูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นและใช้ช่วงเวลากการตัดกระแสที่เป็นช่วงเวลาสูงสุด

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_{step}) ที่มนุษย์ทนได้เป็นขั้นตอนคํานวณเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบกราวด์กริดที่จะทำการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น โดยทำการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำรวมทั้งลักษณะรูปทรงของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 คํานวณหาค่าความต้านทานระบบกราวด์กริด เพื่อใช้ค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดที่คํานวณได้ไปคํานวณในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 คํานวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด การออกแบบจะต้องพิจารณาถึงประเภทของฟอลต์ ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ Decrement factor และการขยายระบบในอนาคต

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (Ground Potential Rise, GPR)

ถ้า $GPR < E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $GPR > E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 คํานวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า โดยทำการคํานวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องคํานึงถึงลักษณะรูปร่างของกราวด์กริด หรือของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ

ถ้า $E_m < E_{\text{touch}}$ ไปยังขั้นตอนที่ 10
 ถ้า $E_m > E_{\text{touch}}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ถ้า $E_s < E_{\text{step}}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12
 ถ้า $E_s > E_{\text{step}}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 ปรับปรุงการออกแบบ เมื่อมาถึงขั้นตอนที่ 11 ได้แสดงว่าผู้ออกแบบยังออกแบบระบบต่อลงดินที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ลดระยะห่างของกราวด์กริด ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำ
2. เพิ่มกราวด์รูด เพื่อเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำ
3. ลดกระแสฟอลต์ เพื่อเป็นการลดกระแสกริด
4. ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสฟอลต์ เพื่อให้มนุษย์ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น
5. ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีค่าความต้านจำเพาะมากขึ้นกว่าเดิม

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด กล่าวคือ การออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่า การออกแบบระบบกราวด์กริดที่ได้ดำเนินการมานั้นปลอดภัย จากนั้นจะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือกราวด์กริด การเชื่อมต่อตัวนำเข้าไปยังตู้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดินซึ่งต้องควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

การออกแบบระบบต่อลงดินของอาคาร

กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548) ลักษณะของระบบต่อลงดินของอาคาร แสดงในภาพที่ 10 พื้นและกำแพงที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก จะใช้เหล็กเสริมหรือเรียกว่าอิลเลคโตรดควบคุมแรงดัน (Equipotential Ground Grid) โดยใช้แถบเหล็กชุบสังกะสีขนาด 32x4 มิลลิเมตร ฝังอยู่ใต้ผิวของคอนกรีตไม่น้อยกว่า 0.10 เมตร โดยจะถูกติดตั้งร่วมกันกับเหล็กโครงสร้างมีลักษณะเป็นเมฆ ความกว้างของเมฆไม่เกิน 10 เมตร แถบเหล็กชุบสังกะสีและเหล็กโครงสร้างจะถูกต่อประสานกันที่

อิเล็กโตรดตอลงดินแบบวงแหวน ถูกฝังที่ความลึก 0.5-1.0 เมตร ห่างจากอาคาร 1 เมตร และต่อเข้ากับเมนกราวด์กริด มีหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสขณะเกิดฟอลต์ และนำกระแสฟอลต์ไปยังดิน

ที่ระยะไม่เกิน 10-20 เมตร รอบๆ เส้นรอบรูปของอาคารควรจะมีตัวนำฝังในคอนกรีต สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่า เพื่อให้ได้ระบบตอลงดินแบบตาข่ายกรง

บริเวณฐานของอาคารและภายนอกอาคาร กระแสฟอลต์จะไหลลงดินโดยผ่านอิเล็กโตรดตอลงดินที่ฐานราก อิเล็กโตรดตอลงดินแบบวงแหวน และเมนกราวด์กริด โดยระบบตอลงดินภายนอกอาคารจะต้องคำนึงถึงพิกัดอุณหภูมิที่ตัวนำได้รับและแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดอันตราย ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000

คู่มือการใช้งานโปรแกรม CDEGS

กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548) โปรแกรม CDEGS (CURRENT DISTRIBUTION, ELECTROMAGNETIC FIELDS, GROUNDING AND SOIL STRUCTURE ANALYSIS) เป็นโปรแกรมที่จัดทำขึ้นกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) ประเทศแคนาดา ซึ่งจะประกอบด้วย 8 โมดูล ย่อย ดังนี้

1) RESAP (Analysis of Earth Resistivity Measurement) เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับหาพารามิเตอร์โครงสร้างดินที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในภาคสนาม

2) MALT (Low Frequency Analysis of Buried Conductor Networks) เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบตอลงดิน เช่น คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบตอลงดิน กระแสที่ไหลออกจากสายดิน แรงดันไฟฟ้าบนผิวดินแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว

3) FCDIST (Simplified Fault Current Distribution) เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับหากระแสที่ไหลผ่านสายดินจึงอากาศและระบบตอลงดินอย่างง่าย เพื่อใช้ในการออกแบบระบบตอลงดินแทนการใช้กระแสฟอลต์

4) MALZ (Frequency Domain Grounding Analysis) มีความสามารถคล้ายๆ กับ MALT แต่ MALZ สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมแต่ละจุดของกราวด์กริดได้

5) TRALIN (TRANsmission LINE parameters) เป็นโมดูลที่ใช้คำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวนำ เช่น Series, Shunt และ Mutual impedance ของสายส่งและสายจำหน่าย ทั้งสายเปลือยและสายหุ้มฉนวน

6) SPLITS (Simulation of Power Lines, Interferences and Terminal Stations) เป็นโมดูลที่ใช้หากระจายกระแสลัดวงจรลงดินในสายส่งหรือในสถานีไฟฟ้าที่กำหนดให้ โดยสามารถพิจารณาเป็นระบบเฟสเดียวหรือสามเฟสได้ และข้อมูลของสายสามารถเรียกจาก TRALIN ได้

7) HIFREQ (Electromagnetic Fields Analysis) เป็นโมดูลที่ใช้ศึกษาการตอบสนองต่อความถี่จากการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากการไหลของกระแสในตัวนำที่อยู่ใต้ดินหรืออากาศหรือกราวด์กริดต่อความถี่สูง

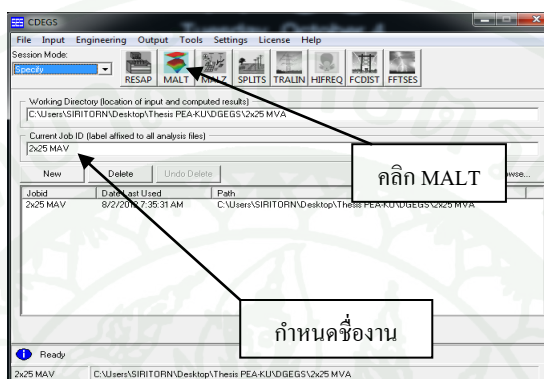
8) FFTSES (Automated Fast Fourier Transform Analysis) โมดูล FFTSES เป็นโมดูลที่ใช้ศึกษา Time domain

1. โมดูล MALT

โมดูล MALT เป็นโมดูลที่ใช้วิเคราะห์ระบบต่อลงดิน ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการศึกษานำกระแสผ่านดิน ซึ่งโดยทั่วไป MALT สามารถวิเคราะห์และออกแบบระบบต่อลงดินได้ทั้งในโรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้า หรือใช้ในการศึกษา Cathodic protection โดย MALT สามารถวิเคราะห์ระบบต่อลงดินที่สลับซับซ้อนที่ประกอบด้วยสายตัวนำเปลือยฝังดินที่มีโครงสร้างเป็นชั้นในแนวดิ่ง แนวนอน เป็นทรงกลมหรือเป็นทรงกระบอก แม้กระทั่งดินที่เป็นปริมาตรที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่างกัน

2. การใช้งานโมดูล MALT

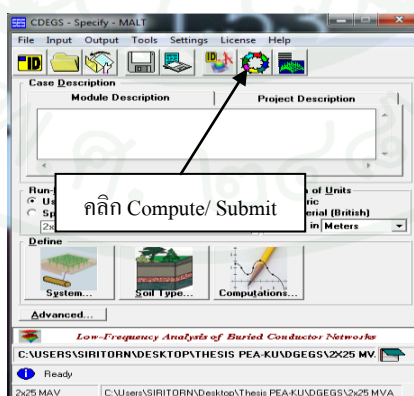
2.1 Start/All Program/SES Software 2500/CdegS แสดงตามภาพที่ 11 และทำการกำหนดชื่องาน



ภาพที่ 11 การกำหนดชื่องานของโปรแกรม CDEGS

ที่มา: กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548)

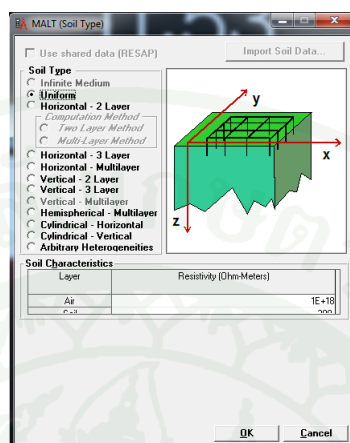
2.2 จากภาพที่ 11 คลิก MALT ที่อยู่ใน Toolbox เพื่อเข้าสู่โมดูลในการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การใช้งาน โมดูล MALT

ที่มา: กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548)

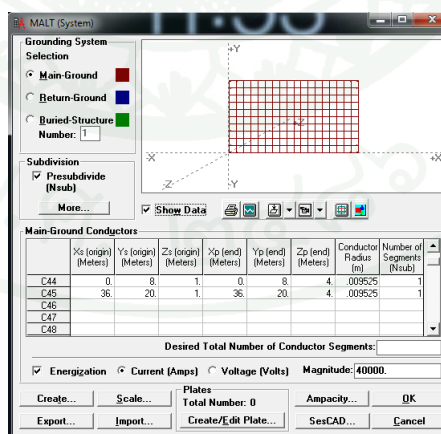
2.3 จากภาพที่ 12 คลิก Soil Type ที่อยู่ใน Toolbox เพื่อป้อนข้อมูลของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน แสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การป้อนข้อมูลค่าความต้านทานจำเพาะของดินของโมดูล MALT

ที่มา: กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548)

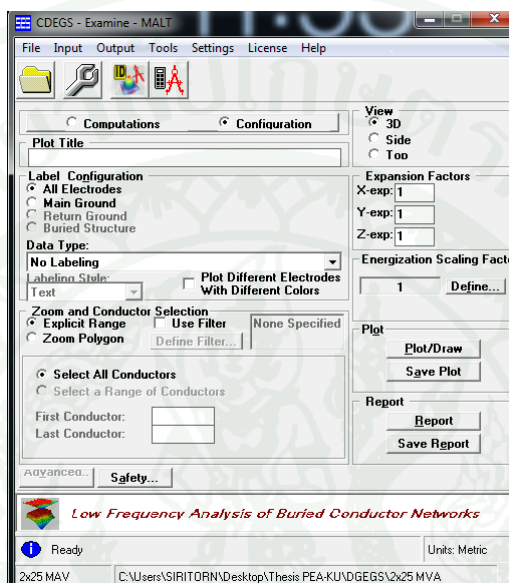
2.4 จากภาพที่ 12 คลิก System ที่อยู่ใน Toolbox เพื่อป้อนค่าของข้อมูลในการออกแบบระบบกราวด์กริด แสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การป้อนข้อมูลในการออกแบบระบบกราวด์กริดของโมดูล MALT

ที่มา: กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548)

2.5 จากภาพที่ 12 คลิก Compute/Submit ที่อยู่ใน Toolbox เพื่อเข้าสู่กระบวนการประมวลผล และการแสดงผลที่เป็นรายงาน ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยสามารถสั่งให้แสดงหรือพิมพ์รายงานได้โดยคลิกปุ่ม Report หรือแสดงกราฟของศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดได้จากการคลิกปุ่ม Plot/ Draw



ภาพที่ 15 การ PLOT/REPORT/PRINT โมดูล MALT

ที่มา: กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2548)

หนังสือคู่มือออกแบบสถานีไฟฟ้า

กองออกแบบสถานีไฟฟ้า (2551) แนวทางในการออกแบบสถานีไฟฟ้าให้กับ พนักงานไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง เพื่อสามารถนำความรู้ไปใช้ประกอบการทำงานได้สะดวก และเป็นไปในแนวทางเดียวกัน เนื้อหาได้รับการเรียบเรียงจาก เอกสารอ้างอิงทางวิชาการ มาตรฐานต่างๆ และข้อกำหนดทางด้านกฎหมาย ร่วมกับการประสบการณ์ในการทำงานของคณะผู้จัดทำ

โปรแกรม Excel-VBA

วิศัลย์ (2554) Microsoft Excel เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการทำงานสูง โดยเฉพาะงานด้านการคำนวณ ประมวลผล และการวิเคราะห์ข้อมูล ทั้งด้านการเงิน บัญชี การผลิต สถิติ และวิศวกรรม รวมถึงงานด้านการจัดการเอกสารต่างๆ

VBA ย่อมาจาก Visual Basic for Applications เป็นเครื่องมือที่อยู่ใน Microsoft Office โดยผู้ใช้งานสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Microsoft Office ได้ตามต้องการ นอกจากนั้นผู้ใช้งานยังสามารถสร้างโปรแกรมต่างๆ เพิ่มเติมบน Microsoft Excel , Word และ Power point โดยจุดเด่นของ Microsoft Excel ก็คืองานในด้านการวิเคราะห์ข้อมูล การคำนวณที่ซับซ้อน ซึ่ง VBA ใน Excel สามารถดึงเครื่องมือต่างๆ ที่มีอยู่ใน Excel มาใช้งานต่อได้เลย เช่น Function สำเร็จรูป รวมทั้งสูตรต่างๆ ทำให้สามารถสร้างหรือพัฒนาโปรแกรมบน Excel ได้ง่ายและรวดเร็ว การเขียนโปรแกรมก็สามารถทำได้ง่ายขึ้น

Visual Basic เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ (Programming Language) ที่พัฒนาโดยบริษัท ไมโครซอฟท์ ซึ่งเป็นบริษัทที่สร้างระบบปฏิบัติการ Windows ที่เรากำลังใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยตัวภาษาเองมีรากฐานมาจากภาษา Basic ซึ่งย่อมาจาก Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code ถ้าแปลให้ได้ความหมายก็คือ “ชุดคำสั่งหรือภาษาคอมพิวเตอร์สำหรับผู้เริ่มต้น” ภาษา Basic มีจุดเด่นคือผู้ที่ไม่มีพื้นฐานเรื่องการเขียนโปรแกรมเลยก็สามารถเรียนรู้และนำไปใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการเรียนภาษาคอมพิวเตอร์อื่นๆ

1. ภาพรวมของ Excel-VBA

โปรแกรม Excel-VBA มีสภาพแวดล้อมสำหรับการพัฒนา ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ครอบคลุมไม่ว่าจะเป็นการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งานเวิร์กชีต การออกแบบเมนูเพื่อใช้ในการป้อนข้อมูล การสร้างและพิมพ์รายงาน รวมถึงการสืบค้นชุดคำสั่งเพื่อการตรวจหาข้อผิดพลาดในโปรแกรม องค์ประกอบเหล่านี้ล้วนแล้วแต่อำนวยความสะดวกในการทำงานของผู้ใช้งานอย่างมาก

2. ข้อดีของโปรแกรม Excel-VBA

1. ง่ายต่อการเรียนรู้ เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น ทั้งในเรื่องไวยากรณ์ของภาษาเองและเครื่องมือการใช้งาน
2. ความนิยมของตัวภาษา โดยภาษา Basic นั้นเป็นภาษาที่คนเรียนรู้และใช้งานมาก
3. สามารถพัฒนาได้อย่างต่อเนื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพในด้านของตัวภาษาและความเร็วของการประมวลผล และในเรื่องของความสามารถใหม่ๆ เช่น การติดต่อกับระบบฐานข้อมูล

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 7
3. โปรแกรม Microsoft Office 2003
4. โปรแกรม CDEGS

วิธีการ

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ใช้งานของมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000
2. ศึกษาทฤษฎี หลักการและการประยุกต์ใช้งานของโปรแกรม CDEGS
3. ศึกษาทฤษฎี หลักการและการประยุกต์ใช้งานของโปรแกรม Excel-VBA
4. ศึกษาขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน
5. ออกแบบสถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type
6. สร้างโปรแกรมการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยพัฒนาบนโปรแกรม Excel-VBA
7. ทำการออกแบบระบบกราวด์กริด
8. ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยพิจารณาถึงผลของการปฐมนิคมดิน และผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินซึ่งอากาศของระบบสายส่ง เพื่อกำหนดรูปแบบของระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้างกล่าวให้เกิดความปลอดภัย
9. สรุปผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์

ผล

การออกแบบระบบกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 เควี ชนิด Gas-Insulated Switchgear Indoor Substation ในพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด โดยออกแบบให้มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้า

ข้อกำหนดของข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะใช้ค่ากระแสฟอลต์สูงสุดเท่ากับ 40 กิโลแอมแปร์ และช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์เท่ากับ 1.0 วินาที

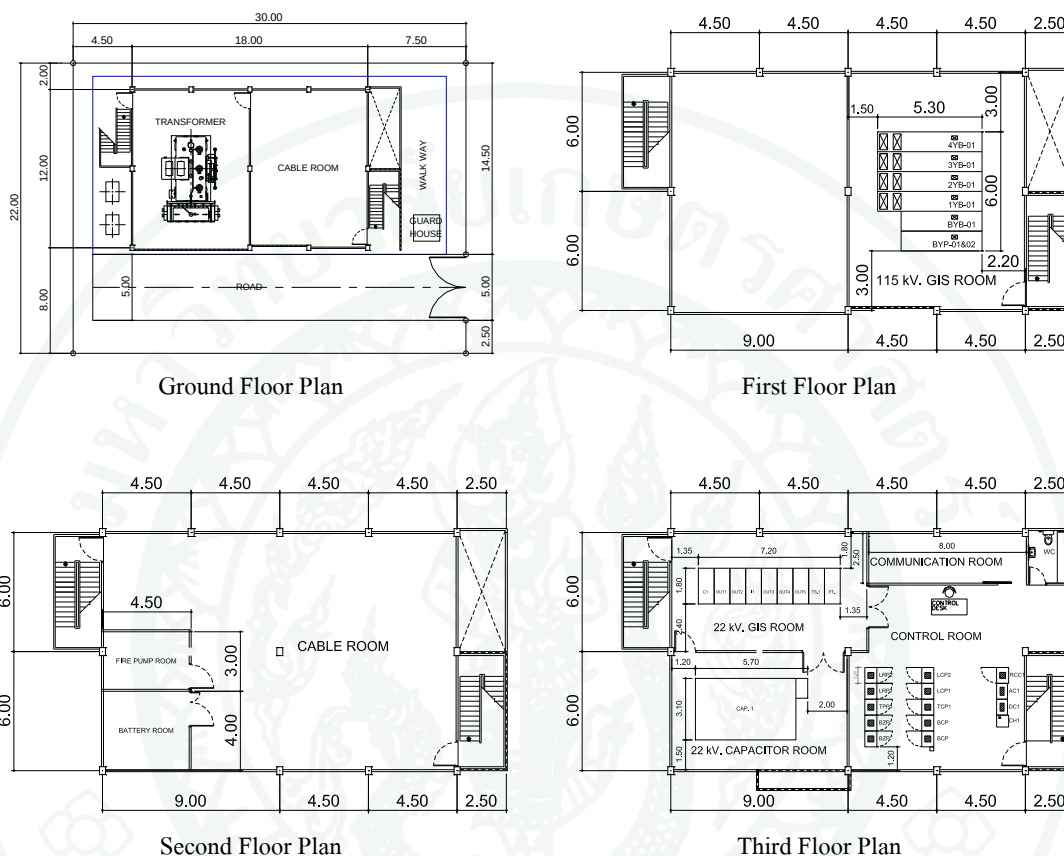
1. การออกแบบของสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา

1.1 สถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type A ระบบ 115-22 กิโลโวลต์ โดยติดตั้ง GAS-Insulated Switchgear ระบบ 115 กิโลโวลต์ จำนวน 4 ชุด (2 Line Bay 1 Transformer Bay และ 1 Coupling Bay) จัดบัสในรูปแบบ Double Bus Single Breaker ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 25 เมกะโวลต์แอมป์ จำนวน 1 เครื่อง และติดตั้ง Switchgear ระบบ 22 กิโลโวลต์ ชนิด Indoor Type จำนวน 5 ชุด (1 Incoming Breaker 3 Outgoing Breaker และ 1 Spare Breaker)

ออกแบบสถานีไฟฟ้า GIS-Indoor Type A โดยมีขนาดของพื้นที่ 30 x 22 เมตร ประกอบด้วยอาคาร 4 ชั้น ขนาด 18 x 12 เมตร แสดงดังภาพที่ 16 โดยมีรายละเอียดการจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าในแต่ละชั้นดังนี้

- 1) Ground Floor ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 25 เมกะโวลต์แอมป์ และใช้ในการวางสาย Power Cable
- 2) First Floor ติดตั้ง GAS-Insulated Switchgear ระบบ 115 กิโลโวลต์
- 3) Second Floor ใช้ในการวางสาย Power Cable

4) Third Floor ติดตั้ง Switchgear และ Capacitor Bank ระบบ 22 กิโลโวลต์ รวมถึงเป็นห้องควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบสื่อสาร



ภาพที่ 16 การจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type A

1.2 สถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type B ระบบ 115-22 กิโลโวลต์ โดยติดตั้ง GAS-Insulated Switchgear ระบบ 115 กิโลโวลต์ จำนวน 5 ชุด (2 Line Bay 2 Transformer Bay และ 1 Coupling Bay) จัดบัสในรูปแบบ Double Bus Single Breaker ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 25 เมกะโวลต์แอมป์ จำนวน 2 เครื่อง และติดตั้ง Switchgear ระบบ 22 kV. ชนิด Indoor Type จำนวน 11 ชุด (2 Incoming Breaker 1 Tie Breaker 6 Outgoing Breaker และ 2 Spare Breaker)

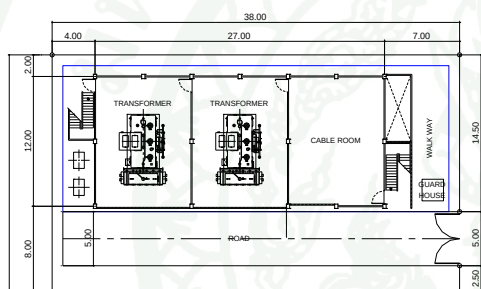
ออกแบบอาคารสถานีไฟฟ้า GIS-Indoor Type B โดยมีขนาดของพื้นที่ 38 x 22 เมตร ประกอบด้วยอาคาร 4 ชั้น ขนาด 27 x 12 เมตร แสดงดังภาพที่ 17 โดยมีรายละเอียดการจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าในแต่ละชั้นดังนี้

1) Ground Floor ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ขนาด 25 เมกะโวลต์แอมป์ และใช้ในการวางสาย Power Cable

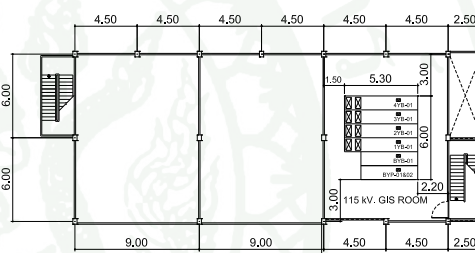
2) First Floor ติดตั้ง GAS-Insulated Switchgear ระบบ 115 กิโลโวลต์

3) Second Floor ใช้ในการวางสาย Power Cable

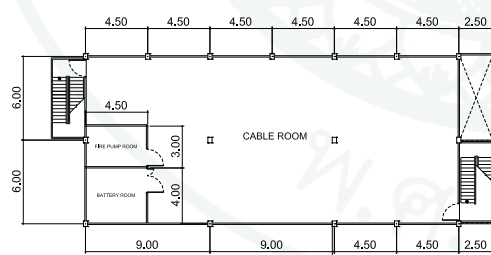
4) Third Floor ติดตั้ง Switchgear และ Capacitor Bank ระบบ 22 กิโลโวลต์ รวมถึงเป็นห้องควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบสื่อสาร



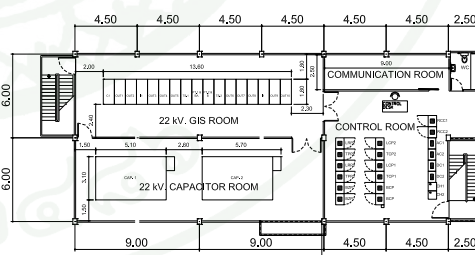
Ground Floor Plan



First Floor Plan



Second Floor Plan



Third Floor Plan

ภาพที่ 17 การจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า GIS Indoor Type B

2. โปรแกรมการออกแบบระบบกราวด์กริด (Ground Grid Tool, GGT)

2.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยให้ชื่อว่าโปรแกรม Ground Grid Tool (GGT)

ความสามารถของโปรแกรม GGT มีรายละเอียดดังนี้

1) สามารถออกแบบระบบกราวด์กริดในพื้นที่ที่มีลักษณะต่าง ๆ กันได้ 3 ประเภท คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า และพื้นที่รูปตัวแอล

2) เรียกดูค่าคงที่ของวัสดุนำไฟฟ้า ที่ใช้ในการคำนวณได้

3) คำนวณค่าแฟกเตอร์แบ่งกระแสได้

4) พิมพ์ผลลัพธ์เป็นข้อมูล (Hard Copy) ได้

2.2 ส่วนประกอบและวิธีการใช้งาน โปรแกรม GGT

การใช้งานโปรแกรม GGT เมื่อทำการเรียกโปรแกรมจะพบวินโดว์แรกเป็นวินโดว์เพื่อเข้าสู่การออกแบบระบบกราวด์กริดดังภาพที่ 18

ภาพที่ 18 วินโดว์แรกของการออกแบบระบบกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT

2.2.1 การคำนวณหาขนาดสายตัวนำ

1) จากภาพที่ 18 คลิก Calculation of Earthing Conductor เพื่อคำนวณหาขนาดสายตัวนำ หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลเพื่อคำนวณหาขนาดสายตัวนำกราวด์กริดแสดงดังภาพที่ 19

ภาพที่ 19 วินโดว์การคำนวณหาขนาดสายตัวนำกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT

- 2) ป้อนค่ากระแสผิดพลาด (The RMS Current)
- 3) ป้อนระยะเวลาการเกิดความผิดพลาด (The Duration of Current)
- 4) ป้อนอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Ambient Temperature)
- 5) ป้อนความถี่ของระบบ (Frequency)
- 6) ป้อนค่า X/R Ratio

7) เลือกชนิดของตัวนำที่ใช้ในการออกแบบ (Type of Earthing Conductor)
คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงแฟคเตอร์เพื่อใช้ในการคูณกระแสผิดพลาดเพื่อหากระแสผิดพลาดที่รวมกระแสตรง และขนาดของสายตัวนำที่ได้จากการคำนวณ

8) ทำการเลือกขนาดของสายตัวนำเพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบกราวด์กริดต่อไป (Select Size Conductor)

9) คลิก Exit to Main Menu เพื่อออกจากวินโดว์การออกคำนวณหาขนาดสายตัวนำ

2.2.2 การป้อนข้อมูลและคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

1) จากภาพที่ 18 คลิก Calculation Tolerable Touch & Step Voltage เพื่อคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ แสดงดังภาพที่ 20

ภาพที่ 20 วินโดว์การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ด้วยโปรแกรม GGT

- 2) ป้อนค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity)
- 3) ป้อนค่าระยะเวลาที่กระแสฟอลต์ไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มีได้ (Duration of Shock Current)
- 4) ป้อนค่าความหนาของวัสดุที่ปูบนผิวดิน (Thickness of Surface)

5) เลือกชนิดของวัสดุที่ใช้ปูบนผิวดิน

6) คลิก Calculate โปรแกรมจะแสดงแฟลคเตอร์ลดสำหรับวัสดุปูบนผิวดิน (C_s) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ ($E_{touch50}$, $E_{touch70}$, E_{step50} และ E_{step70}) ที่ได้จากการคำนวณ

7) คลิก Exit to Main Menu เพื่อออกจากวินโดว์การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

2.2.3 การคำนวณและการออกแบบระบบกราวด์กริด

1) จากภาพที่ 18 คลิก Calculation & Design Substation Grounding Grid เพื่อทำการออกแบบระบบกราวด์กริด และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลออกแบบระบบกราวด์กริด แสดงดังภาพที่ 21

ภาพที่ 21 วินโดว์การคำนวณและการออกแบบระบบกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT

2) ป้อนค่าความยาวมากที่สุดของตัวนำกราวด์กริดในทิศทาง x (L_x) และในทิศทาง y (L_y)

- 3) ป้อนค่าความลึกของตัวนำกราวด์กริด (Depth)
- 4) ป้อนค่าระยะห่างสูงสุดของตัวนำกราวด์กริดในทิศทาง x (D_x) และในทิศทาง y (D_y)
- 5) ป้อนค่าจำนวนตัวนำกราวด์กริดในทิศทาง x (N_x) และในทิศทาง y (N_y)
- 6) ป้อนค่าของจำนวนแท่งรากสายดิน (N_r) ความยาวของแท่งรากสายดิน (L_r)
- 7) ป้อนค่าของจำนวนสายดินเชิงอากาศของระบบสายส่ง (N_{OHGW}) ระยะห่างระหว่างเสาส่ง (D_{μ}) และค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาส่ง (R_T)
- 8) เลือกขนาดของสายดินเชิงอากาศของระบบสายส่ง
- 9) ป้อนค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสฟอลต์สมมาตรสูงสุด (I_p)
- 10) คลิก Calculate R_g โปรแกรมจะแสดงขนาดของสายตัวนำกราวด์กริดที่ได้เลือกไว้ (Conductor Size) ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ที่พิจารณา ค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด (R_g) และความยาวตัวนำทั้งหมดของระบบกราวด์กริด (Total Effective Length Conductor & Rods)
- 11) คลิก Calculate GPR โปรแกรมจะแสดงแฟกเตอร์เพื่อใช้ในการคูณกระแสกริดเฉลี่ยเพื่อหากระแสผิดพลาดที่รวมกระแสตรง (D_p) แฟกเตอร์แบ่งกระแส (S_p) ค่าของกระแสกริดสูงสุด (I_G) และศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (GPR)
- 12) คลิก Calculate E_m & E_s โปรแกรมจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ ($E_{touch50}$ $E_{touch70}$ E_{step50} และ E_{step70}) เพื่อใช้ในการพิจารณาเกณฑ์ความปลอดภัย
- 13) คลิก Exit to Main Menu เพื่อออกจากวินโดว์การคำนวณและการออกแบบระบบกราวด์กริด

2.2.4 การพิมพ์ผลของการคำนวณ

1) จากภาพที่ 18 ที่วินโดว์แรก ป้อนชื่อสถานีไฟฟ้า (Substation Name) อักษรย่อของสถานีไฟฟ้า (Substation Code) จังหวัด (Province) และเขต (Section)

2) คลิก Print Report เพื่อพิมพ์ผลลัพธ์เก็บเป็นข้อมูล แสดงดังภาพที่ 22

โครงการความร่วมมือทางวิชาการและพัฒนาผู้เชี่ยวชาญ ระหว่าง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  			
Result of Calculation for Grounding System Base on IEEE. 80-2000			
Date & Time	9/19/2012 17:19		
Sub Name :	Test		
Sub Code :	Test		
Province :	PATHUMTHANI		
Section :	กฟผ.1		
#	Sizing of Earthing Conductor for Earthing Grid		
Calculate Size	=	148.50	m.m. ²
Select Conductor	=	150	m.m. ²
#	Tolerable Touch & Step Voltage		
Tolerable Touch Voltage 50 kg.	=	1462.492	Volt.
Tolerable Step Voltage 50 kg	=	5501.969	Volt.
Tolerable Touch Voltage 70 kg.	=	1979.408	Volt.
Tolerable Step Voltage 70 kg	=	7446.631	Volt.
#	Grid Resistance		
Soil Resistivity	=	200.00	Ω .cm.
Total Effective Length of Grounding Conductor [Include Grid & Ground Rods]	=	687.00	m.
R_g	=	3.3470	Ω .
#	Division Factor & Maximum Grid Current		
I_r	=	40000	A.
D_r	=	1.03134	-
S_r	=	0.09315	-
I_G	=	3842.60	A.
GPR.	=	12861.13	Volt.
#	Mesh & Step Voltage		
E_m	=	1391.18	Volt.
E_s	=	1275.59	Volt.
#	Check Touch & Step Voltage		
$E_{touch_{50}} - E_m$	=	71.317	Volt.
$E_{step_{50}} - E_s$	=	4226.383	Volt.

ภาพที่ 22 รายงานผลการคำนวณการออกแบบระบบกราวด์กริดด้วยโปรแกรม GGT

3. การหาขนาดของสายตัวนำกราวด์กริด

สายตัวนำสำหรับทำกราวด์กริดมีหน้าที่นำกระแสฟอลต์ลงสู่ดิน ข้อกำหนดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดของสายตัวนำกราวด์กริด โดยใช้โปรแกรม GGT ที่ได้พัฒนาขึ้น และโปรแกรม CDEGS มีดังนี้

- สายตัวนำสำหรับทำกราวด์กริดใช้สายชนิด Copper, commercial hard-drawn
- ขนาดของกระแสฟอลต์ I : 40 กิโลแอมแปร์ (kA)
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ T_a : 45 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)
- ช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ t_c : 1 วินาที (s)
- ค่า X/R Ratio : 20

ผลการคำนวณหาของสายตัวนำสำหรับทำกราวด์กริดแสดงในภาพที่ 23 โดยเลือกใช้สายตัวนำกราวด์กริดขนาด 150 ตารางมิลลิเมตร

Ampacity Function Report

CDEGS Conductor Ampacity Calculation (per IEEE Standard 80)

Computation Results:

Minimum Conductor Size:
293.2524 MCM
148.5574 sq. mm
0.2707 in (radius)
6.8767 mm (radius)

ภาพที่ 23 ผลการคำนวณขนาดสายตัวนำกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT และ CDEGS

4. ผลของการเลือกวัสดุอุปกรณ์บนผิวดินเพื่อพิจารณาถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

การใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะที่สูงบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้า โดยเฉพาะบริเวณที่มีผู้ปฏิบัติงานอยู่เสมอ จะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ให้สูงขึ้นกว่าเดิม

ข้อกำหนดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ โดยใช้โปรแกรม GGT ที่ได้พัฒนาขึ้นมีดังนี้

- ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ : ไม่เกิน 200 โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)
- ค่าความต้านทานจำเพาะของยางมะตอย ρ_s : 10,000 โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)
- ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด ρ_g : 3,000 โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)
- ค่าความต้านทานจำเพาะของคอนกรีต ρ_c : 100 โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)
- ระยะเวลาที่กระแสฟอลต์ไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มีได้ t_s : 1 วินาที (s)
- ความหนาของวัสดุปูบนผิวดิน h_s : 0.15 เมตร (m)

ผลการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ตามข้อกำหนดของข้อมูลแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

ρ (โอห์ม.เมตร)	แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (โวลต์)			แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (โวลต์)		
	ยางมะตอย	หินกรวด	คอนกรีต	ยางมะตอย	หินกรวด	คอนกรีต
10	1454.86	517.94	129.79	5471.45	1723.76	171.14
20	1455.26	518.34	130.19	5473.06	1725.37	172.75
30	1455.67	518.74	130.59	5474.66	1726.97	174.36
40	1456.07	519.14	130.99	5476.27	1728.58	175.96
50	1456.47	519.55	131.39	5477.88	1730.18	177.57
60	1456.87	519.95	131.79	5479.48	1731.79	179.18
70	1457.27	520.35	132.20	5481.09	1733.40	180.78
80	1457.67	520.75	132.60	5482.70	1735.00	182.39
90	1458.08	521.15	133.00	5484.30	1736.61	183.99
100	1458.48	521.55	133.40	5485.91	1738.22	185.60
110	1458.88	521.96	133.80	5487.51	1739.82	187.21
120	1459.28	522.36	134.20	5489.12	1741.43	188.81
130	1459.68	522.76	134.60	5490.73	1743.03	190.42

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ρ (โอห์ม.เมตร)	แรงดันไฟฟ้าสัมผัส			แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว		
	(โวลต์)			(โวลต์)		
	ยางมะตอย	หินกรวด	คอนกรีต	ยางมะตอย	หินกรวด	คอนกรีต
140	1460.08	523.16	135.01	5492.33	1744.64	192.02
150	1460.48	523.56	135.41	5493.94	1746.25	193.63
160	1460.89	523.96	135.81	5495.54	1747.85	195.24
170	1461.29	524.36	136.21	5497.15	1749.46	196.84
180	1461.69	524.77	136.61	5498.76	1751.06	198.45
190	1462.09	525.17	137.01	5500.36	1752.67	200.06
200	1462.49	525.57	137.42	5501.97	1754.28	201.66

5. ผลการทดลองออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าระบบ 115-22 เควี ชนิด Gas-Insulated Switchgear Indoor Substation Type A และ Type B โดยออกแบบให้มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้า

ข้อกำหนดของข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ โดยใช้โปรแกรม GGT และโปรแกรม CDEGS มีดังนี้

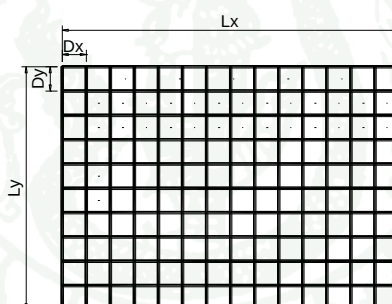
- ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ρ : ไม่เกิน 200 โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)
- วัสดุบุบนผิวดินเลือกใช้อย่างมะตอย ρ_s : 10,000 โอห์ม.เมตร ($\Omega \cdot m$)
- ช่วงเวลาที่เกิดฟลัด t_f : 1 วินาที (s)
- ค่ากระแสฟลัดสูงสุด I_f : 40 กิโลแอมแปร์ (kA)
- ความหนาของวัสดุบุบนผิวดิน h_s : 0.15 เมตร (m)
- ความลึกของตัวนำกราวด์กริด h : 1.0 เมตร (m)
- สายดินจึงอากาศขนาด 35 ตารางมิลลิเมตร : 2 วงจร
- ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาส่ง R_i : 10 โอห์ม (Ω)

- ระยะห่างระหว่างเสาตั้ง D_r : 80 เมตร (m)
- ความยาวแท่งกราวด์รูด L_r : 3 เมตร (m)

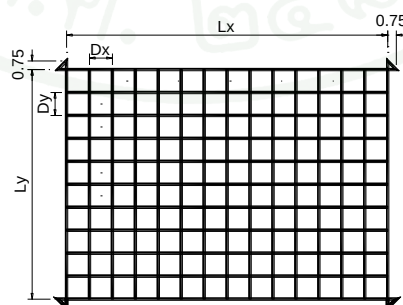
5.1 ผลลัพธ์จากการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type A

ออกแบบกราวด์กริด โดยกราวด์กริดเป็นตัวนำทองแดงขนาด 150 ตารางมิลลิเมตร จัดวางอยู่ในรูปแบบของตาราง วางเรียงโดยทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำ (D_x และ D_y) และแท่งกราวด์รูด ดังแสดงในภาพที่ 24 และภาพที่ 25 โดยรูปแบบของกราวด์กริดที่จะทำการออกแบบมี 3 รูปแบบคือ

- | | | |
|----------------------|------------------|------------------|
| รูปแบบที่ 1 กำหนดให้ | $D_x = 4$ เมตร | $D_y = 5$ เมตร |
| รูปแบบที่ 2 กำหนดให้ | $D_x = 4$ เมตร | $D_y = 4$ เมตร |
| รูปแบบที่ 3 กำหนดให้ | $D_x = 2.5$ เมตร | $D_y = 2.5$ เมตร |



ภาพที่ 24 การจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type A



ภาพที่ 25 การจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A

ผลการออกแบบกราวด์กริดตามข้อกำหนดของข้อมูลจะได้ผลการออกแบบที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยโดยใช้โปรแกรม GGT แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type A

ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)	E_m (V)	E_s (V)
5	4	5	300	-	0.0931	0.4459	1,711.71	429.66	174.77
10	4	5	300	-	0.1861	0.4023	3,088.90	775.34	315.38
15	4	5	300	-	0.2792	0.3665	4,220.90	1,059.49	430.96
20	4	5	300	-	0.3723	0.3365	5,167.84	1,297.18	527.65
25	4	4	328	36	0.4507	0.3148	5,853.27	1,051.30	582.19
30	4	4	328	36	0.5408	0.2931	6,539.57	1,174.57	650.45
35	4	4	328	36	0.6309	0.2742	7,137.32	1,281.93	709.91
40	4	4	328	36	0.7211	0.2576	7,662.62	1,376.28	762.15
45	2.5	2.5	487.5	36	0.7735	0.2488	7,940.08	1,195.52	950.64
50	2.5	2.5	487.5	36	0.8595	0.2357	8,355.90	1,258.13	1,000.43
55	2.5	2.5	487.5	36	0.9454	0.2238	8,729.97	1,314.45	1,045.21
60	2.5	2.5	487.5	36	1.0314	0.2131	9,068.26	1,365.39	1,085.72
65	2.5	2.5	487.5	36	1.1173	0.2034	9,375.69	1,411.68	1,122.52
70	2.5	2.5	487.5	48	1.2003	0.1948	9,646.91	1,332.42	1,128.82
75	2.5	2.5	487.5	48	1.2860	0.1867	9,904.19	1,367.95	1,158.93
80	2.5	2.5	487.5	48	1.3717	0.1792	10,140.83	1,400.64	1,186.62
85	2.5	2.5	487.5	48	1.4575	0.1723	10,359.23	1,430.80	1,212.17
90	2.5	2.5	487.5	60	1.5395	0.1662	10,553.04	1,327.03	1,207.50
95	2.5	2.5	487.5	60	1.6251	0.1602	10,740.90	1,350.66	1,229.00
100	2.5	2.5	487.5	60	1.7106	0.1547	10,915.79	1,372.65	1,249.01
105	2.5	2.5	487.5	60	1.7961	0.1495	11,079.01	1,393.17	1,267.68
110	2.5	2.5	487.5	60	1.8816	0.1447	11,231.68	1,412.37	1,285.15
115	2.5	2.5	487.5	60	1.9672	0.1402	11,374.80	1,430.37	1,301.53

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)	E_m (V)	E_s (V)
120	2.5	2.5	487.5	60	2.0527	0.1359	11,509.23	1,447.27	1,316.91
125	2.5	2.5	487.5	72	2.1333	0.1321	11,628.70	1,324.84	1,301.76
130	2.5	2.5	487.5	72	2.2187	0.1284	11,748.11	1,338.44	1,315.13
135	2.5	2.5	487.5	72	2.3040	0.1248	11,860.88	1,351.29	1,327.75
140	2.5	2.5	487.5	72	2.3893	0.1214	11,967.55	1,363.44	1,339.70
145	2.5	2.5	487.5	72	2.4747	0.1182	12,068.61	1,374.95	1,351.01
150	2.5	2.5	487.5	72	2.5600	0.1152	12,164.48	1,385.88	1,361.74
155	2.5	2.5	487.5	72	2.6453	0.1123	12,255.55	1,396.25	1,371.94
160	2.5	2.5	487.5	72	2.7307	0.1096	12,342.18	1,406.12	1,381.63
165	2.5	2.5	487.5	72	2.8160	0.1070	12,424.68	1,415.52	1,390.87
170	2.5	2.5	487.5	72	2.9013	0.1045	12,503.35	1,424.48	1,399.67
175	2.5	2.5	487.5	72	2.9867	0.1021	12,578.43	1,433.04	1,408.08
180	2.5	2.5	487.5	72	3.0720	0.0998	12,650.18	1,441.21	1,416.11
185	2.5	2.5	487.5	84	3.1504	0.0978	12,713.33	1,308.64	1,393.03
190	2.5	2.5	487.5	84	3.2355	0.0957	12,779.13	1,315.41	1,400.24
195	2.5	2.5	487.5	84	3.3207	0.0937	12,842.18	1,321.90	1,407.15
200	2.5	2.5	487.5	84	3.4058	0.0918	12,902.66	1,328.13	1,413.77

ผลการออกแบบกราวด์กริดตามข้อกำหนดของข้อมูลจะได้ผลการออกแบบที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยโดยใช้โปรแกรม CDEGS แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A

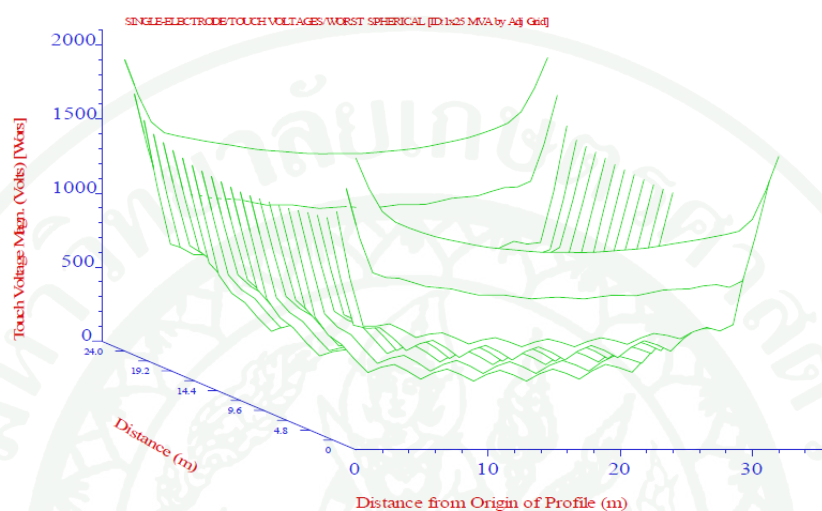
ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)
5	4	5	310.24	12	0.0881	0.4484	1,580.10
10	4	5	310.24	12	0.1761	0.4065	2,864.90
15	4	5	310.24	12	0.2642	0.3718	3,930.50
20	4	5	310.24	12	0.3523	0.3425	4,827.70
25	4	4	338.24	48	0.4199	0.3230	5,425.30
30	4	4	338.24	48	0.5039	0.3016	6,079.00
35	4	4	338.24	48	0.5878	0.2829	6,652.50
40	4	4	338.24	48	0.6718	0.2664	7,159.40
45	2.5	2.5	497.74	36	0.7524	0.2523	7,593.70
50	2.5	2.5	497.74	36	0.8360	0.2391	7,996.00
55	2.5	2.5	497.74	36	0.9196	0.2273	8,361.60
60	2.5	2.5	497.74	36	1.0033	0.2165	8,688.30
65	2.5	2.5	497.74	36	1.0869	0.2067	8,986.30
70	2.5	2.5	497.74	48	1.1600	0.1989	9,229.30
75	2.5	2.5	497.74	48	1.2429	0.1907	9,480.80
80	2.5	2.5	497.74	48	1.3258	0.1831	9,709.90
85	2.5	2.5	497.74	48	1.4086	0.1762	9,928.00
90	2.5	2.5	497.74	60	1.4774	0.1708	10,093.00
95	2.5	2.5	497.74	60	1.5594	0.1647	10,274.00
100	2.5	2.5	497.74	60	1.6415	0.1591	10,447.00
105	2.5	2.5	497.74	60	1.7236	0.1539	10,610.00
110	2.5	2.5	497.74	60	1.8057	0.1490	10,762.00
115	2.5	2.5	497.74	60	1.8877	0.1444	10,904.00

ตารางที่ 7 (ต่อ)

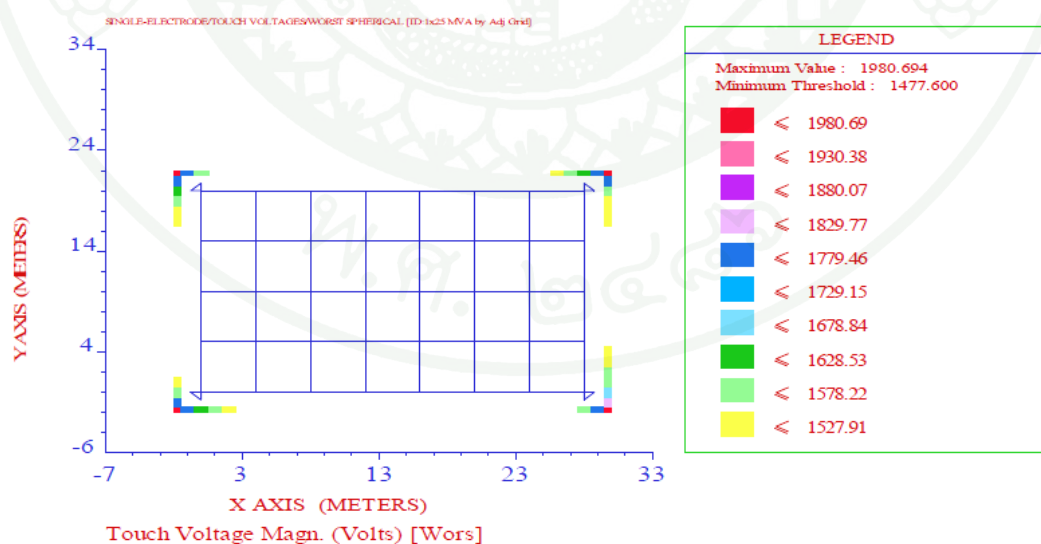
ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)
120	2.5	2.5	497.74	60	1.9698	0.1400	11,031.00
125	2.5	2.5	497.74	72	2.0349	0.1368	11,135.00
130	2.5	2.5	497.74	72	2.1163	0.1329	11,250.00
135	2.5	2.5	497.74	72	2.1977	0.1293	11,366.00
140	2.5	2.5	497.74	72	2.2791	0.1258	11,468.00
145	2.5	2.5	497.74	72	2.3605	0.1225	11,566.00
150	2.5	2.5	497.74	72	2.4418	0.1194	11,662.00
155	2.5	2.5	497.74	72	2.5232	0.1165	11,758.00
160	2.5	2.5	497.74	72	2.6046	0.1137	11,846.00
165	2.5	2.5	497.74	72	2.6860	0.1110	11,926.00
170	2.5	2.5	497.74	72	2.7674	0.1084	12,000.00
175	2.5	2.5	497.74	72	2.8488	0.1060	12,079.00
180	2.5	2.5	497.74	72	2.9302	0.1036	12,143.00
185	2.5	2.5	497.74	84	2.9889	0.0999	12,195.00
190	2.5	2.5	497.74	84	3.0697	0.1020	12,266.00
195	2.5	2.5	497.74	84	3.1505	0.0978	12,325.00
200	2.5	2.5	497.74	84	3.2312	0.0958	12,382.00

หมายเหตุ รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำ (D_x และ D_y) และแท่งกราวด์รูด แสดงในภาคผนวก ก

ภาพที่ 26 แสดงศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติ และภาพที่ 27 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type A รูปแบบที่ 1 ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 20 โอห์ม.เมตร โดยใช้โปรแกรม CDEGS

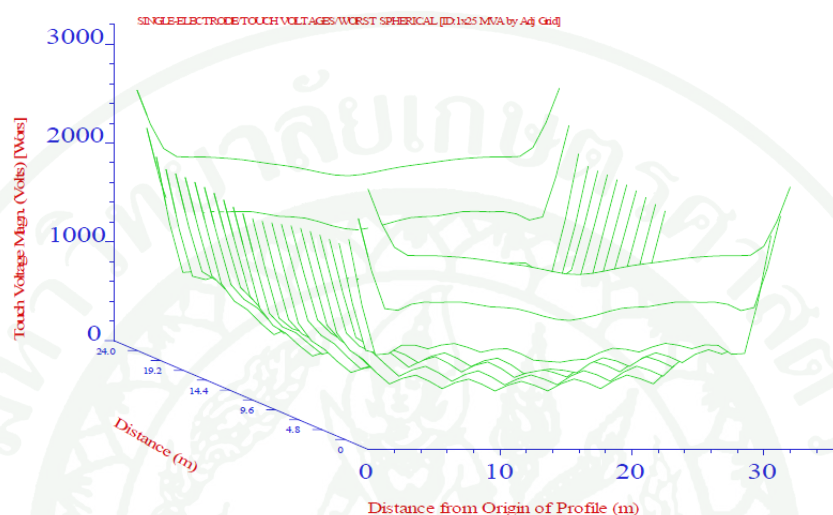


ภาพที่ 26 ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 20 โอห์ม.เมตร

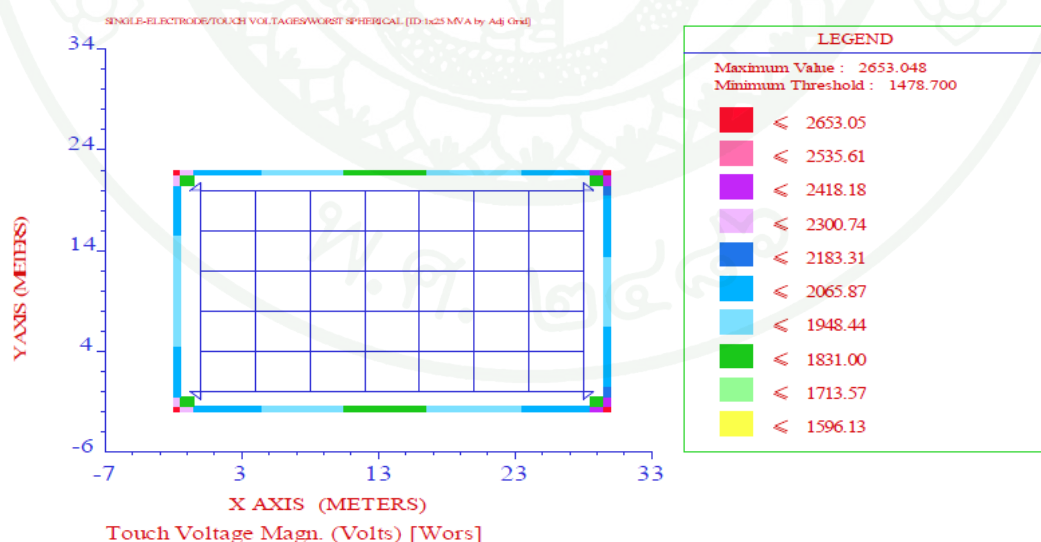


ภาพที่ 27 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 20 โอห์ม.เมตร

ภาพที่ 28 แสดงศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติ และภาพที่ 29 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type A รูปแบบที่ 2 ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 40 โอห์ม.เมตร โดยใช้โปรแกรม CDEGS

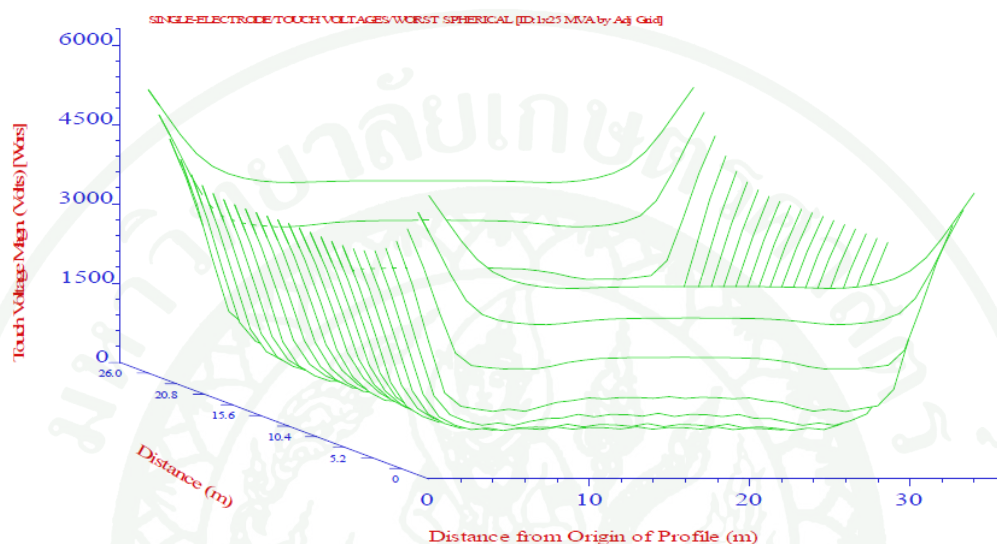


ภาพที่ 28 ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 40 โอห์ม.เมตร

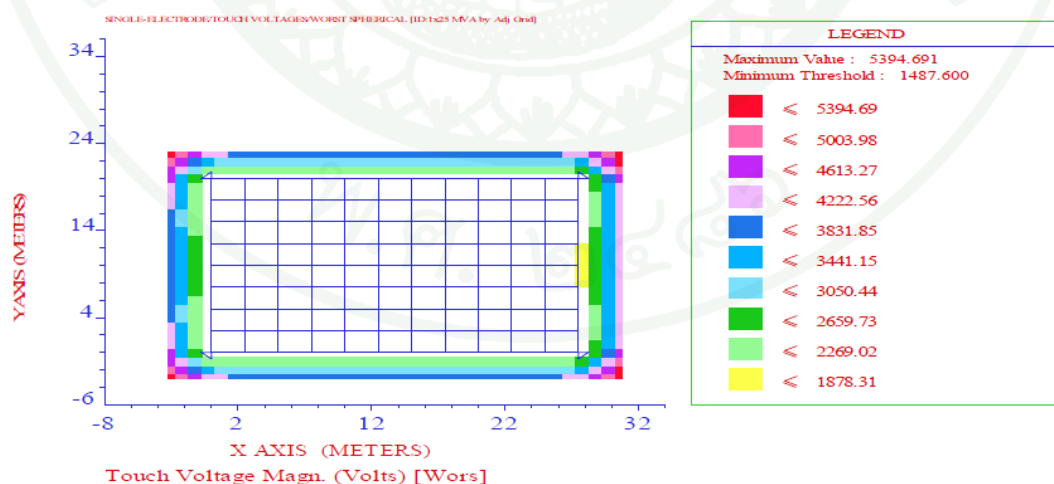


ภาพที่ 29 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 40 โอห์ม.เมตร

ภาพที่ 30 แสดงศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติ และภาพที่ 31 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type A รูปแบบที่ 3 ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 200 โอห์ม.เมตร โดยใช้โปรแกรม CDEGS



ภาพที่ 30 ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร



ภาพที่ 31 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type A ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร

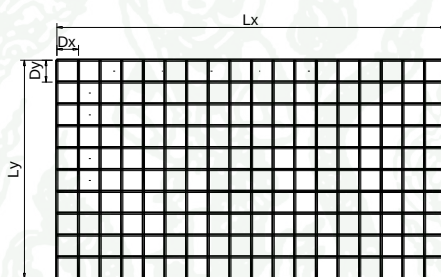
5.2 ผลลัพธ์จากการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type B

ออกแบบกราวด์กริด โดยกราวด์กริดเป็นตัวนำทองแดงขนาด 150 ตารางมิลลิเมตร จัดวางอยู่ในรูปแบบของตาราง วางเรียงต่อเนื่องกัน โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำ (D_x และ D_y) และแท่งกราวด์รูด ดังแสดงในภาพที่ 32 และภาพที่ 33 โดยรูปแบบของกราวด์กริดที่ทำการออกแบบมี 3 รูปแบบคือ

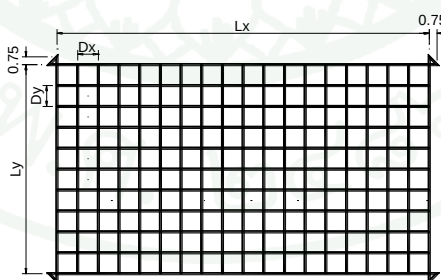
รูปแบบที่ 1 กำหนดให้ $D_x = 4.0$ เมตร $D_y = 5.0$ เมตร

รูปแบบที่ 2 กำหนดให้ $D_x = 3.0$ เมตร $D_y = 2.5$ เมตร

รูปแบบที่ 3 กำหนดให้ $D_x = 2.5$ เมตร $D_y = 2.5$ เมตร



ภาพที่ 32 รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type B



ภาพที่ 33 รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A

ผลการออกแบบกราวด์กริดตามข้อกำหนดของข้อมูลจะได้ผลการออกแบบที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยโดยใช้โปรแกรม GGT แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม GGT ของสถานีไฟฟ้า Type B

ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)	E_m (V)	E_s (V)
5	4	5	380	-	0.0896	0.4477	1,653.93	354.72	146.10
10	4	5	380	-	0.1791	0.4053	2,994.50	642.23	264.51
15	4	5	380	-	0.2687	0.3702	4,103.07	879.99	362.44
20	4	5	380	-	0.3582	0.3407	5,035.07	1,079.88	444.76
25	4	5	380	-	0.4478	0.3156	5,829.57	1,250.27	514.94
30	4	5	380	-	0.5373	0.2939	6,514.90	1,397.26	575.48
35	3	2.5	584	12	0.5935	0.2818	6,898.72	1,084.04	684.07
40	3	2.5	584	12	0.6783	0.2652	7,421.49	1,166.18	735.91
45	3	2.5	584	12	0.7631	0.2505	7,886.30	1,239.22	782.00
50	3	2.5	584	12	0.8479	0.2374	8,302.28	1,304.59	823.25
55	3	2.5	584	12	0.9326	0.2255	8,676.74	1,363.43	860.38
60	3	2.5	584	12	1.0174	0.2148	9,015.60	1,416.68	893.98
65	2.5	2.5	615	36	1.0930	0.2061	9,291.59	1,244.63	974.20
70	2.5	2.5	615	36	1.1771	0.1972	9,573.41	1,282.38	1,003.75
75	2.5	2.5	615	36	1.2612	0.1890	9,831.86	1,317.00	1,030.85
80	2.5	2.5	615	36	1.3452	0.1815	10,069.73	1,348.86	1,055.79
85	2.5	2.5	615	36	1.4293	0.1745	10,289.37	1,378.28	1,078.82
90	2.5	2.5	615	36	1.5134	0.1681	10,492.82	1,405.53	1,100.15
95	2.5	2.5	615	36	1.5975	0.1621	10,681.79	1,430.85	1,119.96
100	2.5	2.5	615	36	1.6815	0.1565	10,857.78	1,454.42	1,138.41
105	2.5	2.5	615	48	1.7627	0.1515	11,016.57	1,382.52	1,133.47
110	2.5	2.5	615	48	1.8466	0.1466	11,170.41	1,401.82	1,149.30
115	2.5	2.5	615	48	1.9306	0.1421	11,314.68	1,419.93	1,164.14

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)	E_m (V)	E_s (V)
120	2.5	2.5	615	48	2.0145	0.1378	11,450.24	1,436.94	1,178.09
125	2.5	2.5	615	48	2.0985	0.1337	11,577.85	1,452.95	1,191.22
130	2.5	2.5	615	60	2.1789	0.1301	11,693.34	1,365.76	1,181.03
135	2.5	2.5	615	60	2.2627	0.1265	11,807.11	1,379.05	1,192.52
140	2.5	2.5	615	60	2.3465	0.1231	11,914.76	1,391.63	1,203.39
145	2.5	2.5	615	60	2.4303	0.1199	12,016.77	1,403.54	1,213.70
150	2.5	2.5	615	60	2.5141	0.1168	12,113.56	1,414.85	1,223.47
155	2.5	2.5	615	60	2.5979	0.1139	12,205.53	1,425.59	1,232.76
160	2.5	2.5	615	60	2.6817	0.1111	12,293.03	1,435.81	1,241.60
165	2.5	2.5	615	60	2.7655	0.1085	12,376.38	1,445.54	1,250.02
170	2.5	2.5	615	60	2.8493	0.1060	12,455.86	1,454.83	1,258.04
175	2.5	2.5	615	72	2.9286	0.1037	12,527.73	1,355.11	1,242.52
180	2.5	2.5	615	72	3.0123	0.1014	12,600.32	1,362.96	1,249.72
185	2.5	2.5	615	72	3.0960	0.0992	12,669.76	1,370.48	1,256.61
190	2.5	2.5	615	72	3.1796	0.0971	12,736.26	1,377.67	1,263.20
195	2.5	2.5	615	72	3.2633	0.0951	12,799.99	1,384.56	1,269.52
200	2.5	2.5	615	72	3.3470	0.0931	12,861.13	1,391.18	1,275.59

ผลการออกแบบกราวด์กริดตามข้อกำหนดของข้อมูลจะได้ผลการออกแบบที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัยโดยใช้โปรแกรม CDEGS แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการออกแบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type B

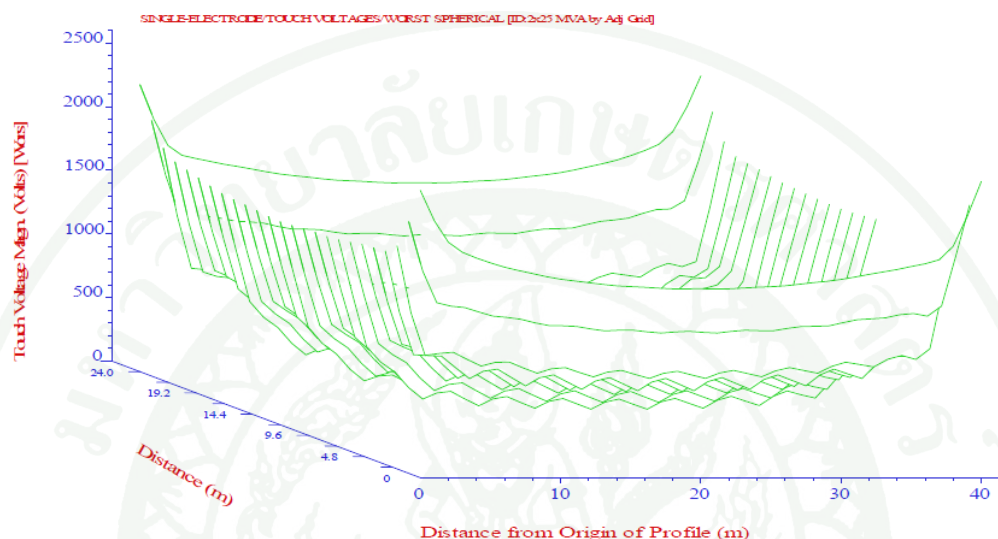
ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)
5	4	5	390.24	12	0.0773	0.4542	1,405.40
10	4	5	390.24	12	0.1547	0.4160	2,574.40
15	4	5	390.24	12	0.2320	0.3838	3,562.70
20	4	5	390.24	12	0.3094	0.3562	4,408.60
25	4	5	390.24	12	0.3867	0.3323	5,141.00
30	4	5	390.24	12	0.4641	0.3114	5,781.20
35	3	2.5	594.24	12	0.5246	0.2968	6,229.10
40	3	2.5	594.24	12	0.5996	0.2805	6,727.90
45	3	2.5	594.24	12	0.6746	0.2659	7,175.00
50	3	2.5	594.24	12	0.7499	0.2527	7,576.50
55	3	2.5	594.24	12	0.8245	0.2408	7,941.70
60	3	2.5	594.24	12	0.8994	0.2300	8,275.10
65	2.5	2.5	625.24	36	0.9655	0.2212	8,543.10
70	2.5	2.5	625.24	36	1.0398	0.2121	8,821.80
75	2.5	2.5	625.24	36	1.1141	0.2038	9,082.00
80	2.5	2.5	625.24	36	1.1884	0.1960	9,316.70
85	2.5	2.5	625.24	36	1.2626	0.1888	9,535.40
90	2.5	2.5	625.24	36	1.3369	0.1822	9,743.40
95	2.5	2.5	625.24	36	1.4112	0.1760	9,934.70
100	2.5	2.5	625.24	36	1.4854	0.1702	10,113.00
105	2.5	2.5	625.24	48	1.5484	0.1655	10,250.00
110	2.5	2.5	625.24	48	1.6221	0.1604	10,408.00
115	2.5	2.5	625.24	48	1.6959	0.1556	10,555.00

ตารางที่ 9 (ต่อ)

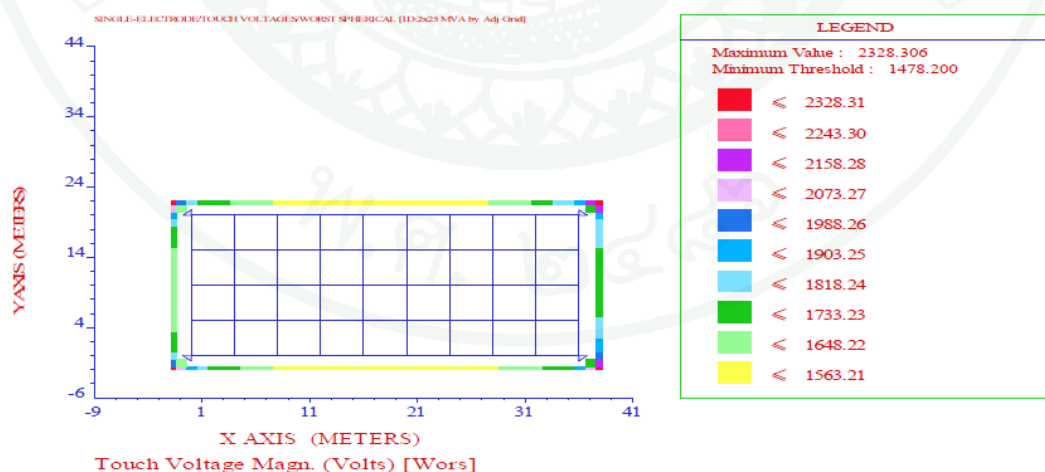
ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	L_c (m)	L_R (m)	R_g (Ω)	S_f	GPR (V)
120	2.5	2.5	625.24	48	1.7696	0.1511	10,695.00
125	2.5	2.5	625.24	48	1.8433	0.1468	10,824.00
130	2.5	2.5	625.24	60	1.9016	0.1436	10,923.00
135	2.5	2.5	625.24	60	1.9747	0.1398	11,043.00
140	2.5	2.5	625.24	60	2.0478	0.1361	11,148.00
145	2.5	2.5	625.24	60	2.1210	0.1327	11,258.00
150	2.5	2.5	625.24	60	2.1941	0.1294	11,357.00
155	2.5	2.5	625.24	60	2.2673	0.1263	11,454.00
160	2.5	2.5	625.24	60	2.3404	0.1233	11,543.00
165	2.5	2.5	625.24	60	2.4135	0.1205	11,633.00
170	2.5	2.5	625.24	60	2.4867	0.1178	11,717.00
175	2.5	2.5	625.24	72	2.5424	0.1158	11,776.00
180	2.5	2.5	625.24	72	2.6150	0.1133	11,851.00
185	2.5	2.5	625.24	72	2.6876	0.1109	11,922.00
190	2.5	2.5	625.24	72	2.7603	0.1086	11,991.00
195	2.5	2.5	625.24	72	2.8329	0.1064	12,057.00
200	2.5	2.5	625.24	72	2.9056	0.1043	12,122.00

หมายเหตุ รูปแบบการจัดวางกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวนำ (D_x และ D_y) และแท่งกราวด์รูด แสดงในภาคผนวก ข

ภาพที่ 34 แสดงศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติ และภาพที่ 35 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type B รูปแบบที่ 1 ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 30 โอห์ม.เมตร โดยใช้โปรแกรม CDEGS

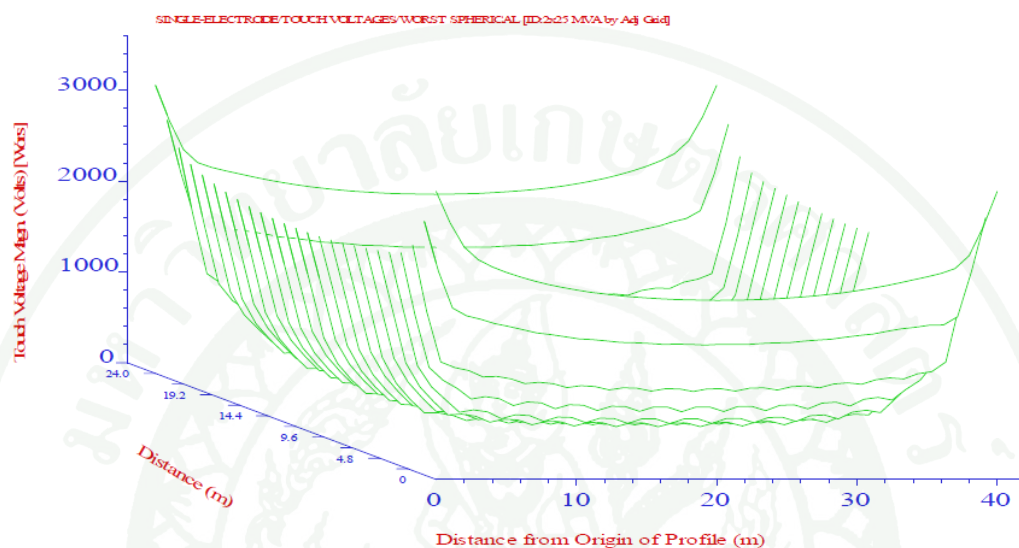


ภาพที่ 34 ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 30 โอห์ม.เมตร

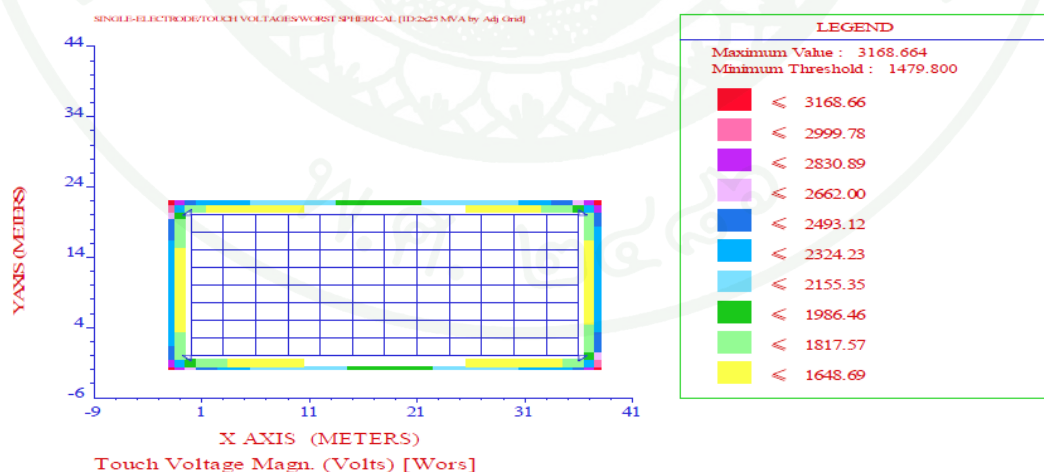


ภาพที่ 35 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 1 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 30 โอห์ม.เมตร

ภาพที่ 36 แสดงศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติ และภาพที่ 37 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type B รูปแบบที่ 2 ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 60 โอห์ม.เมตร โดยใช้โปรแกรม CDEGS

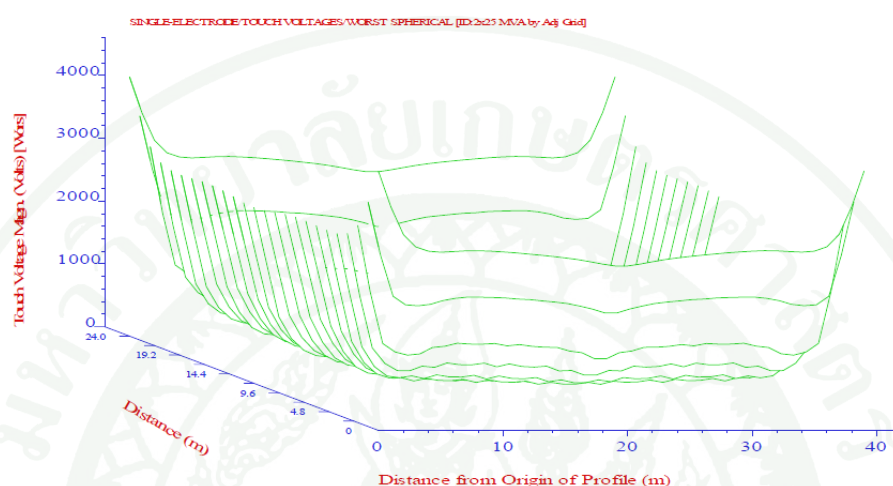


ภาพที่ 36 ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 60 โอห์ม.เมตร

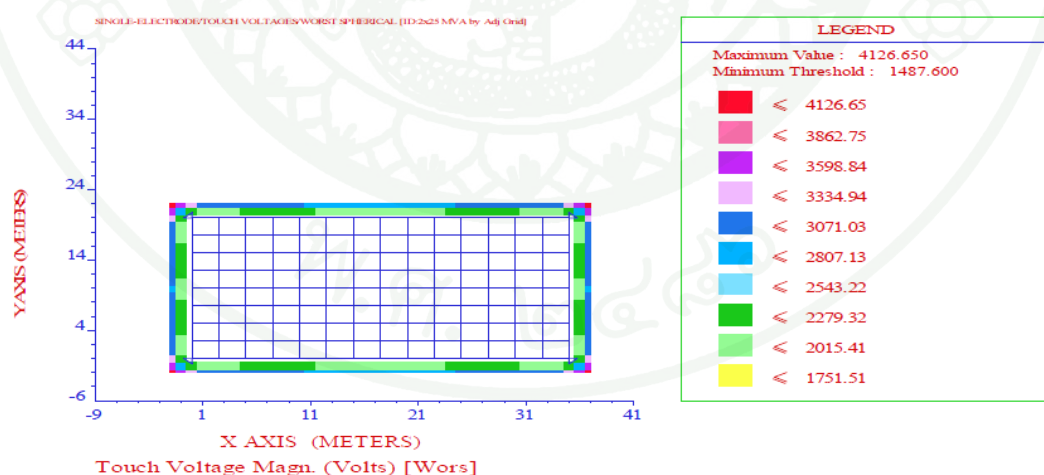


ภาพที่ 37 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 2 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 60 โอห์ม.เมตร

ภาพที่ 38 แสดงศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติ และภาพที่ 39 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า Type B รูปแบบที่ 3 ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 200 โอห์ม.เมตร โดยใช้โปรแกรม CDEGS



ภาพที่ 38 ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มในรูปสามมิติของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร



ภาพที่ 39 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสของการออกแบบกราวด์กริดรูปแบบที่ 3 ของสถานีไฟฟ้า Type B ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 200 โอห์ม.เมตร

วิจารณ์

1. ขนาดของสายตัวนำกราวด์กริดและผลของวัสดุปูบนผิวดิน

ขนาดของสายตัวนำกราวด์กริดจะขึ้นอยู่กับพิจารณาค่าของกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านช่วงเวลาในการตัดกระแส คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำกราวด์กริด อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิที่ยอมรับได้

ผลของการคำนวณหาขนาดสายตัวนำด้วยโปรแกรม Ground Grid และโปรแกรม CDEGS ตามข้อกำหนดของข้อมูล ผลที่ได้จากการคำนวณจะใช้สายตัวนำกราวด์กริดขนาด 150 ตารางมิลลิเมตร

การเลือกใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงๆ ปูบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้า จะเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ให้สูงขึ้น

กรณีพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ จากการศึกษาพบว่าการใช้ยางมะตอยเป็นวัสดุปูบนผิวดินจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้สูงกว่าการใช้หินกรวดเป็นวัสดุปูบนผิวดินประมาณ 3 เท่า และสูงกว่าการใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปูบนผิวดินประมาณ 10 เท่า

กรณีพิจารณาค่าแรงดันช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ จากการศึกษาพบว่าการใช้ยางมะตอยเป็นวัสดุปูบนผิวดินจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้สูงกว่าการใช้หินกรวดเป็นวัสดุปูบนผิวดินประมาณ 3 เท่า และสูงกว่าการใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปูบนผิวดินประมาณ 30 เท่า

2. ผลของแฟลคเตอร์แบ่งกระแส

ผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินซึ่งอากาศของระบบสายส่งที่เชื่อมต่อกับกราวด์กริด จะช่วยลดขนาดกระแสลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (GPR) มีค่าลดลง และส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_g) ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

3. ผลการออกแบบกราวด์กริด

ผลจากการออกแบบกราวด์กริดจากโปรแกรม GGT และโปรแกรม CDEGS โดยพิจารณาถึงเกณฑ์ความปลอดภัยพบว่าจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CDEGS จะมีปริมาณของตัวนำกราวด์กริดมากกว่าตัวนำที่คำนวณได้จากโปรแกรม GGT ดังแสดงในตารางที่ 10 สำหรับสถานีไฟฟ้า Type A และตารางที่ 11 สำหรับสถานีไฟฟ้า Type B

ความยาวของตัวนำที่เพิ่มขึ้นจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CDEGS นั้นจะอยู่บริเวณขอบและมุมของกราวด์กริดทั้ง 4 ด้าน เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสของตัวนำในบริเวณดังกล่าวจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวนำที่อยู่บริเวณส่วนกลางของกราวด์กริด ผลของการเพิ่มตัวนำกราวด์กริดจะช่วยลดแรงดันไฟฟ้าสัมผัส แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และค่าความต้านทานระบบกราวด์กริด ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย

ตารางที่ 10 ความยาวของสายตัวนำกราวด์กริด จากการคำนวณโดยโปรแกรม GGT และโปรแกรม CDEGS สำหรับสถานีไฟฟ้า Type A

ρ ($\Omega \cdot m$)	โปรแกรม GGT	โปรแกรม CDEGS	
	ความยาวตัวนำ (m)	ความยาวตัวนำ (m)	เปอร์เซ็นต์ความยาวที่เพิ่มขึ้น (%)
ไม่เกิน 20	300.00	322.24	7.41
21-40	364.00	386.24	6.11
41-65	523.50	533.74	1.96
66-85	535.50	545.74	1.91
86-120	547.50	557.74	1.87
121-180	559.50	569.74	1.83
181-200	571.50	581.74	1.79

ตารางที่ 11 ความยาวของสายตัวนำกราวด์กริด จากการคำนวณโดยโปรแกรม GGT
และโปรแกรม CDEGS สำหรับสถานีไฟฟ้า Type B

ρ ($\Omega \cdot m$)	โปรแกรม GGT	โปรแกรม CDEGS	
	ความยาวตัวนำ (m)	ความยาวตัวนำ (m)	เปอร์เซ็นต์ความยาวที่เพิ่มขึ้น (%)
ไม่เกิน 30	380	402.24	5.85
31-65	596	606.24	1.72
66-105	651	661.24	1.57
106-140	663	673.24	1.54
141-170	675	685.24	1.52
171-200	687	697.24	1.49

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ถึงการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าแบบ 115-22 เควี ชนิด GAS-Insulated Switchgear Indoor Substation ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รูปแบบของระบบต่อลงดินจะพิจารณากราวด์กริดที่อยู่ใต้พื้นอาคารเท่านั้น ส่วนภายในอาคารเนื่องจากพื้นและกำแพงเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กต่อเชื่อมเข้ากับกราวด์กริด เปรียบเสมือนอิเล็กโทรดควบคุมแรงดันไฟฟ้าบนพื้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

โปรแกรม Ground Grid Tool เป็นโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาบนโปรแกรม Excel-VBA เพื่อใช้ในการออกแบบระบบกราวด์กริด พบว่าสามารถออกแบบได้ตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 ค่าที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม CDEGS และสามารถแสดงผลลัพธ์และค่าที่ใช้ในการออกแบบพิมพ์เป็นข้อมูลรายงานได้ อีกทั้งโปรแกรมยังมีลักษณะการใช้งานง่ายและเหมาะสมกับผู้ใช้งาน

การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า โดยการใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะที่สูงปูบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้ให้สูงขึ้น และผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินจึงอากาศของระบบสายส่งจะช่วยลดค่าศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม

ผลของการศึกษาการออกแบบตามข้อกำหนด โดยพิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วงไม่เกิน 200 โอห์ม.เมตร ค่ากระแสฟอลต์สูงสุดเท่ากับ 40 กิโลแอมแปร์ ช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์เท่ากับ 1.0 วินาที และใช้ยางมะตอยเป็นวัสดุปูบนผิวดิน กราวด์กริดที่ออกแบบจะมีความปลอดภัยเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้โดยพิจารณาผลของการคำนวณโดยใช้โปรแกรม CDEGS เป็นเกณฑ์ สามารถสรุปรูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริดได้ดังนี้

1. สถานีไฟฟ้าไฟฟ้า GIS-Indoor Type A มีขนาดของพื้นที่ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า 30 x 22 เมตร มีรูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด แสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้า Type A

ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	ความยาวตัวนำ (m)	กราวด์ร็อด (No)
ไม่เกิน 20	4	5	310.24	4
21-40	4	4	338.24	16
41-65	2.5	2.5	497.74	12
66-85	2.5	2.5	497.74	16
86-120	2.5	2.5	497.74	20
121-180	2.5	2.5	497.74	24
181-200	2.5	2.5	497.74	28

2. สถานีไฟฟ้าไฟฟ้า GIS-Indoor Type B มีขนาดของพื้นที่ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า 38 x 22 เมตร มีรูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด แสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้า Type B

ρ ($\Omega \cdot m$)	D_x (m)	D_y (m)	ความยาวตัวนำ (m)	กราวด์ร็อด (No)
ไม่เกิน 30	4	5	390.24	4
31-60	3	2.5	594.24	4
61-100	2.5	2.5	625.24	12
101-125	2.5	2.5	625.24	16
126-170	2.5	2.5	625.24	20
171-200	2.5	2.5	625.24	24

ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบเมนกราวด์กริด จะยึดตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 ขั้นตอนในการออกแบบเริ่มจากการคำนวณหาขนาดของสายตัวนำ (A_{mm}) แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ($E_{touch50}$) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_{step50}) ที่มนุษย์ทนได้ ออกแบบและคำนวณหาค่าความต้านทานระบบกราวด์กริด (R_g) ค่ากระแสกริดสูงสุด (I_g) ทำการตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (GPR) ถ้าศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ถือว่าการออกแบบดังกล่าวมีความปลอดภัย ถ้าไม่จะต้องทำการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_g) ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า ถ้าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ ถือว่าการออกแบบกราวด์กริดที่ได้ทำมานั้นมีความปลอดภัยเพียงพอต่อบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้า

2. โปรแกรม Ground Grid Tool ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดคือการวิเคราะห์ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าจะทำการคำนวณค่าโดยรวมทั้งหมดของพื้นที่ในการวางตัวนำกราวด์กริด ไม่สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_g) ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าได้อย่างละเอียดในทุกช่วงของตารางกริด โดยเฉพาะที่บริเวณขอบและมุมของกราวด์กริดทั้ง 4 ด้าน ที่มีความหนาแน่นของกระแสสูง จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรม CDEGS ช่วยในการคำนวณหา ดังนั้นจะต้องพัฒนาความสามารถในการออกแบบระบบต่อลงดินของซอฟต์แวร์โปรแกรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือเลือกใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่มีความสามารถสูงกว่า ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องมากขึ้น

3. การกำหนดความลึกของตัวนำกราวด์กริด โดยปกติแล้วได้กำหนดค่าความลึกในการฝังตัวนำกราวด์กริดไว้ที่ 0.50 เมตร ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่กำหนดในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยตามโครงการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแบบ 115-22 เควี ชนิด GAS-Insulated Switchgear Indoor Substation ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยได้กำหนดค่าความลึกในการฝังตัวนำกราวด์กริดไว้ที่ 1.0 เมตร ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วยังถือว่าสามารถทำงานได้ง่าย เพราะถ้าหากทำการฝังกราวด์กริดลึกมากเกินไปจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขุดดินและเสียเวลาดำเนินการมากขึ้นด้วย ดังนั้นผู้ที่ต้องการศึกษาสามารถ

นำกรณีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการฝังกราวด์กริดไปวิเคราะห์ว่ามีผลกระทบต่อการออกแบบที่ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างไร

4. การต่อสายดินเชิงอากาศของระบบสายส่งเข้ากับระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า หรือการลดค่าความต้านทานของรากสายดินของเสาส่งที่อยู่ใกล้กับสถานีไฟฟ้า จะทำให้กระแสลัดวงจรบางส่วนไหลผ่านทางดังกล่าวทำให้กระแสกริดลดลง ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีจำนวนสายดินเชิงอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสกริดลดลง ดังนั้นผู้ที่ต้องการศึกษาสามารถนำกรณีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายดินเชิงอากาศของระบบสายส่ง หรือการพิจารณาผลของการกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินในระบบสายจำหน่ายว่ามีผลกระทบต่อการออกแบบที่ปลอดภัยอย่างไร

5. ขนาดของสายดินเชิงอากาศต้องสามารถทนกระแสลัดวงจรลงดินได้ และยึดกับสายตัวนำต่อลงดินอย่างแน่นหนา การลดค่าอิมพีแดนซ์ของสายดินเชิงอากาศของระบบสายส่ง โดยการเปลี่ยนชนิดของสายให้มีค่าความนำไฟฟ้ามากขึ้นหรือให้สายมีขนาดโตขึ้น จะทำให้สามารถรองรับกระแสลัดวงจรได้สูงขึ้น

6. การลดเวลาการตัดกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันจะเป็นช่วงเวลาที่ยอมให้กระแสลัดวงจรไหลผ่านร่างกายมนุษย์ ถ้าหากยอมให้ช่วงเวลาที่ไหลผ่านน้อยลง มนุษย์จะทนแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น

7. การลดกระแสลัดวงจร โดยการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจริงจะเป็นการลดศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มลง ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_g) ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าลดลงด้วย

8. รั้วของสถานีไฟฟ้าไม่ควรต่อกับกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า เนื่องจากผลของศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่มจะทำให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นในขณะที่มนุษย์สัมผัสกับส่วนของรั้วที่เป็นโลหะที่ต่อกับกราวด์กริดจะมีค่าสูงมาก แนวทางการป้องกันสามารถทำได้โดยใช้รั้วที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าเช่น รั้วคอนกรีตก็จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

9. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้จากภาคสนามเป็นการวัดที่ดินเดิมก่อนจะมีการสร้างสถานีไฟฟ้าเพื่อนำไปออกแบบระบบต่อลงดินให้ถูกต้องตามความปลอดภัยทางวิศวกรรม

แต่เมื่อจะทำการก่อสร้างจริงที่ดินอาจอยู่ต่ำกว่าระดับถนน จึงจำเป็นที่จะต้องถมให้สูงขึ้นด้วยดินที่มีความต้านทานจำเพาะที่มีค่าใกล้เคียงกับดินเดิม แต่ถ้าทำการถมดินด้วยดินที่มีความต้านทานจำเพาะใหม่จะต้องทำการวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยอีกครั้งว่าระบบต่อลงดินที่ได้ออกแบบไปนั้นมีความปลอดภัยหรือไม่

10. การตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นการยืนยันว่าระบบต่อลงดินเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ ตัวนำกราวด์กริดควรเป็นไปตามแบบและมาตรฐานการก่อสร้าง ตรวจสอบการเชื่อมต่อของทุกจุดให้ปลอดภัยและแข็งแรง วัสดุบุบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าต้องอยู่ในสภาพที่ดีและมีความหนาที่เพียงพอ

11. ระบบต่อลงดินจะต้องทำการตรวจสอบเป็นระยะ เนื่องจากระบบต่อลงดินจะเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อระยะเวลาผ่านไป เช่นสายตัวนำและจุดเชื่อมต่อจะเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อน ความล้าทางกล และการกระทำที่ไม่ตั้งใจ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะและทำการบำรุงรักษาเพื่อให้ระบบต่อลงดินมีความปลอดภัย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2548. โครงการวิจัยรูปแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าและการต่อลงดินระบบจำหน่ายแรงสูงและแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.

กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2548. คู่มือการใช้งานโปรแกรม CDEGS. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.

วิศัลย์ พัวรุ่งโรจน์. 2554. เจาะลึก Excel เทคนิคการเขียนโปรแกรม VBA กับการประยุกต์ใช้งาน. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

IEEE Std 81-1983. 1983. **IEEE guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.** The Institute of Electrical and Electronics Engineer, New York.

IEEE Std 80-2000. 2000. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.** The Institute of Electrical and Electronics Engineer, New York.

IEEE Std C37.122.1. 1993. **IEEE Guide for Gas-Insulated Substations.** The Institute of Electrical and Electronics Engineer, New York.

Meliopoulos, A.P. Sakis. 1988. **Power System Grounding and Transients.** Marcel Dekker Inc, New York.



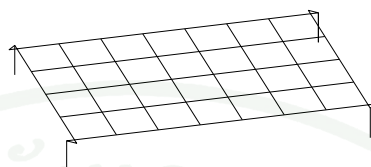
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

รูปแบบการจัดวางกราฟด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type A
ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย

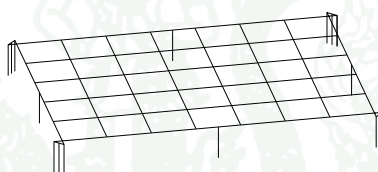
พ.ศ. ๒๕๕๖

1. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 4 x 5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก1



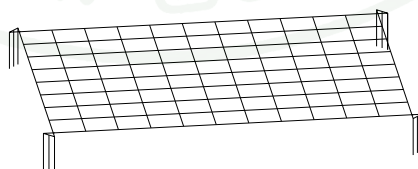
ภาพผนวกที่ ก1 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 โอห์ม.เมตร

2. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 21-40 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 4 x 4 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก2



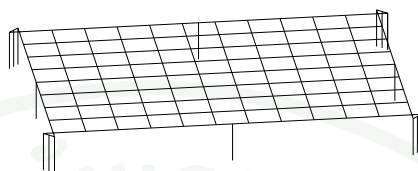
ภาพผนวกที่ ก2 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 21-40 โอห์ม.เมตร

3. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 41-65 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก3



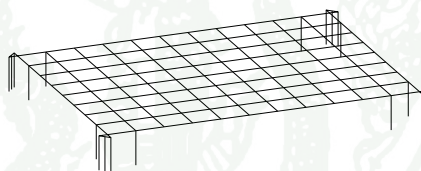
ภาพผนวกที่ ก3 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 41-65 โอห์ม.เมตร

4. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 66-85 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก4



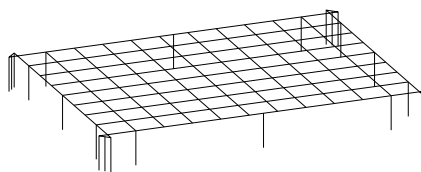
ภาพผนวกที่ ก4 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 66-85 โอห์ม.เมตร

5. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 86-120 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก5



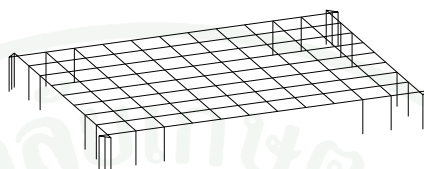
ภาพผนวกที่ ก5 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 86-120 โอห์ม.เมตร

6. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 121-180 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก6



ภาพผนวกที่ ก6 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 121-180 โอห์ม.เมตร

7. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 181-200 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ก7



ภาพผนวกที่ ก7 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type A
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 181-200 โอห์ม.เมตร

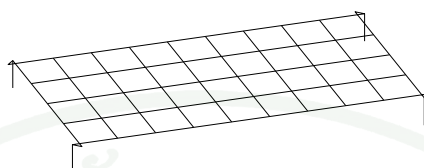
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

รูปแบบการจัดวางกราฟด์กริดโดยใช้โปรแกรม CDEGS ของสถานีไฟฟ้า Type B
ที่ผ่านเกณฑ์ความปลอดภัย

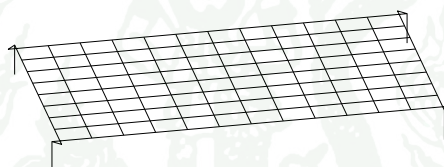
พ.ศ. ๒๕๕๖

1. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 30 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 4 x 5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ข1



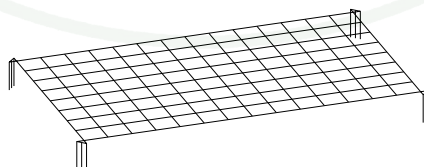
ภาพผนวกที่ ข1 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วงไม่เกิน 30 โอห์ม.เมตร

2. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 31-60 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 3 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ข2



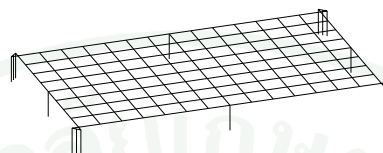
ภาพผนวกที่ ข2 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 31-60 โอห์ม.เมตร

3. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 61-100 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ข3



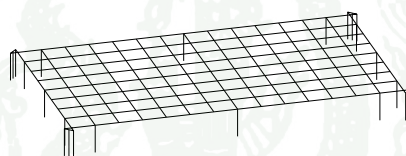
ภาพผนวกที่ ข3 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 61-100 โอห์ม.เมตร

4. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 101-125 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ข4



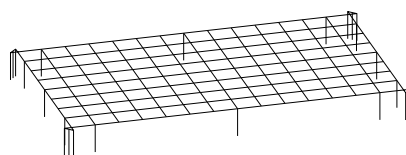
ภาพผนวกที่ ข4 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 101-125 โอห์ม.เมตร

5. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 126-170 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ข5



ภาพผนวกที่ ข5 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 126-170 โอห์ม.เมตร

6. กรณีค่าความจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 171-200 โอห์ม.เมตร จัดวางระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากับ 2.5 x 2.5 เมตร รูปแบบการจัดวางของตัวนำกราวด์กริด แสดงในภาพผนวกที่ ข6



ภาพผนวกที่ ข6 รูปแบบการจัดวางตัวนำกราวด์กริด ของสถานีไฟฟ้า Type B
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินอยู่ในช่วง 171-200 โอห์ม.เมตร

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสิริธร พลับเล็ก
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 มีนาคม 2512
สถานที่เกิด	จ.อุดรธานี
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยปทุมธานี จ.ปทุมธานี
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกร ระดับ 7
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรุงเทพฯ
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค