การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

UNEQUALLY SPACED GROUND GRIDS DESIGN OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEM

ฉัตรชัย เทียบศรไชย
CHATCHAI TIEBSORNCHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2440-4

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

UNEQUALLY SPACED GROUND GRIDS DESIGN OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEM

ฉัตรชัย เทียบศรไชย

CHATCHAI TIEBSORNCHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2440-4

UNEQUALLY SPACED GROUND GRIDS DESIGN

OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEM

CHATCHAI TIEBSORNCHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

ISBN 974-15-2440-4

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

UNEQUALLY SPACED GROUND GRIDS DESIGN OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEM

นักศึกษา นายฉัตรชัย เทียบศรไชย

รหัสประจำตัว 44061050

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.นิทัศน์ กฤษณจินดา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ศุลี บรรจงจิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		**ลายมือชื่อ**
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.พิชิต	ลำยอง	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ
ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
รศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 17 พฤษภาคม 2549 เวลา 13.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่....26.......**เดือน**....กรกฎาคม......**พ.ศ**....2549....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
นักศึกษา	นายฉัตรชัย เทียบศรไชย
รหัสประจำตัว	44061050
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.นิทัศน์ กฤษณจินดา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ศุลี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ควรคำนึงถึงต้นทุนในระดับที่ผลการออกแบบมีความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และไม่ก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ขณะที่มีแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดเกิดขึ้นเนื่องจากผลของลักษณะตะแกรงตาข่ายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผิดพร่องอันเกิดจากธรรมชาติ หรือจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้าไหลกระจายสู่ระบบดินโดยผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยการพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายด้วยความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม ภายใต้ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวางอยู่ในระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ

Thesis Title	Unequally Spaced Ground Grids Design of Substation Grounding System
Student	Mr.Chatchai Tiebsornchai
Student ID.	44061050
Degree	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Programme	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Nitad Krisnachinda
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Sulee Banjongjit

ABSTRACT

The-main function designs of the substation grounding system include economic under conditions ensuring safety and reliable operation of power system and ensuring human being's safety in the situation of ground fault in power system.

The thesis presents the design of an unequally spaced substation grounding grids.The design of the grounding system considers the conductors spacing ratio by the condition of the burial grounding system in soil which has a uniform resistivity.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.นิทัศน์ กฤษณจินดา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ศุลี บรรจงจิตร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและแก้ปัญหาตลอดถึงให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย รศ.พิชิต ลำยอง และรศ.นิทัศน์ กฤษณจินดา คณะกรรมการสอบหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดถึงข้อชี้แนะ ถึงที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย รศ.พิชิต ลำยอง รศ.นิทัศน์ กฤษณจินดา ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ และดร.ชาย ชมภูอินไหว คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางสิ่งที่ต้องแก้ไขในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการทำให้วิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสวัสดิ์ เทียบศรไชย และคุณบุญรวบ เทียบศรไชย ที่มอบความรักและกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คุณอนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช จากบริษัทศรีอู่ท่องที่กรุณาให้ข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

สุดท้ายต้องขอบคุณ ญาติมิตรสหาย ที่เป็นกำลังใจในการทำให้วิทยานิพนธ์เสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่จะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฉัตรชัย เทียบศรไชย

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญตาราง

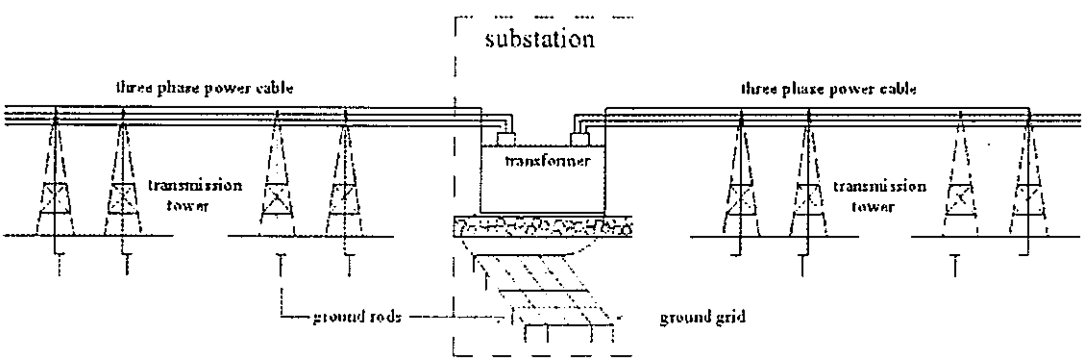
สารบัญรูป

สารบัญรูป (ต่อ)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ประกอบด้วยตัวนำที่วางขนานกันโดยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำเท่ากันและมีการเชื่อมต่อกันเป็นตะแกรงตาข่ายซึ่งมีหรือไม่มีแท่งดิน เชื่อมต่อกับจุดเชื่อมต่อของตะแกรงตาข่าย วางอยู่ใต้พื้นดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและมีการเชื่อมต่อกับโครงสร้างที่เป็นโลหะที่ติดตั้งอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ได้แก่ ตัวถังของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือใช้เป็นจุดต่อนิวตรอนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นต้น ทั้งนี้เพื่อกระจายกระแสไฟฟ้าอันเกิดจากความผิดพร่องของระบบไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าลัดวงจร หรือเกิดจากธรรมชาติ เช่น กระแสฟ้าผ่า ซึ่งกระแสเหล่านี้มีปริมาณที่สูงมาก ให้กระจายสู่ระบบดินเป็นไปอย่างสะดวกรวดเร็ว โดยไม่ทำให้ตัวนำของตะแกรงตาข่ายนั้นหลอมละลายในชั่วระยะเวลาหนึ่ง ขณะเดียวกันที่มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ก็จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวพื้นดิน แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์



รูปที่ 1.1 ลักษณะการเชื่อมต่อระบบต่อลงดินเป็นจุดต่อนิวตรอนของหม้อแปลงไฟฟ้า

ความต่างศักย์ที่กล่าวมาข้างต้น นั้นเป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และบริเวณใกล้เคียงทั้งสิ้น อีกทั้งอาจจะก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้าย่อยอีกด้วย ซึ่งการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยคำนึงถึงความปลอดภัยจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงประกอบด้วยตัวนำจำนวนมาก เมื่อเป็นเช่นนั้นนอกจากระดับความปลอดภัยแล้วต้นทุนก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาการ

กระจายกระแสไฟฟ้าจากตัวนำระบบต่อลงดินสู่ระบบดินไม่สม่ำเสมอ มาใช้อย่างถูกต้องแม่นยำก็สามารถที่ประเมินความปลอดภัย และต้นทุนได้อย่างเหมาะสมกว่าการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาการกระจายกระแสไฟฟ้าจากตัวนำระบบต่อลงดินสู่ระบบดินสม่ำเสมอ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาผลเนื่องจากการวางตัวนำของตะแกรงตาข่ายให้มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ให้มีความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และให้มีการประหยัดตัวนำของระบบต่อลงดินที่ใช้ในการก่อสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ มีการกระจายแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวพื้นดิน เป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย รวมถึงตัวนำของตะแกรงตาข่ายมีจำนวนลดลง เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวนำด้วยความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่เหมาะสม

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความสมมาตรในแต่ละด้านของตะแกรงตาข่าย ภายใต้ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยฝังอยู่ในระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ และพื้นที่ของสถานีไฟฟ้ามีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม รวมถึงเขียนโปรแกรมสำหรับใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ลำดับขั้นตอนของการศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาหลักการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ ตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 “Guide for Safety in AC Substation Grounding.” และศึกษาหลักการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ จากเอกสารบทความ

2. คำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ พร้อมกันนี้เสนอแนวทางใหม่ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย จากหลักการในแนวความคิดเบื้องต้น นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

3. ศึกษาและพัฒนาโปรแกรม Visual Basic สำหรับใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่มีความซับซ้อนของตัวแปร ให้มีความสะดวกและถูกต้องแม่นยำในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

4. ทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็นขนาด 115/24 kv. จังหวัดสระแก้ว ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดอนพุตขนาด 115/24 kv. จังหวัดสระบุรีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา

5. สรุปผลการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยคำนึงถึงการลดลงของจำนวนตัวนำของระบบต่อลงดินและระดับความปลอดภัยที่ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ คือขั้นตอนของการออกแบบเมื่อได้จำนวนตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอตามแนวแกน เป็นจุดทศนิยม มีความจำเป็นต้องเลือกใช้ค่าเป็นจำนวนเต็มที่ต่ำกว่า เพราะหากไม่จะทำให้ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยมีความคลาดเคลื่อนได้ ทั้งนี้ได้มีการเผื่อขนาดของตัวนำไว้ในขั้นตอนของการหาขนาดตัวนำของตะแกรงตาข่าย และขั้นตอนของการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ไม่สามารถที่จะดำเนินการการวัดค่าด้วยตนเองได้ ทั้งนี้ข้อมูลเบื้องต้นทั้งหมดที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอนั้น เป็นข้อมูลที่ใช้จริงในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดอนพุต และระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีที่ใช้ศึกษาค้นคว้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิจัยเอกสารหรือเอกสารบทความ รวมถึงข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดอนพุด จังหวัดสระบุรี และข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น จังหวัดสระแก้ว ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ดำเนินงานโดย บริษัทศรีอู่ทอง

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

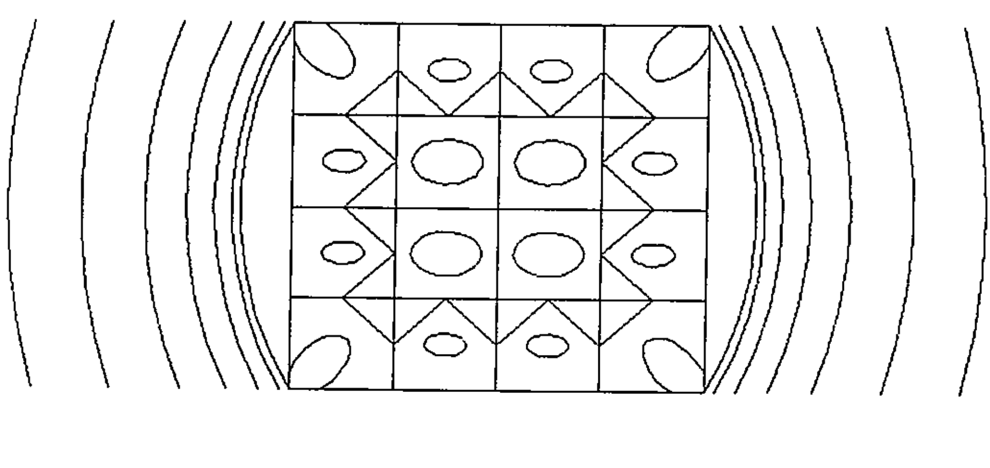
สามารถเข้าใจถึงข้อแตกต่างของทฤษฎี และการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ กับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา หรือประยุกต์ เพื่อนำไปใช้การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยในลำดับต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

บทนี้นำเสนอวัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย และทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่จะกล่าวถึงในบทที่ 3 และบทที่ 4 เป็นลำดับต่อไป

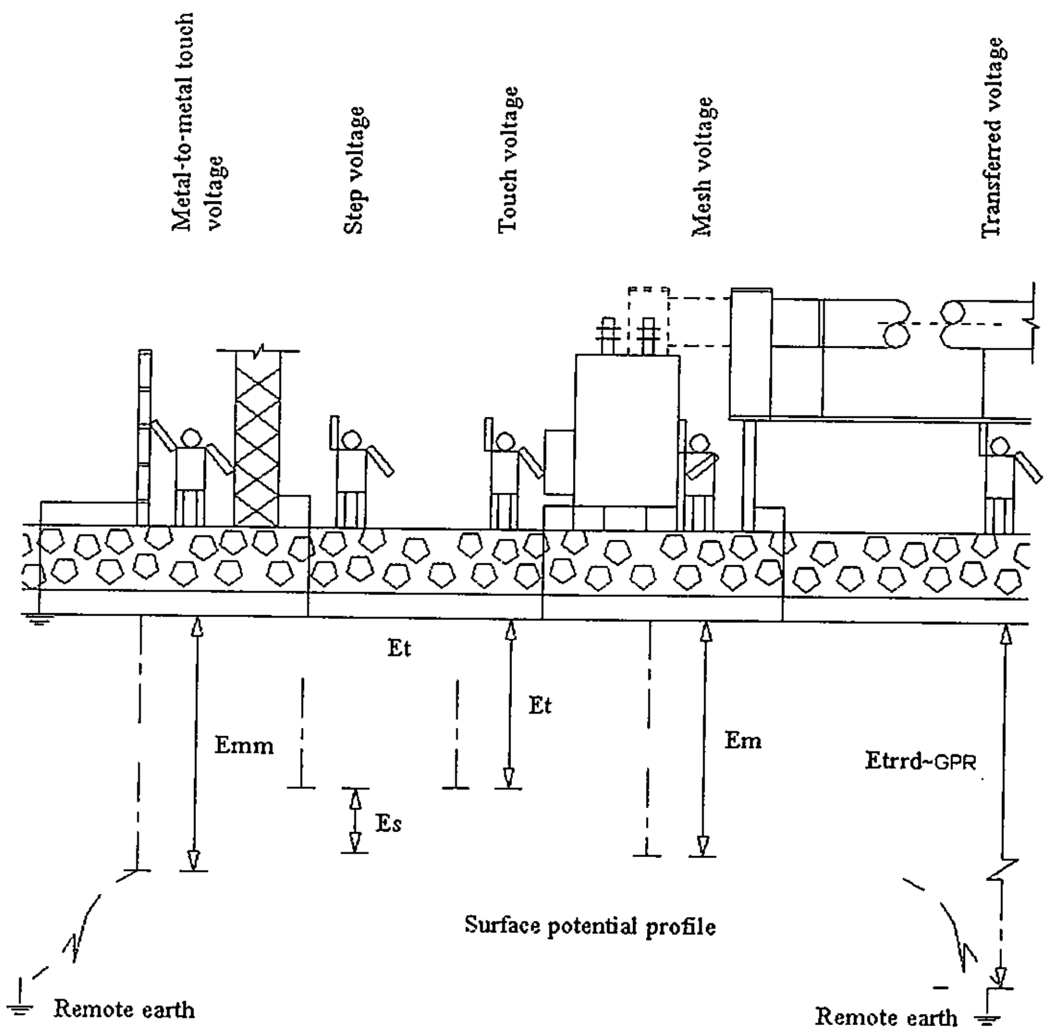
2.1 วัตถุประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่ดีต้องมีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และไม่ก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยที่มีความประหยัดวัสดุรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ควรจะมีค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม ทั้งนี้ไม่สามารถทราบได้ว่าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จมีค่าเท่าไหร่ในขั้นตอนของการออกแบบ สำหรับการออกแบบนั้นอาศัยการประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน ซึ่งมีการกำหนดให้เป็นสมการสำหรับใช้คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ทั้งนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดได้ที่มนุษย์สามารถทนได้ ตามลำดับ [1, 2]



รูปที่ 2.1 ลักษณะความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวดินเมื่อมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

เมื่อเกิดสภาวะผิดพร่องลงดิน (Ground fault condition) ที่สถานีไฟฟ้าย่อย จะมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไหลผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยสู่ระบบดิน ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวดินบริเวณภายในสถานีไฟฟ้าย่อยและบริเวณรอบๆภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.1 [1, 2]



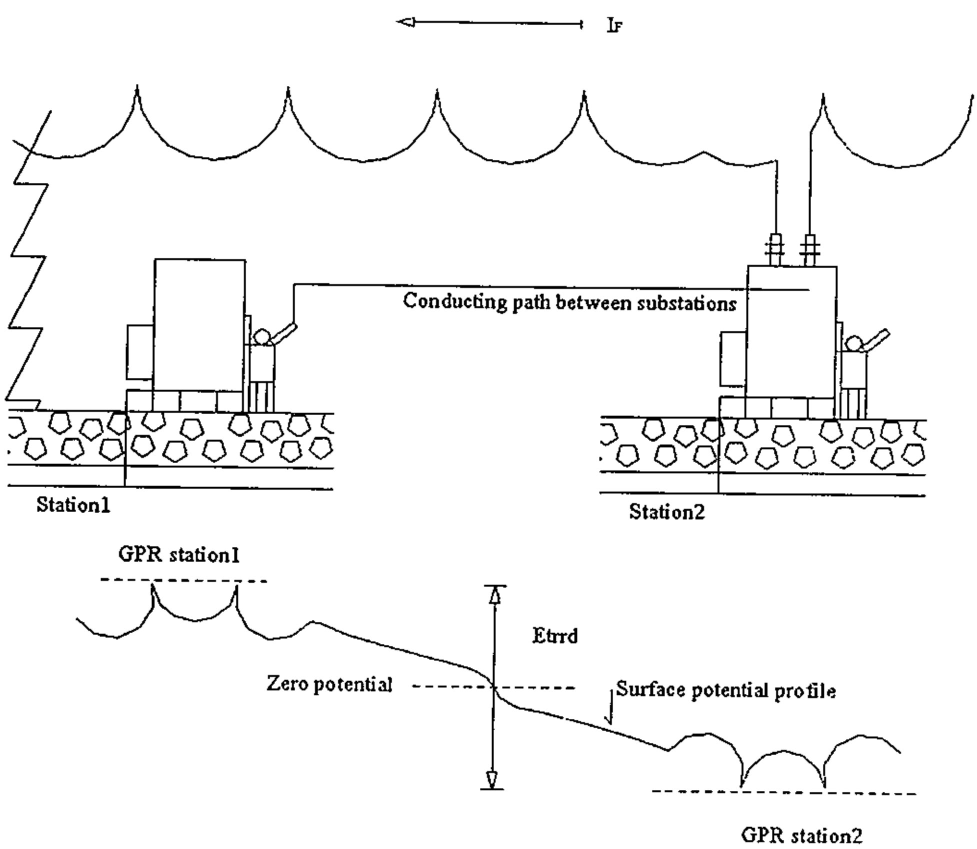
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดอันตรายจากความต่างศักย์

ความต่างศักย์ที่ผิวดินบริเวณภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และบริเวณรอบๆ สถานีไฟฟ้าย่อยที่เป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ซึ่งได้แก่ [1, 2]

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวพื้นดิน (Ground potential rise, GPR) คือค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ระหว่างตะแกรงตาข่ายเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อย

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage, Es) คือค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 2 จุดที่ผิวดิน เนื่องจากการยืนอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีระยะห่างระหว่างเท้า 1 เมตร

แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage, Et) คือค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างจุด 2 จุดที่ผิวดิน เนื่องจากการยืนอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยมีมือสัมผัสอยู่กับโครงสร้างที่เป็นโลหะที่เชื่อมต่อกับระบบต่อลงดิน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์

แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage, Em) คือค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นสูงสุดภายในช่องตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดิน

แรงดันไฟฟ้าทรานสเฟอร์ (Transferred voltage, Etrrd) คือค่าความต่างศักย์ที่เข้ามาหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นกรณีหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

2.2 องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

2.2.1 ตัวนำต่อลงดิน (Conductor cross section area, A_{mm^2})

ขนาดของตัวนำต่อลงดิน เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ตัวนำต่อลงดินที่ดีต้องมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี โดยที่ไม่ทำให้เกิดค่าความต่างศักย์สูงเมื่อมีกระแสลัดวงจรไหลลงสู่ระบบดิน และไม่หลอมละลายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไหลลงสู่ระบบดินเป็นระยะเวลาหนึ่งรวมถึงสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งทองแดงมีคุณสมบัติดังกล่าวจึงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำต่อลงดิน [1, 2]

สามารถคำนวณจากสมการ

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o - T_a}\right)}} \tag{2.1}$$

เมื่อ

A_{mm^2} = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor cross section area) หน่วย ตารางเมตร

I_f = กระแสลัดวงจรไหลลงสู่ระบบดิน (Symmetrical fault current) หน่วย kA

$TCAP$ = Thermal capacity per unit volume หน่วย J/cm^3/^{0}C

t_c = ระยะเวลากระแสลัดวงจรไหลลงสู่ระบบดิน (Time duration of current flow) หน่วย วินาที

T_m = อุณหภูมิใช้งาน (Max. allowable temperature) หน่วย ^{0}C

T_a = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature) หน่วย ^{0}C

T_r = อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ (Ref. Temp. of material constants) หน่วย ^{0}C

α_r = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ 0 ^{0}C
(Thermal coefficient of resistivity at reference temperature)

α_0 = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ T_r (Thermal coefficient of resistivity) หน่วย ^{0}C

ρ_r = ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ T_r
(Resistivity of ground conductor at reference temperature) หน่วย $\mu\Omega / cm^3$

K_0 = $\frac{1}{\alpha_0}$ หรือ $\frac{1}{\alpha_r} - T_r$

ค่าคงตัวของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้เป็นตัวนำต่อลงดินดูอ้างอิงได้จากตารางที่ 2.1 [1, 2]

ตารางที่ 2.1 ค่าคงตัวของวัสดุชนิดต่างๆ

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20 °C (1/ °C)	K_0 at 0 °C (0 °C)	Fuing * temperature T_m (°C)	ρ_r 20°C $(\mu\Omega / cm^3)$	TCAP Thermal capacity (J/cm³/°C)
Copper annealed soft-drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod**	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum BC grade	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum 6201 alloy	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod***	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

*From ASTM standards

**Copper-clad steel rod based on 0.245 mm (0.010 in) copper thickness.

***Stainless-clad steel rod based on 0.508 (0.020 in) No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

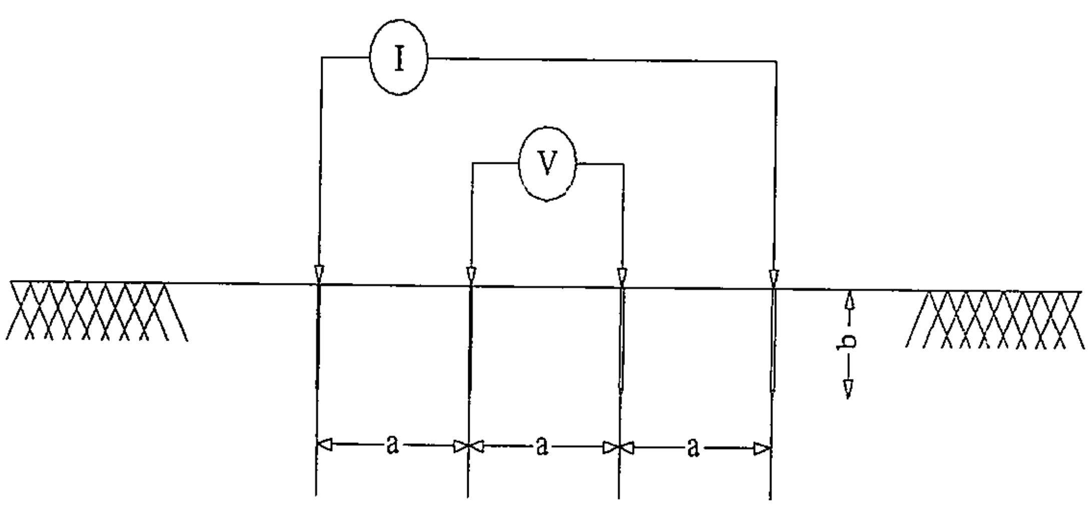
2.2.2 ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity, ρ)

ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ความต้านทานจำเพาะของระบบดินจะมีผลต่อการใช้ตัวนำต่อลงดินจะมากหรือน้อย ทั้งนี้ค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดินจะมีความค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของระบบดินที่ก่อสร้างของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นๆ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินของดินชนิดต่างๆ ดูค่าอ้างอิงได้จากตารางที่ 2.2 [1, 2]

ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)
ดินในที่หนองบึง	5-40
ดินเหนียว	20-200
ดินทราย	200-2,000
ดินหินทราย	500-3,000
หินแข็ง	2,000-10,000

ดังนั้นก่อนการออกแบบระบบต่อลงดิน ต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดินตามสภาพจริงของบริเวณที่จะก่อสร้างของสถานีไฟฟ้าย่อย วิธีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดิน คือ The Werner Four Pin Method ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดิน

กรณีระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดินแบบ 4 จุด มีระยะห่างระหว่างโพรบเท่ากันควรทำการวัดอย่างน้อย 3-4 ทิศทาง เพื่อได้ค่าเฉลี่ยที่เหมาะสม ระยะห่างระหว่างโพรบควรมีระยะห่าง 1.5 เท่าของความยาวที่ก่อสร้างของสถานีไฟฟ้าย่อย ทั้งนี้ทางปฏิบัติค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดินจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเตรียมหน้าดินซึ่งหากต้องการค่าที่ละเอียดก็อาจจะวิเคราะห์หน้าดินส่วนบนประกอบ

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1+\frac{2a}{\sqrt{\left(a^2+4b^2\right)}}-\frac{a}{\sqrt{\left(a^2+b^2\right)}}} \tag{2.2}$$

กรณี $b << a$

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\rho = 4\pi aR \tag{2.3}$$

เมื่อ

ρ = ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

a = ระยะห่างระหว่างแท่งดินที่อยู่ใกล้เคียง (Distance between adjacent electrodes) หน่วย เมตร

b = ความลึกของแท่งดินจากผิวดิน (Depth of the electrodes) หน่วย เมตร

R = ความต้านทานของระบบดินที่วัดได้ (Measured resistance) หน่วย โอห์ม

2.2.3 ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance, R_B)

ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของร่างกาย เนื่องจากค่าความต้านทานของร่างกายจะแปรผกผันกับค่าความชื้นของร่างกาย

สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย นำค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์พิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย [1, 2]

สามารถคำนวณจากสมการ

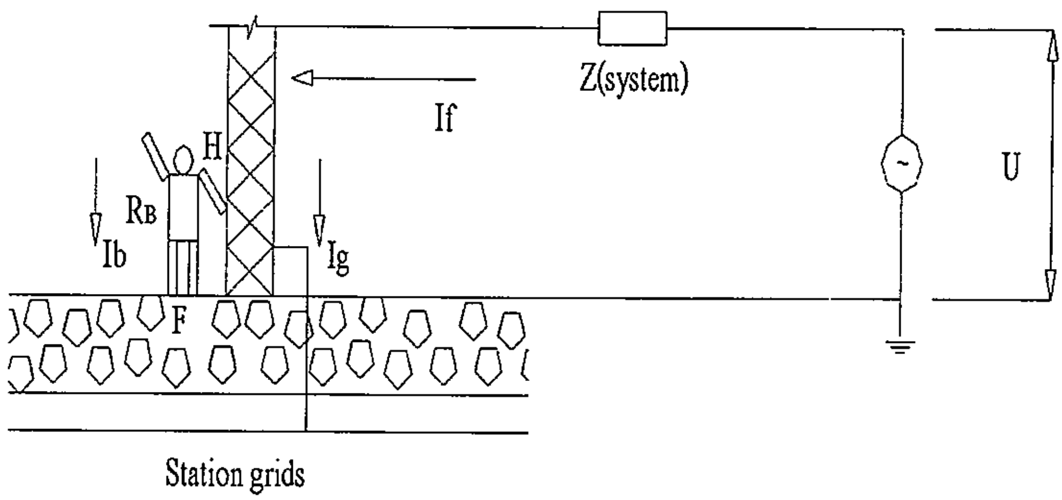
$$R_B = 1000 \tag{2.4}$$

เมื่อ

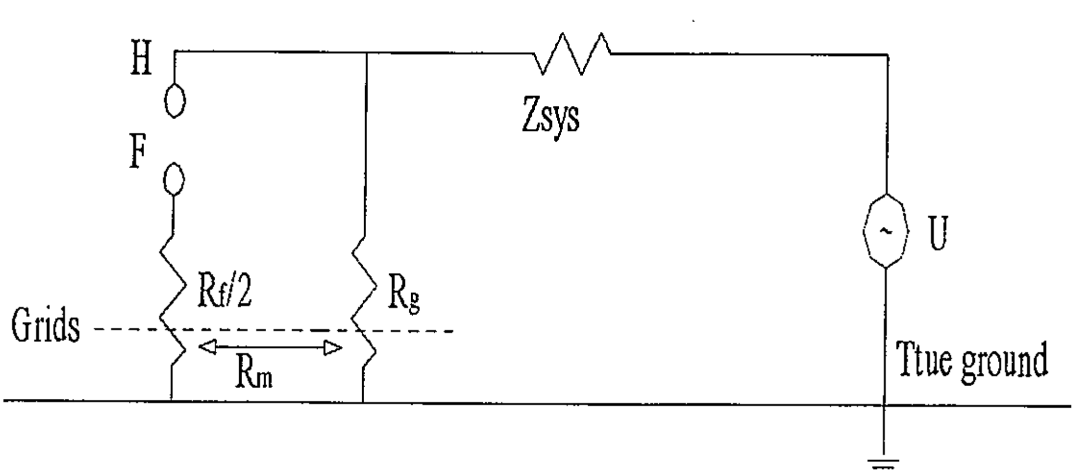
R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance) หน่วย โอห์ม

2.2.4 วงจรสมมูลการเกิดอุบัติเหตุ (Accidental circuit)

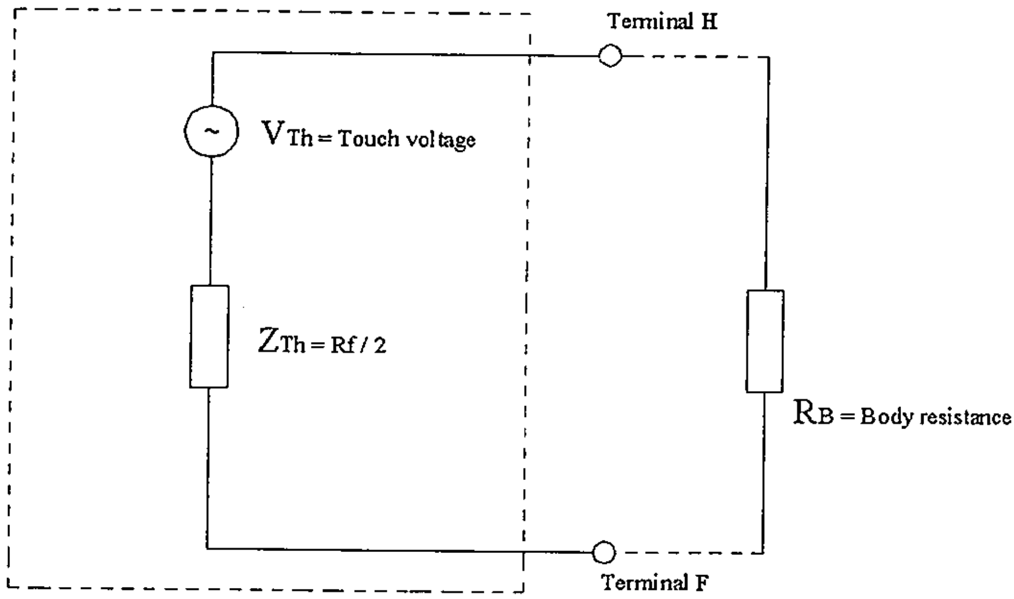
วงจรสมมูลการเกิดอุบัติเหตุแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ขณะที่มีกระแสลัดวงจรไหลสู่ระบบดินจะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ผิวดิน แล้วส่งผลให้บุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต่างศักย์ของจุดที่มือสัมผัสอยู่กับโครงโลหะที่มีการต่อลงดิน กับเท้าที่สัมผัสอยู่กับพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย ขณะเดียวกันจะมีกระแสไหลผ่านร่างกาย โดยจะไหลจากจุดสัมผัสที่มือ (H) ลงสู่จุดสัมผัสที่เท้า (F) ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.5 รูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 [1, 2]



รูปที่ 2.5 จำลองขณะมนุษย์เกิดอุบัติเหตุได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

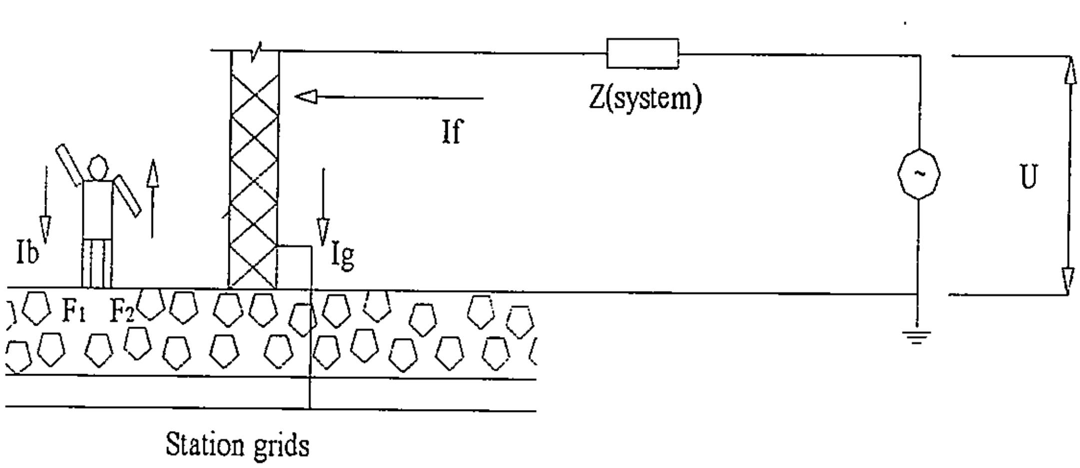


รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

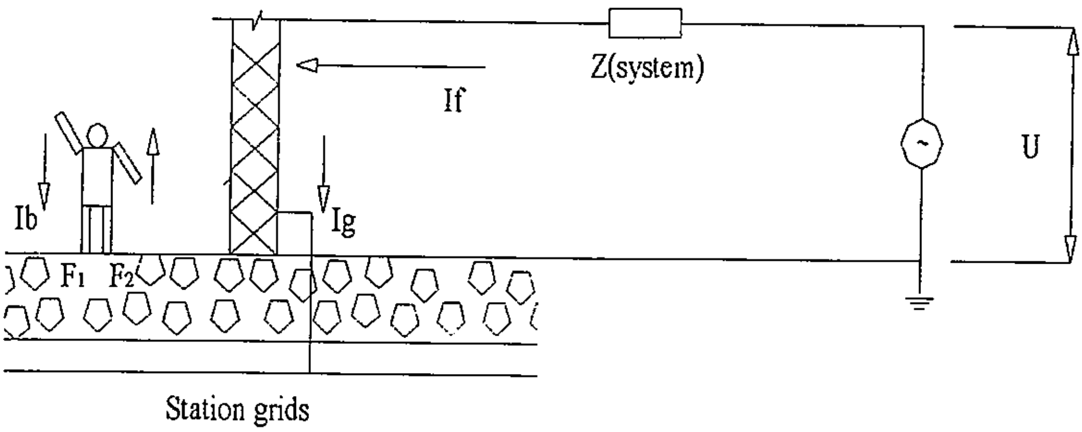


รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

วงจรสมมูลการเกิดอุบัติเหตุแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ขณะที่มีกระแสลัดวงจรไหลสู่ระบบดิน จะทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ผิวดิน แล้วส่งผลให้บุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต่างศักย์ของจุดที่เท้าทั้ง 2 สัมผัสอยู่กับพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย ขณะเดียวกันจะมีกระแสไหลผ่านรางกาย โดยจะไหลจากจุดสัมผัสเท้าหนึ่ง (F1) ไปสู่จุดสัมผัสอีกเท้าหนึ่ง (F2) ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 [1, 2]



รูปที่ 2.8 จำลองขณะมนุษย์เกิดอุบัติเหตุได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

จากวงจรสมมูลขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และวงจรสมมูลขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่มนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร

สามารถคำนวณจากสมการ

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \tag{2.5}$$

สำหรับขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

สามารถคำนวณจากสมการ

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \tag{2.6}$$

สำหรับขณะมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

สามารถคำนวณจากสมการ

$$Z_{Th} = 2R_f \tag{2.7}$$

สำหรับความต้านทานของเท้า

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \tag{2.8}$$

สำหรับความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_t = R_B + \frac{R_f}{2} \tag{2.9}$$

ความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า เมื่อแทนค่าความต้านทานของเท้า ค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_t = R_B + 1.5\rho \tag{2.10}$$

สำหรับความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_s = R_B + 2R_f \tag{2.11}$$

ความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า เมื่อแทนค่าความต้านทานของเท้า ค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_s = R_B + 6\rho \tag{2.12}$$

เมื่อ

b = รัศมีแผ่นโลหะกลม มีค่าเท่ากับ 0.08 เมตร

R_f = ความต้านทานของเท้า หน่วย โอห์ม

R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance) หน่วย โอห์ม

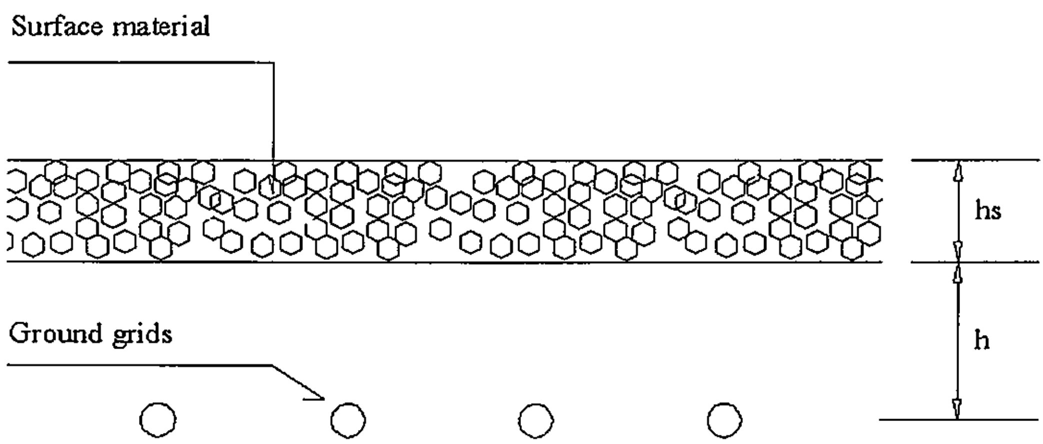
R_s = ความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า หน่วย โอห์ม

R_t = ความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า หน่วย โอห์ม

ρ = ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

2.2.5 วัสดุโรยบนพื้นสถานีไฟฟ้าย่อย (Surface material, C_s)

ผลเนื่องจากวัสดุที่โรยบนระบบดิน เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ มีการใช้หินกรวดเป็นวัสดุโรยบนพื้นสถานีไฟฟ้าย่อย มีความหนาประมาณ 0.08 เมตร ถึง 0.15 เมตร เพื่อลดจำนวนตัวนำต่อลงดินและเพิ่มค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์ [1, 2, 3]



รูปที่ 2.10 หินกรวดเป็นวัสดุโรยบนพื้นสถานีไฟฟ้าย่อย

สำหรับตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของวัสดุที่โรยบนระบบดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$C_s = 1 - \frac{a\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + a} \tag{2.13}$$

ดังนั้นค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า และค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า

กรณีค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า โดยคิดผลเนื่องจากวัสดุที่โรยบนระบบดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_t = R_B + 1.5C_s\rho_s \tag{2.14}$$

กรณีค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า โดยคิดผลเนื่องจากวัสดุที่โรยบนระบบดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_s = R_B + 6C_s\rho_s \tag{2.15}$$

เมื่อ

a = แทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม (Equivalent radius of a foot) มีค่าเท่ากับ 0.09 เมตร

C_s = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Reduction factor)

h_s = ความหนาของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Thickness of surface materiel) หน่วย เมตร

R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance) หน่วย โอห์ม

R_s = ความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า หน่วย โอห์ม

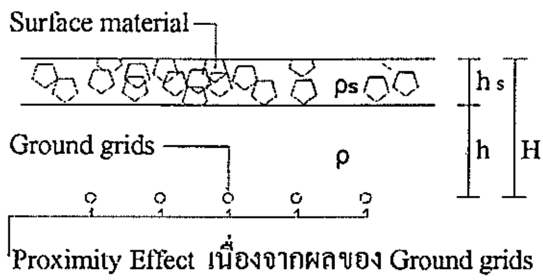
R_t = ความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า หน่วย โอห์ม

ρ = ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Washed granite resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

2.2.6 ผลเนื่องจากมีตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน (Proximity Effect)

ผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน เมื่อจุดที่ตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดินมีค่าศักดาไฟฟ้าสูงกว่าศักดาไฟฟ้า ณ.จุดที่ยืนอยู่บริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านร่างกายลงสู่ระบบดินได้ยากขึ้น เนื่องจากระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินทำให้ค่าความต้านทานรวมมีค่าเพิ่มขึ้น [1, 2]



รูปที่ 2.11 ระบบตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\text{Proximity Effect} = \left(1 + \frac{1.3a}{H}\right) \tag{2.16}$$

ดังนั้นค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้าและค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า

กรณีค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างมือกับเท้า โดยคิดผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_t = R_B + 1.5C_s\rho_s\left(1 + \frac{1.3a}{H}\right) \tag{2.17}$$

กรณีค่าความต้านทานรวมเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านระหว่างเท้ากับเท้า โดยคิดผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_s = R_B + 6C_s\rho_s\left(1+\frac{1.3a}{H}\right) \tag{2.18}$$

เมื่อ

a = แทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม (Equivalent radius of a foot) มีค่าเท่ากับ 0.09 เมตร

C_s = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Reduction factor)

H = ความลึกของตะแกรงตาข่ายถึงผิวดิน หน่วย เมตร

Proximity Effect = ผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

2.2.8 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Tolerable touch voltage, E_{touch})

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย คือค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสอยู่ที่ไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต [1, 2, 3]

สำหรับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{touch50} = R_t \times I_{c50} \tag{2.21}$$

$$E_{touch50} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\left(1 + 1.3\frac{a}{H}\right)\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{2.22}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยไม่คิดผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{touch50} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{2.23}$$

กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{touch70} = R_t \times I_{c70} \tag{2.24}$$

$$E_{touch70} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\left(1 + 1.3\frac{a}{H}\right)\right)\left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{2.25}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยไม่คิดผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{touch70} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{2.26}$$

เมื่อ

C_s = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Reduction factor)

$E_{touch50}$ = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable touch voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

$E_{touch70}$ = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable touch voltage for 70 kg) หน่วย โวลต์

R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance) หน่วย โอห์ม

t_s = ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (Fault clearing duration time) หน่วย วินาที

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Washed granite resistivity) หน่วย โอห์ม - เมตร

2.2.9 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Tolerable step voltage, E_{step})

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย คือค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ที่เกิดขึ้นจากการย่างก้าวที่ไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต [1, 2, 3]

สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{step50} = R_s I_{c50} \tag{2.27}$$

$$E_{step50} = \left(R_B + 6C_s\rho_s \left(1 + 1.3\frac{a}{H} \right) \right) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \tag{2.28}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยไม่คิดผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{step50} = \left(R_B + 6C_s\rho_s \right) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \right) \tag{2.29}$$

กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{step70} = R_s \times I_{c70} \tag{2.30}$$

$$E_{step70} = \left(R_B + 6C_s\rho_s \left(1 + 1.3\frac{a}{H} \right) \right) \left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \right) \tag{2.31}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ โดยไม่คิดผลเนื่องจากมีระบบตะแกรงตาข่ายต่อลงดินฝังอยู่ใต้ดิน

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_{step70} = \left(R_B + 6C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.157}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{2.32}$$

เมื่อ

C_s = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Reduction factor)

E_{step50} = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable step voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

E_{step70} = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable step voltage for 70 kg) หน่วย โวลต์

R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (Human body resistance) หน่วย โอห์ม

t_s = ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (Fault clearing duration time) หน่วย วินาที

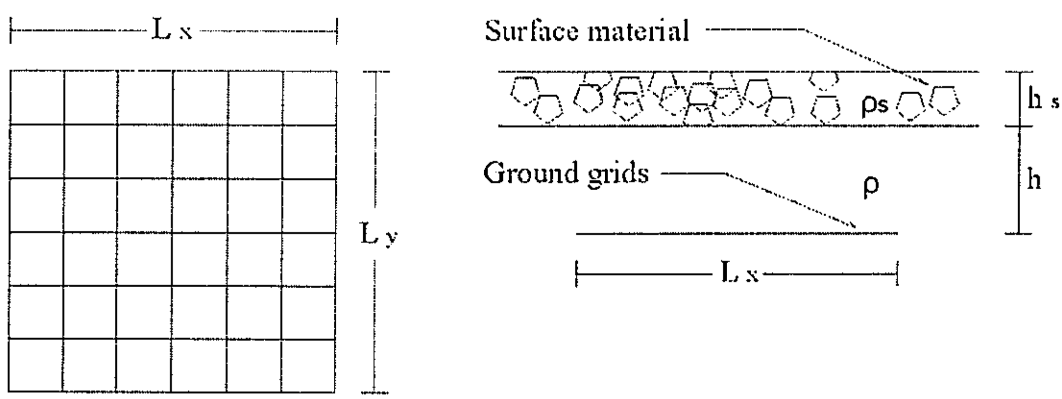
ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยบนระบบดิน (Washed granite resistivity) หน่วย โอห์ม - เมตร

2.2.10 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grid resistance, R_g)

ความต้านทานของระบบต่อลงดิน เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ความต้านทานของระบบต่อลงดินควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1 โอห์ม ถึง 5 โอห์ม เนื่องจากค่า Grid Potential Rise ที่เกิดขึ้นเป็นผลคูณระหว่างค่ากระแสกริดกับค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินซึ่งกระแสกริดมีค่าสูง ดังนั้นค่าวามต้านทานของระบบต่อลงดินควรมีค่าน้อยๆเพื่อระบบต่อลงดินที่ออกแบบมีความปลอดภัยต่อชีวิตและไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์

สามารถคำนวณจากสมการ

$$R_g = \rho\left(\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1 + \frac{1}{h\sqrt{20/A}}\right)\right) \tag{2.33}$$



รูปที่ 2.12 ตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อ

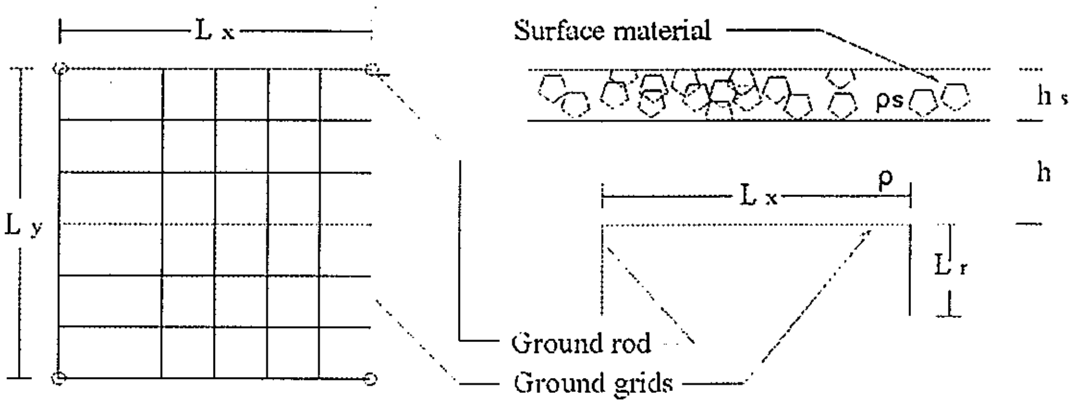
สำหรับความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่าย กรณีตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$n_x = n_y \tag{2.34}$$

$$L_x = L_y \tag{2.35}$$

$$L_T = \left(2n_x L_x\right) \tag{2.36}$$

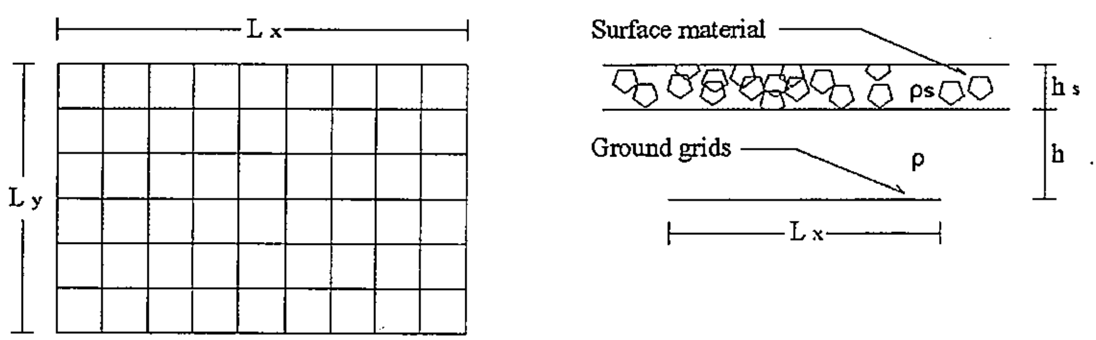


รูปที่ 2.13 ตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งดินเชื่อมต่อ

สำหรับความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายและความยาวทั้งหมดของแท่งดิน กรณีตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_T = (2n_x L_x) + (n_r L_r) \tag{2.37}$$

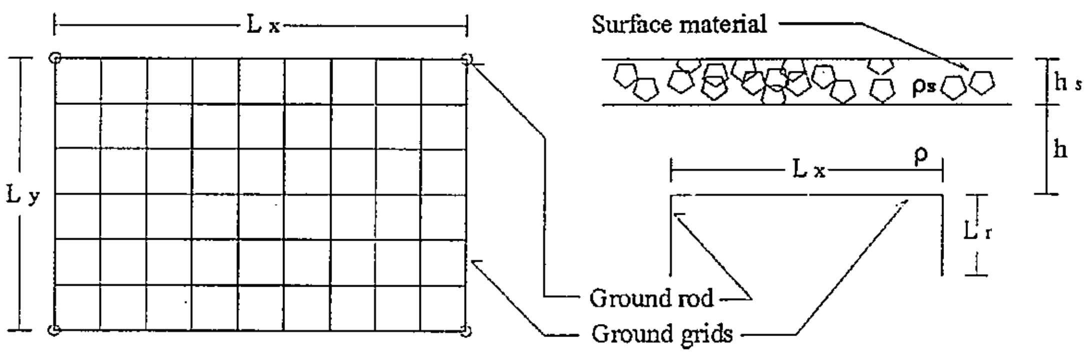


รูปที่ 2.14 ตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อ

สำหรับความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่าย กรณีตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_T = (n_x L_x) + (n_y L_y) \tag{2.38}$$



รูปที่ 2.15 ตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแท่งดินเชื่อมต่อ

สำหรับความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายและความยาวทั้งหมดของแท่งดิน กรณีตะแกรงตาข่ายรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_T = (n_x L_x) + (n_y L_y) + (n_r L_r) \tag{2.39}$$

เมื่อ

A = พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย (Area of substation) หน่วย ตารางเมตร

h = ความลึกของการฝังตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Depth of ground grid) หน่วย เมตร

L_r = ความยาวของแท่งดิน (Length of rod) หน่วย เมตร

L_T = ความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายและความยาวทั้งหมดของแท่งดิน (Total length of ground conductor) หน่วย เมตร

L_x = ความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายตามแนวแกน x (Max. length of grid in x direction) หน่วย เมตร

L_y = ความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายตามแนวแกน y (Max. length of grid in y direction) หน่วย เมตร

n_x = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอตามแนวแกน x (Number of ground conductor for equally spaced grid x direction)

n_y = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอ

ตามแนวแกน y (Number of ground conductor for equally spaced grid y direction)

R_g = ความต้านทานของตะแกรงตาข่าย (Grid resistance) หน่วย โอห์ม

ρ = ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

2.2.11 กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current, I_G)

กระแสกริดสูงสุด เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านตะแกรงตาข่ายสู่ระบบดินเนื่องจากระบบไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรแบบ Line to line to ground fault หรือแบบ Single line to ground fault [1, 2, 3]

สามารถคำนวณจากสมการ

$$I_G = D_f I_g 1000 \tag{2.40}$$

สำหรับกระแสกริดสมมาตร

สามารถคำนวณจากสมการ

$$I_g = S_f I_f \tag{2.41}$$

สำหรับ Decrement Factor อยู่ในความสัมพันธ์ของช่วงเวลาเกิดกระแสลัดวงจรสู่ระบบดิน ดูค่าอ้างอิงได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า Decrement Factor

ช่วงเวลาเกิดกระแสลัดวงจรสู่ระบบดิน	Decrement Factor
0.008	1.62
0.1	1.25
0.25	1.10
0.5 หรือมากกว่า	1.00

เมื่อ

D_f = Decrement factor

I_f = กระแสลัดวงจร (Symmetrical fault current) หน่วย แอมแปร์

I_g = กระแสกริดสมมาตร (Symmetrical grid current) หน่วย แอมแปร์

I_G = กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หน่วย แอมแปร์

2.2.12 แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Grid potential rise, GPR)

แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย การประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยการเปรียบเทียบค่า Grid Potential Rise กับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ หากค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบมีความปลอดภัย แต่หากค่า แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบไม่มีความปลอดภัยต้องพิจารณาประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดินในลำดับต่อไป [1, 2, 3]

สามารถคำนวณจากสมการ

$$GPR = I_G R_g \tag{2.42}$$

เมื่อ

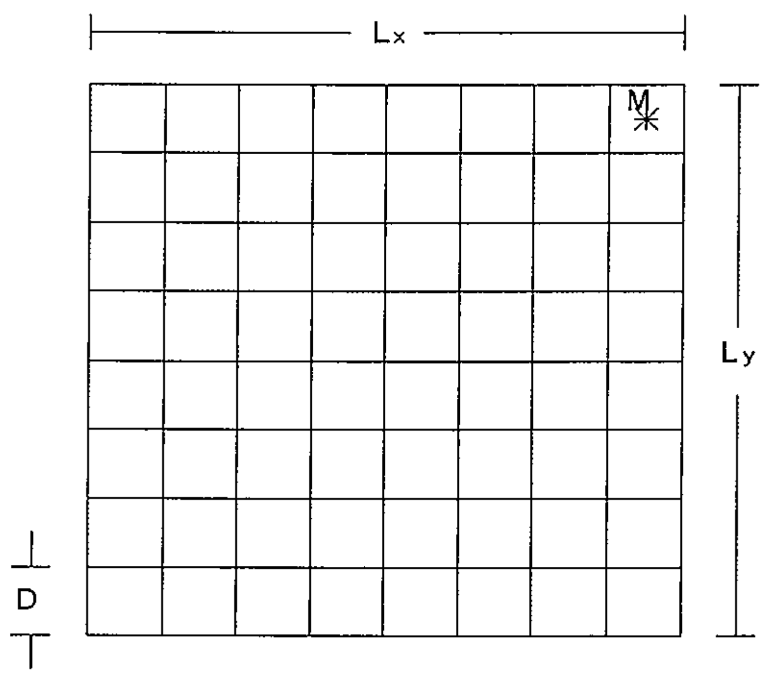
GPR = แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Grid potential rise) หน่วย โวลต์

I_G = กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หน่วย แอมแปร์

R_g = ความต้านทานของตะแกรงตาข่าย (Grid resistance) หน่วย โอห์ม

2.2.13 แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Mesh voltage, E_m)

แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย การประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยการเปรียบเทียบ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดกับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ หากค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบมีความปลอดภัย จึงไปสู่การพิจารณาประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดินลำดับต่อไป แต่หากค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบไม่มีความปลอดภัยต้องพิจารณาปรับปรุงการออกแบบ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดเกิดที่บริเวณจุด M โดยที่จะเกิดทั้ง 4 ช่องย่อยของมุมตะแกรงตาข่าย [1, 2, 3]



รูปที่ 2.16 จุดที่เกิดแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด
สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} \tag{2.43}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่ายสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด

สามารถคำนวณจากสมการ

$$K_m = \frac{1}{2\pi}\left[\ln\left[\frac{D^2}{16hd}+\frac{(D+2h)^2}{8dD}-\frac{h}{8d}\right]+\frac{K_{ii}}{K_h}\ln\left[\frac{8}{\pi(2n-1)}\right]\right] \tag{2.44}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะการวางตะแกรงตาข่าย กรณีไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อ หรือตะแกรงตาข่ายมีแท่งดินเชื่อมต่ออยู่จำนวนน้อยแต่ไม่เชื่อมต่อบริเวณมุม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$K_{ii} = \frac{1}{2n^{(2/n)}} \tag{2.45}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะการวางตะแกรงตาข่าย กรณีตะแกรงตาข่ายมีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$K_{ii} = 1 \tag{2.46}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของความลึกของการฝังตัวนำของตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$K_h = \sqrt{1+\frac{h}{h_o}} \tag{2.47}$$

สำหรับแฟคเตอร์รูปทรงของตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$n = n_a n_b n_c n_d \tag{2.48}$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P} \tag{2.49}$$

$$n_b = \left(\frac{L_P}{4\sqrt{A}}\right)^{(1/2)} \tag{2.50}$$

$$n_c = \left[\frac{L_x L_y}{A}\right]^{0.7A/(L_x L_y)} \tag{2.51}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\left(L_x^2 + L_y^2\right)^{1/2}} \tag{2.52}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผลรูปทรงของตะแกรงตาข่าย สามารถคำนวณจากสมการ

$$K_i = 0.644 + (0.148n) \tag{2.53}$$

สำหรับค่าความยาวทั้งหมดของตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่าย สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด กรณีไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อ หรือตะแกรงตาข่ายมีแท่งดินเชื่อมต่ออยู่จำนวนน้อยแต่ไม่เชื่อมต่อบริเวณมุม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_M = L_C \tag{2.54}$$

สำหรับค่าความยาวทั้งหมดของตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่าย และของแท่งดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด กรณีกรณีตะแกรงตาข่ายมีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22\left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}\right)\right]L_R \tag{2.55}$$

เมื่อ

A = พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย (Area of substation) หน่วย ตารางเมตร

A_o = พื้นที่อ้างอิง (Grid reference depth area) มีค่าเท่ากับ 1 ตารางเมตร

d = เส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Diameter of grid conductor) หน่วย เมตร

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่าย
(Spacing between parallel conductor) หน่วย เมตร

D_m = ระยะห่างสูงสุดระหว่าง 2 จุด ของตะแกรงตาข่าย
(Max. distance between any two points on the grid) หน่วย เมตร

E_m = แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Mesh voltage) หน่วย โวลต์

h = ความลึกของการฝังตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Depth of ground grid) หน่วย เมตร

h_o = ความลึกอ้างอิง (Grid reference depth) มีค่าเท่ากับ 1 เมตร

I_G = กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หน่วย แอมแปร์

K_h = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของความลึกของการฝังตัวนำของตะแกรงตาข่าย
(Corrective weighting factor)

K_i = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะรูปทรงของตะแกรงตาข่าย
(Correct factor for grid geometry)

K_{ii} = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะการวางตะแกรงตาข่าย
(Corrective weighting factor)

K_m = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย
สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Spacing factor for mesh voltage)

L_C = ความยาวทั้งหมดของตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor length) หน่วย เมตร

L_M = ความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายและความยาวทั้งหมดของแท่งดิน
สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Effective length for mesh voltage) หน่วย เมตร

L_P = ความยาวเส้นรอบวงของตะแกรงตาข่าย (The peripheral length of grid) หน่วย เมตร

L_r = ความยาวของแท่งดิน (Length of rod) หน่วย เมตร

L_R = ความยาวทั้งหมดของแท่งดิน (Total length of rod) หน่วย เมตร

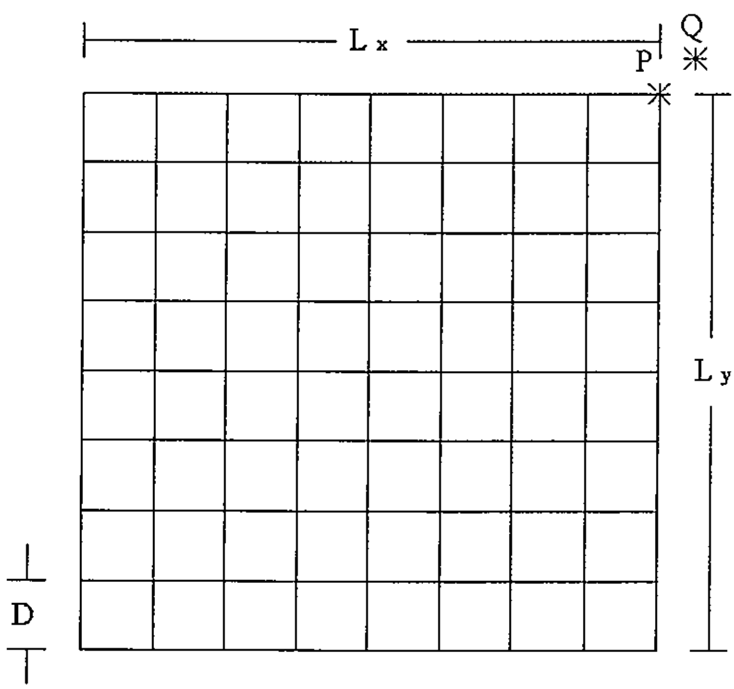
L_x = ความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายตามแนวแกน x
(Max. length of grid in x direction) หน่วย เมตร

L_y = ความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายตามแนวแกน y
(Max. length of grid in y direction) หน่วย เมตร

n = แฟคเตอร์เนื่องจากผลของรูปทรงของตะแกรงตาข่ายซึ่งมีองค์ประกอบของ
แฟคเตอร์ n_a, n_b, n_c, n_d (Geometric factor)

2.2.14 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step voltage, E_S)

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย การประเมินความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยการเปรียบเทียบ ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดกับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ หากค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบมีความปลอดภัย จึงไปสู่การออกแบบระบบต่อลงดินในลำดับต่อไป แต่หากค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ แสดงว่าระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ออกแบบไม่มีความปลอดภัยต้องพิจารณาปรับปรุงการออกแบบ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดเกิดที่บริเวณระหว่างจุด P และจุด Q โดยที่มีระยะห่างระหว่างสองจุด 1 เมตร [1, 2, 3]



รูปที่ 2.17 บริเวณที่เกิดแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด
สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S} \tag{2.56}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่ายสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

สามารถคำนวณจากสมการ

$$K_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{\left(1-0.5^{n-1}\right)}{D}\right] \tag{2.57}$$

สำหรับค่าความยาวทั้งหมดของตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่าย สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด กรณีไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อ หรือตะแกรงตาข่ายมีแท่งดินเชื่อมต่ออยู่จำนวนน้อยแต่ไม่เชื่อมต่อบริเวณมุม

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_S = \left(0.75L_C\right) \tag{2.58}$$

สำหรับค่าความยาวทั้งหมดของตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่าย และของแท่งดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด กรณีตะแกรงตาข่ายมีแท่งดินเชื่อมต่อที่บริเวณเส้นรอบวง หรือบริเวณมุม หรือบริเวณเส้นรอบวงและตลอดพื้นที่ตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$L_S = \left(0.75L_C\right) + \left(0.85L_R\right) \tag{2.59}$$

เมื่อ

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำที่วางขนานกันของตะแกรงตาข่าย (Spacing between parallel conductors) หน่วย เมตร

E_s = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step voltage) หน่วย โวลต์

h = ความลึกของการฝังตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Depth of ground grid) หน่วย เมตร

I_G = กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หน่วย แอมแปร์

K_i = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะรูปทรงของตะแกรงตาข่าย (Correct factor for grid geometry)

K_s = ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Spacing factor for step voltage)

L_C = ความยาวทั้งหมดของตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Total length of Conductor) หน่วย เมตร

L_R = ความยาวทั้งหมดของแท่งดิน (Total length of rod) หน่วย เมตร

L_S = ความยาวตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายและความยาวทั้งหมดของแท่งดิน สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Effective length for step voltage) หน่วย เมตร

n = แฟคเตอร์เนื่องจากผลของรูปทรงของตะแกรงตาข่ายซึ่งมีองค์ประกอบของแฟคเตอร์ n_a, n_b, n_c, n_d (Geometric factor)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

2.2.15 การประเมินความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดิน (Safety check)

การประเมินความปลอดภัย เป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย การประเมินความปลอดภัยมีอยู่ 3 ประการดังนี้ [1, 2, 3]

การประเมินความปลอดภัยระหว่าง Grid potential rise กับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

สามารถคำนวณจากสมการ

$$GPR < E_{touch} \tag{2.60}$$

การประเมินความปลอดภัยระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด กับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_m < E_{touch} \tag{2.61}$$

การประเมินความปลอดภัยระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด กับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้

สามารถคำนวณจากสมการ

$$E_s < E_{step} \tag{2.62}$$

เมื่อ

GPR = แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Grid potential rise) หน่วย โวลต์

E_m = แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Mesh voltage) หน่วย โวลต์

E_s = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step voltage) หน่วย โวลต์

E_{step} = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Tolerable step voltage criteria) หน่วย โวลต์

E_{touch} = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีสามารถทนได้ (Tolerable touch voltage criteria) หน่วย โวลต์

2.2.16 การลดจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor reduce)

สำหรับจำนวนตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอ [4, 5, 6]

สามารถคำนวณจากสมการ

$$n_{xy} = n_x + n_y \tag{2.63}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์ β

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\beta = -92.6e^{-0.07n_{xy}} + 66.337 \tag{2.64}$$

สำหรับค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์ α กรณี $8 \le n_{xy} \le 20$

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\alpha = 121.2e^{(-0.4n_{xy})} + 1.4864 \tag{2.65}$$

หรือค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์ α กรณี $20 < n_{xy} \le 30$

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\alpha = 121.2e^{(-0.4n_{xy})} + 1.2664 \tag{2.66}$$

หรือค่าตัวคูณสัมประสิทธิ์ α กรณี $n_{xy} > 30$

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\alpha = 121.2e^{(-0.4n_{xy})} + 1.1400 \tag{2.67}$$

สำหรับเปอร์เซ็นการประหยัดวัสดุของตะแกรงตาข่าย

สามารถคำนวณจากสมการ

$$\lambda = \frac{\alpha \dfrac{\beta}{100}}{1+\left(\alpha \dfrac{\beta}{100}\right)} 100\% \tag{2.68}$$

สำหรับจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอตามแนวแกน x

สามารถคำนวณจากสมการ

$$n_x^{'} = n_x(1-\lambda) \tag{2.69}$$

หรือตามแนวแกน y

$$n_y^{'} = n_y(1-\lambda) \tag{2.70}$$

เมื่อ

n_x = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอ ตามแนวแกน x (Number of ground conductor for equally spaced grid x direction)

$n_x^{'}$ = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ตามแนวแกน x (Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction)

n_y = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอ ตามแนวแกน y (Number of ground conductor for equally spaced grid y direction)

$n_y^{'}$ = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ตามแนวแกน y (Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction)

n_{xy} = จำนวนตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอ (Total number of the ground conductor for equally spaced grid)

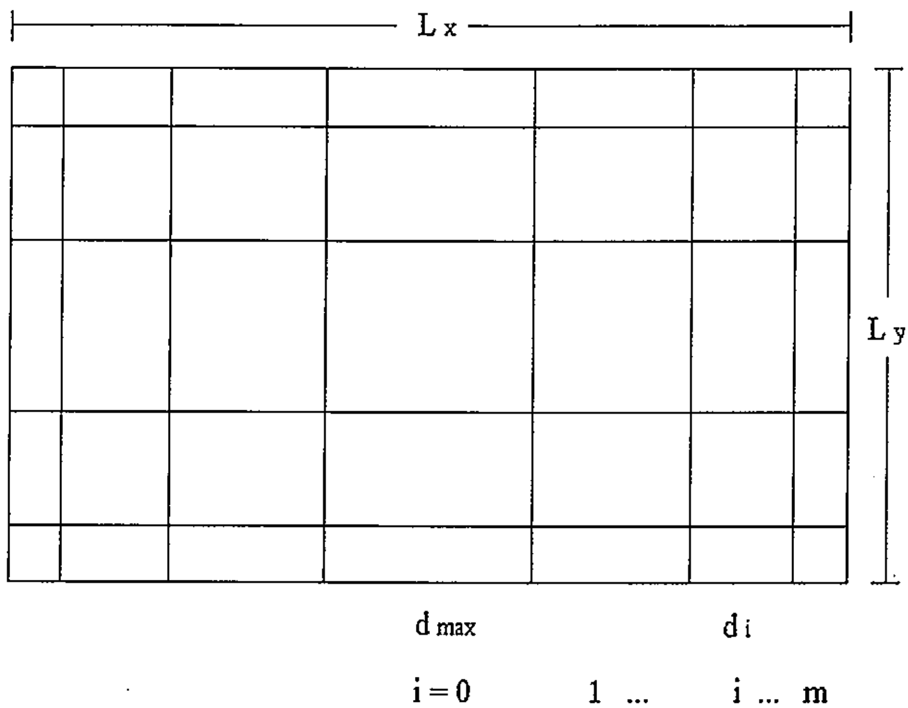
λ = เปอร์เซ็นการประหยัดวัสดุของตะแกรงตาข่าย (Percentage of the save material)

α = ตัวคูณสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

β = ตัวคูณสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

2.2.17 การจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor span)

ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุดของตะแกรงตาข่าย (Central conductor span, d_{max}) ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละด้านหากเป็นจำนวนคู่ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุดของตะแกรงตาข่ายมีเพียงค่าเดียว แต่เมื่อจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละด้านเป็นจำนวนคี่ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุดของตะแกรงตาข่ายมีจำนวนคู่ โดยมีระยะห่างระหว่างตัวนำที่เท่ากัน [7, 8, 9]



รูปที่ 2.18 ลักษณะการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย

สำหรับกรณีจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคู่ ตามแนวแกน x

สามารถคำนวณจากสมการ

$$d_{max} = \frac{L_x(1-C)}{1+C-\left(2C^{\left(\frac{n_y'}{2}\right)+1}\right)} \tag{2.71}$$

หรือตามแนวแกน y

สามารถคำนวณจากสมการ

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{1+C-\left(2C^{\left(\frac{n_x'}{2}\right)+1}\right)} \tag{2.72}$$

สำหรับกรณีจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคี่ ตามแนวแกน x

สามารถคำนวณจากสมการ

$$d_{\max} = \frac{L_x(1-C)}{2\left(1-C^{\frac{(n_y'-1)}{2}}\right)} \tag{2.73}$$

หรือตามแนวแกน y

สามารถคำนวณจากสมการ

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{2\left(1-C^{\frac{(n_x'-1)}{2}}\right)} \tag{2.74}$$

สำหรับระยะห่างระหว่างตัวนำของช่องย่อยลำดับที่ i (Conductor span, d_i)

สามารถคำนวณจากสมการ

$$d_i = d_{\max} C^i \tag{2.75}$$

สำหรับจำนวนช่องย่อยของตะแกรงตาข่าย $i = 0 \xrightarrow{to} m$

กรณีจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคู่ ตามแนวแกน x

สามารถคำนวณจากสมการ

$$m = \frac{n_y^{'}}{2} - 1 \tag{2.76}$$

หรือตามแนวแกน y

สามารถคำนวณจากสมการ

$$m = \frac{n_x^{'}}{2} - 1 \tag{2.77}$$

กรณีจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอเป็นจำนวนคี่ ตามแนวแกน x

สามารถคำนวณจากสมการ

$$m = \frac{\left(n_y^{'} - 1\right)}{2} - 1 \tag{2.78}$$

หรือตามแนวแกน y

สามารถคำนวณจากสมการ

$$m = \frac{\left(n_x^{'} - 1\right)}{2} - 1 \tag{2.79}$$

สำหรับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม (Conductor compression ratio, C) ขึ้นอยู่กับความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายในแต่ละด้าน หากความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายทั้ง 2 ด้าน มีค่าเท่ากันอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสมมีเพียงค่าเดียว แต่เมื่อความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายทั้ง 2 ด้าน นั้นมีค่าไม่เท่ากันอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสมมีจำนวนคู่ โดยมีค่าที่ต่างกันในแต่ละด้าน ทั้งนี้กรณี $C=1$ เมื่อตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอตามแนวแกน x และ ตามแนวแกนy

สามารถคำนวณจากสมการ

$$C = a_0 + a_1 e^{0.0001h} + a_2 e^{bh} \tag{2.80}$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ b ตามแนวแกน x
สามารถคำนวณจากสมการ

$$b = -0.3503 - 9.6311e^{-0.0366L_x} \tag{2.81}$$

หรือตามแนวแกน y
สามารถคำนวณจากสมการ

$$b = -0.3503 - 9.6311e^{-0.0366L_y} \tag{2.82}$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2
สามารถคำนวณจากสมการ

$$a_0 = a_{01} + a_{02}k + a_{03}k^2 \tag{2.83}$$

$$a_1 = a_{11} + a_{12}k + a_{13}k^2 \tag{2.84}$$

$$a_2 = a_{21} + a_{22}k \tag{2.85}$$

สำหรับค่าแฟคเตอร์การสะท้อน
สามารถคำนวณจากสมการ

$$k = \frac{(\rho - \rho_s)}{(\rho + \rho_s)} \tag{2.86}$$

สำหรับสัมประสิทธิ์ a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21} และ a_{22} อยู่ในความสัมพันธ์ของความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายในแต่ละด้าน ดูค่าอ้างอิงได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}

สัมประสิทธิ์	$L_{x,y} \leq 100$	$100 < L_{x,y} \leq 175$	$175 < L_{x,y} \leq 250$	$L_{x,y} > 250$
a_{01}	0.44	0.38	-0.51	0.32
a_{02}	-77.43	-50.65	33.18	-15.44
a_{03}	15.63	13.88	18.49	13.42
a_{11}	0.033	0.19	1.15	0.38
a_{12}	76.9	50.21	32.82	15.16
a_{13}	-15.56	-13.83	-18.44	-13.38
a_{21}	-0.067	-0.037	-0.029	-0.022
a_{22}	0.50	0.41	0.34	0.26

เมื่อ

a_0, a_1, a_2 = ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณหาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม

$a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}$ = ค่าสัมประสิทธิ์อยู่ในความสัมพันธ์ของความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายในแต่ละด้าน

b = ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณหาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม

C = อัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม (Conductor compression ratio)

d_i = ระยะห่างระหว่างตัวนำของช่องย่อยลำดับที่ i (Conductor span) หน่วย เมตร

d_{max} = ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุด (Central conductor span) หน่วย เมตร

h = ความลึกของการฝังตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Depth of ground grid) หน่วย เมตร

i = ลำดับของช่องย่อยของตะแกรงตาข่าย

k = แฟคเตอร์การสะท้อน (Reflection factor)

L_x = ความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายตามแนวแกน x (Max.length of grid in x direction) หน่วย เมตร

L_y = ความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่ายตามแนวแกน y (Max.length of grid in y direction) หน่วย เมตร

m = จำนวนช่องย่อยของตะแกรงตาข่าย

ρ = ความต้านทานจำเพาะของระบบดิน (Soil resistivity) หน่วย โอห์ม - เมตร

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่โรยบนระบบดิน

(Washed granite resistivity) หน่วย โอห์ม - เมตร

n_x' = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ตามแนวแกน x (Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction)

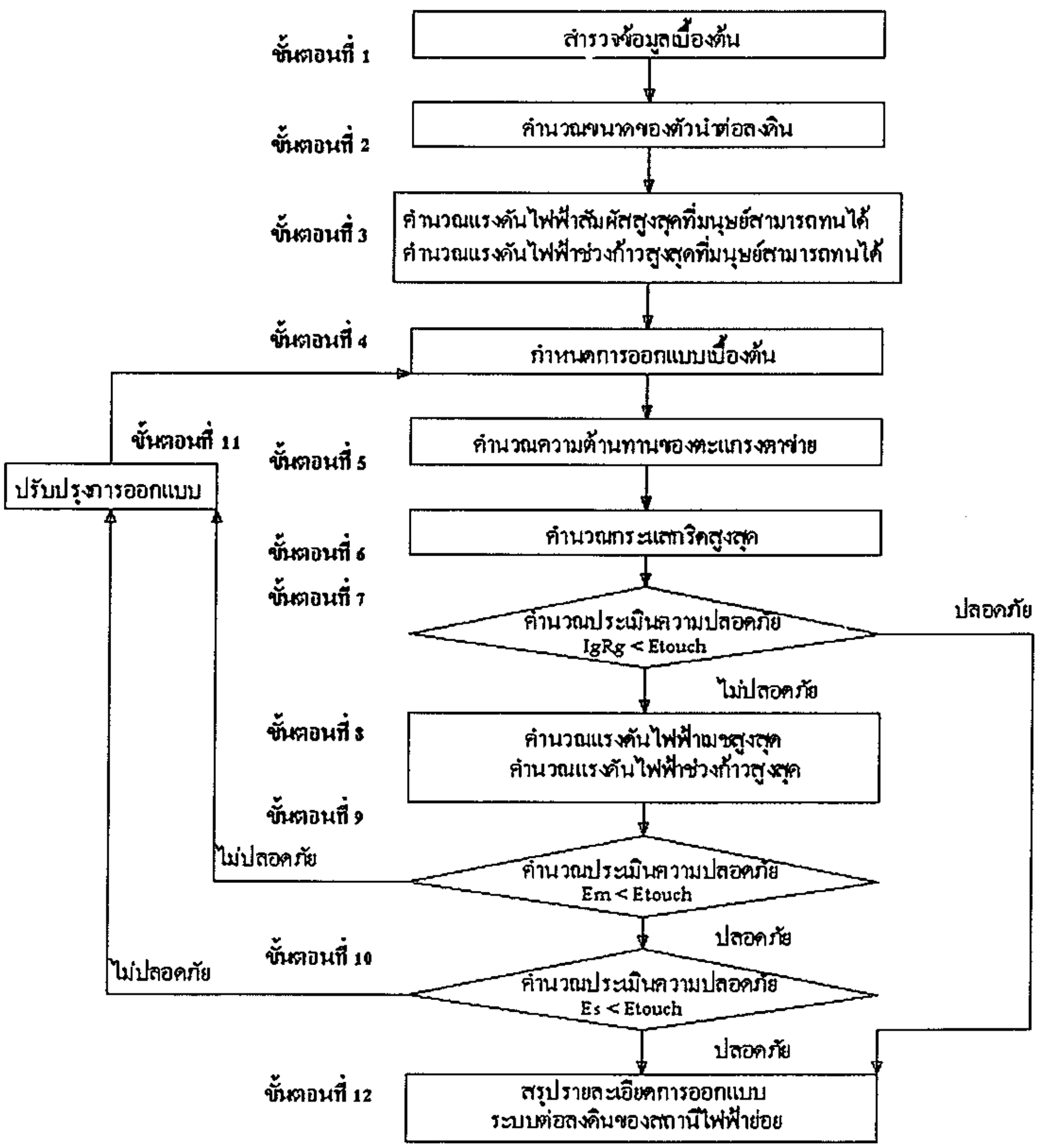
n_y' = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ตามแนวแกน y (Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction)

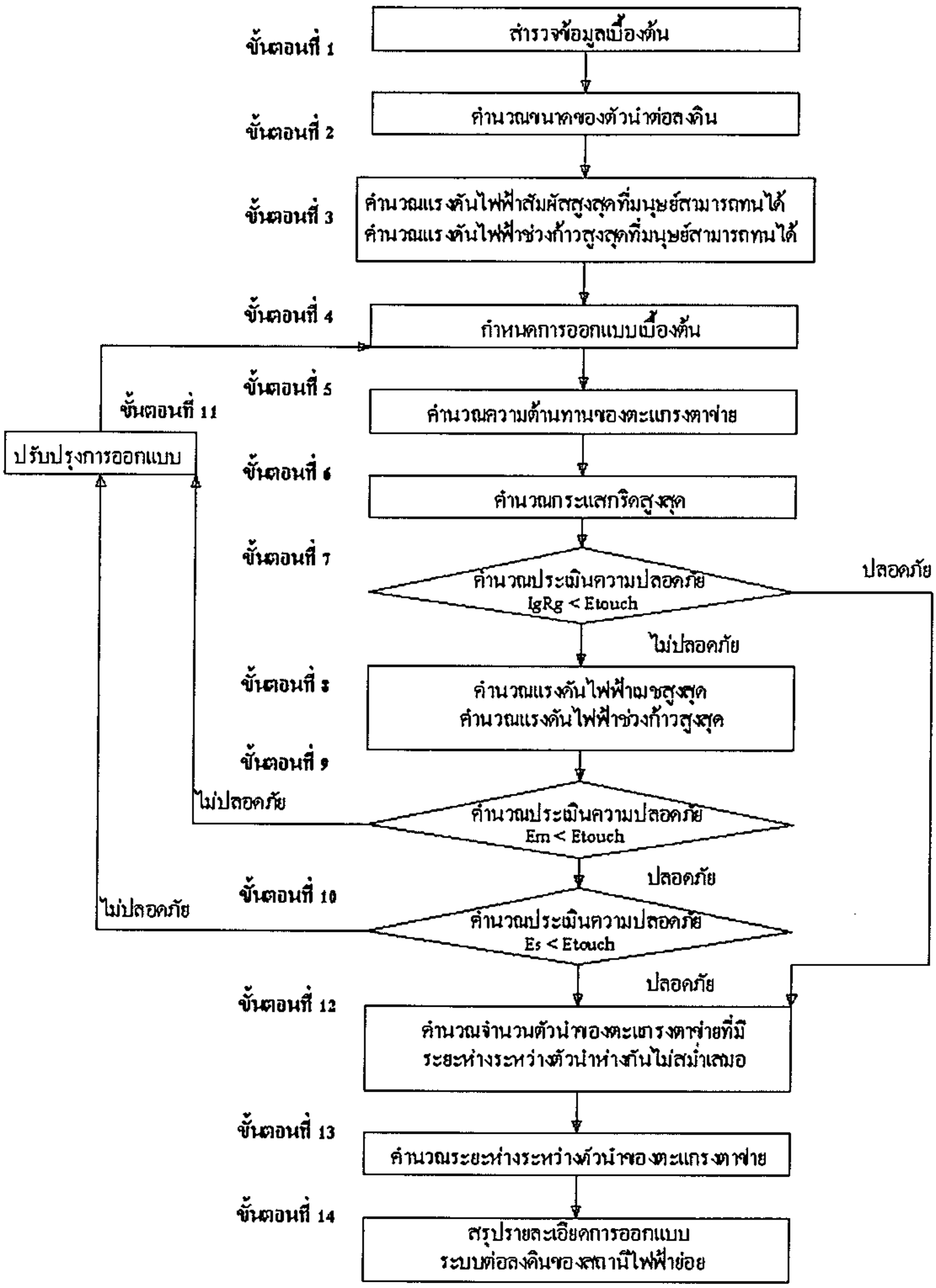
บทที่ 3
ขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

3.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอประกอบด้วย 14 ขั้นตอนดังต่อไปนี้



(a) กรณีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ



(b) กรณีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบกระบวนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

3.1.1 ขั้นตอนที่ 1

สำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย และค่าความต้านทานจำเพาะของระบบดิน

3.1.2 ขั้นตอนที่ 2

คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน (Conductor size) จากสมการ (2.1)

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o - T_a}\right)}} \tag{3.1}$$

เมื่อ

A_{mm^2} = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor cross section area) หน่วย ตารางเมตร

3.1.3 ขั้นตอนที่ 3

คำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch and Step) จากสมการ (2.23), (2.29)

$$E_{touch50} = (R_B + 1.5C_s\rho_s)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{3.2}$$

$$E_{step50} = (R_B + 6C_s\rho_s)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right) \tag{3.3}$$

เมื่อ

$E_{touch50}$ = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable touch voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

E_{step50} = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable step voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

3.1.4 ขั้นตอนที่ 4

กำหนดการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายในแต่ละด้าน จำนวนแท่งดินและความลึกของตะแกรงตาข่าย

3.1.5 ขั้นตอนที่ 5

คำนวณความต้านทานของตะแกรงตาข่าย (Grid resistance) จากสมการ (2.33)

$$R_g = \rho\left(\frac{1}{L_T}+\frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1+\frac{1}{h\sqrt{20/A}}\right)\right) \tag{3.4}$$

เมื่อ

R_g = ความต้านทานของตะแกรงตาข่าย (Grid resistance) หน่วย โอห์ม

3.1.6 ขั้นตอนที่ 6

คำนวณกระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) จากสมการ (2.40)

$$I_G = D_f I_g 1000 \tag{3.5}$$

เมื่อ

I_G = กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หน่วย แอมแปร์

3.1.7 ขั้นตอนที่ 7

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check grid potential rise) จากสมการ (2.60) สำหรับกรณีมีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่12 หรือกรณีไม่มีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 8

$$GPR < E_{touch50} \tag{3.6}$$

เมื่อ

GPR = แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (Grid potential rise) หน่วย โวลต์

$E_{touch50}$ = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable touch voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

3.1.8 ขั้นตอนที่ 8

คำนวณแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Mesh and step) จากสมการ (2.43), (2.56)

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} \tag{3.7}$$

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S} \tag{3.8}$$

เมื่อ

E_m = แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Mesh voltage) หน่วย โวลต์

E_s = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step voltage) หน่วย โวลต์

3.1.9 ขั้นตอนที่ 9

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check mesh voltage) จากสมการ (2.61) สำหรับกรณีมีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่10 หรือกรณีไม่มีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 11

$$E_m < E_{touch50} \tag{3.9}$$

เมื่อ

E_m = แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Mesh voltage) หน่วย โวลต์

$E_{touch50}$ = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable touch voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

3.1.10 ขั้นตอนที่ 10

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check step voltage) จากสมการ (2.62) สำหรับกรณีมีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่12 หรือกรณีไม่มีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 11

$$E_s < E_{step50} \tag{3.10}$$

เมื่อ

E_s = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step voltage) หน่วย โวลต์

E_{step50} = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ (Tolerable step voltage for 50 kg) หน่วย โวลต์

3.1.11 ขั้นตอนที่ 11

ปรับปรุงการออกแบบ (Modify design) เมื่อระบบต่อลงดินไม่มีความปลอดภัยโดยเปลี่ยนแปลงการออกแบบเบื้องต้น (Initial design) ที่ได้กำหนดในขั้นตอนที่ 4

3.1.12 ขั้นตอนที่ 12

คำนวณจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Unequally conductor) จากสมการ (2.69), (2.70)

$$n_x^{'} = n_x(1-\lambda) \tag{3.11}$$

$$n_y^{'} = n_y(1-\lambda) \tag{3.12}$$

เมื่อ

$n_x^{'}$ = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ตามแนวแกน x (Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction)

$n_y^{'}$ = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ ตามแนวแกน y (Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction)

3.1.13 ขั้นตอนที่ 13

คำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor span) จากสมการ (2.71), (2.72), (2.73), (2.74), (2.75)

$$d_{\max} = \frac{L_x(1-C)}{1+C-2C^{(n_y^{'}/2+1)}} \tag{3.13}$$

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{1+C-2C^{(n_x^{'}/2+1)}} \tag{3.14}$$

$$d_{\max} = \frac{L_x(1-C)}{2(1-C^{(n_y^{'}-1)/2})} \tag{3.15}$$

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{2(1-C^{(n_x'-1)/2})} \tag{3.16}$$

$$d_i = d_{\max} C^i \tag{3.17}$$

เมื่อ

d_i = ระยะห่างระหว่างตัวนำของช่องย่อยลำดับที่ i (Conductor span) หน่วย เมตร

$d_{\max}$ = ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุด (Central conductor span) หน่วย เมตร

3.1.14 ขั้นตอนที่ 14

สรุปรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

3.2 ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ข้อมูลสำหรับการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A

Area of substation, A = 7704 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.6

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, $\rho = 500\ \Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 5.28 kA(rms.)

Washed granite resistivity, $\rho s = 3000\ \Omega - m$

ขั้นตอนที่ 1

สำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 7704 m^2

Soil resistivity, ρ = 500 ohm-m

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน (Conductor size)

เลือกตัวนำต่อลงดินชนิด Copper clad steel wire มีค่าคงตัววัสดุดังนี้

Ambient temperature, $T_a = 40\ ^o c$

$K_0 = 245\ ^o c$

Max.allowable temperature, $T_m = 700\ ^o c$

Resistivity of ground conductor at reference temperature, $\rho_r = 5.86\ \mu\Omega - cm$

Thermal capacity per unit volume, $TACP = 3.85\ J/\left(cm^3 \times {}^o c\right)$

Thermal coefficient of resistivity at reference temperature, $\alpha_r = 0.00378\ 1/^o c$

Time duration of current flow, T_c = 0.6 sec

<u>Formula</u> (2.1)

Conductor cross section area, A_{mm^2}

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o - T_a}\right)}}$$

Calculation

$A_{mm^2} = 5.28 / \sqrt{\left(\left(0.000385\right)/\left(0.6\times 0.00378\times 5.86\right)\right)\ln\left(\left(245+700\right)/\left(245+40\right)\right)}$

$A_{mm^2} = 28.3347 \ \ mm^2$

ดังนั้นเลือกใช้ขนาดของตัวนำ

Conductor cross section area, A_{mm^2} =35 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.00756 m

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch and Step)

Equivalent radius of a foot, a = 0.09 m

Formula

The reflection factor, k

$$k = \frac{\left(\rho - \rho_s\right)}{\left(\rho + \rho_s\right)}$$

Calculation (2.89)

$k = \left(500 - 3000\right)/\left(500+3000\right)$

$k = -0.7142857$

Formula (2.13)

Reduction factor, C_s

$$C_s = 1 - \frac{a\left(1-\dfrac{\rho}{\rho_s}\right)}{\left(2h_s\right)+a}$$

Calculation

$C_s = 1-((0.09\times(1-(500/3000)))/((2\times 0.1)+0.09))$

$C_s = 0.741379$

Formula (2.23)

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50}$

$$E_{touch50} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$E_{touch50} = \left(1000+\left(1.5\times 0.741379\times 3000\right)\right)\times\left(0.116/\sqrt{0.6}\right)$

$E_{touch50} = 649.369$ v

Formula (2.29)

Tolerable step voltage for 50 kg, E_{step50}

$$E_{step50} = \left(R_B + 6C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$$E_{step50} = \left(1000 + \left(6\times 0.74137\times 3000\right)\right)\times\left(0.116/\sqrt{0.6}\right)$$

$$E_{step50} = 2148.21 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 4

กำหนดการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Length of ground rod, L_r = 6 m

Max.length of grid in x direction, L_x = 107 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 72 m

Number of ground conductor x direction, n_x = 27

Number of ground conductor y direction, n_y = 38

Number of ground rod, n_r = 4

Spacing between parallel conductor, D = 2.89 m

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grid resistance)

Formula (2.37)

Total length of conductor, L_c

$$L_c = (n_x L_x) + (n_y L_y)$$

Calculation

$$L_c = (27\times 107) + (38\times 72)$$

$$L_c = 5625 \text{ m}$$

Formula (2.39)

Total length of ground conductor, L_T

$$L_T = L_c + (N_r L_r)$$

Calculation

$L_T = 5625 + (4 \times 6)$

$L_T = 5649 \text{ m}$

Formula (2.33)

Grid resistance, R_g

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

Calculation

$R_g = 500 \times ((1/5649) + (1/\sqrt{(20 \times 7704)}) \times (1 + (1/(1 + 0.5\sqrt{(20/7704)}))$

$R_g = 2.60444 \ \Omega$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณกระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current)

Formula (2.41)

Symmetrical grid current, I_g

$I_g = S_f I_f$

Calculation

$I_g = 0.6 \times 5.28$

$I_g = 3.168 \text{ kA(rms.)}$

Formula (2.40)

Maximum grid current, I_G

$I_G = D_f I_g 1000$

Calculation

$I_G = 1 \times 3.168 \times 1000$

$I_G = 3168 \text{ A}$

ขั้นตอนที่ 7

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check grid potential rise)

Formula (2.42)

Grid potential rise, GPR

$GPR = I_G R_g$

Calculation

$GPR = 3168 \times 2.60444$

$GPR = 8250.8659$ v

Check

$GPR < E_{touch50}$

8250.8659 > 649.369 not pass

ขั้นตอนที่ 8

คำนวณแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Mesh and step)

Corrective weighting factor, $K_{ii} = 1$

Grid reference depth, $h_o = 1$ m

Max. Distance between any two points on the grid, $D_m = 128.9689$ m

The peripheral length of grid, $L_p = 358$ m

Formula (2.49)

Geometric factor composed, n_a

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

Calculation

$$n_a = (2 \times 5625)/358$$

$$n_a = 31.4245$$

Formula (2.50)

Geometric factor composed, n_b

$$n_b = \left(\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}\right)^{(1/2)}$$

Calculation

$$n_b = \left(358/\left(4 \times \sqrt{7704}\right)\right) \wedge (1/2)$$

$$n_b = 1.00979$$

Formula (2.51)

Geometric factor composed, n_c

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

Calculation

$$n_c = ((107 \times 72)/7704) \wedge ((0.7 \times 7704)/(107 \times 72))$$

$$n_c = 1$$

Formula (2.52)

Geometric factor composed, n_d

$$n_d = \frac{D_m}{\left(L_x^{\ 2} + L_y^{\ 2}\right)^{1/2}}$$

Calculation

$$n_d = 128.9689/\left(\left(107 \wedge 2\right) + \left(72 \wedge 2\right)\right) \wedge \left(1/2\right)$$

$$n_d = 1$$

Formula (2.48)

Geometric factor, n

$$n = n_a n_b n_c n_d$$

Calculation

$$n = 31.4245 \times 1.00979 \times 1 \times 1$$

$$n = 31.7321$$

Formula (2.47)

Corrective weighting factor, K_h

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

Calculation

$$K_h = \sqrt{\left(1 + \left(0.5/1\right)\right)}$$

$$K_h = 1.225$$

Formula (2.44)

Spacing factor for mesh voltage, K_m

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

Calculation

$$remark = ((2.89 \times 2.89)/(16 \times 0.5 \times 0.00756)) + ((2.89 + 2 \times 0.5) \wedge 2/(8 \times 2.89 \times 0.00756)) - ((0.5/(4 \times 0.00756)))$$

$$remark = 208.136917349$$

$$K_m = (1/2\pi) \times ((\ln(208.1369)) + ((1/1.225) \times \ln(8/(\pi \times (2 \times 31.7321 - 1))))$$

$$K_m = 0.4338395$$

Formula (2.53)

Correct factor for grid geometry, K_i

$$K_i = 0.644 + \left(0.148n\right)$$

Calculation

$$K_i = 0.644 + (0.148 \times 31.7321)$$

$$K_i = 5.3403$$

Formula (2.55)

Effective length for mesh voltage, L_M

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

Calculation

$$L_M = 5625 + (1.55 + (1.22 \times (6/((107 \wedge 2 + 72 \wedge 2) \wedge 0.5)))) \times 24$$

$$L_M = 5663.5621$$

Formula (2.59)

Effective length for step voltage, L_S

$$L_S = (0.75 L_C) + (0.85 L_R)$$

Calculation

$$L_S = (0.75 \times 5625) + (0.85 \times 24)$$

$$L_S = 4239.15$$

Formula (2.57)

Spacing factor for step voltage, K_S

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

Calculation

$$K_s = (1/\pi) \times \left((1/(2 \times 0.5)) + (1/(2.89 + 0.5)) + ((1 - 0.5 \wedge (12.516 - 2))/2.89)\right)$$

$$K_s = 0.5223$$

Formula (2.43)

Mesh voltage, E_m

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

Calculation

$$E_m = (500 \times 3168 \times 0.43386395 \times 5.3403)/5663.5612$$

$$E_m = 648.01461 \text{ v}$$

Formula

Step voltage, E_S

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S}$$

Calculation

$E_s = (500 \times 3168 \times 0.5223 \times 5.3403)/4239.15$

$E_s = 1042.226$ v

ขั้นตอนที่ 9

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check mesh voltage)

Check (2.61)

$E_m < E_{touch50}$

648.01461 < 649.369 pass

ขั้นตอนที่ 10

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check step voltage)

Check (2.62)

$E_s < E_{step50}$

1042.226 < 2148.21 pass

ขั้นตอนที่ 11

ปรับปรุงการออกแบบ (Modify design) เมื่อระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

ขั้นตอนที่ 12

สรุปรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 7704 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.6

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, ρ = 500 $\Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 5.28 kA(rms.)

Washed granite resistivity, ρs = 3000 $\Omega - m$

Conductor cross section area, A_{mm^2} =35 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.00756 m

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50}$ = 649.369 v

Tolerable step voltage for 50 kg, E_{step50} = 2148.21 v

Max.length of grid in x direction, L_x = 107 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 72 m

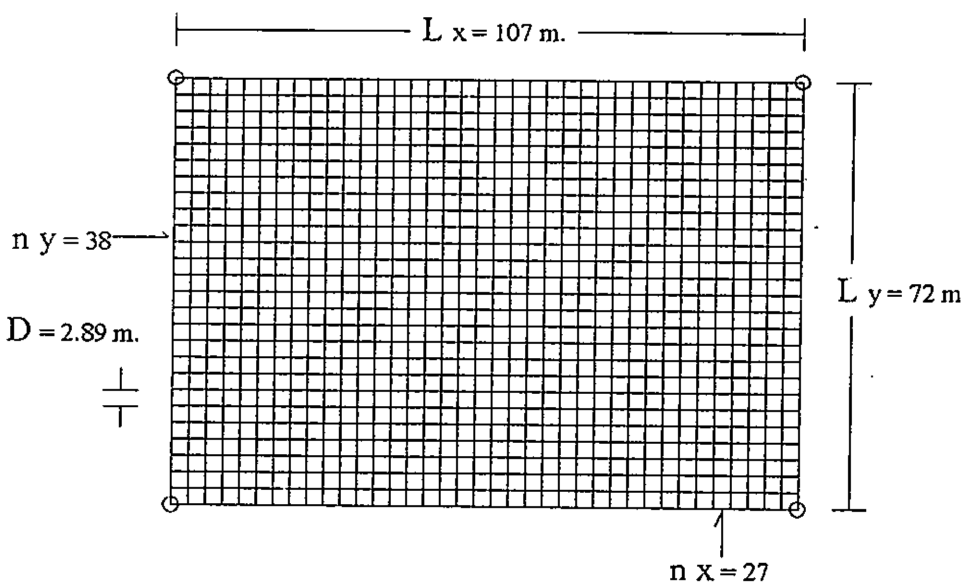
Grid resistance, R_g = 2.60444 Ω

Maximum grid current, I_G = 3168 A

Grid potential rise, GPR = 8250.8659 v

Mesh voltage, E_m = 648.0146 v

Step voltage, E_s = 1042.226 v



รูปที่ 3.2 ตะแกรงตาข่ายสถานีไฟฟ้าย่อย A กรณีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

3.3 ตัวอย่างขั้นตอนการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ข้อมูลสำหรับการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A

Area of substation, A = 7704 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.6

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, $\rho = 500\ \Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 5.28 kA(rms.)

Washed granite resistivity, $\rho s = 3000\ \Omega - m$

ขั้นตอนที่ 1

สำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 7704 m^2

Soil resistivity, ρ = 500 ohm-m

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน (Conductor size)

เลือกตัวนำต่อลงดินชนิด Copper clad steel wire มีค่าคงตัววัสดุดังนี้

Ambient temperature, $T_a = 40\ ^oc$

$K_0 = 245\ ^oc$

Max.allowable temperature, $T_m = 700\ ^oc$

Resistivity of ground conductor at reference temperature, $\rho_r = 5.86\ \mu\Omega - cm$

Thermal capacity per unit volume, $TACP = 3.85\ J/\left(cm^3 \times {}^oc\right)$

Thermal coefficient of resistivity at reference temperature, $\alpha_r = 0.00378\ 1/{}^oc$

Time duration of current flow, T_c = 0.6 sec

<u>Formula</u> (2.1)

Conductor cross section area, A_{mm^2}

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o - T_a}\right)}}$$

Calculation

$A_{mm^2} = 5.28 / \sqrt{((0.000385)/(0.6\times 0.00378\times 5.86))\ln((245+700)/(245+40))}$

$A_{mm^2} = 28.3347\ \ mm^2$

ดังนั้นเลือกใช้ขนาดของตัวนำ

Conductor cross section area, A_{mm^2} =35 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.00756 m

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch and Step)

Equivalent radius of a foot, $a = 0.09$ m

Formula

The reflection factor, k

$$k = \frac{(\rho - \rho_s)}{(\rho + \rho_s)}$$

Calculation (2.89)

$k = (500-3000)/(500+3000)$

$k = -0.7142857$

Formula (2.13)

Reduction factor, C_s

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

Calculation

$C_s = 1-((0.09\times(1-(500/3000)))/((2\times 0.1)+0.09))$

$C_s = 0.741379$

Formula (2.23)

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50}$

$$E_{touch50} = (R_B + 1.5C_s\rho_s)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$E_{touch50} = (1000+(1.5\times 0.741379\times 3000))\times(0.116/\sqrt{0.6})$

$E_{touch50} = 649.369$ v

Formula (2.29)

Tolerable step voltage for 50 kg, E_{step50}

$$E_{step50} = \left(R_B + 6C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$$E_{step50} = \left(1000 + \left(6 \times 0.74137 \times 3000\right)\right) \times \left(0.116 / \sqrt{0.6}\right)$$

$$E_{step50} = 2148.21 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 4

กำหนดการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Length of ground rod, L_r = 6 m

Max.length of grid in x direction, L_x = 107 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 72 m

Number of ground conductor x direction, n_x = 27

Number of ground conductor y direction, n_y = 38

Number of ground rod, n_r = 4

Spacing between parallel conductor, D = 2.89 m

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grid resistance)

Formula (2.37)

Total length of conductor, L_c

$$L_c = (n_x L_x) + (n_y L_y)$$

Calculation

$$L_c = (27 \times 107) + (38 \times 72)$$

$$L_c = 5625 \text{ m}$$

Formula (2.39)

Total length of ground conductor, L_T

$$L_T = L_c + (N_r L_r)$$

Calculation

$L_T = 5625 + (4 \times 6)$

$L_T = 5649 \text{ m}$

Formula (2.33)

Grid resistance, R_g

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

Calculation

$R_g = 500 \times ((1/5649) + (1/\sqrt{(20 \times 7704)}) \times (1 + (1/(1 + 0.5\sqrt{(20/7704)}))$

$R_g = 2.60444 \;\; \Omega$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณกระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current)

Formula (2.41)

Symmetrical grid current, I_g

$I_g = S_f I_f$

Calculation

$I_g = 0.6 \times 5.28$

$I_g = 3.168 \text{ kA(rms.)}$

Formula (2.40)

Maximum grid current, I_G

$I_G = D_f I_g 1000$

Calculation

$I_G = 1 \times 3.168 \times 1000$

$I_G = 3168 \text{ A}$

ขั้นตอนที่ 7

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check grid potential rise)

Formula (2.42)

Grid potential rise, GPR

$GPR = I_G R_g$

Calculation

$GPR = 3168 \times 2.60444$

$GPR = 8250.8659$ v

Check

$GPR < E_{touch50}$

8250.8659 > 649.369 not pass

ขั้นตอนที่ 8

คำนวณแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Mesh and step)

Corrective weighting factor, $K_{ii} = 1$

Grid reference depth, $h_o = 1$ m

Max. Distance between any two points on the grid, $D_m = 128.9689$ m

The peripheral length of grid, $L_p = 358$ m

Formula (2.49)

Geometric factor composed, n_a

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

Calculation

$$n_a = (2 \times 5625)/358$$

$$n_a = 31.4245$$

Formula (2.50)

Geometric factor composed, n_b

$$n_b = \left(\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}\right)^{(1/2)}$$

Calculation

$$n_b = \left(358/\left(4 \times \sqrt{7704}\right)\right) \wedge (1/2)$$

$$n_b = 1.00979$$

Formula (2.51)

Geometric factor composed, n_c

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

Calculation

$$n_c = \left((107 \times 72)/7704\right) \wedge \left((0.7 \times 7704)/(107 \times 72)\right)$$

$$n_c = 1$$

Formula (2.52)

Geometric factor composed, n_d

$$n_d = \frac{D_m}{\left(L_x^{\,2} + L_y^{\,2}\right)^{1/2}}$$

Calculation

$$n_d = 128.9689/\left(\left(107 \wedge 2\right) + \left(72 \wedge 2\right)\right) \wedge \left(1/2\right)$$

$$n_d = 1$$

Formula (2.48)

Geometric factor, n

$$n = n_a n_b n_c n_d$$

Calculation

$$n = 31.4245 \times 1.00979 \times 1 \times 1$$

$$n = 31.7321$$

Formula (2.47)

Corrective weighting factor, K_h

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

Calculation

$$K_h = \sqrt{\left(1 + \left(0.5/1\right)\right)}$$

$$K_h = 1.225$$

Formula (2.44)

Spacing factor for mesh voltage, K_m

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

Calculation

$$remark = ((2.89 \times 2.89)/(16 \times 0.5 \times 0.00756)) + ((2.89 + 2 \times 0.5) \wedge 2/(8 \times 2.89 \times 0.00756)) - ((0.5/(4 \times 0.00756)))$$

$$remark = 208.136917349$$

$$K_m = (1/2\pi) \times ((\ln(208.1369)) + ((1/1.225) \times \ln(8/(\pi \times (2 \times 31.7321 - 1))))$$

$$K_m = 0.4338395$$

Formula (2.53)

Correct factor for grid geometry, K_i

$$K_i = 0.644 + \left(0.148n\right)$$

Calculation

$K_i = 0.644 + (0.148 \times 31.7321)$

$K_i = 5.3403$

Formula (2.55)

Effective length for mesh voltage, L_M

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

Calculation

$L_M = 5625 + (1.55 + (1.22 \times (6/((107 \wedge 2 + 72 \wedge 2) \wedge 0.5)))) \times 24$

$L_M = 5663.5621$

Formula (2.59)

Effective length for step voltage, L_S

$L_S = (0.75 L_C) + (0.85 L_R)$

Calculation

$L_S = (0.75 \times 5625) + (0.85 \times 24)$

$L_S = 4239.15$

Formula (2.57)

Spacing factor for step voltage, K_S

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

Calculation

$K_s = (1/\pi) \times ((1/(2 \times 0.5)) + (1/(2.89 + 0.5)) + ((1 - 0.5 \wedge (12.516 - 2))/2.89))$

$K_s = 0.5223$

Formula (2.43)

Mesh voltage, E_m

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

Calculation

$E_m = (500 \times 3168 \times 0.43386395 \times 5.3403)/5663.5612$

$E_m = 648.01461$ v

Formula

Step voltage, E_S

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S}$$

Calculation

$$E_s = (500 \times 3168 \times 0.5223 \times 5.3403) / 4239.15$$

$$E_s = 1042.226 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 9

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check mesh voltage)

Check (2.61)

$$E_m < E_{touch50}$$

648.01461 < 649.369 pass

ขั้นตอนที่ 10

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check step voltage)

Check (2.62)

$$E_s < E_{step50}$$

1042.226 < 2148.21 pass

ขั้นตอนที่ 11

ปรับปรุงการออกแบบ (Modify design) เมื่อระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

ขั้นตอนที่ 12

คำนวณจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Unequally conductor)

Formula (2.63)

Total number of the ground conductor for equally spaced grid, n_{xy}

$$n_{xy} = n_x + n_y$$

Calculation

$$n_{xy} = 27 + 38$$

$$n_{xy} = 65$$

Formula (2.67)

Coefficients, α

$$\alpha = 121.2e^{(-0.4n_{xy})} + 1.1400$$

Calculation

$$\alpha = 121.2e(-0.4 \times 65) + 1.1400$$

$$\alpha = 1.1400$$

Formula (2.64)

Coefficients, β

$$\beta = -92.6e^{-0.07n_{xy}} + 66.337$$

Calculation

$$\beta = (-92.6)e(-0.07 \times 65) + 66.337$$

$$\beta = 66.337$$

Formula (2.68)

Percentage of the save material, λ

$$\lambda = \frac{\alpha \dfrac{\beta}{100}}{1 + \left(\alpha \dfrac{\beta}{100}\right)} 100\%$$

Calculation

$$\lambda = ((1.1400 \times (66.337/100)/(1 + 1.1400 \times (66.337/100)))) \times 100$$

$$\lambda = 43.060$$

Formula (2.69)

Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction, $n_x^{'}$

$$n_x^{'} = n_x(1 - \lambda)$$

Calculation

$$n_x^{'} = 27 \times (1 - (43.060/100))$$

$$n_x^{'} = 15.3738$$

Select number of ground conductor for unequally spaced grid x direction

$n_x^{'} = 15$

Formula (2.70)

Number of ground conductor for unequally spaced grid y direction, $n_y^{'}$

$$n_y^{'} = n_y(1 - \lambda)$$

Calculation

$$n_y^{'} = 38 \times (1 - (43.060/100))$$

$n_y^{'} = 21.6372$

Select number of ground conductor for unequally spaced grid y direction

$n_y^{'} = 21$

ขั้นตอนที่ 13

คำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor span) ด้าน L_x จากตารางที่ 2.6 ค่า ส.ป.ส. สำหรับคำนวณหาค่า conductor compression ratio มีค่าดังต่อไปนี้

Coefficients, a_{01} = 0.38

Coefficients, a_{02} = - 50.65

Coefficients, a_{03} = 13.88

Coefficients, a_{11} = 0.19

Coefficients, a_{12} = 50.21

Coefficients, a_{13} = - 13.83

Coefficients, a_{21} = - 0.037

Coefficients, a_{22} = 0.41

Formula (2.83)

Coefficients, a_0

$a_0 = a_{01} + a_{02}k + a_{03}k^2$

Calculation

$a_0 = 0.38 + ((-50.65) \times (-0.7142)) + ((13.88 \times (-0.7142) \wedge 2)$

$a_0 = 43.6341$

Formula (2.84)

Coefficients, a_1

$a_1 = a_{11} + a_{12}k + a_{13}k^2$

Calculation

$a_1 = 0.19 + (50.21 \times (-0.7142)) + ((-13.83) \times (-0.7142) \wedge 2)$

$a_1 = -42.7244$

Formula (2.85)

Coefficients, a_2

$a_2 = a_{21} + a_{22}k$

Calculation

$a_2 = (-0.037) + (0.41 \times (-0.7142))$

$a_2 = -0.3298$

Formula (2.81)

Coefficients b for L_x side, b

$$b = -0.3503 - 9.6311e^{-0.0366L_x}$$

Calculation

$$b = (-0.3503) - 9.6311e(-0.03666 \times 107)$$

$$b = -0.5408$$

Formula (2.80)

Conductor compression ratio C for L_x side, C

$$C = a_0 + a_1 e^{0.0001h} + a_2 e^{bh}$$

Calculation

$$C = 43.6341 + ((-42.7244)e(0.0001 \times 0.5)) + ((-0.3298)e((-0.5408) \times 0.5))$$

$$C = 0.6559$$

Formula (2.73)

Central conductor span for L_x side, d_{max}

$$d_{max} = \frac{L_x(1-C)}{2\left(1 - C^{\left(\frac{(n'_y-1)}{2}\right)}\right)}$$

Calculation

$$d_{max} = (107 \times (1 - 0.6559)) / (2 \times (1 - 0.6559 \wedge ((21-1)/2)))$$

$$d_{max} = 18.6846 \text{ m}$$

Formula (2.78)

Number of segment L_x side, m

$$m = \left(\frac{(n'_y - 1)}{2}\right) - 1$$

Calculation

$$m = ((21-1)/2) - 1$$

$$m = 9$$

Formula (2.75)

Conductor span of the i^{th} segment for L_x side, d_i

$$d_i = d_{max} C^i$$

Calculation

$d_1 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 1)$

$d_1 = 12.2552$ m

$d_2 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 2)$

$d_2 = 8.0382$ m

$d_3 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 3)$

$d_3 = 5.2722$ m

$d_4 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 4)$

$d_4 = 3.4580$ m

$d_5 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 5)$

$d_5 = 2.2681$ m

$d_6 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 6)$

$d_6 = 1.4876$ m

$d_7 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 7)$

$d_7 = 0.9757$ m

$d_8 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 8)$

$d_8 = 0.6400$ m

$d_9 = 18.6846 \times (0.6559 \wedge 9)$

$d_9 = 0.4197$ m

คำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor span) ด้าน L_y จากตารางที่ 2.6 ค่า ส.ป.ส. สำหรับคำนวณหาค่า conductor compression ratio มีค่าดังต่อไปนี้

Coefficients, $a_{01} = 0.44$

Coefficients, $a_{02} = -77.43$

Coefficients, $a_{03} = 15.63$

Coefficients, $a_{11} = 0.033$

Coefficients, $a_{12} = 76.9$

Coefficients, $a_{13} = -15.56$

Coefficients, $a_{21} = -0.067$

Coefficients, $a_{22} = 0.50$

Formula (2.83)

Coefficients, a_0

$a_0 = a_{01} + a_{02}k + a_{03}k^2$

Calculation

$a_0 = 0.44 + ((-77.43) \times (-0.7142)) + ((15.63 \times (-0.7142) \wedge 2)$

$a_0 = 63.7130$

Formula (2.84)

Coefficients, a_1

$a_1 = a_{11} + a_{12}k + a_{13}k^2$

Calculation

$a_1 = 0.033 + (76.9 \times (-0.7142)) + ((-15.56) \times (-0.7142) \wedge 2)$

$a_1 = -62.8258$

Formula (2.85)

Coefficients, a_2

$a_2 = a_{21} + a_{22}k$

Calculation

$a_2 = (-0.067) + (0.50 \times (-0.7142))$

$a_2 = -0.4241$

Formula (2.82)

Coefficients b for L_y side, b

$b = -0.3503 - 9.6311e^{-0.0366 L_y}$

Calculation

$b = (-0.3503) - 9.6311e(-0.03666 \times 72)$

$b = -1.037$

Formula (2.80)

Conductor compression ratio C for L_y side, C

$C = a_0 + a_1 e^{0.0001h} + a_2 e^{bh}$

Calculation

$C = 63.7130 + ((-62.8258)e(0.0001 \times 0.5)) + ((-0.4241)e((-1.037) \times 0.5))$

$C = 0.6315$

Formula (2.74)

Central conductor span for L_y side, d_{max}

$$d_{\max} = \frac{L_y(1-C)}{2\left(1-C^{\left(\frac{(n_x'-1)}{2}\right)}\right)}$$

Calculation

$d_{\max} = (72 \times (1-0.6315)/(2 \times (1-0.6315 \wedge ((15-1)/2)))$

$d_{\max} = 13.8194$ m

Formula (2.79)

Number of segment L_y side, m

$$m = \left(\frac{(n_x'-1)}{2}\right) - 1$$

Calculation

$m = ((15-1)/2) - 1$

$m = 6$

Formula (2.75)

Conductor span of the i^{th} segment for L_y side, d_i

$d_i = d_{\max} C^i$

Calculation

$d_1 = 13.8194 \times (0.6315 \wedge 1)$

$d_1 = 8.7269$ m

$d_2 = 13.8194 \times (0.6315 \wedge 2)$

$d_2 = 5.5110$ m

$d_3 = 13.8194 \times (0.6315 \wedge 3)$

$d_3 = 3.4802$ m

$d_4 = 13.8194 \times (0.6315 \wedge 4)$

$d_4 = 2.1977$ m

$d_5 = 13.8194 \times (0.6315 \wedge 5)$

$d_5 = 1.3878$ m

$d_6 = 13.8194 \times (0.6315 \wedge 6)$

$d_6 = 0.8764$ m

ขั้นตอนที่ 14

สรุปรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 7704 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.6

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, $\rho = 500\ \Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 5.28 kA(rms.)

Washed granite resistivity, $\rho s = 3000\ \Omega - m$

Conductor cross section area, A_{mm^2} =35 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.00756 m

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50} = 649.369$ v

Tolerable step voltage for 50 kg, $E_{step50} = 2148.21$ v

Max.length of grid in x direction, L_x = 107 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 72 m

Grid resistance, $R_g = 2.60444\ \Omega$

Maximum grid current, $I_G = 3168$ A

Grid potential rise, $GPR = 8250.8659$ v

Mesh voltage, $E_m = 648.0146$ v

Step voltage, $E_s = 1042.226$ v

Percentage of the save material, $\lambda = 43.060$

Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction, $n_x' = 15$

Number of ground conductor for unequally spaced grid y direction, $n_y' = 21$

Conductor compression ratio C for L_x side, $C = 0.6559$

Conductor compression ratio C for L_y side, $C = 0.6315$

Spacing between parallel conductor L_x side:

$d_9 = 0.4197$ m, $d_8 = 0.6400$ m, $d_7 = 0.9757$ m, $d_6 = 1.4876$ m,

$d_5 = 2.2681$ m, $d_4 = 3.4580$ m, $d_3 = 5.2722$ m, $d_2 = 8.0382$ m,

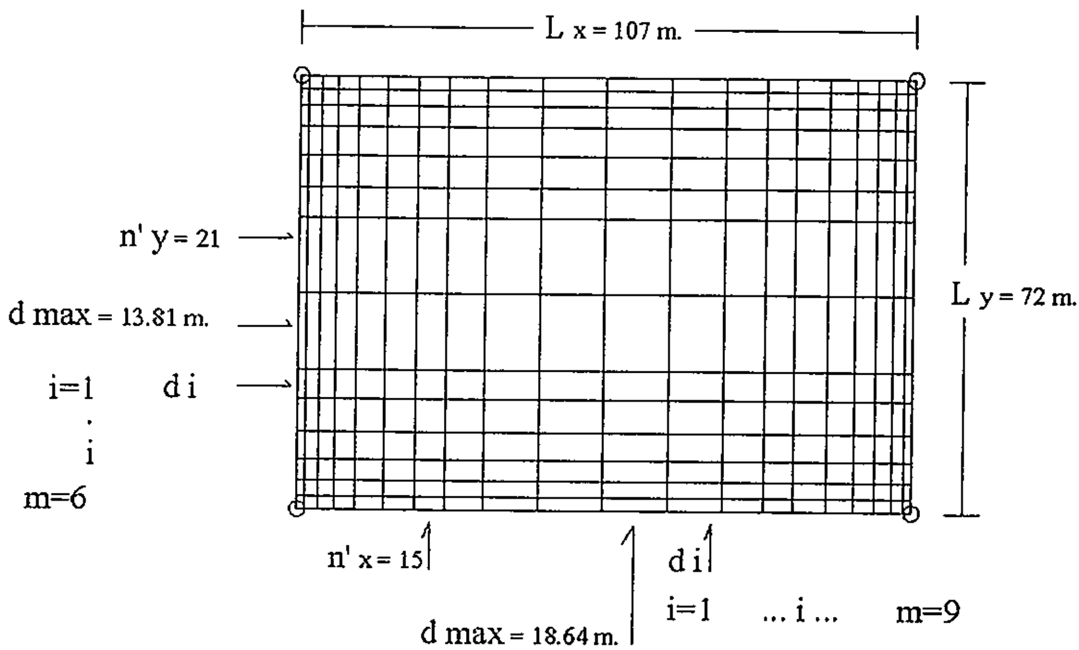
$d_1 = 12.2552$ m, $d_{max} = 18.6846$ m, $d_{max} = 18.6846$, $d_1 = 12.2552$ m, $d_2 = 8.0382$ m, $d_3 = 5.2722$ m, $d_4 = 3.4580$ m, $d_5 = 2.2681$ m, $d_6 = 1.4876$ m, $d_7 = 0.9757$ m, $d_8 = 0.6400$ m, $d_9 = 0.4197$ m

Spacing between parallel conductor L_y side:

$$d_6 = 0.8764 \text{ m}, d_5 = 1.3878 \text{ m}, d_4 = 2.1977 \text{ m}, d_3 = 3.4802 \text{ m},$$

$$d_2 = 5.5110 \text{ m}, d_1 = 8.7269 \text{ m}, d_{max} = 13.8194, d_{max} = 13.8194 \text{ m}, d_1 = 8.7269 \text{ m},$$

$$d_2 = 5.5110 \text{ m}, d_3 = 3.4802 \text{ m}, d_4 = 2.1977 \text{ m}, d_5 = 1.3878 \text{ m}, d_6 = 0.8764 \text{ m}$$



รูปที่ 3.3 ตะแกรงตาข่ายสถานีไฟฟ้าย่อย Aกรณีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

บทที่ 4
ผลการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

4.1 โปรแกรมสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

4.1.1 ลักษณะทั่วไปของโปรแกรม Visual Basic

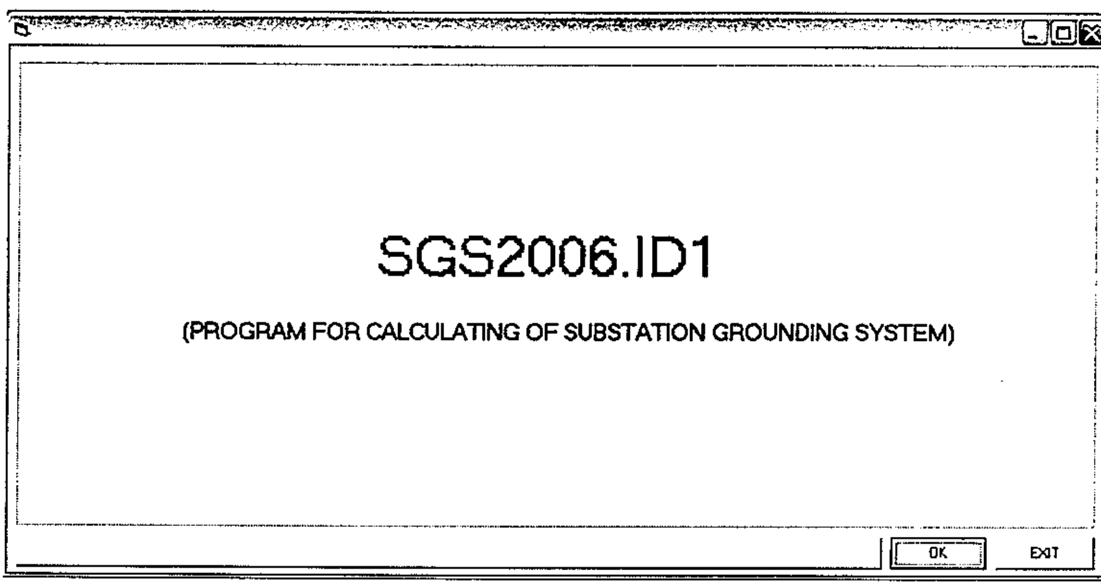
Visual Basic เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ (Programming Language) ที่พัฒนาโดยบริษัทไมโครซอฟท์ ซึ่งเป็นบริษัทที่สร้างระบบปฏิบัติการ Windows 95/98 และ Windows NT โดยตัวภาษาเองมีรากฐานมาจากภาษา Basic โดยที่จากภาษา Basic มีจุดเด่น คือ ผู้ที่ไม่มีพื้นฐานเรื่องการเขียนโปรแกรมก็สามารถที่จะเรียนรู้ได้ไม่ยากเมื่อเทียบกับภาษาคอมพิวเตอร์อื่นๆ เช่น ภาษาซี หรือภาษาปาสคาล Visual Basic เวอร์ชันแรก คือ เวอร์ชัน 1.0 เมื่อปี 1991 โดยที่ในช่วงแรกยังไม่มีความแตกต่างจากภาษา QBasic มากนัก แต่จะเน้นเรื่องเครื่องมือที่ช่วยในการเขียนโปรแกรมบนวินโดว์ ซึ่งปรากฏว่า Visual Basic ได้รับความนิยมและประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี บริษัทไมโครซอฟท์จึงพัฒนา Visual Basic ให้ดีขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความสามารถ และเครื่องมือต่างๆ เช่น เครื่องมือตรวจสอบแก้ไขโปรแกรม (Debugger) สภาพแวดล้อมในการพัฒนาโปรแกรม การเขียนโปรแกรมแบบหลายหน้าต่างย่อย (MDI) เป็นต้น สำหรับ Visual Basic ในปัจจุบัน คือ เวอร์ชัน 6.0 ซึ่งออกมาในปี 1998 ได้เพิ่มความสามารถในการเขียนโปรแกรมติดต่อกับเครือข่ายอินเตอร์เน็ต การเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล และเพิ่มเครื่องมือต่างๆให้ใช้งานได้สะดวกขึ้นกว่าเดิม ในการติดตั้งโปรแกรม Visual Basic ใน Windows นั้น Visual Basic 6.0 ต้องการระบบที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ระบบปฏิบัติการ Windows 95/98 หรือ Windows NT Workstation 4.0
- คอมพิวเตอร์ที่มี ซีพียู 486 DX/66 MHz เป็นอย่างต่ำ แต่ถ้าจะให้ทำงานได้ดียิ่งขึ้นทางบริษัทไมโครซอฟท์แนะนำให้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มี ซีพียู Pentium ขึ้นไป
- หน่วยความจำ 16 MB เป็นอย่างต่ำสำหรับระบบปฏิบัติการ Windows 95/98 และ32 MB เป็นอย่างต่ำสำหรับระบบปฏิบัติการ Windows NT Workstation
- จอภาพและการ์ดแสดงผลที่สนับสนุนการทำงานของ Windows
- เมาส์หรือ Pointing device ที่สนับสนุนการทำงานของ Windows

4.1.2 ลักษณะโปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย SGS2006.ID1

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมดังที่แสดงในรูปที่4.1 ถึงรูปที่ 4.9 เป็นผลการใช้งานโปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย SGS2006.ID1 ในการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ และการทดลอง ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดอนพุด ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

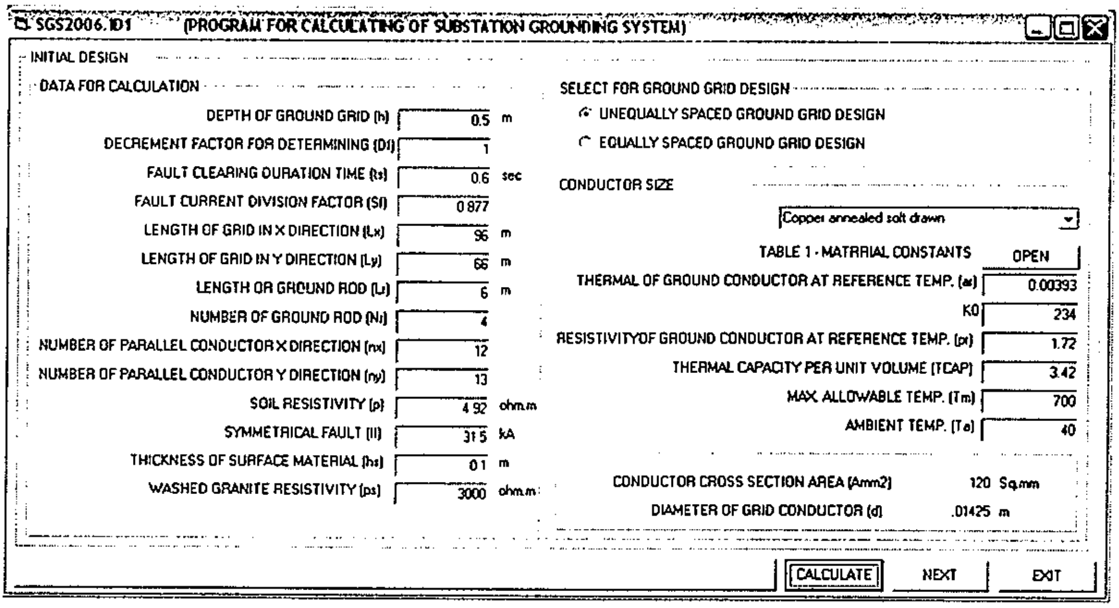
Area of substation(A) = 6336 m^2, Depth of ground grid(h)= 0.5 m, Fault clearing duration time(t_s) = 0.6 sec, Fault current division factor(S_f) = 0.877, Thickness of surface materiel(h_s) = 0.1 m, Soil resistivity(ρ) = 4.92 $\Omega - m$, Symmetrical fault(I_f) = 31.5 kA และ Washed granite resistivity(ρs) = 3000 $\Omega - m$



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบหน้าต่างเข้าสู่โปรแกรม SGS2006.ID1

ประกอบด้วย

1. Buttons OK: ใช้ควบคุมปุ่มการเข้าสู่โปรแกรม
2. Buttons EXIT: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Buttons CALCULATE: ใช้ควบคุมปุ่มการการคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้
    a. Conductor cross section area (Amm^2)
    b. Diameter of grid conductor (d)
3. Buttons NEXT: ใช้ควบคุมปุ่มการเข้าสู่การคำนวณที่หน้าต่างต่อไป
4. Buttons EXIT: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1
5. Buttons OPEN: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างตารางค่าคงตัวของวัสดุ
6. Frame data for calculation: ประกอบด้วย Text box ใช้กรอกข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ตามรายการดังนี้
    a. Depth of ground grid (h)
    b. Decrement factor for determining (Df)
    c. Fault clearing duration time (ts)
    d. Fault current division factor (Sf)
    e. Length of grid in x direction (Lx)
    f. Length of grid in y direction (Ly)
    g. Length of ground rod (Lr)

h. Number of ground rod (Nr)

i. Number of parallel conductor x direction (nx)

j. Number of parallel conductor y direction (ny)

k. Soil resistivity (p)

l. Symmetrical fault (If)

m. Thickness of surface material (hs)

n. Washed granite resistivity (ps)

7. Frame select for ground grid design: ประกอบด้วย Option button ใช้ควบคุมปุ่มการเลือกใช้วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อย ตามรายการดังนี้

   a. Unequally spaced ground grid design

   b. Equally spaced ground grid design

8. Frame conductor size: ประกอบด้วย Text box ใช้กรอกข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ตามรายการดังนี้

   a. Thermal of ground conductor at reference temperature (ar)

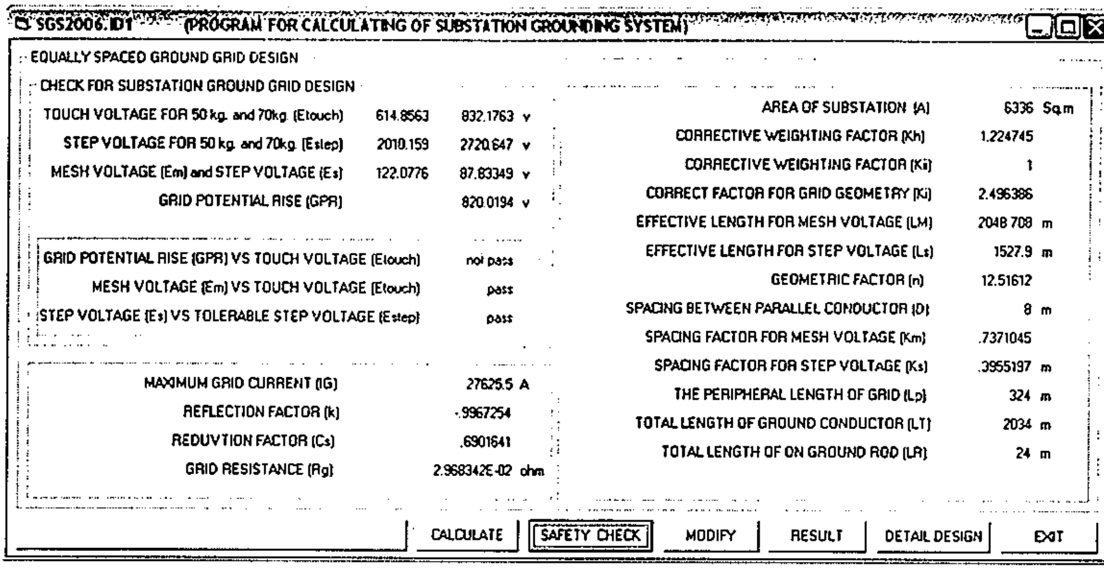
   b. K0

   c. Resistivity of ground conductor at reference temperature (pr)

   d. Thermal capacity per unit volume (TCAP)

   e. Max.allowable temperature (Tm)

   f. Ambient temperature (Ta)



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Buttons CALCULATE: ใช้ควบคุมปุ่มการคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้

    a. Tolerable touch voltage for 50 kg. and 70kg. (Etouch)

    b. Tolerable step voltage for 50 kg. and 70kg. (Estep)

    c. Mesh voltage (Em) and Step voltage (Es)

    d. Grid potential rise (GPR)

    e. Maximum grid current (IG)

    f. Reflection factor (k)

    g. Reduction factor (Cs)

    h. Grid resistance (Rg)

    i. Area of substation (A)

    j. Corrective weighting factor (Kh)

    k. Corrective weighting factor (Kii)

    l. Correct factor for grid geometry (Ki)

    m. Effective length for mesh voltage (LM)

    n. Effective length for step voltage (Ls)

    o. Geometric factor (n)

p. Spacing between parallel conductor (D)

q. Spacing factor for mesh voltage (Km)

r. Spacing factor for step voltage (Ks)

s. The peripheral length of grid (Lp)

t. Total length of ground conductor (LT)

u. Total length of all ground rod (LR)

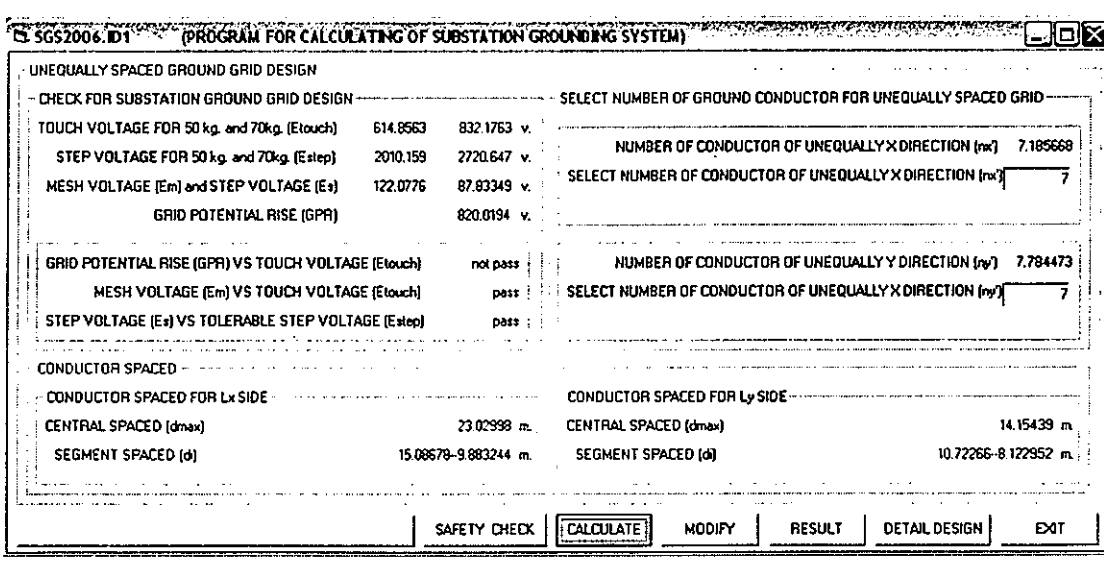
3. Buttons SAFETY CHECK ใช้ควบคุมปุ่มการคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้

    a. Grid potential rise (GPR) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

    b. Mesh voltage (Em) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

    c. Step voltage (Es) vs Tolerable step voltage (Estep)

4. Buttons MODIFY: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและปิดหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ
5. Buttons RESULT: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ
6. Buttons DETAIL DESIGN: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ
7. Buttons EXIT: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1



รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Frame check for substation grounding design: ประกอบด้วยการคำนวณอัตโนมัติในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย แสดงผลตามรายการดังนี้

   a. Tolerable touch voltage for 50 kg. and 70kg. (Etouch)

   b. Tolerable step voltage for 50 kg. and 70kg. (Estep)

   c. Mesh voltage (Em) and Step voltage (Es)

   d. Grid potential rise (GPR)
3. Frame select number of ground conductor for unequally spaced grid: ประกอบด้วยการคำนวณอัตโนมัติในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย แสดงผลตามรายการดังนี้

   a. Number of parallel conductor of unequally x direction (nx')

   b. Number of parallel conductor of unequally y direction (ny')

   Text box ใช้กรอกข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ตามรายการดังนี้

   a. Select number of parallel conductor of unequally x direction (nx')

   b. Select number of parallel conductor of unequally y direction (ny')
4. Frame conductor spaced: ประกอบด้วย

   Frame conductor spaced for Lx side การคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้

   a. Central spaced (dmax)

   b. Segment spaced (di)

   Frame conductors spaced for Ly side การคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้

   a. Central spaced (dmax)

   b. Segment spaced (di)
5. Buttons CALCULATE: ใช้ควบคุมปุ่มการคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้

   Frame conductor spaced

   a. Central spaced (dmax)

   b. Segment spaced (di)
6. Buttons SAFETY CHECK ใช้ควบคุมปุ่มการคำนวณค่าที่แสดงผล ตามรายการดังนี้

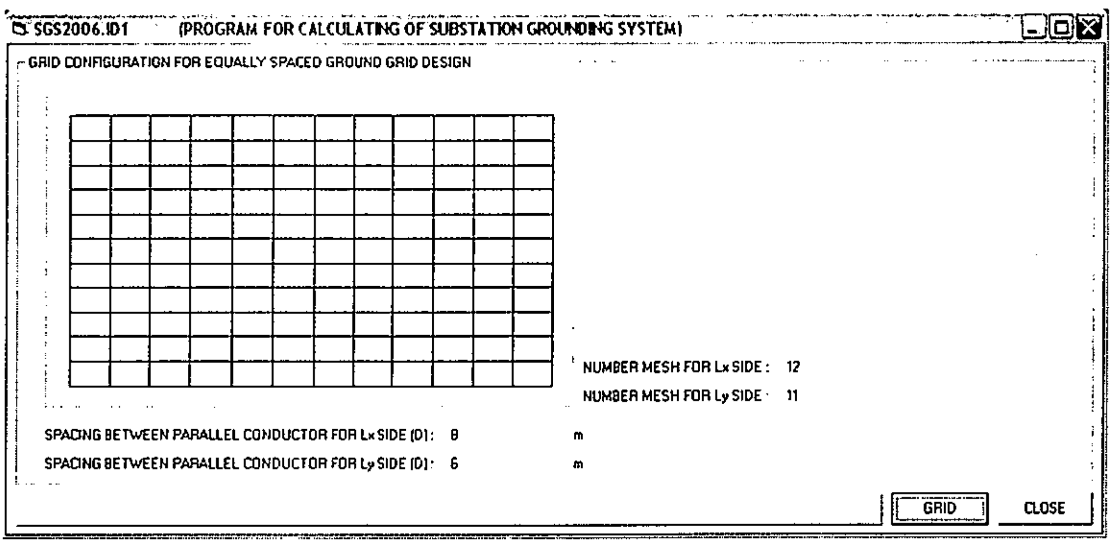
   Frame check for substation grounding design

   a. Grid potential rise (GPR) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

   b. Mesh voltage (Em) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

   c. Step voltage (Es) vs Tolerable step voltage (Estep)

7. Buttons MODIFY: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและปิดหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
8. Buttons RESULT: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
9. Buttons DETAIL DESIGN: ใช้ควบคุมปุ่มการเปิดหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
10. Buttons EXIT: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1



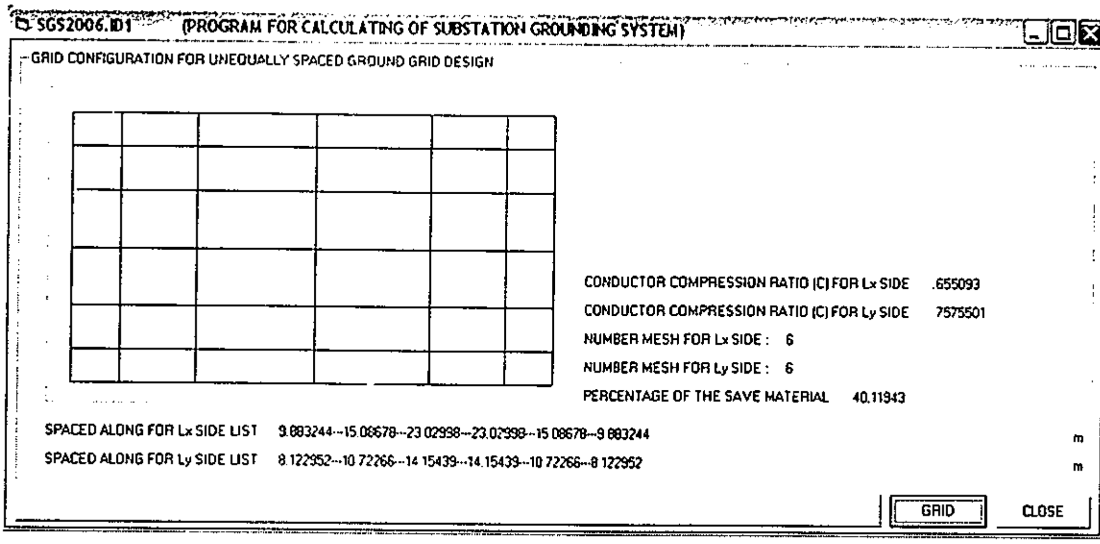
รูปที่ 4.5 ส่วนประกอบหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Frame grid configuration for equally spaced ground grid design: ประกอบด้วยการคำนวณอัตโนมัติในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย แสดงผลตามรายการดังนี้
   a. Number mesh for Lx side
   b. Number mesh for Ly side
   c. Spacing between parallel conductor for Lx side (D)
   d. Spacing between parallel conductor for Ly side (D)
   e. รูปตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย
3. Buttons GRID: ใช้ควบคุมปุ่มการวาดรูปตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

ย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

4. Buttons CLOSE: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

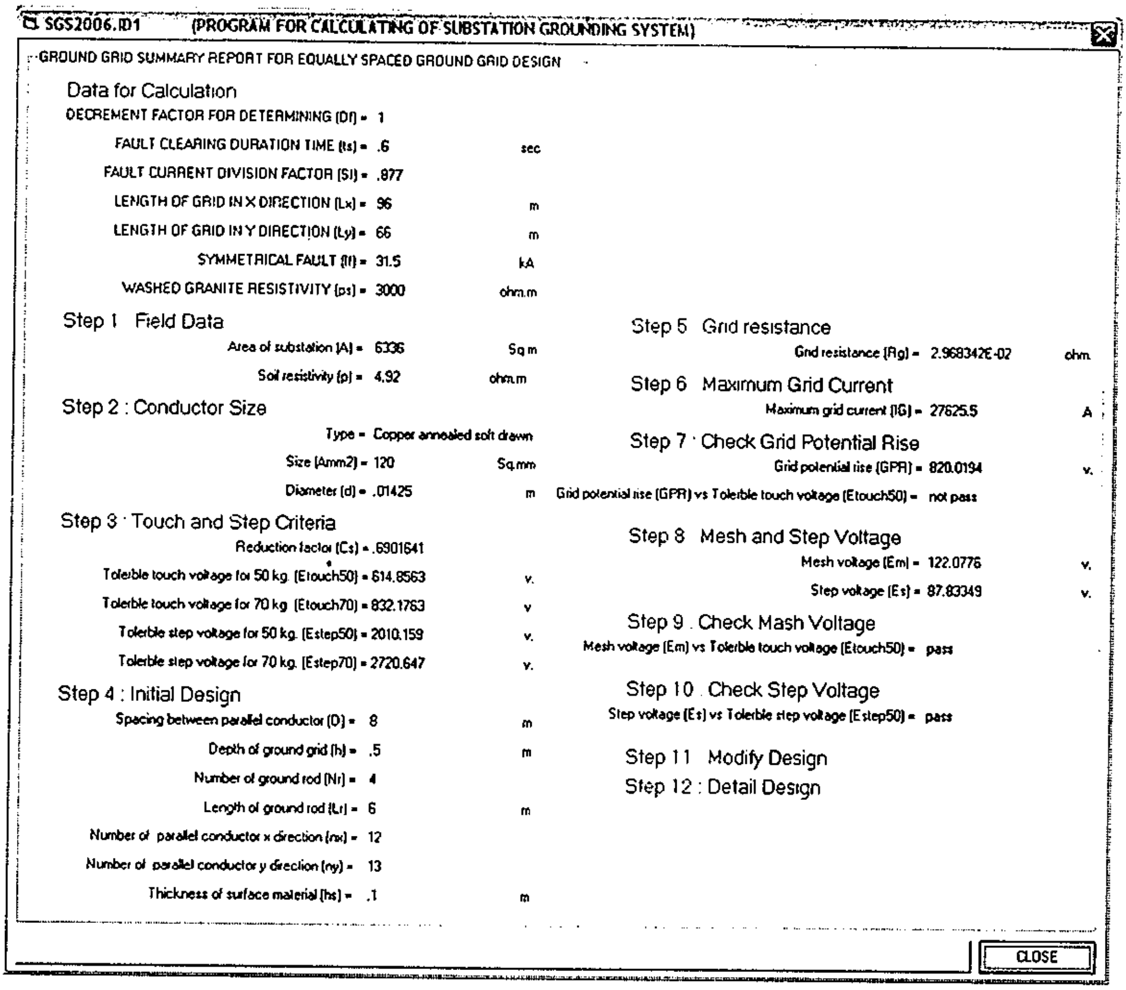


รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Frame grid configuration for unequally spaced ground grid design: ประกอบด้วยการคำนวณอัตโนมัติในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย แสดงผลตามรายการดังนี้
   a. Conductor compression ratio (C) for Lx side
   b. Conductor compression ratio (C) for Ly side
   c. Number mesh for Lx side
   d. Number mesh for Ly side
   e. Percentage of the save material
   g. Spaced along for Lx side list
   h. Spaced along for Ly side list
   i. รูปตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย
3. Buttons GRID: ใช้ควบคุมปุ่มการวาดรูปตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
4. Buttons CLOSE: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของ

สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Frame ground grid summary report for equally spaced ground grid design: ประกอบด้วยการคำนวณอัตโนมัติในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย แสดงผลตามรายการดังนี้
   a. Data for calculation
      - Decrement factor for determining (Df)
      - Fault clearing duration time (t_s)
      - Fault current division factor (S_f)
      - Length of grid in x direction (Lx)

- Length of grid in y direction (Ly)
- Symmetrical fault (I_f)
- Washed granite resistivity (ρs)

b. Step 1 Field data

- Area of substation (A)
- Soil resistivity (ρ)

c. Step 2 Conductor size

- Type
- Conductor cross section area (Amm2)
- Diameter of grid conductor (d)

d. Step 3 Touch and step criteria

- Reduction factor (Cs)
- Tolerable touch voltage for 50 kg. (Etouch50)
- Tolerable touch voltage for 70 kg. (Etouch70)
- Tolerable step voltage for 50 kg. (Estep50)
- Tolerable step voltage for 70kg. (Estep70)

e. Step 4 Initial design

- Depth of ground grid,(h)
- Spacing between parallel conductor (D)
- Length of ground rod (Lr)
- Number of ground rod (Nr)
- Number of parallel conductor x direction (nx)
- Number of parallel conductor y direction (ny)
- Thickness of surface materiel (h_s)

f. Step 5 Grid resistance

- Grid resistance (Rg)

g. Step 6 Maximum grid current

- Maximum grid current (IG)

h. Step 7 Check grid potential rise

- Grid potential rise (GPR)
- Grid potential rise (GPR) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

i. Step 8 Mesh and step voltage

- Mesh voltage (Em)
- Step voltage (Es)

j. Step 9 Check mesh voltage

- Mesh voltage (Em) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

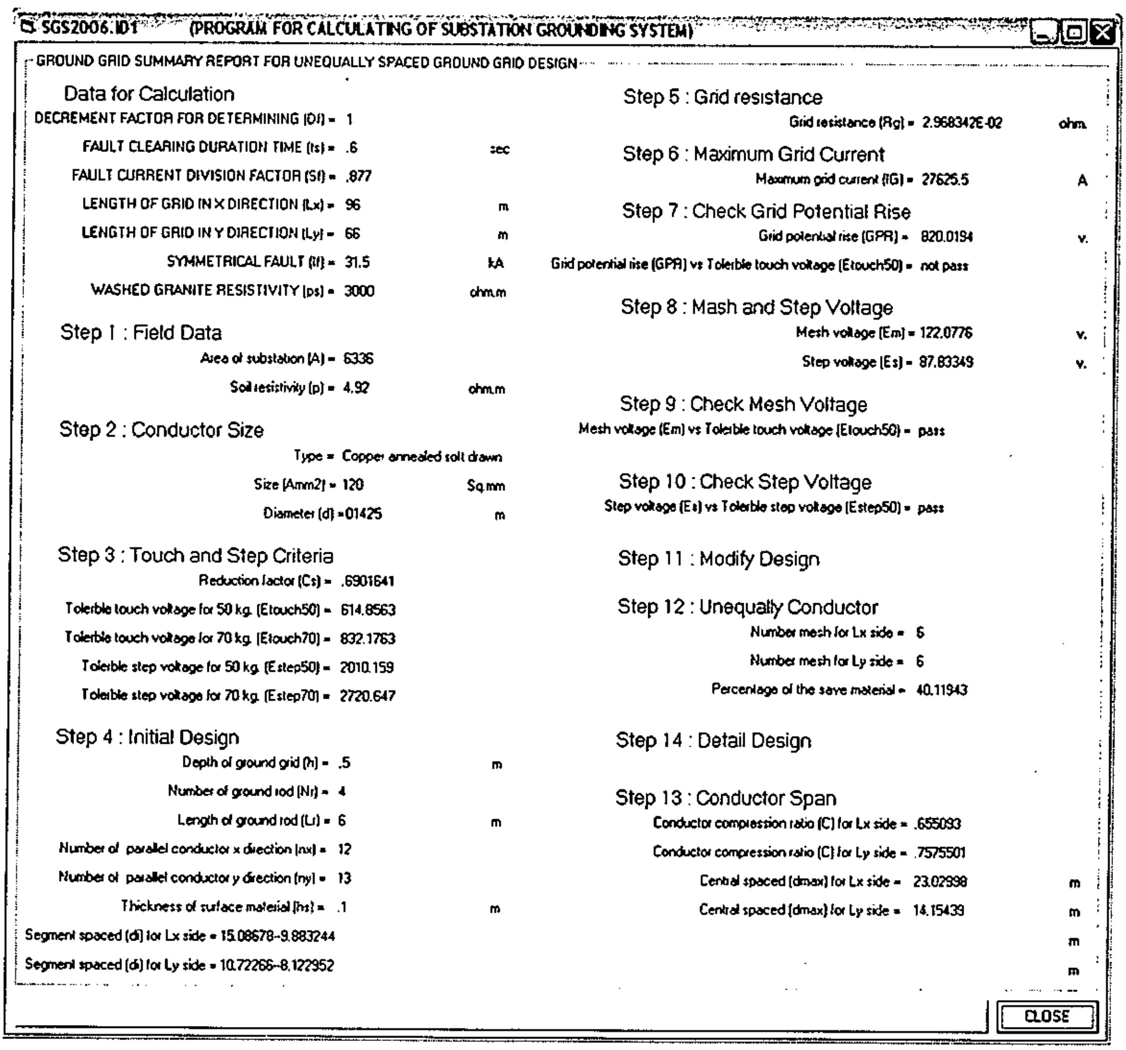
k. Step 10 Check step voltage

- Step voltage (Es) vs Tolerable step voltage (Estep)

l. Step 11 Modify design

m. Step 12 Detail design

3. Buttons CLOSE: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Frame ground grid summary report for unequally spaced ground grid design: ประกอบด้วยการคำนวณอัตโนมัติในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย แสดงผลตามรายการดังนี้

   a. Data for calculation

      - Decrement factor for determining (Df)
      - Fault clearing duration time (t_s)
      - Fault current division factor (S_f)
      - Length of grid in x direction (Lx)
      - Length of grid in y direction (Ly)
      - Symmetrical fault (I_f)
      - Washed granite resistivity (ρs)

   b. Step 1 Field data

      - Area of substation (A)
      - Soil resistivity (ρ)

   c. Step 2 Conductor size

      - Type
      - Conductor cross section area (Amm^2)
      - Diameter of grid conductor (d)

   d. Step 3 Touch and step criteria

      - Reduction factor (Cs)
      - Tolerable touch voltage for 50 kg. (Etouch50)
      - Tolerable touch voltage for 70 kg. (Etouch70)
      - Tolerable step voltage for 50 kg. (Estep50)
      - Tolerable step voltage for 70kg. (Estep70)

   e. Step 4 Initial design

      - Depth of ground grid (h)
      - Spacing between parallel conductor (D)
      - Length of ground rod (Lr)
      - Number of ground rod (Nr)

- Number of parallel conductor x direction (nx)
- Number of parallel conductor y direction (ny)
- Thickness of surface materiel (h_s)

f. Step 5 Grid resistance

- Grid resistance (Rg)

g. Step 6 Maximum grid current

- Maximum grid current (IG)

h. Step 7 Check grid potential rise

- Grid potential rise (GPR)
- Grid potential rise (GPR) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

i. Step 8 Mesh and step voltage

- Mesh voltage (Em)
- Step voltage (Es)

j. Step 9 Check mesh voltage

- Mesh voltage (Em) vs Tolerable touch voltage (Etouch)

k. Step 10 Check step voltage

- Step voltage (Es) vs Tolerable step voltage (Estep)

l. Step 11 Modify design

m. Step 12 Unequally conductor

- Number mesh for Lx side
- Number mesh for Ly side
- Percentage of the save material

n. Step 13 Conductor span

- Conductor compression ratio (C) for Lx side
- Conductor compression ratio (C) for Ly side
- Central spaced (dmax) for Lx side
- Central spaced (dmax) for Ly side
- Segment spaced (di) for Lx side
- Segment spaced (di) for Ly side

o. Step 14 Detail design

3. Buttons CLOSE: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

SGS2006.ID1 (PROGRAM FOR CALCULATING OF SUBSTATION GROUNDING SYSTEM)

Table 1 - Material constants

Description	Material conductivity (%)	Thermal coefficent of resistivity at reference temp (ar)	K0 at 0 oc (0 oC)	Fusing temp (Tm)	Resistivity of ground conductor at reference temp (pr)	TCAP thermal capacity (J/(cm3*oC))
Copper annealed soft drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum BC grade	61.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum 6201 alloy	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.85
Steel 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

CLOSE

รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบหน้าต่างตารางค่าคงตัวของวัสดุ

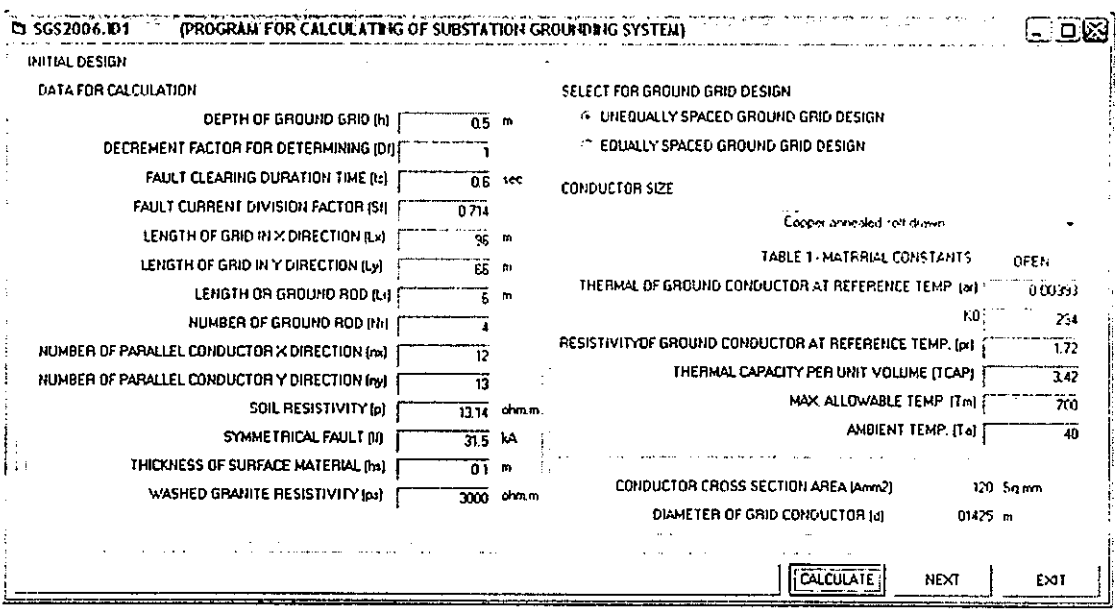
ประกอบด้วย

1. Title: SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)
2. Frame table 1 material constants: แสดงค่าคงตัวของวัสดุชนิดต่างๆ
3. Buttons CLOSE: ใช้ควบคุมปุ่มการออกจากหน้าต่างตารางค่าคงตัวของวัสดุ

4.1.3 ลักษณะการใช้งานโปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย SGS2006.ID1

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมดังที่แสดงในรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.16 เป็นผลการใช้งานโปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย SGS2006.ID1 ในการทดลองออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ และการทดลอง ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยใช้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อของลงดินสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

Area of substation(A) = 6336 m^2, Depth of ground grid(h)= 0.5 m, Fault clearing duration time(t_s) = 0.6 sec, Fault current division factor(S_f) = 0.714, Thickness of surface materiel(h_s) = 0.1 m, Soil resistivity(ρ) = 13.14 $\Omega - m$, Symmetrical fault(I_f) = 31.5 kA และ Washed granite resistivity(ρs) = 3000 $\Omega - m$



รูปที่ 4.10 หน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
  1. Depth of ground grid
  2. Decrement factor for determining
  3. Fault clearing duration time
  4. Fault current division factor
  5. Length of grid in x direction

6. Length of grid in y direction
7. Length of ground rod
8. Number of ground rod
9. Number of parallel conductor x direction
10. Number of parallel conductor y direction
11. Soil resistivity
12. Symmetrical fault
13. Thickness of surface material
14. Washed granite resistivity
15. Thermal of ground conductor at reference temperature
16. K0
17. Resistivity of ground conductor at reference temperature
18. Thermal capacity per unit volume
19. Max. allowable temperature
20. Ambient temp temperature

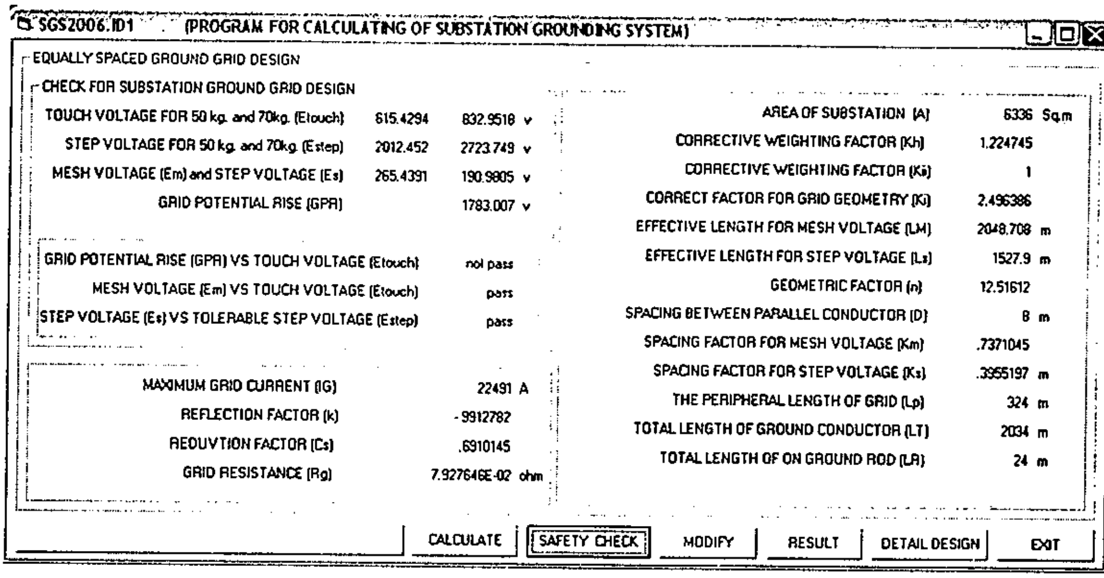
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก**
  1. การคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Unequally spaced ground grid design)
  2. การคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ (Equally spaced ground grid design)
  3. ชนิดตัวนำของตะแกรงตาข่าย

- **ช่องผลลัพธ์**
  1. Conductor cross section area
  2. Diameter of grid conductor

- **ปุ่มควบคุม**
  1. ปุ่ม OPEN เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างตารางค่าคงตัวของวัสดุ
  2. ปุ่ม CALCULATE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ตามรายการที่ 1 และ 2
  3. ปุ่ม NEXT เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยตามที่เลือกเงื่อนไขการออกแบบ และ

จะปิดหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

4. ปุ่ม EXIT เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1



รูปที่ 4.11 หน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

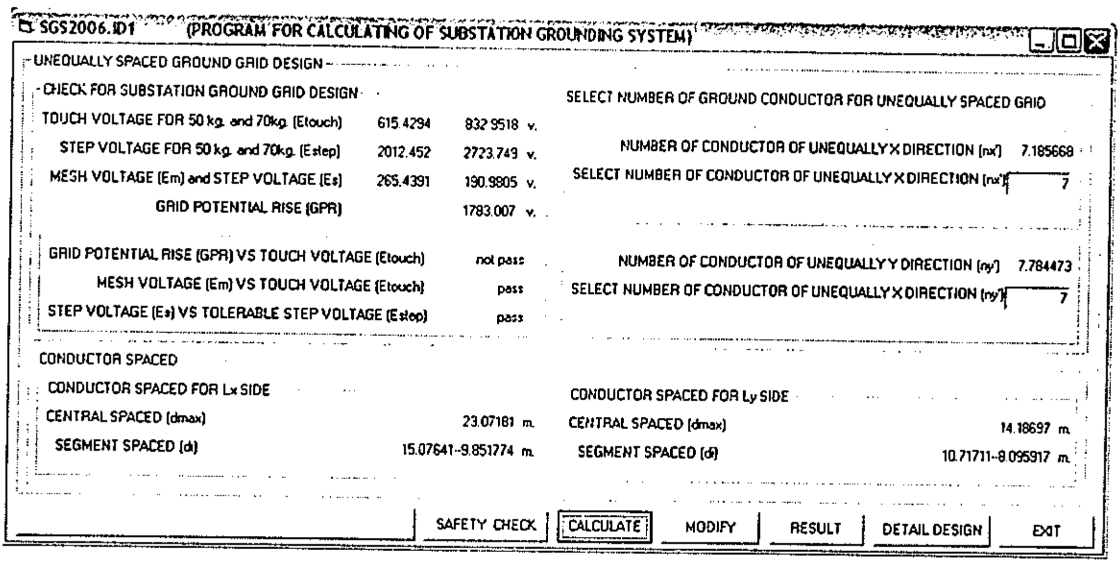
- **ช่องผลลัพธ์**
  1. Tolerable touch voltage for 50 kg. and 70kg
  2. Tolerable step voltage for 50 kg. and 70kg
  3. Mesh voltage and Step voltage
  4. Grid potential rise
  5. Maximum grid current
  6. Reflection factor
  7. Reduction factor
  8. Grid resistance
  9. Area of substation
  10. Corrective weighting factor, Kh
  11. Corrective weighting factor, Kii
  12. Correct factor for grid geometry

13. Effective length for mesh voltage
14. Effective length for step voltage
15. Geometric factor
16. Spacing between parallel conductor
17. Spacing factor for mesh voltage
18. Spacing factor for step voltage
19. The peripheral length of grid
20. Total length of ground conductor
21. Total length of all ground rod
22. Grid potential rise vs Tolerable touch voltage
23. Mesh voltage vs Tolerable touch voltage
24. Step voltage vs Tolerable step voltage

- **ปุ่มควบคุม**

1. ปุ่ม CALCULATE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ ตามรายการที่ 1 ถึง 21
2. ปุ่ม SAFETY CHECK เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ตามรายการที่ 22 ถึง 24 เมื่อปรากฏข้อความ "pass" แสดงว่าระบบระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีความปลอดภัย หากปรากฏข้อความ "not pass" แสดงว่าระบบระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีความไม่ปลอดภัย แล้วทำตามคำแนะนำใน Msg box
3. ปุ่ม MODIFY เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและจะปิดหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ
4. ปุ่ม RESULT เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ
5. ปุ่ม DETAIL DESIGN เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

6. ปุ่ม EXIT เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอและออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1



รูปที่ 4.12 หน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

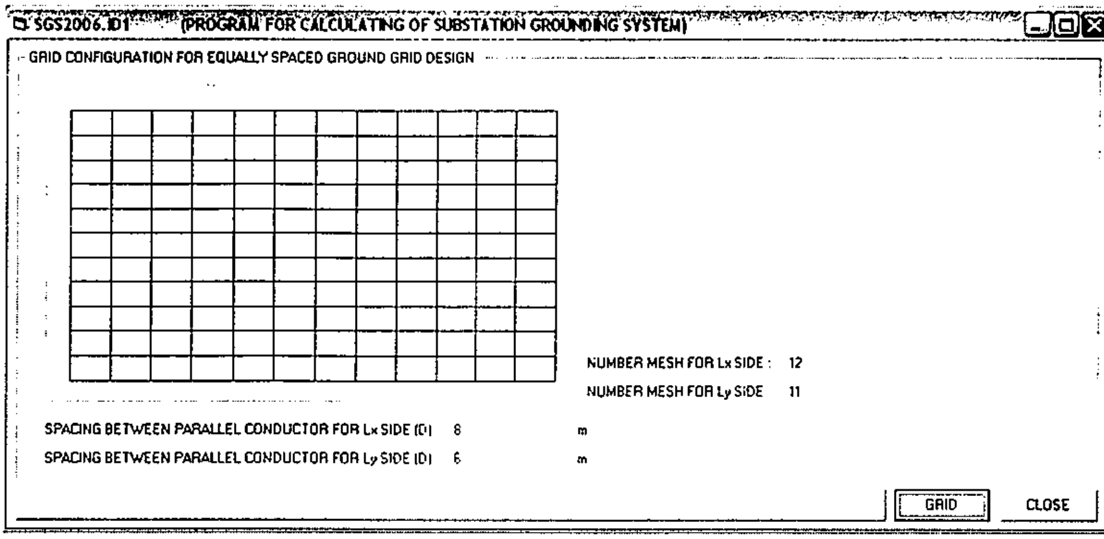
- **ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม**
  1. Select number of parallel conductor of unequally x direction
  2. Select number of parallel conductor of unequally y direction

- **ช่องผลลัพธ์**
  1. Tolerable touch voltage for 50 kg. and 70kg
  2. Tolerable step voltage for 50 kg. and 70kg
  3. Mesh voltage and Step voltage
  4. Grid potential rise
  5. Number of parallel conductor of unequally x direction
  6. Number of parallel conductor of unequally y direction
  7. Central spaced
  8. Segment spaced
  9. Grid potential rise vs Tolerable touch voltage
  10. Mesh voltage vs Tolerable touch voltage

11. Step voltage vs Tolerable step voltage

- **ปุ่มควบคุม**

1. ปุ่ม CALCULATE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ตามรายการที่ 7 ถึง 8
2. ปุ่ม SAFETY CHECK เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ตามรายการที่ 9 ถึง 11 เมื่อปรากฏข้อความ "pass" แสดงว่าระบบระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีความปลอดภัย หากปรากฏข้อความ "not pass" แสดงว่าระบบระบบต่อลงดินที่ทำการออกแบบมีความไม่ปลอดภัย แล้วทำตามคำแนะนำใน Msg box
3. ปุ่ม MODIFY เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยและจะปิดหน้าต่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
4. ปุ่ม RESULT เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
5. ปุ่ม DETAIL DESIGN เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะเปิดหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ
6. ปุ่ม EXIT เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอและออกจากโปรแกรม SGS2006.ID1



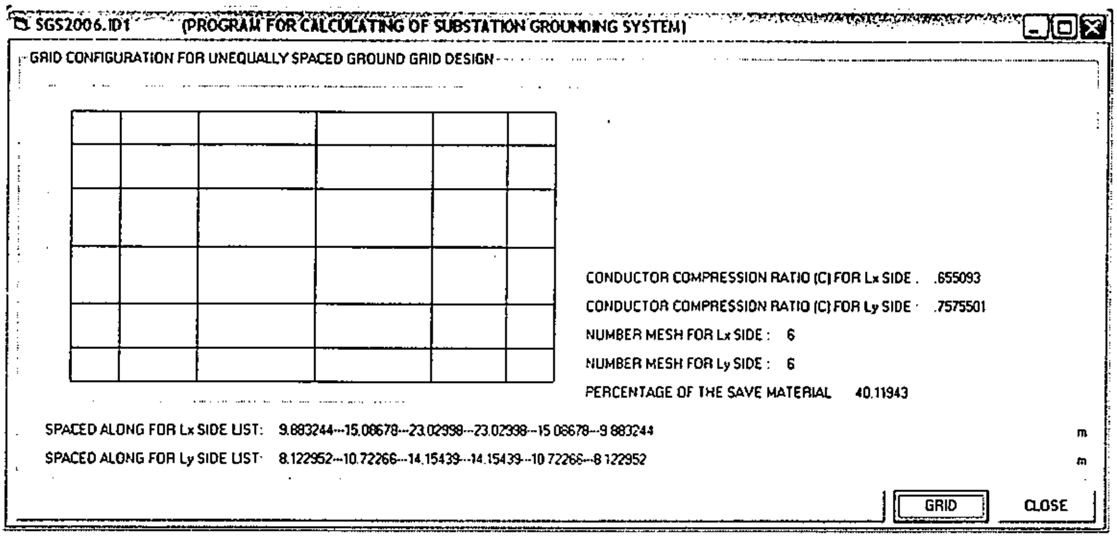
รูปที่ 4.13 หน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

- **ช่องผลลัพธ์**
  1. Number mesh for Lx side
  2. Number mesh for Ly side
  3. Spacing between parallel conductor for Lx side
  4. Spacing between parallel conductor for Ly side

- **วาดภาพ**
  1. รูปตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ (Grid configuration for equally spaced ground grid design)

- **ปุ่มควบคุม**
  1. ปุ่ม GRID เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ตามรายการที่ 1 ถึง 4 และรูปตะแกรงตาข่าย
  2. ปุ่ม CLOSE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ



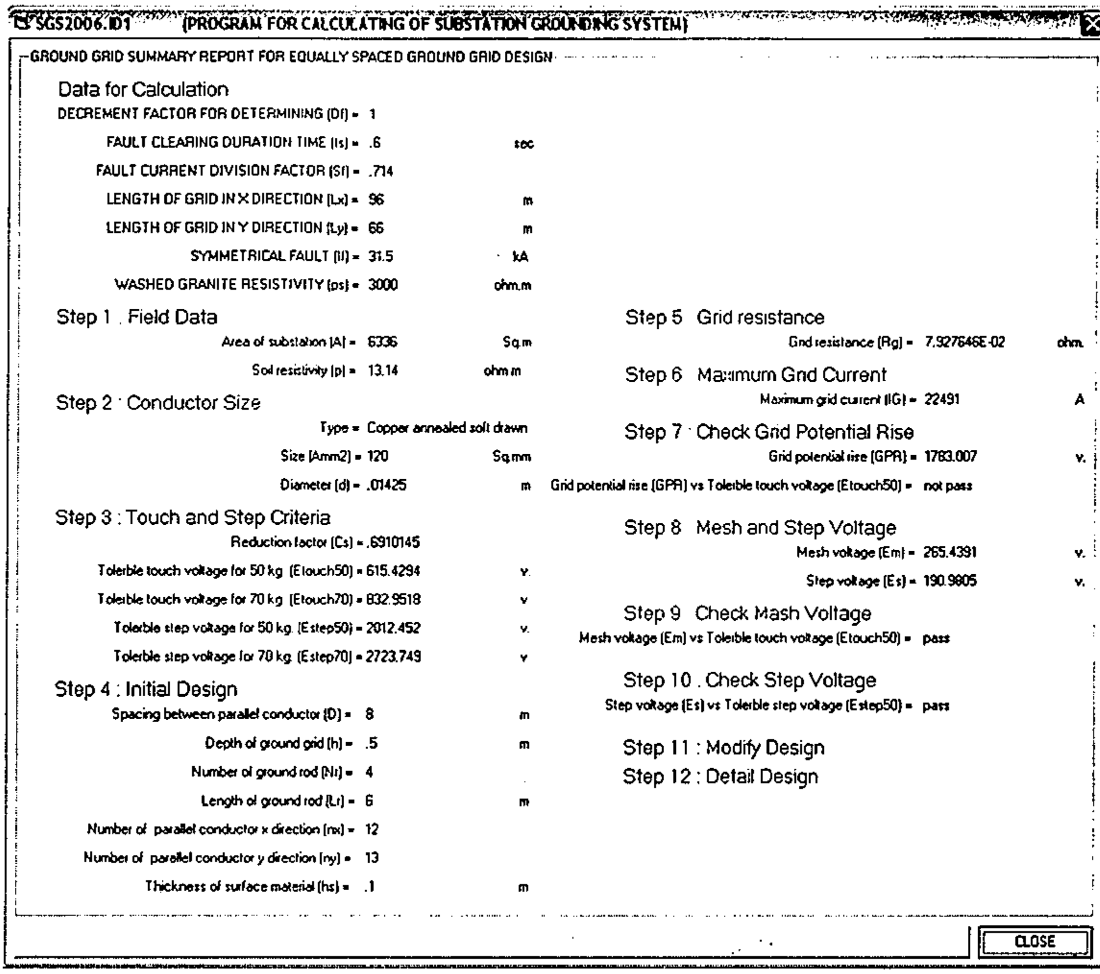
รูปที่ 4.14 หน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

- **ช่องผลลัพธ์**
  1. Conductor compression ratio for Lx side
  2. Conductor compression ratio for Ly side
  3. Number mesh for Lx side
  4. Number mesh for Ly side
  5. Percentage of the save material
  6. Spaced along for Lx side LIST
  7. Spaced along for Ly side LIST

- **วาดภาพ**
  1. รูปตะแกรงตาข่ายของระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Grid configuration for unequally spaced ground grid design)

- **ปุ่มควบคุม**
  1. ปุ่ม GRID เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปรากฏผลลัพธ์ที่ช่องผลลัพธ์ตามรายการที่ 1 ถึง 6 และรูปตะแกรงตาข่าย
  2. ปุ่ม CLOSE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ



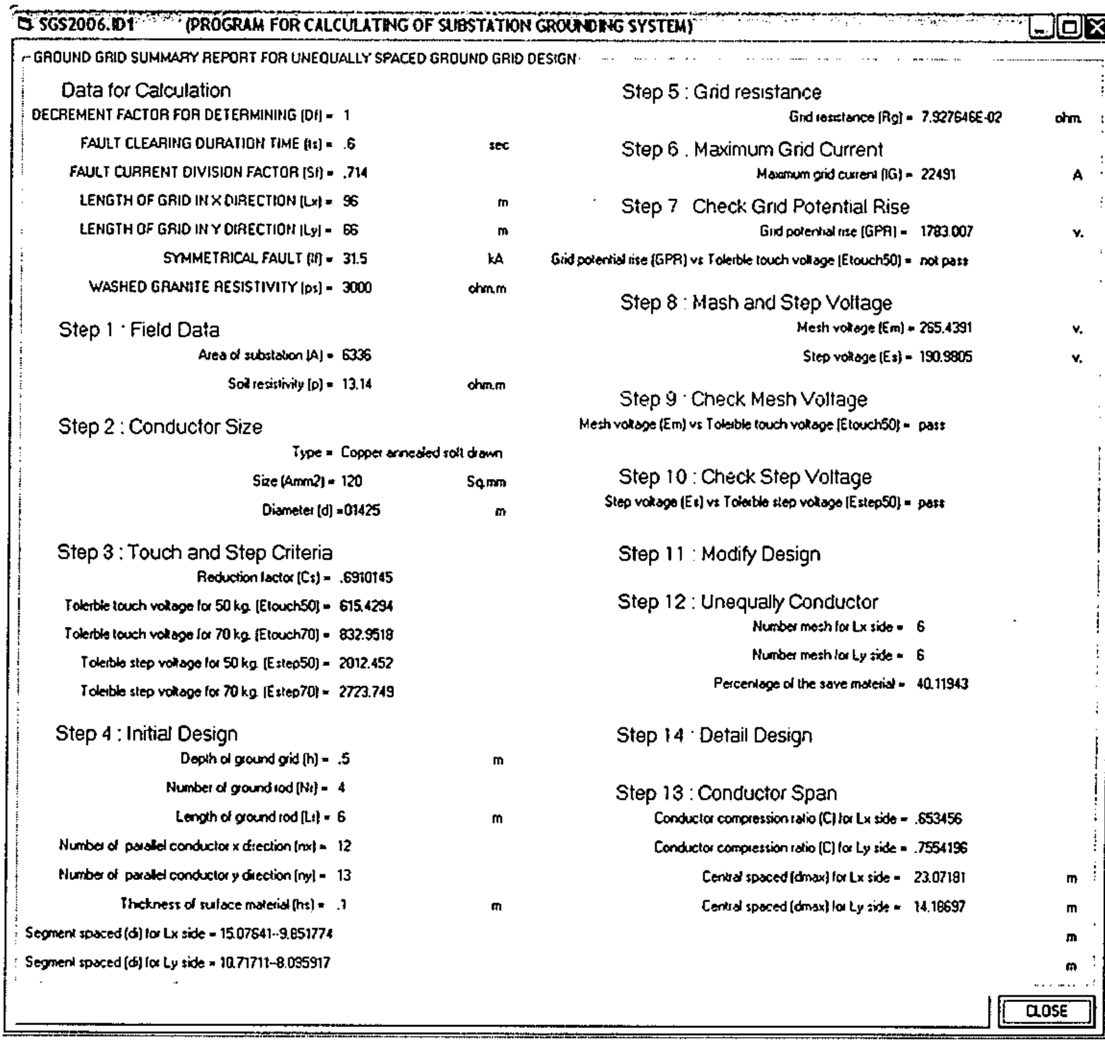
รูปที่ 4.15 หน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

- **ช่องผลลัพธ์**
  1. Data of calculation
  2. Step 1 Field data
  3. Step 2 Conductor size
  4. Step 3 Touch and step criteria
  5. Step 4 Initial design
  6. Step 5 Grid resistance
  7. Step 6 Maximum grid current
  8. Step 7 Check grid potential rise
  9. Step 8 Mesh and step voltage
  10. Step 9 Check mesh voltage

11. Step 10 Check step voltage
12. Step 11 Modify design
13. Step 12 Detail design

- **ปุ่มควบคุม** 1. ปุ่ม CLOSE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.16 หน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

- **ช่องผลลัพธ์** 1. Data of calculation

2. Step 1 Field data
3. Step 2 Conductor size
4. Step 3 Touch and step criteria
5. Step 4 Initial design
6. Step 5 Grid resistance
7. Step 6 Maximum grid current
8. Step 7 Check grid potential rise
9. Step 8 Mesh and step voltage
10. Step 9 Check mesh voltage
11. Step 10 Check step voltage
12. Step 11 Modify design
13. Step 12 Unequally conductor
14. Step 13 Conductor span
15. Step 14 Detail design

- **ปุ่มควบคุม**

1. ปุ่ม CLOSE เมื่อคลิกที่ปุ่มนี้จะปิดหน้าต่างรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

4.2 ผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

4.2.1 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดอนพุต

ข้อมูลสำหรับการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดอนพุต จังหวัดสระบุรี ขนาด 115 / 22 kV.

Area of substation, A = 6336 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.877

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, $\rho = 4.92\ \Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 31.5 kA(rms.)

Washed granite resistivity, $\rho s = 3000\ \Omega - m$

ขั้นตอนที่ 1

สำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 6336 m^2

Soil resistivity, ρ = 4.92 ohm-m

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน (Conductor size)

เลือกตัวนำต่อลงดินชนิด Copper annealed soft-drawn มีค่าคงตัววัสดุดังนี้

Ambient temperature, $T_a = 40\ ^oc$

$K_0 = 234\ ^oc$

Max.allowable temperature, $T_m = 700\ ^oc$

Resistivity of ground conductor at reference temperature, $\rho_r = 1.72\ \mu\Omega - cm$

Thermal capacity per unit volume, $TACP = 3.42\ J/\left(cm^3 \times {^oc}\right)$

Thermal coefficient of resistivity at reference temperature, $\alpha_r = 0.00393\ \ 1/^oc$

Time duration of current flow, t_c = 0.6 sec

Formula

Conductor cross section area, A_{mm^2}

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o - T_a}\right)}}$$

Calculation

$$A_{mm^2} = 31.5 / \sqrt{\left((0.000342)/(0.6 \times 0.00393 \times 1.72)\right) \ln\left((234+700)/(234+40)\right)}$$

$$A_{mm^2} = 97.95502 \quad mm^2$$

ดังนั้นเลือกใช้ขนาดของตัวนำ

Conductor cross section area, A_{mm^2} =120 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.01425 m

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch and Step)

Equivalent radius of a foot, a = 0.09 m

Formula

The reflection factor, k

$$k = \frac{(\rho - \rho_s)}{(\rho + \rho_s)}$$

Calculation

$$k = (4.92 - 3000)/(4.92 + 3000)$$

$$k = -0.99672537$$

Formula

Reduction factor, C_s

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

Calculation

$$C_s = 1 - ((0.09 \times (1 - (4.92/3000)))/((2 \times 0.1) + 0.09))$$

$$C_s = 0.6902$$

Formula

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50}$

$$E_{touch50} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$$E_{touch50} = \left(1000 + \left(1.5 \times 0.6902 \times 3000\right)\right) \times \left(0.116 / \sqrt{0.6}\right)$$

$$E_{touch50} = 614.8805 \text{ v}$$

Formula

Tolerable step voltage for 50 kg, E_{step50}

$$E_{step50} = \left(R_B + 6C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$$E_{step50} = \left(1000 + \left(6 \times 0.6902 \times 3000\right)\right) \times \left(0.116 / \sqrt{0.6}\right)$$

$$E_{step50} = 2010.256 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 4

กำหนดการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Length of ground rod, L_r = 6 m

Max.length of grid in x direction, L_x = 96 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 66 m

Number of ground conductor x direction, n_x = 12

Number of ground conductor y direction, n_y = 13

Number of ground rod, n_r = 4

Spacing between parallel conductor, D = 8 m

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grid resistance)

Formula

Total length of conductor, L_c

$L_c = (n_x L_x) + (n_y L_y)$

Calculation

$L_c = (12 \times 96) + (13 \times 66)$

$L_c = 2010\ \text{m}$

Formula

Total length of ground conductor, L_T

$L_T = L_c + (N_r L_r)$

Calculation

$L_T = 2010 + (4 \times 6)$

$L_T = 2034\ \text{m}$

Formula

Grid resistance, R_g

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

Calculation

$R_g = 4.92 \times ((1/2034) + (1/\sqrt{(20 \times 6336)}) \times (1 + (1/(1 + 0.5\sqrt{(20/6336)}))$

$R_g = 0.0297\ \Omega$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณกระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current)

Formula

Symmetrical grid current, I_g

$I_g = S_f I_f$

Calculation

$I_g = 0.877 \times 31.5$

$I_g = 27.6255\ \text{kA (rms.)}$

Formula

Maximum grid current, I_G

$I_G = D_f I_g 1000$

Calculation

$I_G = 1 \times 27.6255 \times 1000$

$I_G = 27625.5$ A

ขั้นตอนที่ 7

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check grid potential rise)

Formula

Grid potential rise, GPR

$GPR = I_G R_g$

Calculation

$GPR = 27625.5 \times 0.0297$

$GPR = 820.477$ v

Check

$GPR < E_{touch50}$

820.477 > 614.8805 not pass

ขั้นตอนที่ 8

คำนวณแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Mesh and step)

Corrective weighting factor, $K_{ii} = 1$

Grid reference depth, h_o = 1 m

Max. Distance between any two points on the grid, D_m = 116.4989 m

The peripheral length of grid, L_p = 324 m

Formula

Geometric factor composed, n_a

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}$$

Calculation

$n_a = (2 \times 2010)/324$

$n_a = 12.4074$

Formula

Geometric factor composed, n_b

$$n_b = \left(\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}} \right)^{(1/2)}$$

Calculation

$n_b = \left(324 / \left(4 \times \sqrt{6336}\right)\right) \wedge (1/2)$

$n_b = 1.00876$

Formula

Geometric factor composed, n_c

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

Calculation

$n_c = ((96 \times 66)/6336) \wedge ((0.7 \times 6336)/(96 \times 66))$

$n_c = 1$

Formula

Geometric factor composed, n_d

$$n_d = \frac{D_m}{\left(L_x^2 + L_y^2\right)^{1/2}}$$

Calculation

$n_d = 116.4989 / ((96 \wedge 2) + (66 \wedge 2)) \wedge (1/2)$

$n_d = 1$

Formula

Geometric factor, n

$n = n_a n_b n_c n_d$

Calculation

$n = 12.4074 \times 1.00876 \times 1 \times 1$

$n = 12.516$

Formula

Corrective weighting factor, K_h

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

Calculation

$$K_h = \sqrt{(1+(0.5/1))}$$

$$K_h = 1.225$$

Formula

Spacing factor for mesh voltage, K_m

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

Calculation

$$remark = ((8\times 8)/(16\times 0.5\times 0.01425)) + ((8+2\times 0.5)\wedge 2/(8\times 8\times 0.01425)) - ((0.5/(4\times 0.01425)))$$

$$remark = 641.447$$

$$K_m = (1/2\pi)\times((\ln(641.447)) + ((1/1.225)\times \ln(8/(\pi\times(2\times 12.516-1))))$$

$$K_m = 0.7371$$

Formula

Correct factor for grid geometry, K_i

$$K_i = 0.644 + (0.148n)$$

Calculation

$$K_i = 0.644 + (0.148\times 12.516)$$

$$K_i = 2.496$$

Formula

Effective length for mesh voltage, L_M

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

Calculation

$$L_M = 2010 + (1.55 + (1.22\times(6/((96\wedge 2+66\wedge 2)\wedge 0.5))))\times 24$$

$$L_M = 2048.7079$$

Formula

Effective length for step voltage, L_S

$$L_S = (0.75L_C) + (0.85L_R)$$

Calculation

$$L_S = (0.75 \times 2010) + (0.85 \times 24)$$

$$L_S = 1527.9$$

Formula

Spacing factor for step voltage, K_S

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

Calculation

$$K_s = (1/\pi) \times \left(\left(1/(2 \times 0.5)\right) + \left(1/(8+0.5)\right) + \left(\left(1 - 0.5 \wedge (12.516-2)\right)/8\right)\right)$$

$$K_s = 0.3955$$

Formula

Mesh voltage, E_m

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

Calculation

$$E_m = (4.92 \times 27625.5 \times 0.7371 \times 2.496)/2048.7079$$

$$E_m = 122.0 \text{ v}$$

Formula

Step voltage, E_S

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S}$$

Calculation

$$E_s = (4.92 \times 27625.5 \times 0.3955 \times 2.496)/1527.9$$

$$E_s = 87.8 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 9

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check mesh voltage)

Check

$E_m < E_{touch50}$

122.0 < 614.8805 pass

ขั้นตอนที่ 10

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check step voltage)

Check

$E_s < E_{step50}$

87.8 < 2010.256 pass

ขั้นตอนที่ 11

ปรับปรุงการออกแบบ (Modify design) เมื่อระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

ขั้นตอนที่ 12

คำนวณจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Uunequally conductor)

Formula

Total number of the ground conductor for equally spaced grid, n_{xy}

$n_{xy} = n_x + n_y$

Calculation

$n_{xy} = 12 + 13$

$n_{xy} = 25$

Formula

Coefficients, α

$\alpha = 121.2e^{(-0.3 n_{xy})} + 1.2664$

Calculation

$\alpha = 121.2e(-0.3 \times 25) + 1.2664$

$\alpha = 1.3334$

Formula

Coefficients, β

$$\beta = -92.6e^{-0.07n_n} + 66.337$$

Calculation

$$\beta = (-92.6)e(-0.07 \times 25) + 66.337$$

$$\beta = 50.2455$$

Formula

Percentage of the save material, λ

$$\lambda = \frac{\alpha \frac{\beta}{100}}{1 + \left(\alpha \frac{\beta}{100}\right)} 100\%$$

Calculation

$$\lambda = ((1.3334 \times (50.2455/100)/(1 + 1.3334 \times (50.2455/100)))) \times 100$$

$$\lambda = 40.1188$$

Formula

Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction, $n_x^{'}$

$$n_x^{'} = n_x(1 - \lambda)$$

Calculation

$$n_x^{'} = 12 \times (1 - (40.1188/100))$$

$$n_x^{'} = 7.1857$$

Select number of ground conductor for unequally spaced grid x direction

$$n_x^{'} = 7$$

Number of ground conductor x direction, $n_y = 13$

Percentage of the save material, $\lambda = 40.1188$

Formula

Number of ground conductor for unequally spaced grid y direction, $n_y^{'}$

$$n_y^{'} = n_y(1 - \lambda)$$

Calculation

$$n_y^{'} = 13 \times (1 - (40.1188/100))$$

$$n_y^{'} = 7.73$$

Select number of ground conductor for unequally spaced grid y direction

$$n_y^{'} = 7$$

ขั้นตอนที่ 13

คำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor span) จากตารางที่ 2.6 ค่า ส.ป.ส. สำหรับคำนวณหาค่า Conductor compression ratio มีดังนี้

Coefficients, $a_{01} = 0.44$

Coefficients, $a_{02} = -77.43$

Coefficients, $a_{03} = 15.63$

Coefficients, $a_{11} = 0.033$

Coefficients, $a_{12} = 76.9$

Coefficients, $a_{13} = -15.56$

Coefficients, $a_{21} = -0.067$

Coefficients, $a_{22} = 0.50$

<u>Formula</u>

Coefficients, a_0

$$a_0 = a_{01} + a_{02}k + a_{03}k^2$$

<u>Calculation</u>

$$a_0 = 0.44 + ((-77.43) \times (-0.9967)) + ((15.63 \times (-0.9967) \wedge 2)$$

$$a_0 = 93.14149$$

<u>Formula</u>

Coefficients, a_1

$$a_1 = a_{11} + a_{12}k + a_{13}k^2$$

<u>Calculation</u>

$$a_1 = 0.033 + (76.9 \times (-0.9967)) + ((-15.56) \times (-0.9967) \wedge 2)$$

$$a_1 = -92.0707$$

<u>Formula</u>

Coefficients, a_2

$$a_2 = a_{21} + a_{22}k$$

<u>Calculation</u>

$$a_2 = (-0.067) + (0.50 \times (-0.9967))$$

$$a_2 = -0.565$$

Formula

Coefficients b for L_x side, b

$$b = -0.3503 - 9.6311e^{-0.0366L_x}$$

Calculation

$$b = (-0.3503) - 9.6311e(-0.03666 \times 96)$$

$$b = -0.6355576$$

Formula

Conductor compression ratio C for L_x side, C

$$C = a_0 + a_1 e^{0.0001h} + a_2 e^{bh}$$

Calculation

$$C = 93.1414 + ((-92.0707)e(0.0001 \times 0.5)) + ((-0.565)e((-0.6355576) \times 0.5))$$

$$C = 0.655$$

Formula

Central conductor span for L_x side, d_{max}

$$d_{max} = \frac{L_x(1-C)}{2\left(1 - C^{\left(\frac{(n_y'-1)}{2}\right)}\right)}$$

Calculation

$$d_{max} = (96 \times (1 - 0.655)) / (2 \times (1 - 0.655 \wedge ((7-1)/2)))$$

$$d_{max} = 23.03 \text{ m}$$

Formula

Number of segment L_x side, m

$$m = \left(\frac{(n_y'-1)}{2}\right) - 1$$

Calculation

$$m = ((7-1)/2) - 1$$

$$m = 2$$

Formula

Conductor span of the i^{th} segment for L_x side, d_i

$$d_i = d_{max} C^i$$

Calculation

$$d_1 = 23.03 \times (0.655 \wedge 1)$$

$$d_1 = 15.08 \text{ m}$$

$$d_2 = 23.03 \times (0.655 \wedge 2)$$

$$d_2 = 9.88 \text{ m}$$

Formula

Coefficients b for L_y side, b

$$b = -0.3503 - 9.6311 e^{-0.0366 L_y}$$

Calculation

$$b = (-0.3503) - 9.6311 e(-0.03666 \times 66)$$

$$b = -1.207$$

Formula

Conductor compression ratio C for L_y side, C

$$C = a_0 + a_1 e^{0.0001 h} + a_2 e^{bh}$$

Calculation

$$C = 93.1414 + ((-92.0707) e(0.0001 \times 0.5)) + ((-0.565) e((-1.207) \times 0.5))$$

$$C = 0.757$$

Formula

Central conductor span for L_y side, d_{max}

$$d_{max} = \frac{L_y (1 - C)}{2\left(1 - C^{\left(\frac{(n_x' - 1)}{2}\right)}\right)}$$

Calculation

$$d_{max} = (66 \times (1 - 0.757)) / (2 \times (1 - 0.757 \wedge ((7-1)/2)))$$

$$d_{max} = 14.16 \text{ m}$$

Formula

Number of segment L_y side, m

$$m = \left(\frac{\left(n_x^{'} - 1\right)}{2}\right) - 1$$

Calculation

$m = ((7-1)/2) - 1$

$m = 2$

Formula

Conductor span of the i^{th} segment for L_y side, d_i

$d_i = d_{\max} C^i$

Calculation

$d_1 = 14.16 \times (0.757 \wedge 1)$

$d_1 = 10.72$ m

$d_2 = 14.16 \times (0.757 \wedge 2)$

$d_2 = 8.11$ m

ขั้นตอนที่ 14

สรุปรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 6336 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.877

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, $\rho = 4.92\ \Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 31.5 kA(rms.)

Washed granite resistivity, $\rho s = 3000\ \Omega - m$

Conductor cross section area, A_{mm^2} =120 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.01425 m

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50} = 614.8805$ v

Tolerable step voltage for 50 kg, $E_{step50} = 2010.256$ v

Max.length of grid in x direction, L_x = 96 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 66 m

Grid resistance, $R_g = 0.0297\ \Omega$

Maximum grid current, $I_G = 27625.5$ A

Grid potential rise, $GPR = 820.477$ v

Mesh voltage, $E_m = 122.0$ v

Step voltage, $E_s = 87.8$ v

Percentage of the save material, $\lambda = 40.1188$

Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction, $\dot{n}_x = 7$

Number of ground conductor for unequally spaced grid y direction, $\dot{n}_y = 7$

Conductor compression ratio C for L_x side, $C = 0.655$

Conductor compression ratio C for L_y side, $C = 0.757$

Spacing between parallel conductor L_x side:

$d_2 = 9.88$ m, $d_1 = 15.08$ m, $d_{max} = 23.03$ m,

$d_{max} = 23.03$ m, $d_1 = 15.08$ m, $d_2 = 9.88$ m

Spacing between parallel conductor L_y side:

$d_2 = 8.11$ m, $d_1 = 10.72$ m, $d_{max} = 14.16$ m,

$d_{max} = 14.16$ m, $d_1 = 10.72$ m, $d_2 = 8.11$ m

4.2.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น

ข้อมูลสำหรับการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น จังหวัดสระแก้ว ขนาด 115 / 22 kv.

Area of substation, A = 6336 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.714

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, ρ = 13.14 $\Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 31.5 kA(rms.)

Washed granite resistivity, ρs = 3000 $\Omega - m$

ขั้นตอนที่ 1

สำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 6336 m^2

Soil resistivity, ρ = 13.14 ohm-m

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน (Conductor size)

เลือกตัวนำต่อลงดินชนิด Copper annealed soft-drawn มีค่าคงตัววัสดุดังนี้ (ตารางที่ 2.1)

Ambient temperature, T_a = 40 ^oc

K_0=234 ^oc

Max.allowable temperature, T_m = 700 ^oc

Resistivity of ground conductor at reference temperature, ρ_r = 1.72 $\mu\Omega - cm$

Thermal capacity per unit volume, $TACP$ = 3.42 $J/\left(cm^3 \times {}^oc\right)$

Thermal coefficient of resistivity at reference temperature, α_r = 0.00393 $1/^oc$

Time duration of current flow, t_c = 0.6 sec

Formula

Conductor cross section area, A_{mm^2}

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o - T_a}\right)}}$$

Calculation

$$A_{mm^2} = 31.5 / \sqrt{((0.000342)/(0.6 \times 0.00393 \times 1.72)) \ln((234+700)/(234+40))}$$

$$A_{mm^2} = 97.95502 \ \ mm^2$$

ดังนั้นเลือกใช้ขนาดของตัวนำ

Conductor cross section area, A_{mm^2} =120 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.01425 m

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch and Step)

Equivalent radius of a foot, $a = 0.09$ m

Formula

The reflection factor, k

$$k = \frac{(\rho - \rho_s)}{(\rho + \rho_s)}$$

Calculation

$$k = (13.14 - 3000)/(13.14 + 3000)$$

$$k = -0.9912$$

Formula

Reduction factor, C_s

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

Calculation

$$C_s = 1 - ((0.09 \times (1 - (13.14/3000)))/((2 \times 0.1) + 0.09))$$

$$C_s = 0.6910$$

Formula

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50}$

$$E_{touch50} = \left(R_B + 1.5C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$$E_{touch50} = \left(1000 + \left(1.5 \times 0.6910 \times 3000\right)\right) \times \left(0.116 / \sqrt{0.6}\right)$$

$$E_{touch50} = 615.4196 \text{ v}$$

Formula

Tolerable step voltage for 50 kg, E_{step50}

$$E_{step50} = \left(R_B + 6C_s\rho_s\right)\left(\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}\right)$$

Calculation

$$E_{step50} = \left(1000 + \left(6 \times 0.6910 \times 3000\right)\right) \times \left(0.116 / \sqrt{0.6}\right)$$

$$E_{step50} = 2012.4124 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 4

กำหนดการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Length of ground rod, L_r = 6 m

Max.length of grid in x direction, L_x = 96 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 66 m

Number of ground conductor x direction, n_x = 12

Number of ground conductor y direction, n_y = 13

Number of ground rod, n_r = 4

Spacing between parallel conductor, D = 8 m

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grid resistance)

<u>Formula</u>

Total length of conductor, L_c

$$L_c = (n_y L_x) + (n_y L_y)$$

<u>Calculation</u>

$$L_c = (12 \times 96) + (13 \times 66)$$

$$L_c = 2010 \text{ m}$$

<u>Formula</u>

Total length of ground conductor, L_T

$$L_T = L_c + (N_r L_r)$$

<u>Calculation</u>

$$L_T = 2010 + (4 \times 6)$$

$$L_T = 2034 \text{ m}$$

<u>Formula</u>

Grid resistance, R_g

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

<u>Calculation</u>

$$R_g = 13.14 \times ((1/2034) + (1/\sqrt{(20 \times 6336)}) \times (1 + (1/(1 + 0.5\sqrt{(20/6336)}))$$

$$R_g = 0.0792 \ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6

คำนวณกระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current)

<u>Formula</u>

Symmetrical grid current, I_g

$$I_g = S_f I_f$$

<u>Calculation</u>

$$I_g = 0.714 \times 31.5$$

$$I_g = 22.491 \text{ kA (rms.)}$$

Formula

Maximum grid current, I_G

$$I_G = D_f I_g 1000$$

Calculation

$$I_G = 1 \times 22.491 \times 1000$$

$$I_G = 22491 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check grid potential rise)

Formula

Grid potential rise, GPR

$$GPR = I_G R_g$$

Calculation

$$GPR = 22491 \times 0.0792$$

$$GPR = 1781.2872 \text{ v}$$

Check

$$GPR < E_{touch50}$$

1781.2872 > 615.4196 not pass

ขั้นตอนที่ 8

คำนวณแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Mesh and step)

Corrective weighting factor, $K_{ii} = 1$

Grid reference depth, h_o = 1 m

Max.distance between any two points on the grid, D_m = 116.4989 m

The peripheral length of grid, L_p = 324 m

Formula

Geometric factor composed, n_a

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

Calculation

$$n_a = (2 \times 2010)/324$$

$$n_a = 12.4074$$

Formula

Geometric factor composed, n_b

$$n_b = \left(\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}} \right)^{(1/2)}$$

Calculation

$$n_b = \left(324 / \left(4 \times \sqrt{6336}\right)\right) \wedge (1/2)$$

$$n_b = 1.00876$$

Formula

Geometric factor composed, n_c

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

Calculation

$$n_c = ((96 \times 66) / 6336) \wedge ((0.7 \times 6336) / (96 \times 66))$$

$$n_c = 1$$

Formula

Geometric factor composed, n_d

$$n_d = \frac{D_m}{\left(L_x^2 + L_y^2\right)^{1/2}}$$

Calculation

$$n_d = 116.4989 / \left((96 \wedge 2) + (66 \wedge 2)\right) \wedge (1/2)$$

$$n_d = 1$$

Formula

Geometric factor, n

$$n = n_a n_b n_c n_d$$

Calculation

$$n = 12.4074 \times 1.00876 \times 1 \times 1$$

$$n = 12.516$$

Formula

Corrective weighting factor, K_h

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

Calculation

$$K_h = \sqrt{(1+(0.5/1))}$$

$$K_h = 1.225$$

Formula

Spacing factor for mesh voltage, K_m

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

Calculation

$$remark = ((8\times 8)/(16\times 0.5\times 0.01425))+((8+2\times 0.5)\wedge 2/(8\times 8\times 0.01425))-((0.5/(4\times 0.01425)))$$

$$remark = 641.447$$

$$K_m = (1/2\pi)\times((\ln(641.447))+((1/1.225)\times \ln(8/(\pi\times(2\times 12.516-1))))$$

$$K_m = 0.7371$$

Formula

Correct factor for grid geometry, K_i

$$K_i = 0.644+(0.148n)$$

Calculation

$$K_i = 0.644+(0.148\times 12.516)$$

$$K_i = 2.496$$

Formula

Effective length for mesh voltage, L_M

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

Calculation

$$L_M = 2010+(1.55+(1.22\times(6/((96\wedge 2+66\wedge 2)\wedge 0.5))))\times 24$$

$$L_M = 2048.7079$$

Formula

Effective length for step voltage, L_S

$$L_S = (0.75L_C) + (0.85L_R)$$

Calculation

$$L_S = (0.75 \times 2010) + (0.85 \times 24)$$

$$L_S = 1527.9$$

Formula

Spacing factor for step voltage, K_S

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

Calculation

$$K_s = (1/\pi)\times\left(\left(1/(2\times 0.5)\right) + \left(1/(8+0.5)\right) + \left(\left(1-0.5\wedge(12.516-2)\right)/8\right)\right)$$

$$K_s = 0.3955$$

Formula

Mesh voltage, E_m

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M}$$

Calculation

$$E_m = (13.14\times 22491\times 0.7371\times 2.496)/2048.7079$$

$$E_m = 265.3964 \text{ v}$$

Formula

Step voltage, E_S

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S}$$

Calculation

$$E_s = (13.14\times 22491\times 0.3955\times 2.496)/1527.9$$

$$E_s = 190.9414 \text{ v}$$

ขั้นตอนที่ 9

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check mesh voltage)

Check

$E_m < E_{touch50}$

265.3964 < 615.4196 pass

ขั้นตอนที่ 10

คำนวณประเมินความปลอดภัย (Check step voltage)

Check

$E_s < E_{step50}$

190.9414 < 2012.4124 pass

ขั้นตอนที่ 11

ปรับปรุงการออกแบบ (Modify design) เมื่อระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบเบื้องต้น (Initial design)

ขั้นตอนที่ 12

คำนวณจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Unequally conductor)

Formula

Total number of the ground conductor for equally spaced grid, n_{xy}

$n_{xy} = n_x + n_y$

Calculation

$n_{xy} = 12 + 13$

$n_{xy} = 25$

Formula

Coefficients, α

$\alpha = 121.2e^{(-0.3n_n)} + 1.2664$

Calculation

$\alpha = 121.2e(-0.3 \times 25) + 1.2664$

$\alpha = 1.3334$

Formula

Coefficients, β

$$\beta = -92.6e^{-0.07n_{xy}} + 66.337$$

Calculation

$$\beta = (-92.6)e(-0.07 \times 25) + 66.337$$

$$\beta = 50.2455$$

Formula

Percentage of the save material, λ

$$\lambda = \frac{\alpha \frac{\beta}{100}}{1 + \left(\alpha \frac{\beta}{100} \right)} 100\%$$

Calculation

$$\lambda = ((1.3334 \times (50.2455/100)/(1 + 1.3334 \times (50.2455/100)))) \times 100$$

$$\lambda = 40.1188$$

Formula

Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction, $n_x^{'}$

$$n_x^{'} = n_x (1 - \lambda)$$

Calculation

$$n_x^{'} = 12 \times (1 - (40.1188/100))$$

$$n_x^{'} = 7.1857$$

Select number of ground conductor for unequally spaced grid x direction

$$n_x^{'} = 7$$

Number of ground conductor x direction, $n_y = 13$

Percentage of the save material, $\lambda = 40.1188$

Formula

Number of ground conductor for unequally spaced grid y direction, $n_y^{'}$

$$n_y^{'} = n_y (1 - \lambda)$$

Calculation

$$n_y^{'} = 13 \times (1 - (40.1188/100))$$

$$n_y^{'} = 7.73$$

Select number of ground conductor for unequally spaced grid y direction

$$n_y^{'} = 7$$

ขั้นตอนที่ 13

คำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย (Conductor span) จากตารางที่ 2.6 ค่า ส.ป.ส. สำหรับคำนวณหาค่า Conductor compression ratio มีดังนี้

Coefficients, $a_{01} = 0.44$

Coefficients, $a_{02} = -77.43$

Coefficients, $a_{03} = 15.63$

Coefficients, $a_{11} = 0.033$

Coefficients, $a_{12} = 76.9$

Coefficients, $a_{13} = -15.56$

Coefficients, $a_{21} = -0.067$

Coefficients, $a_{22} = 0.50$

Formula

Coefficients, a_0

$$a_0 = a_{01} + a_{02}k + a_{03}k^2$$

Calculation

$$a_0 = 0.44 + ((-77.43)\times(-0.9912)) + ((15.63\times(-0.9912)\wedge 2)$$

$$a_0 = 92.5447$$

Formula

Coefficients, a_1

$$a_1 = a_{11} + a_{12}k + a_{13}k^2$$

Calculation

$$a_1 = 0.033 + (76.9\times(-0.9912)) + ((-15.56)\times(-0.9912)\wedge 2)$$

$$a_1 = -91.4776$$

Formula

Coefficients, a_2

$$a_2 = a_{21} + a_{22}k$$

Calculation

$$a_2 = (-0.067) + (0.50\times(-0.9912))$$

$$a_2 = -0.5626$$

Formula

Coefficients b for L_x side, b

$b = -0.3503 - 9.6311e^{-0.03666L_x}$

Calculation

$b = (-0.3503) - 9.6311e(-0.03666 \times 96)$

$b = -0.6355576$

Formula

Conductor compression ratio C for L_x side, C

$C = a_0 + a_1 e^{0.0001h} + a_2 e^{bh}$

Calculation

$C = 92.5447 + ((-91.4776)e(0.0001 \times 0.5)) + ((-0.5626)e((-0.6355576) \times 0.5))$

$C = 0.6530$

Formula

Central conductor span for L_x side, d_{max}

$$d_{max} = \frac{L_x(1-C)}{2\left(1 - C^{\left(\frac{(n_x^{'}-1)}{2}\right)}\right)}$$

Calculation

$d_{max} = (96 \times (1 - 0.6530)) / (2 \times (1 - 0.655 \wedge ((7-1)/2)))$

$d_{max} = 23.1658$ m

Formula

Number of segment L_x side, m

$$m = \left(\frac{(n_y^{'} - 1)}{2}\right) - 1$$

Calculation

$m = ((7-1)/2) - 1$

$m = 2$

Formula

Conductor span of the i^{th} segment for L_x side, d_i

$$d_i = d_{max} C^i$$

Calculation

$$d_1 = 23.1658 \times (0.6530 \wedge 1)$$

$$d_1 = 15.1272 \text{ m}$$

$$d_2 = 23.1658 \times (0.6530 \wedge 2)$$

$$d_2 = 9.8781 \text{ m}$$

Formula

Coefficients b for L_y side, b

$$b = -0.3503 - 9.6311 e^{-0.0366 L_y}$$

Calculation

$$b = (-0.3503) - 9.6311 e(-0.03666 \times 66)$$

$$b = -1.207$$

Formula

Conductor compression ratio C for L_y side, C

$$C = a_0 + a_1 e^{0.0001h} + a_2 e^{bh}$$

Calculation

$$C = 92.5447 + ((-91.4776)e(0.0001 \times 0.5)) + ((-0.5626)e((-1.207) \times 0.5))$$

$$C = 0.7548$$

Formula

Central conductor span for L_y side, d_{max}

$$d_{max} = \frac{L_y(1-C)}{2\left(1 - C^{\left(\frac{(n_y - 1)}{2}\right)}\right)}$$

Calculation

$$d_{max} = (66 \times (1 - 0.7548) / (2 \times (1 - 0.7548 \wedge ((7-1)/2)))$$

$$d_{max} = 14.1964 \text{ m}$$

Formula

Number of segment L_y side, m

$$m = \left(\frac{\left(n_x^{'} - 1\right)}{2}\right) - 1$$

Calculation

$m = ((7-1)/2) - 1$

$m = 2$

Formula

Conductor span of the i^{th} segment for L_y side, d_i

$d_i = d_{\max} C^i$

Calculation

$d_1 = 14.1964 \times (0.7548 \wedge 1)$

$d_1 = 10.7154$ m

$d_2 = 14.1964 \times (0.7548 \wedge 2)$

$d_2 = 8.0880$ m

ขั้นตอนที่ 14

สรุปรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

Area of substation, A = 6336 m^2

Depth of ground grid, h = 0.5 m

Fault clearing duration time, t_s = 0.6 sec

Fault current division factor, S_f = 0.714

Thickness of surface materiel, h_s = 0.1 m

Soil resistivity, ρ = 13.14 $\Omega - m$

Symmetrical fault, I_f = 31.5 kA(rms.)

Washed granite resistivity, $\rho s = 3000\ \Omega - m$

Conductor cross section area, A_{mm^2} =120 Sq.mm

Diameter of grid conductor, d =0.01425 m

Tolerable touch voltage for 50 kg, $E_{touch50} = 615.4196$ v

Tolerable step voltage for 50 kg, $E_{step50} = 2012.4124$ v

Max.length of grid in x direction, L_x = 96 m

Max.length of grid in y direction, L_y = 66 m

Grid resistance, $R_g = 0.0792\ \Omega$

Maximum grid current, $I_G = 22491$ A

Grid potential rise, $GPR = 1781.2872$ v

Mesh voltage, $E_m = 265.3954$ v

Step voltage, $E_s = 190.9414$ v

Percentage of the save material, $\lambda = 40.1188$

Number of ground conductor for unequally spaced grid x direction, $n_x' = 7$

Number of ground conductor for unequally spaced grid y direction, $n_y' = 7$

Conductor compression ratio C for L_x side, $C = 0.6530$

Conductor compression ratio C for L_y side, $C = 0.7548$

Spacing between parallel conductor L_x side:

$d_2 = 9.8781$ m, $d_1 = 15.1272$ m, $d_{max} = 23.1658$ m,

$d_{max} = 23.1658$ m, $d_1 = 15.1272$ m, $d_2 = 9.8781$ m

Spacing between parallel conductor L_y side:

$d_2 = 8.0880$ m, $d_1 = 10.7154$ m, $d_{max} = 14.1964$ m,

$d_1 = 10.7154$ m, $d_2 = 8.0880$ m

บทที่ 5
บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการนำเสนอ วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยพิจารณาการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย ด้วยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม และใช้การประเมินความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดิน กรณีมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม จึงมีผลให้ระดับความปลอดภัยมากกว่ากรณีมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม และการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีการที่นำเสนอสามารถที่จะออกแบบระบบต่อลงดิน ทั้งในกรณีสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต้านทานจำเพาะระบบดินมีค่าสูง แต่ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าต่ำ ใช้สถานีไฟฟ้าย่อย A เป็นแบบจำลอง และกรณีสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต้านทานจำเพาะระบบดินมีค่าต่ำ แต่ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูง ใช้สถานีไฟฟ้าดอนพุดและสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น เป็นแบบจำลอง อีกทั้งเมื่อพิจารณาด้านความประหยัด เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบระหว่าง วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ และวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ [2] ปรากฏว่าผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ มีความความประหยัดมากกว่าการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยการทดลองคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A ในบทที่ 3 ซึ่งมีข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย A
Soil resistance, $\rho\,(\Omega-m)$	500
Washed granite resistivity, $\rho s\,(\Omega-m)$	3000
Area of substation, A (Sq.m)	7704
Length of grid in x direction, L_x (m)	107

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย A
Length of grid in y direction, L_y (m)	72
Thickness of surface materiel, h_s (m)	0.1
Depth of ground grid, h (m)	0.5
Symmetrical fault, I_f (kA)	5.28
Fault clearing duration time, t_s (sec)	0.6
Number of ground conductor x direction, n_x	27
Number of ground conductor y direction, n_y	38
Number of ground rod, n_r	4
Length of ground rod, L_r (m)	6

จากการออกแบบ ด้วยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยพิจารณาการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย ด้วยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A ยาว 3117 เมตร สำหรับวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ นั้นใช้ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายยาว 5625 เมตร ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถลดตัวนำของตะแกรงตาข่ายได้ถึง 43 % ดังที่แสดงข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย A	
	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอ
Grid resistance, Rg (ohm)	2.6044	2.6044
Maximum grid current, IG (A)	3168	3168
Grid potential rise, GPR (v)	8250.8659	8250.8659
Tolerable touch voltage, Etouch50 (v)	649.369	649.369
Tolerable step voltage , Estep50 (v)	2148.21	2148.21
Mesh voltage, Em (v)	648.0146	648.0146
Step voltage, Es (v)	1042.2260	1042.2260

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) ข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย A

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย A	
	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอ
Total length of all ground rod, LR (m)	24	24
Total length of conductor for equally, Lc (m)	5625	-
Percentage of save grounding grid, λ (%)	-	43
Total length of conductor for unequally, Lc (m)	-	3117

สำหรับสถานีไฟฟ้าดอนพุต สามารถจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยการทดลองคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต ในบทที่ 4 ซึ่งมีข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ดอนพุต

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต
Soil resistance, $\rho\,(\Omega-m)$	4.92
Washed granite resistivity, $\rho s\,(\Omega-m)$	3000
Area of substation, A (Sq.m)	6336
Length of grid in x direction, L_x (m)	96
Length of grid in y direction, L_y (m)	66
Thickness of surface materiel, h_s (m)	0.1
Depth of ground grid, h (m)	0.5
Symmetrical fault, I_f (kA)	31.5
Fault clearing duration time, t_s (sec)	0.6
Number of ground conductor x direction, n_x	12
Number of ground conductor y direction, n_y	13
Number of ground rod, n_r	4
Length of ground rod, L_r (m)	6

จากการออกแบบ ด้วยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยพิจารณาการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย ด้วยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ดอนพุต ยาว 1134 เมตร สำหรับวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ นั้นใช้ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายยาว 2010 เมตร ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถลดตัวนำของตะแกรงตาข่ายได้ถึง 40 % ดังที่แสดงข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต	
	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอ
Grid resistance, Rg (ohm)	0.0297	0.0297
Maximum grid current, I_G (A)	27625.5	27625.5
Grid potential rise, GPR (v)	820.477	820.477
Tolerable touch voltage, Etouch50 (v)	614.8805	614.8805
Tolerable step voltage , Estep50 (v)	2010.256	2010.256
Mesh voltage, Em (v)	122.0	122.0
Step voltage, Es (v)	87.8	87.8
Total length of all ground rod, L_R (m)	24	24
Total length of conductor for equally, Lc (m)	2010	-
Percentage of save grounding grid, λ (%)	-	40
Total length of conductor for unequally, Lc (m)	-	1134

และสถานีไฟฟ้าวังน้ำเย็น สามารถจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยการทดลองคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย วังน้ำเย็น ในบทที่ 4 ซึ่งมีข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น
Soil resistance, $\rho\,(\Omega - m)$	13.14
Washed granite resistivity, $\rho s\,(\Omega - m)$	3000
Area of substation, A (Sq.m)	6336
Length of grid in x direction, L_x (m)	96
Length of grid in y direction, L_y (m)	66
Thickness of surface materiel, h_s (m)	0.1
Depth of ground grid, h (m)	0.5
Symmetrical fault, I_f (kA)	31.5
Fault clearing duration time, t_s (sec)	0.6
Number of ground conductor x direction, n_x	12
Number of ground conductor y direction, n_y	13
Number of ground rod, n_r	4
Length of ground rod, L_r (m)	6

จากการออกแบบ ด้วยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยพิจารณาการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย ด้วยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็นยาว 1134 เมตร สำหรับวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ นั้นใช้ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายยาว 2010 เมตร ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถลดตัวนำของตะแกรงตาข่ายได้ถึง 40 % ดังที่แสดงข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็นดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น	
	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอ
Grid resistance, Rg (ohm)	0.0792	0.0792
Maximum grid current, IG (A)	22491	22491

ตารางที่ 5.6 (ต่อ) ข้อมูลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย วังน้ำเย็น	
	สม่ำเสมอ	ไม่สม่ำเสมอ
Grid resistance, Rg (ohm)	0.0792	0.0792
Maximum grid current, IG (A)	22491	22491
Grid potential rise, GPR (v)	1781.2872	1781.2872
Tolerable touch voltage, Etouch50 (v)	615.4196	615.4196
Tolerable step voltage , Estep50 (v)	2012.4124	2012.4124
Mesh voltage, Em (v)	265.3964	265.3964
Step voltage, Es (v)	190.9414	190.9414
Total length of all ground rod, LR (m)	24	24
Total length of conductor for equally, Lc (m)	2010	-
Percentage of save grounding grid, λ (%)	-	40
Total length of conductor for unequally, Lc (m)	-	1134

อีกทั้งสามารถจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองกับการออกแบบจริง ซึ่งมีข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต และสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย	
	ดอนพุต	วังน้ำเย็น
Soil resistance, $\rho\,(\Omega - m)$	4.92	13.14
Washed granite resistivity, $\rho s\,(\Omega - m)$	3000	3000
Area of substation, A (Sq.m)	6336	6336
Length of grid in x direction, L_x (m)	96	96
Length of grid in y direction, L_y (m)	66	66
Thickness of surface materiel, h_s (m)	0.1	0.1
Depth of ground grid, h (m)	0.5	0.5

ตารางที่ 5.7 (ต่อ) ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต และสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย	
	ดอนพุต	วังน้ำเย็น
Symmetrical fault, I_f (kA)	31.5	31.5
Fault clearing duration time, t_s (sec)	0.6	0.6
Number of ground conductor x direction, n_x	7	7
Number of ground conductor y direction, n_y	9	9
Number of ground rod, n_r	25	25
Length of ground rod, L_r (m)	6	6

จากการออกแบบ ด้วยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอที่ใช้ในการทดลอง โดยพิจารณาการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย ด้วยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่ต้องใช้ในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต 780 เมตร และสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็นยาว 780 เมตร สำหรับวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอที่ใช้ในการออกแบบจริง นั้นใช้ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายยาว 1266 เมตร สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถลดตัวนำของตะแกรงตาข่ายได้ถึง 37 % และสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็นยาว 1266 เมตร ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถลดตัวนำของตะแกรงตาข่ายได้ถึง 37 % ดังที่แสดงข้อมูลเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต ดังตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต	
	การทดลอง	ออกแบบจริง
Grid resistance, Rg (ohm)	0.03059	0.030739
Maximum grid current, IG (A)	27499.5	27499.5
Grid potential rise, GPR (v)	841.4264	845.3071
Tolerable touch voltage, Etouch50 (v)	614.8563	614.88
Tolerable step voltage , Estep50 (v)	2010.159	2010.256
Mesh voltage, Em (v)	129.3141	152.99

ตารางที่ 5.8 (ต่อ) ข้อมูลเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยดอนพุต	
	การทดลอง	ออกแบบจริง
Step voltage, Es (v)	88.3788	84.14
Total length of all ground rod, LR (m)	150	150
Total length of conductor for equally, Lc (m)	-	1266
Percentage of save grounding grid, λ (%)	37	-
Total length of conductor for unequally, Lc (m)	780	-

ตารางที่ 5.9 ข้อมูลเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อยวังน้ำเย็น	
	การทดลอง	ออกแบบจริง
Grid resistance, Rg (ohm)	0.08171	0.082096
Maximum grid current, IG (A)	22491	22491
Grid potential rise, GPR (v)	1837.936	1846.4211
Tolerable touch voltage, Etouch50 (v)	615.4294	615.4196
Tolerable step voltage , Estep50 (v)	2012.452	2012.4125
Mesh voltage, Em (v)	282.4621	334.17
Step voltage, Es (v)	193.0468	183.79
Total length of all ground rod, LR (m)	150	150
Total length of conductor for equally, Lc (m)	-	1266
Percentage of save grounding grid, λ (%)	37	-
Total length of conductor for unequally, Lc (m)	780	-

ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ มีผลให้จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายลดลง ซึ่งค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงมีความประหยัดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ ที่ต้องใช้ปริมาณตัวนำของตะแกรงตาข่ายมากกว่า

สำหรับข้อจำกัดของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือผู้ใช้พิจารณาความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนให้กับโปรแกรม เพื่อ

โปรแกรมจะได้ประมวลผลลัพธ์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ถูกต้อง ทั้งนี้ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ ในขั้นตอนของการคำนวณหาขนาดของตัวนำระบบต่อลงดินนั้น มีการใช้ค่าคงตัวของวัสดุตามตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นค่าคงที่ โดยคิดที่ 20 ^{o}C เป็นอุณหภูมิโดยประมาณการของประเทศในแถบที่มีอากาศหนาว จึงมีความสอดคล้องกันในการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับประเทศนั้นๆ หากแต่ประเทศไทยตั้งอยู่ในแถบที่มีอากาศร้อนชื้น ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าประเทศในแถบที่มีอากาศหนาวโดยประมาณ 10 ^{o}C ถึง 20 ^{o}C ดังนั้นค่าคงตัวของวัสดุตามตารางที่ 2.1 จึงควรใช้ค่าที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ซึ่งมีผลจะทำให้ขนาดตัวนำของระบบต่อลงดิน มีขนาดใหญ่ขึ้น หากแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการเผื่อขนาดตัวนำของระบบต่อลงดินเอาไว้แล้วในขั้นตอนของการคำนวณหาขนาดตัวนำของระบบต่อลงดิน จึงทำให้ระบบต่อลงดินที่ได้ทำการออกแบบมีระดับความปลอดภัยที่เชื่อถือได้ รวมถึงการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาเฉพาะระบบดินมีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ ซึ่งควรมีการพิจารณาระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะไม่สม่ำเสมอประกอบด้วย สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

เอกสารอ้างอิง

[1] ANSI/IEEE Std. 80-1986, "IEEE Guide for safety in AC substation grounding," New York, U.S.A, 1986.

[2] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for safety in AC substation grounding," New York, U.S.A, 2000.

[3] J.G. Sverak, "Progress in step and touch voltage equations of ANSI/IEEE Std 80-Historical Perspective." IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 3, pp. 732-767, Apr. 1998

[4] L. Huang, X. Chen, and H. Yan, "Study of unequally spaced grounding grids," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 716-722, Apr. 1995.

[5] B. Phithakwong, N. Kraisnachinda, S. Banjongjit, C. Chompoo-Inwai, and M. Kando, "New techniques the computer-aided design for substation grounding grids." Power Engineering Society winter meeting, 2000 IEEE Volume 3, 23-27, pp. 2011-2015, Jan. 2000.

[6] S.S.El-Dessouky, M. Abd El-Aziz, and A.Khamis, "An accurate design of substation grounding system aid expert system methodology," in Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference, Arlington, Virginia, USA, pp. 411-414, June 7-10, 1998.

[7] H.S. Lee, J.H. Kim, F.P. Dawalibi, and J. Ma, "Efficient ground grid designs in layered soils," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 3, pp. 745-751 , Jan. 1998

[8] W. M. Sun, J. L. He, Y. Q. Gao, R. Zeng, W. Wu, and Q. Su, "Optimal design analysis of grounding grids for Substations built in nonuniform soil," in Proceedings of International Power System Technology Conference, Perth, Australia, pp. 1455-1460, 2000.

[9] W. M. Sun, J. L. He, Y. Q. Gao, R. Zeng, J. Zou, and Z.C. Guan, "Optimal design of grounding system considering the influence of seasonal frozen soil layer," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 107-115, Jan. 2005.

ภาคผนวก

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

วิศวสารลาดกระบัง
Ladkrabang Engineering Journal
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,Bangkok 10520

วันที่ 3 เมษายน 2549

เลขที่อ้างอิง 1111

เรื่อง การตอบรับบทความ

เรียน คุณฉัตรชัย เทียบศรไชย ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ (Unequally Spaced Ground grids Design of Substation Grounding System) มาให้พิจารณาเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวสารลาดกระบัง บัดนี้ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการพิจารณาแล้วเห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 23 ฉบับที่ 2 เดือนมิถุนายน 2549

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

Unequally Spaced Ground Grids Design of Substation Grounding System

ฉัตรชัย เทียบศรไชย ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ควรคำนึงถึงต้นทุนในระดับที่ผลการออกแบบมีความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และไม่ก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ขณะที่มีแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดเกิดขึ้นเนื่องจากผลของลักษณะตะแกรงตาข่าย เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผิดพร่องอันเกิดจากธรรมชาติ หรือจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้าไหลกระจายสู่ระบบดินโดยผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย บทความเสนอ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยการพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายด้วยความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม ภายใต้ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยวางอยู่ในระบบดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ

ABSTRACT

The main functions of the design of the substation grounding system include economic under conditions ensuring safe and reliable operation of power system and ensuring human being's safety in the situation of grounding fault in power system. This paper presents the design of an unequally spaced substation grounding grids. The design of the grounding system considering the conductors spacing ratio by condition of the burial grounding system in soil which has uniform resistivity.

1. บทนำ

ความปลอดภัยเกิดจาก ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดีเท่านั้น โดยประเมินจากค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดเกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่มากกว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ เป็นข้อกำหนด ทั้งนี้ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยดังกล่าวนั้น ประกอบด้วยตัวนำที่วางขนานกัน และมีการเชื่อมต่อกันเป็นตะแกรงตาข่ายซึ่งมี หรือไม่มีแท่งดินเชื่อมต่อ กับจุดเชื่อมต่อของตะแกรงตาข่าย วางอยู่ใต้พื้นดินของสถานีไฟฟ้าย่อย และตะแกรงตาข่ายก็มีการเชื่อมต่อ กับโครงสร้างของอุปกรณ์ต่างๆ

2. ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ขั้นตอนการคำนวณ ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ ประกอบด้วย 14 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนที่ 1

สำรวจข้อมูลเบื้องต้นสำหรับ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ขนาดพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย และค่าความต้านทานจำเพาะระบบดิน [1]

2.2 ขั้นตอนที่ 2

คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน (conductor size) จากสมการ [1]

$$A_{mm^2} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{TCAP10^{-4}}{t_c\alpha_r\rho_r}\right)\ln\left(\frac{K_o+T_m}{K_o-T_a}\right)}} \qquad (1)$$

เมื่อ A_{mm^2} = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (Sq.mm)

I_f = กระแสลัดวงจร (kA)

t_c = ระยะเวลาลัดวงจร (sec)

α_r = ส.ป.ส. อุณหภูมิความต้านทานที่ 0°c

ρ_r = ความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่ 0°c

T_m = อุณหภูมิที่ใช้งาน (°c)

T_a = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°c)

$TCAP$ = Thermal capacity per unit volume (J/cm^3/°c)

K_o $= (1/\alpha_0) or ((1/\alpha_0) - T_r)$

2.3 ขั้นตอนที่ 3

คำนวณแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch and Step) จากสมการ [1]

$$E_{touch50} = (R_H + 1.5C_s\rho_s)(0.116/\sqrt{t_s}) \qquad (2)$$

$$E_{step50} = (R_H + 6C_s\rho_s)(0.116/\sqrt{t_s}) \qquad (3)$$

เมื่อ $E_{touch50}$ = แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนัก 50 กก.สามารถทนได้ (v)

E_{step50} = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนัก 50 กก.สามารถทนได้ (v)

2.4 ขั้นตอนที่ 4

กำหนดการออกแบบเบื้องต้น (initial design) จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายในแต่ละด้าน จำนวนแท่งดิน และความลึกของตะแกรงตาข่าย [1]

2.5 ขั้นตอนที่ 5

คำนวณความต้านทานของระบบต่อลงดิน (grid resistance) จากสมการ [1]

$$R_g = \rho\left(\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1 + \frac{1}{h\sqrt{20/A}}\right)\right) \qquad (4)$$

เมื่อ R_g = ความต้านทานของตะแกรงตาข่าย (ohm)

ρ = ความต้านทานจำเพาะระบบดิน (ohm-m)

L_T = ความยาวทั้งหมดของตัวนำและแท่งดิน (m)

A = พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย (Sq.m)

h = ความลึกของตัวนำ (m)

2.6 ขั้นตอนที่ 6

คำนวณกระแสกริดสูงสุด (maximum grid current) จากสมการ [1]

$$I_G = D_f I_g 1000 \qquad (5)$$

เมื่อ I_G = กระแสกริดสูงสุด (A)

D_f = Decrement factor

I_g = กระแสกริดสมมาตร (A)

2.7 ขั้นตอนที่ 7

ประเมินความปลอดภัย (check grid potential rise) จากสมการ [1]

$$GPR < E_{touch50} \qquad (6)$$

เมื่อ GPR = แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวดิน (v)

สำหรับกรณีมีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 12 หรือกรณีไม่มีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 8

2.8 ขั้นตอนที่ 8

คำนวณแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (mesh and step) จากสมการ [1]

$$E_m = (\rho I_G K_m K_i)/L_M \qquad (7)$$

$$E_s = (\rho I_G K_s K_i)/L_s \qquad (8)$$

เมื่อ E_m = แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (v)

E_s = แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (v)

K_m = ส.ป.ส. เนื่องจากระยะระหว่างตัวนำสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด

K_i = ส.ป.ส. เนื่องจากรูปทรงของตะแกรงตาข่าย

L_M = ความยาวทั้งหมดของตัวนำและแท่งดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (m)

K_s = ส.ป.ส. เนื่องจากระยะระหว่างตัวนำสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

L_s = ความยาวทั้งหมดของตัวนำและแท่งดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (m)

2.9 ขั้นตอนที่ 9

ประเมินความปลอดภัย (check mesh voltage) จากสมการ [1]

$$E_m < E_{touch50} \quad (9)$$

สำหรับกรณีมีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 10 หรือกรณีไม่มีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 11

2.10 ขั้นตอนที่ 10

ประเมินความปลอดภัย (check step voltage) จากสมการ [1]

$$E_s < E_{step50} \quad (10)$$

สำหรับกรณีมีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 12 หรือกรณีไม่มีความปลอดภัยไปทำขั้นตอนที่ 11

2.11 ขั้นตอนที่ 11

ปรับปรุงการออกแบบ (modify design) เมื่อระบบต่อลงดินไม่มีความปลอดภัย โดยเปลี่ยนแปลงการออกแบบเบื้องต้นที่ได้กำหนดในขั้นตอนที่ 4 [1]

2.12 ขั้นตอนที่ 12

คำนวณจำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอ (unequally conductor) จากสมการ [2]

$$n_x' = n_x(1-\lambda) \quad (11)$$

$$n_y' = n_y(1-\lambda) \quad (12)$$

โดยที่ $n_{xy} = n_x + n_y$ (13)

$$\beta = (-92.6)e(-0.07n_{xy}) + 66.337 \quad (14)$$

$$\alpha = 121.2e(-0.4n_{xy}) + 1.4864; 8 < n_{xy} \le 20 \quad (15)$$

$$\alpha = 121.2e(-0.3n_{xy}) + 1.2664; 20 < n_{xy} \le 30 \quad (16)$$

$$\alpha = 121.2e(-0.4n_{xy}) + 1.1400; n_{xy} > 30 \quad (17)$$

$$\lambda = ((\alpha/(\beta/100))/(1+\alpha/(\beta/100)))100 \quad (18)$$

เมื่อ n_x' = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอแนวแกน x

n_y' = จำนวนตัวนำของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันไม่สม่ำเสมอแนวแกน y

n_{xy} = จำนวนตัวนำทั้งหมดของตะแกรงตาข่ายที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำห่างกันสม่ำเสมอ

λ = เปอร์เซ็นการประหยัดวัสดุ (%)

β, α = ส.ป.ส. สำหรับคำนวณหาเปอร์เซ็นการประหยัดวัสดุ

2.13 ขั้นตอนที่ 13

คำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่าย (conductor span) จากสมการ [3, 4]

$$d_{max} = (L_x(1-C))/(1+C-2C^{(n_x'/2+1)}) \quad (19)$$

$$d_{max} = (L_y(1-C))/(1+C-2C^{(n_y'/2+1)}) \quad (20)$$

$$d_{max} = (L_x(1-C))/(2(1-C^{(n_x'-1)/2})) \quad (21)$$

$$d_{max} = (L_y(1-C))/(2(1-C^{(n_y'-1)/2})) \quad (22)$$

$$d_i = d_{max}C^i \quad (23)$$

โดยที่ $m = (n_y'/2) - 1$ (24)

$$m = (n_x'/2) - 1 \quad (25)$$

$$m = ((n_y' - 1)/2) - 1 \quad (26)$$

$$m = ((n_x' - 1)/2) - 1 \quad (27)$$

$$C = a_0 + a_1e(0.0001h) + a_2e(bh) \quad (28)$$

$$b = (-0.3503) - 9.6311e(-0.0366L_x) \quad (29)$$

$$b = (-0.3503) - 9.6311e(-0.0366L_y) \quad (30)$$

$$a_0 = a_{01} + a_{02}k + a_{03}k^2 \quad (31)$$

$$a_1 = a_{11} + a_{12}k + a_{13}k^2 \quad (32)$$

$$a_2 = a_{21} + a_{22}k \quad (33)$$

$$k = (\rho - \rho_s)/(\rho + \rho_s) \quad (34)$$

เมื่อ a_0, a_1, a_2, b = ส.ป.ส. สำหรับคำนวณหาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม

C = อัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม

d_i = ระยะห่างระหว่างตัวนำช่องย่อยลำดับที่ i (m)

d_{max} = ระยะห่างระหว่างตัวนำสูงสุด (m)

m = จำนวนช่องย่อยตะแกรงตาข่าย

L_x = ความยาวตัวนำแนวแกน x (m)

L_y = ความยาวตัวนำแนวแกน y (m)

k = แฟคเตอร์การสะท้อน

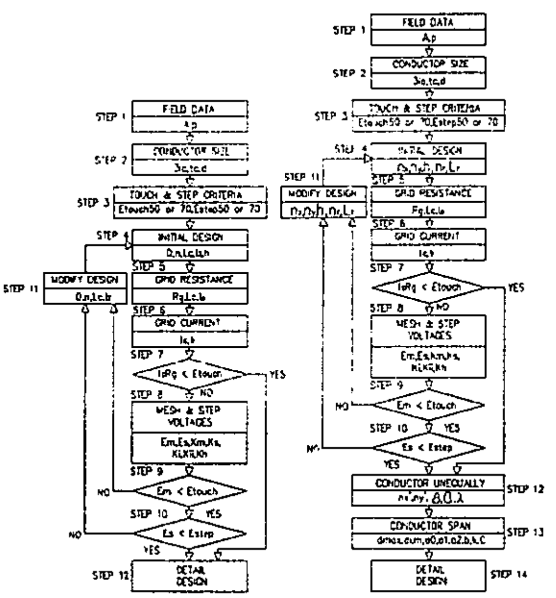
สำหรับสมการ(21), (22), (26), (27) กรณีตะแกรงตาข่ายด้านที่พิจารณามีจำนวนตัวนำเป็นจำนวนคี่ สมการ (19), (20), (24), (25) กรณีตะแกรงตาข่ายด้านที่พิจารณามีจำนวนตัวนำเป็นจำนวนคู่

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_{01} , a_{02} , a_{03} , a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{22} อยู่ในความสัมพันธ์ของความยาวตัวนำของตะแกรงตาข่าย [4]

ส.ป.ส.	$L_{x,y} \le 100$	$100 < L_{x,y} \le 175$	$100 < L_{x,y} \le 250$	$L_{x,y} > 250$
a_{01}	0.44	0.38	-0.51	0.32
a_{02}	-77.43	-50.65	33.18	-15.44
a_{03}	15.63	13.88	18.49	13.42
a_{11}	0.033	0.19	1.15	0.38
a_{12}	76.9	50.21	32.82	15.16
a_{13}	-15.56	-13.83	-18.44	-13.38
a_{21}	-0.067	-0.037	-0.029	-0.022
a_{22}	0.50	0.41	0.34	0.26

2.14 ขั้นตอนที่ 14

สรุปรายละเอียดการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย



รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

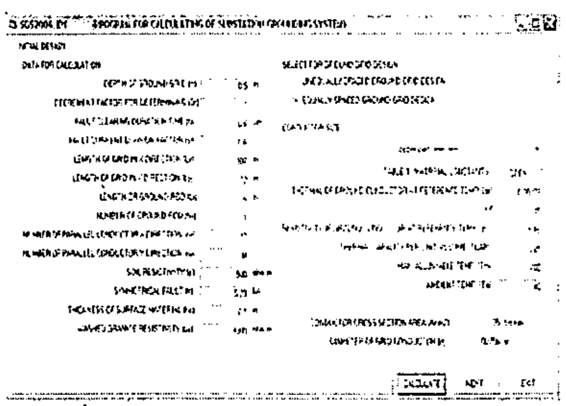
(a) ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ (ANSI/IEEE Std.80-2000)

(b) ที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ

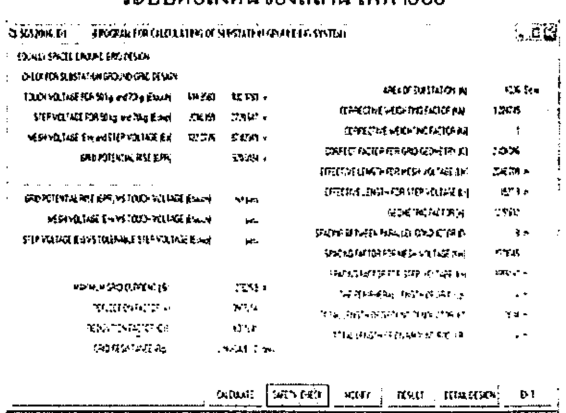
3. การทดลอง

ผลลัพธ์การทดลอง ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ และระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอด้วยโปรแกรม SGS2006.ID1 (Program for calculating of substation grounding system)

สถานีไฟฟ้าย่อย A ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย อ้างอิงจาก Study of unequally spaced grounding grids. และสถานีไฟฟ้าย่อย B ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย (สถานีไฟฟ้าดอนพุด จังหวัดสระบุรี ขนาด 115/22 kv) อ้างอิงจากเอกสารการทดสอบของ บริษัท ศรีอู่ทอง จำกัด ทั้งนี้ในการทดลอง ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ กรณีมนุษย์มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม เป็นข้อกำหนด ในการประเมินความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

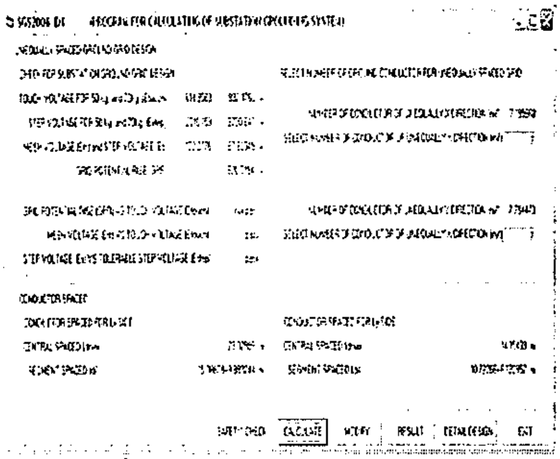


รูปที่ 3.1 แสดงหน้าจอสำหรับรับข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

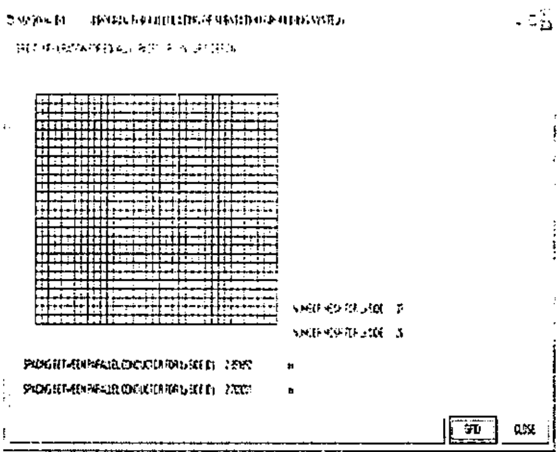


รูปที่ 3.2 แสดงหน้าจอสำหรับการออกแบบ

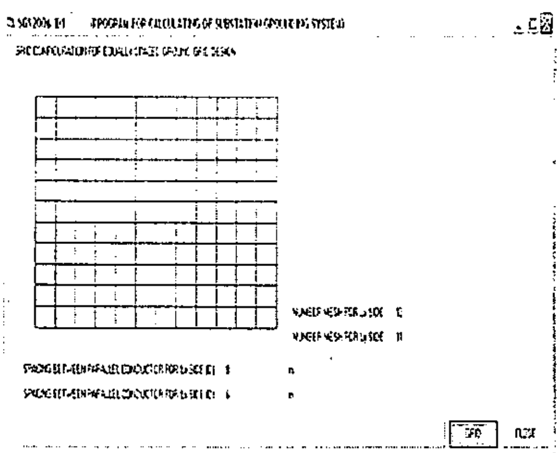
ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่าง
ตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ



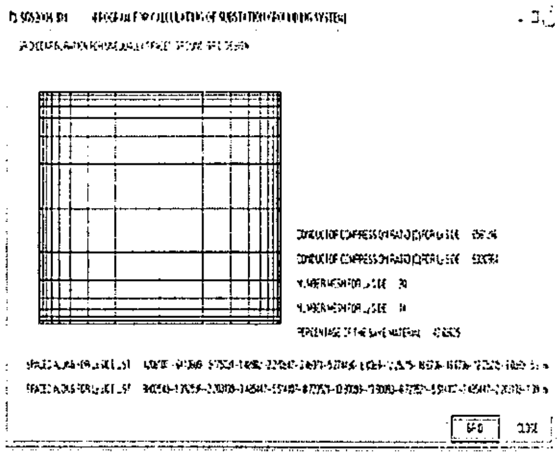
รูปที่ 3.3 แสดงหน้าจอสำหรับการออกแบบ
ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่าง
ตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ



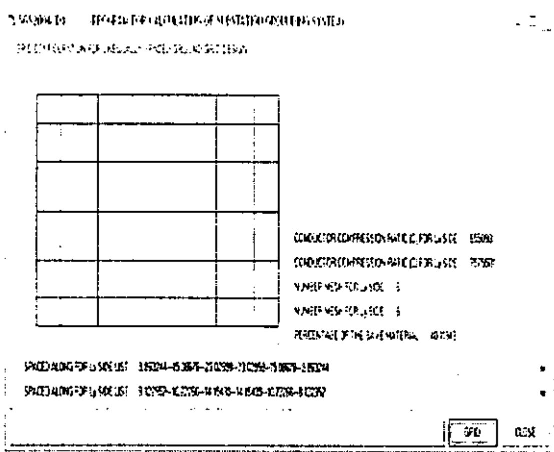
รูปที่ 3.4 แสดงหน้าจอผลการออกแบบระบบต่อลงดิน
ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรง
ตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ (สถานีไฟฟ้าย่อย A)



รูปที่ 3.5 แสดงหน้าจอผลการออกแบบระบบต่อลงดิน
ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรง
ตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ (สถานีไฟฟ้าย่อย B)



รูปที่ 3.6 แสดงหน้าจอผลการออกแบบระบบต่อลงดิน
ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรง
ตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ (สถานีไฟฟ้าย่อย A)



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าจอผลการออกแบบระบบต่อลงดิน
ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรง
ตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ (สถานีไฟฟ้าย่อย B)

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

รายการ	สถานีไฟฟ้าย่อย	
	A	B
ความต้านทานจำเพาะระบบดิน, ρ (ohm-m)	500	4.92
พื้นที่สถานีไฟฟ้า, A (Sq.m)	7704	6336
กระแสลัดวงจร, I_f (kA)	5.28	31.5
ความหนาของหิน, h_s (m)	0.1	0.1
ความลึกตะแกรงตาข่าย, h (m)	0.5	0.5
ระยะเวลาลัดวงจร, t_s (sec)	0.6	0.6
ความต้านทานจำเพาะหินกรวด, ρ_s (ohm-m)	3000	3000
ความกว้าง, L_y (m) × ความยาว, L_x (m)	72 × 107	66 × 96

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

DESCRIPTION	SUBSTATION	
	A	B
Grid resistance, Rg (ohm)	2.60441	0.02968
Maximum grid current, IG (A)	3168	27625.5
Grid potential rise, GPR (v)	8250.87	820.019
Tolerable touch voltage, Etouch50 (v)	649.370	614.856
Mash voltage, Em (v)	648.230	122.077
Tolerable step voltage, Estep50 (v)	2148.21	2010.15
Percentage of save grounding grid, λ (%)	42.6962	40.1194
Conductor compression ratio for Lx,C	0.65612	0.65509
Conductor compression ratio for Ly,C	0.63209	0.75750
Step voltage, Es (v)	1042.09	87.8334
Total length of all ground rod, LR (m)	24	24
Total length of conductor for equally, Lc (m)	5649	2010
Total length of conductor for unequally, Lc (m)	3117	1134

4. บทสรุป

จากการนำเสนอ วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยพิจารณาการจัดวางตัวนำของตะแกรงตาข่าย ด้วยอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวนำที่เหมาะสม และใช้การประเมินความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดิน กรณีมนุษย์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม จึงมีผลให้ระดับความปลอดภัยมากกว่ากรณีมนุษย์น้ำหนัก 70 กิโลกรัม และการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีการที่นำเสนอ สามารถที่จะออกแบบระบบต่อลงดิน ทั้งในกรณีสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต้านทานจำเพาะระบบดินมีค่าสูง แต่ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าต่ำ ใช้สถานีไฟฟ้าย่อย A เป็นแบบจำลอง และกรณีสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่าความต้านทานจำเพาะระบบดินมีค่าต่ำ แต่ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูง ใช้สถานีไฟฟ้าย่อย B เป็นแบบจำลอง อีกทั้งเมื่อพิจารณาด้านความประหยัด ปรากฏว่าผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ [1] ต้องใช้ตัวนำของตะแกรงตาข่ายยาว 5649 เมตร สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย A และ 2010 เมตร สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย B ส่วนการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีการที่นำเสนอ นั้นใช้ตัวนำของตะแกรงตาข่ายยาว 3117 เมตร สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย A และ 1134 เมตร สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย B ซึ่งสามารถลดตัวนำของตะแกรงตาข่ายได้ถึง 42 % สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย A และ 40% สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย B นั้นคือเมื่อตัวนำของตะแกรงตาข่ายลดลง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงมีความประหยัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันสม่ำเสมอ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ บริษัท ศรีอู่ทอง จำกัด ที่อนุเคราะห์ข้อมูลสถานีไฟฟ้าย่อย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for safety in AC substation grounding," New York, U.S.A. 2000.

[2] L. Huang, X. Chen and H. Yan, "Study of unequally spaced grounding grids," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 716-722, Apr. 1995.

[3] W.- M. Sun, J.- L. He, Y.- Q. Gao, R. Zeng, W. Wu and Q. Su, "Optimal design analysis of grounding grids for Substations built in nonuniform soil," Proc. Int. Conf. Power System Technology, Perth, Australia, pp. 1455-1460, 2000.

[4] W.- M. Sun, J.- L. He, Y.- Q. Gao, R. Zeng, J. Zou and Z.- C. Guan, "Optimal design of grounding system considering the influence of seasonal frozen soil layer," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 107-115, Jan. 2005.

ประวัติผู้เขียน

นายฉัตรชัย เทียบศรไชย เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ.2517 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม ปีการศึกษา 2540

เข้าศึกษาระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2544 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท ในวิศวกรรมสารลาดกระบัง ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 เดือนมิถุนายน 2549

ผลงานทางวิชาการ

1. ฉัตรชัย เทียบศรไชย, ศุลี บรรจงจิตร, นิทัศน์ กฤษณจินดา. “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ” วิศวกรรมสารลาดกระบัง ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 เดือนมิถุนายน 2549