

ปีการศึกษา 2531

การศึกษาระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคาร
GROUND MAT STUDY FOR INDOOR SUBSTATION



๑๕



ปริญญาโทปีการศึกษา 2531

ภาควิชา ไฟฟ้ากำลัง

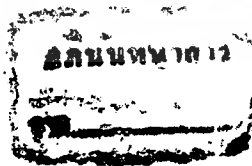
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
เรื่อง การศึกษาระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคาร

ผู้จัดทำ

- 1. นายกฤษณ์ เทพชนะกุล 28.1017
- 2. นายโชคชัย ลออปักษี 28.1068


 (รศ. ศุภิต บรรจงจิตร) อาจารย์ที่ปรึกษา


 (ผศ. ทองใบ อรรถเศรษฐ) อาจารย์ที่ปรึกษา



023158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่-9.๑๒.๒532 ไปได้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบต่อลงดิน	2
-2.1 ปัญหาพื้นฐานของระบบต่อลงดิน	2
-2.2 สาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุของระบบต่อลงดิน	3
-2.3 ความต้านทานจำเพาะของดิน	4
บทที่ 3 ทฤษฎีในการคำนวณ	6
-3.1 ขนาดการทนต่อกระแสของร่างกาย	6
-3.2 ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์	6
-3.3 สมมูลย์วงจรทางไฟฟ้าขณะเกิดอันตราย	7
-3.4 ผลของก้อนกรวดที่โรยบนพื้นผิวดิน	10
-3.5 ลักษณะของการเกิดอันตราย	11
-3.6 ค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัส	14
-3.7 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวและ Mesh voltage	15
-3.8 การประมาณค่าความยาวของตัวนำที่ใช้สั้นที่สุด	17
-3.9 ข้อจำกัดในการใช้สมการสำหรับ E_m และ E_s	18
-3.10 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน	18
-3.11 หลักการคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าบนผิวดินของ Dawalibi	19
บทที่ 4 ขั้นตอนในการคำนวณและออกแบบ	23
บทที่ 5 ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ผล	33
-5.1 ตะแกรงชุดเดียวไม่ประกอบแท่งต่อลงดิน	33
-5.2 ตะแกรงชุดเดียวประกอบแท่งต่อลงดิน	34
-5.3 ตะแกรง 2 ชุดแบบเชื่อมโยงกัน	35
บทที่ 6 สรุป	37
Appendix 1 ตัวอย่างการออกแบบ	40

Appendix 3	ตัวอย่างการออกแบบ	42
Appendix 4	ตัวอย่างการออกแบบ	43
Appendix 5	ตัวอย่างการออกแบบ	44
Appendix 6	ตัวอย่างการออกแบบ	45
Appendix 7	ตัวอย่างการออกแบบ	46
Appendix 8	Gas-Insulated Substation	47
Appendix 9	ระดับกระแสลัดวงจรของการไฟฟ้านครหลวง กิติกรรมประกาศ เอกสารอ้างอิง	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคาร

กฤษณ์ เทพชนะกุล

โชคชัย ลออปักซี่

รศ. ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ทองใบ อรรถเศรษฐ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2531

บทคัดย่อ

การศึกษาระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคาร มีความยุ่งยากมากกว่าแบบภายนอกอาคาร ทั้งนี้เพราะในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคารมีการออกแบบตะแกรงต่อลงดินแบบ 2 ชุด โดยชุดแรกจะถูกฝังในพื้นที่อาคารซึ่งเป็นคอนกรีต ส่วนตะแกรงอีกชุดถูกฝังลงที่ดินใต้อาคาร ซึ่งการออกแบบจะแตกต่างจากระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายนอกอาคารที่มีตะแกรงเพียงชุดเดียวเท่านั้น อีกทั้งในปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ประเภท Gas Insulated Equipment มาใช้ในสถานีไฟฟ้าแบบภายในอาคารกันมาก ดังนั้นในปฏิญานินพนธ์นี้จะได้ศึกษาการออกแบบระบบตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคารชนิด Gas Insulated Substation โดยจะนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณออกแบบเพื่อความถูกต้องและรวดเร็วด้วย

GROUND MAT STUDY FOR INDOOR SUBSTATION

Krit Thepchanakul

Chokechai La-o-paksi

Associate Professor Sulee

Banjongjit Advisor

Assistant Professor Thongbai

Attaseth Advisor

1988

Abstract

Indoor substation grounding designs are more difficult than outdoor substation designs because indoor grounding system utilizes two groups of ground grid. The upper grid is buried in the concrete floor and the other is buried under ground beneath the power-house. Generally outdoor substation has only one ground grid. At present, gas insulated equipment is popular to use indoor substation. This paper presents indoor substation or gas insulated substation grounding designs, and a better accuracy in designing is achieved by using a microcomputer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยทั่วไปจะเป็นในลักษณะของการนำเอาตัวนำมาประกอบเป็นตะแกรง (ground grid) และในบางกรณีอาจมีการประกอบแท่งต่อลงดิน (ground rod) เข้าไปด้วยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในบางจุด

ในปฏิญานินพนธ์นี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบต่อลงดินในลักษณะตะแกรงเช่นกัน โดยจะนำเอาทฤษฎีการคำนวณมาจากมาตรฐานของ IEEE ปี 1986 ซึ่งได้ทำการปรับปรุงการออกแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การศึกษาระบบต่อลงดินนี้จะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ทั้งนี้เพื่อความรวดเร็วและถูกต้อง ในส่วนแรกของปฏิญานินพนธ์นี้จะ เป็นทฤษฎีต่างๆในการออกแบบ และในส่วหลังจะเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการออกแบบและตัวอย่างโปรแกรมผลลัพธ์ของการออกแบบ

โดยที่ในปัจจุบันมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคารกันมาก และสถานีไฟฟ้าชนิดนี้มักเป็นแบบ Gas-Insulated Substation ใน Appendix 8 จึงได้อธิบายถึงลักษณะทั่วไปของสถานีไฟฟ้าย่อยชนิดนี้ เพื่อให้เกิดความกระจ่างขึ้นด้วย และการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบภายในอาคารกับแบบภายนอกอาคารก็มีความแตกต่างกันซึ่งจะได้อธิบายในส่วนของการออกแบบ

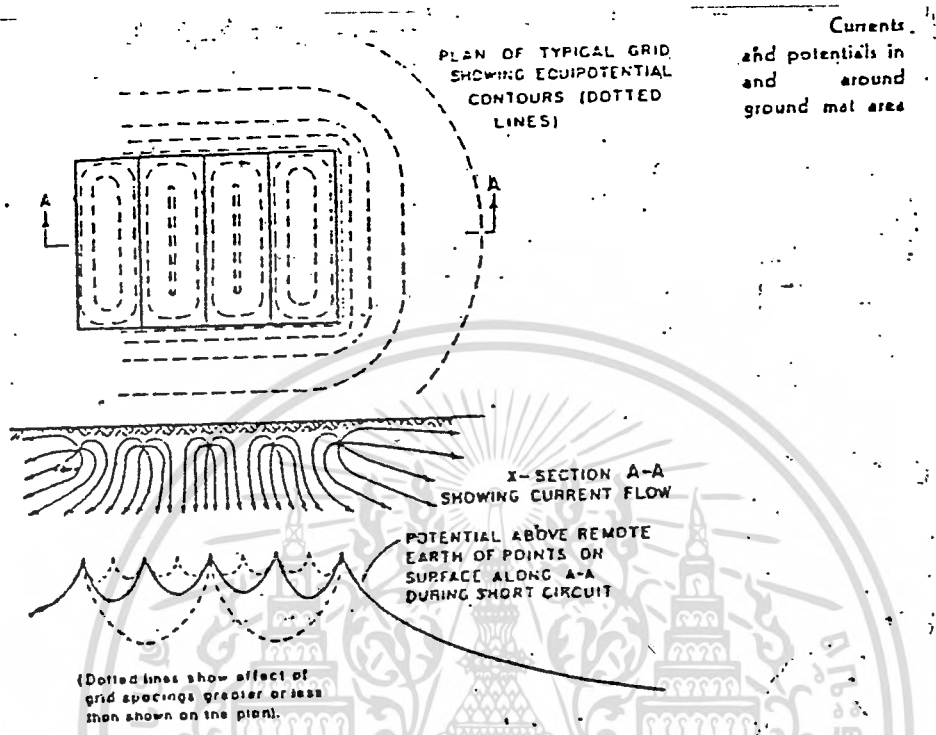
บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบต่อลงดิน

ในสถานีไฟฟ้าย่อยเมื่อเกิดผิดปกติ (fault) ขึ้นเช่น เกิดการลัดวงจรลงดิน (ground fault) กระแสลัดวงจรหรือกระแสผิดปกติจะไหลกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยถ้าในระบบมีการสาย overhead ground wire กระแสผิดปกติก็จะไหลผ่านทางสายเส้นนี้ แต่ถ้าไม่มีสาย overhead ground wire ก็จะใช้ดินเป็นทางกลับของกระแส (current return path) ทั้งนี้เพื่อให้กระแสผิดปกติสามารถไหลได้ครบวงจร อุปกรณ์ตัดจับความผิดปกติหรืออุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า (circuit breaker) จะสามารถตรวจจับความผิดปกติ และทำการตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานในการออกแบบระบบต่อลงดินก่อน

2.1 ปัญหาพื้นฐานของระบบการต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินนอกจากจะเป็นกราวด์ (ground) ของระบบไฟฟ้าแล้วยังต้องให้เกิดความปลอดภัยกับบุคคลที่ประกอบภารกิจภายในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วย ซึ่งภายใต้ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า (fault condition) กระแสจะไหลลงสู่ดินเป็นสาเหตุของการเกิดเกรเดียนของศักดาไฟฟ้าขึ้นทั้งภายในและภายนอกสถานีไฟฟ้าย่อย (substation) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการต่อลงดินโดยตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้ลักษณะดินเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (homoginious) ถ้าในการออกแบบไม่ตีพอเกรเดียนของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวเหนือตะแกรงต่อลงดินนั้น อาจมีค่าสูงเกินไปจนทำให้เกิดอันตรายต่อบุคคลภายในบริเวณนั้นได้ ค่าความต่างศักย์ที่เป็นอันตรายอาจจะเกิดขึ้นกับโครงของอุปกรณ์ซึ่งต่อลงดินกับพื้นดินในบริเวณใกล้เคียง ภายในและรอบขบวนสถานีไฟฟ้าย่อย หรืออาจจะเกิดขึ้นระหว่างสองจุดใดบนพื้นผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเท่าทั้งสองของคนนั้นสัมผัสอยู่ ถ้าการออกแบบระบบต่อลงดินได้ออกแบบอย่างถูกต้องก็สามารถที่จะป้องกันความต่างศักย์เหล่านี้ได้ ในทางปฏิบัติรูปทรงเรขาคณิตของระบบต่อลงดินจะมีความยุ่งยากสลับซับซ้อนมากกว่ารูป 2.1



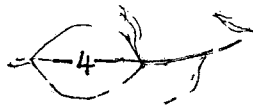
รูป 2.1

การที่ความต้านทานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย (SUBSTATION - GROUND RESISTANCE) มีค่าต่ำ ไม่ได้เป็นสิ่งยืนยันความปลอดภัย ยกเว้นในกรณีผลคูณ IR (โดยที่ I คือกระแสผิดปกติมากที่สุด R คือความต้านทานของระบบต่อลงดิน) มีค่าต่ำพอที่จะสัมผัสได้อย่างปลอดภัย โดยทั่วไปไม่สามารถหาความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างความต้านทานของระบบต่อลงดินกับค่าศักดาที่อันตรายสูงสุด (MAXIMUM SHOCK POTENTIAL) ในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ที่มีความต้านทานต่ำอาจจะไม่ปลอดภัยในบางสภาพแวดล้อม แต่ในบางสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต้านทานสูงอาจมีความปลอดภัย

นอกเหนือไปจากปริมาณเกรเดียนต์ที่เกิดในสถานีไฟฟ้าย่อยแล้ว ยังมีองค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อความปลอดภัย เช่น ช่วงเวลาของการเกิดอันตราย (SHOCK) , ความต้านทานของร่างกาย, โอกาสของการสัมผัส ซึ่งเป็นการยากในการประเมิน

2.2 สาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุของระบบต่อลงดิน

ในอดีตที่ผ่านมาคนจำนวนมากมักจะคิดว่าวัตถุใดๆก็ตามที่ได้มีการต่อลงดินจะสามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย ความคิดที่ผิดนี้ทำให้เกิดอุบัติเหตุเกิดขึ้นหลายครั้งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในอดีต แต่ในปัจจุบันปัญหานี้ได้ถูกนำมาค้นหาสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งจากการอาศัยข้อมูลและความรู้ใหม่จำนวนมากทำให้สามารถหาสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กระแสผิดปกติ (FAULT CURRENT) ไหลลงสู่ดินในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบต่อลงดินและค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดิน
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูง ทำให้การกระจายของกระแสลงสู่ดินมีค่าต่ำ เป็นสาเหตุให้เกิดเกรเดียนท์ที่สูงในบางจุดหรือหลายจุดในสถานีไฟฟ้าย่อย
3. มีส่วนของร่างกายของคนเป็นสะพานไฟฟ้า เชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุดที่ตำแหน่งหนึ่ง ณ เวลาหนึ่งๆ ซึ่งมีความต่างศักย์ที่มีค่าสูงคร่อมอยู่ระหว่างจุดสองจุดนั้น
4. ความต้านทานสัมผัส (CONTACT RESISTANCE) มีค่าน้อยหรืออาจไม่มีที่จะจำกัดกระแสที่จะไหลผ่านร่างกายเพื่อทำให้เกิดความปลอดภัย ภายใต้อุปกรณ์ที่เกิดความผิดปกติ
5. ช่วงเวลาของการเกิดผิดปกติ (FAULT) และของการไหลของกระแสผ่านร่างกายทางจุดสัมผัสทั้งสองดังกล่าวนี้เป็นเวลานาน ทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้ ที่ระดับความเข้มของกระแสตามที่กำหนด

2.3 ความต้านทานจำเพาะของดิน

ความต้านทานจำเพาะของดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อย จะมีผลต่อการกระจายกระแสผิดปกติลงสู่ดินบริเวณรอบตัวนำของตะแกรงต่อลงดินมาก โดยถ้าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าต่ำกระแสผิดปกติจะสามารถกระจายออกสู่พื้นผิวดินได้มาก ในทางกลับกันถ้าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงกระแสผิดปกติก็จะกระจายออกสู่พื้นดินได้ต่ำ ทำให้ศักดาไฟฟ้าที่จุดต่างๆที่พื้นผิวดินมีค่าสูง ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละพื้นที่หรือในพื้นที่บริเวณเดียวกันอาจมีค่าต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ความชื้นของดิน อุณหภูมิของดิน สารเคมีที่อยู่ภายในดิน เป็นต้น สำหรับค่าความต้านทานจำเพาะของดินและหินชนิดต่างๆ ได้แสดงให้เห็นอยู่ในตารางที่ 2.1

Representative Values of Soil Resistivities

Type of Ground	Resistivity in ohm-meters
Wet organic soil	10
Moist soil	10 ²
Dry soil	10 ³
Bed rock	10 ⁴

ตารางที่ 2.1

โดยทั่วไปสำหรับการคำนวณและออกแบบมักจะถือว่าพื้นดินเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าเดียวตลอดเนื้อดินนั้น เพราะคุณสมบัติของพื้นดินส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในบางสภาพพื้นดินอาจมีลักษณะที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกันตลอด การพิจารณาอาจต้องจัดให้มีโครงสร้างแบบพื้นดินหลายชั้น ซึ่งแต่ละชั้นก็มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินค่าหนึ่ง

บทที่ 3

ทฤษฎีในการคำนวณ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีในการคำนวณทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในปฏิญานี้พจน์นี้

3.1 ขนาดการทนต่อกระแสของร่างกาย

ได้มีการทดลองหาค่ากระแสที่ผ่านร่างกายของมนุษย์โดยที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบประสาท และร่างกายของมนุษย์ในช่วงเวลาสั้นๆประมาณ 0.03-3 วินาที ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ร่างกายรับเข้าไป ดังสมการ

$$I_b^2 t_s = S_b \dots\dots\dots 3.1$$

โดยที่ I_b = ค่ากระแส (rms) ที่ผ่านร่างกาย (แอมแปร์)

t_s = เวลาที่ใช้ขณะเกิดการผิปกติ (วินาที)

S_b = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานไฟฟ้าที่ร่างกายได้รับในขณะเกิดการผิปกติ

จากสมการ 3.1 สามารถเขียนในรูปกระแสได้ดังนี้

$$I_b = \sqrt{\frac{S_b}{t_s}} \dots\dots\dots 3.2$$

และจากการศึกษาทดลองบุคคลโดยเฉลี่ยทั่วไปที่ น.น. 50 kg หรือ 110 lbs พบว่าจำนวน 99.5% ของบุคคลที่ทดลอง สามารถทนต่อขนาดของกระแสที่มา จากสมการ 3.1 ได้ โดยมีค่า $S_b = 0.0135$ ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 เขียนใหม่ได้

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{สำหรับคนหนัก 50 kg} \dots\dots\dots 3.3$$

และสำหรับน้ำหนักคนที่เพิ่มขึ้นก็มีผลต่อกระแสที่สามารถทนได้ ดังนั้นที่น้ำหนัก 70 kg จะมีค่า $S_b = 0.0246$

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{สำหรับคนหนัก 70 kg} \dots\dots\dots 3.4$$

3.2 ค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์

(Resistance of the Human Body)

สำหรับไฟกระแสดตรงและไฟกระแสลับในสภาวะความถี่ปกติ ร่างกายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มนุษย์จะมีค่าความต้านทานประมาณ 500 - 3000 โอห์ม แต่ก็ขึ้นอยู่กับว่า สภาพผิวหนังนั้นมีค่าความชื้นมากน้อยเพียงไร ซึ่งก็จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป

ดังนั้น เราจะสรุปเป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบ ดังนี้

1. สมมุติฐานว่าความต้านทานที่มือสัมผัส และพื้นรองเท้ามีค่าประมาณเท่ากับศูนย์
2. ค่าความต้านทานจากมือไปเท้าทั้งสอง (hand-to-both feet) และจากมือหนึ่งไปยังอีกมือหนึ่ง (hand-to-hand) หรือ จากขาข้างหนึ่งไปยังขาอีกข้างหนึ่ง (one foot to the other foot) มีค่าความต้านทานประมาณ 1000 โอห์ม

$$R_B = 1000 \text{ ohm} \dots\dots\dots 3.5$$

โดยได้มีการกำหนดว่า R_A เป็นความต้านทานทั้งหมดขณะเกิดการผิดปกติ โดยมีค่าเท่ากับ ผลรวมของ R_B (ความต้านทานร่างกาย) และ R_F (ความต้านทานที่ใต้เท้าสัมผัสอยู่)

3.3 สมมูลย์วงจรทางไฟฟ้าขณะเกิดอันตราย

(Accidental Circuit Equivalents)

การวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวงจรจะพิจารณาว่าเท้าของคนเราเปรียบเสมือนกับแผ่นโลหะ (metallic disk) และความต้านทานของรองเท้าที่ใส่จะไม่พิจารณา ซึ่งหลักการดังกล่าว SUNDE, J.G. ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ (self resistances) และความต้านทานไฟฟ้าร่วม (mutual resistances) สำหรับแผ่นโลหะกลม 2 อันซึ่งมีรัศมี b และห่างกันเป็นระยะทาง d_F บนผิวหน้าของดินที่มีสภาพความต้านทานจำเพาะ P เท่ากับ

$$R_{foot} = P / (4 * b) \dots\dots\dots 3.6$$

$$R_{mfoot} = P / (2 \pi d_{foot}) \dots\dots\dots 3.7$$

โดยที่ P = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

R_{foot} = self resistance ของขาแต่ละข้าง (โอห์ม)

R_{mfoot} = mutual resistance ระหว่างขาทั้งสอง (โอห์ม)

b = สมมูลย์ค่ารัศมีของเท้า (equivalent radius) (เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_{foot} = ระยะห่างระหว่างเท้าทั้งสอง (เมตร)

ค่าความต้านทานของพื้นดินใต้เท้าทั้งสองข้างเมื่อเป็นแบบอนุกรมและขนาน

คือ $R_{2FB} = 2 * (R_{foot} - R_{Mfoot}) \dots\dots 3.8$

$R_{2FF} = 1/2 (R_{foot} + R_{Mfoot}) \dots\dots 3.9$

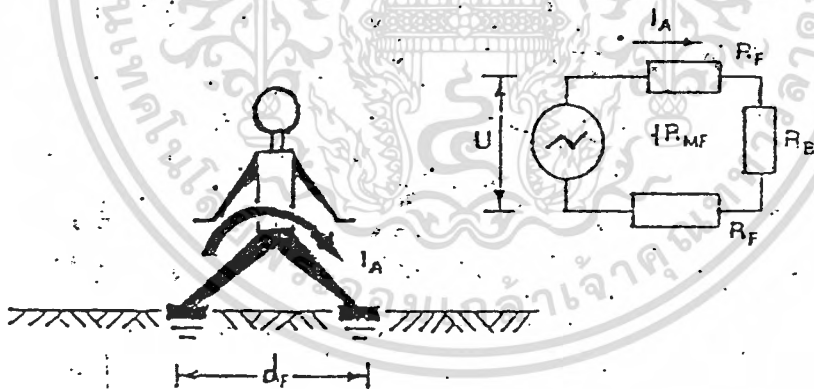
โดยที่

R_{2FB} = ความต้านทานใต้เท้าทั้งสองเมื่อเป็นแบบอนุกรม

R_{2FF} = ความต้านทานใต้เท้าทั้งสองเมื่อเป็นแบบขนาน

ในรูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว หรือ step voltage โดยในการคำนวณจะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเท้าทั้งสองประมาณ 1 เมตร และในสมการที่ 3.10 แสดงความต้านทานของวงจรไฟฟ้าสมมูลย์สำหรับแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว

$R_A = R_B + 2(R_{foot} - R_{Mfoot}) \dots\dots 3.10$



$d_F = 1 \text{ m}$
 $R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$
 $I_A = U/R_A$
 $R_B = 1000 \Omega$

where

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

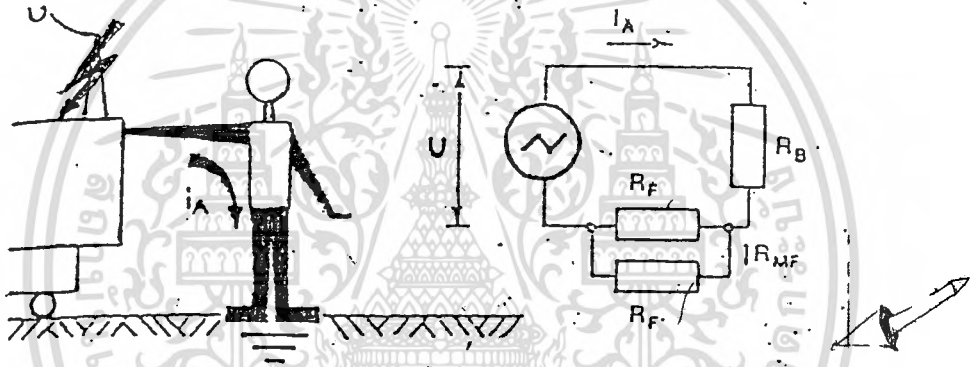
รูปที่ 3.1



และในรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส หรือ touch voltage และลักษณะของวงจรไฟฟ้าสมมูลย์

โดยที่จะมีค่าความต้านทานของวงจรไฟฟ้าสมมูลย์สำหรับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เป็นดังสมการที่ 3.11

$$R_A = R_B + 1/2 (R_{foot} + R_{Mfoot}) \dots\dots 3.11$$



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

รูปที่ 3.2

แสดงลักษณะของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ซึ่งอาจจะคิดโดยประมาณว่า รัศมีของแผ่นโลหะกลมที่สมมุติแทนเท้าของคนเราแต่ละข้างมีค่าเท่ากับ 0.08 เมตรหรือ 3 นิ้ว และไม่คิดค่าความต้านทานร่วม (mutual resistance) ดังนั้นค่าความต้านทานของพื้นดินใต้เท้าทั้งสองข้างในแบบอนุกรม และขนานสามารถเขียนในรูปของสภาพความต้านทานจำเพาะ P ได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$R_{2FB} = 6 * (P) \dots\dots 3.12$$

$$R_{2FF} = 1.5 * (P) \dots\dots 3.13$$

3.4 ผลของก้อนกรวด(crush rock)ที่โรยบนพื้นผิวดิน

จากการหาค่าความต้านทานของวงจรมุมลู่ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3 นั้น โดยการตั้งสมมุติฐานว่า พื้นดินเป็นเนื้อเดียวกันหมด แต่ในทางปฏิบัติจะมีการโรยก้อนกรวดหนาประมาณ 0.08 - 0.15 เมตร บนพื้นผิวดิน เพื่อเพิ่มความต้านทานสัมผัส(contact resistivity) ระหว่างเท้าของผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยกับพื้นดิน ซึ่งจะเป็นส่วนช่วยในการจำกัดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายในขณะที่เกิดการผิดปกติได้

ดังนั้นสมการที่ 3.6 และ 3.7 จึงเขียนใหม่ในรูปที่มีผลของการโรยก้อนกรวดเป็นดังสมการที่ 3.14 และ 3.15

$$R_{foot} = P * F(X1) / 4b \dots\dots 3.14$$

$$R_{mfoot} = P * F(X2) / (2\pi d_{foot}) \dots\dots 3.15$$

ซึ่งค่า F(X) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความต้านทานของดิน และความต้านทานของก้อนกรวดที่โรยดังนี้

$$F(X) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q}{K^n} \dots\dots 3.16$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1+(2nX)^2}} \dots\dots 3.17$$

$$K = (P-P_s)/(P+P_s) \dots\dots 3.18$$

โดยที่ P_s = ความต้านทานจำเพาะของก้อนกรวด (โอห์ม-เมตร)
(crush rock resistivity)

P = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)
(soil resistivity)

X = X1 = hs/b สำหรับ R_{foot}

X = X2 = hs/d_{foot} สำหรับ R_{mfoot}

hs = ความหนาของก้อนกรวดที่โรยบนผิวดิน (เมตร)

ดังนั้นในกรณีที่มีการโรยก้อนกรวดบนผิวดิน จะได้ค่าความต้านทานที่ได้เท้าของคนในแบบอนุกรม(series resistance) และแบบขนาน(parallel resistance) ดังสมการที่ 3.19 และ 3.20 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_{2FS} = 6.0 * C_s(h_s,K)*P_s3.19

R_{2FR} = 1.5 * C_s(h_s,K)*P_s3.20

ซึ่งค่า C_s เป็นค่า reduction factor

และ C_s = 1 เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของก้อนกรวดเท่ากับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

C_s = 1 / 0.96 [1 + 2 * sum_{n=1}^{inf} (K^n / sqrt(1+(2nh_s/0.08)^2))]3.21

ซึ่งค่า C_s จากสมการ 3.21 เป็นค่าผลรวมอนุกรมอนันต์ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

C_s = 1 - a [(1 - (P/P_s)) / (2h_s + a)]3.22

โดยค่า a = 0.106 m

3.5 ลักษณะของการเกิดอันตราย

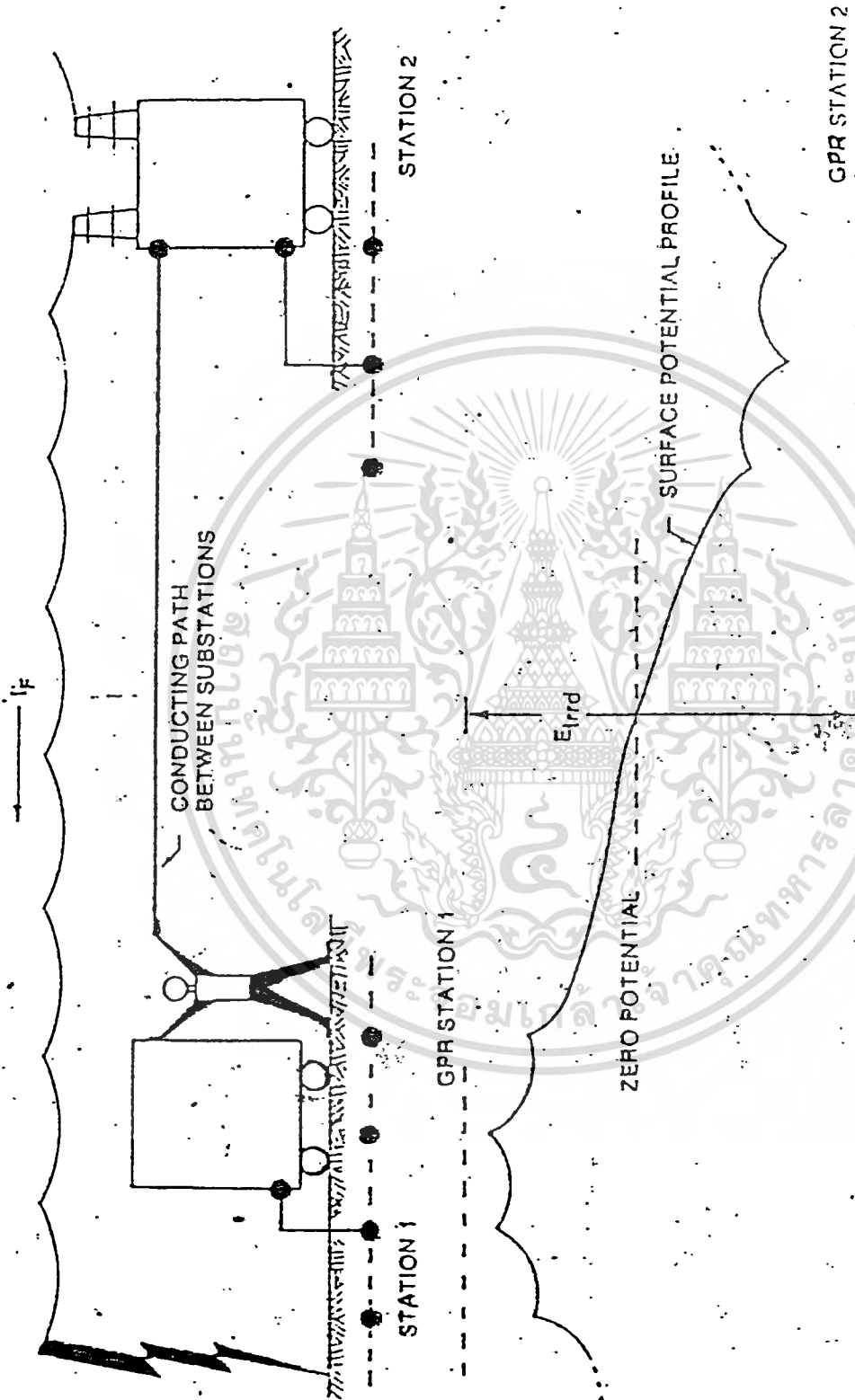
(Typical Shock Situation)

รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงถึงเหตุการณ์ขณะเกิดการผิดปกติ 4 เหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานที่ในสถานีไฟฟ้าย่อย ดังต่อไปนี้

- 1. เกิดจากแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว (step voltage)
2. เกิดจากแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (touch voltage)
3. เกิดจากแรงดัน mesh voltage
4. เกิดจากแรงดัน transferred voltage

ในขณะที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้น กระแสผิดปกติจะไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดิน (ground grid) ทำให้เกิดการกระจายของกระแสไปที่บริเวณนั้น และจะเกิดศักดาไฟฟ้าบนผิวดิน(surface voltage)ขึ้น

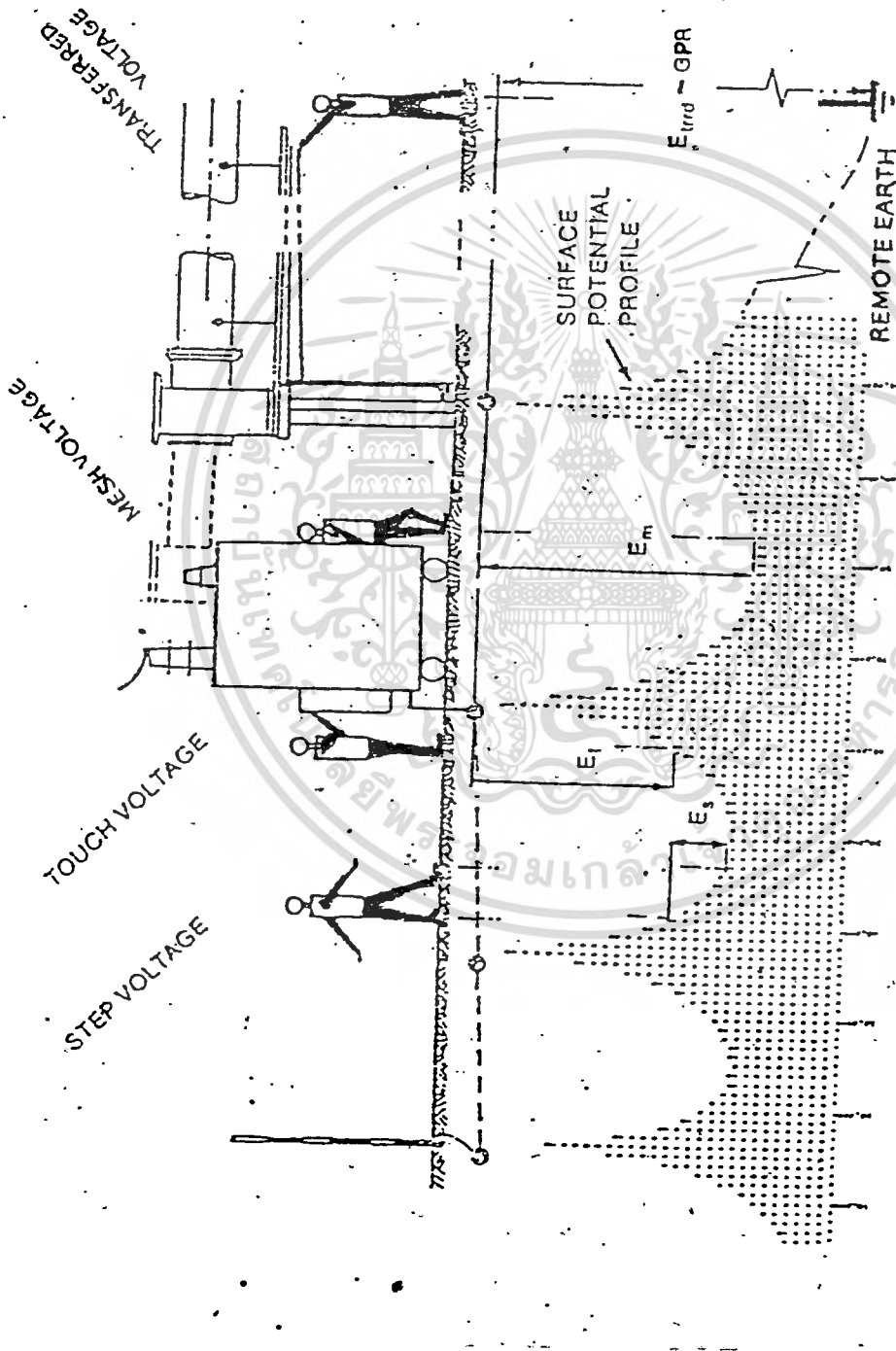
โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงนิยามของค่าที่จำเป็นต้องทราบ เพื่อสะดวกในการอ้างอิงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3

แสดงลักษณะการเกิด External Transferred Potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4

แสดงลักษณะการเกิดอันตรายแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Grid Potential Rise (GPR) เป็นค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำที่ประกอบเป็นตะแกรง
- Step voltage (แรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว) เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างขาทั้งสองในขณะก้าวเดิน โดยทั่วไปจะประมาณระยะก้าวเดินสำหรับการคำนวณเท่ากับ 1 เมตร
- Touch voltage (แรงดันไฟฟ้าสัมผัส) เป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างโครงสร้างของอุปกรณ์ต่างๆในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ต่อลงระบบต่อลงดิน กับศักดาไฟฟ้า ณ. จุดที่คนผู้นั้นยืนอยู่
- Mesh voltage เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด หรือเท่ากับความแตกต่างของศักดาไฟฟ้าระหว่างตัวนำบนตะแกรง(GPR) กับศักดาไฟฟ้าบนผิวดินตรงจุดกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างตัวนำหรือช่อง mesh
- Transferred voltage เป็นเหตุการณ์กรณีพิเศษของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นเมื่อบุคคลยืนอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และสัมผัสกับโครงสร้างที่ต่อกับระบบต่อลงดิน ณ. จุดที่ห่างไกลออกไป หรือ บุคคลนั้นยืนอยู่ ณ. จุดที่ห่างไกลจากสถานีย่อย และไปสัมผัสกับตัวนำซึ่งเชื่อมกับตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยในขณะเกิดการผิดปกติ ซึ่งค่า Transferred voltage นี้อาจมากกว่าหรือเท่ากับ ค่าGPR ก็ได้

3.6 ค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

เป็นค่าศักดาไฟฟ้าที่สูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้ โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง ดังนี้

$$E_{step} = (R_B + R_{res}) * I_B \dots\dots\dots 3.23$$

$$E_{step} 50 \text{ kgs} = (1000 + 6C_s(h_s, K)P_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots 3.24$$

$$E_{step} 70 \text{ kgs} = (1000 + 6C_s(h_s, K)P_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots\dots\dots 3.25$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในการออกแบบระบบต่อลงดิน ค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวที่เกิดขึ้นในขณะเกิด
ความผิดปกติ ควรมีค่าน้อยกว่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว และ
สำหรับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

$$E_{\text{touch}} = (R_B + R_{\text{zpp}}) * I_B \quad \dots\dots 3.26$$

$$E_{\text{touch } 50 \text{ kgs}} = (1000 + 1.5 C_s(h_s, K) P_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \dots\dots 3.27$$

$$E_{\text{touch } 70 \text{ kgs}} = (1000 + 1.5 C_s(h_s, K) P_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \dots\dots 3.28$$

ทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว และแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ที่ปรากฏขึ้นควรมีค่า
ต่ำกว่าค่าขอบเขตความปลอดภัยในสมการที่ 24, 25, 27 และ 28

3.7 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว และ Mesh voltage

สำหรับ Mesh voltage

กำหนดให้ E_m = ค่า mesh voltage ของ mesh ตรงมุมตะแกรง

$$\text{และ } E_m = P * K_m * K_i * I_g / L \quad \dots\dots 3.29$$

โดยกำหนดให้ P = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

L = ความยาวทั้งหมดของตัวนำที่ใช้ (เมตร)

I_g = กระแสผิดปกติที่เกิดขึ้น (แอมแปร์)

K_m = ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับ spacing factor

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2 + \frac{(D+2h)^2 - h^2}{8Dd}}{16hd} \right) + \frac{K_{ii} \ln 8}{Kh \pi(2n-1)} \right] \quad \dots 3.30$$

D = ช่องว่างระหว่างตัวนำในแต่ละแนว (เมตร)

h = ความลึกของตะแกรงต่อลงดินที่ใช้ฝัง (เมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ (เมตร)

n = จำนวนตัวนำที่ขนานกันในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

K_{ii} = 1 สำหรับตะแกรงต่อลงดินที่มีการประกอบแท่งต่อลงดินเข้าที่ทุกจุดตัด
ของตัวนำในตะแกรง

$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$ สำหรับตะแกรงต่อลงดินที่ไม่มีการต่อแท่งต่อลงดิน เข้าที่บริเวณ
มุมของตะแกรง หรือมีแท่งต่อลงดิน ในบางจุดเท่านั้น

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_o}$$

$h_o = 1 \text{ m}$ (ความลึกอ้างอิงของตะแกรงต่อลงดิน)

โดยที่ค่า K_i เป็นค่า corrective factor สำหรับรูปทรงของตะแกรง

$$\text{และค่า } K_i = 0.656 + 0.172 n \dots\dots 3.31$$

ถ้ากำหนดให้ L_c แทนความยาวทั้งหมดเฉพาะตะแกรง และ L_r แทนความยาวทั้งหมดเฉพาะแท่งต่อลงดิน

ดังนั้นสำหรับตะแกรงที่มีการต่อแท่งต่อลงดินที่ทุกจุด

$$E_m = \frac{P * I_G * K_m * K_i}{L_c + 1.15 L_r} \dots\dots 3.32$$

และสำหรับตะแกรงที่มีการต่อแท่งต่อลงดินในบางจุดเท่านั้น

$$E_m = \frac{P * I_G * K_m * K_i}{L_c + L_r} \dots\dots 3.33$$

สำหรับ Step voltage

$E_s =$ ค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว โดยคิดจากจุดที่ห่างจากขอบตะแกรง
ด้านนอกเป็นระยะทาง 1 เมตร

$$E_s = P * K_s * K_i * I_G / L \dots\dots 3.34$$

ซึ่ง $L = L_c + L_r$ สำหรับตะแกรงซึ่งไม่ประกอบแท่งต่อลงดิน หรือมีแท่งต่อ
ลงดินเพียงบางจุด

$L = L_c + 1.15 L_r$ สำหรับตะแกรงที่มีการประกอบแท่งต่อลงดินทุกจุดตัด

โดยปกติค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวสูงสุด (maximum step voltage) ถูกสมมุติ
ให้เกิดที่รอบนอกตะแกรงเป็นระยะห่างเท่ากับความลึกในการฝัง (h)

ในการฝังตะแกรงปกติจะประมาณ 0.25 - 2.5 เมตร ซึ่ง K_s จะเท่ากับ

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \dots\dots 3.35$$

และสำหรับตะแกรงที่ลึกละเอียดกว่า 0.25 เมตร

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right] \dots\dots\dots 3.36$$

ซึ่ง $W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \dots + \frac{1}{n-1}$

หรือ สำหรับ n มากกว่าหรือเท่ากับ 6

$$W = \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423$$

สังเกตได้ว่าค่า K_s นี้ขึ้นกับค่าความลึกตะแกรง ซึ่งเป็นความจริงที่ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความลึกของตะแกรงเพิ่มขึ้น

3.8 การประมาณค่าความยาวของตัวนำที่ใช้อย่างน้อยที่สุด

(Estimate of Minimum Burial Conductor Length)

ในการประมาณค่าความยาวของตัวนำที่จำเป็นต้องใช้อย่างน้อยที่สุด มาจากความล้มพันธ์ที่ว่า ค่า Mesh voltage จะต้องน้อยกว่าค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ซึ่งสามารถหาเป็นสมการได้ว่า

$$E_m < E_{touch50} \quad \text{สำหรับคนหนัก 50 ก.ก.}$$

$$\frac{K_m * K_i * P * I_G}{L} < \frac{(1000 + 1.5 C_s (h_s, K) P_s)}{\sqrt{t_s}} \quad 0.116 \quad \dots\dots\dots 3.37$$

จัดรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$L > \frac{K_m * K_i * P * I_G \sqrt{t_s}}{(116 + 0.174 C_s (h_s, K) P_s)} \quad \dots\dots\dots 3.38$$

เช่นเดียวกันสำหรับคนหนัก 70 ก.ก. , $E_m < E_{touch70}$

$$L > \frac{K_m * K_i * P * I_G \sqrt{t_s}}{(157 + 0.235 C_s (h_s, K) P_s)} \quad \dots\dots\dots 3.39$$

3.9 ข้อจำกัดในการใช้สมการสำหรับ E_m และ E_s

สมการต่างๆในหัวข้อที่ 3.7 และ 3.8 มีขอบเขตในการนำไปใช้ออกแบบ ดังนี้

- ลักษณะของตะแกรงจะต้องเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า และระยะห่างระหว่างตัวนำแต่ละแนวต้องเท่ากัน (equalling spacing conductor)
- จำนวนตัวนำที่ใช้ทั้งสองทิศทางไม่เกิน 25 ($n \leq 25$)
- เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ต้องน้อยกว่า 25% ของระยะความลึกที่ฝัง ($d < 0.25h$)

ถึงแม้ว่าจะมีข้อจำกัดนี้ แต่ในทางปฏิบัติจริงๆก็อาจจะละเลยต่อข้อปฏิบัติเหล่านี้ได้ เพราะค่าที่ได้ก็ยังไม่พอที่จะยอมรับได้

3.10 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน

(Ground resistance)

ในทางอุดมคติค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินควรมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจะกำหนดให้มีค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินไม่เกิน 1 โอห์ม

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน สามารถหาได้จากสมการ 3.40 และสมการ 3.41

$$R_g = \frac{P}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{P}{L} \dots\dots\dots 3.40$$

สำหรับตะแกรงที่ฝังลึกน้อยกว่า 0.25 เมตร

โดยที่ L = ความยาวของตัวนำทั้งหมดที่ถูกฝัง (เมตร)

P = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

A = พื้นที่ซึ่งถูกครอบคลุมโดยตะแกรง (ตร. เมตร)

R_g = ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (โอห์ม)

และ

$$R_g = P \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \dots\dots\dots 3.41$$

สำหรับความลึกของตะแกรงระหว่าง 0.25 ถึง 2.5 เมตร
โดยที่ h = ความลึกในการฝังตะแกรง (เมตร)

3.11 หลักการคำนวณค่าศักดาไฟฟ้าบนผิวดินของ Devalibi

ในหัวข้อนี้เป็นหลักการในการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าบนผิวดิน ซึ่งจะขอกล่าวเพียงคร่าวๆเท่านั้น เพราะในปฏิญานพนธ์นี้จะไม่ใช้หลักการในหัวข้อนี้ออกแบบ เนื่องจากในปัจจุบันได้มีวิธีการใหม่ในการคำนวณออกแบบมาใช้ดังในหัวข้อก่อนหน้า และในปฏิญานพนธ์รุ่นก่อนหน้า ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์มาแล้ว

การศึกษาวิธีการหาค่าศักดาไฟฟ้าบนผิวดินในหัวข้อนี้จะทำให้เข้าใจสมการต่างๆในหัวข้อ 3.7 ได้ว่ามีที่มาอย่างไร

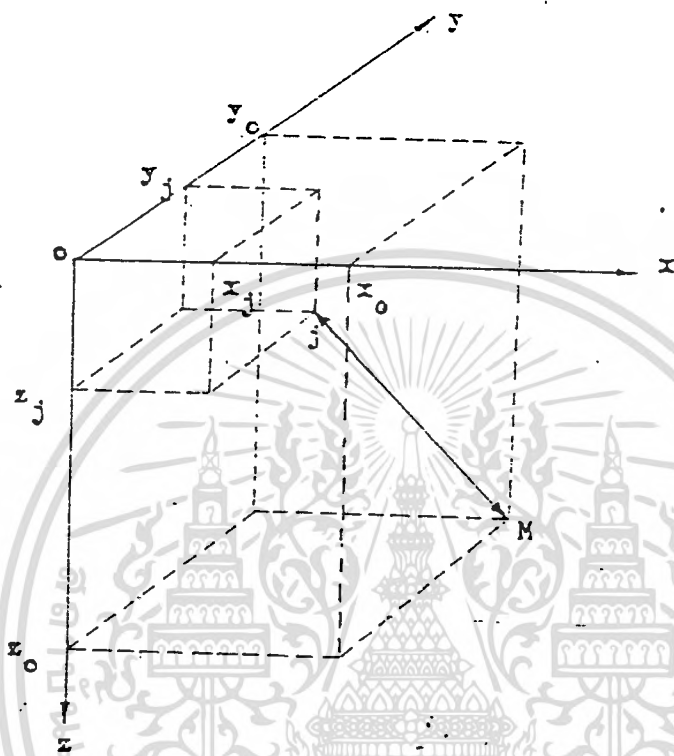
หลักการของ Devalibi แบ่งเป็น 2 วิธีการคือ

- วิธีผลรวม (Summation method)
- วิธีอินทิเกรต (Integration method)

3.11.1 วิธี Summation

วิธีนี้ใช้หลักการแบ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งจะได้ค่าศักดาไฟฟ้าที่จุด M ใดที่อยู่บนพื้นดินชั้นบนสุดเป็นผลรวมของศักดาไฟฟ้าเนื่องจากแต่ละส่วนย่อยๆ j ที่มีกระแส I_j ไหลผ่านคือ

$$V = \frac{PI}{4\pi L} \sum_1^m \delta_j \left[\frac{1}{r_{0j}} + \frac{1}{r'_{0j}} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right) \right] du$$



รูปที่ 3.5
แสดงพิกัดจก j และจาก M

โดยที่

$$r_{oj} = [(Xj-Xo)^2 + (Yj-Yo)^2 + (Zj-Zo)^2]^{1/2}$$

$$r'_{oj} = [(Xj-Xo)^2 + (Yj-Yo)^2 + (Zj+Zo)^2]^{1/2}$$

$$r_{nj+} = [(Xj-Xo)^2 + (Yj-Yo)^2 + [2nh + (Zj-Zo)]^2]^{1/2}$$

$$r'_{nj+} = [(Xj-Xo)^2 + (Yj-Yo)^2 + [2nh + (Zj+Zo)]^2]^{1/2}$$

$$r_{nj-} = [(Xj-Xo)^2 + (Yj-Yo)^2 + [2nh - (Zj+Zo)]^2]^{1/2}$$

$$r'_{nj-} = [(Xj-Xo)^2 + (Yj-Yo)^2 + [2nh - (Zj-Zo)]^2]^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี Summation

$$V = \frac{PI}{4\pi L} \sum_1^m \rho_j \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} \right] du$$

และวิธี Integration

$$V = \frac{PI}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \left[\ln \frac{(U_p - U_o + \sqrt{(U_p - U_o)^2 + V_o^2 + W_o^2})}{-U_o + \sqrt{U_o^2 + V_o^2 + W_o^2}} + \ln \frac{(U_p - U_o + \sqrt{(U_p - U_o)^2 + V_o^2 + (W_o + 2Z\epsilon)^2})}{-U_o + \sqrt{U_o^2 + V_o^2 + (W_o + 2Z\epsilon)^2}} \right]$$

โดยที่

P = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)

I = กระแสผิดปกติทั้งหมดที่ไหลลงตะแกรง (แอมแปร์)

L = ความยาวของตัวนำที่ใช้ประกอบเป็นตะแกรง (เมตร)

ρ_j = ค่า numerical factor ที่ใช้ในกรณีที่เป็นการกระจายกระแสอย่างไม่สม่ำเสมอ (non-uniform linear current)

r = ระยะทางระหว่างจุดหนึ่งในขั้วตะแกรงกับจุดหนึ่งในพื้นดิน (เมตร)

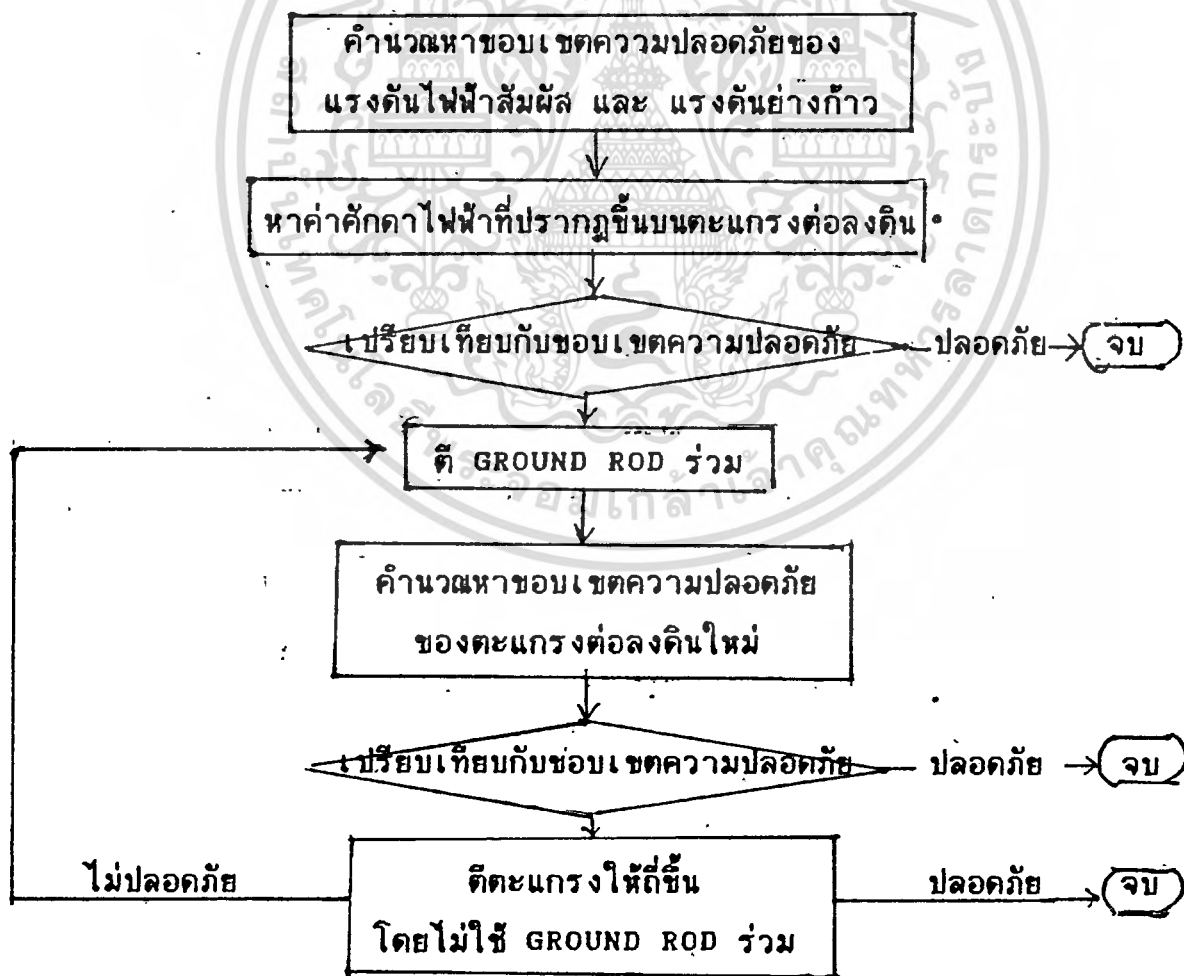
u, v, w = เป็นพิกัดเทียบกับแกนซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับส่วนหนึ่งของตะแกรง

x, y, z = เป็นพิกัดเทียบกับแกนอ้างอิง

บทที่ 4

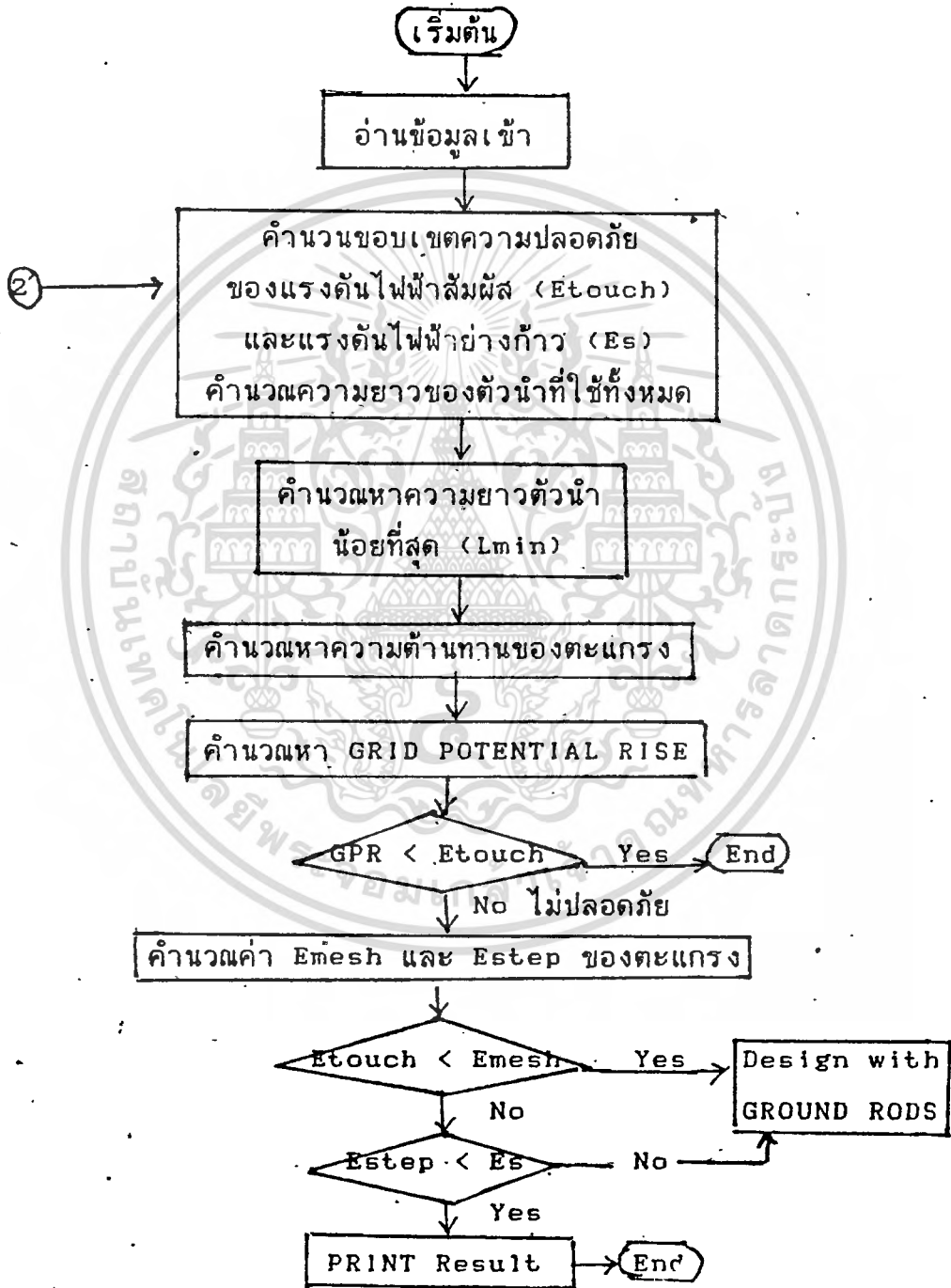
ขั้นตอนในการคำนวณและออกแบบ

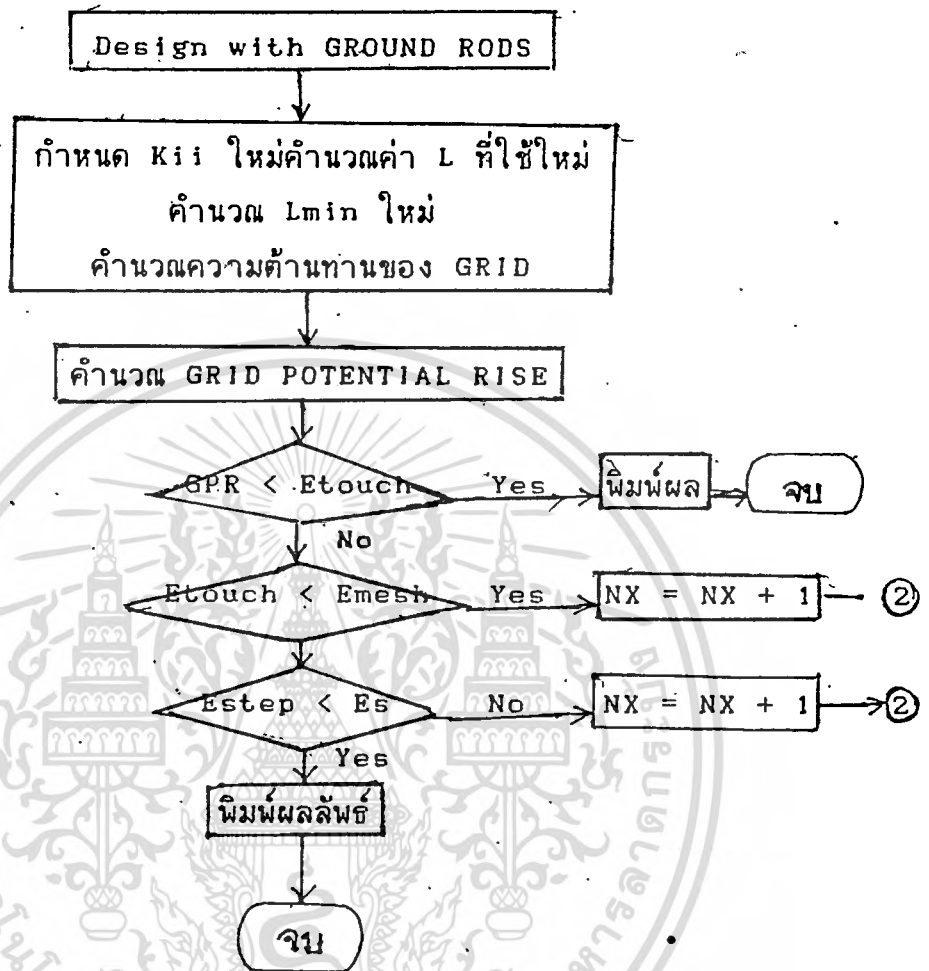
4.1 ส่วนของแผนภูมินี้แสดงถึง การใช้ GROUND GRID ในการออกแบบ โดยมีเงื่อนไข หากยังไม่ปลอดภัยก็จะมีประกอบ GROUND RODS และหากยังไม่ปลอดภัยก็จะมีแบ่งตะแกรงให้ดีขึ้นโดยไม่ใช้ GROUND RODS ถ้าหากยังไม่ปลอดภัยอีกก็จะมีประกอบ GROUND RODS จุดประสงค์ก็เพื่อเน้นถึงด้านความประหยัด ควบคู่กับความปลอดภัยในการออกแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภูมิอธิบายการใช้ GROUND GRID + GROUND RODS





ขั้นตอนสำคัญ ๆ จากแผนภูมิสามารถอธิบายได้ดังนี้

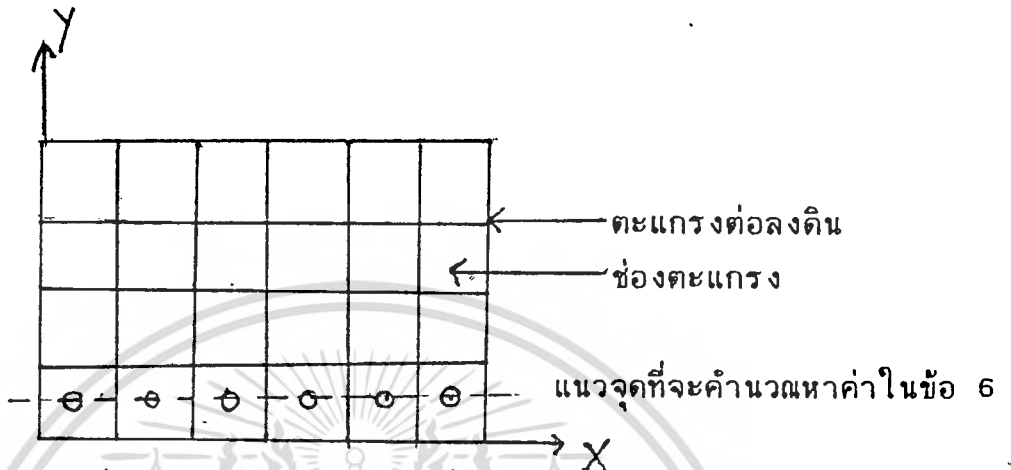
1. การอ่านข้อมูล

ข้อมูลค่าที่ถูกเตรียมไว้ในหัวข้อ จะถูกอ่านเข้าไปเพื่อนำไปคำนวณและออกแบบในขั้นต่อไป

2. เป็นการคำนวณหาขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) และ (E_s) แรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว และคำนวณหาความยาวของการวางตัวนำลงดินครั้งแรก ในแนวความกว้างและยาวอย่างละเท่าใด โดยนำรูปร่างของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อมาเป็นหลัก โดยลักษณะการวางตัวนำจะเป็นตะแกรงต่อลงดินแบบธรรมดา

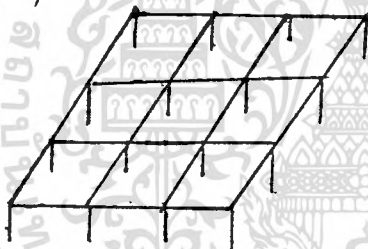
3. ขั้นตอนในการหาตัวนำที่น้อยที่สุด ตามสูตรของ IEEE 1987
4. คำนวณหาความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน และคำนวณค่า GRID POTENTIAL RISE
5. เปรียบเทียบค่าขอบเขตความปลอดภัยสัมผัส Etouch > GRID POTENTIAL RISE หากปลอดภัยจะพิมพ์ผลลัพธ์ และจบสิ้นการทำงาน
6. หากการเปรียบเทียบในข้อ 5 ไม่ปลอดภัยก็จะคำนวณค่า Emesh และ Estep ของตะแกรงต่อลงดิน
7. เปรียบเทียบค่าขอบเขตความปลอดภัยสัมผัสกับค่า Emesh หากไม่ปลอดภัยจะมีการออกแบบใช้ GROUND RODS เพิ่มเข้าไปร่วมกับ GROUND GRID แต่หากปลอดภัยจะมีการเปรียบเทียบขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันอย่างก้าว กับ แรงดันอย่างก้าวของตะแกรงต่อลงดิน หากไม่ปลอดภัยก็จะมีการออกแบบใช้ GROUND RODS ร่วมกัน แต่หากปลอดภัยก็จะมีการพิมพ์ผลลัพธ์ และจบสิ้นการทำงาน
8. ขั้นตอนต่อไป จะกล่าวถึงการออกแบบโดยใช้ร่วมกับ GROUND RODS ซึ่งมีการกำหนดค่า Parameter เปลี่ยนไป เช่น $K_{11} = 1$ ค่าคำนวณ Lmin ใหม่ ตลอดจนคำนวณ GRID POTENTIAL RISE และค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดิน
9. จากนั้นจึงมีการเปรียบเทียบค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันสัมผัส กับ GRID POTENTIAL RISE หากปลอดภัยพิมพ์ผลลัพธ์และจบการคำนวณ แต่หากไม่ปลอดภัยจะมีการเปรียบเทียบระหว่างขอบเขตความปลอดภัยสัมผัส และอย่างก้าว (E_s) กับค่าศักดาของ Emesh กับ Estep หากไม่ปลอดภัยคอมพิวเตอร์จะแบ่งตะแกรงลงดินให้มีความถี่ขึ้น และนำค่าที่ได้ไปออกแบบหาคักดาบนตะแกรงอีกครั้ง จึงนำมาเปรียบเทียบกับขอบเขตความปลอดภัยอีกครั้ง
10. หากการเปรียบเทียบในข้อ 9 ปลอดภัยก็จะพิมพ์ผลลัพธ์ และ จบสิ้นการคำนวณ

จากการอธิบายดังกล่าว จะเห็นว่า หากเราเปรียบเทียบศักดาความปลอดภัย กับ Emesh + Estep แล้ว ไม่ปลอดภัย หากใช้วิธีชอยแบ่งตะแกรงให้ถี่ขึ้นอย่างเดียว จะทำให้เปลืองค่าใช้จ่ายมาก จึงใช้วิธีเพิ่ม GROUND RODS เพื่อลดค่าใช้จ่ายให้มีความประหยัด และขณะเดียวกันก็มีความปลอดภัยเช่นกัน



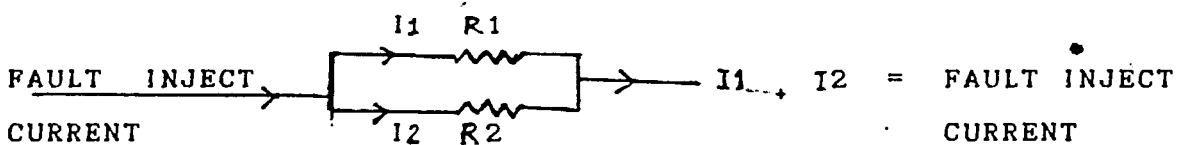
๑ จุดกึ่งกลางของช่องตะแกรงที่จะคำนวณหาค่า

รูป 4.1 ภาพแสดง ตำแหน่งที่คำนวณหาค่าคักตาที่จุดกึ่งกลางของตะแกรง



รูป 4.2 ภาพแสดงการประกอบ กราวด์รอต เข้ากับตะแกรงต่อลงดิน

4.2 ในแผนภูมิที่ 2 นี้ มีแนวความคิด คือ เราจะแบ่งตะแกรง GROUND GRID เป็น 2 ชั้น ซึ่งชั้นที่ 1 ถ้าฝังในคอนกรีต ซึ่งมีค่าความต้านทานพื้นดินสูง ทำให้มีการกระจายกระแสลงดินได้ต่ำ จึงเปรียบเสมือนเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีความต้านทานสูงต่ออยู่ และขณะที่ดินชั้นที่ 2 ต่ลงพื้นดิน ซึ่งในประเทศไทย ดินส่วนใหญ่ค่อนข้างจะมีความชื้นสูงจึงทำให้ค่าความต้านทานพื้นดินต่ำ มีการกระจายกระแสลงดินที่ดี จึงเปรียบเสมือนวงจรไฟฟ้าที่มีความต้านทานต่ำ ดังนั้น เมื่อเขียนเป็นวงจรไฟฟ้าได้ดังนี้

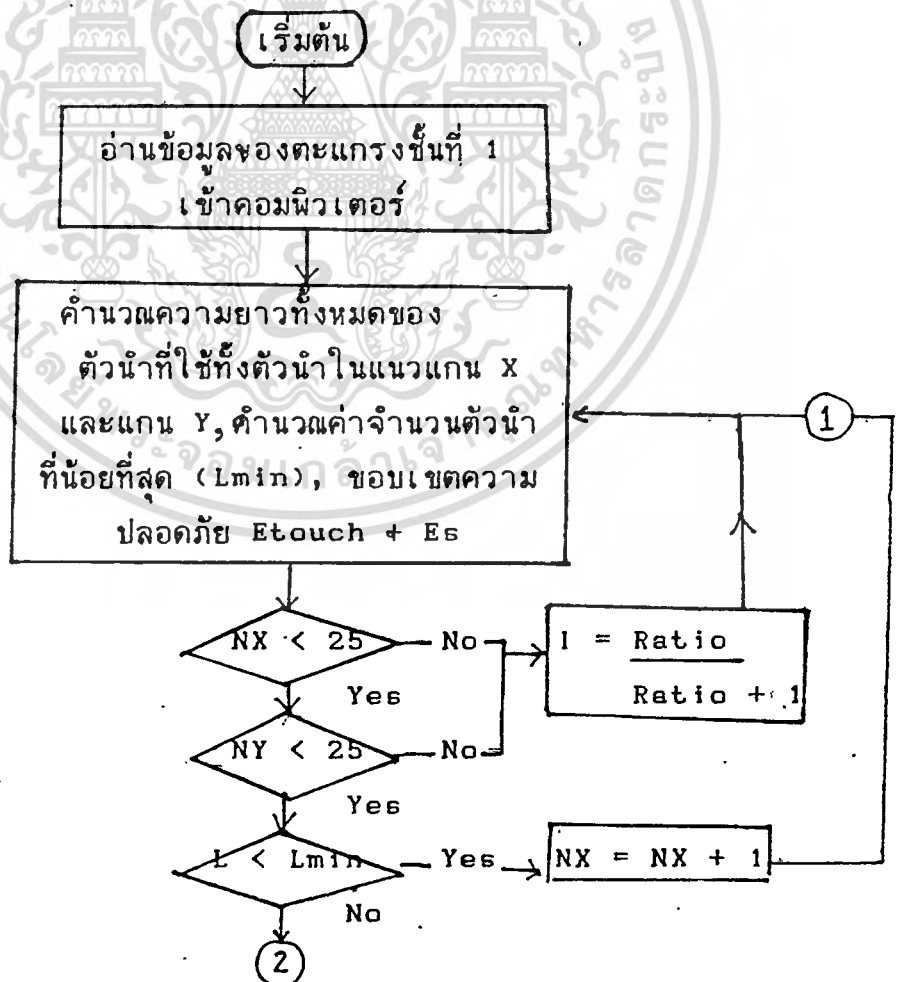


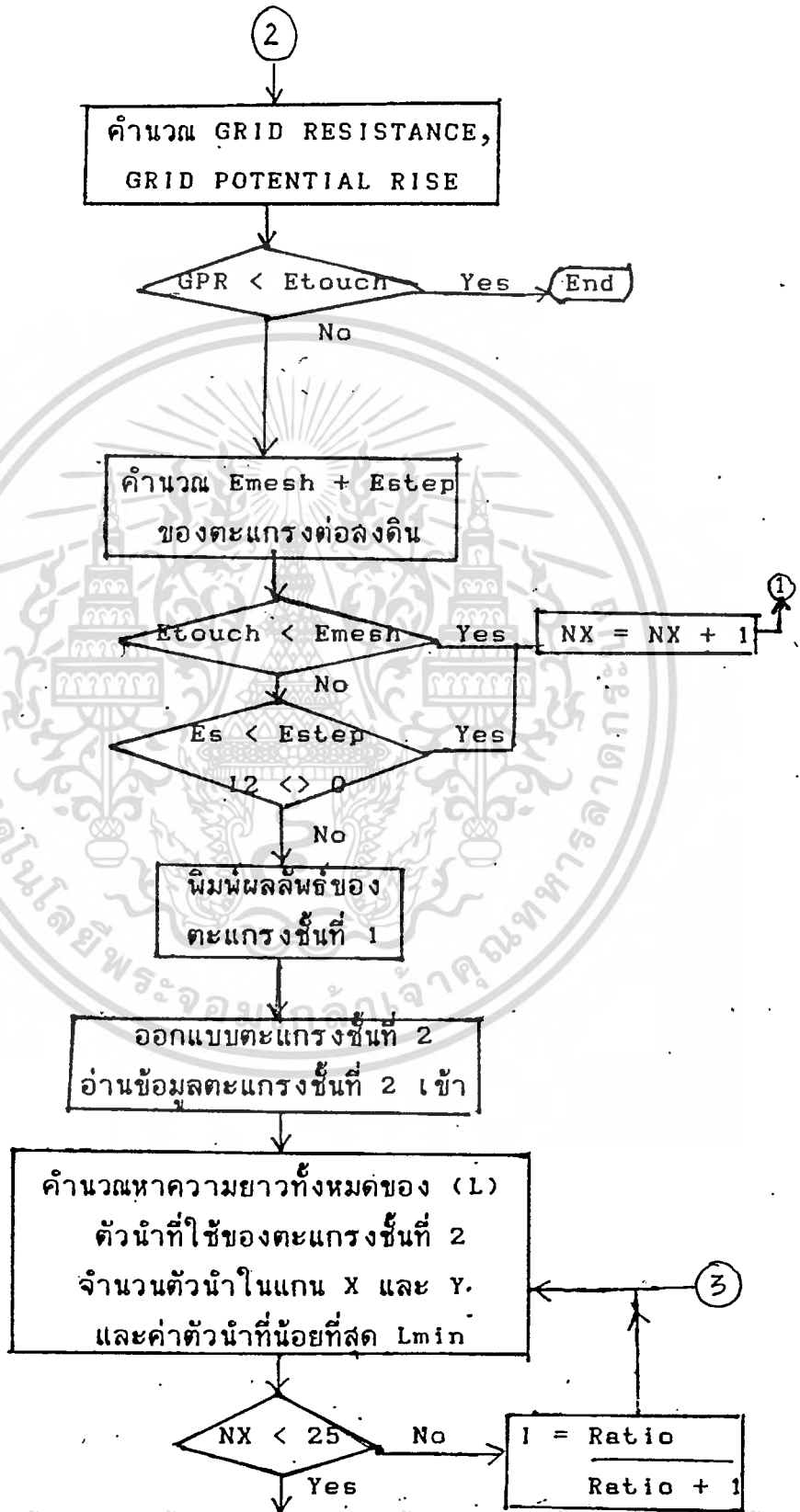
R1 เป็นความต้านทานของพื้นดินชั้นที่ 1

R2 เป็นความต้านทานของพื้นดินชั้นที่ 2

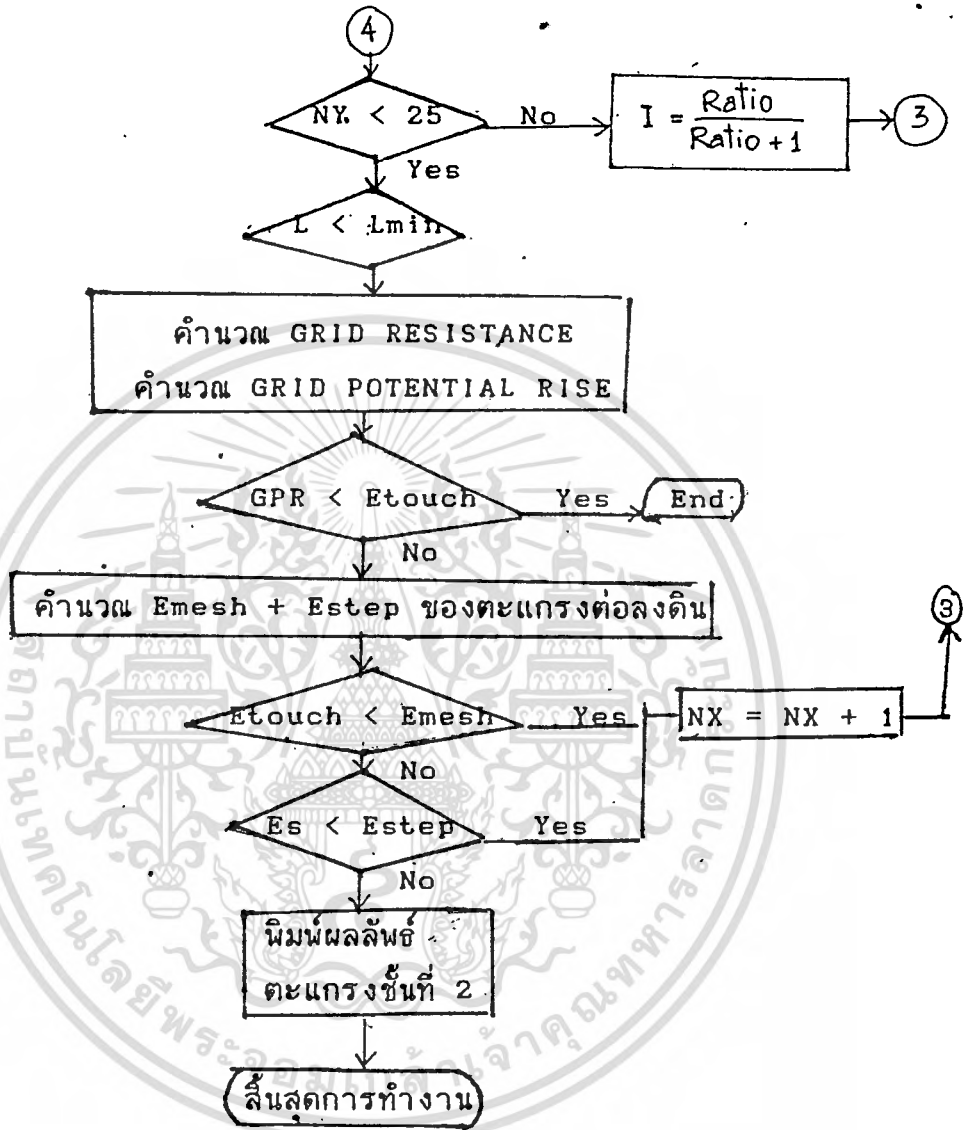
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 I1 + I2 เป็นผลรวมของกระแสของตะแกรงชั้นที่ 1 + ชั้นที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแส
 ไม่สามารถใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป
 แลเมิดลิขสิทธิ์ เมื่อเกิด FAULT CONDITION ขึ้น

ในการเขียนแผนภูมิดังกล่าว แสดงถึงการคำนวณ การใช้จำนวนตัวนำลงดิน โดยหากการออกแบบตัวนำลงดินชั้นที่ 1 สามารถกระจายกระแสผิดปกติขณะเกิด FAULT CONDITION ได้เพียงพอคือ มีความปลอดภัยแก่ผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีย่อยแล้ว โปรแกรม COMPUTER ก็จะไม่ออกแบบชั้นที่ 2 ของ GROUND GRID แต่ถ้าหากเงื่อนไขการออกแบบตะแกรงต่อลงดินชั้นที่ 1 ไม่สามารถกระจายกระแสได้เพียงพอ ซึ่งทำให้ อาจเกิดอันตรายต่อผู้ที่อยู่ในสถานีย่อยได้ COMPUTER จะออกแบบตะแกรงชั้นที่ 2 โดยให้ใส่ข้อมูลต่าง ๆ ยกเว้นกระแสที่เหลือจากการที่นำ FAULT CURRENT ลงกระแสที่กระจายในชั้นที่ 1 เอง ทำให้การออกแบบมีความปลอดภัยเพียงพอต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีย่อย ดังนี้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (4) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อธิบายขั้นตอนการทำงานของตะแกรงชนิด 2 ชั้นแบบสมมาตร

1. การอ่านข้อมูลเข้าตามหัวข้อ จะถูกอ่านเข้าไปเพื่อนำคำนวณและออกแบบในขั้นต่อไป
2. ค่า Parameter เช่นจำนวนตัวนำในแกน X จะถูกกำหนดอยู่ใน Program Computer อยู่แล้วในขั้นนี้จึงเป็นการคำนวณความยาวตัวนำที่ใช้ ซึ่งอาจเป็นค่าที่เป็นตัวแปรเปลี่ยนไม่ได้ จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งความยาวตัวนำในด้านกว้าง + ด้านยาวทั้งหมด

3. คำนวณค่าตัวนำที่ต้องใช้อย่างน้อยที่สุดเพื่อให้เกิดความปลอดภัยตามข้อกำหนดของIEEE คือคำนวณหาค่า L_{min} และคำนวณหาขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) และขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว (E_g) ของผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยนี้ ซึ่งในโปรแกรมมีการเลือกค่าน้ำหนักที่ใช้ในการคำนวณคือ น้ำหนัก 50 ก.ก. หรือ 70 ก.ก.
4. สูตรต่าง ๆ นั้นมีข้อจำกัดของจำนวนตัวนำที่ใช้ คือตัวนำในแต่ละแนวไม่เกิน 25 ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจะตรวจสอบจำนวนตัวนำที่ใช้ในแนวแกน X และแกน Y ถ้ามีค่ามากกว่า 25 แล้วจะมีการออกแบบตะแกรงเป็นแบบ 2 ชุด โดยจะทำการแบ่งแยกกระแสเป็น 2 ส่วนตามอัตราส่วนที่กำหนดขึ้นมา เป็นกระแส I₁ และกระแส I₂ หลังจากนั้นจะนำกระแส I₁ มาคำนวณออกแบบตะแกรงชุดแรกต่อไป แต่ถ้าจำนวนตัวนำที่ใช้ยังไม่เกิน 25 ก็จะข้ามขั้นตอนนี้ไป
5. ทำการเปรียบเทียบจำนวนตัวนำที่ใช้จริง (L) กับจำนวนตัวนำที่ต้องใช้อย่างน้อยที่สุด (L_{min}) ถ้าพบว่า L มีค่าน้อยกว่า L_{min} ก็จะทำการเพิ่มจำนวนตัวนำที่ใช้ให้มากขึ้น โดยการขอยุทธะแกรงให้มีความถี่มากขึ้นหลังจากนั้นก็กลับไปเริ่มที่ขั้นตอนที่ 2 ใหม่อีกครั้ง
6. หากจำนวนตัวนำที่ใช้จริงมากกว่าจำนวนตัวนำที่กำหนดให้ใช้อย่างน้อยที่สุดแล้วก็จะทำการคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (ground grid resistance) และ ค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนตะแกรง (Grid potential rise) หรือ ค่า GPR
7. ขั้นตอนนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงกับค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ถ้าพบว่าค่าศักดาบนตะแกรงมีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัย แสดงว่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่สามารถทำอันตรายต่อมนุษย์ได้ ดังนั้นจึงถือว่าการออกแบบจนถึงขั้นนี้ปลอดภัยและเป็นการสิ้นสุดโปรแกรม แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นคือค่าศักดาบนตะแกรงมีค่ามากกว่าขอบเขตความปลอดภัย ก็จะทำการคำนวณหาค่า E_{mesh} และ แรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวที่เกิดขึ้นจริง (E_{step})
8. ขั้นตอนนี้ต่อจากขั้นตอนที่ 7 คือนำค่า E_{mesh} และ E_{step} มาเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและของแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดับ ถ้าพบว่า E mesh หรือ E step ค่าใดค่าหนึ่งมากกว่าขอบเขตความปลอดภัยแล้ว ก็จะทำให้การเพิ่มจำนวนตัวนำให้มากขึ้นโดยการแบ่งตะแกรงให้ถี่มากขึ้นอีก หลังจากนั้น จึงกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2 ใหม่อีกครั้ง แต่ถ้าหาก E mesh และ E step มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัยแล้ว แสดงว่าการออกแบบตะแกรงนี้ปลอดภัย เป็นการสิ้นสุดโปรแกรมการทำงาน อนึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการตรวจสอบค่ากระแสผิวดิพโพลีการแบ่งแยกเป็น 2 ส่วนหรือไม่ ถ้าพบว่าการแบ่งแยกกระแสไหลแสดงว่าการออกแบบตะแกรงชุดเดียวไม่ปลอดภัย ต้องมีการออกแบบตะแกรงอีกหนึ่งชุด ดังนั้นกระแสส่วนที่เหลือ หรือกระแส 12 จะถูกนำมาเป็นข้อมูลในการออกแบบต่อไป แต่ถ้าไม่พบว่าการแบ่งแยกกระแสไหลก็จะเป็นการออกแบบตะแกรงเพียงชุดเดียว

9. เมื่อมีการตรวจสอบพบการแบ่งกระแสเป็น 2 ส่วน หลังจากการออกแบบตะแกรงชุดแรกปลอดภัยแล้ว จะต้องมีการอ่านข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบตะแกรงชุดที่ 2 นี้ โดยค่ากระแสที่ใช้คำนวณจะเป็นกระแสที่เหลือจากการไหลในตะแกรงชุดแรก หรือกระแส 12 นั้นเอง หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณตามขั้นตอนที่ 2 ใหม่ตั้งแต่ต้นจนปลอดภัยซึ่งเป็นการออกแบบตะแกรงชุดที่ 2

บทที่ 5

ผลจากการศึกษา และวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการศึกษาผลการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นมา และจะทำการวิเคราะห์ผลการออกแบบที่ได้โดยใช้ข้อมูลต่าง ๆ กัน โดยจะแบ่งลักษณะของตะแกรงที่ออกแบบเป็นดังนี้

1. ตะแกรงชุดเดียวไม่ประกอบแท่งต่อลงดิน (grid without rod)
2. ตะแกรงชุดเดียวประกอบแท่งต่อลงดิน (grid with rods)
3. ตะแกรง 2 ชุดแบบเชื่อมโยงกัน

5.1 ตะแกรงชุดเดียวไม่ประกอบแท่งต่อลงดิน

ใน Appendix 1 แสดงให้เห็นถึงผลของขนาดพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของกระแสผิดปกติที่มีค่าสูง คือมีค่ากระแสผิดปกติ 25,000 A และมีพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย 15x15 ตร. เมตร ซึ่งพบว่าเกิดความไม่ปลอดภัยขึ้นเนื่องจาก mesh voltage มีค่ามากกว่าขอบเขตความปลอดภัย และค่าศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงจะมีค่าสูงมากด้วย แต่เมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่สถานีย่อยเป็น 73x73 ตร. เมตร และยังคงขนาดของกระแสไว้เท่าเดิมดังใน Appendix 2 พบว่าใช้จำนวนตัวนำเพียง 9x9 ก็ทำให้ mesh voltage มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัย และยังพบอีกว่าค่าศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงมีค่าน้อยกว่าใน Appendix 1

จากโปรแกรมทั้งสองนี้พอสรุปได้ว่า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน ถ้าขนาดพื้นที่มีน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยได้ เพราะจะเกิดความหนาแน่นของกระแสมากในบริเวณพื้นที่นั้นและจะทำให้ศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่ให้มากขึ้น กระแสสามารถกระจายไปได้มากกว่าเดิมจึงทำให้ศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงมีค่าต่ำลงและเกิดความปลอดภัยมากขึ้นด้วย

สำหรับใน Appendix 3 ยังคงขนาดพื้นที่ 73x73 ตร. เมตร เหมือนใน Appendix 2 แต่เพิ่มขนาดกระแสผิดปกติให้สูงขึ้นเป็น 33,000 A พบว่ายังสามารถออกแบบให้ปลอดภัยได้ แต่ต้องใช้จำนวนตัวนำที่มากกว่าคือใช้ 1,898 เมตร เมื่อเทียบกับใน Appendix 2 ใช้ 1,314 เมตร และค่าศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาเปไซบระเษขนดานการคาไมวารณิใดทงสิ้น อิกทงหามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 3 ก็ยิ่งมากกว่า Appendix 2 จึงสรุปเพิ่มเติมได้อีกว่า เมื่อกระแสผิปกติมีค่าสูงขึ้นในขณะที่พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยเท่าเดิมจะทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสในตัวนำมากขึ้น จึงต้องออกแบบโดยใช้ความยาวของตัวนำเพิ่มขึ้นเพื่อลดความหนาแน่นของกระแสในตัวนำลง แต่ค่าศักดาไฟฟ้าบนตะแกรงของ Appendix 3 ยิ่งมากกว่า Appendix 2 ก็เพราะกระแสผิปกติที่มีค่าสูงกว่ามากนั่นเอง

Appendix 3 และ Appendix 4 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบโดยใช้น้ำหนักของร่างกายมาเกี่ยวข้องด้วย โดยข้อมูลอื่นๆของAppendixทั้งสองเหมือนกันทุกประการ ต่างกันเฉพาะน้ำหนักของร่างกายที่ใช้ โดยใน Appendix 3 ใช้ 70 Kg และ Appendix 4 ใช้ 50 Kg ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อใช้กรณีร่างกายหนัก 50 Kg ออกแบบจะได้ค่าขอบเขตความปลอดภัยที่ร่างกายสามารถทนได้ต่ำกว่ากรณี 70 Kg จึงต้องออกแบบให้ปลอดภัยมากยิ่งขึ้นโดยเพิ่มจำนวนตัวนำที่ใช้ จากการเปรียบเทียบผลการออกแบบทั้งสองให้ข้อสังเกตว่า ในการออกแบบถ้าใช้น้ำหนักร่างกายมากจะสามารถประหยัดตัวนำที่ใช้ได้มากกว่า การพิจารณาว่าจะใช้น้ำหนักร่างกาย 70 หรือ 50 Kg ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการออกแบบ

5.2 ตะแกรงขึ้นเดียวประกอบแท่งต่อลงดิน

Appendix 5 และ Appendix 6 เป็นผลการออกแบบตะแกรงที่มีแท่งต่อลงดินหรือ rod ต่ออยู่ด้วยทุกจุดตัดของตัวนำ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับตะแกรงที่ไม่ได้ต่อแท่งrodในAppendix 2 และ Appendix 3

ใน Appendix 5 ใช้ข้อมูลทุกอย่างเหมือนกับ Appendix 2. แต่ใน Appendix 5 จะมีแท่งrodต่ออยู่ทุกจุดตัดของตัวนำ พบว่าใช้ตัวนำน้อยกว่าคือใช้เพียง 1,144.5 เมตรเท่านั้นก็ปลอดภัย ในขณะที่ Appendix 2 ใช้ตัวนำ 1,314 เมตร ซึ่งยาวกว่ามาก

และใน Appendix 6 เหมือนกันที่ประกอบแท่งrod พบว่าใช้ตัวนำยาวเพียง 1,516.5 เมตร เมื่อเทียบกับ Appendix 3 ที่ใช้ตัวนำยาว 1,898 เมตร

จึงสรุปได้อีกว่า การออกแบบระบบต่อลงดินถ้าใช้แท่งrods ประกอบเข้าไปด้วย จะสามารถประหยัดตัวนำได้มากกว่าเมื่อใช้ตะแกรงอย่างเดียว โดยยังเกิดความปลอดภัยเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ตะแกรง 2 ชุดแบบเชื่อมโยงกัน

การออกแบบตะแกรงลักษณะนี้ใช้ในกรณีที่ตะแกรงชุดเดียวไม่สามารถกระจายกระแสผิดปกติ (fault current) ที่เกิดขึ้นให้น้อยลงจนเกิดความปลอดภัยได้ จึงใช้วิธีออกแบบตะแกรงเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชุด และเชื่อมโยงตะแกรงทั้งสองชุดเข้าด้วยกัน โดยจะให้ตะแกรงชุดที่สองช่วยกระจายกระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นจนค่า mesh voltage มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัย ซึ่งการออกแบบลักษณะนี้จะใช้ในสถานีย่อยแบบในอาคาร (indoor substation)

จาก Appendix 7 กระแสผิดปกติมีค่า 33,000 A และตะแกรงถูกฝังในพื้นที่คอนกรีตซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) 90 ohm-meter และขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยมีเพียง 40x30 ตร. เมตร ในสภาพเช่นนี้เนื่องจากคอนกรีตมีค่า resistivity สูง ทำให้การกระจายกระแสเป็นไปด้วยความลำบาก และค่าขอบเขตความปลอดภัยมีค่าน้อยลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ร่างกายสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวได้น้อยลง ดังนั้นจึงออกแบบโดยแบ่งให้กระแสไหลในตะแกรงชุดแรก (upper part) จนกระทั่ง mesh voltage มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัย ซึ่งพบว่ากระแสไหลในตะแกรงชุดแรกเพียง 1,031.25 A เท่านั้น

สำหรับกระแสส่วนที่เหลือ 31,968.75 A จะไหลในตะแกรงชุดที่สอง (lower part) ซึ่งถูกฝังในดินที่มีค่า resistivity ต่ำกว่าของคอนกรีตคือเท่ากับ 30 ohm-meter กระแสส่วนนี้สามารถกระจายได้ดีกว่า ทั้งนี้เพราะตะแกรงถูกฝังในตัวกลางที่มีค่า resistivity ต่ำกว่า ดังนั้นค่า mesh voltage ของตะแกรงชุดที่สองนี้จึงสามารถถูกออกแบบให้มีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัยได้

โปรแกรมการออกแบบตะแกรงทั้งสองชุดนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในกรณีสถานีไฟฟ้าย่อยภายนอกอาคาร (outdoor substation) เช่น บริเวณเขื่อนซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะสูง และไม่สามารถตอกแท่ง rod ลงในดินได้ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่เป็นภูเขาและพื้นข้างล่างเป็นหินแข็ง กรณีเช่นนี้สามารถนำโปรแกรมนี้ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตามเขื่อนได้

สำหรับเขื่อนโดยทั่วไป จะประกอบด้วย ท่อส่งน้ำ (penstock) , โรงไฟฟ้า (power house) , switchyard ฯลฯ ในแต่ละส่วนจะมีตะแกรงต่อลงดินของตนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอง และตะแกรงทั้งหมดจะถูกเชื่อมถึงกันหมดเป็นระบบต่อลงดินเดียวกัน ฉะนั้นทฤษฎีที่จะใช้ในการวิเคราะห์ก็จะคล้ายๆกับแบบตะแกรง 2 ชุดนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป

การสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยมีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อบุคคลที่ปฏิบัติงานอยู่ในสถานีย่อยแห่งนั้น ซึ่งอันตรายที่เกิดขึ้นมาจากค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นดินในขณะที่เกิดความผิดปกติ โดยการออกแบบระบบต่อลงดินมีความมุ่งหมายเพื่อให้เกิดความราบเรียบของศักดาไฟฟ้าจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าขอบเขตความปลอดภัย

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นการนำเอาตัวนำมาต่อเป็นลักษณะตะแกรง โดยในการวางตำแหน่งของตัวนำให้มีความถี่มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายอย่าง เช่น ค่ากระแสผิดปกติที่เกิดขึ้น ถ้ามีค่ามากก็มีแนวโน้มที่จะต้องใช้จำนวนตัวนำมาก หรือออกแบบตะแกรงให้มีความถี่มาก ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินขอบเขตความปลอดภัย

ในปฏิญานี้ มุมนี้ตะแกรงต่อลงดินจะมีลักษณะแบบสมมาตรกล่าวคือ มีการวางตัวนำในแต่ละทิศทางที่เท่ากัน ซึ่งถ้าออกแบบให้บริเวณมุมตะแกรงมีความปลอดภัยแล้ว บริเวณช่วงกลางของตะแกรงก็จะมีความปลอดภัยด้วยเหมือนกัน ทั้งนี้เพราะที่มุมตะแกรงเป็นจุดที่เกิดอันตรายมากที่สุด ดังนั้นถ้าเราสามารถที่จะขยับตัวนำเข้าหาขอบตะแกรงได้ จะทำให้บริเวณขอบตะแกรงมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ในขณะที่บริเวณช่วงกลางของตะแกรงอาจสามารถลดจำนวนตัวนำที่ใช้ไปได้ ซึ่งทฤษฎีในการขยับตะแกรงจะต้องใช้หลักการของ Dawalibi สำหรับในปฏิญานี้ใช้หลักการของ IEEE ฉบับปี 1986 ซึ่งไม่กล่าวถึงวิธีการขยับตะแกรง ดังนั้นจึงเป็นข้อเสียที่ไม่สามารถทำการขยับตะแกรงได้และเมื่อเป็นเช่นนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า ในหลักการของ IEEE ไม่สามารถออกแบบให้มีการประหยัดตัวนำในบริเวณช่วงกลางของตะแกรงได้ แต่จะมีความปลอดภัยอย่างมากในบริเวณช่วงกลางของตะแกรงเมื่อตรงมุมตะแกรงปลอดภัย

เนื่องจากทฤษฎีในปฏิญานี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ลักษณะของตะแกรงต้องเป็นแบบสมมาตร, จำนวนตัวนำที่ใช้ในแต่ละแนวต้องไม่เกิน 25 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าทฤษฎีดังกล่าวนำไปใช้ออกแบบได้เฉพาะสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีขนาดไม่ใหญ่โตจนเกินไป ซึ่งสถานีย่อยที่ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างน้อยมักจะเป็นแบบสถานีย่อยภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกหนึ่งชุดมา เชื่อมกับตะแกรงชุดแรกเพื่อให้กระแสแบ่งไหลเป็น 2 ส่วนซึ่งจะทำให้การออกแบบตะแกรงให้ปลอดภัยง่ายขึ้น สำหรับตะแกรงชุดที่สองนี้จะถูกฝังในดินซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำกว่าของคอนกรีต ดังนั้นกระแสส่วนใหญ่จะไหลในตะแกรงชุดที่สองนี้เอง

อนึ่งค่ากระแสผิดปกติที่ใช้เป็นข้อมูลในการป้อนโปรแกรมตัวอย่างอ้างมาจากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงซึ่งได้แสดงใน Appendix 9

ผลการออกแบบในปฏิญานิพนธ์นี้เป็นลักษณะของวิจัยซึ่งจะต้องเข้มงวดต่อรายละเอียดต่างๆ แต่ในทางปฏิบัติการก่อสร้างระบบต่อลงดินจริงๆมักจะละเอียดน้อยกว่าที่คิดบางประการเช่น ใช้จำนวนตัวนำในแต่ละแนวเกิน 25 ซึ่งนั่นเป็นข้อแตกต่างจากงานในปฏิญานิพนธ์นี้



APPENDIX 1

FAULT CURRENT	[A]	25000
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014
SUBSTATION AREA	[M : M]	15 : 15
BODY WEIGHT	[Kg]	70
OUTPUT DATA		
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	4112.585
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	1243.128
GRID COVER AREA	[M : M]	15 : 15
NUMBER OF CONDUCTOR		25 : 25
GRID SPACING ALONG X-AXIS	[M]	.625
GRID SPACING ALONG Y-AXIS	[M]	.625
TOTAL GRID CONDUCTOR LENGTH	[M]	750
NUMBER OF RODS USED		0
LENGTH OF GROUND ROD	[M]	0
TOTAL LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	750
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	814.549
STATION GROUND RESISTANCE	[ohm]	.8764094
STATION GRID POTENTIAL RISE	[V]	21910.24
MESH VOLTAGE	[V]	1347.912
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	5503.879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 2

FAULT CURRENT	[A]	25000
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014
SUBSTATION AREA	[M : M]	73 : 73
BODY WEIGHT	[Kg]	70
OUTPUT DATA		
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	4112.585
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	1243.128
GRID COVER AREA	[M : M]	73 : 73
NUMBER OF CONDUCTOR		9 : 9
GRID SPACING ALONG X-AXIS	[M]	9.125
GRID SPACING ALONG Y-AXIS	[M]	9.125
TOTAL GRID CONDUCTOR LENGTH	[M]	1314
NUMBER OF RODS USED		0
LENGTH OF GROUND ROD	[M]	0
TOTAL LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	1314
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	1253.148
STATION GROUND RESISTANCE	[ohm]	.2038863
STATION GRID POTENTIAL RISE	[V]	5097.158
MESH VOLTAGE	[V]	1183.621
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	485.5746

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 3

FAULT CURRENT	[A]	33000
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014
SUBSTATION AREA	[M : M]	73 : 73
BODY WEIGHT	[Kg]	70
OUTPUT DATA		
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	4112.585
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	1243.128
GRID COVER AREA	[M : M]	73 : 73
NUMBER OF CONDUCTOR		13 : 13
GRID SPACING ALONG X-AXIS	[M]	6.083334
GRID SPACING ALONG Y-AXIS	[M]	6.083334
TOTAL GRID CONDUCTOR LENGTH	[M]	1898
NUMBER OF RODS USED		0
LENGTH OF GROUND ROD	[M]	0
TOTAL LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	1898
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	1780.49
STATION GROUND RESISTANCE	[ohm]	.1968614
STATION GRID POTENTIAL RISE	[V]	6496.427
MESH VOLTAGE	[V]	1164.257
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	631.9902

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 4

FAULT CURRENT	[A]	33000
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014
SUBSTATION AREA	[M : M]	73 : 73
BODY WEIGHT	[Kg]	50
OUTPUT DATA		
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	3038.598
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	918.489
GRID COVER AREA	[M : M]	73 : 73
NUMBER OF CONDUCTOR		18 : 18
GRID SPACING ALONG X-AXIS	[M]	4.294118
GRID SPACING ALONG Y-AXIS	[M]	4.294118
TOTAL GRID CONDUCTOR LENGTH	[M]	2628
NUMBER OF RODS USED		0
LENGTH OF GROUND ROD	[M]	0
TOTAL LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	2628
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	2528.851
STATION GROUND RESISTANCE	[ohm-meter]	.1924708
STATION GRID POTENTIAL RISE	[V]	6351.537
MESH VOLTAGE	[V]	883.8361
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	648.5246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 5

FAULT CURRENT	[A]	25000
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014
SUBSTATION AREA	[M : M]	73 : 73
BODY WEIGHT	[Kg]	70

OUTPUT DATA

SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	4112.585
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	1243.128
GRID COVER AREA	[M : M]	73 : 73
NUMBER OF CONDUCTOR		7 : 7
GRID SPACING ALONG X-AXIS	[M]	12.16667
GRID SPACING ALONG Y-AXIS	[M]	12.16667
TOTAL GRID CONDUCTOR LENGTH	[M]	1022
NUMBER OF RODS USED		49
LENGTH OF GROUND ROD	[M]	2.5
TOTAL LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	1144.5
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	1044.47
STATION GROUND RESISTANCE	[ohm-meter]	.2068534
STATION GRID POTENTIAL RISE	[V]	5171.336
MESH VOLTAGE	[V]	1134.338
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	442.399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 6

FAULT CURRENT	[A]	33000
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014
SUBSTATION AREA	[M : M]	73 : 73
BODY WEIGHT	[Kg]	70
OUTPUT DATA		
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	4112.585
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	1243.128
GRID COVER AREA	[M : M]	73 : 73
NUMBER OF CONDUCTOR		9 : 9
GRID SPACING ALONG X-AXIS	[M]	9.125
GRID SPACING ALONG Y-AXIS	[M]	9.125
TOTAL GRID CONDUCTOR LENGTH	[M]	1314
NUMBER OF RODS USED		81
LENGTH OF GROUND ROD	[M]	2.5
TOTAL LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	1516.5
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	1418.223
STATION GROUND RESISTANCE	[ohm-meter]	.2004492
STATION GRID POTENTIAL RISE	[V]	6614.824
MESH VOLTAGE	[V]	1162.247
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	544.465

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ใ้ข้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX 7

FAULT CURRENT	[A]	33000	
FAULT CLEARING TIME	[sec]	.3	
CONDUCTOR DIAMETER	[M]	.014	
BODY WEIGHT	[Kg]	70	
----- UPPER PART OF GROUND GRID -----			
INJECT CURRENT FOR UPPER PART	[A]	1031.25	
SUBSTATION AREA	[M : M]	40 : 30	
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	90	
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	90	
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.1	
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	0	
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	441.4279	
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	325.3381	
GRID COVER AREA	[M : M]	38.57143	: 30
NUMBER OF CONDUCTOR		8	: 10
GRID SPACING ALONG X-AXIS , Y-AXIS	[M]	4.285714	
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	579.0786	
LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	608.5715	
GRID RESISTANCE	[ohm]	1.323426	
GRID POTENTIAL RISE	[V]	1364.784	
MESH VOLTAGE	[V]	309.4932	
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	58.76177	
----- LOWER PART OF GROUND GRID -----			
INJECT CURRENT FOR LOWER PART	[A]	31968.75	
SUBSTATION AREA	[M : M]	40 : 30	
SOIL RESISTIVITY	[ohm-meter]	30	
SURFACE RESISTIVITY	[ohm-meter]	3000	
DEPTH OF BURIAL MAIN GRID	[M]	.5	
THICKNESS OF CRUSHED ROCK	[M]	.15	
SAFTY TOLERABLE STEP-VOLTAGE	[V]	4112.585	
SAFTY TOLERABLE TOUCH-VOLTAGE	[V]	1243.128	
GRID COVER AREA	[M : M]	39.375	: 30
NUMBER OF CONDUCTOR		17	: 22
GRID SPACING ALONG X-AXIS , Y-AXIS	[M]	1.875	
MINIMUM LENGTH OF CONDUCTOR	[M]	1281.65	
LENGTH OF BURIAL CONDUCTOR	[M]	1329.375	
GRID RESISTANCE	[ohm]	.4010043	
GRID POTENTIAL RISE	[V]	12819.61	
MESH VOLTAGE	[V]	1196.541	
MAXIMUM STEP-VOLTAGE	[V]	1227.997	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 8

Gas-Insulated Substation (GIS)

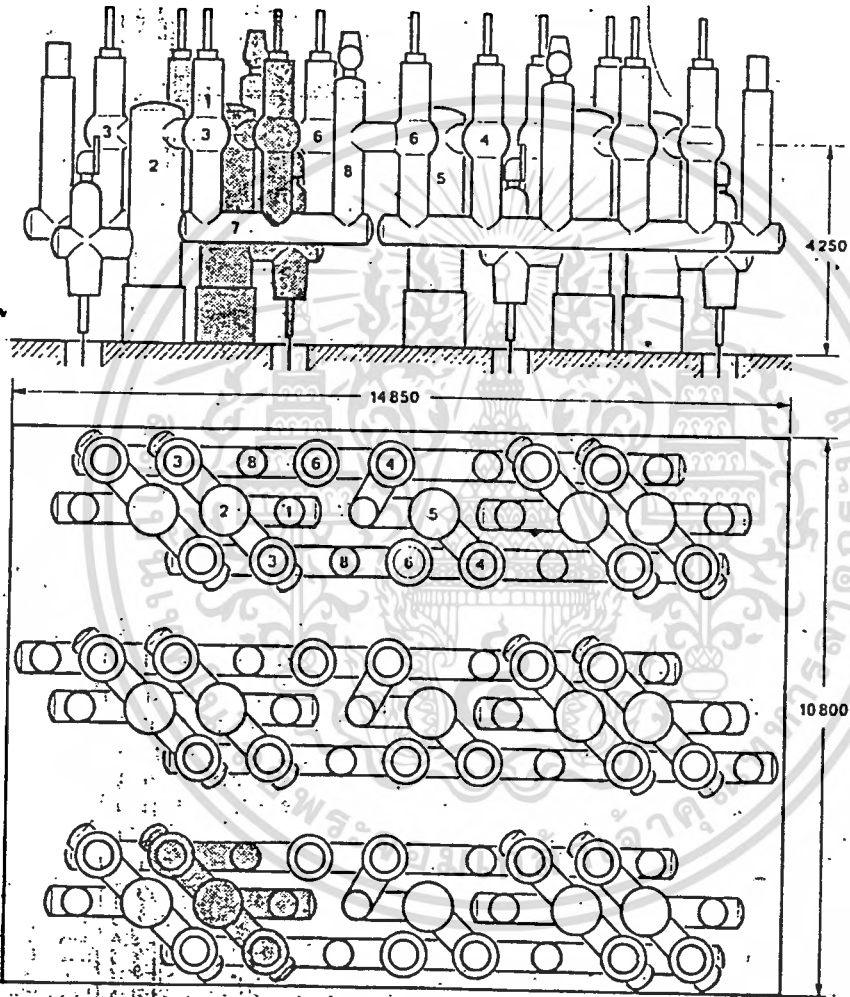
GIS เป็นสถานีไฟฟ้าย่อยแบบหนึ่งที่ได้มีการใช้การใช้ก๊าซ SF6 ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวน และมีความสามารถในการดับอาร์ค (insulating and arc-quenching ability) ได้ดีมาก ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของก๊าซ SF6 ที่มีความแข็งแรงในการเป็นฉนวน (dielectric strength) เป็น 2-3 เท่าของอากาศในสภาวะบรรยากาศปกติ และในขณะที่มีความดันเป็น 3 เท่าของบรรยากาศ จะมีสภาพความเป็นฉนวนดีเท่ากับฉนวนน้ำมันเลยทีเดียว

นอกจากนี้การใช้ SF6 เป็นฉนวนยังสามารถลดน้ำหนักของอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงได้เมื่อเทียบกับใช้น้ำมันเป็นฉนวน และยังทำให้มีขนาดที่เล็กกระทัดรัดกว่าด้วย ฉะนั้นในปัจจุบันจึงได้นิยมสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นชนิด GIS กันมาก เนื่องจกสามารถลดพื้นที่ในการสร้างได้มากซึ่งเหมาะสำหรับที่จะใช้ในบริเวณที่มีประชากรหนาแน่น และที่ดินมีราคาแพง และโดยมากจะใช้อุปกรณ์ประเภทนี้ในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบในอาคารหรือ Indoor Substation

สำหรับในประเทศไทยได้มีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยประเภทนี้เช่นกัน และโดยปกติสถานีย่อยในระบบ 69 KV จะอยู่ในเมืองซึ่งที่ดินมีราคาแพงและหายาก การไฟฟ้านครหลวงจึงกำหนดให้ก่อสร้างสถานีย่อยแบบในอาคาร และใช้อุปกรณ์ในสถานีย่อยเป็นชนิด Gas Insulated Substation เพราะต้องการที่ดินขนาดเพียง 40 ม. x 25 ม. (250 ตารางวา) สำหรับสถานีย่อยขนาด 2x40 MVA และขนาด 40 ม. x 30 ม. (300 ตารางวา) สำหรับสถานีย่อยขนาด 3x40 MVA , ตัวอย่างของสถานีย่อยประเภทนี้เช่น สถานีย่อยคลองเตย ซึ่งเป็นระบบ 69 KV , SF6 switchgear และสถานีต้นทางชิดลมในระบบ 230 KV , SF6 switchgear และ 69 KV, SF6 switchgear เป็นต้น

สถานีย่อยแบบGIS จะมีอุปกรณ์ต่างๆเหมือนกับสถานีย่อยทั่วไป จะแตกต่างกันตรงที่อุปกรณ์ทั้งหมด เช่น circuit breaker, isolating and selector switches, earth switches, busbars เหล่านี้จะถูกบรรจุภายในห้อง (chambers or enclosures) และภายในห้องจะมีก๊าซSF6 อยู่ภายใต้ความดัน 2-3 เท่าของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

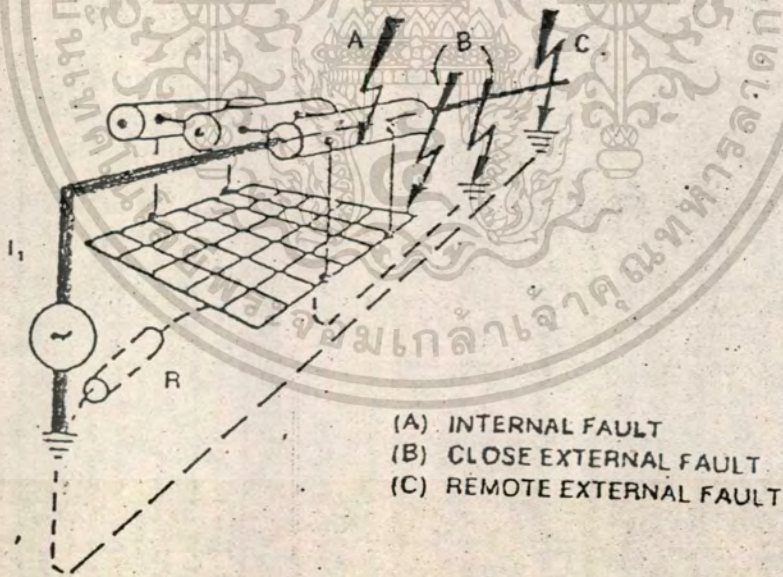


- LEGEND
- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. CABLE BOX | 5. BUS-COUPLER CIRCUIT-BREAKER |
| 2. CIRCUIT-BREAKER (FEEDER) | 6. BUS-SECTION ISOLATORS |
| 3. BUSBAR SELECTOR SWITCHES | 7. BUSBARS |
| 4. BUS-COUPLER ISOLATING SWITCHES | 8. EARTHING SWITCHES |

รูป A2 แสดงการวางตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆที่ประกอบเป็น SF6 switch gear ซึ่งใช้พื้นที่เพียง 14.95m x 10.8m เท่านั้น ไม่นับพื้นที่หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกบรรจุอยู่ภายในท่อซึ่งเป็นโลหะ ดังนั้นจึงอาจเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวท่อได้ ซึ่งสาเหตุเกิดได้จาก 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

1. เกิด fault ขึ้นภายในท่อ เช่น เกิดการ flashover ระหว่างตัวนำที่เป็นบัสบาร์ (bus conductor) กับผนังด้านในของท่อ
2. เกิด fault ขึ้นภายนอก กระแสผิดปกติจะไหลผ่านบัสบาร์ในระบบ GIS และเกิดการเหนี่ยวนำกระแส (induced currents) ขึ้นที่ผิวท่อ ดังนั้นในระบบ GIS จึงควรที่ทำการต่อท่อโลหะนี้เข้ากับระบบต่อลงดิน เพื่อให้กระแสเหนี่ยวนำที่ผิวท่อไหลลงดิน ลักษณะของการต่อท่อเข้ากับตะแกรงจะเป็นดังรูปข้างล่าง



รูป A4 แสดงการเกิดลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าขดขม GIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix 9

ระดับกระแสลัดวงจรของการไฟฟ้านครหลวง

การไฟฟ้านครหลวงได้จำกัดค่าระดับกระแสลัดวงจร (Fault Level) ของระบบไม่ให้เกินค่าระดับกระแสลัดวงจรสูงสุด (Maximum Fault Level) ที่กำหนด เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ได้ ค่าระดับกระแสลัดวงจรสูงสุดที่กำหนดได้แสดงไว้ในตาราง

ตาราง A1 แสดงค่าระดับกระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบการไฟฟ้านครหลวง

Rated Voltage	Maximum Fault Level	
	MVA	KA
230 KV	15,000	33.0
115 KV	5,000	25.0
69 KV	5,000	41.8
24 KV	500	12.0
12 KV (Network Area)	750	36.0
12 KV	500	24.0
380/220 V (Network Area)	36/12#	50.0
380/220 V	7.2-36/2.4-12*	10.0-50.0*

Three phase fault level / Single phase fault level

* Up to capacity of connecting distribution transformer

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ศุภี บรรจงจิตร และท่านอาจารย์ทองใบ อรรถเศรษฐ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาช่วยแนะนำและให้คำปรึกษาต่างๆ จนปริญาานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] "IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING"
ANSI/IEEE STD 80-1986, NEW YORK, 1986
- [2] F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR, "OPTIMUM DESIGN OF SUBSTATION
GROUNDING IN TWO LAYER EARTH STRUCTURE PART I, II, III "
IEEE. TRAN. VOL. PAS-94, NO. 2, MARCH / APRIL 1975
- [3] "IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING OF INDUSTRIAL AND
COMMERCIAL POWER SYSTEMS" IEEE STD 142-1972
- [4] R. T. LYTHALL, "THE J&P SWITCHGEAR BOOK", LONDON, 1972

