

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบกราวนด์ของ
สถานีไฟฟ้าย่อยโดยคำนึงถึงการถ่ายเทฟลด์
USING COMPUTER FOR
SUBSTATION GROUNDING SYSTEM DESIGN
WHICH TAKES INTO ACCOUNT FAULT TRANSFER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี

033136

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบระบบกราวนด์ของ
สถานีไฟฟ้าย่อยโดยคำนึงถึงการถ่ายเทฟอลต์

USING COMPUTER FOR SUBSTATION GROUNDING SYSTEM DESIGN
WHICH TAKES INTO ACCOUNT FAULT TRANSFER

โดย นายนิติ โคนองบัว
นายพิสิทธิ์ แซ่เตี๋ย
นายภาคภูมิ แจ้งใจกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ศลี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

ในการออกแบบระบบกราวนด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของบุคคลซึ่งปฏิบัติงานอยู่ในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วย ดังนั้น ในการออกแบบดังกล่าว จึงต้องออกแบบให้มีความปลอดภัยสูงและคำนึงถึงความประหยัด ในปริมาณเงินงบประมาณนี้ เป็นการออกแบบระบบกราวนด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งมีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในเมืองใหญ่ ๆ ทำให้พื้นที่ในการวางระบบกราวนด์มีอย่างจำกัด จึงได้ต่อเชื่อมตะแกรงกราวนด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นระบบใหญ่ โดยใช้ตัวนำที่เป็นกราวนด์ ซึ่งการออกแบบโดยวิธีปกติที่คิดว่ากระแสผิดปกติไหลลงสู่ตะแกรงกราวนด์ของ 1 สถานีไฟฟ้าย่อยเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดความปลอดภัย จึงใช้หลักการกระจายไม่สม่ำเสมอที่มีการแยกไหลของกระแสเป็นส่วน ๆ โดยส่วนหนึ่งจะไหลลงสู่ตะแกรงกราวนด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น ส่วนที่เหลือจะถูกถ่ายเทไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยอื่น ๆ โดยผ่านทางตัวนำที่เป็นกราวนด์เป็นการถ่ายเทกระแสผิดปกติจากสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งหนึ่งไปยังแห่งอื่น ๆ ได้ ซึ่งในการออกแบบได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณให้เป็นไปอย่างถูกต้องและรวดเร็วมากขึ้น

Abstract

Substation grounding system design requires to insure the safety conditions of human life and equipments during the occurrence of a fault to the ground. So, in designation, technical know-how, safety and economics are considered. This project presents the substation grounding system design which located in the city, so, the grounding system area are limited. Because of these reason, substation grounding mat are linked together to the large system with ground conductor. In general case, the fault current are only injected to ground mat which not enough for safety. So that, the current distribution method are take into account, which the fault current are sepetated. One of these are injected to that ground mat and the other are transfered. In designing, using microcomputer, the calculation are complete and fast.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	28
3.6 การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว	29
3.7 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในกรณีที่โครงสร้างพื้นดินเป็นแบบสมำเสมอ	29
บทที่ 4 วิเคราะห์การกระจายความหนาแน่นของกระแส	30
4.1 กล่าวนำ	30
4.2 การคำนวณหาค่าการกระจายของกระแส	31
4.2.1 กรณีของระบบกราวด์ที่แยกโดด ๆ	31
4.2.2 กรณีของระบบกราวด์แบบโครงข่าย	37
บทที่ 5 การวิเคราะห์ระบบกราวด์แบบโครงข่าย	40
5.1 วิธีดีคัปเปิ้ล	42
5.2 การนำผลจากการคำนวณไปใช้	49
บทที่ 6 การศึกษาระบบกราวด์ขนาดใหญ่โดยใช้คอมพิวเตอร์	51
6.1 การเตรียมข้อมูล	51
6.2 ขั้นตอนการคำนวณ	52
บทที่ 7 ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ผล	55
Appendix A	57
Appendix B	76
Appendix C	88
กิตติกรรมประกาศ	
บรรณานุกรม	

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 เกรเดียนของศักดาไฟฟ้าบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย	4
รูปที่ 2.2 การสัมผัสแบบแตะต้อง	13
รูปที่ 2.3 การสัมผัสแบบย่างก้าว	13
รูปที่ 3.1 ขั้วต่อลงดินแบบจุดในโครงสร้างพื้นดินแบบสองชั้น	17
รูปที่ 3.2 วิธีอิมเมจ	18
รูปที่ 3.3 พิกัดของขั้วต่อลงดิน j และพิกัดของจุด M	19
รูปที่ 3.4 วิธีผลรวม	20
รูปที่ 3.5 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำในแนวระดับ (เมื่อมองจากมุมบน)	22
รูปที่ 3.6 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำในแนวระดับ	24
รูปที่ 3.7 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำในแนวระดับ	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการตีพิมพ์ ลิขสิทธิ์สงวนไว้ให้คนไทยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำไม่อยู่ในแนวระดับ	27
รูปที่ 4.1 ระบบกราวด์ที่แยกโดด ๆ	32
รูปที่ 4.2 ขั้วต่อลงดินแบบโครงข่าย	37
รูปที่ 5.1 ตั้งอย่างของระบบกราวด์แบบโครงข่าย	41
รูปที่ 5.2 การเกิดคัปปลิงร่วมระหว่างสายเฟสกับสายกราวด์ และระหว่างสายกราวด์กับสายกราวด์	41
รูปที่ 5.3 สายกราวด์ที่เป็นส่วนที่สม่ำเสมอ	43
รูปที่ 5.4 การแทนเคเบิลชิตด้วยตัวนำที่เชื่อมต่อกันด้วยวงจรแลตเตอร์	43
รูปที่ 5.5 การกำจัดคัปปลิงร่วมกับสายเฟส	44
รูปที่ 5.6 การแทนแหล่งจ่ายกระแสเพิ่มเข้าไป : แหล่งจ่ายกระแสผิดปกติ (I_C) และแหล่งจ่ายกระแสนิวตรอล (I_N)	45
รูปที่ 5.7 สายกราวด์ที่ขนานกัน	46
รูปที่ 5.8 วงจรสมมูลย์สำหรับสายกราวด์ที่ขนานกัน	46
รูปที่ 5.9 ภาวะที่เกิดขึ้นสำหรับส่วนที่มีสายกราวด์ขนานกัน	47
รูปที่ 5.10 การแทนวงจรพายหลาย ๆ วงจรให้อยู่ในรูปของวงจรพายเพียงวงจรเดียว	48
รูปที่ 5.11 วงจรพายสมมูลย์สำหรับวงจรบันไดที่ไม่สม่ำเสมอ	49
รูปที่ 5.12 วงจรสมมูลย์ที่ลดรูปจนถึงขั้นสุดท้าย	50
รูปที่ A1 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1	60
รูปที่ A2 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2	66
รูปที่ A3 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3	72
รูปที่ B1 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1	78
รูปที่ B2 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2	82
รูปที่ B3 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3	87
รูปที่ C1 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1	92
รูปที่ C2 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2	96
รูปที่ C3 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3	100

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ผลของกระแสไฟฟ้าช็อคที่มีผลต่อร่างกาย	7
---	---

เอกสารตำราที่ 2.2 ค่าของความต้านทานจำเพาะของดินในสภาวะต่าง ๆ 10

ไม่ว่า ตารางที่ 2.3 ดีกรีเมนต์แฟคเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้าช็อค ซึ่ง เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของกระแสลับ
ตารางที่ 3.1 การเทียบระบบพิกัด XYZ กับระบบพิกัด UVW

11

13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยทั่ว ๆ ไป จะต้องมียระบบกราวด์ที่ดี ทั้งนี้เพราะในขณะที่เกิดการผิดปกติ เช่น เกิด Ground fault ขึ้น ทุก ๆ จุดในสถานีไฟฟ้านั้น จะต้องมีความปลอดภัยสูงพอ ความปลอดภัยจะเกิดขึ้นได้ก็เนื่องมาจากระบบกราวด์ที่ดีเท่านั้น

โดยปกติระบบกราวด์ที่ใช้กันในสถานีไฟฟ้านั้น จะนิยมใช้เป็นแบบลักษณะของตะแกรง (Grid) ซึ่งประกอบด้วยส่วนย่อย ๆ เป็นช่องสี่เหลี่ยมเรียกว่า Mesh และ Mesh นี้อาจมีขนาดเท่ากันทั้งสถานีไฟฟ้าหรือไม่เท่ากันก็ได้ ตะแกรงนี้จะถูกฝังอยู่ในพื้นดินที่ระดับความลึกตามการออกแบบซึ่งได้คำนึงถึงความปลอดภัยไว้ และจะมีสายต่อจากตัวอุปกรณ์หรือโครงสร้างต่าง ๆ มาต่อเข้ากับแผ่นตะแกรงนี้ เพื่อประกอบขึ้นเป็นระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้น ๆ

ในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยทั่ว ๆ ไป มักจะให้การกระจายกระแสในแต่ละตัวนำที่นำมาประกอบกันเป็นระบบกราวด์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ในทุกตัวนำนี้เพื่อความสะดวกในการคำนวณ โดยเฉพาะในกรณีที่กราวด์แมทมีขนาดเล็กและจำนวนตัวนำนั้นมีไม่มากเกินไป การกระจายของกระแสในแต่ละตัวนำอาจจะเป็นในลักษณะสม่ำเสมอได้ แต่ถ้าเป็นในกรณีที่ขนาดของสถานีไฟฟ้าย่อยมีขนาดใหญ่และจำนวนตัวนำที่ใช้มีปริมาณมาก ๆ การกระจายกระแสในแต่ละตัวนำก็จะมีแตกต่างกันอันจะเป็นผลต่อการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น

ดังนั้นในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จึงออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยยึดหลักว่ามีการกระจายกระแสในตัวนำเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) จะทำให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังใช้การขยับตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็น Ground mat ทำให้ขนาดของ Mesh ไม่เท่ากันหรือมีการต่อแท่งตัวนำลงดิน (Ground rod) ประกอบเข้ากับระบบกราวด์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงขึ้นกว่าเดิม

สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งอยู่ในเมืองใหญ่ ๆ โดยที่ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีไฟฟ้าย่อยถูกล้อมรอบด้วยอาคารสูงจำนวนมาก พื้นที่ในการวางระบบกราวด์จึงมีจำกัด และไม่สามารถวัดความต้านทานของพื้นดินได้เนื่องจากพื้นที่ไม่เพียงพอสำหรับระยะห่างของ Electrode ในระหว่างการวิเคราะห์ดิน หรือผลจากการวัดมีความผิดพลาดเนื่องจากสิ่งที่เป็นโลหะในบริเวณใกล้เคียง เช่น ท่อส่งน้ำและท่อส่ง Gas หรือสิ่งก่อสร้างที่เป็นโลหะของอาคารต่าง ๆ จึงทำให้การออกแบบระบบกราวด์ตามวิธีปกติ ไม่สามารถยืนยันได้ว่าจะมีความปลอดภัยกับบุคคลที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นเนื่องจากการวัดความต้านทานของดินจะไม่สามารถเชื่อถือได้ทั้งหมด ดังนั้นการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้ จึงใช้วงจรภายนอกมาเชื่อมต่อกับ Ground mat เพื่อเป็นทางถ่ายเท Fault จากสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้ ไปสู่สถานีไฟฟ้าย่อยอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห่งหนึ่งที่อยู่ใกล้เคียงกัน จะทำให้กระแส Fault ที่ Inject ลงสู่ Ground mat (I_G) ของสถานี ไฟฟ้าช้อยนี้ลดลงเพราะมีกระแสส่วนหนึ่งได้ถูกถ่ายเทไปยังที่อื่น แล้วจึงนำค่ากระแส I_G นี้มา ออกแบบระบบกราวด์ต่อไปโดยค่าความต้านทานของดินที่ถูกใช้ จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดไว้แล้ว จากสถานีไฟฟ้าช้อยใกล้เคียง

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า เมื่อเชื่อมต่อ Ground mat ของสถานีไฟฟ้าช้อยตั้งแต่ 2 แห่งขึ้นไปเข้าด้วยกัน จะทำให้เกิดเป็นระบบกราวด์ขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ทาง ไฟฟ้าก็จะมี circuit element ประมาณ 100-1,000 elements การวิเคราะห์วงจรจึงยุ่งยากและผิดพลาดได้ง่าย ในปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า "Decoupled Method" มาช่วยเพื่อลดรูปของวงจรให้ดูง่ายขึ้น ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ได้ Equivalent circuit ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า Original circuit ประมาณถึง 10 - 60 เท่า



บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานทั่วไป

ในการออกแบบและสร้างระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า นอกจากจะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงกลและความร้อนที่เป็นผลมาจากกระแส อันเนื่องมาจากการเกิดผิปกติในระบบ เช่น กระแสลัดวงจร เป็นต้น ยังจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยแก่บุคคลและสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นระบบกราวด์จึงเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาออกแบบด้วย ซึ่งได้มีการค้นคว้าและพัฒนารูปแบบจนได้แนวทางในการทำระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ขึ้น

2.1 คำนิยาม

Phase หมายถึง สายเฟสซึ่งมีกระแสผิปกติไหลผ่านเฟส อาจจะหมายถึงความถี่เฟสของ Transmission line หรือของ Underground cable ก็ได้

Ground circuit ประกอบด้วย Ground conductor (ซึ่งอาจจะเป็น Ground wire หรือ Underground conductor) กับ Ground mat resistance

Sheath หมายถึง ปลอกของสาย cable ซึ่งจะใช้เป็น Ground conductor อีกแบบหนึ่งที่เชื่อมต่อกับ Ground mat ของสองสถานีไฟฟ้าย่อยเข้าด้วยกัน

Underground conductor คือ ตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อกับ Ground mat ของสองสถานีไฟฟ้าย่อยเข้าด้วยกันโดยฝังไว้ในพื้นดิน เช่น Sheath ของ Underground cable, Interconnecting copper conductor ที่ฝังอยู่ในดิน, Pipe line

Ground wire คือ ตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อกับ Ground mat ของสองสถานีไฟฟ้าย่อยเข้าด้วยกัน โดยเดินในอากาศขนานไปกับแนวของ Transmission line

ศักดาไฟฟ้าระหว่างก้าว (Step voltage, E_s) เป็นความต่างศักย์ที่ผิวระหว่างจุดสองจุดที่มีระยะห่างกันหนึ่งเมตรของก้าวคน โดยไม่มีส่วนอื่นของร่างกายสัมผัสกับอุปกรณ์หรือดิน

ศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage, E_t) เป็นความต่างศักย์ระหว่างศักดาไฟฟ้าระหว่างระบบกราวด์กับศักดาไฟฟ้าที่ผิวที่คนยืนอยู่ และมือไปสัมผัสที่โครงสร้างหรืออุปกรณ์ที่ต่อลงดินไว้

ศักดาไฟฟ้าเมช (Mesh voltage, E_m) เป็นศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ภายใน Mesh ของตะแกรงต่อลงดิน (Ground grid)

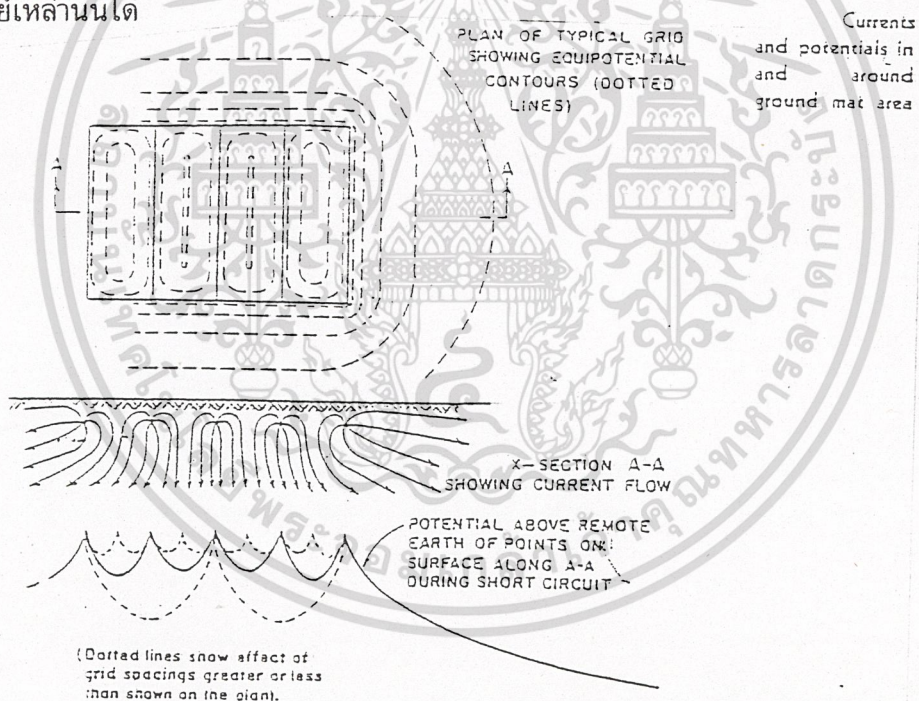
ศักดาไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transferred voltage) เป็นศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่ศักดาไฟฟ้ามาจากที่อื่น แล้วเข้ามายัง Substation หรือออกจาก Substation ไปข้างนอก โดยเทียบกับศักดาไฟฟ้าที่จุดที่ยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปัญหาพื้นฐานที่เกิดขึ้นกับระบบต่อลงดิน

ภายใต้ภาวะที่เกิดความผิดปกติ (Fault) ขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าย่อยหนึ่ง ๆ นั้น การไหลของกระแสผิดปกติลงสู่พื้นดิน (Ground fault current) โดยผ่านระบบต่อลงดิน จะมีผลทำให้เกิดเกรเดียนของศักดาไฟฟ้าขึ้นภายในและรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนั้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นระบบต่อลงดินที่มีตะแกรงต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถูกฝังอยู่ในดินที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogenous)

ดังนั้นถ้าระบบต่อลงดินนั้นไม่ได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้อง เกรเดียนของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่พื้นผิวของบริเวณที่ถูกครอบคลุมโดยตะแกรงต่อลงดินนั้น อาจจะสูงเกินไปจนเกิดอันตรายต่อบุคคลที่อยู่ในบริเวณนั้นได้ ค่าความต่างศักย์ที่เป็นอันตรายอาจจะเกิดขึ้นระหว่างโครงสร้างหรือโครงของอุปกรณ์ซึ่งถูกต่อลงดิน กับพื้นดินในบริเวณใกล้เคียงภายในและรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเท่าทั้งสองของคน ๆ นั้นสัมผัสอยู่ในทางตรงข้ามถ้าระบบต่อลงดินนั้นได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้องและรอบคอบ ก็จะสามารถป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นจากความต่างศักย์เหล่านั้นได้



รูปที่ 2.1 เกรเดียนของศักดาไฟฟ้าบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย

ที่ผ่านมาในอดีตมีคนจำนวนมากมักจะคิดว่าวัตถุใด ๆ ก็ตามล้วนแล้วแต่ถูกต่อลงดินทั้งสิ้นและสามารถจะสัมผัสได้อย่างปลอดภัย ความเข้าใจผิดอันนี้เป็นเหตุให้เกิดอุบัติเหตุต่อบุคคลต่าง ๆ ถึงแก่ชีวิตมาแล้วเป็นจำนวนมาก แต่ในปัจจุบันนี้ปัญหาอันนี้ได้นำไปสู่การค้นหาคำเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุเหล่านั้นว่าเกิดขึ้นมาเนื่องจากอะไร จากการอาศัยข้อมูลและความรู้ใหม่ ๆ จำนวนมากทำให้สามารถหาคำเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ซึ่งสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้คือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีกระแสผิตปกติที่ค่อนข้างสูงไหลสู่ดิน เมื่อเทียบกับขนาดของระบบต่อลงดินที่มีอยู่ และความต้านทานจำเพาะของพื้นดินบริเวณนั้น
2. ความต้านทานจำเพาะของดินสูงและการกระจายของกระแสสู่ดิน ออกสู่พื้นดินต่ำ เป็นเหตุให้เกิดเกรเดียนของศักดาไฟฟ้าขึ้นสูงมาก ในบางจุดหรือหลาย ๆ จุดบนพื้นบริเวณสถานี ไฟฟ้าอยู่นั้น ๆ
3. มีส่วนของร่างกายของคนเป็นสะพานไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุด ที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ณ เวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งมีความต่างศักย์ที่มีค่าสูง คร่อมอยู่ระหว่างจุดทั้งสองนั้น
4. การไม่มีหรือมีความต้านทานสัมผัส (Contact resistance) หรือความต้านทานอนุกรมไม่เพียงพอที่จะจำกัดกระแสผ่านร่างกายให้มีค่าที่ปลอดภัยภายในสถานะที่เกิดความผิตปกตินั้น
5. ช่วงเวลาของการเกิดความผิตปกติ และของการไหลของกระแสผ่านร่างกายทางจุดสัมผัสทั้งสองดังกล่าวนั้นเป็นเวลานาน พอที่จะเป็นเหตุให้เกิดอันตรายขึ้นได้ที่ระดับความเข้มของกระแสตามที่กำหนด

จากที่กล่าวมาถึงข้างต้นจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุเหล่านั้นอาจจะพิจารณาได้ในแง่ที่เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยนั่นเอง แต่ปัญหาสำคัญในการลดอุบัติเหตุที่เป็นอันตรายต่อคนนี่ลงให้ได้มากที่สุด ก็คือการพยายามที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิตปกติให้ลดลงไปอย่างรวดเร็วที่สุด ซึ่งก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยเหล่านั้นเป็นสำคัญ

2.3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย

สำหรับองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยนั้นจะกล่าวรวม ๆ เป็นหัวข้อใหญ่ดังต่อไปนี้

2.3.1 ร่างกายของมนุษย์

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องตะแกรงต่อลงดิน ในแง่ของความปลอดภัยต่อบุคคลนั้น จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของส่วนที่สำคัญที่สุดของวงจร ก็คือร่างกายของมนุษย์นั่นเอง เนื่องจากว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดอาการช็อค ร่างกายของคนเราเป็นความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ตามสภาวะแวดล้อมและมีค่าต่างกันทุกคน การทดสอบที่ผ่านมาในอดีตเพื่อจะหาค่าความต้านต่ำสุดของร่างกายคนเรานั้นปรากฏว่า มีตั้งแต่ 400-600 โอห์ม แต่เมื่อวัดความต้านทานทั้งหมดจากมือหนึ่งไปยังอีกมือหนึ่งจะมีค่าประมาณ 2300 โอห์ม และเมื่อวัดจากมือถึงเท้าจะมีค่าประมาณ 1100 โอห์ม เพื่อเป็นระเบียบแบบแผนเดียวกันหมด IEEE STD 80-1976 สแนะนำให้นำใช้ค่าความต้านทาน 1000 โอห์ม โดยประมาณสำหรับเป็นค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์เรามีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาพที่เป็นจริงนั้นค่าความต้านทานที่ผิวหนังหรือจุดสัมผัสเป็นตัวการสำคัญจะจำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ว่าจะผ่านอวัยวะส่วนใด ดังนั้นสภาพของผิวหนังบริเวณจุดสัมผัสจะมีผลโดยตรงต่ออันตรายที่จะเกิดขึ้น อาทิเช่น ผิวหนังเปียกชื้นจะมีโอกาสเกิดอันตรายได้ง่ายและรุนแรงกว่าผิวหนังที่แห้ง

2.3.2 กระแสที่ผ่านร่างกายมนุษย์ (Body current)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายเป็นตัวการที่สำคัญที่ทำให้เกิดอาการช็อค ซึ่งเป็นอุบัติเหตุที่อาจจะเป็นอันตรายถึงกับเสียชีวิตได้ ความรุนแรงของอุบัติเหตุอันนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ - ขนาดและช่วงเวลาของกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่ที่สำคัญของร่างกาย ซึ่งจะแยกกันพิจารณาต่อไปนี้

- ความถี่

ที่ความถี่ 50 Hz ความต้านทานของร่างกาย จะเป็นความต้านทานชนิด รีซิสทีฟ (Resistive) แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นความต้านทานของร่างกายต่อกระแสไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ความต้านทานที่จุดสัมผัสต่ำลงมากอีกด้วย

- ขนาดของกระแส

ขนาดของกระแสจะมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาตอบโต้ของร่างกายมนุษย์ และอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับร่างกายของคนเรา ที่ขนาดของกระแสระดับต่าง ๆ กัน

- ระยะเวลาของการถูกกระแสไฟฟ้าช็อค

ระยะเวลาของการถูกกระแสไฟฟ้าช็อคจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่ง ในการที่จะกำหนดขนาดของกระแสที่ร่างกายสามารถจะทนได้ ในช่วงเวลานั้น ๆ โดยที่ไม่เกิดอันตรายต่อร่างกาย กล่าวคือ ร่างกายของคนเราสามารถจะทนกระแสสูงมาก ๆ ได้เป็นระยะเวลาสั้น ๆ แต่ในทางตรงข้ามร่างกายของมนุษย์จะทนกระแสได้น้อยลง เมื่อระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายเพิ่มขึ้น Dalziel ได้แสดงให้เห็นว่า 99.5 % ของคนที่มีสุขภาพปกติทั่วไป สามารถจะทนกระแสที่ไหลผ่านหัวใจ ซึ่งกำหนดได้โดยสมการต่อไปนี้

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{T}} \quad (2.1)$$

โดยที่

I_b = กระแสที่ไหลผ่านร่างกายได้มากที่สุด (Maximum body current)

T = ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (หน่วย วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับสงวนลิขสิทธิ์ กระแสไหลผ่านร่างกายนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันในการ Clear fault ที่เกิดขึ้น โดยปกติมักจะเลือกใช้ค่า Clearing time ของ Regular high speed relay

นอกจากนี้ช่วงเวลาดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงผลของการ Reclosure อยู่ภายในระบบนั้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าการทำงานของหัวใจต้องใช้เวลาประมาณ 5 นาที จึงจะกลับคืนภาวะปกติ ภายหลังจากประสบกับการช็อคอย่างรุนแรงนั้นก็หมายความว่าถ้ามีการทำงานของ Reclosure การช็อคที่มีระยะห่างไกลๆกัน จะเสมือนกับเกิดการช็อคเพียงครั้งเดียว ซึ่งมีระยะเวลาเท่ากับผลรวมของระยะเวลาของการช็อคแต่ละครั้ง

ตารางที่ 2.1 ผลของกระแสไฟฟ้าช็อคที่มีผลต่อร่างกาย

ระดับกระแสไฟฟ้าช็อค โดยประมาณ	ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวใจ เช่น จากมือลงสู่พื้นดิน	วิธีการรักษา
- ต่ำกว่า 0.7 มิลลิแอมแปร์	- ไม่มีผลต่อร่างกาย - เกิดความรู้สึกจุกกระจี้	
- 0.7- 2 มิลลิแอมแปร์	- 1. มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท	
- 2-8 มิลลิแอมแปร์	2. เจ็บปวดอย่างรุนแรงเกิดการช็อคที่ไม่ถึงขั้นอันตราย	
- 8-20 มิลลิแอมแปร์	- 1. มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท 2. ไม่สามารถปล่อย (แบ) มือออกได้เนื่องจากการหดตัวของกล้ามเนื้อ 3. ถ้าถูกกระแสไฟขนาด 20 มิลลิแอมแปร์โดยทันทีทันใดจะได้รับอันตรายจากการเกิดกล้ามเนื้อฉีก ถ้าน้อยกว่านี้จะไม่อันตราย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ระดับกระแสไฟฟ้าช็อกโดย ประมาณ	ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวใจ เช่น จากมือลงสู่พื้นดิน	วิธีการรักษา
- 20-50 มิลลิแอมแปร์	<ul style="list-style-type: none"> - 1. มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท 2. กล้ามเนื้อหน้าอกหดตัวอย่างรุนแรง 3. มีอากาศขั้วอยู่ในปอดมากผิดปกติทำให้ปอดทำงานได้ไม่เต็มที่ 4. ไม่สามารถปล่อยมือออกได้ 5. เกิดของเสียขึ้นในกระแสโลหิตมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางผิดปกติขึ้นในเซลล์สมองและทำให้สิ้นชีวิตในเวลาเพียง 2-3 นาที 	- ถ้าช่วยปฐมพยาบาลด้วยการให้ลมหายใจโดยตรงทางปากอย่างทันท่วงที อาจทำให้หัวใจ กลับทำงานดังเดิมได้
- 50-100 มิลลิแอมแปร์	<ul style="list-style-type: none"> - 1. มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท - 2. หัวใจเริ่มต้นในลักษณะไม่ประสานงานกันคือไม่เป็นจังหวะตามปกติ มีผลทำให้การหมุนเวียนของโลหิตหยุดลง แม้ถูกกระแสไฟฟ้าช็อกแค่ 1/10 วินาทีก็สามารถทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้อกระตุก กระแสไฟฟ้าช็อกในระดับนี้ และไหลผ่านร่างกายประมาณ 1 วินาที หรือนานกว่านั้น อาจทำให้กล้ามเนื้อหัวใจกระตุก ซึ่งมีผลให้หัวใจสูบฉีดโลหิตไม่ได้ 	- มีวิธีเดียวที่จะทำให้หัวใจกลับทำงานตามปกติได้ โดยใช้เครื่องมือที่ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจหยุดอาการกระตุกหรือหดตัวและช่วยการหายใจด้วยวิธีเป่าปากจนกว่าหัวใจจะกลับเต้นตามจังหวะปกติหรือการใช้สารทางเคมีเข้าช่วย เช่น การฉีดยาจำพวกอะเซทิลคอลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ระดับกระแสไฟฟ้าช็อคโดยประมาณ	ผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวใจ เช่น จากมือลงสู่พื้น	วิธีรักษา
- กระแสปริมาณที่สูงกว่าที่กล่าวมาแล้ว	<ol style="list-style-type: none"> 1. เนื้อเยื่อไหม้อย่างรุนแรง 2. ไม่เกิดอาการกล้ามเนื้อหัวใจกระตุก 3. เกิดการรวมตัวของมายโอโกลบิน (myoglobin) ซึ่งมีลักษณะเป็นน้ำเมือกข้นทั่วไปในเนื้อซึ่งมีผลให้กล้ามเนื้อไม่ทำงาน 	- จำเป็นต้องได้รับการดูแลจากนายแพทย์อย่างดี ให้ดื่มโซเดียมไบคาร์บอเนต

2.3.3 เส้นทางของกระแสที่ผ่านร่างกาย

โดยธรรมชาติแล้วกระแสไฟฟ้าจะเลือกไหลไปตามเส้นทางที่สะดวกที่สุด เช่นเดียวกันสำหรับกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของคนเรา กระแสก็จะเลือกเอาเส้นทางที่จะลงสู่ดินสะดวกที่สุด ซึ่งการไหลของกระแสไฟฟ้าส่วนมากจะผ่านส่วนต่าง ๆ ของร่างกายซึ่งประกอบด้วยอวัยวะที่สำคัญต่าง ๆ รวมทั้งหัวใจด้วย เส้นทางที่ไหลของกระแสผ่านร่างกายของคนเรานั้นมีได้หลายทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดสัมผัสของร่างกายกับบริเวณที่ความต่างศักย์เกิดขึ้นซึ่งแต่ละเส้นทางนั้นก็จะมีผลอันตรายจากกระแสที่ไหลผ่านนั้นไม่เท่ากัน เนื่องจากการที่มีกระแสไหลผ่านในปริมาณที่ต่างกัน อาทิเช่น เส้นทางของกระแสไหลจากมือสู่มือหรือมือสู่ขาทั้งสองข้างจะมีผลที่เป็นอันตรายมากกว่าเส้นทางที่ไหลของกระแสไฟฟ้าจากขาสู่ขา ทั้งนี้มีการทดสอบในอดีตที่ผ่านมา มาเป็นที่ยืนยันว่ากระแสชนิดปกติที่ต้องการในการทำให้เกิดกระแสขนาดเท่ากันผ่านบริเวณหัวใจสำหรับเส้นทางขาสูขาคือมากกว่าสำหรับมือสู่ขา หรือในอีกแง่หนึ่งก็คือกระแสไฟฟ้าจะไหลจากมือสู่ขาในปริมาณที่สูงกว่าการไหลจากขาสู่ขาภายใต้ภาวะผิดปกติอันเดียวกัน

2.3.4 ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ บนพื้นผิวดินภายในและรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าขอยนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสผิดปกติที่ไหลลงสู่พื้นดินโดยผ่านทางแผ่นรองต่อลงดิน ดังนั้นถ้ามีส่วนของร่างกายของคนเป็นสะพานไฟต่อเชื่อมจุดสองจุดใด ๆ ซึ่งอาจเป็นโครงสร้าง หรือโครงของอุปกรณ์ที่ถูกต่อลงดินกับพื้นดินบริเวณใกล้เคียงที่คน ๆ นั้นยืนอยู่หรือจุดสองจุดใด ๆ ซึ่งอยู่บนพื้นดินได้เท่าทั้งสองของคน ๆ นั้น ศักดาไฟฟ้าที่จุดสองจุดดังกล่าวนี้จะเป็น

ต้นเหตุให้เกิดความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าคร่อมตัวคนคนนั้นอยู่ได้ ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านร่างกายซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อคนผู้นั้นได้ ขนาดของกระแสจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ดังกล่าวว่าเกิดขึ้นมากหรือน้อย และความต่างศักย์นี้ก็ขึ้นโดยตรงกับศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะมุ่งความสนใจเริ่มแรกไปที่ศักดาไฟฟ้าที่เกิดดังกล่าวเสียก่อน

ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่าง ๆ บริเวณพื้นผิวดินนั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่างด้วยกันคือ ความต้านทานจำเพาะของดิน, กระแสผิวดินที่ลึกลงสู่ดินที่อาจจะเกิดขึ้นได้และรูปทรงทางเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งแยกพิจารณาออกเป็นส่วน ๆ ดังต่อไปนี้

- ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ground resistivity)

ความต้านทานจำเพาะของดินภายในบริเวณที่ตั้งของสถานีไฟฟ้านั้น จะมีความสำคัญต่อการกระจายของกระแสผิวดินที่จะกระจายออกสู่พื้นดินบริเวณรอบ ๆ ตัวนำของตะแกรงต่อลงดินอย่างมาก ถ้าพื้นดินบริเวณนั้นมีความต้านทานจำเพาะต่ำ กระแสผิวดินจะกระจายออกสู่พื้นดินภายในพื้นผิวดินมีค่าต่ำแต่ในทางตรงกันข้ามถ้าพื้นดินบริเวณนั้นมีความต้านทานจำเพาะสูง กระแสผิวดินจะกระจายออกสู่พื้นดินได้ต่ำมาก มีผลให้ศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ภายในพื้นผิวดินมีค่าสูงมากด้วย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในพื้นที่หนึ่ง ๆ มักจะมีค่าไม่แน่นอน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับ ระดับความลึกของชั้นดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นของดิน อุณหภูมิของดิน สารเคมีที่มีอยู่ภายในดิน เป็นต้น สำหรับค่าความต้านทานจำเพาะของดินและหินชนิดต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าของความต้านทานจำเพาะของดินในสภาวะต่าง ๆ

TYPE OF GROUND	RESISTIVITY IN OHM-METERS
Wet organic soil	10
moist soil	10^2
dry soil	10^3
bed rock	10^4

สำหรับการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ภายในพื้นดินนี้มักจะพิจารณาให้พื้นดินนั้นเป็นเนื้อเดียวกันตลอดคือ มีความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากันตลอดเนื้อดินนั้น ซึ่งก็ตรงกับคุณสมบัติของพื้นดินทั่วไป แต่ในบางสภาพพื้นดินนั้นอาจจะมีลักษณะที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันตลอดคือ ภายในพื้นดินนั้นมีความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันออกไป ซึ่งพื้นดินในลักษณะนี้จะถูกพิจารณาให้มีโครงสร้างที่พิเศษออกไปในลักษณะของโครงสร้างพื้นดินแบบหลายชั้น ซึ่งจะกล่าวละเอียดในบทต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสผิดปกติ (Fault current) Magittude และ Duration

กระแสผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นได้นี้ก็เป็นองค์ประกอบที่มีผลโดยตรงต่อศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคือถ้าขนาดของกระแสอันนี้สูงมาก ก็ย่อมจะทำให้ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวสูงมาก เช่นกัน การหาขนาดของกระแสผิดปกติสำหรับระบบต่อลงดินแบบตะแกรงต่อลงดินนั้น หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{3V}{3R_g + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (2.2)$$

โดยที่ I	คือ ขนาดของกระแสผิดปกติสูงสุด หน่วยแอมแปร์
V	คือ Phase to neutral voltage หน่วยโวลท์
R _g	คือ Grid resistance to earth หน่วยโอห์ม
R ₂	คือ Negative sequence system resistance หน่วยโอห์ม
R ₁	คือ Positive sequence system resistance หน่วยโอห์ม
R ₀	คือ Zero sequence faultpath resistance หน่วยโอห์ม
X ₁	คือ Positive sequence subtransient system reactance หน่วยโอห์ม
X ₂	คือ Negative sequence system reactance หน่วยโอห์ม
X ₀	คือ Zero sequence system fault path reactance หน่วยโอห์ม

กระแสอันนี้โดยทั่วไปจะเป็นคลื่นรูปซายน์ ซึ่งมีระดับ D.C. offset อยู่ด้วย และด้วยเหตุที่กระแสไฟฟ้าตรงสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายคนเราได้เช่นกัน ค่าของกระแสอันนี้จำเป็นต้องถูกคูณด้วย Correction factor ค่าตัวคูณอันนี้เรียกว่า Decrement factor สำหรับค่าตัวประกอบอันนี้ได้มีการแสดงไว้ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ดีกรีเมนต์แฟคเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้าช็อก ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของกระแสสลับ

Shock and Fault Duration		Decrement Factor
Seconds	Cycles(60 Hz)	
0.008	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 or more	30 or more	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ต้องการค่า Decrement factor ที่แน่นอนก็สามารถหาได้จากสมการ

$$D = \frac{1}{\sqrt{T}} \left[T + \left(\frac{1}{W} \right) \left(\frac{X}{R} \right) \left(1 - e^{-\frac{zWT}{X/R}} \right) \right] \quad (2.3)$$

โดยที่

- T คือ ช่วงเวลาของการเกิดความผิดปกติ หน่วย วินาที
 W คือ ความถี่ของระบบ หน่วย เรเดียน/วินาที
 X คือ Reactance ทั้งหมดของระบบ หน่วย โอห์ม
 R คือ Reactance ทั้งหมดของระบบ หน่วย โอห์ม

ค่ากระแสที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.2) นั้นต้องคูณด้วยค่า factor อันนี้ เพื่อจะหาค่ากระแสผิดปกติที่แท้จริงในระบบ สำหรับช่วงเวลาในการเกิดความผิดปกติจะเป็นค่า Clearing time ของ Primary protective device หรือ Back up protection นั้นขึ้นอยู่กับแต่ละระบบแต่โดยทั่วไป มักจะใช้ค่าของ Primary protective device เป็นหลัก นอกจากนี้การหาค่ากระแสดังกล่าวจะต้องนำเอาการขยายตัวของระบบในอนาคตเข้ามาพิจารณาด้วย

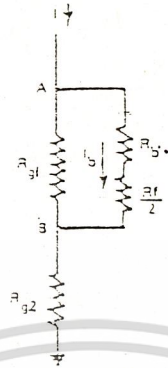
- รูปทรงเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน

คักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ นอกจากจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังกล่าวมาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งรวมไปถึงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำระยะห่างระหว่างตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็นตะแกรงต่อลงดิน ความลึกในการฝังตัวนำการกระจายของกระแสตลอดตะแกรงต่อลงดิน และตำแหน่งที่กระแสไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดินนั้น เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการควบคุมคักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่าง ๆ ทั้งภายในและรอบ ๆ สถานีไฟฟ้าย่อย ให้อยู่ภายในขอบเขตที่จะไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์เกินค่าที่ร่างกายคนเราจะสามารถทนได้ ในทางปฏิบัติการคำนวณหาค่าคักดาไฟฟ้า องค์ประกอบบางอย่างที่กล่าวถึงข้างต้น อาจจะถูกละเลยไปจากการพิจารณาได้ โดยที่ทำให้ค่าที่ได้มาไม่ผิดไปเท่าไรนัก

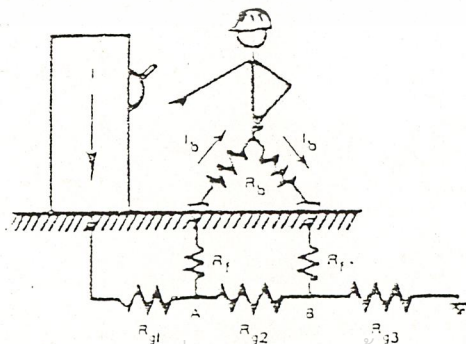
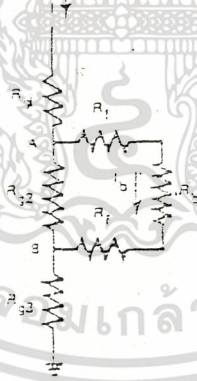
2.4 ขอบเขตของความปลอดภัย

องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยที่ได้กล่าวผ่านไปแล้วนั้นบางส่วนจะถูกนำมาใช้ช่วยในการกำหนดขอบเขตของความปลอดภัย บางส่วนก็ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความปลอดภัยสำหรับการกำหนดขอบเขตความปลอดภัยนั้น องค์ประกอบที่จะนำมาใช้ช่วยในการกำหนดขอบเขตนั้นจะประกอบด้วยกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน เส้นทางการไหลของกระแสหรือลักษณะการสัมผัสกับจุดสองจุดใดที่มีคักดาไฟฟ้าอยู่ วิจารณ์ความต้านทานส่วนที่มีคนเป็นส่วนประกอบและความต้านทานจำเพาะของดิน ถ้าพิจารณาตามรูปที่ 2.2 และ 2.3 จะเป็นลักษณะการสัมผัสซึ่งทำ

ให้เกิดการช็อคที่อาจจะเกิดอันตรายขึ้นได้มากสองลักษณะและแผนผังวงจรความต้านทานสมมูลย์ของการสัมผัสแต่ละลักษณะนั้น



รูปที่ 2.2 การสัมผัสแบบแตะต้อง (Touch contact)



รูปที่ 2.3 การสัมผัสแบบย่างก้าว (Step contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานั้น ไม่นอนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 เป็นลักษณะการสัมผัสแบบ Touch contact ซึ่งในลักษณะเช่นนี้กระแสจะไหลจากส่วนของมือที่สัมผัสอยู่กับโครงสร้างหรือโครงของอุปกรณ์ที่ถูกต้องลงดินไปยังขาทั้งสองข้างที่ยืนอยู่บนพื้นผิวดิน

รูปที่ 2.3 เป็นลักษณะการสัมผัสแบบ Step contact ซึ่งในลักษณะเช่นนี้ กระแสจะไหลจากขาข้างหนึ่งไปยังขาอีกข้างหนึ่ง ซึ่งยืนอยู่บนพื้นผิวดินโดยระยะระหว่างจุดที่เท้าทั้งสองสัมผัสอยู่บนผิวดินมักจะกำหนดให้มีค่าเป็น 1 เมตร

ในแต่ละกรณีดังกล่าวกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน I_b จะถูกขับโดยความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B

ปกติเท้าของคนเราที่สัมผัสอยู่กับพื้นผิวดินนั้นจะเสมือนกับเป็นขั้วต่อลงดินที่เป็น วงกลม (Plate) ซึ่งมีความต้านทานประมาณ $3P_s$ ลักษณะของเท้าที่ขนานกันจะมีความต้านทานเท่ากับ $1.5P_s$ และอนุกรมกันจะมีความต้านทานเท่ากับ $6P_s$ ดังนั้นวงจรความต้านทานส่วนที่มีร่างกายคนเป็นส่วนประกอบ สำหรับการสัมผัสในแต่ละลักษณะจะเป็นไปตามนี้คือ

$$\text{สำหรับการสัมผัสแบบ Touch } R = 1000 + 1.5P_s \text{ โอห์ม} \quad (2.4)$$

$$\text{สำหรับการสัมผัสแบบ Step } R = 1000 + 6P_s \text{ โอห์ม} \quad (2.5)$$

ซึ่งตัวประกอบ 1000 โอห์มนั้นก็คือ ความต้านทานของร่างกายคนเรานิยมใช้กันเป็นมาตรฐาน

P_s คือ ความต้านทานจำเพาะของชั้นดินพื้นผิว

การสัมผัสในแต่ละลักษณะกระแสที่ร่างกายคนเราสามารถที่จะทนได้นั้นกำหนดได้จากสมการที่ 2.1 คือ $I_b = 0.116/\sqrt{T}$ แต่เนื่องจากว่าความต่างศักย์ต่อการคำนวณและการวัดมากกว่ากระแส และจากการที่เราทราบถึงวงจรความต้านทานของลักษณะการสัมผัสทั้งสองทำให้เราสะดวกที่จะกำหนดขอบเขตความปลอดภัยให้อยู่ในรูปของความต่างศักย์ดังนี้คือ

ความต่างศักย์หรือแรงดันอย่างก้าวสูงสุดที่ร่างกายจะทนได้ (Maximum tolerable step voltage)

$$E_{\text{step}} = (1000 + 6P_s) \frac{0.116}{\sqrt{T}} \quad (2.6)$$

ความต่างศักย์หรือแรงดันสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายสามารถจะทนได้ (Maximum tolerable touch voltage)

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1.5P_s) \frac{0.116}{\sqrt{T}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้

โดยปกติค่า E_{step} จะมีค่าสูงกว่า E_{touch} นั่นก็คือการสัมผัสแบบ step จะเกิดอันตรายน้อยกว่าการสัมผัสแบบ touch ในสภาวะที่มีกระแสผิดปกติเดียวกัน นอกจากนี้ถ้าพื้นผิวของสถานีถูกโรยด้วยหินละเอียดหรือสารอื่น ๆ ที่มีความต้านทานจำเพาะสูงปนอยู่ ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นพื้นผิวนั้น ควรจะถูกนำมาใช้คำนวณหาขอบเขตความปลอดภัยตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งมีผลทำให้ขอบเขตความปลอดภัยมีค่าสูงขึ้นด้วย

2.5 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ก่อนที่จะมีการคำนวณเพื่อหาค่าของศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ บนพื้นดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยขณะเกิดความผิดปกติ และก่อนที่จะมีการพิจารณาเกี่ยวกับความปลอดภัยภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น ๆ เราจำเป็นต้องมีการหาข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นเสียก่อน โดยสรุปแล้วข้อมูลที่จำเป็นจะต้องทราบมีดังนี้คือ

1. ความต้านทานจำเพาะของดิน ทั้งที่พื้นผิวและที่ระดับความลึกที่ตะแกรงต่อลงดินนั้นถูกฝังอยู่
2. ความต้านทานจำเพาะของพื้นผิวพิเศษที่ปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิวดิน
3. ช่วงเวลาประมาณของการเกิดความผิดปกติลงสู่ดิน (Ground fault duration)
4. ความถี่ระบบไฟฟ้า
5. X/R Ratio ของระบบไฟฟ้า
6. ค่า Symmetrical ground fault current สูงสุดในปัจจุบันและต่อไปในอนาคต
7. แบบของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งแสดงถึงขนาดของตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำและระดับความลึกที่แน่นอนในการฝังตัวนำ
8. พิกัดตำแหน่งที่จะคำนวณหาศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน

นอกจากนี้จะต้องมีการคำนวณขอบเขตความปลอดภัย ตามสมการที่ 2.8 และ 2.7 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันสัมผัส และแรงดันย่างก้าวเพื่อพิจารณาถึงความปลอดภัยภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ๆ นั้น

2.6 ความยาวตัวนำน้อยที่สุดที่ใช้

เพื่อเป็นการประหยัดความยาวตัวนำที่นำมาใช้ทำระบบ Grounding ต้องมีค่าน้อยที่สุด และยังให้ความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์

$$L_{min} = \frac{K\rho I\sqrt{T}}{165 + 0.25\rho} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (2.8) ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีในการคำนวณเบื้องต้น

ในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ บนพื้นผิวดินเนื่อง จากอิทธิพลของกระแสฟอลต์ในตะแกรงต่อลงดิน (ground mat) การหาค่าความต้านทานของ ตะแกรงต่อลงดิน การหาค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นบนตะแกรงต่อลงดิน (grid potential rise) การหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (touch voltage) และแรงดันไฟฟ้าย่างก้าว (step voltage) ที่ ตำแหน่งต่าง ๆ จากค่าศักดาไฟฟ้าที่พื้นผิวที่คำนวณมาได้ ตลอดทั้งการหาความยาวของตัวนำทั้งหมดที่น้อยที่สุด ที่ประกอบขึ้นเป็นตะแกรงต่อลงดิน

3.1 สมมติฐานเบื้องต้น

เนื่องจากสภาพพื้นดินโดยทั่วไป มักจะมีเนื้อดินที่ไม่สม่ำเสมอคือ ไม่ได้ประกอบ ด้วยเนื้อดินที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (nonhomogenous) ดังนั้นจึงมีค่าความต้านทานจำเพาะของ ดินไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับระดับความลึกของดิน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายอย่าง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.4 ผลจากความไม่แน่นอนของค่าความต้านทานจำเพาะของดินนี้ ทำให้เกิดปัญหาต่อการวิเคราะห์และการออกแบบระบบกราวด์ เป็นอย่างมาก ทำให้การพิจารณาถึง ความปลอดภัยนั้นก็ยุ่งยากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นในปัจจุบันนี้จึงได้มีการนำเอาสมมติฐานที่ว่าโครงสร้างของดินเป็นแบบหลายชั้นมาช่วยแก้ไขปัญหา ซึ่งในแต่ละชั้นก็จะมีค่าความต้านจำเพาะที่แน่นอนค่าหนึ่งและแตกต่างกันไปจากชั้นอื่น ๆ ในที่นี้จะใช้โครงสร้างพื้นดินแบบสองชั้นเป็นสมมติฐานเบื้องต้นในการคำนวณ โดยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของดินแบบชั้นเดียวได้อีกด้วย

3.2 การคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ บนพื้นผิวดิน

ก่อนที่จะศึกษาถึงการคำนวณทางทฤษฎี จะขอกกล่าวถึงสัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่จะพบในสูตร การคำนวณดังนี้

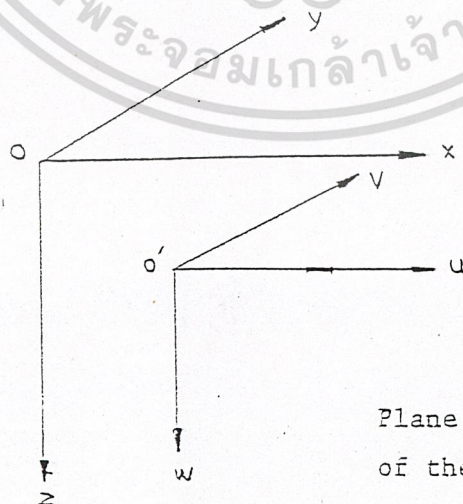
- ρ_1 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นแรก ($\Omega\text{-m}$)
- ρ_2 คือค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่สอง ($\Omega\text{-m}$)
- K คือค่า reflection factor = $[(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)]$
- h คือความสูงของพื้นดินชั้นแรก (m)
- L คือความยาวทั้งหมดของตัวนำของขั้วต่อลงดินที่ถูกฝังดิน (m)
- i คือค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นกระแสเชิงเส้นในขั้วต่อลงดิน (average linear current density = I/L) (A/m)

- I คือกระแสทั้งหมดที่ลงสู่ดินผ่านขั้วต่อลงดิน (A)
 I_j คือกระแสทั้งหมดที่ลงสู่ดินผ่านส่วนย่อย j ของขั้วต่อลงดินนั้น ๆ (A)
 i_j คือค่าความหนาแน่นของกระแสเชิงเส้นในส่วนย่อย j ของขั้วต่อลงดินนั้น ๆ (A/m)
 S_j คือค่าการกระจายความหนาแน่นของกระแสเชิงเส้นในแต่ละส่วนย่อย j ของขั้วต่อลงดินในกรณีพิจารณาว่าการกระจายของกระแสในขั้วต่อลงดินเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (non uniform)
 X, Y, Z คือพิกัดเทียบกับแกนอ้างอิง
 U, V, W คือพิกัดเทียบกับแกนซึ่งสัมพันธ์กับส่วนหนึ่งของขั้วต่อลงดิน
 r คือระยะทางระหว่างจุดหนึ่ง ๆ ในขั้วต่อลงดินกับจุดหนึ่ง ๆ ในพื้นดิน (m)
 m คือจำนวนส่วนย่อย j ของขั้วต่อลงดิน
 e คือความลึกในการฝังตัวนำของขั้วต่อลงดิน (m)
 α คือมุมระหว่างแกน OX และแกน OU (องศา)

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 เราจะยึดเอาสมมติฐานที่ว่าพื้นดินทั่วไปมีโครงสร้างเป็นแบบสองชั้นเป็นพื้นฐานในการคำนวณ ก่อนที่จะไปศึกษาถึงขั้วต่อลงดินที่ใช้ในทางปฏิบัติ จะขอเริ่มศึกษาจากขั้วต่อลงดินที่เป็นแบบจุด (point source electrode) เป็น พื้นฐานเสียก่อน

3.2.1 ขั้วต่อลงดินแบบจุด (Point source electrode)

พิจารณาขั้วต่อลงดิน ซึ่งมีขนาดเล็กจนเสมือนกับเป็นจุด (Point source electrode) ซึ่งมีพิกัดเป็น (X_j, Y_j, Z_j) เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง X, Y, Z และเมื่อเทียบกับระบบพิกัด U, V, W ขั้วต่อลงดิน j นี้ จะตั้งอยู่บนแกน U ตามรูปที่ 3.1



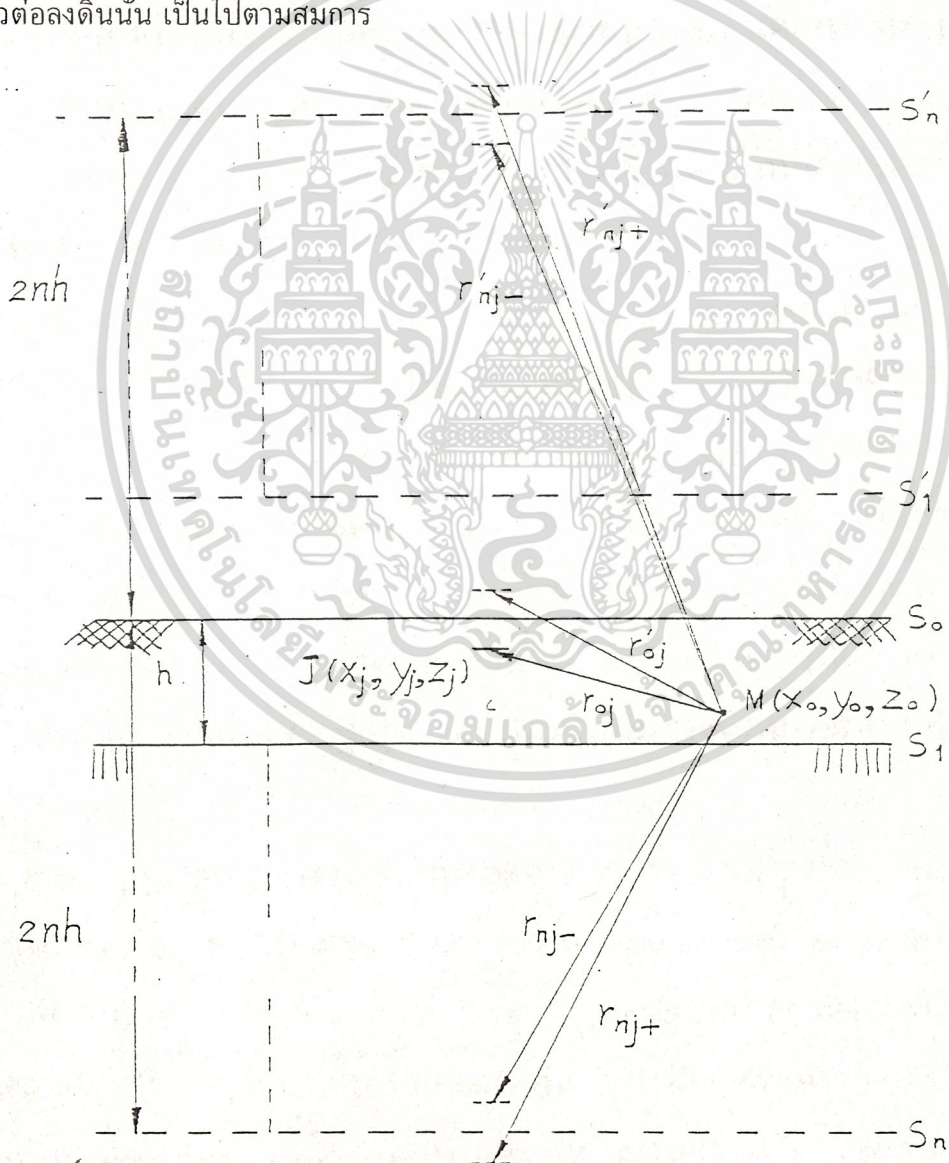
Plane xoy is the surface
of the earth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ารูปที่ 3.1 ขั้วต่อลงดินแบบจุด (Point source electrode) ในโครงสร้างพื้นดินแบบสองชั้น

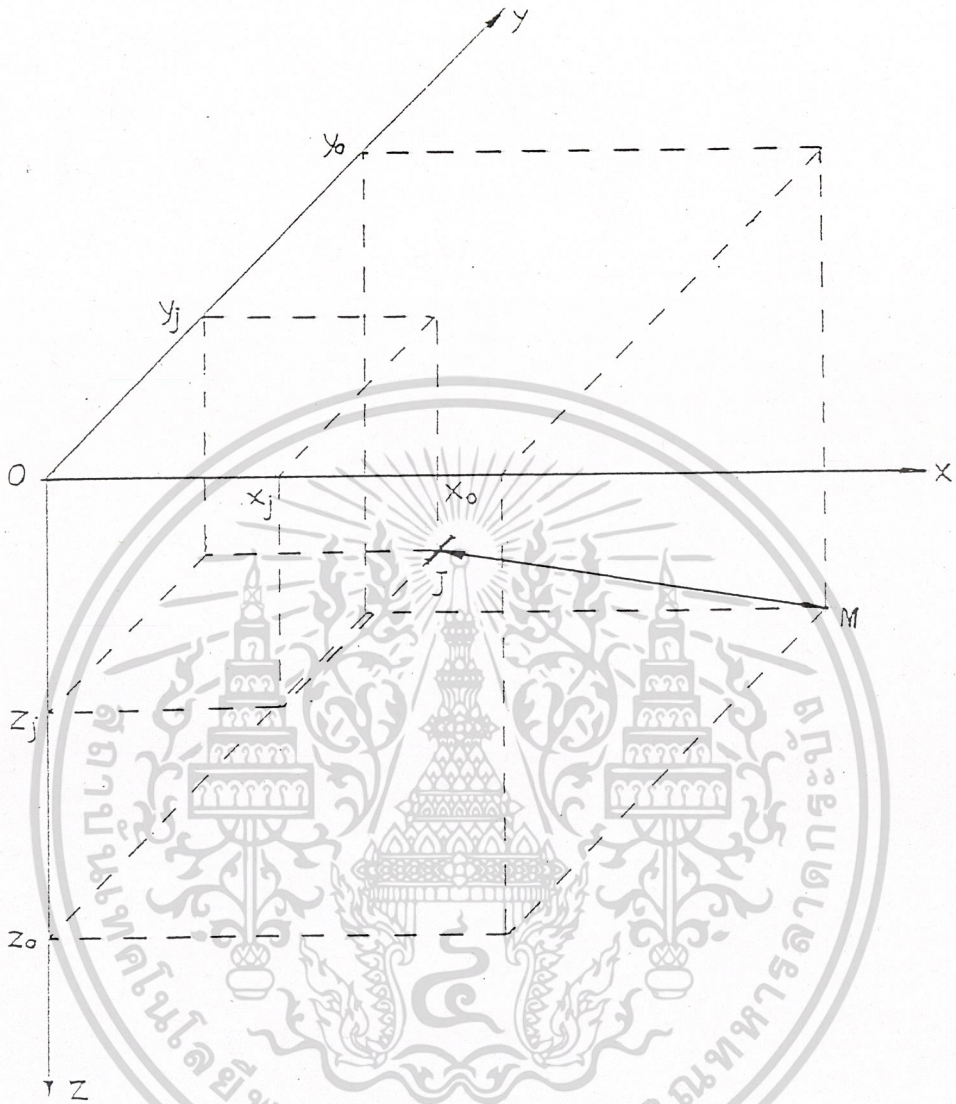
ขั้วต่อลงดินนี้ จะมีกระแสซึ่งมีขนาดเท่ากับ I_j ไหลผ่านลงสู่ดิน ถ้าความยาวของขั้วต่อลงดินนี้เท่ากับ du ดังนั้น จะได้ว่า

$$I_j = i_j du \quad (3.1)$$

ตามรูปที่ 3.2 และ 3.3 จุด M เป็นจุดใดๆที่อยู่ภายในพื้นดิน โดยที่จุด M นี้มีพิกัดเป็น (X_0, Y_0, Z_0) สำหรับระบบพิกัด X, Y, Z และ (U_0, V_0, W_0) สำหรับระบบพิกัด (U, V, W) ศักตาไฟฟ้าที่จุด M สามารถคำนวณได้โดยวิธีอิมเมจ (Method of image) ซึ่งสามารถจะแสดงได้ว่าศักตาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ที่ตั้งอยู่บนพื้นดินชั้นบนสุดของโครงสร้างพื้นดินแบบสองชั้นเนื่องมาจากขั้วต่อลงดินนั้น เป็นไปตามสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.2 วิธีอิมเมจ (Method of image)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 พิกัดของขั้วต่อลงดิน j และพิกัดของจุด M

$$dV_j = \frac{\rho_{ij} du}{4\pi} \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right) \right] \quad (3.2)$$

โดยที่:

$$\begin{aligned} r_{oj} &= \left[(X_j - X_o)^2 + (Y_j - Y_o)^2 + (Z_j - Z_o)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{oj} &= \left[(X_j - X_o)^2 + (Y_j - Y_o)^2 + (Z_j + Z_o)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 r_{nj+} &= \left[(X_j - X_0)^2 + (Y_j - Y_0)^2 + [2nh + (Z_j + Z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
 r_{nj-} &= \left[(X_j - X_0)^2 + (Y_j - Y_0)^2 + [2nh - (Z_j + Z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
 r'_{nj-} &= \left[(X_j - X_0)^2 + (Y_j - Y_0)^2 + [2nh - (Z_j - Z_0)]^2 \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

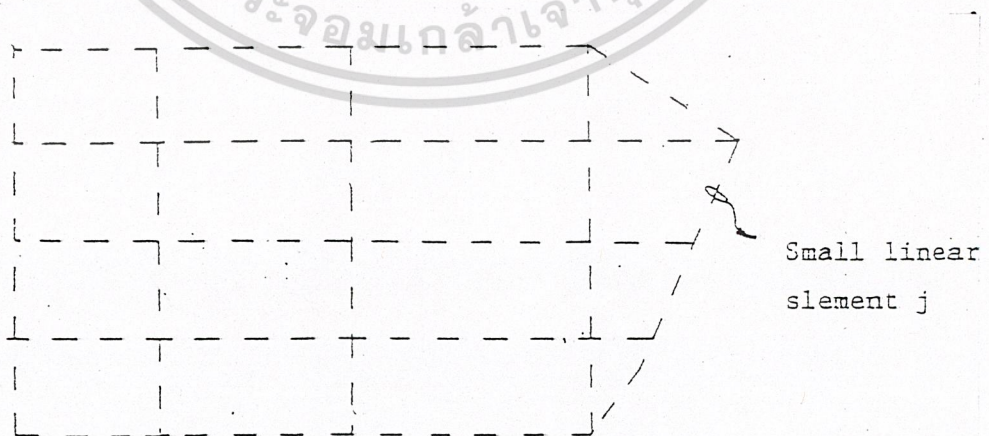
3.2.2 ขั้วต่อลงดินที่ใช้ในทางปฏิบัติ (Practical electrode)

ขั้วต่อลงดินที่นิยมใช้งานจริงในสถานีจ่ายไฟฟ้าขอยอนั้นจะเป็นตะแกรงต่อลงดิน (Ground grid) ซึ่งอาจมีการเพิ่มกราวด์รอต (Ground rod) เข้าไปหรือไม่ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบความปลอดภัย โดยที่การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ นี้ สามารถหาได้ 2 วิธี คือ วิธีผลรวม (Summation method) และวิธีอินทิเกรชัน (Integration method)

3.2.2.1 วิธีผลรวม (Summation method)

ในกรณีที่ขั้วต่อลงดินที่ใช้นั้นมีขนาดใหญ่และมีรูปร่างที่ซับซ้อน ดังเช่นขั้วต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขอยอนทั่วไป สมการที่ (3.2) นั้นไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นขั้วต่อลงดินที่จะนำมาศึกษาและคำนวณนั้น จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ ทั้งหมด m ส่วน (1, 2, ..., m) ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งส่วนเล็กๆ นี้ จะมีค่าความยาวเท่ากันตลอดโดยมีค่าความยาวเท่ากับ du จากการแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ นี้ ก็จะสามารถนำสมการที่ (3.2) มาประยุกต์ใช้ได้ และเมื่อผ่านกระแส I_j ลงสู่ดิน จะได้ว่า

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_j + \dots + I_m \tag{3.4}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 วิธีผลรวม (Summation method) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าให้ความยาวทั้งหมดของตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็นตะแกรงต่อลงดิน มีค่าเท่ากับ L ดังนั้นเราจะได้ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นกระแสเชิงเส้น (average Linear current density) ใน ขั้วต่อลงดินมีค่าเป็น

$$i = \frac{I}{L} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.1) คูณด้วย $\frac{i}{i}$ จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_j = \left(\frac{i_j}{i} \right) i du = S_j i du \quad (3.6)$$

แทนค่า I_j จากสมการที่ (3.6) และแทนค่า $I = iL$ จากสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.4) จะ ได้

$$I = \left(\sum_{j=1}^m S_j \right) i du \quad (3.7)$$

เนื่องจาก $L/du = m$ ดังนั้น

$$\sum_{j=1}^m S_j = m \quad (3.8)$$

S_j คือ ค่าตัวประกอบซึ่งนำมาพิจารณาถึงการกระจายกระแสอย่างไม่สม่ำเสมอในตัวนำ ของขั้วต่อลงดิน ถ้าหากที่ตั้งของขั้วต่อลงดินที่เป็นทางกลับของกระแส (Return current electrode) อยู่ไกลจากขั้วต่อลงดินหลักนั้น ค่า S_j นี้จะขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของขั้วต่อลงดิน หลักนั้นเพียงอย่างเดียว ในทางปฏิบัติค่า Phase to ground fault ที่รุนแรงที่สุดมักจะเกิดใน บริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย ภายใต้สภาวะอันนี้การกระจายกระแสจะมีมากในตัวนำซึ่งอยู่ใกล้กับ ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติมากที่สุด ดังนั้นค่า S_j นั้นสามารถหาได้โดยให้สอดคล้องกับสมการที่ (3.8) รูปร่างของขั้วต่อลงดิน และความใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติได้ดังต่อไปนี้

$$S_j = a \frac{d_{cj}}{d_{fj}} \quad (3.9)$$

ซึ่ง a คือ ค่าคงที่ที่เลือกให้สอดคล้องกับสมการที่ (3.8)

d_{cj} คือ ระยะระหว่าง Element j และศูนย์กลางของขั้วต่อลงดิน (ผลของรูปร่างของขั้วต่อลงดิน)

d_{fj} คือ ระยะระหว่าง Element j และตำแหน่งของ Fault (ผลของความใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิด Fault)

เอกสารถ้าเราสมมุติว่าการกระจายกระแสในขั้วต่อลงดินนั้น เป็นแบบสม่ำเสมอ แล้วจะได้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งให้ $S_j = 1$ สำหรับ $j = 1, 2, \dots, m$ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นศักดาไฟฟ้าที่จุด M ใด ๆ ที่อยู่บนพื้นดินชั้นบนสุด (ชั้นแรก) จะเป็นผลรวมของ ศักดาไฟฟ้าเนื่องจากแต่ละส่วนย่อย j ที่มีกระแส I_j ไหลผ่าน ดังนั้น

$$V = \frac{\rho I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m S_j \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right) \right] du \quad (3.10)$$

ความถูกต้องของวิธีผลรวม (summation method) นี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อแบ่งขั้วต่อลงดินให้มี ส่วนย่อย j มากยิ่งขึ้น

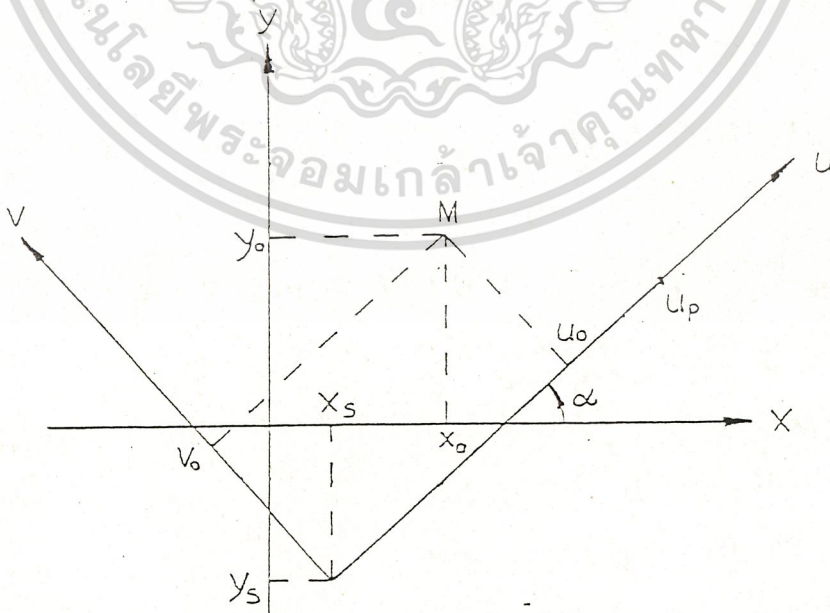
3.2.2.2 วิธีอินทิเกรชัน (Integration method)

สำหรับระบบต่อลงดินแบบแผ่นรองต่อลงดิน (ground mat) นั้น การคำนวณหาค่าศักดา ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ โดยอาศัยวิธีอินทิเกรชันนี้ จำเป็นต้องมีการสมมติว่า

- ขั้วต่อลงดินนั้นประกอบขึ้นมาจากตัวนำที่เป็นเส้นตรง มาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันใน ลักษณะของตะแกรง
- ความหนาแน่นของกระแสในตัวนำที่เป็นเส้นตรงเหล่านั้นสม่ำเสมอเท่ากัน ทุกตัวนำ ($S_j = 1$)

3.2.2.2.1 กรณีของตัวนำที่เป็นเส้นตรงเส้นเดียวอยู่ในแนวระดับ

จากข้อสมมติข้างต้น เราจะพิจารณาถึงผลของตัวนำที่เป็นเส้นตรงเส้นเดียวโดด ๆ ซึ่งถูกฝังอยู่ในแนวระดับเท่ากับตลอดแนวของตัวนำนั้น และมีความหนาแน่นของกระแสสม่ำเสมอเสียก่อน ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำอยู่ในแนวระดับ (เมื่อมองจากมุมบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 ตัวนำเส้นตรงอยู่ในแนวระดับถูกฝังอยู่ที่ความลึก e ในชั้นแรกของพื้นผิวดิน ตัวนำนี้จะอยู่บนแกน U ของระบบพิกัด U, V, W เมื่อเทียบกับระบบพิกัด X, Y, Z จะเป็นดังนี้คือ

ตารางที่ 3.1 การเทียบระบบพิกัด XYZ กับระบบพิกัด UVW

ระบบ XYZ	ระบบ UVW	รายละเอียด
X_s, Y_s, Z_s	U_s, V_s, W_s	จุดเริ่มของตัวนำ
X_p, Y_p, Z_p	U_p, V_p, W_p	จุดปลายของตัวนำ

โดยที่ $V_s = V_p = W_s = W_p = 0$; $Z_s = Z_p = e$;
และสำหรับระบบพิกัด U, V, W มักจะถูกเลือกให้ $U_s = 0$

ศักดาไฟฟ้าที่จุด $M(U_0, V_0, W_0)$ เนื่องมาจากตัวนำส่วนเล็กๆ dU ตามรูปที่ 3.6 หาได้โดยอาศัยวิธีอิมเมจ (image of method) เช่นเดียวกัน วิธีอินทิเกรชันนี้อาศัยการอินทิเกรตสมการที่ (3.2) โดยเทอม r ทั้งหมดในสมการที่ (3.3) นี้ จะต้องแสดงในรูปฟังก์ชันของ U, V, W โดยจัดให้พิกัด X, Y, Z มีความสัมพันธ์กับพิกัด U, V, W (ตามรูปที่ 3.6 และ 3.7) ดังต่อไปนี้

พิจารณาส่วนย่อย j ที่พิกัด (X_j, Y_j, Z_j) และพิจารณาจุด M ที่พิกัด (X_0, Y_0, Z_0) เมื่อเปลี่ยนเป็นระบบพิกัด U, V, W จะได้

$$\begin{aligned}
 X_j &= U \cos \alpha - V \sin \alpha + X_s \\
 Y_j &= U \sin \alpha + V \cos \alpha + Y_s \\
 Z_j &= W + Z_s \\
 X_0 &= U_0 \cos \alpha - V_0 \sin \alpha + X_s \\
 Y_0 &= U_0 \sin \alpha + V_0 \cos \alpha + Y_s \\
 Z_0 &= W_0 + Z_s
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

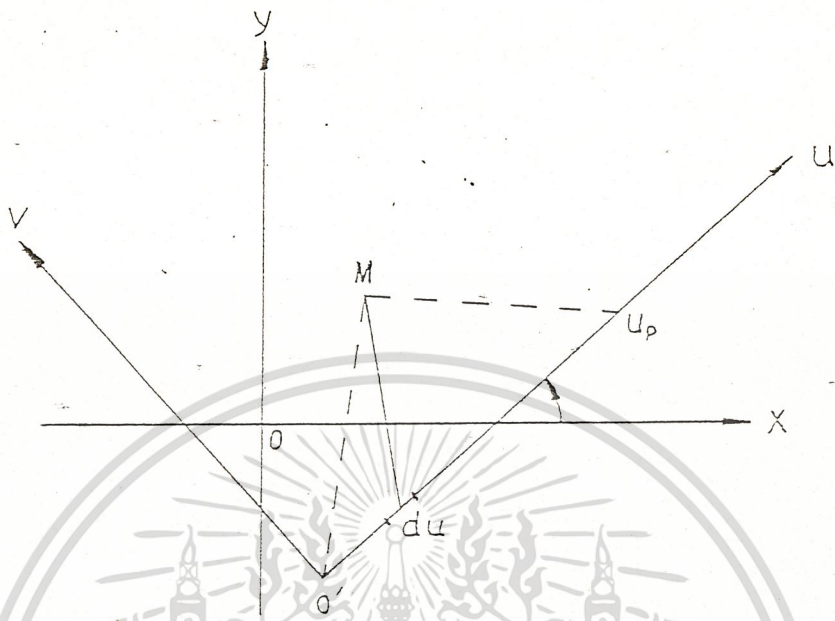
โดยที่

$$\begin{aligned}
 V &= 0, W = 0 \\
 Z_s &= Z_p = e
 \end{aligned}$$

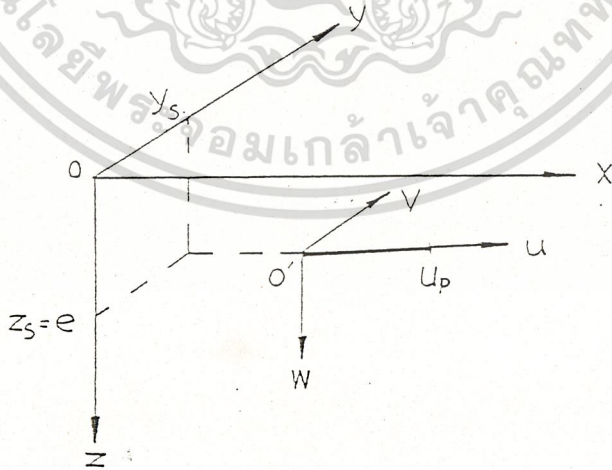
โดยการแทนค่า X_j, Y_j, Z_j และ X_0, Y_0, Z_0 ที่ได้จากสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.3) จะได้

$$\begin{aligned}
 r_{0j} &= \left[[(U \cos \alpha - V \sin \alpha + X_s) - (U_0 \cos \alpha - V_0 \sin \alpha + X_s)]^2 \right. \\
 &\quad + [(U \sin \alpha + V \cos \alpha + Y_s) - (U_0 \sin \alpha + V_0 \cos \alpha + Y_s)]^2 \\
 &\quad \left. + [(W + Z_s) - (W_0 + Z_s)]^2 \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ [(U - U_0) \cos \alpha + V_0 \sin \alpha]^2 + [(U - U_0) \sin \alpha - V_0 \cos \alpha]^2 + [W_0]^2]^{\frac{1}{2}} ซึ่งขึ้นด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำอยู่ในแนวระดับ



รูปที่ 3.7 วิธีอินทิเกรชันในกรณีตัวนำอยู่ในแนวระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อแจกจ่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{oj} = \left[\left[(U - U_0)^2 \cos^2 \alpha + 2(U - U_0)V_0 \sin \alpha \cos \alpha + V_0^2 \sin^2 \alpha \right] \right. \\ \left. + \left[(U - U_0)^2 \sin^2 \alpha - 2(U - U_0)V_0 \sin \alpha \cos \alpha + V_0^2 \cos^2 \alpha \right] + [W_0]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r_{oj} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + W_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ในทำนองเดียวกันก็จะได้

$$r_{oj} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + W_0^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{oj} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + (W_0 + 2Z_s)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj+} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh + W_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.12) \\ r'_{nj+} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh + W_0 + 2Z_s)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r_{nj-} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh - W_0 - 2Z_s)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r'_{nj-} = \left[(U - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh - W_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ (3.2) ใหม่ในเทอมของ r ที่แสดงอยู่ในสมการที่ (3.12)

ได้ดังนี้

$$dV = \theta(W_0) + \theta(W_0 + 2Z_s) \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\theta(W_0) = \frac{\rho_1 idu}{4\pi} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{(U - U_0)^2 + V_0^2 + W_0^2}} \right) \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{(U - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh + W_0)^2}} \right) \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{(U - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh - W_0)^2}} \right) \right] \quad (3.14)$$

สำหรับค่า $\theta(W_0 + 2Z_s)$ ก็หาได้เช่นเดียวกับสมการ (3.14) เพียงแต่แทนค่า W_0 ด้วย $W_0 + 2Z_s$ ดังนั้นศักดาไฟฟ้าทั้งหมดที่จุด M เนื่องมาจากตัวนำเส้นหนึ่ง ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $V = \int_{U_s=0}^{U_p} \theta(W_0) \cdot du + \int_{U_s=0}^{U_p} \theta(W_0 + 2Z_s) \cdot du$ นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณินไปใช้ (3.15)

โดยที่

$$\int_0^{U_p} \theta(W_0) = \frac{\rho_1 i}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{(U_p - U_0) + \sqrt{(U_p - U_0)^2 + V_0^2 + W_0^2}}{-U_0 + \sqrt{U_0^2 + V_0^2 + W_0^2}} \right) \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left(\frac{(U_p - U_0) + \sqrt{(U_p - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh + W_0)^2}}{-U_0 + \sqrt{U_0^2 + V_0^2 + (2nh + W_0)^2}} \right) \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left(\frac{(U_p - U_0) + \sqrt{(U_p - U_0)^2 + V_0^2 + (2nh - W_0)^2}}{-U_0 + \sqrt{U_0^2 + V_0^2 + (2nh - W_0)^2}} \right) \right] \quad (3.16)$$

สำหรับ $\int_0^{U_p} \theta(W_0 + 2Z_s)$ สามารถหาได้โดยการแทนที่ W_0 ในสมการที่ (3.16) ด้วยค่า $W_0 + 2Z_s$ ดังนั้น V สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่มีสัญลักษณ์ง่าย ๆ ดังนี้

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left[\Phi(U_p, U_0, V_0, W_0) + \Phi(U_p, U_0, V_0, (W_0 + 2Z_s)) \right] \quad (3.17)$$

โดยที่ U_p, U_0, V_0, W_0 มีความสัมพันธ์กับพิกัด X, Y, Z ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} U_p &= (X_p - X_s) \cos \alpha + (Y_p - Y_s) \sin \alpha \\ U_0 &= (X_0 - X_s) \cos \alpha + (Y_0 - Y_s) \sin \alpha \\ V_0 &= (Y_0 - Y_s) \cos \alpha - (X_0 - X_s) \sin \alpha \\ W_0 &= Z_0 - Z_s \\ \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{Y_p - Y_s}{X_p - X_s} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

แต่เนื่องจากขั้วต่อลงดินที่ใช้กันในทางปฏิบัตินั้นประกอบขึ้นจากการเอาตัวนำที่เป็นเส้นตรงมาเชื่อมต่อกันเข้าเป็นลักษณะตะแกรง ดังนั้นศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุด M เนื่องจากขั้วต่อลงดินดังกล่าวนี้เป็นผลรวมของศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำแต่ละเส้นนั้น ถ้าขั้วต่อลงดินนั้นประกอบด้วยตัวนำที่เป็นเส้นตรงจำนวน m ตัวนำ ซึ่งแต่ละเส้นสามารถแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ $1, 2, 3, \dots, j, \dots, m$ ตามลำดับ เราจะหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุด M หาได้ดังต่อไปนี้คือ

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \left[\Phi_j(U_p, U_0, V_0, W_0) + \Phi_j(U_p, U_0, V_0, (W_0 + 2Z_s)) \right] \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2.2 กรณีของตัวนำที่เป็นเส้นตรงเส้นเดียวและไม่อยู่ในแนวระดับ

จากรูปที่ 3.8 เราเลือกใช้ระบบโคออร์ดิเนต UVW ดังนั้นตัวนำจึงอยู่ในระนาบ UO'V จุดเริ่มต้นของโคออร์ดิเนต UVW คือ ตำแหน่ง X_S, Y_S, Z_0 (จุด M อยู่ในระนาบ UO'V) ดังนั้น

$$U_S = V_S = 0$$

$$V_P = 0$$

$$W_S = Z_S - Z_0$$

$$W_P = Z_P - Z_0$$

ศักดาไฟฟ้าเนื่องจากตัวนำนี้ที่จุด $M(U_0, V_0, 0)$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นตัวนำในแนวระดับ (Horizontal conductor) บนแกน O'U ที่จุด $M'(U_0', V_0', 0)$ ดังนั้นจึงได้คุณลักษณะใหม่ของตัวนำเชิงเส้นสมมูลย์คือ

$$U_S' = V_S' = W_S' = 0$$

$$V_P' = W_P' = 0$$

$$W_0' = W_0 = 0$$

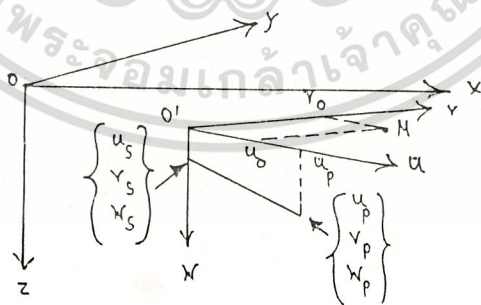
$$U_P' = \sqrt{U_P^2 + (W_P - W_S)^2}$$

และโคออร์ดิเนตของจุด M' ใหม่คือ

$$U_0' = [U_P U_0 + W_S (W_S - W_P)] / U_P'$$

$$V_0' = [(U_0)^2 + (V_0)^2 + (W_S)^2 - (U_0')^2]^{1/2}$$

$$W_0' = W_0 = 0$$



รูปที่ 3.8 วิธีการอินทิเกรชันในกรณีที่ตัวนำไม่ได้อยู่ในแนวระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน

(Grid potential rise)

ให้ตัวนำของตะแกรงต่อลงดินมีรัศมีเท่ากับ a หาค่าของศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ (V_j) ซึ่งอยู่ห่างจากศูนย์กลางของตัวนำเป็นระยะทางเท่ากับ a ดังนั้นจะหาค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดินได้ดังสมการ

$$\text{GPR} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \quad (3.20)$$

โดยที่ N คือ จำนวนจุดทั้งหมดที่มีการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้า ซึ่งค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ดังกล่าวนั้นจะสามารถคำนวณได้โดยอาศัยวิธีการ Summation หรือวิธีการ Integration

3.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

(Grid resistance)

จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) $R = V/I$ ดังนั้น เราสามารถหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน เมื่อ I คือ ค่ากระแสผิดปกติที่ลงสู่ดิน ได้ดังสมการ

$$R = \frac{\text{GPR}}{I} \quad (3.21)$$

3.5 การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

(Touch voltage)

สามารถจะคำนวณหาได้จาก ผลต่างของศักดาไฟฟ้าที่โครงสร้างหรือที่โครงของอุปกรณ์ซึ่งถูกต่อลงดินกับศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ บนพื้นผิวดิน (V_s) สำหรับศักดาไฟฟ้าที่โครงสร้างหรือที่โครงของอุปกรณ์ซึ่งถูกต่อลงดินนั้น อาจจะพิจารณาได้ว่าเป็นศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน (GPR) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Touch voltage} = \text{GPR} - V_s \quad (3.22)$$

สำหรับกรณีที่รุนแรงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสซึ่งก็คือความต่างศักย์ระหว่างจุดที่อยู่ที่ศูนย์กลางของ Mesh กับจุดที่อยู่บนโครงสร้างหรือโครงอุปกรณ์ (โดยที่โครงสร้างนั้นถูกต่อลงดินไว้) แรงดันไฟฟ้าอันนี้เรียกว่า Mesh voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว (Step voltage)

สามารถคำนวณได้จากผลต่างของศักดาไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดใด ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น ๆ ซึ่งโดยมากมักจะกำหนดระยะห่างระหว่างจุดสองจุดนั้นเท่ากับ 1 เมตร

3.7 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในกรณีที่โครงสร้างพื้นดินเป็นแบบสมมาตร

สำหรับโครงสร้างของพื้นดินในประเทศไทยนั้น มักจะมีชั้นดินพื้นผิวที่หนามากและเนื้อดินก็มักจะไม่แตกต่างกันมากนัก จนอาจจะสมมุติได้ว่าเป็นเนื้อเดียวกันตลอด และมีค่าความต้านทานจำเพาะค่าเดียวโดด ๆ การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ โดยอาศัยวิธีผลรวมและวิธีอินทิเกรชัน (Summation and Integration method) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาดัดแปลงใช้กับโครงสร้างพื้นดินแบบสมมาตรนี้ได้

จากการที่พื้นดินมีค่าความต้านทานจำเพาะค่าเดียวโดด ๆ ดังนั้นค่าของ Reflection factor (K) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่า

- สำหรับวิธีผลรวม (Summation method) สมการที่ (3.10) จะกลายเป็น

$$V = \frac{\rho I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m S_j \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} \right] du \quad (3.23)$$

- สำหรับวิธีอินทิเกรชัน (Integration method) สมการที่ (3.19) จะกลายเป็น

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \left[\ln \left(\frac{(U_p - U_o) + \sqrt{(U_p - U_o)^2 + V_o^2 + W_o^2}}{-U_o + \sqrt{U_o^2 + V_o^2 + W_o^2}} \right) + \ln \left(\frac{(U_p - U_o) + \sqrt{(U_p - U_o)^2 + V_o^2 + (W_o + 2Z_s)^2}}{-U_o + \sqrt{U_o^2 + V_o^2 + (W_o + 2Z_s)^2}} \right) \right] \quad (3.24)$$

ส่วนการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน แรงเคลื่อนไฟฟ้าสัมผัสแรงเคลื่อนไฟฟ้าอย่างก้าว ความต้านทานของขั้วต่อลงดิน ก็สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีเดียวกันกับโครงสร้างพื้นดินแบบสองชั้น เพียงแต่เปลี่ยนสูตรการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าที่จุดใด ๆ มาเป็นสูตรตามสมการข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีหาค่าการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Multistep Method)

4.1 กล่าวนำ

การแก้ปัญหาของระบบกราวน้ออย่างถูกต้อง ต้องคำนึงถึงค่าการกระจายของกระแสในขั้วต่อลงดิน (Grounding electrode) ทั้งหมด ซึ่งก็คือ ต้องรู้ค่าการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Current density distribution factor : S_j) ในทุก ๆ ตัวนำ j ที่แบ่งย่อยบนขั้วต่อลงดิน (Grounding electrode)

ดังนั้น สำหรับระบบกราวนที่ซับซ้อน (Complex electrode) และฝังอยู่ในพื้นดินแบบไม่สม่ำเสมอ (Non uniform soil) จะต้องเลือกวิธีซึ่งมีการคำนวณไม่ยุ่งยากมากนัก และหาค่าได้อย่างถูกต้อง โดยใช้เวลาในการคำนวณไม่มากเกินไป นอกจากนี้ ควรใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้ด้วย ซึ่งวิธีการที่จะกล่าวถึงนี้ ไม่เพียงแต่ใช้หาค่าการกระจายของกระแส (Current distribution) สำหรับระบบกราวนที่แยกโดด ๆ (Isolated electrode) เท่านั้น แต่ยังใช้กับระบบกราวนแบบโครงข่าย (Interconnected complex electrode) ได้อีกด้วย

การหาค่าการกระจายของกระแส (Current distribution) ตามขั้วต่อลงดิน (Grounding electrode) นั้น โดยทั่วไปจะเป็นการประมาณค่า ซึ่งก็มีหลายวิธีที่จะใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับระบบกราวนแบบโครงข่าย (Interconnected electrode) และส่วนมากจะสมมุติว่า กระแสไหล (Injected) เข้าไปในระบบกราวนที่จุดศูนย์กลางทางไฟฟ้า (Electrical center) ของระบบกราวนนั้น ๆ และกระจายออกจากจุดนั้นในทุกทิศทาง ดังนั้น จะได้ค่าการกระจายกระแสเชิงเส้น (S_j) ของแต่ละตัวนำ j เทียบกับจุดศูนย์กลางทางไฟฟ้าของระบบกราวนนั้น ๆ สำหรับปริปัญหานี้ฉบับนี้จะใช้วิธี Multistep Analysis เนื่องจากเป็นวิธีไม่ซับซ้อน ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และมีความแม่นยำสูง

ก่อนที่จะศึกษาถึงการคำนวณทางทฤษฎี จะขอกล่าวถึงสัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่จะพบในสูตรการคำนวณดังนี้

- n : จำนวนของตัวนำเส้นตรงย่อย ๆ (Straigth conductor) ทั้งหมดในขั้วต่อลงดิน
- L : ความยาวทั้งหมดของขั้วต่อลงดิน (m)
- I : Injected current (A)
- l_j : ความยาวของตัวนำ j (m)
- i : Linear current density (A/m)
- S_j : Current density distribution factor ของตัวนำ j

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{ij} : ศักดาเนื่องจากตัวนำ i ที่จุด j หรือค่าเฉลี่ยของศักดาเนื่องจากตัวนำ i ไปตามตัวนำ j (V)

R : ความต้านทานของขั้วต่อลงดิน (Electrode) (ohm)

Z : Impedance (ohm)

4.2 การคำนวณหาค่าการกระจายของกระแส

(Current Distribution)

กำหนดให้ศักดาไฟฟ้า เนื่องจากตัวนำเส้นตรงในแนวนอนที่ฝังอยู่ในพื้นดินแบบสองชั้น (Two layer) แทนด้วยสัญลักษณ์ V

ในการคำนวณ สามารถแบ่งออกเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1. กรณีของระบบกราวด์ที่แยกโดด ๆ (Isolated electrode) คือ ระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) หนึ่ง ๆ ซึ่งแยกออกมาเดี่ยว ๆ โดยไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยอื่น ๆ ซึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยในเมืองไทยทั้งหมดเป็นแบบนี้

2. กรณีของระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected electrode) คือ การนำระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ มาเชื่อมต่อกัน จนกลายเป็นระบบกราวด์ขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นกรณีที่ปริญญาโทฉบับนี้กำลังศึกษาอยู่

4.2.1 กรณีของระบบกราวด์ที่แยกโดด ๆ

(Isolated grounding electrode)

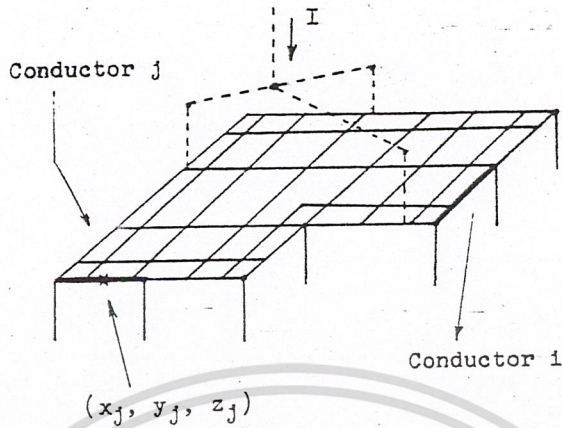
พิจารณาระบบกราวด์ที่แยกโดด ๆ (Isolated grounding electrode) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวนำ j ทั้งหมด n ตัวนำ ($j=1, \dots, n$) และฝังอยู่ในพื้นดินแบบสองชั้น (Two-layer)

ในการศึกษาถือว่าส่วนของตัวนำตรง j มีความยาวน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวทั้งหมดของขั้วต่อลงดิน ($l_j \ll L$)

ให้ x_j, y_j, z_j คือ Coordinate ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละตัวนำ j และ V_{ij} คือค่าศักดาไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำเนื่องจากตัวนำ i ที่จุด x_j, y_j, z_j ซึ่งจุดนี้จะอยู่ที่ผิวของตัวนำ ให้ i_i คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสเชิงเส้น (Linear current density) ของตัวนำ i และ I คือกระแสทั้งหมดที่ไหลเข้าไปในระบบกราวด์แล้วไหลลงสู่ดิน ถ้าให้ S_j คือ ค่าการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Current density distribution) ในตัวนำ

ในการคำนวณ เราจะแบ่งตัวนำของระบบกราวด์ (Grounding electrode) ทั้งหมดออกเป็นตัวนำเส้นตรงย่อย ๆ (Straigth conductor) จำนวน n ตัวนำ ซึ่งเราจะกำหนดชื่อของตัวนำด้วยตัวเลข 1 จนถึง n หรือเรียกว่า ตัวนำ j ($j=1, \dots, n$) จากนั้นถ้าต้องการหาค่าการกระจายความหนาแน่นของกระแสที่ตัวนำใดก็กำหนดให้ตัวนำนั้นเป็นตัวนำ i ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ระบบกราวด์ที่แยกโดดๆ
(Isolated grounding electrode)

ดังนั้น
$$i_i = S_i \frac{I}{L} \tag{4.1}$$

ค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏบนตะแกรงกราวด์ซึ่งฝังอยู่ในแนวนอนในพื้นดินแบบสองชั้น (Two-layer) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ V คือค่า Grid potential rise (GPR) ดังนั้น สามารถเขียนสมการของโวลต์เตจได้ดังนี้ (ไม่คิดค่า Voltage drop ในตัวนำของตะแกรงกราวด์)

$$S_1 V_{1j} + S_2 V_{2j} + \dots + S_i V_{ij} + \dots + S_n V_{nj} = V \tag{4.2}$$

และเนื่องจาก

$$l_1 + l_2 + \dots + l_i + \dots + l_n = L$$

ดังนั้น เขียนสมการของกระแสได้ดังนี้ คือ

$$i_1 l_1 + i_2 l_2 + \dots + i_i l_i + \dots + i_n l_n = I \tag{4.3}$$

แทนค่า i_i จากสมการที่ (4.1) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูช่างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$l_1 \left(S_1 \frac{I}{L} \right) + l_2 \left(S_2 \frac{I}{L} \right) + \dots + l_i \left(S_i \frac{I}{L} \right) + \dots + l_n \left(S_n \frac{I}{L} \right) = I$$

$$S_1 I_1 + S_2 I_2 + \dots + S_i I_i + \dots + S_n I_n = L \quad (4.4)$$

วิธีการ Multistep Analysis นี้ จะทำให้จำนวน Unknown ในสมการลดลง โดยใช้หลักการที่ว่า ความต้านทานของตะแกรงกราวน์ จะไม่ขึ้นอยู่กับการกระจายกระแสในตะแกรงกราวน์ และศักดาไฟฟ้าของตัวนำ j ที่ถูกเหนี่ยวนำเนื่องจากตัวนำ i นั้น จะไม่ขึ้นอยู่กับการกระจายกระแสในตัวนำ i ด้วยเช่นกัน

ดังนั้น แทนที่จะแบ่งตัวนำของตะแกรงกราวน์ ออกเป็น n ส่วน ก็ให้แบ่งตะแกรงกราวน์ ออกเป็น 2 ส่วนแทน คือ

- ตัวนำที่จุดซึ่งต้องการหาค่าศักดาไฟฟ้า
- ตัวนำที่เหลือทั้งหมดให้เป็นตัวนำ r

ถ้าต้องการหาค่าศักดาไฟฟ้าของตัวนำ (1) ที่จุด (x_1, y_1, z_1) ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางโดยคิดที่ผิวของตัวนำ (1) ดังนั้น ตัวนำที่เหลือ [ตัวนำ (2) ถึง (n)] จะกำหนดให้เป็นตัวนำ r_1 เมื่อเทียบกับตัวนำ (1)

สมการ (4.2) , (4.4) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$S_1 I_1 + (L - I_1) S_{r1} = L \quad (4.5)$$

$$S_1 V_{11} + S_{r1} V_{r1} = V = IR \quad (4.6)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานของ Ground mat

จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$S_{r1} = \frac{L - S_1 I_1}{L - I_1}$$

แทน S_{r1} ในสมการ (4.6) จะได้

$$S_1 = \left(\frac{\alpha_1 V - V_{r1}}{\beta_1 V_{11} - V_{r1}} \right) \gamma_1$$

เมื่อ $\alpha_1 = (L - I_1) / L$; $\beta_1 = (L - I_1) / I_1$; $\gamma_1 = L / I_1$;

$$V_{r1} = \sum_{j=1}^n V_{j1} - V_{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการหาค่าการกระจายความหนาแน่นของกระแส ที่จุดอื่นๆ $(1, \dots, n)$ โดยคิดที่จุดศูนย์กลางของตัวนำ จะหาได้จากสมการ

$$S_i = \gamma_i \left(\frac{\alpha_i V + V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) \quad (4.7)$$

เมื่อ $\alpha_i = (L-l_i) / L$; $\beta_i = (L-l_i) / l_i$; $\gamma_i = L / l_i$;

$$V_{ii} = \sum_{j=1}^n V_{ji} - V_{ii}$$

จากสมการที่ (4.4)

$$\sum_{j=1}^n S_j l_j = L$$

แทนค่า S_j จากสมการที่ (4.7) ในสมการที่ (4.4) จะได้

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i \left[\frac{\alpha_i V + V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right] (l_i) = L$$

แทนค่า γ_i :

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{L}{l_i} \right) \left[\frac{\alpha_i V + V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right] (l_i) = L$$

เนื่องจาก L เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะได้

$$L \sum_{i=1}^n \left[\frac{\alpha_i V + V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right] = L$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อนุญาตเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\alpha_i V}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right] + \sum_{i=1}^n \left[\frac{V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right] = 1$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} 1 + \beta_i &= \gamma_i \\ \gamma_i - \beta_i &= 1 \\ \gamma_i V_{ii} - \beta_i V_{ii} &= V_{ii} \end{aligned}$$

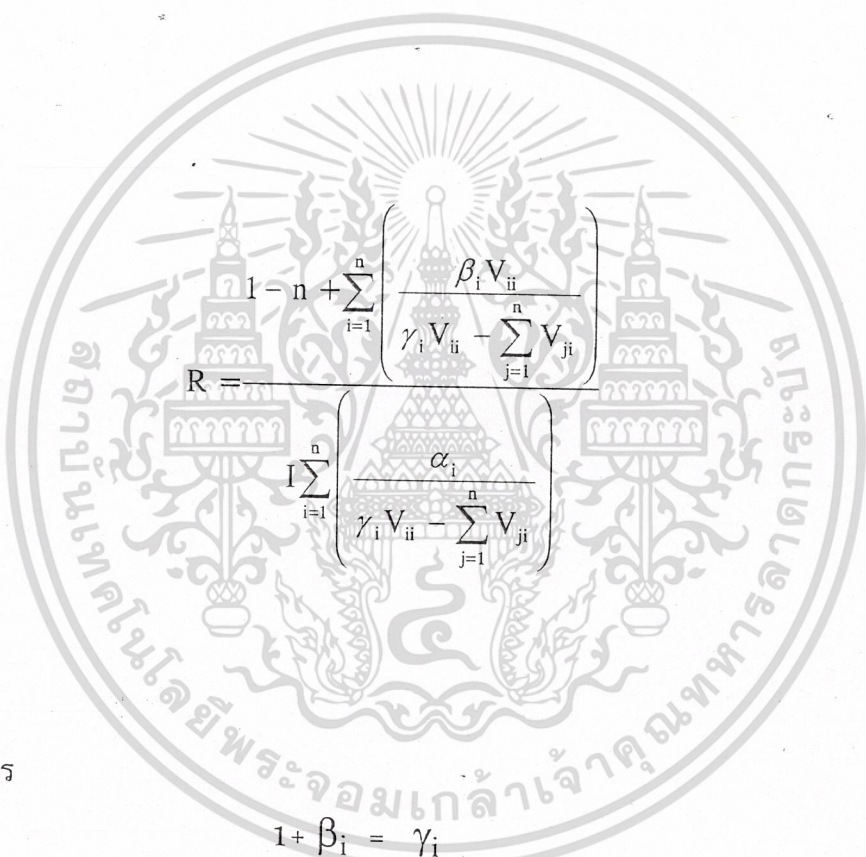
และเนื่องจาก V เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} V \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) &= 1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\gamma_i V_{ii} - \beta_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) \\ V \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) &= 1 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) \\ V \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) &= 1 - n + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = IR = \frac{1 - n + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right)}$$

ดังนั้น



$$R = \frac{1 - n + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right)}{I \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right)}$$

(4.8)

จากสมการ

$$\begin{aligned} 1 + \beta_i &= \gamma_i \\ \gamma_i - \beta_i &= 1 \\ \gamma_i V_{ii} - \beta_i V_{ii} &= V_{ii} \end{aligned}$$

แทนในสมการ (4.7) จะได้

$$S_i = \gamma_i \left[\frac{\alpha_i V + (\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}) - \beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right]$$

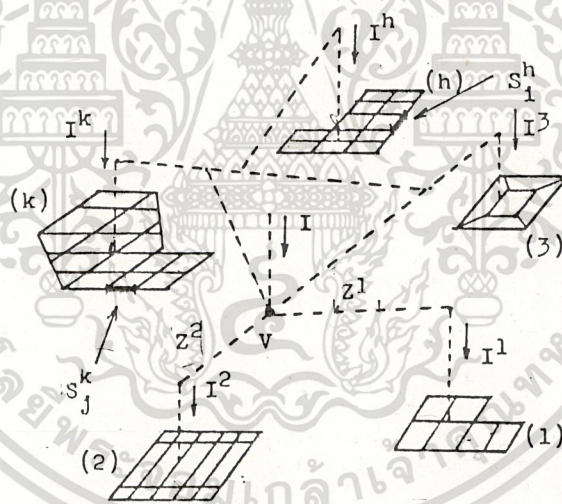
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_i = \gamma_i \left[1 + \frac{\alpha_i V - \beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right] \quad (4.9)$$

4.2.2 กรณีของระบบกราวด์แบบโครงข่าย

(Interconnected electrode)

สำหรับระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected electrode) นั้น จะเชื่อมต่อกันด้วย Overhead ground wire (หรือ Sheath ของ Underground cable) ซึ่งในกรณีนี้ จะเกิด Voltage drop ขึ้น อันเนื่องมาจากมีการไหลของ Zero sequence fault current ใน Ground wire และเนื่องจาก Ground wire โดยปกติจะมีความยาวมาก ทำให้ค่าของ Voltage drop มีค่ามากด้วย ดังนั้น เราจึงต้องคิดผลจาก Voltage drop ด้วย



รูปที่ 4.2 ขั้วต่อลงดินแบบโครงข่าย
(Interconnected Electrodes)

จากรูปที่ 4.2 ให้ I เป็นกระแสทั้งหมดที่ไหลสู่กลุ่มของระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected electrode k โดยที่ $k=1, \dots, t$) และ I^k เป็นกระแสทั้งหมดที่ไหลลงสู่ดิน โดยผ่านทางอิเล็กโทรด k จึงเขียนได้เป็น

$$\sum_{k=1}^t I^k = I \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวทั้งหมดของอิเล็กโทรด k ที่ฝังอยู่ในดิน ให้เป็น L^k และ ความยาวทั้งหมดของระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected grounding network) เป็น L ดังนั้น

$$\sum_{k=1}^t L^k = L \quad (4.11)$$

ในการหาตัวประกอบการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Linear current density factor) สำหรับพื้นที่ของระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected grounding) ทั้งหมด (S_a) และตัวประกอบการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Linear current density factor) สำหรับแต่ละอิเล็กโทรด (S_c) จะยึดหลัก 2 ประการ คือ

- * การหา Electrical center
- * การเลือกความสัมพันธ์สำหรับ Linear current distribution ที่เหมาะสม

ในขั้นตอนแรกระบบกราวด์แบบโครงข่ายจะพิจารณา เป็น Unique electrode ที่มีความยาว L และมีกระแสไหล I สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้ (ใช้ผลที่ได้จากกรณีแรก)

$$R = \frac{1-t + \sum_{k=1}^t \frac{\beta^k \Phi_{kk}}{\gamma^k \Phi_{kk} - \sum_{h=1}^t \Phi_{hk}}}{I \sum_{k=1}^t \frac{\alpha^k}{\gamma^k \Phi_{kk} - \sum_{h=1}^t \Phi_{hk}}} \quad (4.12)$$

และ

$$S^k = \gamma^k \left[1 + \frac{\alpha^k V - \beta^k \Phi_{kk}}{\gamma^k \Phi_{kk} - \sum_{h=1}^t \Phi_{hk}} \right] \quad (4.13)$$

เมื่อ $\gamma^k = L/L_k$; $\beta^k = (L-L^k)/L^k$; $\alpha^k = (L-L^k)/L$

R เป็นความต้านทานทั้งหมดของระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected grounding network)

Φ_{hk} เป็นค่าศักดาไฟฟ้า ซึ่งจะถูกเหนี่ยวนำจากอิเล็กโทรด h ที่จุดศูนย์กลางของอิเล็ก

โทรด k โดยการสมมติว่า การกระจายกระแสในอิเล็กโทรด h เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_k เป็นตัวประกอบการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Current distribution factor) ของอิลเลคโตรด k
 Φ_{hk} จึงเขียนได้เป็น

$$\Phi_{hk} = \sum_{j_h=1}^{n_h} V_{j_h k} \quad (4.14)$$

ในขั้นตอนที่สอง จะพิจารณาเฉพาะอิลเลคโตรด k เท่านั้น ความยาวทั้งหมดของอิลเลคโตรด k ที่ฝังอยู่ เป็น L^k และกระแสทั้งหมด เป็น I^k จะได้

$$S_{i_k}^k = \gamma_{i_k}^k \left(1 + \frac{\alpha_{i_k}^k V^k - \beta_{i_k}^k V_{i_k i_k}}{\gamma_{i_k}^k V_{i_k i_k} - \sum_{j_k=1}^{n_k} V_{j_k i_k}} \right) \quad (4.15)$$

ซึ่ง

$$I^k = S^k I^k / L$$

เมื่อ

$$V = IR \text{ ดังนั้น}$$

$$V^k = V - Z^k I^k$$

$$V^k = RI - Z^k S^k L^k I / L$$

Z^k เป็นค่า Impedance ของ ground wire จากจุดที่กระแส I ของระบบไหล (Injected) เข้าสู่ระบบกราวนด์แบบโครงข่าย (Interconnected ground electrode) จนถึงตะแกรงกราวนด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย k

ดังนั้นตัวประกอบการกระจายความหนาแน่นของกระแส (Current distribution factor) ของ ตัวนำเส้นตรง i (Straight conductor i) ของอิลเลคโตรด k เป็น

$$S_{i_k}^k = \gamma_{i_k}^k \left(1 + \frac{\alpha_{i_k}^k (RI - Z^k S^k L^k I / L) - \beta_{i_k}^k V_{i_k i_k}}{\gamma_{i_k}^k V_{i_k i_k} - \sum_{j_k=1}^{n_k} V_{j_k i_k}} \right) \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 .ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected Ground System)

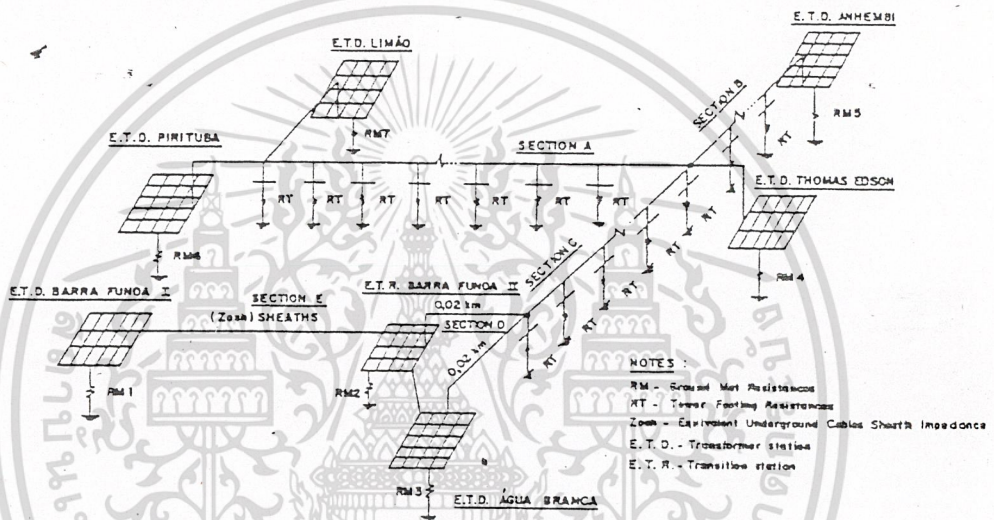
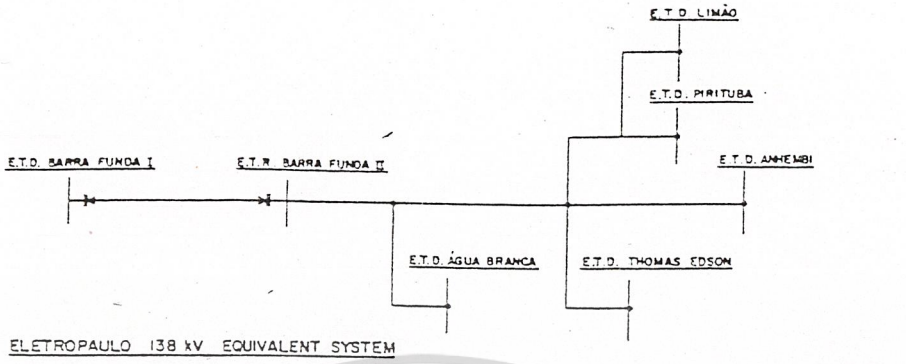
ระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected Ground System) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมต่อตะแกรงกราวด์ (Ground mat) ของสถานีไฟฟ้าย่อยตั้งแต่สองแห่งเข้าด้วยกัน ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันได้หลายวิธีดังนี้

- 1) ใช้สายกราวด์ (Ground wire) ของสายส่งที่เดินลอยในอากาศ (Transmission line)
- 2) ใช้ตัวนำทองแดง (Interconnecting copper conductor)
- 3) ใช้ปลอก (Sheath) ของสายส่งใต้ดิน (underground cable)

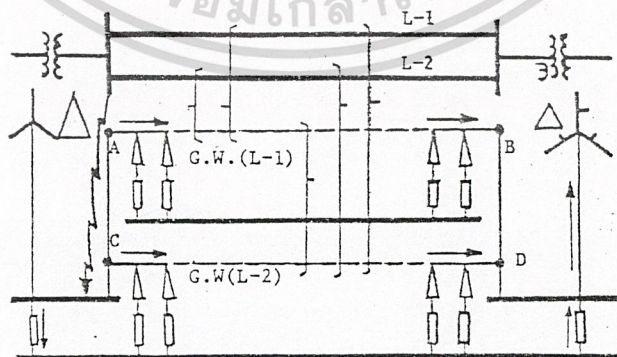
เมื่อเชื่อมต่อตะแกรงกราวด์ (Ground mat) เข้าด้วยกันก็จะเกิดเป็น ระบบกราวด์ (Grounding system) ขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ดังนั้นพฤติกรรมของตะแกรงกราวด์ในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยหนึ่งๆ จะมีอิทธิพลอย่างมากกับตะแกรงกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยอื่นๆ จึงทำให้ระบบกราวด์ทั้งหมดต้องถูกศึกษาอย่างละเอียด

ระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected Ground System) จะสามารถเขียนเป็นวงจรกราวด์ที่สมบูรณ์ (Complete Ground circuit) ได้ โดยการแทนตะแกรงกราวด์ของแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยความต้านทานแบบกลุ่ม (Lumped resistance) และแทนวงจรกราวด์ (Ground circuit) ด้วยวงจร π (Cascaded Pi) สำหรับสายกราวด์ของ Transmission line จะเฉลี่ยประมาณ 4 วงจร π ต่อหนึ่งกิโลเมตร (เท่ากับ 8 อิลิเมนต์ต่อ 1 กิโลเมตร) สำหรับตัวนำของสายส่งใต้ดิน (Underground conductor) จะประมาณ 10 วงจร π ต่อ 1 กิโลเมตร (20 อิลิเมนต์ต่อ 1 กิโลเมตร) ซึ่งอิลิเมนต์เหล่านี้จะทำให้เกิดคัปปลิงร่วม (Mutual coupling) ระหว่างเฟสกับวงจรกราวด์ (ตัวอย่างเช่น Ground wire, Underground conductor) และยังคงเกิดคัปปลิงร่วม (Mutual coupling) ระหว่างคู่ของวงจรกราวด์อีกด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 5.2

การวิเคราะห์วงจรกราวด์ที่สมบูรณ์ (Complete Ground circuit) จะสามารถทำได้โดย "วิธีตัดเบิ้ล (Decoupled Method)" ซึ่งทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงจนเหลือวงจรลดรูปขั้นสุดท้าย (Final reduced circuit) การคำนวณหาค่าต่าง ๆ จึงง่ายขึ้น และยังคงใช้หลักการของกระแสหักล้างตนเอง (Self-neutralized current) มาช่วยในการวิเคราะห์วงจรอีกด้วย



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของระบบกราวด์แบบโครงข่าย (Interconnected ground system)



รูปที่ 5.2 การเกิดคัปปลิงร่วม (Mutual coupling) ระหว่างสายเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กับสายกราวด์ และระหว่างสายกราวด์กับสายกราวด์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 Decoupled Method

ขั้นตอนของ "Decoupled Method" ได้แสดงไว้เป็น Step ดังนี้

Step 1 : การเลือก Monitored point

Monitored point คือ จุดต่าง ๆ ซึ่งต้องการรู้ค่าศักดาไฟฟ้าและกระแสที่จุดนั้น ดังนั้น การระบุวงจรเราจึงต้องคง Monitored point ไว้ใน Final reduced circuit การพิจารณาว่าจุดไหน เป็น Monitored point พิจารณาได้ ดังนี้

- จุดที่เลือกให้เป็น Critical fault position
- Substation ที่ต้องการรู้ค่า Transferred potential ระหว่างสอง Substation ใด ๆ
- Substation ที่มีกระแส Fault ไหลผ่าน Transformer neutral

Step 2 : หากกระแส Zero sequence current ที่ไหลใน Phase และที่ไหลผ่าน Transformer neutral Zero sequence current ที่ไหลไปตาม Phase ของ Transmission line หรือ Underground cable มีค่าเท่ากับกระแสที่ผ่าน Transformer neutral ซึ่งกระแสนี้สามารถหาได้จากการคำนวณ Short-circuit current ตามวิธีปกติหรืออาจเขียนเป็น Short-circuit program แล้วใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณก็ได้ ซึ่งในการคำนวณจะไม่คำนึงถึงค่า Transversal impedance ที่ต่อกับ Remote ground (คือไม่คิดค่า Ground mat resistance และ Tower footing resistance) ซึ่งสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีระดับ Voltage มากกว่า 34.5 KV ค่ากระแสที่คำนวณได้โดยตัด Transversal impedance ทิ้ง จะมีความผิดพลาดประมาณ 1-2 %

ในการหาค่า Zero sequence current ของ Transmission lines หรือของ Underground cable จะสามารถหาได้โดยวิธีการทั่วไป แต่ให้รวมผลของ Longitudinal impedance ของ Ground conductor และ Mutual coupling ระหว่าง Phase กับ Ground circuit ไปด้วย (ศึกษาได้จากวิธี Kron Transformation ในหนังสือ "Solution of Large Network by Matrix Method" ของ (Rommer I. Brown)

Step 3 : ลักษณะของ Uniform section ตาม Ground circuit

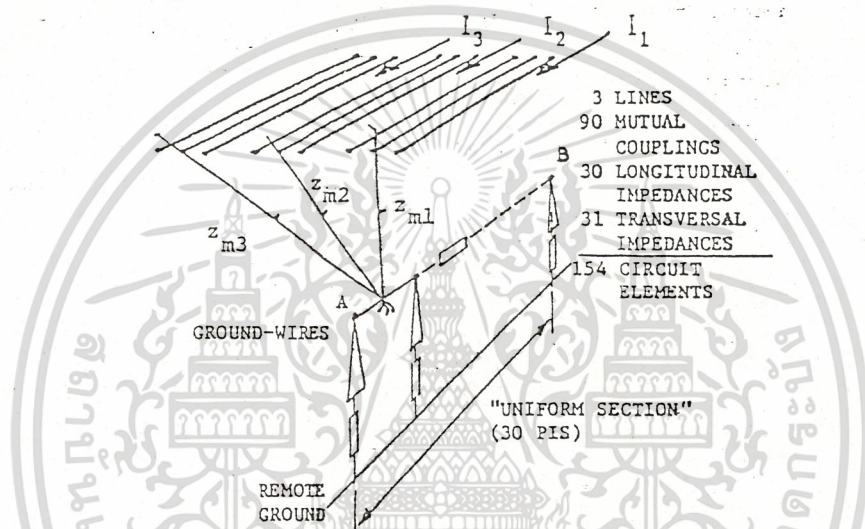
"Uniform section" คือ ส่วนประกอบของ 1 Ground wire หรือส่วนประกอบของ 1 Underground circuit ซึ่งค่า Induced longitudinal voltage เป็นแบบ Uniform โดยค่า Voltage นี้เป็น Voltage ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นตามแนวยาวของ Ground circuit โดยจะตกคร่อมเฉพาะที่ Longitudinal impedance เท่านั้น

ตามรูปที่ 5.3 จะเห็นว่า ส่วนประกอบของ "Uniform section" เกิดจาก Longitudinal impedance กับ Transversal impedance รวมกันเป็น Cascaded π ซึ่งใช้แทน Ground wire ของ transmission line ที่มี 30 Line span ซึ่งอยู่ระหว่างจุด A และ B โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะสมมติให้เป็นแบบ Uniform

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสำนักงานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

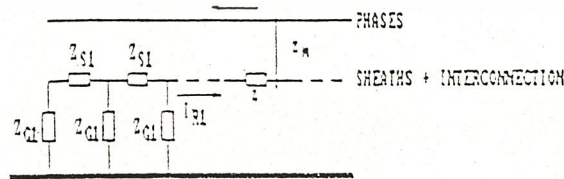
- (Z_1) เป็น self-impedance ของ ground wire ในหน่วย Ω/km
- (Z_{m1}), (Z_{m2}), (Z_{m3}),... เป็น mutual impedance ระหว่างวงจรกราวด์และเฟสของวงจร 1, 2, 3,... (transmission line หรือ underground cable) ในหน่วย Ω/km
- (I_1), (I_2), (I_3) เป็นกระแสลำดับศูนย์ (Zero sequence current) ในหน่วย แอมแปร์ ซึ่งไหลผ่านเฟสของ circuit 1, 2, 3,... (transmission line หรือ underground cable ซึ่งมีผลต่อ "uniform section")

จะเห็นว่าคุณสมบัติของ "uniform section" ไม่ได้กำหนดว่า span length หรือ tower-footing resistance ของ ground wire ต้องเป็น uniform



รูปที่ 5.3 สายกราวด์ที่เป็นส่วนที่สม่ำเสมอ

สำหรับ underground conductor ก็สามารถแทนด้วย "uniform section" ได้ โดยปกติตัวนำเหล่านี้จะมีพารามิเตอร์เป็นแบบกระจาย (distributed parameter) อยู่ใน ladder circuit ซึ่งเราสามารถแทน distributed parameter เหล่านี้ด้วย lumped parameter ทำให้ ladder circuit มีลักษณะเป็น cascade π ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การแทน cable sheath กับ interconnecting

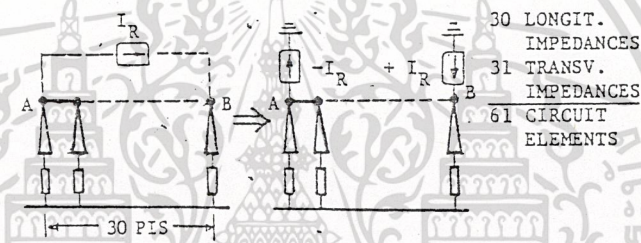
copper conductor ด้วย ladder circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step 4 : การกำจัด Mutual coupling ระหว่างเฟสกับ "uniform section" ของ ground circuit (Decoupling Technique)

กระแสเฟส และ mutual coupling ทั้งหมด ที่อยู่ระหว่าง "uniform section" (A, B) ของ ground circuit กับเฟสของ circuit 1, 2, 3,... (transmission line หรือ underground cable) สามารถแทนได้ด้วย current source (I_R) ที่ต่ออยู่ระหว่าง terminal point (A), (B) ของ "uniform section" ดังรูปที่ 5.5 ซึ่ง current source (I_R) นี้จะให้ผลเช่นเดียวกับผลที่เกิดจากสายเฟสของสายส่ง (lines) และ mutual coupling ดังนั้น lines และ mutual coupling จึงไม่จำเป็นต้องนำมาแสดงอีกต่อไป

จะเห็นว่าการต่อ current source ระหว่างจุด (A) และ (B) เสมือนกับว่ามี 2 current source ต่ออยู่ระหว่างจุด (A) และ (B) กับ remote ground ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การกำจัด Mutual Couplings with Phases

การคำนวณค่า I_R ของแต่ละ "uniform section" สามารถทำได้โดยอิสระจากกัน ดังนี้

$$V_1 = I_1(Z_{m1}) + I_2(Z_{m2}) + I_3(Z_{m3}) + \dots \quad , \text{ในหน่วย V/km} \quad (5.1)$$

$$I_R = \frac{V_1}{Z_1} \quad , \text{ในหน่วย Amperes} \quad (5.2)$$

เมื่อมีเพียง line เดียวเท่านั้นที่มีผลกับ "uniform section" ของวงจรกราวด์ (ground circuit) เราจะได้ว่า

$$V = I_1(Z_{m1}) \quad , \text{ในหน่วย V/km} \quad (5.3)$$

$$I_R = -\frac{V_1}{Z_1} = -\left(\frac{Z_{m1}}{Z_1}\right)I_1 = -\mu I_1 \quad , \text{ในหน่วย Ampere} \quad (5.4)$$

พารามิเตอร์ (μ) จะพบบ่อยมากในการวิเคราะห์สมการที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติของสายกราวด์ (ground wire) μ จะเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีปริมาณของกระแสลำดับศูนย์จำนวนเท่าใด ที่ไหลผ่าน ground wire ซึ่งเรียกกระแสนี้ว่า "self-neutralized current"

สังเกตตัวอย่างในรูปที่ 5.3 และ 5.5 เป็นการเปลี่ยนแปลงวงจรให้ดูง่ายขึ้นโดยการลดจำนวนของ circuit element จาก 154 เป็น 61 ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า "Decoupling technique" ซึ่งเป็น

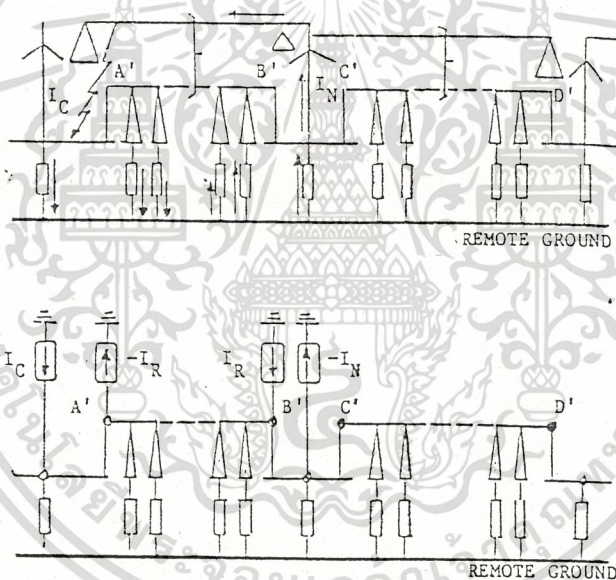
เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นเอกสารอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้

การประยุกต์มาจากทฤษฎีของนอร์ตัน (Norton theorem) โดยเฉพาะ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เห็นว่ามี การแบ่ง Zero sequence current ออกเป็น 2 องค์ประกอบคือ "self-neutralized component" กับ "non-neutralized component" การแบ่งย่อยนี้จะช่วยทำให้เข้าใจผลของคัปปลิงร่วม (mutual coupling) ในระบบกราวนด์ได้ดีขึ้น

terminal point ของ "uniform section" ที่มี current source ต่ออยู่ต้องคงไว้ใน วงจรลดรูปขั้นสุดท้าย (final equivalent circuit) ด้วยเช่นกัน ดังนั้น terminal point จึงเป็น "monitored point" ด้วย

Step 5 : รวม Current source ที่เพิ่มมา เข้าไปใน Ground circuit

ถ้าจุดที่เกิดฟอลต์อยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งมีกระแสฟอลต์นั้นไหลผ่านตัว Transformer neutral ต้องถือว่าจุดนั้นเป็น "Monitored point" ด้วยเช่นกัน ค่ากระแสฟอลต์และกระแสนิว-ทรอลจะถูกแทนด้วย Current source ดังรูปที่ 5.6

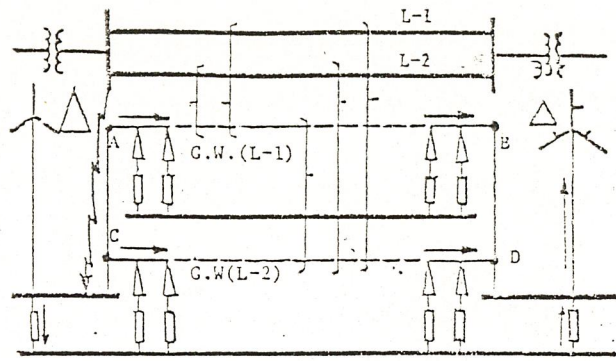


รูปที่ 5.6 การแทนแหล่งจ่ายกระแสเพิ่มเข้าไป : แหล่งจ่ายกระแสผิดปกติ (I_C) และแหล่งจ่ายกระแสนิวทรัล (I_N)

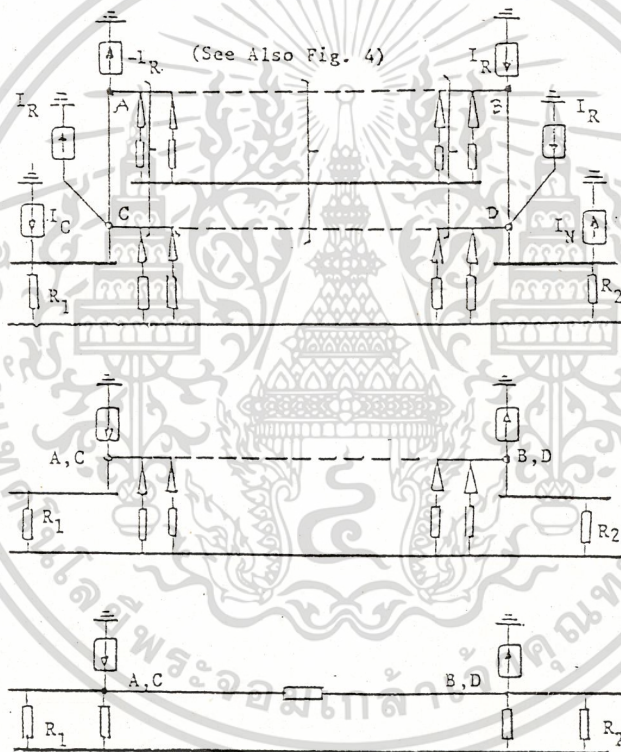
Step 6 : การทำ "Parallel section" ให้อยู่ในรูปที่ง่าย

รูปที่ 5.7 แสดง Coupling ทั้งหมดที่เกิดจาก Parallel transmission line ทั้งสองแนว เมื่อแทน Mutual coupling ระหว่างเฟสกับ Ground circuit ด้วย Current source ก็เหลือเพียง Magnetic coupling อยู่ระหว่างสายกราวนด์ทั้งสอง ดังรูปที่ 5.8

ถ้ามีวงจรกราวนด์ 2 วงจรหรือมากกว่าขนานกันอยู่ และมีฟอลต์เกิดขึ้นที่วงจรใดวงจรหนึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ซึ่งไม่ใช่ที่ตำแหน่ง Critical fault เราจะเรียก วงจรกราวนด์เหล่านี้ว่า "Parallel section" ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

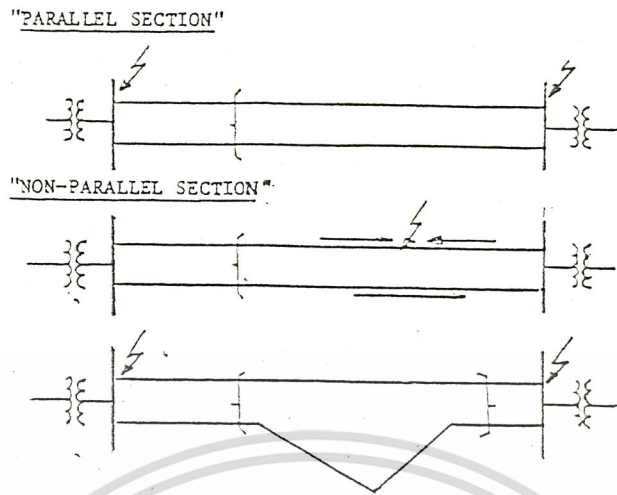


รูปที่ 5.7 สายกราวด์ที่ขนานกัน



รูปที่ 5.8 วงจรสมมูลสำหรับสายกราวด์ที่ขนานกัน

ในกรณีของ "Parallel section" จุดที่ตรงกันทั้งหมดของวงจรกราวด์ (Ground circuit) ทั้งสองวงจรหรือมากกว่า จะประมาณได้ว่ามีค่าศักดาไฟฟ้า (Potential) เท่ากัน ดังนั้นจุดเหล่านี้จึงขนานกันด้วยในทางไฟฟ้า ทำให้สามารถแทนค่าอิมพีแดนซ์ตามยาว (longitudinal impedance) ด้วย Single equivalent circuit ได้ (Kron transformation) ดังรูปที่ 5.8 และค่าอิมพีแดนซ์ตามขวาง (Transversal Impedance) ก็สามารถแทนได้ด้วย Equivalent circuit เช่น-
 เอกสาคนี้ จึงทำให้จำนวนของ circuit element ลดลง ปรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ภาวะอย่างหนึ่งสำหรับส่วนที่มีสายกราวด์ขนานกัน

Step 7 : การแทน Ladder circuit ระหว่างสอง "Monitored point" ด้วย Single equivalent π

เมื่อมีหลายๆ Cascaded π จะทำให้มีลักษณะเป็น Ladder circuit และถ้าไม่มีคัปปลิ่งกับวงจรอื่นๆอีกจะเรียก Ladder circuit นี้ว่า "Decoupled ladder circuit" จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่า "Decoupled ladder circuit" ที่มีหลายๆ Cascaded π อยู่ระหว่างสอง "Monitored point" A, B สามารถแทนได้ด้วย Single equivalent π โดยยังคงค่าการกระจายของกระแส และศักดาไฟฟ้าของ circuit element ที่ไม่ถูกเปลี่ยนแปลง (R_1), (R_2) ไว้เหมือนเดิม ดังนั้นการแทนที่จึงต้องรักษาค่าศักดาไฟฟ้าที่ Node A และ B ไว้คงเดิม

กระบวนการแทนที่ (Replacement process) ที่ได้อธิบายไว้ข้างล่างนี้สามารถนำมาใช้แทนส่วนของวงจรซึ่งเป็นแบบ Uniform หรือ Non-uniform π ก็ได้

(a) สมมติว่า π ทั้งหมดระหว่าง A และ B รวมทั้ง circuit element ที่ต่อจาก A และ B ลงกราวด์ ไม่ต่อเนื่องกับ Original circuit

(b) กำหนดให้กระแส $I = 1.0/\Omega$ A ไหลเข้าสู่ Node A แล้วคำนวณหาค่าโวลต์เดจลัฟท์ (V_A) และ (V_B) ในหน่วย Volt ที่จุด A และจุด B

(c) Equivalent π ถูกเปลี่ยนเป็น Span Impedance (Q) กับค่าของอิมพีแดนซ์ที่ต่อกับกราวด์ (P) จำนวน 2 อีลีเมนต์

ถ้า decoupled ladder circuit เป็นแบบ uniform การหาค่าอิมพีแดนซ์ (P) และ (Q) จะหาได้จากสมการต่อไปนี้ :

$$P = \frac{V_A + V_B}{1.0} \quad \text{ในหน่วย } \Omega$$

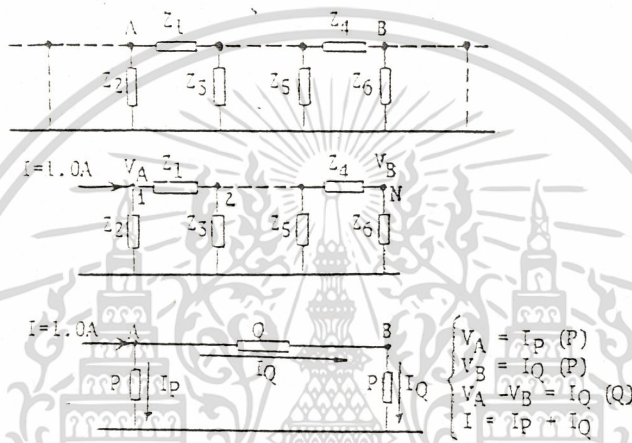
$$Q = \frac{1.0}{P(V_A - V_B)} \quad \text{ในหน่วย } \Omega \quad (5.5)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบ V_B เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการข้างบนได้มาจากการแก้สมการทั้ง 4 สมการข้างล่างนี้พร้อม ๆ กัน

$$\begin{aligned} V_A &= I_p(P), V_B = I_Q(P) \\ V_A - V_B &= I_Q(Q), I = I_p + I_Q \end{aligned} \tag{5.6}$$

กระแส (I_p) และ (I_Q) ถูกระบุไว้ใน equivalent π ดังในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 การแทนวงจรพายหลาย ๆ วงจรให้อยู่ในรูปของวงจรพายเพียงวงจรเดียว

การคำนวณหาค่า (V_A) และ (V_B) สามารถทำได้โดยใช้สูตรข้างล่างนี้ ซึ่งพิสูจน์มาจาก reference [6] จุดต่างๆ ที่อยู่ใน ladder circuit ของรูปที่ 5.10 ให้กำหนดด้วยเลขจาก 1 ถึง N โดย uniform π จะถูกแทนด้วยอิมพีแดนซ์ (Z_S), (Z_G) ในหน่วย Ohm

$$Z_E = \frac{Z_S}{2} + \sqrt{\frac{Z_S^2}{4} + Z_G Z_S} \tag{5.7}$$

$$K = \frac{Z_G}{Z_G + Z_E} \tag{5.8}$$

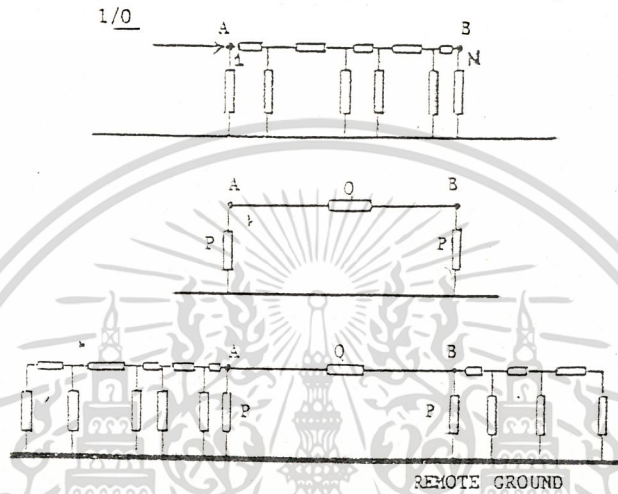
$$A = \frac{K^{2N}}{1 - K^{2N}} \tag{5.9}$$

$$V_n = I Z_G (1 - K) \left[K^{n-1} (1 + A) + \frac{A}{K^n} \right] \tag{5.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ขอไปใช้สำหรับคำนวณหาค่าไฟฟ้าเทียบกับกราวด์ที่จุด n ใดๆ (V_n) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง 1 ถึง N ดังนั้นเมื่อ $n=1$ เราจะได้ (V_A) และเมื่อ $n=N$ จะได้ (V_B)

ถ้า decoupled ladder circuit เป็นแบบ non-uniform π ดังรูปที่ 5.11 ระหว่างจุด (A) และ (B) อันหนึ่งที่แตกต่างกัน ค่าของ (V_A) และ (V_B) สามารถทำได้โดยการแก้ matrix ซึ่งมีจำนวน column เท่ากับจำนวนของ π ที่ถูกแทน โดยการคำนวณจะไม่คิดค่า error propagation



รูปที่ 5.11 วงจรพายสมมูลย์สำหรับวงจรบันไดที่ไม่สม่ำเสมอ

Step 8 : การลดรูปของวงจร เพื่อหาวงจรลดรูปขั้นสุดท้าย (Reduced Equivalent circuit)

การใช้เทคนิคตามที่กล่าวมาแล้วจะทำให้ลดขนาดของวงจรเริ่มต้นลงไปประมาณ 10-60 เท่าและถ้าโครงสร้างของระบบช่วยสนับสนุนให้ไม่มีคัปปลิงระหว่างวงจรกราวด์ (ground circuit) เหลืออยู่ในวงจรขั้นสุดท้าย (final circuit) จะทำให้การยุบวงจรได้ผลดีที่สุดคือ จะมีเพียง "monitored points" เท่านั้นในวงจรลดรูปขั้นสุดท้าย (final equivalent circuit) ดังในรูปที่ 5.12

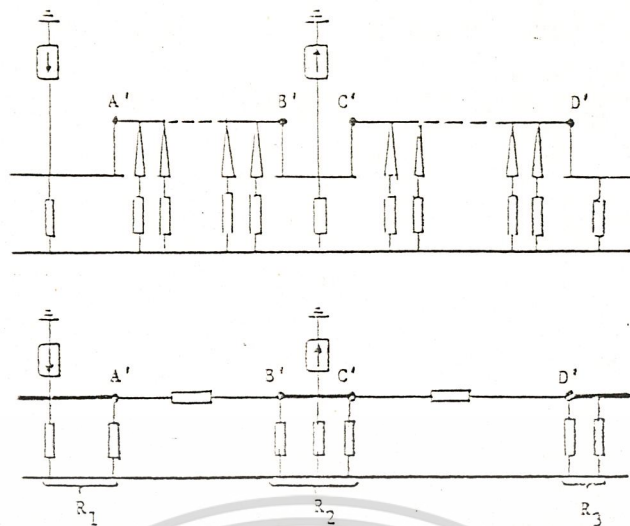
วงจรลดรูป (reduced circuit) สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคเรื่อง matrix โดยไม่ต้องคำนึงถึง error propagation

5.2 การนำผลจากการคำนวณไปใช้

กระแสและศักดาไฟฟ้าที่หามาจาก "monitored points" ก็เพียงพอแล้วที่จะนำไปใช้ในการคำนวณ เพื่อวัตถุประสงค์ในการวางแผนและออกแบบทั้งหมด ตัวอย่างเช่น กระแสที่ไหล (inject) เข้าไปในดินโดยผ่านทางความต้านทานของตะแกรงกราวด์ (ground mat resistance) สามารถนำไปใช้หาระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงกราวด์ (ground mat conductor) ที่จำเป็น

ในการควบคุม "step", "touch" และ "mesh" potential ภายในตะแกรงกราวด์และ potential gradient ใกล้เคียง ตะแกรงกราวด์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 วงจรสมมูลย์ที่ลดรูปจนถึงขั้นสุดท้าย

เมื่อนำกระแสค่าเดียวกันนี้คูณกับความต้านทานของตะแกรงกราวด์ (mat resistance) จะได้ค่า ground potential rise (GPR) ของสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่ง GPR จะมีผลกับเคเบิลที่เข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อย GPR ของ 2 สถานีไฟฟ้าย่อยที่อยู่ติดกันจะสามารถนำไปหาค่า transferred potential ที่มีผลเนื่องมาจากการเชื่อมต่อตะแกรงกราวด์ระหว่าง 2 สถานีไฟฟ้าย่อยโดยสายเคเบิลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การศึกษาระบบกราวด์ขนาดใหญ่โดยใช้คอมพิวเตอร์

การคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งต่อลงดิน ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน และค่าอื่น ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3, 4 และ 5 นั้นจะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ และพิจารณาถึงความปลอดภัยภายในบริเวณ สถานีไฟฟ้าย่อย เนื่องจากว่าวิธีการคำนวณในบทที่ 3, 4 และ 5 นั้นยากต่อการคำนวณด้วยมืออย่างมากอีกทั้งยังอาจทำให้เกิดความสับสน เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ง่าย และยิ่งเสียเวลาในการคำนวณอย่างมากด้วย ข้อดีในการนำเอาคอมพิวเตอร์มาใช้คำนวณคือ จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการคำนวณด้วยมือซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะกล่าวต่อไปนี้

6.1 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณนั้น สามารถจะหามาได้จากข้อมูลบางส่วนที่จำเป็นในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

6.1.1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของพื้นดิน

- ก) ความต้านทานของพื้นดินชั้นแรก
- ข) ความต้านทานของวัตถุที่ขุดพื้นดิน
- ค) ความต้านทานของพื้นดินชั้นสอง (สำหรับโครงสร้างพื้นดินแบบ 2 ชั้น)
- ง) ความหนาของพื้นดินชั้นแรก (สำหรับโครงสร้างพื้นดินแบบ 2 ชั้น)

6.1.2 ข้อมูลเกี่ยวกับตะแกรงต่อลงดิน

- ก) ความยาวทั้งหมดของตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน
- ข) ความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดิน
- ค) ความกว้าง ความยาวของตะแกรงต่อลงดิน
- ง) พิกัดตำแหน่งของตะแกรงต่อลงดิน
- จ) ระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน
- ฉ) เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำของตะแกรงต่อลงดิน

6.1.3 ข้อมูลเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังขณะเกิดความผิดปกติภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

- ก) กระแสผิดปกติลงสู่ดินสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้
- ข) ช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติ
- ค) ระยะห่างระหว่างขั้วต่อลงดินและขั้วที่เป็นทางกลับของกระแส

6.1.4 ข้อมูลเกี่ยวกับวงจรภายนอก (External circuit)

- ก) อิมพีแดนซ์ของเคเบิลชีท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก) อิมพีแดนซ์ของสายดินภายในเสาไฟฟ้า เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ง) ระยะห่างระหว่างเสาไฟฟ้า
- จ) ความสูงของเสาไฟฟ้า
- ฉ) ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ กัน

6.2 ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นที่ 1 การอ่านข้อมูล

ข้อมูลที่ถูกเตรียมขึ้นมาจากหัวข้อที่ 6.1 จะถูกอ่านเข้าไปพร้อมกับตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการคำนวณบางอย่าง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการคำนวณขั้นต่อไป

ขั้นที่ 2 การคำนวณหาขอบเขตของความปลอดภัย

การคำนวณหาขอบเขตความปลอดภัยจะอาศัยสมการที่ 2.6 สำหรับการหาค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวและสมการที่ 2.7 สำหรับการหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสโดยจะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับความต้านทานจำเพาะของวัตถุที่ใช้ปูพื้นผิวดิน และช่วงเวลาของการเกิดความผิดปกติมาคำนวณ โดยค่าแรงดันทั้งสองจะถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าแรงดันทั้งสองที่ได้จากการคำนวณที่จะกล่าวถึงต่อไป

ขั้นที่ 3 การคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการในการวางโพรบศักดาไฟฟ้า

ขั้นที่ 4 การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบกราวด์ขนาดใหญ่ และค่าความต้านทานของระบบกราวด์ขนาดใหญ่ ซึ่งจะใช้วิธีการของอินทิเกรชันในการคำนวณ ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบกราวด์ขนาดใหญ่ จะถูกนำมาใช้คำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตะแกรงต่อลงดิน

ขั้นที่ 5 เปรียบเทียบความยาวของตัวนำที่นำมาใช้ทำตะแกรงต่อลงดินกับค่าความยาวของตัวนำที่น้อยที่สุดที่จะนำมาใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งได้มาจากการคำนวณ

ขั้นที่ 6

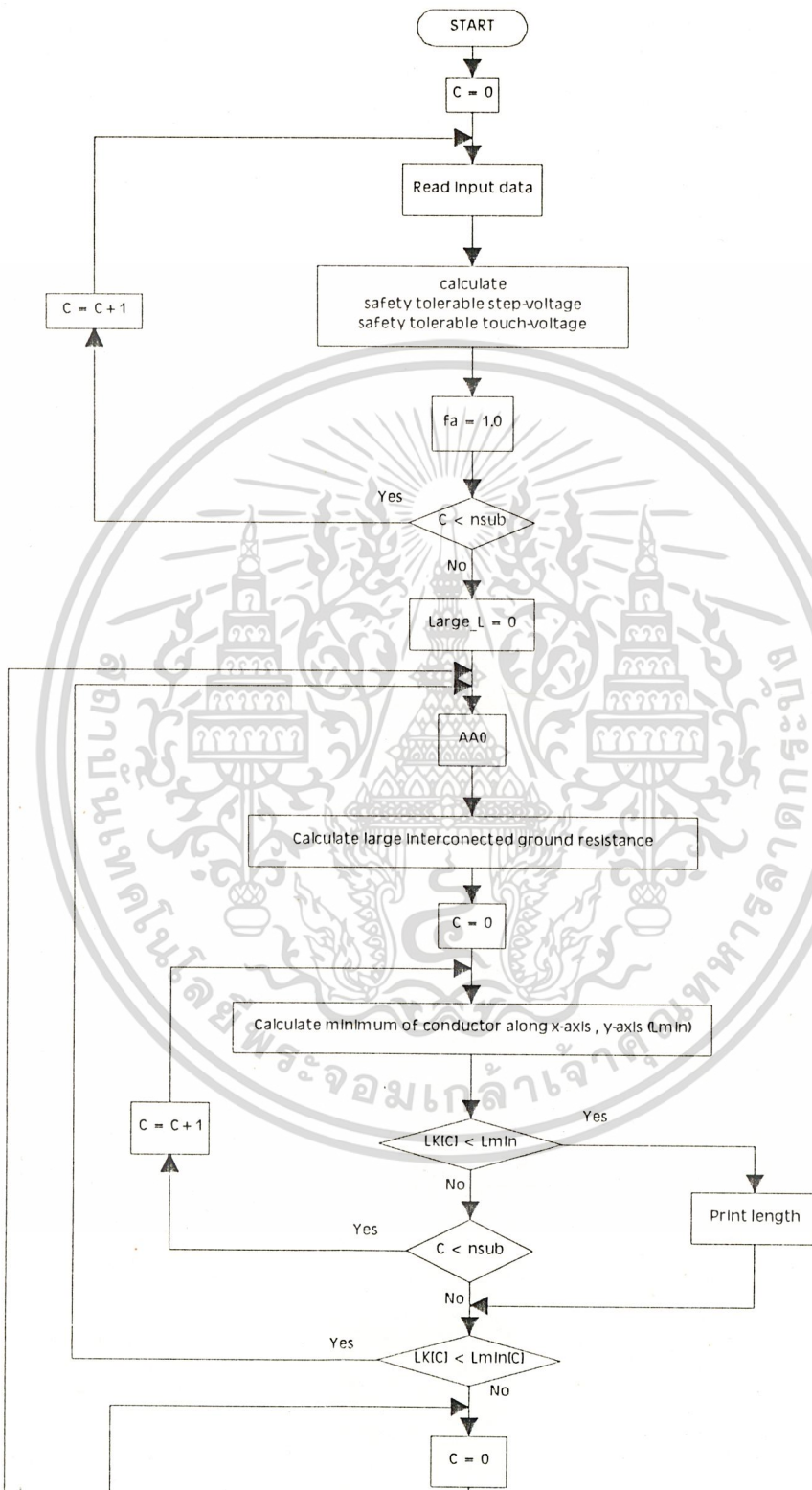
ก) การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ บนพื้นผิวดิน

การคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ บนพื้นผิวดินนั้นสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีผลรวม การคำนวณจะทำได้โดยการกำหนดแนวทิศทางของจุดที่ต้องการคำนวณ และระยะห่างระหว่างจุดนั้น ๆ จะเป็น 1 เมตร

ข) การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

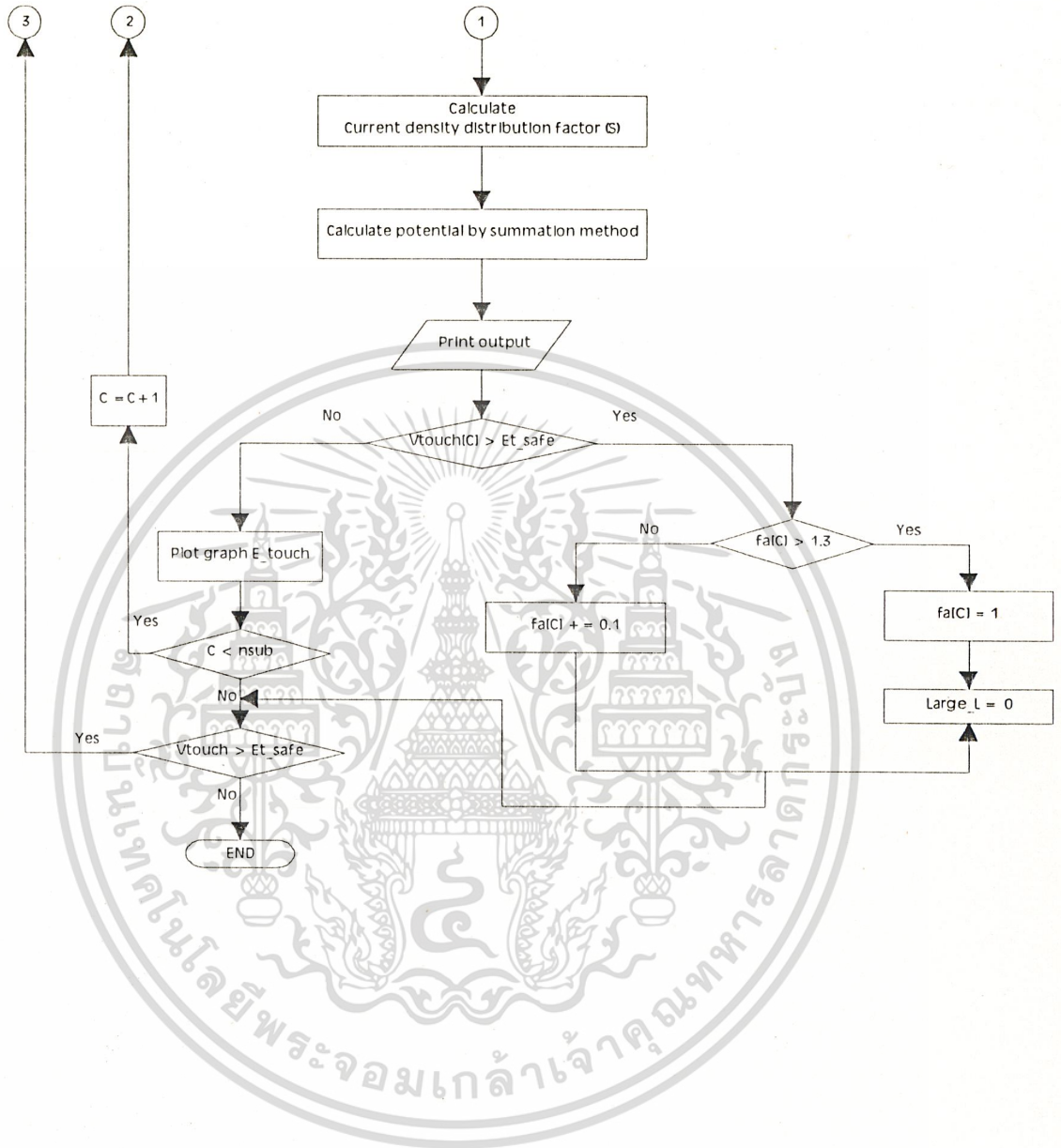
สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสหาได้จากผลต่างของศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดินที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 4 กับศักดาไฟฟ้าที่พื้นผิว ณ ตำแหน่งจุดต่าง ๆ ค่าแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าขอบเขตที่ยอมรับได้ของร่างกายต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ซึ่งคำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2 เพื่อพิจารณาว่าโครงสร้างหรือโครงของอุปกรณ์ที่ถูกต่อลงดินนั้นปลอดภัยต่อการสัมผัสในตำแหน่งที่ยืนอยู่นั้นหรือไม่ ในขณะที่เกิดความผิดปกติลงสู่ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 2 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ผล

จากตัวอย่างที่จะใช้ศึกษา ณ ที่นี้จะมีการสมมติให้สถานีไฟฟ้าย่อยที่จะทำการศึกษานี้มีพื้นที่ครอบคลุมต่อตะแกรงต่อลงดิน โดยจะยึดเอาโครงสร้างของพื้นดินเป็นแบบชั้นเดียว (Uniform Earth Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างของพื้นดินส่วนมากในประเทศไทย วิธีการคำนวณที่เลือกใช้ก็คือวิธีผลรวมกับวิธีอินทิเกรชันที่ได้รับการตัดแปลงมาจากสมมติฐานของโครงสร้างพื้นดินแบบสองชั้น สำหรับการหาค่าแฟลคเตอร์การกระจายกระแสไฟฟ้าจะใช้วิธีมัลติสแต็ป

จากการคำนวณและออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย 3 แห่งซึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 มีพื้นที่ 32.55 x 161.44 เมตร ในสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 2 มีพื้นที่ 72.49 x 72.49 เมตร และสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 3 มีพื้นที่ 32.55 x 161.44 เมตร ในการคำนวณจะมีการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

1. การคำนวณและออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่งนั้นแยกจากกัน คือ ไม่มีการเชื่อมต่อกราวด์เข้าด้วยกัน ซึ่งการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1, 2 และ 3 จะได้ผลดังแสดงใน Appendix-A

2. การคำนวณและออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งเชื่อมต่อตะแกรงต่อลงดินเข้าด้วยกันโดยใช้สายดินที่เดินลอยอากาศ ในกรณีนี้เราสมมติว่าสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1 และ 2 เป็นสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งก่อสร้างเสร็จและใช้งานแล้วแต่สถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 3 ถือว่าเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งใหม่ที่กำลังจะก่อสร้าง ดังนั้นจึงได้เชื่อมต่อตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 3 เข้ากับสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 และ 2 เพื่อประโยชน์ในการถ่ายเทฟอลต์ ซึ่งแสดงผลได้จาก Appendix-B และ Appendix-C

วิเคราะห์จากทดลอง

องค์ประกอบในการวิเคราะห์

1. กระแสฟอลต์ที่ไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดิน
2. ความยาวของตัวนำ
3. ศักดาที่เกิดขึ้นบนผิวตะแกรงต่อลงดิน (GPR)

จากผลการคำนวณที่ได้จะเห็นว่า

1. กระแสฟอลต์ขนาด 35000 แอมแปร์ ที่ไหลลงสู่สถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3 เพียงแห่งเดียว จะเห็นว่าความยาวตัวนำที่น้อยที่สุดที่จะใช้ทำตะแกรงต่อลงดินคือ 785.66 เมตร แต่เมื่อต่อเชื่อมโยงกันระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งสามแห่งจะได้ว่าความยาวตัวนำที่น้อยที่สุดที่จะใช้ทำตะแกรงต่อลงดินได้คือ 284.24 เมตร ใน Appendix-B และ 274.43 เมตร ใน Appendix-C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดิน Appendix-A จะมีค่าสูงกว่าค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดินใน Appendix-B และ C

สรุป

จากการออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งสองกรณีทีกล่าวมาแล้วจะเห็นว่า ในกรณีที่ทำการคำนวณและออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยแต่ละแห่งนั้นแยกจากกัน จากการทดลองในสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งสามแห่งนั้นเราจะคำนึงถึงกระแสที่ไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 3 ซึ่งจะต้องใช้ตัวนำให้มีความยาวมากขึ้น เพื่อให้ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดินมีค่าลดลงและทำให้เกิดความปลอดภัยต่อบุคคลและอุปกรณ์ต่าง ๆ มากขึ้น สำหรับอีกกรณีหนึ่งนั้นจะใช้การเชื่อมโยงระหว่างตะแกรงต่อลงดินของแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยเข้าด้วยกัน จากการทดลองในสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งสามแห่งนั้นเราจะคำนึงถึงกระแสที่ไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 3 ซึ่งจะมีการถ่ายเทพอลต์จากสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 1 และ 2 ไปสู่สถานีไฟฟ้าย่อยแห่งที่ 3 โดยจะทำให้กระแสพอลต์ที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นแบ่งแยกไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่เชื่อมโยงถึงกัน ซึ่งค่าของกระแสที่ไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดินมีค่าลดลง ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตะแกรงต่อลงดินมีค่าลดลงและทำให้ตัวนำที่จะนำเอามาใช้ทำตะแกรงต่อลงดินมีจำนวนน้อยลง ทั้งนี้ก็ยังทำให้เกิดความปลอดภัยต่อบุคคลและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 1

Input data

Fault current	25000.00000	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	32.55000 x 161.44000	meter x meter
Grid cover area	5254.87196	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	2.50000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	3 : 8	
Minimum length of conductor	561.19116	meter
Total length	744.71997	meter
Grid potential rise	4732.52637	volt
Grid resistance	0.18930	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

0.00000
16.27500
32.55000

Co-ordinate along Y-axis

0.00000
23.06286
46.12571
69.18857
92.25143
115.31429
138.37714
161.43999

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.42952228
1	2	1.42952228
2	1	0.94500458
2	2	0.94500458
3	1	0.76705658
3	2	0.76705658
4	1	0.69796288
4	2	0.69796288
5	1	0.69796288
5	2	0.69796288
6	1	0.76705658
6	2	0.76705658
7	1	0.94500458
7	2	0.94500458
8	1	1.42952704
8	2	1.42952228

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

1	1	1.31904519
1	2	1.07542467
1	3	0.97352302
1	4	0.94394833
1	5	0.97352052
1	6	1.07542455
1	7	1.31904292
2	1	1.12074065
2	2	0.84321982
2	3	0.73229021
2	4	0.70064354
2	5	0.73228770
2	6	0.84321743
2	7	1.12073827
3	1	1.31904292
3	2	1.07542467
3	3	0.97352302
3	4	0.94394833
3	5	0.97352052
3	6	1.07542455
3	7	1.31904292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
8.13750	0.00000	4026.68188	705.84448	SAFE
8.13750	11.53143	3308.59302	1423.93335	SAFE
8.13750	23.06286	4229.88672	502.63965	SAFE
8.13750	34.59428	3458.40698	1274.11938	SAFE
8.13750	46.12571	4082.73730	649.78906	SAFE
8.13750	57.65714	3421.64014	1310.88623	SAFE
8.13750	69.18857	3988.47607	744.05029	SAFE
8.13750	80.72000	3400.58936	1331.93701	SAFE
8.13750	92.25143	3988.66479	743.86157	SAFE
8.13750	103.78285	3421.67261	1310.85376	SAFE
8.13750	115.31429	4082.91309	649.61328	SAFE
8.13750	126.84571	3457.27295	1275.25342	SAFE
8.13750	138.37714	4227.29199	505.23438	SAFE
8.13750	149.90857	3297.75879	1434.76758	SAFE
8.13750	161.43999	4005.30640	727.21997	SAFE
24.41250	0.00000	4055.86938	676.65698	SAFE
24.41250	11.53143	3300.99097	1431.53540	SAFE
24.41250	23.06286	4247.58008	484.94629	SAFE
24.41250	34.59428	3452.26245	1280.26392	SAFE
24.41250	46.12571	4096.91504	635.61133	SAFE
24.41250	57.65714	3416.27417	1316.25220	SAFE
24.41250	69.18857	4001.34570	731.18066	SAFE
24.41250	80.72000	3395.45801	1337.06836	SAFE
24.41250	92.25143	4001.53662	730.98975	SAFE
24.41250	103.78285	3416.30786	1316.21851	SAFE
24.41250	115.31429	4097.09326	635.43311	SAFE
24.41250	126.84571	3451.12695	1281.39941	SAFE
24.41250	138.37714	4244.98584	487.54053	SAFE
24.41250	149.90857	3290.15503	1442.37134	SAFE
24.41250	161.43999	4034.49048	698.03589	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 8.13750 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ A1 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 2

Input data

Fault current	25000.00000	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	72.49000 x 72.49000	meter x meter
Grid cover area	5254.79979	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	4 : 5	
Minimum length of conductor	561.19116	meter
Total length	652.40997	meter
Grid potential rise	5456.73877	volt
Grid resistance	0.21827	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

0.00000
 24.16333
 48.32666
 72.49000

Co-ordinate along Y-axis

0.00000
 18.12250
 36.24500
 54.36750
 72.49000

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.29050481
1	2	1.14132690
1	3	1.29050481
2	1	0.94129449
2	2	0.74523032
2	3	0.94129449
3	1	0.84514284
3	2	0.63481259
3	3	0.84514284
4	1	0.94129449
4	2	0.74523032
4	3	0.94129449
5	1	1.29050672
5	2	1.14132690
5	3	1.29050481

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

1	1	1.32257545
1	2	1.13749480
1	3	1.13749254
1	4	1.32257545
2	1	0.88981438
2	2	0.64168644
2	3	0.64168417
2	4	0.88981438
3	1	0.88981438
3	2	0.64168644
3	3	0.64168417
3	4	0.88981438
4	1	1.32257545
4	2	1.13749480
4	3	1.13749254
4	4	1.32257545

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
12.08167	0.00000	4540.02051	916.71826	SAFE
12.08167	9.06125	3752.88281	1703.85596	NOT SAFE

เนื่องจากในการทดลองสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2 นี้ เมื่อใส่ตัวนำ 4:5 ทำให้ศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่ตำแหน่ง (12.08167, 9.06125) มีค่ามากกว่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายจะทนได้ ดังนั้นเราจึงได้เพิ่มตัวนำให้มากขึ้น

Substation 2

Input

Fault current	25000.00000	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	72.49000 x 72.49000	meter x meter
Grid cover area	5254.79979	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	5 : 5	
Minimum length of conductor	561.19116	meter
Total length	724.89996	meter
Grid potential rise	5358.00488	volt
Grid resistance	0.21432	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

0.00000
18.12250
36.24500
54.36750
72.49000

Co-ordinate along Y-axis

0.00000
18.12250
36.24500
54.36750
72.49000

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.40622020
1	2	1.19758248
1	3	1.19758475
1	4	1.40622020
2	1	0.97726011
2	2	0.70123518
2	3	0.70123750
2	4	0.97726005
3	1	0.86582482
3	2	0.56960827
3	3	0.56961060
3	4	0.86582017
4	1	0.97726011
4	2	0.70123518
4	3	0.70123750
4	4	0.97726005
5	1	1.40622020
5	2	1.19758248
5	3	1.19758475
5	4	1.40622020

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

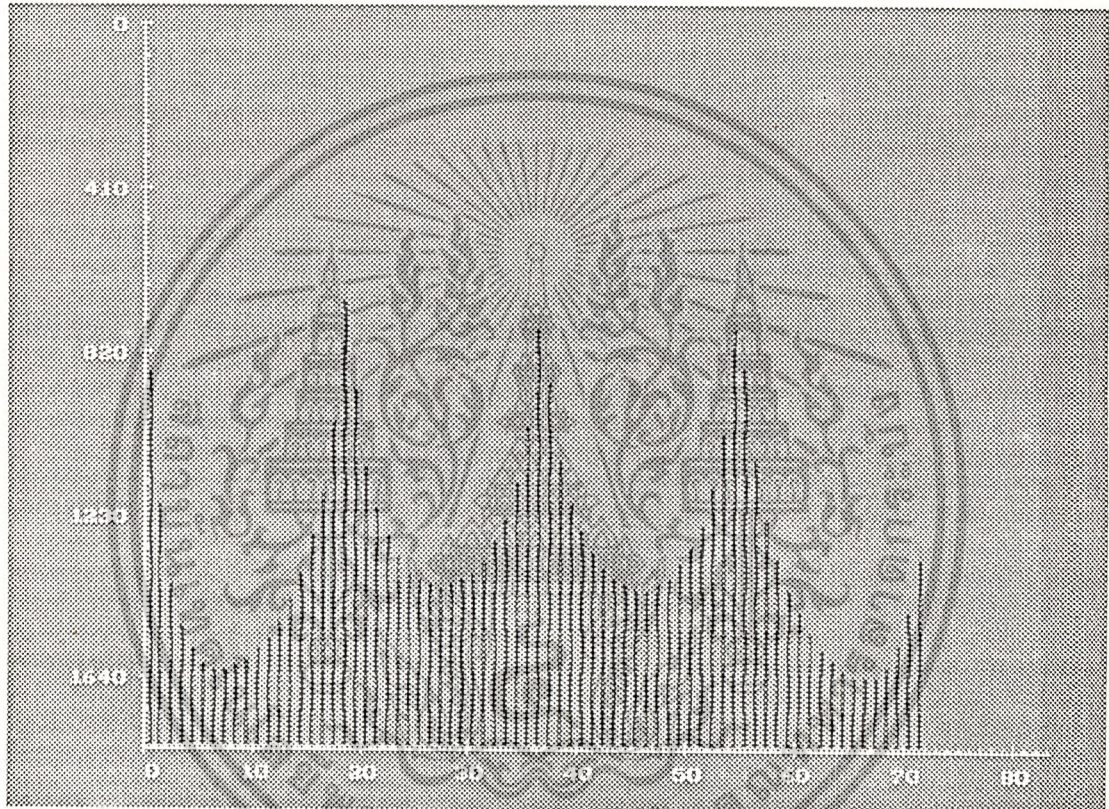
1	1	1.40622020
1	2	1.19758248
1	3	1.19758475
1	4	1.40622020
2	1	0.97726011
2	2	0.70123518
2	3	0.70123750
2	4	0.97726005
3	1	0.86582482
3	2	0.56960827
3	3	0.56961060
3	4	0.86582017
4	1	0.97726011
4	2	0.70123518
4	3	0.70123750
4	4	0.97726005
5	1	1.40622020
5	2	1.19758248
5	3	1.19758475
5	4	1.40622020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
9.06125	0.00000	4495.29102	862.71387	SAFE
9.06125	9.06125	3782.93408	1575.07080	SAFE
9.06125	18.12250	4685.88086	672.12402	SAFE
9.06125	27.18375	3964.43823	1393.56665	SAFE
9.06125	36.24500	4646.35791	711.64697	SAFE
9.06125	45.30625	3962.90210	1395.10278	SAFE
9.06125	54.36750	4681.69385	676.31104	SAFE
9.06125	63.42875	3770.86084	1587.14404	SAFE
9.06125	72.49000	4475.38525	882.61963	SAFE
27.18375	0.00000	4556.91650	801.08838	SAFE
27.18375	9.06125	3964.43896	1393.56592	SAFE
27.18375	18.12250	4640.85400	717.15088	SAFE
27.18375	27.18375	4107.03320	1250.97168	SAFE
27.18375	36.24500	4562.46777	795.53711	SAFE
27.18375	45.30625	4105.69189	1252.31299	SAFE
27.18375	54.36750	4637.19922	720.80566	SAFE
27.18375	63.42875	3953.38037	1404.62451	SAFE
27.18375	72.49000	4538.89844	819.10645	SAFE
45.30625	0.00000	4572.95459	785.05029	SAFE
45.30625	9.06125	3962.90161	1395.10327	SAFE
45.30625	18.12250	4649.88721	708.11768	SAFE
45.30625	27.18375	4105.68896	1252.31592	SAFE
45.30625	36.24500	4569.75146	788.25342	SAFE
45.30625	45.30625	4104.34766	1253.65723	SAFE
45.30625	54.36750	4646.23145	711.77344	SAFE
45.30625	63.42875	3951.84204	1406.16284	SAFE
45.30625	72.49000	4554.93994	803.06494	SAFE
63.42875	0.00000	4532.11963	825.88525	SAFE
63.42875	9.06125	3770.85791	1587.14697	SAFE
63.42875	18.12250	4708.22949	649.77539	SAFE
63.42875	27.18375	3953.37939	1404.62549	SAFE
63.42875	36.24500	4665.55664	692.44824	SAFE
63.42875	45.30625	3951.84399	1406.16089	SAFE
63.42875	54.36750	4704.04346	653.96143	SAFE
63.42875	63.42875	3758.78638	1599.21851	SAFE
63.42875	72.49000	4512.21191	845.79297	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 9.06125 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ A2 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 3

Input

Fault current	35000.00000	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	32.55000 x 161.44000	meter x meter
Grid cover area	5254.87196	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	3 : 15	
Minimum length of conductor	785.66760	meter
Total length	972.57001	meter
Grid potential rise	6337.65625	volt
Grid resistance	0.18108	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

0.00000
16.27500
32.55000

Co-ordinate along Y-axis

0.00000
11.53143
23.06286
34.59428
46.12571
57.65714
69.18857
80.71999
92.25142
103.78284
115.31427
126.84570
138.37712
149.90855
161.43999

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.68140805
1	2	1.68140805
2	1	1.24757516
2	2	1.24757516
3	1	1.00913095
3	2	1.00913095
4	1	0.86286604
4	2	0.86286604
5	1	0.76842374
5	2	0.76842374
6	1	0.70867264
6	2	0.70867264
7	1	0.67537242
7	2	0.67537242
8	1	0.66465670
8	2	0.66465670
9	1	0.67537242
9	2	0.67537242
10	1	0.70867264
10	2	0.70867264
11	1	0.76842374
11	2	0.76842374
12	1	0.86286604
12	2	0.86286604
13	1	1.00913095
13	2	1.00913095
14	1	1.24757516
14	2	1.24757516
15	1	1.68140805
15	2	1.68140805

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งทางเรามีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

1	1	1.67855251
1	2	1.37385702
1	3	1.19678581
1	4	1.08159363
1	5	1.00621164
1	6	0.96019542
1	7	0.93830347
1	8	0.93830347
1	9	0.96019542
1	10	1.00621176
1	11	1.08159375
1	12	1.19679534
1	13	1.37385702
1	14	1.67855251
2	1	1.31423926
2	2	0.95149684
2	3	0.74894607
2	4	0.62150192
2	5	0.53976965
2	6	0.49045202
2	7	0.46712133
2	8	0.46712133
2	9	0.49045202
2	10	0.53976971
2	11	0.62150204
2	12	0.74895567
2	13	0.95149684
2	14	1.31423926
3	1	1.67855251
3	2	1.37385702
3	3	1.19678581
3	4	1.08159363
3	5	1.00621164
3	6	0.96019542
3	7	0.93830347
3	8	0.93830347
3	9	0.96019542
3	10	1.00621176
3	11	1.08159375
3	12	1.19679534
3	13	1.37385702
3	14	1.67855251

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
8.13750	0.00000	5609.24072	728.41553	SAFE
8.13750	5.76571	4903.03516	1434.62109	SAFE
8.13750	11.53143	5925.07959	412.57666	SAFE
8.13750	17.29714	5137.91455	1199.74170	SAFE
8.13750	23.06286	5798.47803	539.17822	SAFE
8.13750	28.82857	5074.08057	1263.57568	SAFE
8.13750	34.59428	5594.02686	743.62939	SAFE
8.13750	40.36000	4951.00000	1386.65625	SAFE
8.13750	46.12571	5406.47119	931.18506	SAFE
8.13750	51.89143	4835.68018	1501.97607	SAFE
8.13750	57.65714	5265.62744	1072.02881	SAFE
8.13750	63.42286	4752.10400	1585.55225	SAFE
8.13750	69.18857	5178.79883	1158.85742	SAFE
8.13750	74.95428	4708.30176	1629.35449	SAFE
8.13750	80.71999	5149.25098	1188.40527	SAFE
8.13750	86.48570	4707.57178	1630.08447	SAFE
8.13750	92.25142	5177.22900	1160.42725	SAFE
8.13750	98.01714	4749.41699	1588.23926	SAFE
8.13750	103.78284	5261.84521	1075.81104	SAFE
8.13750	109.54855	4831.20410	1506.45215	SAFE
8.13750	115.31427	5401.01904	936.63721	SAFE
8.13750	121.07999	4943.53906	1394.11719	SAFE
8.13750	126.84570	5584.44189	753.21436	SAFE
8.13750	132.61140	5063.18994	1274.46631	SAFE
8.13750	138.37712	5785.23145	552.42480	SAFE
8.13750	144.14284	5119.16992	1218.48633	SAFE
8.13750	149.90855	5899.46094	438.19531	SAFE
8.13750	155.67427	4871.38184	1466.27441	SAFE
8.13750	161.43999	5574.25244	763.40381	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
24.41250	0.00000	5641.65088	696.00537	SAFE
24.41250	5.76571	4882.95312	1454.70312	SAFE
24.41250	11.53143	5943.15820	394.49805	SAFE
24.41250	17.29714	5119.11523	1218.54102	SAFE
24.41250	23.06286	5811.37012	526.28613	SAFE
24.41250	28.82857	5057.44092	1280.21533	SAFE
24.41250	34.59428	5604.49121	733.16504	SAFE
24.41250	40.36000	4936.11914	1401.53711	SAFE
24.41250	46.12571	5415.56641	922.08984	SAFE
24.41250	51.89143	4822.04883	1515.60742	SAFE
24.41250	57.65714	5273.92090	1063.73535	SAFE
24.41250	63.42286	4739.26025	1598.39600	SAFE
24.41250	69.18857	5186.66211	1150.99414	SAFE
24.41250	74.95428	4695.83545	1641.82080	SAFE
24.41250	80.71999	5156.98047	1180.67578	SAFE
24.41250	86.48570	4695.10498	1642.55127	SAFE
24.41250	92.25142	5185.09229	1152.56396	SAFE
24.41250	98.01714	4736.56982	1601.08643	SAFE
24.41250	103.78284	5270.14014	1067.51611	SAFE
24.41250	109.54855	4817.56787	1520.08838	SAFE
24.41250	115.31427	5410.11621	927.54004	SAFE
24.41250	121.07999	4928.65967	1408.99658	SAFE
24.41250	126.84570	5594.90283	742.75342	SAFE
24.41250	132.61140	5046.54834	1291.10791	SAFE
24.41250	138.37712	5798.12891	539.52734	SAFE
24.41250	144.14284	5100.36865	1237.28760	SAFE
24.41250	149.90855	5917.54248	420.11377	SAFE
24.41250	155.67427	4851.30225	1486.35400	SAFE
24.41250	161.43999	5606.66455	730.99170	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 8.13750 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ A3 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage (By multistep method) 2570.15551758 Volts

Overall resistance 0.07343301 Ohms 3

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION EACH SUBSTATION

Substation 1 : $S_k = 1.11336601$ $I_k = 12093.57617$ $V_k = 1873.26318$

Substation 2 : $S_k = 1.07651389$ $I_k = 10243.86914$ $V_k = 2160.40088$

Substation 3 : $S_k = 0.86599052$ $I_k = 12662.55371$ $V_k = 2190.27881$

Total current density = 3.05587

Total current = 35000.00000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 1		
Input data		
Total fault current	12093.57617	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	32.55000 x 161.44000	meter x meter
Grid cover area	5254.87196	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter
Output data		
Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	3 : 8	
Minimum length of conductor	271.47232	meter
Total length	744.71997	meter
Grid potential rise	1873.26318	volt
Grid resistance	0.15490	ohm
FACTOR OF SPACE = 1.00		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coordinate along X-axis

0.00000
16.27500
32.55000

Co-ordinate along Y-axis

0.00000
23.06286
46.12571
69.18857
92.25143
115.31429
138.37714
161.43999

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	0.90707421
1	2	0.90707421
2	1	0.41684344
2	2	0.41684344
3	1	0.23679434
3	2	0.23679434
4	1	0.16688989
4	2	0.16688989
5	1	0.16688989
5	2	0.16688989
6	1	0.23679940
6	2	0.23679940
7	1	0.41684344
7	2	0.41684344
8	1	0.90707421
8	2	0.90707421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

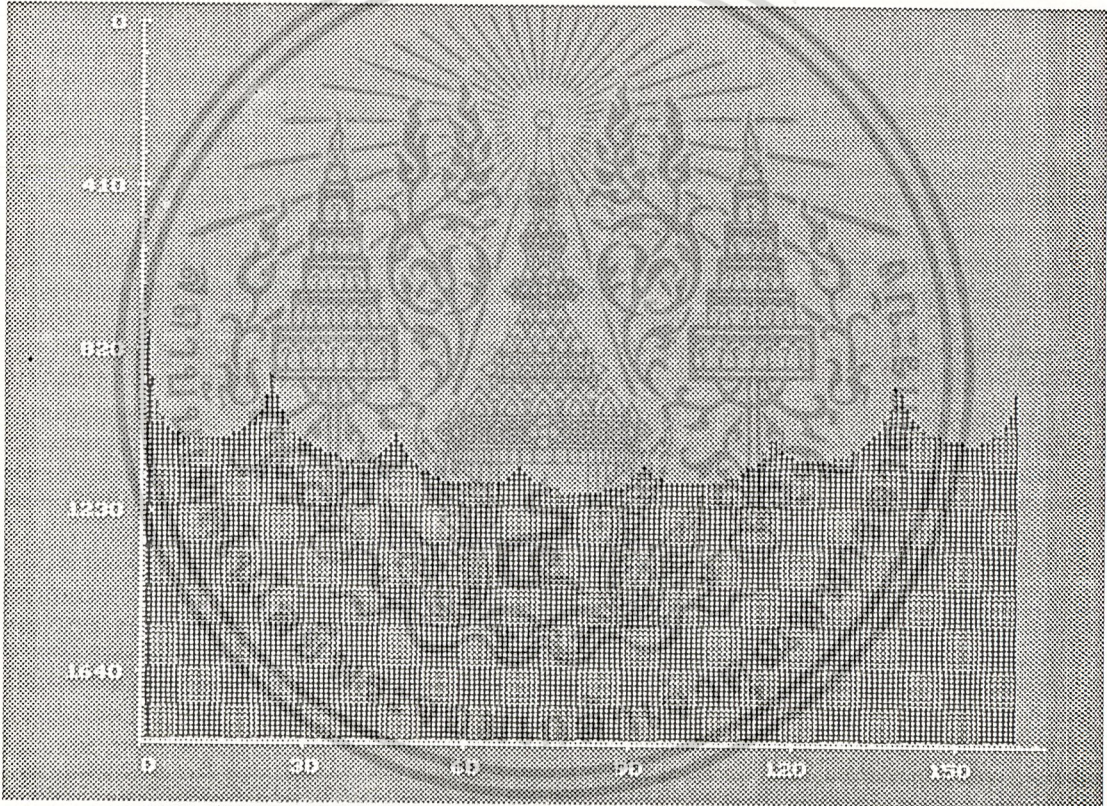
1	1	0.82302129
1	2	0.57550001
1	3	0.47196633
1	4	0.44191715
1	5	0.47196379
1	6	0.57550001
1	7	0.82302135
2	1	0.62154043
2	2	0.33957475
2	3	0.22687240
2	4	0.19471654
2	5	0.22686747
2	6	0.33957717
2	7	0.62154043
3	1	0.82302129
3	2	0.57550001
3	3	0.47196874
3	4	0.44191715
3	5	0.47196379
3	6	0.57550240
3	7	0.82302135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
8.13750	0.00000	1099.44531	773.81787	SAFE
8.13750	11.53143	837.76306	1035.50012	SAFE
8.13750	23.06286	999.42700	873.83618	SAFE
8.13750	34.59428	795.37207	1077.89111	SAFE
8.13750	46.12571	854.97046	1018.29272	SAFE
8.13750	57.65714	730.99371	1142.26953	SAFE
8.13750	69.18857	780.89172	1092.37146	SAFE
8.13750	80.72000	707.55823	1165.70496	SAFE
8.13750	92.25143	781.16656	1092.09668	SAFE
8.13750	103.78285	731.39618	1141.86694	SAFE
8.13750	115.31429	855.70020	1017.56299	SAFE
8.13750	126.84571	795.81665	1077.44653	SAFE
8.13750	138.37714	999.75482	873.50836	SAFE
8.13750	149.90857	835.27216	1037.99097	SAFE
8.13750	161.43999	1093.66431	779.59888	SAFE
24.41250	0.00000	1108.52869	764.73450	SAFE
24.41250	11.53143	835.76642	1037.49683	SAFE
24.41250	23.06286	1003.13647	870.12671	SAFE
24.41250	34.59428	794.19104	1079.07214	SAFE
24.41250	46.12571	857.00909	1016.25409	SAFE
24.41250	57.65714	730.21863	1143.04456	SAFE
24.41250	69.18857	782.30219	1090.96094	SAFE
24.41250	80.72000	706.90253	1166.36060	SAFE
24.41250	92.25143	782.57794	1090.68530	SAFE
24.41250	103.78285	730.62036	1142.64282	SAFE
24.41250	115.31429	857.73914	1015.52405	SAFE
24.41250	126.84571	794.63617	1078.62695	SAFE
24.41250	138.37714	1003.46515	869.79803	SAFE
24.41250	149.90857	833.27509	1039.98804	SAFE
24.41250	161.43999	1102.74768	770.51550	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 8.13750 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ B1 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 2

Input data

Total fault current	10243.86914	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	72.49000 x 72.49000	meter x meter
Grid cover area	5254.79979	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	4 : 5	
Minimum length of conductor	229.95074	meter
Total length	652.40997	meter
Grid potential rise	2160.40088	volt
Grid resistance	0.21090	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

1963.75500
1987.91833
2012.08167
2036.24500

Co-ordinate along Y-axis

1963.75500
1981.87756
2000.00012
2018.12268
2036.24524

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.19718468
1	2	1.04746437
1	3	1.19718468
2	1	0.84670639
2	2	0.64993107
2	3	0.84670639
3	1	0.75020581
3	2	0.53911310
3	3	0.75020581
4	1	0.84670639
4	2	0.64993107
4	3	0.84670639
5	1	1.19718468
5	2	1.04746437
5	3	1.19718468

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

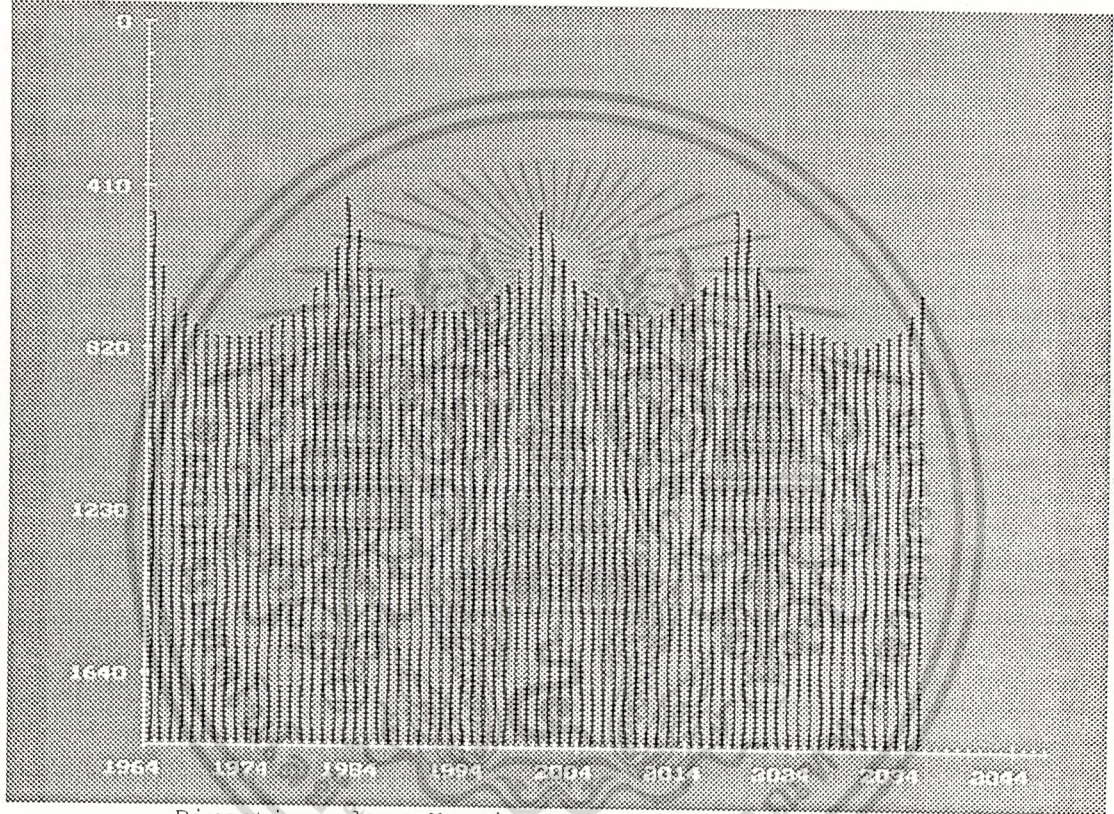
1	1	1.22535324
1	2	1.03975475
1	3	1.03975475
1	4	1.22535324
2	1	0.79137909
2	2	0.54255551
2	3	0.54255551
2	4	0.79137909
3	1	0.79137909
3	2	0.54255551
3	3	0.54255551
3	4	0.79137909
4	1	1.22535324
4	2	1.03975475
4	3	1.03975475
4	4	1.22535324

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
1975.83667	1963.75500	1696.66980	463.73108	SAFE
1975.83667	1972.81628	1390.76904	769.63184	SAFE
1975.83667	1981.87756	1743.36597	417.03491	SAFE
1975.83667	1990.93884	1457.59460	702.80627	SAFE
1975.83667	2000.00012	1728.69324	431.70764	SAFE
1975.83667	2009.06140	1457.02319	703.37769	SAFE
1975.83667	2018.12268	1741.82483	418.57605	SAFE
1975.83667	2027.18396	1387.18420	773.21667	SAFE
1975.83667	2036.24524	1691.39355	469.00732	SAFE
2000.00000	1963.75500	1712.91321	447.48767	SAFE
2000.00000	1972.81628	1446.70337	713.69751	SAFE
2000.00000	1981.87756	1727.69104	432.70984	SAFE
2000.00000	1990.93884	1502.82263	657.57825	SAFE
2000.00000	2000.00012	1701.16736	459.23352	SAFE
2000.00000	2009.06140	1502.32629	658.07458	SAFE
2000.00000	2018.12268	1726.33936	434.06152	SAFE
2000.00000	2027.18396	1443.48511	716.91577	SAFE
2000.00000	2036.24524	1708.16064	452.24023	SAFE
2024.16333	1963.75500	1710.71594	449.68494	SAFE
2024.16333	1972.81628	1386.65393	773.74695	SAFE
2024.16333	1981.87756	1751.99109	408.40979	SAFE
2024.16333	1990.93884	1453.63049	706.77039	SAFE
2024.16333	2000.00012	1736.01538	424.38550	SAFE
2024.16333	2009.06140	1453.05908	707.34180	SAFE
2024.16333	2018.12268	1750.45178	409.94910	SAFE
2024.16333	2027.18396	1383.06812	777.33276	SAFE
2024.16333	2036.24524	1705.44055	454.96033	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 1975.83667 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ B2 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 3

Input data

Total fault current	12662.55371	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	161.44000 x 32.55000	meter x meter
Grid cover area	5254.87196	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	6 : 5	
Minimum length of conductor	284.24454	meter
Total length	1002.50000	meter
Grid potential rise	2190.27881	volt
Grid resistance	0.17297	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

3419.28003
3451.56812
3483.85620
3516.14429
3548.43237
3580.72046

Co-ordinate along Y-axis

58.72500
66.86250
74.99999
83.13749
91.27499

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.28261268
1	2	0.94699776
1	3	0.86590439
1	4	0.94699484
1	5	1.28261268
2	1	1.03165615
2	2	0.65818131
2	3	0.57172883
2	4	0.65818131
2	5	1.03165317
3	1	0.95611650
3	2	0.56927299
3	3	0.48097894
3	4	0.56927299
3	5	0.95611650
4	1	1.03165615
4	2	0.65818131
4	3	0.57172883
4	4	0.65818131
4	5	1.03165317
5	1	1.28261268
5	2	0.94699484
5	3	0.86590439
5	4	0.94699484
5	5	1.28261268

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

1	1	1.63754356
1	2	1.45591187
1	3	1.45591187
1	4	1.63754356
2	1	0.63596356
2	2	0.36553103
2	3	0.36553103
2	4	0.63596356
3	1	0.40294760
3	2	0.12216792
3	3	0.12216792
3	4	0.40294760
4	1	0.40294760
4	2	0.12216792
4	3	0.12216792
4	4	0.40294760
5	1	0.63596356
5	2	0.36553103
5	3	0.36553103
5	4	0.63596356
6	1	1.63754356
6	2	1.45591187
6	3	1.45591187
6	4	1.63754356

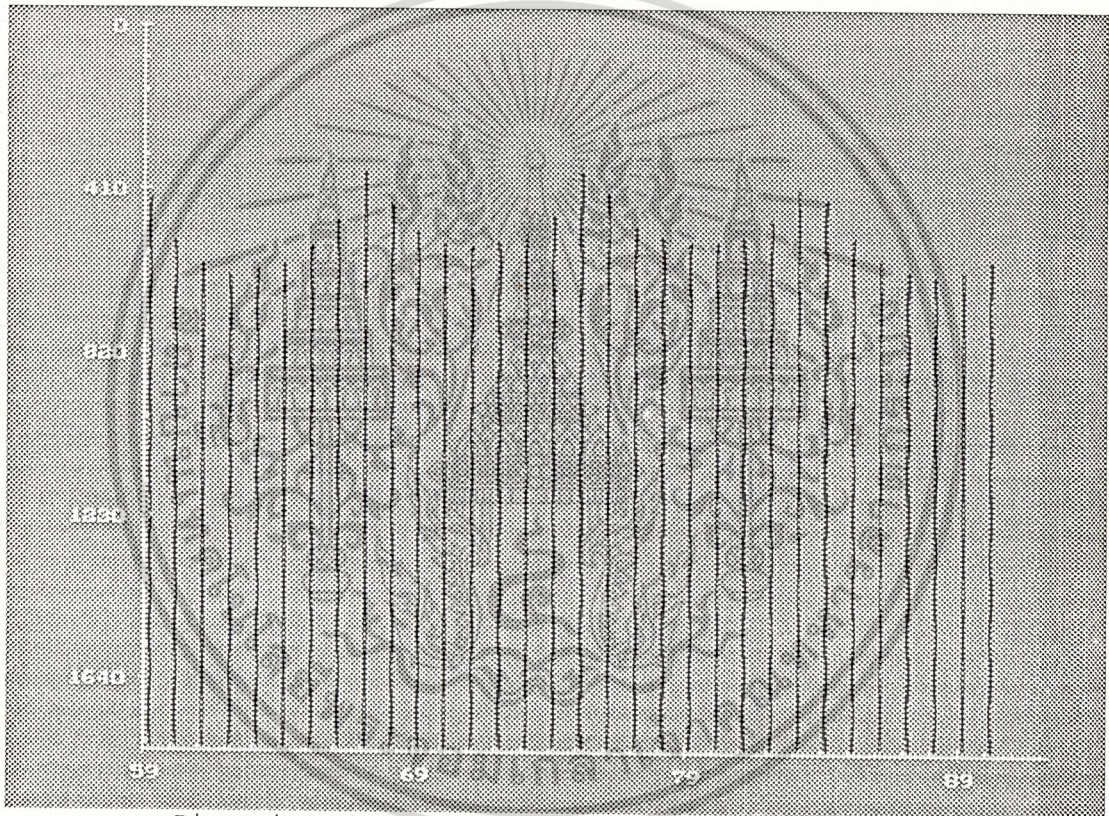


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
3435.42407	58.72500	1756.15247	434.12634	SAFE
3435.42407	62.79375	1592.47363	597.80518	SAFE
3435.42407	66.86250	1837.56592	352.71289	SAFE
3435.42407	70.93124	1658.47083	531.80798	SAFE
3435.42407	74.99999	1850.58423	339.69458	SAFE
3435.42407	79.06874	1657.78674	532.49207	SAFE
3435.42407	83.13749	1836.21130	354.06750	SAFE
3435.42407	87.20624	1590.52734	599.75146	SAFE
3435.42407	91.27499	1753.83350	436.44531	SAFE
3467.71216	58.72500	1647.07141	543.20740	SAFE
3467.71216	62.79375	1511.89404	678.38477	SAFE
3467.71216	66.86250	1673.20764	517.07117	SAFE
3467.71216	70.93124	1549.55029	640.72852	SAFE
3467.71216	74.99999	1668.88538	521.39343	SAFE
3467.71216	79.06874	1549.29761	640.98120	SAFE
3467.71216	83.13749	1672.67932	517.59949	SAFE
3467.71216	87.20624	1511.07739	679.20142	SAFE
3467.71216	91.27499	1646.03308	544.24573	SAFE
3500.00024	58.72500	1578.77087	611.50793	SAFE
3500.00024	62.79375	1455.37109	734.90771	SAFE
3500.00024	66.86250	1588.96790	601.31091	SAFE
3500.00024	70.93124	1482.40857	707.87024	SAFE
3500.00024	74.99999	1579.56604	610.71277	SAFE
3500.00024	79.06874	1482.25623	708.02258	SAFE
3500.00024	83.13749	1588.63037	601.64844	SAFE
3500.00024	87.20624	1454.81995	735.45886	SAFE
3500.00024	91.27499	1578.04187	612.23694	SAFE
3532.28833	58.72500	1633.89111	556.38770	SAFE
3532.28833	62.79375	1511.58679	678.69202	SAFE
3532.28833	66.86250	1664.04858	526.23022	SAFE
3532.28833	70.93124	1549.32336	640.95544	SAFE
3532.28833	74.99999	1660.96899	529.30981	SAFE
3532.28833	79.06874	1549.07214	641.20667	SAFE
3532.28833	83.13749	1663.51965	526.75916	SAFE
3532.28833	87.20624	1510.77100	679.50781	SAFE
3532.28833	91.27499	1632.85461	557.42419	SAFE
3564.57642	58.72500	1760.19604	430.08276	SAFE
3564.57642	62.79375	1588.15430	602.12451	SAFE
3564.57642	66.86250	1839.55530	350.72351	SAFE
3564.57642	70.93124	1653.85791	536.42090	SAFE
3564.57642	74.99999	1851.96008	338.31873	SAFE
3564.57642	79.06874	1653.17529	537.10352	SAFE
3564.57642	83.13749	1838.19751	352.08130	SAFE
3564.57642	87.20624	1586.20789	604.07092	SAFE
3564.57642	91.27499	1757.87708	432.40173	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 3435.42427 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ B3 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage (By multistep method) 2619.46435547 Volts

Overall resistance 0.07484184 Ohms 3

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION EACH SUBSTATION

Substation 1: Sk = 0.98213488 Ik = 12326.73242 Vk = 1909.13647

Substation 2: Sk = 0.95020354 Ik = 10447.70898 Vk = 2201.55591

Substation 3: Sk = 1.06737912 Ik = 12225.55762 Vk = 2252.69775

Total current density = 2.99972

Total current = 35000.00000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 1

Input data

Total fault current	12326.73242	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	32.55000 x 161.44000	meter x meter
Grid cover area	5254.87196	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	3 : 8	
Minimum length of conductor	276.70612	meter
Total length	744.71997	meter
Grid potential rise	1909.13647	volt
Grid resistance	0.15488	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

0.00000
16.27500
32.55000

Co-ordinate along Y-axis

0.00000
23.06286
46.12571
69.18857
92.25143
115.31429
138.37714
161.43999

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	0.90677738
1	2	0.90677738
2	1	0.41654369
2	2	0.41654369
3	1	0.23649487
3	2	0.23649487
4	1	0.16658878
4	2	0.16658878
5	1	0.16658878
5	2	0.16658878
6	1	0.23649487
6	2	0.23649487
7	1	0.41654369
7	2	0.41654369
8	1	0.90677738
8	2	0.90677738

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

1	1	0.82273740
1	2	0.57521385
1	3	0.47168028
1	4	0.44163027
1	5	0.47167781
1	6	0.57521617
1	7	0.82273972
2	1	0.62125534
2	2	0.33928674
2	3	0.22658069
2	4	0.19442631
2	5	0.22657825
2	6	0.33928910
2	7	0.62125772
3	1	0.82273740
3	2	0.57521385
3	3	0.47168028
3	4	0.44163027
3	5	0.47167781
3	6	0.57521617
3	7	0.82273972

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรณีการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
8.13750	0.00000	1120.15051	788.98596	SAFE
8.13750	11.53143	853.47083	1055.66565	SAFE
8.13750	23.06286	1018.08765	891.04883	SAFE
8.13750	34.59428	810.19629	1098.94019	SAFE
8.13750	46.12571	870.80402	1038.33252	SAFE
8.13750	57.65714	744.54944	1164.58704	SAFE
8.13750	69.18857	795.27917	1113.85730	SAFE
8.13750	80.72000	720.65411	1188.48242	SAFE
8.13750	92.25143	795.56067	1113.57581	SAFE
8.13750	103.78285	744.95966	1164.17676	SAFE
8.13750	115.31429	871.54669	1037.58984	SAFE
8.13750	126.84571	810.65088	1098.48560	SAFE
8.13750	138.37714	1018.42389	890.71259	SAFE
8.13750	149.90857	850.93365	1058.20288	SAFE
8.13750	161.43999	1114.25891	794.87756	SAFE
24.41250	0.00000	1129.40625	779.73022	SAFE
24.41250	11.53143	851.43671	1057.69971	SAFE
24.41250	23.06286	1021.86597	887.27051	SAFE
24.41250	34.59428	808.99316	1100.14331	SAFE
24.41250	46.12571	872.87817	1036.25830	SAFE
24.41250	57.65714	743.75977	1165.37671	SAFE
24.41250	69.18857	796.71405	1112.42236	SAFE
24.41250	80.72000	719.98724	1189.14917	SAFE
24.41250	92.25143	796.99542	1112.14111	SAFE
24.41250	103.78285	744.16974	1164.96680	SAFE
24.41250	115.31429	873.62036	1035.51611	SAFE
24.41250	126.84571	809.44824	1099.68823	SAFE
24.41250	138.37714	1022.20227	886.93420	SAFE
24.41250	149.90857	848.90033	1060.23608	SAFE
24.41250	161.43999	1123.51477	785.62170	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 8.13750 meters.

Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ C1 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 2

Input data

Total fault current	10447.70898	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	72.49000 x 72.49000	meter x meter
Grid cover area	5254.79979	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	4 : 5	
Minimum length of conductor	234.52647	meter
Total length	652.40997	meter
Grid potential rise	2201.55591	volt
Grid resistance	0.21072	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

1963.75500
 1987.91833
 2012.08167
 2036.24500

Co-ordinate along Y-axis

1963.75500
 1981.87756
 2000.00012
 2018.12268
 2036.24524

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.19496214
1	2	1.04522824
1	3	1.19496214
2	1	0.84445322
2	2	0.64765960
2	3	0.84445322
3	1	0.74794316
3	2	0.53683245
3	3	0.74794316
4	1	0.84445322
4	2	0.64765960
4	3	0.84445322
5	1	1.19496214
5	2	1.04522824
5	3	1.19496214

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

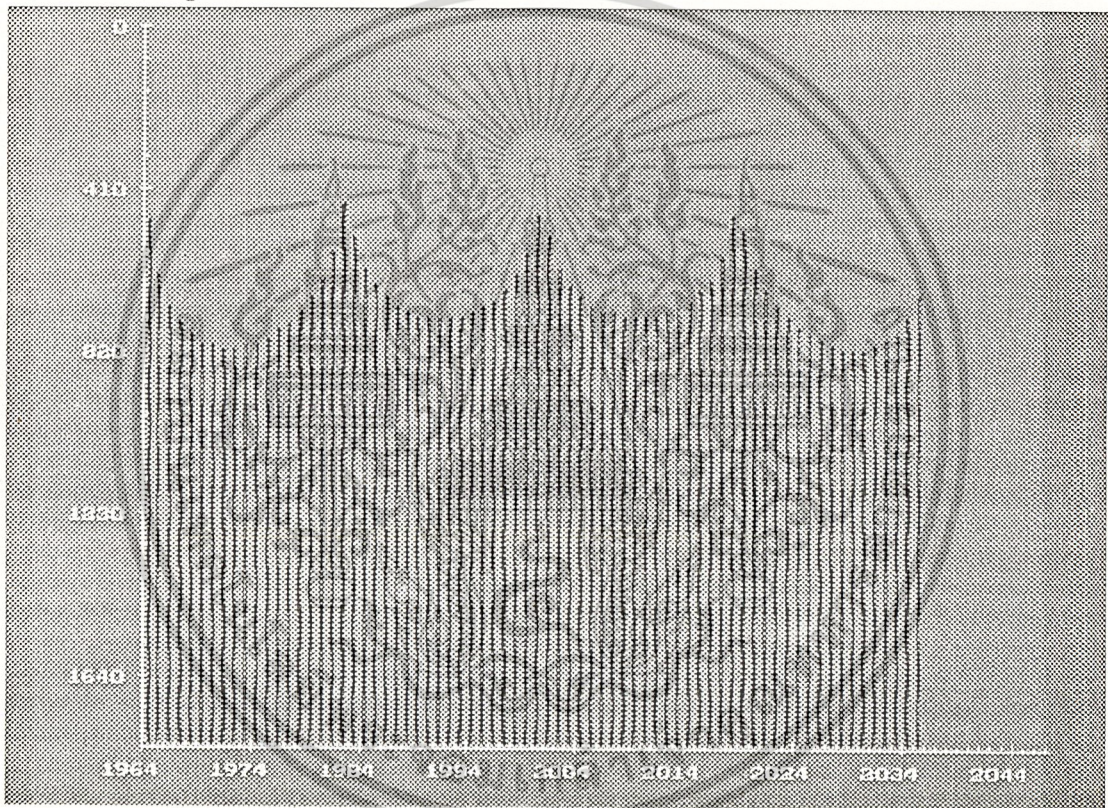
1	1	1.22303927
1	2	1.03742731
1	3	1.03742731
1	4	1.22303927
2	1	0.78903455
2	2	0.54019672
2	3	0.54019672
2	4	0.78903455
3	1	0.78903455
3	2	0.54019672
3	3	0.54019672
3	4	0.78903455
4	1	1.22303927
4	2	1.03742731
4	3	1.03742731
4	4	1.22303927

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
1975.83667	1963.75500	1726.45532	475.10059	SAFE
1975.83667	1981.87756	1773.40356	428.15234	SAFE
1975.83667	1990.93884	1482.63257	718.92334	SAFE
1975.83667	2000.00012	1758.25476	443.30115	SAFE
1975.83667	2009.06140	1482.05371	719.50220	SAFE
1975.83667	2018.12268	1771.84021	429.71570	SAFE
1975.83667	2027.18396	1411.22571	790.33020	SAFE
1975.83667	2036.24524	1721.08862	480.46729	SAFE
2000.00000	1963.75500	1742.71985	458.83606	SAFE
2000.00000	1972.81628	1471.59143	729.96448	SAFE
2000.00000	1981.87756	1757.03125	444.52466	SAFE
2000.00000	1990.93884	1528.38257	673.17334	SAFE
2000.00000	2000.00012	1729.77185	471.78406	SAFE
2000.00000	2009.06140	1527.87817	673.67773	SAFE
2000.00000	2018.12268	1755.65942	445.89648	SAFE
2000.00000	2027.18396	1468.32092	733.23499	SAFE
2000.00000	2036.24524	1737.88745	463.66846	SAFE
2024.16333	1963.75500	1740.75696	460.79895	SAFE
2024.16333	1972.81628	1410.68689	790.86902	SAFE
2024.16333	1981.87756	1782.18005	419.37585	SAFE
2024.16333	1990.93884	1478.60254	722.95337	SAFE
2024.16333	2000.00012	1765.70093	435.85498	SAFE
2024.16333	2009.06140	1478.02161	723.53430	SAFE
2024.16333	2018.12268	1780.61536	420.94055	SAFE
2024.16333	2027.18396	1407.04065	794.51526	SAFE
2024.16333	2036.24524	1735.39050	466.16541	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 1975.83667 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ C2 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Substation 3

Input data

Total fault current	12225.55762	ampere
Fault duration time	0.30000	second
Depth of burial	0.50000	meter
Soil resistivity	30.00000	ohm-meter
Surface resistivity	3000.00000	ohm-meter
Area size	161.44000 x 32.55000	meter x meter
Grid cover area	5254.87196	square meter
Radius of conductor	0.00670	meter

Output data

Safety tolerable step-voltage	5723.70068	volt
Safety tolerable touch-voltage	1656.86072	volt
Rod length	0.00000	meter
Number of rod	0	
Conductor size	6 : 3	
Minimum length of conductor	274.43500	meter
Total length	679.62000	meter
Grid potential rise	2252.69775	volt
Grid resistance	0.18426	ohm

FACTOR OF SPACE = 1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Co-ordinate along X-axis

3419.28003
3451.56812
3483.85620
3516.14429
3548.43237
3580.72046

Co-ordinate along Y-axis

58.72500
75.00000
91.27500

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG X - AXIS

1	1	1.10616922
1	2	0.89225143
1	3	0.84012359
1	4	0.89224941
1	5	1.10616922
2	1	0.94942021
2	2	0.70946652
2	3	0.65332609
2	4	0.70946860
2	5	0.94941819
3	1	1.10616922
3	2	0.89224941
3	3	0.84012359
3	4	0.89224941
3	5	1.10616922

CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ALONG Y - AXIS

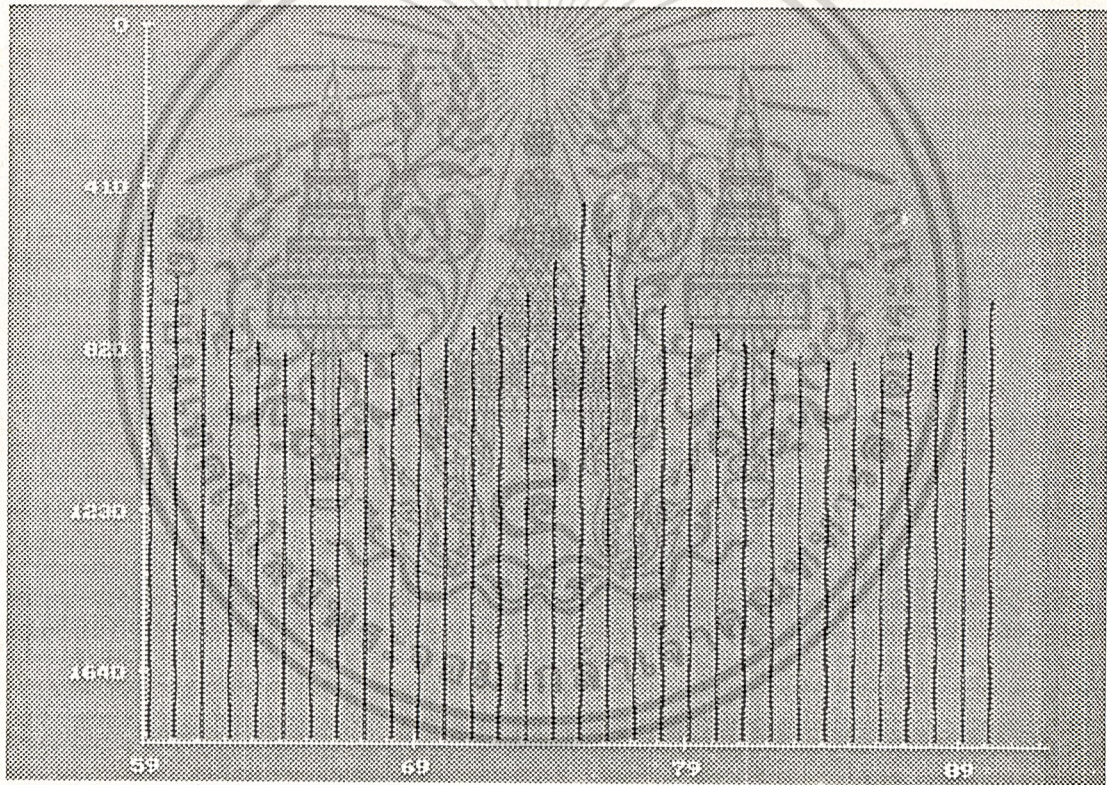
1	1	1.23025322
1	2	1.23025322
2	1	0.70663142
2	2	0.70663142
3	1	0.57106632
3	2	0.57106632
4	1	0.57106632
4	2	0.57106632
5	1	0.70663142
5	2	0.70663142
6	1	1.23025322
6	2	1.23025322

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xo	Yo	V-surface	V-touch	Status
3435.42407	58.72500	1775.82886	476.86890	SAFE
3435.42407	66.86250	1436.00891	816.68884	SAFE
3435.42407	75.00000	1836.87805	415.81970	SAFE
3435.42407	83.13750	1433.99097	818.70679	SAFE
3435.42407	91.27500	1772.56189	480.13586	SAFE
3467.71216	58.72500	1756.33484	496.36292	SAFE
3467.71216	66.86250	1475.92065	776.77710	SAFE
3467.71216	75.00000	1788.69751	464.00024	SAFE
3467.71216	83.13750	1474.45190	778.24585	SAFE
3467.71216	91.27500	1753.92346	498.77429	SAFE
3500.00024	58.72500	1721.00256	531.69519	SAFE
3500.00024	66.86250	1462.67627	790.02148	SAFE
3500.00024	75.00000	1745.13062	507.56714	SAFE
3500.00024	83.13750	1461.34949	791.34827	SAFE
3500.00024	91.27500	1718.82190	533.87585	SAFE
3532.28833	58.72500	1738.51733	514.18042	SAFE
3532.28833	66.86250	1475.30225	777.39551	SAFE
3532.28833	75.00000	1774.42151	478.27625	SAFE
3532.28833	83.13750	1473.83423	778.86353	SAFE
3532.28833	91.27500	1736.10828	516.58948	SAFE
3564.57642	58.72500	1782.05591	470.64185	SAFE
3564.57642	66.86250	1431.99561	820.70215	SAFE
3564.57642	75.00000	1841.27490	411.42285	SAFE
3564.57642	83.13750	1429.97864	822.71912	SAFE
3564.57642	91.27500	1778.78955	473.90820	SAFE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Touch voltage



Direction along Y-axis at X = 3435.42407 meters.
Distance step = 1.00 meter.

รูปที่ C3 แสดงถึงศักดาไฟฟ้าสัมผัสของข้อมูลในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ศุสึ บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึง ข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์มากมาย ขอขอบคุณ คุณอภิชาติ ศิริกุล วิศวกรไฟฟ้า ประจำแผนกรักษาสายส่ง1/กองบำรุงรักษาสายส่ง/ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง สำหรับความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลของสายส่ง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการคอมพิวเตอร์ที่ให้ความสะดวกในการใช้คอมพิวเตอร์ รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] J.E.T. Villas, D. Mukhedkar, V.R. Fernandes, A.C. Magalhaes, "Ground Grid Design of a Transition Station System-A Typical Example of Fault Transfer", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1989, pp. 124-129.

[2] F. Dawalibiand, D. Mukhedkar, "Mutistep analysis of Interconnected Grounding Electrodes" , IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976, pp. 113-119.

[3] S.T. Sobral, J.O. Barbosa and V.S. Costa, "Ground Potential Rise Characteristics of URBAN Step-down Substations Fed by Power Cable - A Practical Example", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1564-1572.

[4] S.T. Sobral, V.G.P. Fleury, J.R. Villalba and D. Mukhedkar, " Decoupled Method for Studying Large Interconnected Ground System Using Microcomputers - Part I - Fundamentals", IEEE Transaction Paper 86SM455-0.

[5] S.T. Sobral, V.G.P. Fleury, J.R. Villalba and D. Mukhedkar, " Decoupled Method for Studying Large Interconnected Ground System Using Microcomputers - Part II - Utilization on the Itaipu Ground System and Complementary Aspects", IEEE Transaction Paper 86SM456-8.

[6] S.T. Sobral, Vasco S. Costa, J.O. Barbosa and D. Mukheadkar, "Solution of General Lumped Parameter Ladder Circuit Excited by Current Sources-A New Approach-Part I and Part II", Paper Submitted to IEEE.

[7] ศุภี บรรจงจิตร, ทองใบ อรรถเศรษฐ์, " การออกแบบระบบกราวด์ที่ดีที่สุดของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยอาศัยหลักการกระจายกระแสที่ไม่สม่ำเสมอ", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[8] สมชาย อึ้งนภาธานินทร์, สมพงษ์ เปี่ยมการุญวงษ์, " Ground Mat Study ", ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษา 2527, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้