

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า
โดยใช้โปรแกรม MATLAB

GROUNDING SYSTEM DESIGN OF SUBSTATION
USING MATLAB PROGRAM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-020-032

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า
โดยใช้โปรแกรม MATLAB**

**GROUNDING SYSTEM DESIGN OF SUBSTATION
USING MATLAB PROGRAM**



T148786

**ประทีป คาพิจารณ์
PRATEEP KAPIJAN**

เลขหมู่.....
ตบทะเบียน **148786**
รับเดือนปี **23 11 2560**

b.00266901
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GROUNDING SYSTEM DESIGN OF SUBSTATION
USING MATLAB PROGRAM



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

2017

KMITL-2017-EN-M-020-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB
Thesis Title Grounding System Design of Substation using Matlab Program
นักศึกษา นายประทีป คาพิจารณ์
รหัสประจำตัว 56601075
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-032

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศุภกิตติ	โชติโก	
ผศ.ดร.พีรวัฒน์	ยุทธโกวิท	
รศ.ดร.นรเศรษฐ	พัฒนเดช	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.ศิริวัฒน์	โปธิเวชกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB
นักศึกษา	นายประทีป คาพิจารณ์
รหัสประจำตัว	56601075
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) ประเทศแคนาดา สำหรับการนำโปรแกรม CDEGS นั้นจำเป็นต้องเชื่อมต่ออุปกรณ์ Hard Lock เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ในขณะที่ใช้งาน ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ซื้อลิขสิทธิ์อุปกรณ์ Hard Lock ดังกล่าวมาเพื่อใช้งาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโปรแกรมทางเลือกสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ทดแทนโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS โดยโปรแกรมดังกล่าวถูกพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งตัวโปรแกรมได้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ การประมาณค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นในแนวระดับโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) และการคำนวณหาตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า เช่น ค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g), ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของกราวด์กริด(GPR), แรงดันไฟฟ้าเมช(E_m) และ แรงดันไฟฟ้าช่วงกาว(E_s) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการใช้งานโปรแกรมและการแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบ ทั้งนี้เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมาเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS พบว่าค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นในแนวระดับที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโมดูล RESAP ของโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS ส่วนการคำนวณหาตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความต้านทานกราวด์ กริด (R_g), ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของกราวด์กริด(GPR) และแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) ค่าที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโมดูล MALT ของโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาว (E_s) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากโมดูล MALT ของโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS เล็กน้อย

Thesis	Grounding System Design of Substation Using Matlab Program
Student	Mr.Prateep Kapijan
Student ID.	56601075
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

Currently, substation grounding system of Provincial Electricity Authority (PEA) is normally designed using CDEGS software which is a copyright of Safety Engineering Services & Technologic Limited (SES), Canada. For using the CDEGS program, a device called Hard Lock needs to be connected to the computer while using all the time and PEA bought the authenticated Hard Lock for this purpose.

This thesis presents a program for the design of substation grounding system as an alternative for CDEGS program. The program was developed using MATLAB program which can be divided into two main part: parameter estimation of horizontal two-layer soil using Genetic Algorithm (GA) and calculation of important parameters related to the design grounding system of substation, including the resistance ground grid (R_g), ground potential rise (GPR), touch voltage(E_m) and step voltage(E_s). This thesis gives how to use the program and the result from the operation. We found that the result from the alternative program was comparable to the CDEGS program. The parameter values of horizontal two-layer soil from MATLAB program were similar to the values from the RESAP modules of the CDEGS program. Moreover, the values of important parameters related to the grounding system design of substation, including the resistance ground grid (R_g), ground potential rise (GPR) and touch voltage (E_m) were also similar to the value from the MALT modules of CDEGS program. However, the step voltages value (E_s) from the MATLAB program was slightly different from the MALT modules of the CDEGS program.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาทั้งงานวิจัยและอื่นๆ จาก รศ.ดร.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.พีรวัฒน์ ยุทธโกวิท ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยแนะนำและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกเรื่อง จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ประทีป คาพิจารณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน.....	5
2.1.2 การหาค่าความต้านทานระบบกราวด์.....	6
2.1.3 การหาค่าความต้านทานที่เท้า (Footing Resistance).....	7
2.1.4 การหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว.....	8
2.1.5 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า.....	8
2.1.6 งานวิจัยในประเทศอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า.....	8
2.2 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ.....	12
2.3 หลักการสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ.....	12
2.4 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะด้วยวิธีเวนเนอร์.....	13
2.5 วิธีทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm).....	16
2.5.1 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding).....	17
2.5.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Population Initialization).....	18
2.5.3 ฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (Fitness Function).....	18
2.5.4 ตัวดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection).....	18
2.5.5 การดำเนินการสลับสายพันธุ์ (Crossover).....	19
2.5.6 การดำเนินการกลายพันธุ์ (Mutation).....	19
2.5.7 การแทนที่ (Replacement).....	19
2.5.8 การกำหนดการสิ้นสุดของการทำงาน.....	20
2.5.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์.....	20
2.6 ระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.1 นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดิน.....	21
2.6.2 หลักในการออกพิจารณาออกแบบระบบต่อลงดิน ตามมาตรฐาน IEEE-2000...	24
2.6.3 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย	25
2.6.4 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบต่อลงดิน	25
2.6.5 พิกัดกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์.....	26
2.6.6 การจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้.....	27
2.6.7 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ	30
2.6.8 การโรยวัสดุที่ผิวดินในพื้นที่บริเวณสถานีไฟฟ้า	33
2.6.9 พื้นฐานเหตุการณ์ การเกิดอันตรายต่อบุคคลเมื่อเกิดสภาวะกระแสผิตพร่อง	35
2.6.10 ขนาดและวัสดุของสายตัวนำต่อลงดิน	38
2.6.11 ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	41
บทที่ 3 โปรแกรม CDEGS.....	63
3.1 โมดูล RESAP	64
3.1.1 การวัด.....	64
3.1.2 การใช้ โมดูล RESAP	66
3.1.3 ตัวอย่างการรันโมดูลกรณีกำหนดให้เป็นดินสองชั้น.....	70
3.2 โมดูล MALT	71
3.2.1 แบบจำลองของดินใน MALT.....	71
3.2.2 การใช้ โมดูล MALT.....	72
3.2.3 ตัวอย่างการแสดงผล	75
บทที่ 4 ประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ออกแบบระบบต่อลงดิน.....	77
4.1 แนะนำโปรแกรม MATLAB.....	77
4.1.1 ความต้องการของระบบคอมพิวเตอร์ก่อนการติดตั้งโปรแกรม	78
4.1.2 ข้อดีของโปรแกรม MATLAB.....	78
4.1.3 การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB เบื้องต้น	79
4.1.4 การปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ทางรูปภาพ (Graphical User Interface).....	79
4.1.5 แนวคิดพื้นฐานการสร้าง Object ต่างๆในโปรแกรมทำงานประสานกัน.....	80
4.2 แนะนำโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า.....	88
4.2.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการออกแบบด้วยโปรแกรมการออกแบบระบบต่อ ลงดิน	88
4.2.2 การใช้โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน	88
บทที่ 5 ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า	97
5.1 สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	97
5.1.1 การหาค่าองค์ประกอบของดิน.....	97
5.1.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	100
5.2 สถานีไฟฟ้านางรอง	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.1 การหาค่าองค์ประกอบของดิน.....	106
5.2.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง	109
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	115
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	115
6.1.1 การหาค่าองค์ประกอบของดิน.....	116
6.1.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า.....	117
6.2 ข้อเสนอแนะ	119
เอกสารอ้างอิง	120
ภาคผนวก.....	123
ภาคผนวก ก.ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	124
ประวัติผู้เขียน.....	134



สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ของวัสดุ.....	40
2.2 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน	44
3.1 ความต้านทานดินที่ภาคสนาม สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	70
5.1 ความต้านทานจำเพาะปรากฏ (apparent resistivity) ที่วัดได้จากภาคสนามสถานีพิษณุโลก	397
5.2 ค่าองค์ประกอบต่างๆของชั้นดินสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	99
5.3 เปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	99
5.4 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3	105
5.5 เปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 ระหว่าง Uniform Soil กับ Nonuniform Soil.....	105
5.6 ความต้านทานจำเพาะปรากฏ (apparent resistivity) ที่วัดได้จากภาคสนามสถานีนางรอง..	106
5.7 ค่าองค์ประกอบต่างๆของชั้นดินสถานีไฟฟ้านางรอง	108
5.8 เปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้านางรอง	108
5.9 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง	114
5.10 เปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง ระหว่าง Uniform Soil กับ Nonuniform Soil.....	114
6.1 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	117
6.2 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง	117
6.3 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 ระหว่างดินแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น	118
6.4 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง ระหว่างดินแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น.....	118

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	12
2.2 หลักการประยุกต์สำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตามกฎของโอห์ม โดยมีแบตเตอรี่สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้า แอมมิเตอร์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และมีแท่งโลหะ(แท่งอิเล็กโทรด) สำหรับปักลงดินเพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน.....	13
2.3 เครื่องมือในการวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินโดยวิธี Wenner	14
2.4 ลักษณะของการวางขั้วกระแสไฟฟ้าและขั้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เป็นหลักการสำรวจเบื้องต้นของการสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสภาพใต้ผิวดิน.....	14
2.5 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม.....	17
2.6 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 10 โครโมโซม	18
2.7 การสุ่มเลือกสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่มาทำการสลับสายพันธุ	19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของกระแสผิดพลาด และค่าของ IF, If, และ Df ในช่วงเวลาการเกิดความผิดพลาด tf	23
2.9 แนวคัสต์ไฟฟ้า และเส้นคัสต์ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบๆ.....	25
2.10 แสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อหัวใจต่อน้ำหนักของสัตว์ในหลายๆพันธุกรรมซึ่งพิจารณาบนระยะเวลาของการช็อคของ กระแสไฟฟ้า.....	29
2.11 กระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้จะน้อยกว่าเส้นโค้งรูปตัว Z ของ Biegelmeier ที่เวลา 0.06 s ถึง 0.7s.....	29
2.12 แสดงวงจรการเกิดอุบัติเหตุเมื่อเกิดมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส.....	30
2.13 แสดงวงจรสมมูลย์ของมนุษย์ขณะได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส.....	30
2.14 แสดงวงจรการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว.....	31
2.15 แสดงวงจรสมมูลย์ที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว.....	32
2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง	35
2.17 การเกิดอันตรายต่อบุคคลเมื่อเกิดสภาวะกระแสผิดพลาด.....	36
2.18 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน(Transferred Potential).....	37
2.19 แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน	43
2.20 แท่งกราวด์รูดในดินสองชั้น.....	47
2.21 หลักในการพิจารณา Factor Km จากความต่างศักย์ต่างกันของแรงดันไฟฟ้า ระหว่างจุด X1 และ X2.....	50
2.22 ตำแหน่งความต่างศักย์ Em จากรูปแบบของ Electrode.....	53
2.23 โครงสร้างชั้นดิน ที่แบ่งออกเป็น 2 ชั้น.....	53
2.24 ค่าของ Factor Cm เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา H = 1 เมตร.....	54
2.25 ค่าของ Factor Cm เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนา H = 5 เมตร.....	55
2.26 ค่าของ Factor Cm เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา H = 10 เมตร.....	55
2.27 ตำแหน่งความต่างศักย์ไฟฟ้าของ mesh Voltage ที่นำมาพิจารณา.....	56
2.28 กราวด์กริด และกราวด์รูดฝังอยู่ในโครงสร้างชั้นดินแบบ 2 ชั้น.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.29 Factor Cm ของกราวด์กริดที่ต่อร่วมกับกราวด์รอต เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา 1 เมตร.....	57
2.30 Factor Cm ของกราวด์กริดที่ต่อร่วมกับกราวด์รอต เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา 5 เมตร.....	57
2.31 Factor Cm ของกราวด์กริดที่ต่อร่วมกับกราวด์รอต เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา 10 เมตร.....	58
2.32 ค่าของ Factor Cs เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนาH=1เมตร.....	60
2.33 ค่าของ Factor Cs เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนาH=5 เมตร.....	60
2.34 ค่าของ Factor Cs เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนาH=10 เมตร.....	61
2.35 ค่าของ Factor Cs เมื่อกราวด์กริดต่อกับกราวด์รอต โครงสร้างของดินชั้นบน หนา H = 1 เมตร.....	61
2.36 ค่าของ Factor Cs เมื่อกราวด์กริดต่อกับกราวด์รอต โครงสร้างของดินชั้นบน หนา H = 5 เมตร.....	62
2.37 ค่าของ Factor Cs เมื่อกราวด์กริดต่อกับกราวด์รอต โครงสร้างของดินชั้นบน หนา H = 10 เมตร.....	62
3.1 การวัดแบบ Wenner	64
3.2 การวัดแบบ Schlumberger	65
3.3 การวัดแบบ General	65
3.4 CDEGS Start-Up Window.....	66
3.5 RESAP Specific windows	67
3.6 การป้อนข้อมูล.....	68
3.7 การเลือกแบบจำลอง	68
3.8 การตั้งค่า	69
3.9 ผลค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้นของโมดูล RESAP	70
3.10 ดินสองชั้นในแนวนอน	71
3.11 MALT Specific windows	72
3.12 การสร้างแบบจำลองกราวด์กริด	73
3.13 ข้อมูลของดิน	73
3.14 หน้าจอของการ PLOT/REPORT/PRINT โมดูล MALT	74
3.15 ตัวอย่าง Report จากโมดูล MALT.....	75
3.16 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัส.....	76
3.17 แสดงแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว.....	76
4.1 รุ่นของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้	78
4.2 องค์ประกอบของวินโดว์เพื่อใช้สร้าง GUI.....	79
4.3 โครงร่างของกราฟิกคร่าวๆบนกระดาษที่จะนำมาสร้างโดย GUI	80
4.4 เมื่อคลิกที่ Link ชื่อ Layout Editor with completed GUI Layout	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.5 เมื่อคลิกที่ Link ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File.....	81
4.6 การเปิดวินโดว์ Layout Editor โดยการพิมพ์ guide ที่ MATLAB prompt ที่หน้า Command Window.....	82
4.7 วินโดว์ GUIDE Quick Start.....	82
4.8 วิธีการเพิ่มขนาดของพื้นที่การสร้าง GUI.....	83
4.9 วินโดว์ Property Inspector เพื่อการตั้งค่าของ Figure สำหรับ GUI.....	84
4.10 การสร้างองค์ประกอบ Object.....	85
4.11 แสดงวิธีการจัด Object.....	85
4.12 วินโดว์เตือนให้ Save ไฟล์ล่าสุด.....	86
4.13 วินโดว์ GUIDE เพื่อเลือกทางเดินของไฟล์.....	86
4.14 เมื่อลอง Run โปรแกรม.....	87
4.15 วินโดว์แรกของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า.....	88
4.16 วินโดว์ลำดับที่สองสำหรับป้อนข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	89
4.17 วินโดว์ลำดับที่สามสำหรับการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ.....	90
4.18 โปรแกรมทำการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ.....	91
4.19 วินโดว์ลำดับที่สี่สำหรับการหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด.....	92
4.20 โปรแกรมทำการหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด.....	92
4.21 รายงานการหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด.....	93
4.22 วินโดว์ลำดับที่ห้าสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า.....	94
4.23 วินโดว์สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า.....	94
4.24 รายงานการหาค่าความต้านทานกราวด์กริด.....	95
4.25 รายงานการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว.....	96
5.1 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 โดยใช้ MATLAB.....	98
5.2 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 โดยใช้โมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS.....	98
5.3 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3.....	100
5.4 วินโดว์แสดงการป้อนข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้า พิษณุโลก 3.....	101
5.5 วินโดว์แสดงการหาขนาดของตัวนำกราวด์กริดสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3.....	102
5.6 วินโดว์แสดงการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 ของโปรแกรม MATLAB.....	102
5.7 ค่าความต้านทานกราวด์กริด (Rg) และ Grid Potential Rise (GPR) ของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 จากโปรแกรม CDEGS.....	103
5.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ(Em) ของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 จากโปรแกรม CDEGS.....	104
5.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Es) ของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 จากโปรแกรม CDEGS.....	104
5.10 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้านางรอง โดยใช้ MATLAB.....	107
5.11 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้านางรองโดยใช้โมดูล RESAPของโปรแกรม CDEGS.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.12 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้านางรอง	109
5.13 วินโดว์แสดงการป้อนข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้านางรอง	110
5.14 วินโดว์แสดงการหาขนาดของตัวนำกราวด์กริดสถานีไฟฟ้านางรอง	111
5.15 วินโดว์แสดงการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง ของโปรแกรม MATLAB	111
5.16 ค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g) และ Grid Potential Rise (GPR) ของสถานีไฟฟ้านางรอง จากโปรแกรม CDEGS	112
5.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช(E_m) ของสถานีไฟฟ้านางรอง จากโปรแกรม CDEGS	113
5.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ของสถานีไฟฟ้านางรอง จากโปรแกรม CDEGS	113
6.1 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของดินสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3	116
6.2 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของดินสถานีไฟฟ้านางรอง	116



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย มีวัตถุประสงค์เพื่อปกป้องชีวิตของผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าให้ได้รับความปลอดภัยจากภาวะที่เกิดความผิดพลาด เพราะในขณะที่เกิดภาวะความผิดพลาดจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในและบริเวณรอบๆสถานีไฟฟ้าย่อย ความแตกต่างของแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองข้างในขณะที่มนุษย์เดินอยู่ในสถานีไฟฟ้า(Step Voltage) หรือเกิดขึ้นระหว่างเท้าและแขนในขณะที่มนุษย์สัมผัสกับอุปกรณ์ (Touch Voltage) จะทำให้มีกระแสไหลเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ที่มีค่ามากกว่ากระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ ก็จะทำให้เกิดอาการช็อกหรือเสียชีวิตได้ ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ดี จึงควรออกแบบไม่ให้แรงดันทั้งสองดังกล่าวมีค่าเกินกว่าที่มนุษย์จะทนได้ [1,17]

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย มีตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบหลายประการ คือ ขนาดของตัวนำ, ความลึกของตะแกรง, ขนาดของตะแกรง, จำนวนร่องตาข่าย, ความหนาของชั้นหินกรวด รวมไปถึงแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ใช้เป็นเกณฑ์ในความปลอดภัยของบุคคลที่ทำงานในสถานีไฟฟ้า แต่ในการหาตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้น จำเป็นที่จะต้องรู้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน(ρ) ก่อน ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้สำหรับการออกแบบ [1,17]

ในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) ประเทศแคนาดา ภายในโปรแกรม CDEGS จะประกอบไปด้วย 8 โมดูล แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 โมดูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ได้แก่ 1. โมดูล RESAP เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในภาคสนาม 2. MALT เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน เช่น คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินกระแสที่ไหลออกจากสายดิน แรงดันไฟฟ้าบนผิวดินแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว สำหรับการที่ใช้โปรแกรม CDEGS จะต้องใช้ Hard lock เสียเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ขณะที่ทำการออกแบบ ซึ่งปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมี Hard lock อยู่ 2 อัน เนื่องจากได้ซื้อลิขสิทธิ์มาเพียง 2 user ปัจจุบัน Hard lock ดังกล่าวอยู่ที่กองวิจัย สำนักงานใหญ่ และแผนกออกแบบสถานีไฟฟ้า สำนักงานใหญ่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [2]

การออกแบบสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะแยกออกเป็น 2 กรณี คือ การออกแบบสถานีไฟฟ้าถาวร และการออกแบบสถานีไฟฟ้าชั่วคราว สำหรับการออกแบบสถานีไฟฟ้าถาวรแผนกออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำนักงานใหญ่ จะเป็นผู้รับผิดชอบในการออกแบบ ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS ช่วยในการออกแบบได้ ส่วนการออกแบบสถานีไฟฟ้าชั่วคราวแผนกวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิศวกรรมและวางแผน การไฟฟ้าเขต จะเป็นผู้รับผิดชอบในการออกแบบ ซึ่งทั่วประเทศมีการไฟฟ้าเขตอยู่ 12 ที่ โดยแต่ละที่จะทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม excel ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขียนขึ้น ช่วยในการออกแบบ โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบจะพิจารณาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform soil) หลังจากนั้นหาขนาดสายตัวนำและออกแบบกรวดกริดเบื้องต้น แต่การออกแบบดังกล่าวยังมีความถูกต้องแม่นยำไม่มากนัก เพราะดินที่พบส่วนมากในธรรมชาติจะเป็นดินที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่มีการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform soil)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและนำเสนอการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบ ซึ่งประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (Graphical User Interface : GUI) [3] โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.การประมาณค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นในแนวระดับโดยวิธีทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm) และ 2.การคำนวณหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับระหว่างวิธีทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm)ที่ใช้โปรแกรม MATLAB กับโมดูล RESAP ของ โปรแกรม CDEGS ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ และเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า เช่น ค่าความต้านทานกรวดกริด, แรงดันไฟฟ้าเมช และ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ที่คำนวณหาโดยใช้โปรแกรม MATLAB กับที่คำนวณหาโดยใช้โมดูล MALT ของ โปรแกรม CDEGS ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับสามารถใช้วิธีทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการหาได้ ซึ่งค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำและมีความรวดเร็วใกล้เคียงกับโมดูล RESAP ของโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS และการหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณหาได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับโมดูล MALT ของโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ทฤษฎีเบื้องต้นในการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับเพื่อนำไปใช้กับโปรแกรมวิธีทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm)ใน MATLAB จากมาตรฐาน IEEE Std 81TM-2012, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.[16] และใช้ทฤษฎีการคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า จากมาตรฐาน IEEE Std 80TM-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding[17], บทความเรื่อง “New Method for Calculating Ground Resistance of Grounding Grids Buried in Horizon Two-Layer Soil” [18] และบทความเรื่อง “Nonuniformity Correction Factors for Maximum Mesh and Step Voltages of Ground Grids and Combined Ground Electrodes” [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาเฉพาะกราวด์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า
2. ไม่พิจารณาผลของดินที่ตำแหน่งไกลออกไปจากพื้นที่สถานีไฟฟ้า
3. ศึกษาความต้านทานจำเพาะของดินที่สภาพได้ผิวดินมีความไม่เป็นเนื้อเดียวของชั้นดิน
4. พิจารณาชั้นของดินออกเป็น 2 ชั้น ในแนวระดับเท่านั้น ซึ่งมีค่าองค์ประกอบของชั้นดินดังนี้ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนคือ ρ_1 , ความหนาของดินชั้นบน คือ h_1 , ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างคือ ρ_2 , และความหนาของดินชั้นล่างเป็นค่านันต์
5. ข้อมูลความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากภาคสนาม เป็นการวัดโดยวิธีของเวนเนอร์เท่านั้น

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ของมาตรฐาน IEEE Std 80-2000 เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินในทางปฏิบัติ และนำทฤษฎีเบื้องต้นในการหาค่าองค์ประกอบของดินมาใช้กับโปรแกรมวิธีทางพันธุกรรม
2. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ใช้วิธีทางพันธุกรรม(Genetic Algorithm) เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ
3. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ งานวิจัย Xiaobin เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าความต้านทานกราวด์กริดที่พิจารณาดินเป็นดินสองชั้น (Two-layers Soil)
4. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ งานวิจัย Salama,Chow เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าความต้านทานกราวด์กริดที่พิจารณาดินเป็นดินสองชั้น (Two-layers Soil)
5. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ งานวิจัย Nahman เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่พิจารณาดินเป็นดินสองชั้น (Two-layers Soil)
6. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ของโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 2012 เพื่อเขียนโปรแกรม
7. ศึกษาการใช้โปรแกรม CDEGS 2 โมดูล คือ 1.โมดูล RESAP เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ และ 2.โมดูล MALT เพื่อใช้คำนวณหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า
8. เขียน โปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีฟ้าโดยใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2012 เพื่อหาค่าองค์ประกอบของดิน 2 ชั้นในแนวระดับ โดยใช้วิธีทางพันธุกรรม และคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า
9. ทดสอบโปรแกรม ด้วยการเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับที่ได้กับค่าที่ได้จากโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS และเปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ได้กับค่าที่ได้จากโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS
10. แก้ไขและพัฒนาโปรแกรมให้สมบูรณ์
11. สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์
12. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ ความสามารถในการออกแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า รวมทั้งการเขียนโปรแกรมทางวิศวกรรม
2. ได้รับความรู้ และสามารถใช้อินเตอร์ RESAP และโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าได้
3. นำโปรแกรมที่สร้างไปหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับและหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าได้
4. การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยวิธีพิจารณาเป็นดินสองชั้น จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าวิธีคำนวณแบบดินชั้นเดียว
5. ถ้ามีการประยุกต์นำโปรแกรมที่สร้างไปใช้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะสามารถนำไปใช้ทดแทนโมดูล RESAP และโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ได้ ซึ่งโปรแกรม CDEGS เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่เป็นลิขสิทธิ์ของประเทศแคนาดา ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต้องเสียค่าลิขสิทธิ์เป็นจำนวนเงินหลายล้านบาท อีกทั้งยังสามารถใช้ได้เพียง 2 User เท่านั้น แต่ถ้านำโปรแกรมในงานวิจัยนี้ไปใช้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก็ไม่ต้องเสียเงินค่าลิขสิทธิ์และสามารถใช้งานได้หลาย User อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้านั้นมีอยู่มาก และได้มีการพัฒนาวิธีการให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะมีที่ตั้งข้อสมมุติฐานและเสนอวิธีการต่างกันไป ซึ่งแต่ละงานวิจัยพอจะแยกได้ดังนี้

2.1.1 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน

ประโยชน์ของดินนั้นมีมากมายหลายอย่างด้วยกัน เช่นในการป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและฟ้าผ่าได้ ซึ่งในสภาวะที่ดินมีค่าความชื้นน้อย จะทำให้ดินนั้นมีค่าความต้านทานสูง แต่ถ้าดินมีความชื้นมาก ก็จะทำให้ค่าความต้านทานของดินมีค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งความชื้นในดินจะขึ้นกับชนิดของดิน คือ ถ้าเป็นดินที่มีลักษณะเป็นดินทรายจะมีความชื้นน้อยเพราะว่าดินชนิดนี้อุ้มน้ำได้ไม่ดี แต่ถ้าหากเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นมาก เพราะสามารถอุ้มน้ำได้ดี นอกจากนั้นค่าความชื้นของดินยังขึ้นอยู่กับฤดูกาลอีกด้วย คือถ้าเป็นฤดูแล้งดินจะมีความชื้นน้อย จึงทำให้ดินในฤดูฝนนี้มีความต้านทานต่ำ

ในการคำนวณเพื่อออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้านั้น ค่าที่สำคัญที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณคือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งโครงสร้างของดินนั้นอาจจะเป็นดินชั้นเดียว (Single-Layer) ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะอย่างสม่ำเสมอ หรืออาจจะมีค่าต่างกันเป็นชั้นๆ เรียกว่าเป็นดินหลายชั้น (Multi-Layer) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วการกำหนดโครงสร้างของดินเป็นชั้นเดียวนั้นก็เพื่อให้การคำนวณง่ายแต่ก็อาจจะทำให้การออกแบบนั้นผิดพลาดไปได้ ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณนั้นถูกต้องยิ่งขึ้นอาจจะกำหนดให้ดินเป็นดินสองชั้น(Two-Layer) ก็ได้ จึงต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินที่เป็นดินสองชั้น ซึ่งจะประกอบด้วยค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน, ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง และความลึกของดินชั้นบน

Blatter (1980) [20] ได้เสนอวิธีการคาดการณ์ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานของกราวด์รอต ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะปรากฏ(Apparent Resistivity) ค่าที่ได้จากการ Extrapolate จะถูกต้องที่สุดที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่อเมตรมีค่าเกือบคงที่ และอยู่ในช่วงไม่เกินสิบเท่าของความลึกสูงสุดที่วัดได้ แต่วิธีดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินดังกล่าวนี้จะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่มีการนำมาศึกษาและนำมาใช้ในการออกแบบกราวด์จะมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือ วิธีปักกราวด์รอต(Driven Rod Method) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วิธีเปลี่ยนความลึก (Variation of Depth Method) และวิธีวัดแบบ 4 จุด (Four-point Method) ซึ่งปกติแล้วจะใช้วิธีที่สองมากกว่าเนื่องจากสะดวกต่อการปฏิบัติงานและให้ความถูกต้องมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้หลักการวางอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์ (Wenner Method) ส่วนวิธีแรกจะต้องลงทุนสูงและใช้เวลาในการปฏิบัติงานนาน แต่ก็สามารถที่จะใช้กราวด์รอตนั้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบกราวด์ได้เลย ค่าที่วัดได้จากทั้งสองวิธีจะเป็นกระแสและแรงดัน ซึ่งก็คือค่าความต้านทานนั่นเอง แล้วนำเอาค่าความต้านทานนี้ไปแทนค่าเพื่อหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานจำเพาะของดินต่อไป Blatter (1982) [21] ได้นำเอาวิธีการวัดทั้งสงมาเปรียบเทียบกัน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ โดยวิธีปิกกราวด์รอนนั้นจะสมมติให้การกระจายของกระแสที่ไหลออกจากกราวด์รอนไปสู่ดินนั้นมีลักษณะขนานกับผิวดิน

การกำหนดโครงสร้างของดินที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าผิดไปหรือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินผิดไป อาจจะทำให้การคำนวณค่าความต้านทานของระบบกราวด์ผิดไปด้วย ถึงแม้วิธีการคำนวณที่นำมาใช้หาค่าความต้านทานของระบบกราวด์นั้นจะเป็นระบบที่ดีที่สุดแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงสมควรจะมีวิธีการที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้อย่างถูกต้อง Dawalibi และ Blattner (1984) [22] ได้เสนอเทคนิคการแปลความหมายของข้อมูลที่ได้จากการวัดแบบเวนเนอร์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินสองชั้น ซึ่งจะใช้วิธี Steepest-Descent Algorithm โดยวิธีการนี้จะกำหนดระยะห่างเริ่มต้นของอิเล็กโตรดที่ 2.5 เมตร ต่อมา Melipoulos และคณะ (1984) [23] ได้เสนอวิธีการอีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสามของดินที่เป็นสองชั้น ที่ได้ข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีปิกกราวด์รอน โดยจะใช้วิธี Weighted Least Square Estimation คือ การทำให้ค่าผิดพลาดระหว่างค่าจริงที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้น้อยที่สุดและมีการชี้ถึงคุณภาพของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วย โดยจะกำหนดเป็นระดับความเชื่อมั่น และในปี 1986 Melipoulos และคณะ[24] ได้นำเอาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาพัฒนาและนำมาใช้กับวิธีวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว และได้ชี้ถึงแหล่งที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการประมาณค่าพารามิเตอร์ว่าจะประกอบด้วยข้อผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือวัดและการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามธรรมชาติ เช่น จากความชื้น อุณหภูมิและปริมาณของเกลือที่มีอยู่ในดิน เป็นต้น

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน IEEE-81 ซึ่งจะอธิบายวิธีการวัดและแปลความหมายจากข้อมูลที่ได้จากการวัด นอกจากนี้ยังกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในแต่ละวิธีที่กล่าวถึง แต่อย่างไรก็ตามเนื้อหาในมาตรฐานนี้ไม่ได้ให้รายละเอียดมากนัก

2.1.2 การหาค่าความต้านทานระบบกราวด์

ค่าความต้านทานระบบกราวด์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาระดับศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์(GPR) อันเนื่องมาจากมีกระแสลัดวงจรลงดิน เพื่อให้ทราบว่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์อยู่ในช่วงที่มนุษย์จะทนได้หรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าค่าความต้านทานระบบกราวด์มีค่าต่ำ ศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นก็จะมีค่าต่ำด้วย แต่ก็ไม่ได้ประกันว่าศักดาไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นบนกราวด์หรือค่าความต้านทานของกราวด์จะเป็นตัวกำหนดถึงความปลอดภัยได้อย่างแน่นอน

สมการที่ใช้หาค่าความต้านทานกราวด์พื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือสมการของ Schwarz(1954) [25] ซึ่งได้เสนอสมการหาค่าความต้านทานของกริด ค่าความต้านทานกราวด์รอน และค่าความต้านทานรวมระหว่างกราวด์กริดกับกราวด์รอนเพื่อนำไปหาค่าความต้านทาน

Thapar และคณะ (1991) [26] ได้เสนอวิธีการหาค่าความต้านทานกราวด์ของสถานีไฟฟ้ารูปทรงต่างๆที่นอกเหนือไปจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส เช่น รูปทรงตัวแอล, ตัวที และทรงสามเหลี่ยม โดยถือว่าดินที่ใช้เป็นดินชั้นเดียว สมการที่ใช้หาค่าความต้านทานกราวด์ ใช้ได้ดีกับการแบ่งเมชเป็นส่วนตัดตรงยาวประมาณ 5 เมตร โดยที่ไม่มีกราวด์รอนร่วมอยู่ด้วย สมการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานตัวมันเองและความต้านทานรวม อยู่บนพื้นฐานของศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละส่วน

Chow และ Salama(1994) [27] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดด้วยวิธีการที่เรียกว่าอิมเมจของกระแส โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานกราวด์กริดจะขึ้นอยู่กับความลึกของกริด, ขนาดของกริด, จำนวนเมฆและขนาดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำที่ใช้ทำกริด โดยถือว่าดินที่ใช้เป็นดินชั้นเดียว การคำนวณค่าความต้านทานกราวด์กริดด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำ จะมีผลต่อความต้านทานกราวด์กริดมาก หลังจากนั้นในปี (1995) Chow และ Salama [28] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดโดยพิจารณาดินเป็นดินสองชั้น และในปี (1996) Chow และ Salama [29] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดโดยพิจารณาดินเป็นดินสองชั้น

Xiaobin Cao และคณะ(2008) [18] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดที่พิจารณาเป็นดินสองชั้นในแนวระดับ โดยนำผลที่ได้ไปเทียบกับโปรแกรม CDEGS ผลปรากฏว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับโปรแกรม CDEGS มากกว่าสูตรของ Chow และ Salama

2.1.3 การหาค่าความต้านทานที่เท้า (Footing Resistance)

เป็นค่าความต้านทานที่อยู่ใต้ฝ่าเท้าทั้งสองของมนุษย์ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการหาค่าค่าไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวที่ปลอดภัยสำหรับมนุษย์ ค่าความต้านทานที่เท้ามักถูกแทนแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี 8 เซนติเมตร และวางอยู่ในระนาบบนผิวดิน ในสถานีไฟฟ้าย่อยมักโรยด้วยหินกรวดให้มีความหนา 8-20 เซนติเมตร เพื่อเป็นการทำให้ความต้านทานจำเพาะที่ใต้ฝ่าเท้ามีค่าสูงขึ้น

Thapar และ Ziad (1989) [30] ได้เสนอวิธีการเพิ่มความต้านทานที่เท้าในบางจุดของสถานีไฟฟ้า เพื่อเป็นการลดความต้านทานกราวด์ โดยการใช้แผ่นพลาสติกที่ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน, เพอร์มาลอน, พีวีซี หรือนีโอพรีน ผึ่งใต้ชั้นหินกรวดโดยทำการทดสอบกับแผ่นพลาสติกทั้งที่เจาะรู การใช้แผ่นพลาสติกสามารถช่วยลดค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสได้

Thapar และคณะ (1992) [31] ได้เสนอสมการและแบบจำลองในการหาค่าความต้านทานที่เท้าเนื่องจากการสะสมของดินในชั้นหินกรวดที่อยู่ลึกลงไป เมื่อดินสะสมในช่องว่างระหว่างหินที่อยู่ต่ำลงไป จะมีชั้นของความต้านทานจำเพาะที่แตกต่างกันอยู่ 3 ชั้นคือ ชั้นของหินที่ไม่มีดินสะสม ชั้นของหินที่มีดินสะสม และชั้นของดินเพียงอย่างเดียว ในการหาค่าความต้านทานที่เท้าจึงต้องใช้แบบจำลองความต้านทานจำเพาะที่ต่างกัน 3 ชั้นในการคำนวณ

Thapar และคณะ (1993) [32] ได้แสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่าความต้านทานที่เท้าตามมาตรฐาน IEEE80-1986 ยังมีข้อผิดพลาดและข้อจำกัดอยู่และได้เสนอสมการ, กราฟและแบบจำลองขึ้นใหม่เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานที่เท้าไว้สองวิธีคือ แบบจำลองแผ่นตัวนำวงกลมและแบบจำลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Thapar และ Madan (1984) [33] ได้เสนอวิธีการหาค่ากระแสกริดที่ใช้ในการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าช่วงก้าวและศักดาไฟฟ้าสัมผัส เป็นค่าที่เหมาะสมกว่าที่จะใช้ค่ากระแสลัดวงจร เพื่อความประหยัดในการออกแบบโดยทำการศึกษาระแสกริด โดยคำนึงถึงค่าความต้านทานกราวด์กริด, พารามิเตอร์ของสาย Overhead Ground Wire, ค่าความต้านทานของเสา (Tower Footing Resistance), ระยะห่างระหว่างเสาส่ง(Tower Span)

2.1.4 การหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าว

Nahman และ Djordjevic (1995) [19] ได้นำเสนอแพคเตอร์สำหรับการคำนวณแรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวในกรณีที่พิจารณาเป็นสองชั้นที่เกี่ยวข้องกับกราวด์กริดและกราวด์หรือด

Nahman และ Djordjevic (1996) [34] ได้นำเสนอการพัฒนาและปรับปรุงแพคเตอร์สำหรับการคำนวณแรงดันไฟฟ้าเมฆในกรณีที่พิจารณาเป็นสองชั้นที่เกี่ยวข้องกับกราวด์กริดและกราวด์หรือด

Nahman และ Djordjevic (1998) [35] ได้นำเสนอการพัฒนาและปรับปรุงสมการสำหรับการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าวในกรณีที่พิจารณาเป็นสองชั้นที่เกี่ยวข้องกับกราวด์กริดและกราวด์หรือดเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2.1.5 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า

Lazzara และ Barbeito (1990) [36] ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยในแบบจำลองของดินสองชั้น (Nonuniform Soil) ซึ่งสมการตามมาตรฐาน IEEE80-1986 ตั้งสมมติฐานว่าดินเป็นแบบดินชั้นเดียว แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าความต้านทานจำเพาะของดินมักเปลี่ยนแปลงตามความลึก โดยได้ทำการศึกษาที่ Florida Power Corporation เป็นเวลา 2 ปี โดยพื้นฐานที่ทำการทดลองมีความต้านทานจำเพาะที่ผิวดินอยู่ในช่วง 1000-2000 โอห์ม-เมตร ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานระบบกราวด์, ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าว รวมทั้งศึกษาผลกระทบต่างๆของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการคำนวณ

Meliopoulos และคณะ (1993) [37] ได้เสนอวิธีการและคอมพิวเตอร์โมเดลในการวิเคราะห์ระบบกราวด์ด้วยวิธีการที่เรียกว่า Method of Moment โดยวิเคราะห์ระบบกราวด์ที่ประกอบด้วยกราวด์กริด, กราวด์หรือด, รั้ว, ท่อโลหะ, กราวด์อิเล็กทรอนิกส์ทรงสี่เหลี่ยม, แผ่นโลหะเรียบ ฯลฯ ที่ฝังอยู่ใต้ดินหรือวางอยู่บนผิวดิน โดยถือว่าดินเป็นแบบดินชั้นเดียว (Uniform Soil) หรือดินสองชั้น (Two-Layer Soil) แล้วทำการคำนวณหาศักดาไฟฟ้าสัมผัส, ศักดาไฟฟ้าช่วงก๊าว, กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนในขณะที่เกิดกระแสไหลผิดปกติ, ความต้านทานระบบกราวด์ และโวลต์เตจโพรไฟล์ (Voltage Profile)

2.1.6 งานวิจัยในประเทศอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้า

ปี 2535 มีงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาและการออกแบบระบบต่อลงดิน” โดย นายอลงกรณ์ พรหมสวัสดิ์ [4] โดยศึกษาวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า อ้างอิงมาตรฐาน IEEE 80-1986 และได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัย องค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยมีการคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดินจากกรณีศึกษา 12 กรณี แล้วทำการหาค่า แรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก๊าว (E_g) เพื่อคำนวณหาความปลอดภัย ผลที่ได้คือ ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบระบบต่อลงดิน ได้แก่ 1.ความต้านทานจำเพาะของดิน การนำค่าความต้านทานจำเพาะเฉลี่ยของดินมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จะทำให้เกิดความผิดพลาดมาก ดังนั้นเพื่อที่จะให้การออกแบบระบบต่อลงดินมีความผิดพลาดน้อยลง จึงควรใช้ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่วัดได้ในบริเวณที่จะทำการติดตั้งระบบต่อลงดินนั้นๆ 2.ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน เมื่อรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีการแปลงไปจากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าความต้านทานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะแกรงตัวนำต่อลงดินจะเปลี่ยนไป และการใช้สมการของ Sverak และ สมการของ Schwarz ในการหาค่า R_0 จะให้ค่าที่ถูกต้องในกรณีทีรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ปี 2540 มีงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาความต้านทานของตะแกรงในดินที่มีความสม่ำเสมอ โดยใช้แบบจำลองในการทดสอบ” โดย นายสมชาติ จิรวินาการ [5] โดยได้ศึกษากระบวนการวัดและสร้างแบบจำลองของระบบกราวด์ขึ้น 27 โมเดลและมีการย่อส่วนโดยอาศัยสเกลแฟคเตอร์เพื่อหาความต้านทานดินของตะแกรงในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในดินที่มีความสม่ำเสมอและระยะห่างของตัวนำในตะแกรงมีความสม่ำเสมอ โดยมีการเปลี่ยนแปลงความลึกของตะแกรง, ขนาดของตะแกรง, ขนาดตัวนำของตะแกรง, จำนวนเมซในแต่ละด้านของตะแกรง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีบทและผลที่ได้คือ การทดสอบโมเดลของระบบกราวด์และค่าความต้านทานของระบบกราวด์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณในสูตรของ Salama

ปี 2541 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์” โดย นายบัณฑิต พิทักษ์วงศ์ [6] โดยได้ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญ เช่น ลักษณะร่องตาข่ายของตะแกรงต่อลงดินที่สมมาตร และไม่สมมาตร กราวด์รอต อีกทั้งการนำแผ่นพลาสติกมาเพิ่มความต้านทานที่เท้าในบางจุดของสถานีไฟฟ้า พร้อมกับแสดงวิธีการลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตร ผลที่ได้คือ การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยการเพิ่มแผ่นพลาสติก จะทำให้สามารถลดจำนวนตัวนำของตะแกรงกริดที่มีระยะไม่สมมาตรได้ถึง 30-40% ทำให้เกิดความประหยัดและมีความปลอดภัยมากขึ้น

ปี 2543 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน” โดย นายชาญชัย เล่าห์พงศ์ไพศาล [7] โดยได้ศึกษาการออกแบบการต่อลงดินกรณีสมมติเป็นดินเนื้อเดียวและดินสองชั้น ในส่วนของซอฟต์แวร์นั้นได้พัฒนาโปรแกรมในการออกแบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน ด้วยภาษา Visual Basic เวอร์ชัน 6.0 ระบบต่อลงดินที่พิจารณาเป็นระบบที่มีลักษณะโครงตาข่ายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยแนวโน้มของค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงอย่างเดียว การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพิจารณา ระบบต่อลงดินที่มีเฉพาะโครงตาข่ายและระบบต่อลงดินที่มีแท่งดินติดตั้งรอบโครงตาข่าย โดยมีข้อกำหนดที่ใช้ลวดตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร และฝังโครงตาข่ายลึก 0.5 เมตร จากผิวดิน การออกแบบได้แสดงผลออกมาในรูปของ ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสและค่าศักดาไฟฟ้าช่วงก้าว โดยค่าความปลอดภัยในการออกแบบจะพิจารณาจากกรณีดินเนื้อเดียว ตามมาตรฐาน IEEE Std 80-1986

ปี 2544 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย” โดย นายธิดิ เอื้อมงคล [8] โดยได้ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ซึ่งในการออกแบบนี้จะทำการพิจารณาถึงผลของค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นรวมถึงมีการพิจารณาถึงรูปร่างของตะแกรงต่อลงดินในรูปแบบต่างๆอีกทั้งยังได้นำเสนอถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ผลที่ได้คือ ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ควรคำนึงถึงค่ากระแสกริดและค่ากระแส dc-offset ด้วย เพราะจะมีผลต่อค่าความปลอดภัย นอกจากนี้ได้บอกผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน ได้แก่ 1. ระยะห่างระหว่างตัวนำควรอยู่ในช่วง 2.5-12.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร เนื่องจากเป็นช่วงที่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามากที่สุด 2. ความลึกของตะแกรงระบบต่อลงดิน ควรมีความลึก 0.25-0.5 เมตร เพราะเป็นช่วงที่ส่งผลต่อการลดค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้ามากที่สุด 3. ขนาดตัวนำ เมื่อขนาดของตัวนำใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆลดลงแต่ไม่ส่งผลของความต้านทานระบบต่อลงดิน

ปี 2548 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้โปรแกรม MATLAB” โดย นายจิรพันธ์ บั้นประไพ [9] โดยได้ศึกษาและสร้างโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งโปรแกรมการออกแบบนี้สามารถเลือกวิธีการออกแบบแบบต่างๆไปและยังสามารถเลือกวิธีการออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสมได้ และได้ทำการเอาผลลัพธ์ของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้คือ วิธีการออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสมสามารถลดปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าได้มากถึงร้อยละ 11.83 อีกทั้งยังลดเวลาการออกแบบจากวิธีเดิมลงอย่างมาก

ปี 2549 มีงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000” โดย นายจิรพัฒน์ นวนนุรักษ์ [10] โดยได้ศึกษาการพัฒนาโปรแกรมในการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเมื่อพิจารณาดินเป็นแบบสองชั้นและชั้นเดียว โดยอ้างอิงการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ผลปรากฏว่า การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากวิธีดินสองชั้นกับค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 แรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ดังนั้นการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าและเกิดความประหยัด ส่วนการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ไม่ทำให้เกิดความประหยัด และการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นของดินชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 แรงดันไฟฟ้าเมฆและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของกราวด์กริดมีค่ามากกว่าการออกแบบกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียว ดังนั้นการออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีดินสองชั้นทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ในทางเศรษฐศาสตร์ไม่ทำให้เกิดความปลอดภัยเมื่อเปรียบเทียบกับกราวด์กริดด้วยดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE 80-2000

ปี 2553 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า พิจารณาโครงสร้างชั้นดินแบบ Nonuniform Soil โดยใช้โปรแกรม MATLAB” โดย นายวิศิษฐ์ ดีสวัสดิ์ [11] โดยได้ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยพิจารณาโครงสร้างแบบ Nonuniform Soil และมีการประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ มาช่วยคำนวณเพื่อลดความซับซ้อนและมีความสะดวกรวดเร็วขึ้น ผลการวิจัยที่ได้คือ การออกแบบระบบต่อลงดินโดยพิจารณาโครงสร้างของชั้นดินกรณี Nonuniform Soil ไม่สามารถนำมาแก้ปัญหาเพื่อลด E_m , E_s และให้ผลได้ดีกว่ากรณี Uniform Soil โดยเฉพาะเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะ $\rho_2 > \rho_1$ แต่การพิจารณาโครงสร้างชั้นดินแบบ Nonuniform Soil ควรนำมาพิจารณาออกแบบเมื่อมีค่าความต้านทานจำเพาะ $\rho_1 > \rho_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี 2554 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาความปลอดภัยด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์” โดย นายพลฉัตร กัลยา [12] โดยได้ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า และคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริด ที่พิจารณาเป็นโครงสร้างดินสองชั้น โดยใช้สมการของ Sverak ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 และสมการของ Xiaobin ที่ถูกพัฒนาและตีพิมพ์ในเอกสารประชุมนานาชาติ หลังจากนั้นนำค่าความต้านทานกราวด์กริดที่ได้จากสมการทั้งสองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม CDEGS ที่เป็นลิขสิทธิ์ของประเทศแคนาดา ผลปรากฏว่า สมการของ Xiaobin มีความแม่นยำมากกว่าสมการ Sverak จึงได้นำสมการนี้ไปใช้กับโปรแกรม Visual basic เพื่อให้โปรแกรมช่วยคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดิน

ปี 2555 มีงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ใช้สวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซ ติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด” โดย นายสิริธร พลับเล็ก [13] โดยได้ศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม CDEGS และพัฒนาโปรแกรมการออกแบบกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้าชนิด GAS-Insulated Switchgear (GIS) Indoor Substation ติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงวัสดุบุบผิว และพิจารณาผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินซึ่งอากาศของระบบสายส่ง โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE80-2000 ผลของงานวิจัยที่ได้คือ การออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าโดยการใช้วัสดุที่มีความต้านทานจำเพาะที่สูงบุบผิวดินในสถานีไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ และผลของการกระจายกระแสลัดวงจรลงดินผ่านสายดินซึ่งอากาศของระบบสายส่ง เพื่อลดศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม

2.2 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ[14]

ดินหรือพื้นดินถูกใช้เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติหรือลัดวงจรให้กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคน พื้นดินสามารถแบ่งได้เป็นหลายชั้น แต่ละชั้นก็ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ มากมาย ส่วนใหญ่จะเป็น ซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีในสภาวะที่แห้ง แต่หากมีความชื้นหรือมีสารละลายเกลือ คุณสมบัติของดินจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งอุณหภูมิก็มีผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าด้วย ดังนั้นสภาพดินในแต่ละพื้นที่ก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปในการออกแบบการต่อลงดิน มีจุดประสงค์เพื่อนำพากระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติลงสู่ดินอย่างสะดวกและรวดเร็วจึงต้องมีการทำให้ค่าความต้านทานดินมีค่าต่ำตามที่กำหนด สิ่งที่จะต้องนำพิจารณาในเบื้องต้นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน (ρ) ซึ่งประมาณได้จากการพิจารณาชนิดของดินบริเวณนั้นๆ อย่างไรก็ตาม ควรมีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินด้วยเครื่องมือวัด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ การติดตั้งและการบำรุงรักษาหลักดิน

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน คือ ค่าความต้านทานของดินในปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร โดยวัดระหว่างผิวด้านตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน



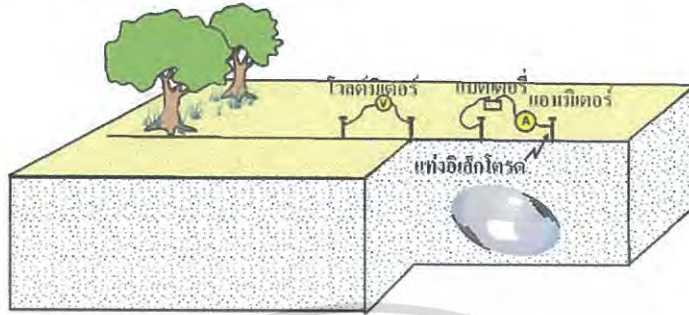
รูปที่ 2.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

2.3 หลักการสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ[14]

การสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ จะทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าไปตามเส้นลวดลงสู่ดิน กระแสไฟฟ้าจะไหลออกไปจากจุดที่ปล่อย (รูปที่ 2.2) หากได้ผิวดินเป็นตัวนำที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ย่อมสามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน และเมื่อทราบค่าของกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ย่อมสามารถหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะได้ตามกฎของโอห์ม และจากค่าความต้านทานไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดิน-หินใต้ผิวดิน ในบริเวณที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า และความยาวของระยะทางที่กระแสไฟฟ้าไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่กระแสไฟฟ้าไหล เมื่อนำหลักการนี้มาสำรวจในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งโดยกำหนดให้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากัน และระยะห่างของขั้วไฟฟ้าที่วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน หากสภาพใต้ผิวดินมีความต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะเท่านั้น ผลคือได้ค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะยอมเท่านั้น แปลความหมายได้ว่าสภาพใต้ผิวดินของทั้งสองบริเวณมีความคล้ายคลึงกันหรือเหมือนกัน แต่ถ้าสภาพใต้ผิวดินแตกต่างกันผลคือค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดยอมแตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 หลักการประยุกต์สำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตามกฎหมายของโอห์ม โดยมีแบตเตอรี่สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้า แอมมิเตอร์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และมีแท่งโลหะ(แท่งอิเล็กโทรด) สำหรับปักลงดินเพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดิน

2.4 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะด้วยวิธีเวนเนอร์[14]

จากสมการพื้นฐานของการวางรูปขั้วอิเล็กโทรดแบบแนวเส้นตรง ตามสมการที่ (2.1) นั่นคือ

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left[\frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right] \quad (2.1)$$

เทอมที่อยู่ในวงเล็บเรียกว่าเทอมของค่าคงที่ (K) ของระยะห่างขั้วอิเล็กโทรด (geometric factor) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} Z$$

ดังนั้นถ้าทราบค่า I , ΔV , และ Z สามารถหา ρ ได้ และถ้าสภาพของใต้ผิวดินเป็นแบบเนื้อเดียวไปตลอด (homogeneous and isotropic) ไม่ว่าจะขยายระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดไปอย่างไร ค่าของ ρ จะมีค่าคงที่ค่าเดียว แต่ถ้าสภาพใต้ผิวดินไม่เป็นเนื้อเดียวไปตลอดแล้ว ค่าของ ρ ที่ได้จะเป็นค่า ρ_a (ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ) กรณีของการวางขั้วอิเล็กโทรดระยะสั้นๆ ค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้ เรียกว่า ค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่ผิวดิน (surface resistivity) และหากสภาพผิวดินมีความเป็นเนื้อเดียว สามารถถือได้ว่าค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้เป็นค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริงของผิวดิน แต่ส่วนใหญ่สภาพของธรรมชาติจะไม่เป็นเนื้อเดียว ค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้ จึงเป็นค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (ρ_a)

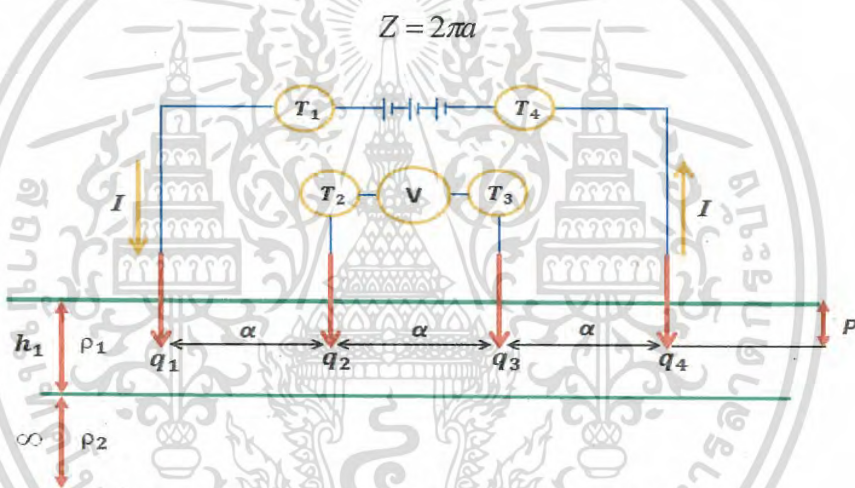
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏของการจัดวางแบบเวนเนอร์ การจัดวางขั้วอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์ (Wenner array) โดยที่ $r_1 = r_4 = a$ และ $r_2 = r_3 = 2a$ (รูปที่ 2.3) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏคำนวณได้จากสมการ (2.1) นั่นคือ

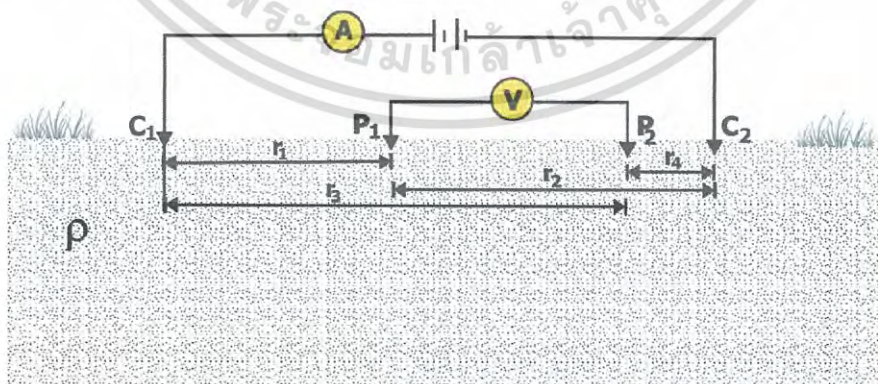
$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left[\frac{1}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}} \right]$$

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

ดังนั้นค่าคงที่ของระยะห่างของการวางขั้วอิเล็กโทรดแบบเวนเนอร์ คือ



รูปที่ 2.3 เครื่องมือในการวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินโดยวิธี Wenner



รูปที่ 2.4 ลักษณะของการวางขั้วกระแสไฟฟ้าและขั้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เป็นหลักการสำรวจเบื้องต้นของการสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสภาพใต้ผิวดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในแนวระดับ โดยมีรูปจำลองการสำรวจแสดงในรูปที่ 2.2 และลักษณะของการจัดวางขั้วอิเล็กโทรด 4 ขั้ว โดยมี 2 ขั้วเป็นขั้วที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าและอีก 2 ขั้วเป็นขั้วที่ใช้วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (รูปที่ 2.4)

เมื่อทราบระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป และค่าต่างศักย์ไฟฟ้า สามารถคำนวณหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะได้ ในกรณีชั้นดิน-หินเป็นเนื้อเดียวไปตลอด ย่อมสามารถหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริงของพื้นที่นั้นได้โดยคำนวณจากสมการที่ (2.1) แต่ถ้าสภาพใต้ผิวดินไม่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวไปตลอด เช่น มีชั้นดิน-หินที่มีค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะไม่เท่ากัน เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวกลางต่างชนิดที่มีค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแตกต่างกัน กระแสไฟฟ้าจะมีการเบี่ยงเบน ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่เบี่ยงเบน ชั้นดิน-หินต่างชนิดกันไม่ว่าจะมีการวางตัวในแนวราบหรือเอียงเท จะมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นไปตามรูปแบบสมการที่ (2.2)

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi r} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nZ)^2}} \right] \quad (2.2)$$

ในการสำรวจวัดค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ หากจะกล่าวว่ค่าที่วัดได้เป็นค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏคงไม่ผิด เพราะสภาพใต้ผิวดินไม่เป็นเนื้อเดียวไปตลอด ดังนั้นสมการพื้นฐานที่เกี่ยวกับผลกระทบต่อกักไฟฟ้า จึงต้องนำมาพิจารณาเพื่อหารูปแบบของสมการที่แสดงค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ และสมการที่จะนำไปหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริงจากการทราบค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ที่สอดคล้องกับรูปแบบของการวางขั้วอิเล็กโทรด ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะรูปแบบของการวางขั้วอิเล็กโทรด แบบเวนเนอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สมการทั่วไป (general equation) ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในสนาม กรณีที่สภาพใต้ผิวดินไม่เป็นเนื้อเดียว มีดังนี้

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) + D \right] \quad (2.3)$$

$$D = 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ \frac{1}{r_1^2 + (2nZ)^2} - \frac{1}{r_2^2 + (2nZ)^2} - \frac{1}{r_3^2 + (2nZ)^2} + \frac{1}{r_4^2 + (2nZ)^2} \right\}$$

กรณีของการวางรูปแบบการสำรวจแบบเวนเนอร์ (Wenner Array) จะได้ $r_1 = r_4 = a$ และ $r_2 = r_3 = 2a$ สมการที่ (2.3) เขียนใหม่ได้คือ

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) + D_w \right]$$

$$D_w = 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ \frac{1}{a^2 + (2nZ)^2} - \frac{1}{4a^2 + (2nZ)^2} - \frac{1}{4a^2 + (2nZ)^2} + \frac{1}{a^2 + (2nZ)^2} \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{\rho_1}{2\pi a} [1 + 4D_w] \quad (2.4)$$

ค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ของการวางรูปแบบเวนเนอร์ เมื่อแทนค่าระยะห่างของขั้ว อิเล็กโตรด ลงในสมการที่ (2.1) จะได้

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left[\frac{1}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}} \right]$$

$$\rho_a = \frac{2\pi a \Delta V}{I} \quad (2.5)$$

ดังนั้นค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริง คำนวณได้โดยแทนค่า $\Delta V/I$ จากสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้

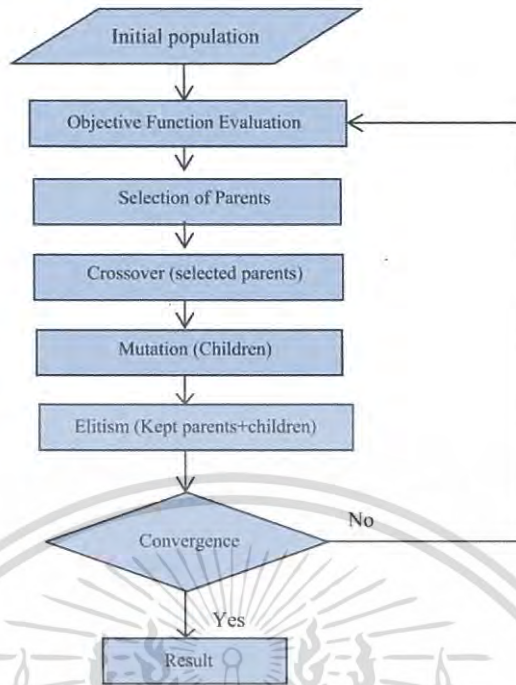
$$\rho_a = \rho_1 (1 + 4D_w) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (4.6) จะเป็นว่าค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏที่วัดได้ในสนาม สามารถแปลความหาค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริงได้ โดยที่จะต้องทราบค่า D_w ซึ่งค่า D_w เป็นค่าที่ได้จากสมการที่มีลักษณะอนุกรมอนันต์ และจะเห็นได้ว่าค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริงที่คำนวณได้ เป็นค่าของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริงแบบประมาณเท่านั้น

2.5 วิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [15]

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา โดยเลียนแบบวิวัฒนาการทางธรรมชาติโดยมีพื้นฐานแนวคิดมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติของ ชาร์ล ดาร์วิน (Charle Darwin) คือ ผู้ที่แข็งแกร่งกว่าย่อมมีโอกาสในการอยู่รอดมากกว่าและมีโอกาสในการถ่ายทอดลักษณะที่แข็งแกร่งนั้นไปยังรุ่นถัดไป ซึ่งแนวคิดดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้โดย Holland (1975) และถูกพัฒนาต่อโดย โกลด์เบิร์ก (Goldberg, 1989) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นหนึ่งในวิชาปัญญาประดิษฐ์ที่จำลองกระบวนการทำงานทางชีววิทยาหรือวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการกำเนิดประชากรรุ่นใหม่โดยอาศัยพื้นฐานการวิวัฒนาการทางพันธุกรรมในการถ่ายทอดลักษณะต่างๆ ไปยังรุ่นหลาน ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จากสถานการณ์ที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แสดงดังภาพที่ 2.5 จะประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานของระเบียบวิธีนี้ อธิบายเป็นขั้นตอนได้ว่า

- 1) การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding)
- 2) การสร้างประชากรเริ่มต้น (Population Initialization)
- 3) การประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Function)
- 4) การดำเนินการทางขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Operations) ประกอบไปด้วย การคัดเลือก (Selection) เพื่อเป็นประชากรในรุ่นต่อไป การสลับสายพันธุ (Crossover) การกลายพันธุ์ (Mutation)
- 5) การแทนที่ (Replacement)
- 6) การตรวจสอบเงื่อนไขสิ้นสุดการทำงาน (Termination Condition)

การวางลำดับขั้นตอนในการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอาจจะพบว่ามี ความแตกต่างกันไปตามการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของผู้วิจัยแต่ละคน

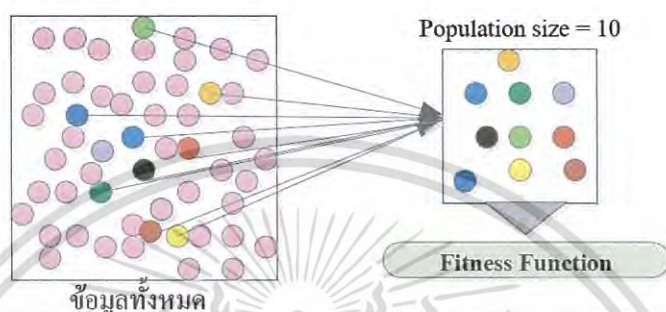
2.5.1 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding)

การเข้ารหัสโครโมโซมเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่สำคัญเพราะก่อนเข้าสู่กระบวนการต่างๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจำเป็นที่จะต้องผ่านการเข้ารหัสโครโมโซมก่อนจึงดำเนินการกระบวนการอื่นๆ และเป็นขั้นตอนการออกแบบให้โครโมโซมเป็นตัวแทนของคำตอบของระบบ โดยเลือกใช้วิธีเข้ารหัสแบบใดก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการแก้ปัญหา ทำให้รูปแบบของการเข้ารหัสโครโมโซมนั้นมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้นๆ ซึ่งมีการเข้ารหัสโครโมโซมหลายแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Population Initialization)

การสร้างประชากรเริ่มต้นเป็นการกระทำขั้นถัดไปหลังจากเลือกรูปแบบการเข้ารหัสโครโมโซมได้แล้ว ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมโดยประชากรกลุ่มแรกจะเกิดจากการสุ่ม (Random) ค่าขึ้นมาจากกลุ่มข้อมูลที่มีอยู่แสดงในภาพที่ 2.6 เพื่อนาประชากรเข้าสู่กระบวนการ โดยในการสุ่มจะต้องสุ่มให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดประชากร (Population Size) ที่ได้กำหนดไว้ โดยที่ยังไม่มีการสนใจค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม



รูปที่ 2.6 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 10 โครโมโซม

2.5.3 ฟังก์ชันค่าความเหมาะสม (Fitness Function)

Fitness Function เป็นการกำหนดค่าความเหมาะสม เพื่อให้คะแนนสำหรับคำตอบต่างๆ ที่เป็นไปได้ของปัญหา โครโมโซมทุกตัวจะมีบ่งบอกถึงความเหมาะสมของตัวเองเพื่อใช้สำหรับพิจารณาว่า โครโมโซมตัวนั้น เหมาะสมหรือไม่ ที่จะนำมาใช้ในการสืบทอดพันธุกรรม สำหรับสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ โดยวิธีการสำหรับคิดค่าความเหมาะสมนั้น จะใช้สมการที่สอดคล้องกับแต่ละปัญหา การกำหนดฟังก์ชันที่เกี่ยวกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาค่าความเหมาะสม

- 1) ฟังก์ชันแบบจุดประสงค์เดียว (Single Objective Function) เป็นการกำหนดฟังก์ชันขึ้นมาหนึ่งฟังก์ชันที่ต้องการเพียงคำตอบเดียว ซึ่งเหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อย และไม่มี ความขัดแย้งกัน
- 2) ฟังก์ชันแบบหลายจุดประสงค์ (Multi Objective Function) เป็นการกำหนดฟังก์ชันขึ้นมาหลายๆ ฟังก์ชันที่ต้องการเพียงคำตอบหลายๆ คำตอบ แต่ละคำตอบที่เป็นคู่แข่งกัน ซึ่งเหมาะสม สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก และมีความขัดแย้งกัน

2.5.4 ตัวดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)

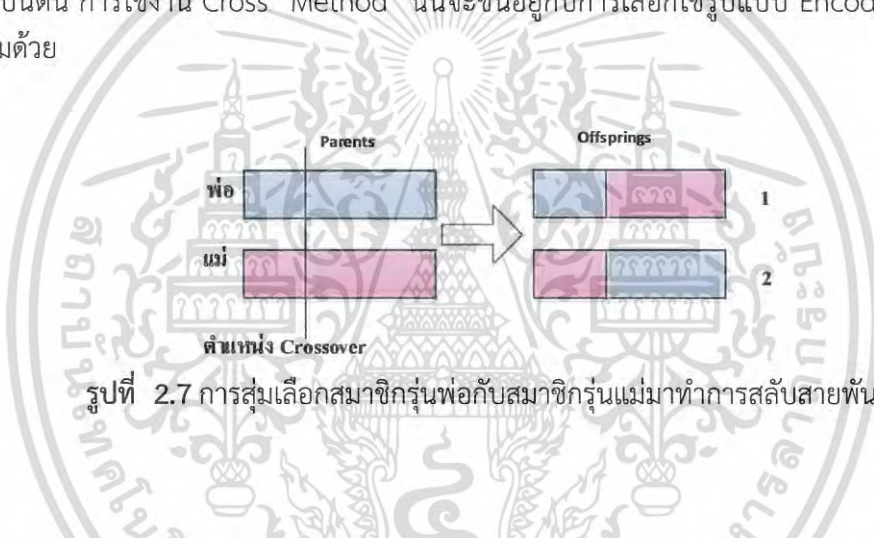
ตัวดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) เป็นการสนับสนุนให้สมาชิกที่มีความเหมาะสมในปัจจุบันถูกส่งต่อไปยังรุ่นถัดไปขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์ หรือโครโมโซมพ่อแม่ ในการสืบสายพันธุ์เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้สายพันธุ์ที่ดี ต้นกำเนิดสายพันธุ์ ต้องดีด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามหลักการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุด โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลานในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยส่วนโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกน้อยกว่าหรือไม่ได้รับการคัดเลือกเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 การดำเนินการสลับสายพันธุ์ (Crossover)

การสลับสายพันธุ์ (Crossover) เป็นกระบวนการที่สำคัญของขั้นตอนวิธีเชิงทางพันธุกรรมเมื่อเกิดการสลับสายพันธุ์ ขึ้นในทางพันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลาย ซึ่งอัลกอริทึมพยายามสร้างทางเลือกที่ดีขึ้นโดยการรวมลักษณะที่ดีของแต่ละโครโมโซมเข้าด้วยกัน

ขั้นตอนในการการสลับสายพันธุ์ คือ จะนำสมาชิกของประชากรที่ผ่านการคัดเลือกมาเป็นคู่ๆ กำหนดให้เป็นสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่ (Parent Individual) มาผสมกันเพื่อให้ได้โครโมโซมใหม่ ขึ้นมาจากนั้นทำการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่จากนั้นคัดลอกโครโมโซมที่อยู่หน้าตำแหน่งที่สุ่มได้จากโครโมโซมพ่อ และคัดลอกโครโมโซมที่อยู่หลังตำแหน่งที่สุ่มได้จากโครโมโซมแม่ แล้วนำโครโมโซมที่ได้ทั้งสองมารวมกันเป็นโครโมโซมลูกตัวที่ 1 ส่วนลูกตัวที่สองทำในลักษณะเดียวกันแต่สลับตำแหน่งระหว่างพ่อและแม่ จากตัวอย่างรูปที่ 2.7 การสุ่มเลือกสมาชิกรุ่นพ่อ กับสมาชิกรุ่นแม่มาทำการสลับสายพันธุ์จะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการสลับสายพันธุ์ (Crossover Probability) วิธีการสลับสายพันธุ์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น แบบ One Point, Two Point เป็นต้น การใช้งาน Cross Method นั้นจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปแบบ Encoding ของโครโมโซมด้วย



รูปที่ 2.7 การสุ่มเลือกสมาชิกรุ่นพ่อกับสมาชิกรุ่นแม่มาทำการสลับสายพันธุ์

2.5.6 การดำเนินการกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการสลับสายพันธุ์ วัตถุประสงค์เพื่อทำให้ค่าของโครโมโซมที่มีอยู่เดิมเกิดการเปลี่ยนแปลง และช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการเวียนซ้ำอยู่กับค่าใดค่าหนึ่ง (Iteration Search) ขั้นตอนในการกลายพันธุ์โดยทั่วไปคือทำการสุ่มตำแหน่งที่ต้องการการกลายพันธุ์ขึ้นมาภายใต้ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Probability of Mutation) ซึ่งได้ทำการกำหนดไว้ในช่วงของการเริ่มกระบวนการ โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าบางส่วนของสมาชิกของกลุ่มประชากร เพื่อให้สมาชิกของกลุ่มประชากรมีความหลากหลายมากขึ้น และเทคนิคในการกลายพันธุ์ส่วนมากจะขึ้นกับการเข้ารหัสโครโมโซม ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.1

2.5.7 การแทนที่ (Replacement)

การแทนที่ เป็นขั้นตอนที่เมื่อผ่านขั้นตอนของการสลับสายพันธุ์และกลายพันธุ์จะทำให้เกิดโครโมโซมลูกหลานเรียบร้อยแล้วและนำโครโมโซมลูกหลานใหม่นี้ ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจน คือการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อน ทำให้ประชากรรุ่นใหม่ เป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ววิธีในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่มีด้วยกัน 2 วิธีคือ

1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational Genetic Algorithm)

ลูกหลานไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีจำนวนประชากรเท่ากับ N จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่จะต้องมีความยาว N เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย เนื่องมาจากไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่มีข้อเสียคือโครโมโซมที่ดีในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วย ซึ่งวิธีแก้ที่ง่ายคือ ก่อนที่จะทำการแทนที่ให้เลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2-3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกหวักระที (Elitist Strategy) กล่าวคือถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไป และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ขึ้นทำให้ Genetic Algorithm ไม่สามารถวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ขึ้นมาได้ ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหวักระทีจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้แต่วิธีนี้ก็ทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2) การแทนที่ประชากรแบบบางส่วน (Partial Genetic Algorithm)

เป็นการนำเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้นโดยมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ซึ่งจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซม โครโมโซมเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้นวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธี เช่นการแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุด หรือ การแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือกเป็นต้น

2.5.8 การกำหนดการสิ้นสุดของการทำงาน (Termination Condition)

เมื่อถึงขั้นตอนการแทนที่ประชากร (Population Replacement) จากนั้นเป็นขั้นตอนการตรวจสอบว่าจบกระบวนการแล้วหรือยัง การทำงานของ Genetic Algorithm เป็นวัฏจักรหมุนเวียนอยู่เช่นนี้จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งตามเงื่อนไขโดยอาจสิ้นสุดเมื่อถึงรุ่นตามที่กำหนด หรือ พบคำตอบที่ดีที่สุดตามที่กำหนดไว้หากไม่เข้าเงื่อนไขดังกล่าวมาแล้ว ก็ให้กลับไปขั้นตอนการสร้างต้นแบบ แล้วทำงานซ้ำกระบวนการจนกว่าจะพบเงื่อนไขจบการทำงาน

2.5.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) ขนาดประชากร (Population Size)
- 2) จำนวนรุ่น (Number of Generations)
- 3) ความน่าจะเป็นในการสลับสายพันธุ์ (Probability of Crossover)
- 4) ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Probability of Mutation)
- 5) วิธีการที่ใช้ในการสลับสายพันธุ์ (Method of Crossover)
- 6) วิธีการที่ใช้ในการกลายพันธุ์ (Method of Mutation)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอนต่างๆ นั้นเพื่อให้การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม มีความเหมาะสมที่สุดในการทำงานและแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

2.6 ระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นกราวด์กริด (Ground grid) และส่วนที่เป็นแท่งกราวด์หรือทรอด (Ground rod) โดยส่วนที่เป็นกราวด์กริดประกอบด้วยสายตัวนำขนานและตัดตั้งฉากกันได้ดินเกิดเป็นตารางย่อยๆ รวมกันเป็นตาข่ายครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยจุดที่ตัดกันมีวิธีการที่นิยมติดตั้งในปัจจุบันคือ การหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความร้อนสูง (Exothermic welding) ดังนั้นการใช้สายตัวนำจำนวนเท่าใดเป็นสิ่งสำคัญ เพราะใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งค่าวัสดุ ค่าแรง และเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง แต่ถ้าใช้น้อยเกินไป จะเกิดความไม่ปลอดภัยต่อมนุษย์ สัตว์และอุปกรณ์ทั้งภายในและบริเวณใกล้เคียงสถานีไฟฟ้าย่อย ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นด้วย

2.6.1 นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดิน

ในการศึกษาหลักการ และทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบจะต้องเข้าใจความหมาย การนิยาม คำศัพท์เฉพาะ เพื่อให้ผู้ศึกษามีมาตรฐานความเข้าใจที่ตรงกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการศึกษาและการวิจัยที่แพร่หลาย และไปในทางทิศเดียวกัน ดังนี้ [1,17]

2.6.1.1 กราวด์กริด (Ground grid) หมายถึง ระบบแท่งรากสายดินในแนวนอนที่ประกอบด้วยตัวนำเปลือยหลายๆเส้นต่อรวมกันและฝังใต้ดินเพื่อเป็นจุดต่อลงดินร่วมสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างที่เป็นโลหะในตำแหน่งที่กำหนดให้

2.6.1.2 ระบบต่อลงดิน (Grounding system) หมายถึง ระบบ ตัวนำไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งถูกใช้สำหรับนำกระแสลัดวงจรที่ถูกนำมาเชื่อมต่อเป็นระบบเดียวกันในพื้นที่ที่พิจารณาให้ต้องมีการสร้างระบบต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

2.6.1.3 ตะแกรงต่อลงดิน (Ground mat or earth mat) หมายถึง แผ่นโลหะ หรือระบบของตัวนำที่มีระยะห่างใกล้เคียงกันมากๆที่ฝังไว้ตื้นๆเหนือกราวด์กริด หรือที่ใดก็ได้บนผิวดิน ซึ่งเป็นการป้องกันเสริมเพื่อลดอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสในบริเวณปฏิบัติงานที่วิกฤติ หรือในพื้นที่ที่บุคลากรใช้บ่อย ตะแกรงเหล็กต่อลงดินที่วางอยู่บนผิวดินหรืออยู่บนเหนือผิวดินหรือลวดตาข่ายที่อยู่วัสดุที่ปูบนผิวดินสามารถเรียกได้ว่าเป็นตะแกรงต่อลงดิน

2.6.1.4 ความต้านทานเริ่มต้นของร่างกายมนุษย์ (Initial resistance of the human body) หมายถึง ค่าความต้านทานที่จำกัดกระแสยอดในขณะที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

2.6.1.5 เกรเดียนต์ศักย์ไฟฟ้า (Gradient potential) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบตามระยะทาง

2.6.1.6 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าบน ผิวดินที่มีระยะห่างกันหนึ่งเมตรของก้าวมนุษย์โดยไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์ที่ต่อลงดินเลย

2.6.1.7 แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสัมผัสที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ภายในเมชของกราวด์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.8 แรงดันไฟฟ้าส่งผ่าน (Transfer voltage) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสัมผัสที่มาจากที่อื่น เข้ายังสถานีไฟฟ้าย่อย หรือออกจากสถานีฟ้าออกไปข้างนอกโดยเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่จุดที่ยืน

2.6.1.9 แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าระบบต่อลงดิน (GPR) และศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่คนยืนอยู่ และมือสัมผัสไปที่โครงสร้างหรืออุปกรณ์ที่ต่อลงดินไว้

2.6.1.10 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ (Metal-to-metal touch voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างโลหะกับโครงสร้างภายในสถานีไฟฟ้าที่อาจมีมือสัมผัสหรือมือสลุ้เข้าไปสัมผัสเป็นสะพาน

2.6.1.11 ศักย์ไฟฟ้าระบบต่อลงดิน (Ground Potential Rise-GPR หรือ Earth Potential Rise-EPR) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าย่อยที่เป็นไปได้เมื่อเทียบกับดินที่อยู่ห่างออกไป ค่า GPR สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับความต้านทานระบบต่อลงดิน

2.6.1.12 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential line or contour) หมายถึง เส้นทางของจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันที่อยู่บนเส้นนั้น

2.6.1.15 กระแสลงดิน (Ground current) หมายถึง กระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกในดิน

2.6.1.14 ออฟเซต ดีซี (dc offset) หมายถึง ค่าแตกต่างระหว่างคลื่นกระแสที่สมมาตร (Symmetrical current wave) และคลื่นกระแสที่แท้จริง (Actual current wave) ในระหว่างที่ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในภาวะชั่วคราว กระแสผิดพลาดที่แท้จริง (Actual fault current) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับสมมาตร (Symmetrical alternating component) และองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง [Unidirectional (dc) component] องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเป็นขั้วใดขั้วหนึ่ง แต่จะไม่เปลี่ยนขั้วไฟฟ้า และจะลดลงที่อัตราการลดลงบางอัตราที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า

2.6.1.15 ตัวประกอบการลดลง (Decrement factor) หมายถึง แฟคเตอร์เพื่อใช้ปรับค่ากระแสลัดวงจรลงดินแบบสมมาตรเป็นแบบไม่สมมาตร เพื่อใช้ในการคำนวณระบบต่อลงดินให้เกิดความปลอดภัย

2.6.1.16 ตัวประกอบแบ่งกระแสผิดพลาด (Fault current division factor) หมายถึง แฟคเตอร์ที่ใช้แทนอัตราส่วนของกระแสลัดวงจรแบบสมมาตรกับกระแสบางส่วนที่ไหลระหว่างกราวด์กริดกับดินที่อยู่รอบๆ

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad (2.7)$$

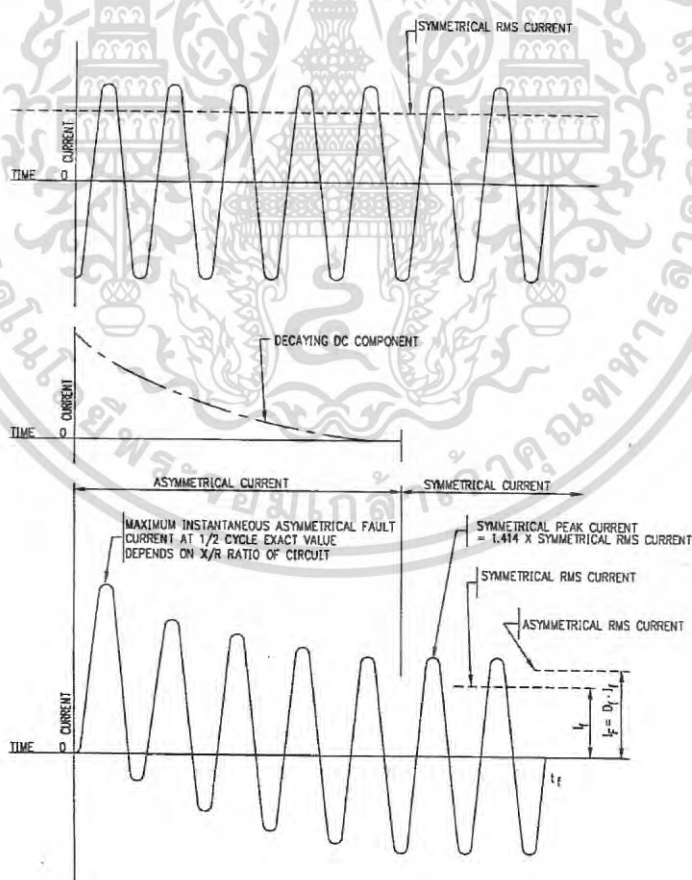
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ S_f คือ ตัวประกอบแบ่งกระแสผิดพลาด
 I_g คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าสมมาตรที่กราวด์กริด (Grid current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)
 I_0 คือ กระแสผิดพลาดลำดับศูนย์ (The zero-sequence fault current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)

2.6.1.17 กระแสผิดพลาดไม่สมมาตรประสิทธิผล (Effective Asymmetrical Fault Current) หมายถึง ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของคลื่นกระแสไม่สมมาตรในช่วงเวลาเกิดความผิดพลาด (Fault)

$$I_F = D_f \times I_f \quad (2.8)$$

- เมื่อ I_F คือ กระแสผิดพลาดไม่สมมาตรประสิทธิผล ในหน่วย แอมแปร์ (A)
 I_f คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสผิดพลาดลงดินแบบสมมาตร ในหน่วย แอมแปร์ (A)
 D_f คือ ตัวประกอบการลดลง



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของกระแสผิดพลาด และค่าของ I_F , I_f , และ D_f

ในช่วงเวลาการเกิดความผิดพลาด t_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.18 กระแสกริดสูงสุด (Maximum grid current) หมายถึง ค่าออกแบบของกระแสสูงสุดที่ไหลจากกราวด์กริดสู่ดิน

$$I_G = D_f \times I_g \quad (2.9)$$

เมื่อ I_G คือ กระแสกราวด์กริดสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)
 D_f คือ ตัวประกอบการลดลง
 I_g คือ ค่าราคกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าสมมาตรที่กราวด์กริด (Grid current) ในหน่วย แอมแปร์ (A)

2.6.1.19 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้อุปกรณ์หรือบริเวณที่มีก๊าซเป็นฉนวน (Gas-Insulated Substation) หมายถึง สถานีไฟฟ้าย่อยประเภทหนึ่งแต่มีขนาดกะทัดรัด อุปกรณ์ทั้งหมด เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน สวิตช์ต่อลงดิน บัสบาร์ เหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ภายในเปลือกหุ้ม (Enclosure) ที่ถูกต่อลงกราวด์ และภายในเปลือกหุ้มจะใช้ก๊าซเป็นฉนวน

2.6.1.20 วัสดุปูผิวดิน (Surface material) หมายถึง วัสดุที่ปูผิวดิน ซึ่งไม่จำกัดว่าจะ เป็นหิน หินบด (Crushed rock) แอสฟัลท์ (Asphalt) หรือวัสดุที่มนุษย์ทำขึ้น ซึ่งวัสดุปูผิวดินจะ ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่อาจจะมีส่วนสำคัญต่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ จากเท้าทั้งสองข้างที่จะทำให้ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

2.6.1.21 อัตราส่วน X/R (X/R ratio) หมายถึง อัตราส่วนของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของระบบ เป็นตัวบ่งบอกถึงอัตราการลดลงของ dc offset เมื่ออัตราส่วน X/R มีค่าสูง จะทำให้มีค่าคงที่ของเวลาสูงและอัตราการลดลงช้าลง

2.6.2 หลักในการออกพิจารณาออกแบบระบบต่อลงดิน ตามมาตรฐาน IEEE-2000

การพิจารณาออกแบบระบบต่อลงดินมีหลักการที่ต้องพิจารณาตามลำดับดังนี้

1. ศึกษาแบบแปลนของสถานีไฟฟ้าและตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ
2. หาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
3. หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินสูงสุด และเวลาที่กระแสลัดวงจรไหลกลับในระบบ
4. หาขนาดตัวนำไฟฟ้าตะแกรงจากกระแสลัดวงจร
5. หาค่า Tolerable Touch – Step Voltage
6. กำหนดขนาดกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงสูงสุด
7. กำหนดแนวการฝังตะแกรงต่อลงดินให้ครอบคลุมพื้นที่ ที่ต้องการออกแบบทั้งหมด
8. คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน
9. คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

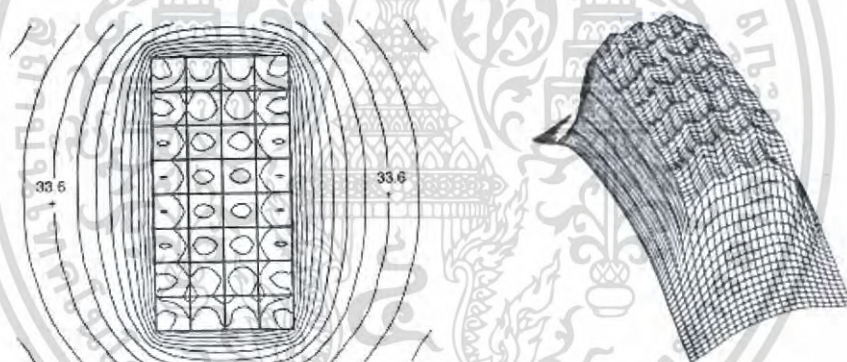
2.6.3 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจะใช้เป็นแบบตะแกรงต่อลงดิน (Ground grid) แทนทั้งสิ้นเพราะระบบต่อลงดินแบบตะแกรงที่นำมาวางใต้ผิวดินบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าจะมีข้อดีที่สำคัญคือ

1. ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบตะแกรงต่อลงดินนี้ สามารถทนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงๆ ที่ไหลลงสู่ดินได้ดีกว่าแบบอื่น
2. ระบบต่อลงดินแบบตะแกรงต่อลงดินนี้ จะมีความค่าความต้านทานน้อย เนื่องจากถ้าตะแกรงต่อลงดินนี้มีแห่งตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมยิ่งมากค่าความต้านทานจะยิ่งต่ำ การนำไฟฟ้าจะดีขึ้น

2.6.4 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบต่อลงดิน

เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติของลงดิน (Ground fault Condition) ในพื้นที่สถานีไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า ลัดวงจรที่ไหลลงดินจะสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวดิน (Potential Gradients) แผลขยายไปยังบริเวณรอบๆจุดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลลงดิน กล่าวคือจุดที่กระแสไฟฟาลัดวงจรลงดิน จะให้จุดนั้นเป็นจุดศูนย์กลาง และเป็นจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และศักย์ไฟฟ้าจะลดต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางในแนวรัศมีออกไป



รูปที่ 2.9 แนวศักย์ไฟฟ้า และเส้นศักย์ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบๆ

ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินจะมีค่าที่ไม่เท่ากันในแต่ละแนวเส้น จุดที่เป็นเส้นทางไหลของกระแสไฟฟาลัดวงจรหรือจุดเกิดเหตุจะเป็นจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุดและศักย์ไฟฟ้าจะลดต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางในแนวรัศมีออกไป จะให้คำจำกัดความว่าศักย์ไฟฟ้าพื้นผิว (Potential Gradient, Gradient Voltage) ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอที่กระจายบนผิวดิน ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่เกิดความผิดปกติขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอกระจายบนผิวดิน และมีบุคคลที่อยู่ในพื้นที่เกิดเหตุ และบุคคลนั้นมีส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายสัมผัส หรืออยู่บนแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน เช่น มือแตะโครงตัวถังของอุปกรณ์ที่มีศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งขณะที่เท้าทั้งคู่อยู่บนศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าช็อตร่างกายเปรียบเทียบบนสะพานไฟฟ้าให้กระแสไฟฟ้าไหลจากมือสู่เท้าทั้งสองข้าง หรือในกรณีที่มีมือไม่ได้แตะอุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆเลย แต่บังเอิญไม่ได้ยืนในท่าเท้าชิดกัน ซึ่งการยืนท่านี้อาจทำให้เท้าทั้งสองข้างอยู่บนเส้นศักย์ไฟฟ้าคนละเส้น และมีค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกันในกรณีเช่นนี้ก็เกิดไฟฟ้าช็อตร่างกายได้เหมือนกันเพราะเมื่อเท้ายืนอยู่บนศักย์ไฟฟ้าคนละเส้นและมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่างกัน ตามมาตรฐานให้ระยะห่างของเท้าประมาณ 1 เมตร กระแสไฟฟ้าจะไหลจากเท้าที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งเหตุการณ์ลักษณะนี้ก็ทำอันตรายถึงชีวิตได้ ดังนั้นจะเห็นว่าปัญหาของการเกิดอันตรายต่อบุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าจะเป็นเรื่องของการเกิดแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่างกัน เพราะฉะนั้นจึงต้องหาวิธีในการจำกัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วงที่บุคคลที่ปฏิบัติงานอาจจะได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เกิดศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอขึ้นบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้า และบริเวณข้างเคียง

1. กระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบต่อลงดิน เพราะถ้าระบบต่อลงดินมีขนาดพื้นที่เล็กเกินไป จนไม่สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าที่จะลดกระแสพ่วงในปริมาณที่สูงได้ระบบต่อลงดินนั้นก็จะไม่ช่วยในการลดศักย์ไฟฟ้าในแต่ละแนวเส้นให้มีค่าใกล้เคียงกันได้ และถ้าพิจารณาในตำแหน่งพื้นที่ที่ไกลออกไปจากจุดศูนย์กลางของจุดเกิดเหตุ ซึ่งเป็นจุดอยู่นอกพื้นที่ตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งเรียกว่า Remote Earth ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าถ่ายโอนขึ้นได้ (Transferred Voltage)

2. มีส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายมนุษย์ทำหน้าที่เป็นสะพานไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างจุดสองจุดที่มีความต่างกันมาก กล่าวคือ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ร่างกาย ส่งผลให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายมากไปด้วย

3. ความต้านทานที่สัมผัสกับร่างกาย (Contact Resistance) หรือค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อย ทำให้ไม่สามารถจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยได้

4. ช่วงระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจะมีผลต่อการเกิดอันตรายต่อบุคคล เช่น เมื่อกำหนดให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายด้วยปริมาณคงที่ค่าหนึ่ง อันตรายจะเกิดขึ้นต่อบุคคลนี้จะแปรผันตามระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย

2.6.5 พิภพกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์

ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตลอดทั้งร่างกายจะขึ้นอยู่กับระยะเวลา ขนาดและความถี่ของกระแสไฟฟ้านี้ โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับหัวใจ ซึ่งจะเกิดภาวะการกระตุกของหัวใจห้องล่าง (Ventricular fibrillation) ซึ่งมีผลต่อการไหลเวียนของโลหิตอย่างฉับพลัน

2.6.5.1. ผลของความถี่ (Effect of frequency) มนุษย์จะได้รับอันตรายที่ความถี่ของกระแสไฟฟ้า 50 Hz หรือ 60 Hz กระแสไฟฟ้าประมาณ 0.1 A สามารถทำให้เสียชีวิตได้ ผลการวิจัยระบุว่ามนุษย์สามารถทนได้อย่างน้อยที่สุดที่ความถี่ประมาณ 25 Hz ได้มากกว่าไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 5 เท่า และที่ความถี่ 3000-10000 Hz มนุษย์จะสามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณที่มากกว่า 50-60 Hz กล่าวคือบุคคลจะสามารถทนต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายที่ความถี่สูงได้มากกว่าความถี่ต่ำๆ

2.6.5.2 ผลของขนาดกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาที่ได้รับ (Effect of magnitude and duration) ผลทางกายภาพของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย โดยมากจะมีดังนี้ คือ ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงระดับหนึ่ง จะมีผลตั้งแตรรู้สึกได้ (Threshold Perception) กล้ามเนื้อใจหดตัว (Muscular Contraction) ไม่รู้สึกตัว (Unconsciousness) เกิดภาวะกระตุกในหัวใจห้องล่าง (Fibrillation of The Heart) หายใจขัด (Respiratory never blockage) และมีแผลไหม้ (Burning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระแสไฟฟ้าขนาด 1mA

เป็นจุดเริ่มต้นของการรับรู้คือรู้สึกได้ว่าโดนช็อต นั่นคือเป็นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่บุคคลรับรู้และสามารถที่ผล (Fingertips) ออกจากจุดที่ไฟฟ้ารั่วได้

2. กระแสไฟฟ้าขนาด 1 – 6 mA

เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ได้ ไม่มีผลกระทบต่อระบบประสาทในการควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อให้สามารถจับ หรือปล่อยวัตถุได้

3. กระแสไฟฟ้าขนาด 9 – 25 mA

บางครั้งทำให้เกิดความเจ็บปวดและเป็นเรื่องยากที่บุคคลจะสามารถผลตัวหรือปล่อยมือส่วนที่นำไฟฟ้าผ่านร่างกายออกจากจุดที่มีไฟฟ้ารั่วได้ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่านี้ทำให้กล้ามเนื้อหดตัว และหายใจไม่สะดวก ผลเหล่านี้จะเกิดไม่ตลอดแต่จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกตัดออก นอกจากการหดตัวของกล้ามเนื้อที่รุนแรงมาก และการหายใจหยุดลงเป็นระยะเวลาหลายๆ วินาที กรณีเหล่านี้ บ่อยครั้งที่ยังสามารถฟื้นคืนชีพได้

4. กระแสไฟฟ้าขนาด 60 – 100 mA

เกิดอาการกระตุกของกล้ามเนื้อ หัวใจหยุดเต้น หรือการยับยั้งการหายใจ ซึ่งเป็นเหตุของการบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้ ดังนั้นมาตรฐาน IEEE Std.80 – 2000[1] จะเน้นย้ำความสำคัญของจุดเริ่มต้นการกระตุกของกล้ามเนื้อ ถ้าสามารถรักษาระดับของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่านี้ได้ด้วยการออกแบบระบบการต่อลงดินที่ระมัดระวังก็สามารถหลีกเลี่ยงการบาดเจ็บ หรือเสียชีวิตได้ Dalziel และร่วมด้วยกับบุคคลอื่นๆ ได้แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ทำให้กล้ามเนื้อกระตุก I_b ที่ระยะเวลา 0.03 – 0.3 วินาที ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานที่ดูดซึมโดยร่างกายมนุษย์ ซึ่งอธิบายได้ดังสมการนี้

$$S_B = (I_B)^2 \times t_S \quad (2.10)$$

I_B คือ ขนาดกระแสไฟฟ้ารากกำลังสอง (rms) ที่ไหลผ่านร่างกาย มีหน่วยเป็น A

t_S คือ ช่วงระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย มีหน่วยเป็นวินาที

S_B คือ ค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลองซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานการกระตุกทางไฟฟ้าที่ทนได้

2.6.6 การจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้

ขนาด และระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 - 60 Hz ที่ไหลผ่านร่างกายควรจะมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อ (Ventricular Fibrillation)

2.6.6.1 สูตรระยะเวลา (Duration formula) ช่วงระยะเวลาสำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 – 60 Hz ที่สามารถทนได้ ส่วนใหญ่จะสัมพันธ์กับขนาดของกระแสไฟฟ้าซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (2.10) ผลลัพธ์จากการศึกษาของ Dalziel ได้สมมุติว่า 99.5% ของคนทั้งหมดสามารถทนกระแสไฟฟ้า โดยปราศจากการกระตุกของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่าง (Ventricular Fibrillation) ขนาดของกระแสไฟฟ้า และช่วงที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย ถูกกำหนดด้วยสมการตามนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (2.11)$$

เพิ่มเติมจากสมการที่ (2.10) ก่อนหน้านี้

$$k = \sqrt{S_B} \quad (2.12)$$

Dalziel พบว่าพลังงานกระตุกสามารถทำให้รอดชีวิต 99.5% ของบุคคลที่มีน้ำหนักตัวประมาณ 50 Kg (110 lb) จะมีค่า $S_B = 0.0135$ ดังนั้น $K_{50} = 0.116$ และสูตรสำหรับกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นที่ยอมรับได้จากสมการ (2.10) เมื่อ $t_s = 1s$ จะได้ $I_B = 116mA$ และ $t_s = 0.1s$ จะได้ 367 mA

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{สำหรับ น้ำหนักตัว 50 กิโลกรัม} \quad (2.13)$$

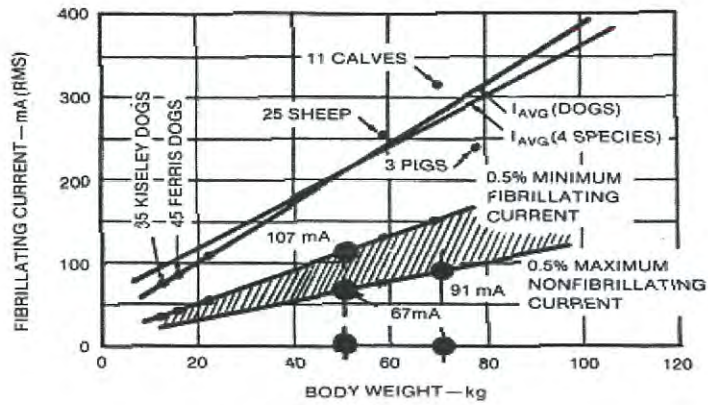
สมการที่(2.13) จะได้ค่า I_B เท่ากับ 116 mA ในปี 11936 Ferris ได้แนะนำค่า $I_B = 100$ mA เป็นจุดเริ่มต้นของการกระตุกของกล้ามเนื้อ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย 100mA ได้มาจากการทดลองที่กว้างขวางที่มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย ในการทดลองใช้สัตว์ซึ่งมีน้ำหนักร่างกายใกล้เคียงน้ำหนักของร่างกายของมนุษย์ ได้เสนอค่าระยะเวลาการกระตุก มากที่สุด 3s การทดลองแนะนำจุดเริ่มต้นที่ชัดเจนที่มีอยู่ 2 ข้อ ข้อแรกระยะเวลาการกระตุกสั้นกว่าระยะเวลาการเต้นของหัวใจ 1 ครั้ง สำหรับผู้ใหญ่ ที่มีน้ำหนักตัว 50 Kg (110 lb) Biegelmeier เสนอค่าเริ่มต้นที่ 500 mA และ 50 mA

2.6.6.2 ข้อสมมุติฐานในด้านอื่นๆ (Alternative assumption) กระแสไฟฟ้าที่เริ่มทำให้อาการกล้ามเนื้อกระตุก (Fibrillation current) ถูกสมมุติให้เป็นฟังก์ชันของน้ำหนักร่างกายของแต่ละคนซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ตามรูปภาพได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าวิกฤต และน้ำหนักของร่างกาย สำหรับสัตว์ประเภทต่างๆ ที่มีพันธุกรรมต่างกัน (ลูกรว และ และสุกร) และขอบเขตจุดเริ่มต้นทั่วไป 0.5 % ในปี 1961 แนะนำให้ค่าคงที่ S_B และ K ในสมการที่ (2.10) สมการที่ (2.11) มีค่า 0.0272 และ 0.165 ตามลำดับ และสมมุติค่าที่ชัดเจนสำหรับ 99.5% ของประชาชนทั้งหมดที่มีน้ำหนักประมาณ 70 Kg (155 lb) จากการศึกษาของDalzie ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมการที่ (2.11) นำไปสู่การเปลี่ยนแปลง ค่าของ $k=0.157$ และ $S_B = 0.0246$ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับคนที่มีน้ำหนัก 70 Kg (155 lb) ดังนั้น

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{สำหรับ น้ำหนักตัว 70 กิโลกรัม} \quad (2.14)$$

ใช้ค่า $k = 0.157$ โดยมีข้อแม้ว่าน้ำหนักของประชากรเฉลี่ยสามารถคาดหวังว่าจะมีน้ำหนักตัวอย่างน้อย 70 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

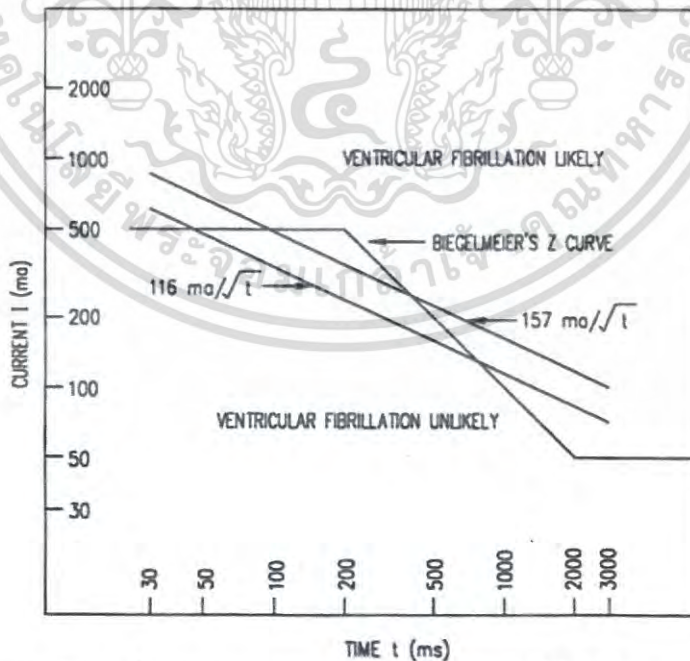


VALUE OF CONSTANT k FOR EFFECTIVE RMS VALUES OF I_B ($k = I_B \sqrt{t}$):
 $k_{70} = 0.091 \sqrt{3} = 0.157$
 $k_{50} = 0.067 \sqrt{3} = 0.116$
 $k_{50} = 0.107 \sqrt{3} = 0.185$
 FIBRILLATION

รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อหัวใจต่อน้ำหนักของสัตว์ในหลายพันธุ์กรรมซึ่งพิจารณาบนระยะเวลาของการช็อคของ กระแสไฟฟ้า

2.6.6.3 การเปรียบเทียบระหว่างสมการของ Dalziel และเส้นโค้งของBiegelmeier

ในการเปรียบเทียบของสมการที่(2.13) สมการที่(2.14) และเส้นโค้งตัว Z ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายต่อเวลาที่พัฒนาโดย Biegelmeier ซึ่งตีพิมพ์ โดย Biegelmeier และ Lee ซึ่งแสดงไว้ในรูปภาพที่ 2.11 เส้นโค้งรูปตัว Z จำกัดกระแสไฟฟ้าไว้ที่ 500mA สำหรับเวลาที่ยาวกว่า 0.2 s นอกจากนั้นลดลง 50 mA ที่ 2 s และเวลาที่ยาวกว่า 2 s ซึ่งการใช้สมการที่ (2.13) กระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้จะน้อยกว่าเส้นโค้งรูปตัว Z ของ Biegelmeier ที่เวลา 0.06 s ถึง 0.7 s



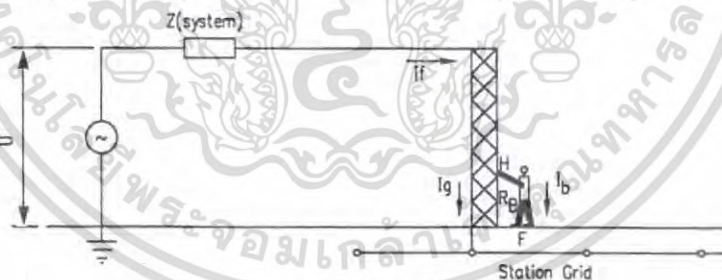
รูปที่ 2.11 กระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้จะน้อยกว่าเส้นโค้งรูปตัว Z ของ Biegelmeier ที่เวลา 0.06 s ถึง 0.7s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

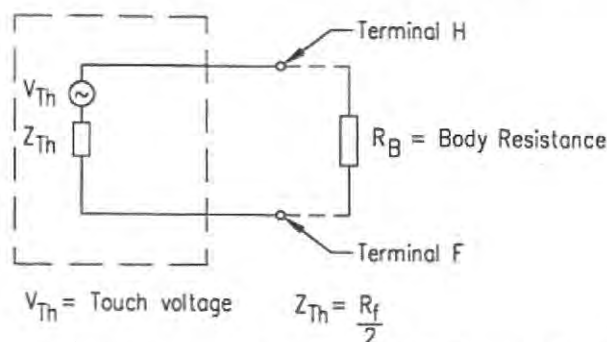
2.6.6.4 ข้อสังเกตเกี่ยวกับการปิดซ้ำ (Non on reclosing) การปิดซ้ำภายหลังจากการ เกิดความผิดปกติของแรงดัน(ground fault) คือการปฏิบัติการทำงานของเครื่องมือตัดต่อวงจร เช่นเหตุการณ์ที่บุคคลถูกไฟฟ้าดูดครั้งแรก โดยปราศจากการบาดเจ็บถาวรต่อจากนั้นปิดตัวซ้ำอัตโนมัติ(Reclosure) ก็ทำการต่อวงจรเมื่อต่อวงจรในขณะที่บุคคลนั้น ยังไม่ได้หลุดจากวงจรที่ผิดปกติก็ทำให้เกิดการกระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นครั้งที่สอง ตั้งแต่เริ่มต้นใช้เวลาน้อยกว่า 0.33s เหตุการณ์กระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าในครั้งที่สองมีระยะเวลาในช่วงเวลาที่สั้นก่อนที่บุคคลนั้นจะฟื้น ซึ่งบางที่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุที่ร้ายแรงจากการปิดซ้ำอัตโนมัติ และเป็นไปได้มากเลยที่การกระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าในครั้งที่สองจะลดลงเนื่องจากช่วงระหว่างเวลาการปิดซ้ำบางที่เป็นสิ่งสำคัญ

2.6.7 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

ค่าของกระแสไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้นั้น จะถูกนำมาใช้ในสมการที่(2.13) และสมการที่(2.14) เมื่อประกอบกับค่าคงที่ ที่เหมาะสม ก็สามารถที่จะหาแรงดันไฟฟ้าที่ทนได้ระหว่างจุดสองจุดที่สัมผัสสัญลักษณ์เหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุดังแสดงใน รูปที่ (2.12) เมื่อเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นที่ผิวภายในสถานีไฟฟ้า เหนือระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า และบริเวณรอบสถานีไฟฟ้าทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด หรือค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า และรอบสถานีไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดิน จึงต้องพิจารณาความปลอดภัยของมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก ค่าความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้า ระหว่างจุดสองจุดที่มักจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้า นำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้า ซึ่งก็คือค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ในรูปที่ 2.12 และ 2.14



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรการเกิดอุบัติเหตุเมื่อเกิดมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรสมมูลย์ของมนุษย์ขณะได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_B = 1000\Omega$ คือความต้านทานร่างกายมนุษย์

I_B คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (ร่างกายเป็นส่วนหนึ่งของวงจรอุบัติเหตุ ดังแสดงในรูปที่ 2.11)

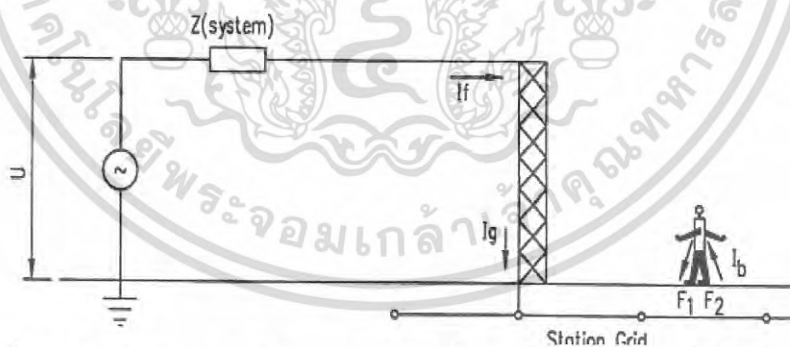
R_A คือค่าความต้านทานประสิทธิภาพรวมของวงจรอุบัติเหตุในหน่วย โอห์ม

V_A คือค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพรวมของวงจรอุบัติเหตุ(แรงดันสัมผัส หรือแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ในหน่วย V)

มนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเมื่อทำการสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.12 โดยค่าความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่มือมนุษย์สัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์(H) กับตำแหน่งที่มนุษย์ยืนอยู่(F) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกจากมือข้างที่สัมผัสกับ จากรูปที่ 2.12 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดัน ดังในรูปที่ 2.13 ดังนั้นสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่ได้รับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส ซึ่งก็คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ จากในวงจรมูลุย์นี้ แสดงเป็นสมการที่ (2.15)

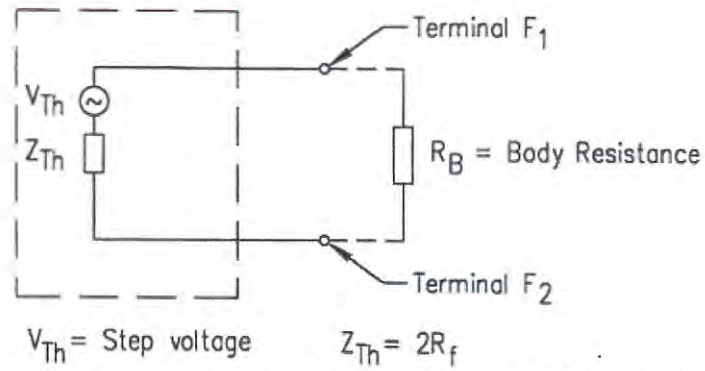
$$I_b = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \quad (2.15)$$

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้าทั้งสองข้าง ผลของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจากเท้าข้างหนึ่ง (F1) ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง (F2) เพื่อใช้เป็นเส้นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลลงดิน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรสมมูลย์ที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ค่าความต้านทานแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวใช้ สมการที่(2.16)

$$Z_{th} = \frac{R_f}{2} \quad (2.16)$$

ค่าความต้านทานแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวใช้ สมการที่(2.17)

$$Z_{th} = 2R_f \quad (2.17)$$

R_f เป็นค่าความต้านทานของเท้าข้างเดียว มีหน่วย โอห์ม ในการวิเคราะห์ความต้านทานเท้าที่ได้จากความต้านทานของรองเท้า ถุงเท้า และอื่นๆ ความต้านทานของเท้าที่นำมาพิจารณาเป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นบนผิวหนังอยู่ระหว่างเป็นความต้านทานจำเพาะของดิน ρ มีหน่วยเป็น($\Omega.m$) สมการที่(2.18) เป็นสมการที่หาค่าความต้านทานของเท้าโดยประมาณ โดยสมมติให้ b เป็นแผ่นระนาบเหล็กวงกลมแทนรัศมีของเท้ามีรัศมี 8 เซนติเมตร)

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (2.18)$$

สำหรับความต้านทานของเท้าที่อยู่บนพื้นดินมี 2 สมการคือสมการที่ (2.19) และสมการ (2.20)

$$Z_{th} = 1.5 \rho \quad (2.19)$$

$$Z_{th} = 6.0 \rho \quad (2.20)$$

สมการที่(2.21) ได้จากสมการที่(2.11)และ (2.19) ที่ $R_B=1000 \Omega$ ใช้คำนวณหาค่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสของมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{touch} = I_g (R_B + 1.5\rho) \quad (2.21)$$

สมการที่(2.22) ได้จากสมการที่(2.11) และ (2.20) ที่ $R_B=1000\ \Omega$ ใช้คำนวณหาค่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวของมนุษย์

$$E_{step} = I_g (R_B + 6.0\rho) \quad (2.22)$$

2.6.8 การโรยวัสดุที่ผิวดินในพื้นที่บริเวณสถานีไฟฟ้า

การโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า ใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดินเพื่อเป็นการช่วยเพิ่มความต้านทานที่เท้าของมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าให้สูงจึงจะช่วยป้องกันอันตรายให้กับมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้า จากค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า โดยส่วนมากวัสดุที่ใช้ในการโรยที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า ใช้ในการเพิ่มความต้านทานที่เท้าของมนุษย์นั้น มักจะใช้หินกรวดที่มีความหนา ระหว่าง 8 – 15 เซนติเมตรและผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินนี้จะทำให้ค่าความต้านทานของเท้ามีค่าดังสมการที่(2.23)

$$R_f = (\rho_s / 4.b).C_s \quad (2.23)$$

โดยที่ C_s คือค่าตัวคูณที่เกิดเนื่องจากความหนาของวัสดุที่โรยบนผิวดิน ได้ระบุสมการที่ใช้สำหรับหาคำนวนค่าไว้ดังใน สมการที่(2.24)

$$C_s = 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad (2.24)$$

ต่อมาในปี 1994 Thaper , Gerez และ Kejiwal ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่า C_s ขึ้นมาใหม่เนื่องจากสมการเดิมที่ใช้อยู่นั้น ได้จากการทดลองแทนเท้าด้วยครึ่งทรงกลม รัศมี 8 ดังแสดงในสมการที่ (2.25)

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\infty} K^n R_{m(2nh)} \quad (2.25)$$

โดยที่ $R_{m(2nh)}$ คือค่าความต้านทานเหนี่ยวนำแผ่นโลหะที่ใช้แทนเท้าทั้งสองข้างที่เกิดขึ้นเป็นระยะทาง $(2nh_s)$ ในตัวนำที่มีความหนานั่นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ แต่เนื่องจากการพิจารณาหาค่า C_s จากสมการที่ (2.25) นั้นเป็นวิธีที่ไม่สะดวกเพราะมีการคำนวณที่ยุ่งยาก จึงได้มีการนำเสนอสมการเพื่อใช้หาค่าโดยประมาณของค่า C_s ขึ้นมาใช้งาน และในปีเดียวกันได้เสนอสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สามารถคำนวณได้ด้วยมือและมีความรวดเร็ว ดังสมการที่ (2.26) ขึ้นมาเพื่อใช้คำนวณหาค่า C_s

$$C_s = \frac{1+K}{1-K} - \frac{4K}{\pi(1-k)} \tan^{-1}(2h/b) - 0.21k^2(e^{-7h} - e^{-30h}) \quad (2.26)$$

ต่อมาในปี 2000[1] ได้นำเสนอสมการที่จะใช้ในการคำนวณหาค่า C_s โดยประมาณขึ้นดังในสมการที่ (2.27)

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (2.27)$$

จากผลการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความต้านทานของเท้าจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมการที่ (2.21) ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ สำหรับมนุษย์ที่น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัม เมื่อมีการโรยวัสดุที่ผิวดิน ได้ดังในสมการที่ (2.28) และ (2.29)

$$E_{touch50} = (1000 + 1.15\rho_s C_s) \frac{0.016}{\sqrt{t_s}} \quad (2.28)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.15\rho_s C_s) \frac{0.0157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.29)$$

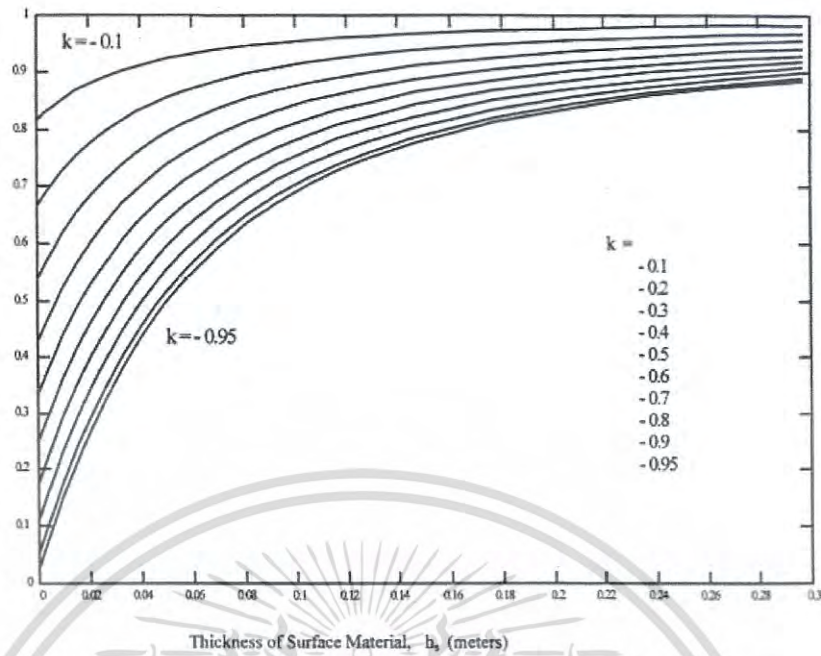
จากสมการที่(2.24) สามารถหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ ที่น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัม เมื่อมีการโรยวัสดุที่ผิวดิน ดังในสมการที่ (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$E_{step50} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.016}{\sqrt{t_s}} \quad (2.30)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.0157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.31)$$

สมการที่ (2.28) ถึง (2.31) ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงค่าความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินในกรณีที่มีการโรยวัสดุที่ผิวดิน

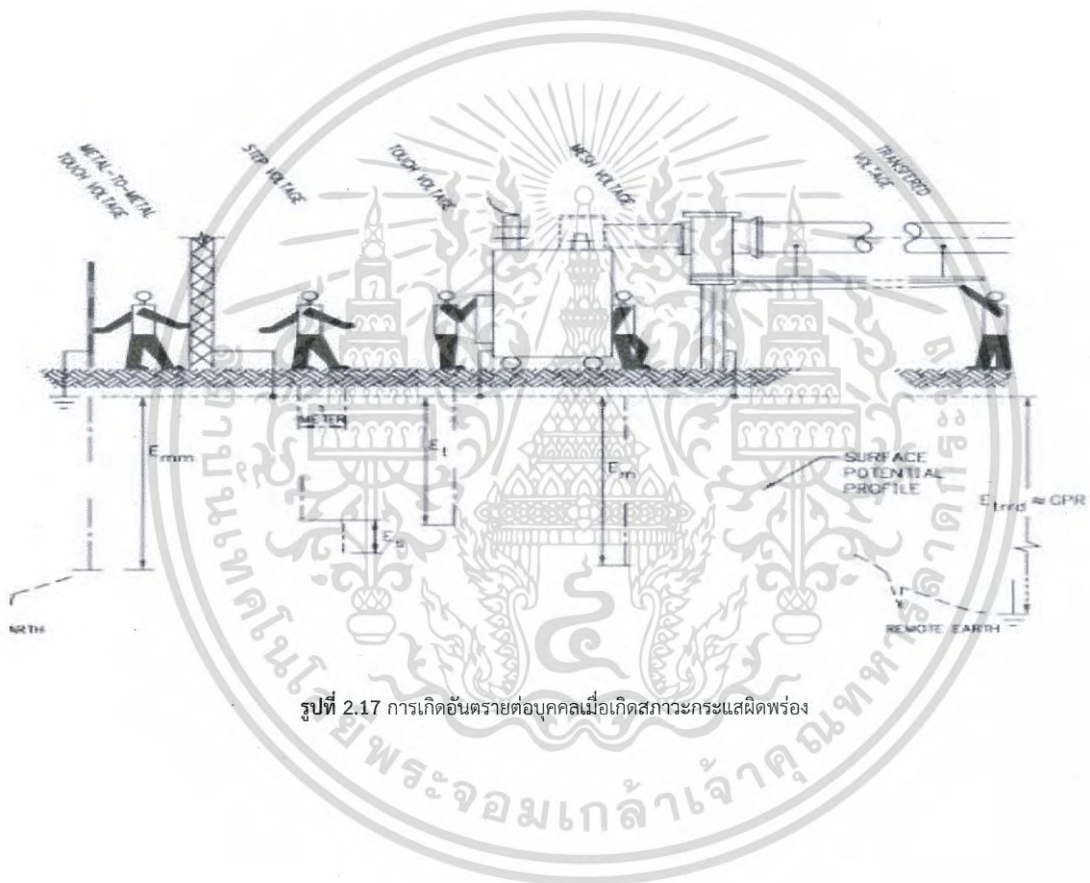
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_s, h_s

2.6.9 พื้นฐานเหตุการณ์ การเกิดอันตรายต่อบุคคลเมื่อเกิดสถานะกระแสผิวดร่อง

รูปที่ 2.17 และ รูปที่ 2.18 แสดงเหตุการณ์พื้นฐาน 5 เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับบุคคล และ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อสายดิน (เมื่อปรับค่า h_s จากสมการที่(2.27) สังเกตได้ว่าค่า C_s มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ ความหนาของวัสดุที่นำมาปูผิวดินชั้นบนมีค่าเพิ่มมากขึ้น)



รูปที่ 2.17 การเกิดอันตรายต่อบุคคลเมื่อเกิดสภาวะกระแสผิดพ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transferred Potential)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.10 ขนาดและวัสดุของสายตัวนำต่อลงดิน

2.6.10.1 คุณสมบัติของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

สายตัวนำเป็นอุปกรณ์หลักที่นำมาใช้ประกอบเป็นระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยทำหน้าที่นำกระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นกระจายลงสู่ดิน ดังนั้นสายตัวนำที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. มีค่าความนำจำเพาะเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์สูงเมื่อกระแสลัดวงจรไหลผ่าน
2. ต้องไม่หลอมละลายและทนต่อแรงทางกลที่เกิดจากขนาดกระแสลัดวงจรและช่วงเวลาการไหล
3. มีความแข็งแรงทางกลและทนทานและการผุกร่อนตลอดอายุการใช้งาน
4. สามารถรักษาสภาพไว้ได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีการผุกร่อนหรือถูกกระแทกจากแรงภายนอก

2.6.10.2 ขนาดของสายตัวนำ

ขนาดของสายตัวนำระบบต่อลงดินจะขึ้นอยู่กับ

1. ขนาดกระแสลัดวงจรที่ไหลผ่าน
2. ช่วงเวลาดัดกระแส
3. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิแวดล้อม
4. อุณหภูมิที่ยอมรับได้

ซึ่งมีสมการดังนี้

$$A_{mm} = I \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{T_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2.32)$$

เมื่อ	A_{mm}	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด ในหน่วย ตารางมิลลิเมตร (mm^2)
	I	คือ กระแสลัดวงจรลงดินเป็นค่า rms ในหน่วย กิโลแอมแปร์ (kA)
	T_m	คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ยังไม่หลอมละลาย ในหน่วย องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
	T_a	คือ อุณหภูมิรอบด้านหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ในหน่วย องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
	T_r	คือ อุณหภูมิอ้างอิงสำหรับค่าคงตัวของวัสดุ ในหน่วย องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)
	α_0	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$
	α_r	คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_r^{\circ}C$
	ρ_r	คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ ที่อุณหภูมิ T_r ($\mu\Omega/cm^3$) ในหน่วย โอห์ม-เมตร ($\Omega\cdot m$)
	t_c	คือ ช่วงเวลาที่กระแสลัดวงจรไหล ในหน่วย วินาที (s)
	TCAP	คือ ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ($J/cm^3/^{\circ}C$)
	K_0	มีค่าเท่ากับ $1/\alpha_0$ หรือ $1/\alpha_r - T_r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำระบบต่อลงดินที่คำนวณได้นั้นจะใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต่อลงดินนั้นสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2.1 [1, 17]

2.6.10.3 โลหะที่ใช้เป็นลวดตัวนำในระบบต่อลงดิน [1, 11, 12]

1.ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี มีความนำจำเพาะสูงและไม่มีปัญหาในเรื่องของการผุกร่อน เพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบเมื่อนำมาฝังในดิน โดยทำการเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

2.เหล็กกล้าหุ้มทองแดง (Copper-Clad Steel)

เหล็กกล้าหุ้มทองแดงนั้นนิยมใช้เป็นแท่งหลักดินเนื่องจากทนต่อการตอกลงใต้ดิน และเพื่อหลีกเลี่ยงการลักขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินออกไปขาย

3.อะลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบธรรมดา เนื่องจากมีข้อเสียคือ

1. อะลูมิเนียมจะมีการผุกร่อนเมื่อมีการฝังลงในดิน และจะไม่สามารถใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้เมื่อเกิดการผุกร่อน
2. เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการผุกร่อนที่ผิวของอลูมิเนียม

ทั้งนี้เพราะว่าอะลูมิเนียมประพฤติตัวเป็นขั้วบวกเมื่อทำการฝังดินโดยเทียบกับ โลหะอื่นฝังอยู่ภายในบริเวณเดียวกัน โดยส่วนมากแล้วอะลูมิเนียมจะใช้เป็นเปลือกหุ้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS (Gas Insulated Substation)

4.เหล็ก (Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินและใช้เป็นแท่งกราวด์รอตแต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องพิจารณาถึงการป้องกันการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวของเหล็กหรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็ก เพื่อให้ประพฤติตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดิน ในระบบต่อลงดินถึงแม้จะทำการเลือกใช้ ทองแดง หรือเหล็กชุบทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดินเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการผุกร่อนที่ผิวดำนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน แต่ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากการผุกร่อนของโลหะที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดิน เพราะทองแดงและเหล็กนั้นจะประพฤติตัวเหมือน Galvanize Cell โดยที่ดินทำหน้าที่เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า โดยที่เหล็กจะประพฤติตัวเหมือนขั้วบวก และทองแดงจะประพฤติตัวเหมือนขั้วลบ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาการผุกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินได้ดังนี้

1. ทำการเคลือบผิววัสดุที่ประพฤติตัวเป็นขั้วบวกเมื่อฝังลงในดินโดยการพันเทปพลาสติก หรือใช้ Asphalt ผสมเคลือบที่ผิวของวัสดุ
2. กำหนดการวางแนวท่อในบริเวณที่มีการฝังระบบต่อลงดินนั้นใหม่ เพื่อให้ตัวนำที่เป็นทองแดงใดๆที่ข้ามแนวของท่อน้ำหรือวัตถุอื่นๆที่เป็นโลหะที่ไม่ได้เคลือบอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเคลือบโลหะชนิดใดชนิดหนึ่งที่อยู่ใกล้กันด้วยฉนวน โดยปกติแล้วเราจะเคลือบฉนวนท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้คุณสมบัติของขั้วลบในการป้องกันการผุกร่อน (Cathodic protection) โดยใช้แอนโนดหรือป้อนด้วยกระแสไฟฟ้า
4. หลีกเลี่ยงการใช้ท่อเหล็ก โดยเลือกใช้ท่อพลาสติกแทน

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของวัสดุ

Description	α_r at 20 °C (1/°C)	K at 0 °C (°C)	Fusing Temperature T_m (°C)	ρ_r at 20 °C ($\mu\Omega/\text{cm}^3$)	TCAP (J / $\text{cm}^3/^\circ\text{C}$)
Copper, annealed soft-drawn (100% conductivity)	0.00393	234	1,083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)	0.00381	242	1,084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire (40% conductivity)	0.00378	245	1,084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire (30% conductivity)	0.00378	245	1,084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod (20% conductivity)	0.00378	245	1,084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade (61% conductivity)	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy (53.5% conductivity)	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy (52.5% conductivity)	0.00347	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire (20.3% conductivity)	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020 (10.8% conductivity)	0.00160	605	1,510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod (9.8% conductivity)	0.00160	605	1,400	17.5	4.44
Zinc-coated steel rod (8.6% conductivity)	0.00320	293	419	20.10	3.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Stainless steel, 304 (2.4% conductivity)	0.00130	749	1,400	72.00	4.03
---	---------	-----	-------	-------	------

2.6.11 ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย จะยึดตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 และมีหลักการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งแสดงได้ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.19 ส่วนขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สํารวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

คือการหาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณในขั้นตอนอื่นๆต่อไป เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่จะมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งโดยมากสามารถหาข้อมูลได้จากแบบก่อสร้างของสถานีไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ

การหาขนาดสายตัวนำจะใช้กระแสลัดวงจรลงดินสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นและใช้ช่วงเวลาการตัดกระแสที่เป็นช่วงเวลาสูงสุด การหาขนาดสายตัวนำได้แสดงไว้ก่อนหน้านี

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้

เป็นขั้นตอนคำนวณเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ของระบบต่อลงดินในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่จะทำการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น

โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำ รวมทั้งลักษณะรูปทรงของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน

เพื่อใช้ค่าความต้านทานระบบต่อลงดินที่คำนวณได้ไปคำนวณในขั้นตอนอื่นๆต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด

ในการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงประเภทการลัดวงจรที่ทำให้กระแสลัดวงจรลงดินสูงสุด ตำแหน่งการเกิดการลัดวงจร Decrement factor และการขยายระบบในอนาคต

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่า Ground Potential Rise (GPR)

ถ้า $GPR < E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $GPR > E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า

คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_g) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องคำนึงถึงลักษณะรูปร่างของกราวด์กริด หรือของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

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

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

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

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

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

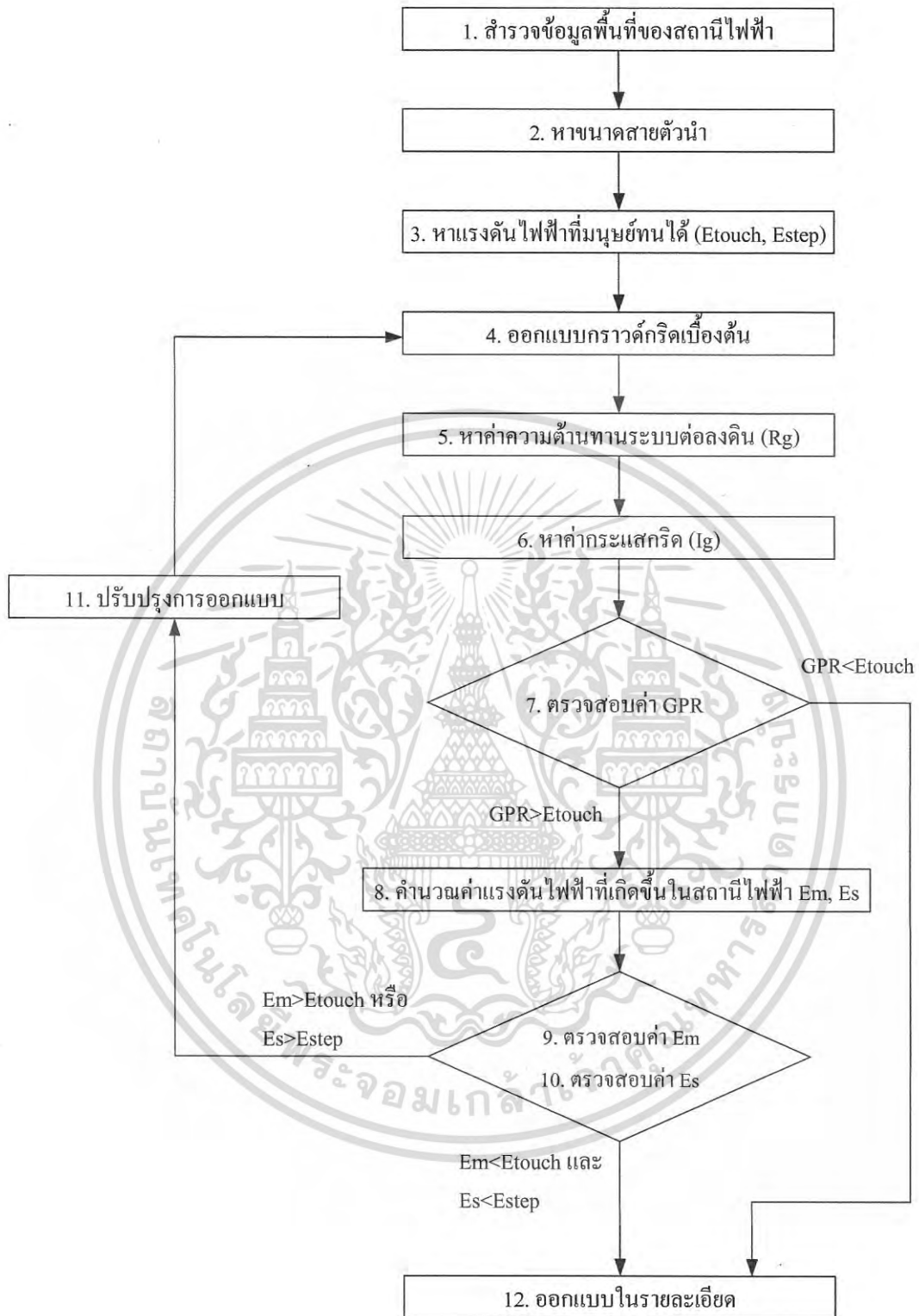
ขั้นตอนที่ 11 ปรับปรุงการออกแบบ

เมื่อมาถึงขั้นตอนที่ 11 ได้แสดงว่าผู้ออกแบบยังออกแบบระบบต่อลงดินที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ลดระยะห่างของกราวด์กริด ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำด้วย
2. เพิ่มกราวด์รอต เพื่อเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำ
3. ลดกระแสลัดวงจร เพื่อลดกระแสกริด
4. ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสลัดวงจร เพื่อให้มนุษย์ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น
5. ใช้วัสดุบุผิวดินที่มีค่าความต้านจำเพาะมากขึ้นกว่าเดิม

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด

กล่าวคือการออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่า การออกแบบระบบต่อลงดินที่ได้ดำเนินการมานั้นปลอดภัย จากนั้นจะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือกราวด์กริด การเชื่อมต่อตัวนำเข้าไปยังตู้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือสถานโกไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดินซึ่งต้องควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.19 แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.11.1 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบในด้านการคำนวณนั้นมีสัญลักษณ์ตัวแปรหลายตัวมาที่เกี่ยวกับการคำนวณที่ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบและมีความเข้าใจ สามารถแยกแยะได้ว่าตัวแปรสัญลักษณ์ต่างๆ คืออะไร เพื่อง่ายต่อความเข้าใจและคำนวณ ซึ่งตัวแปรต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.2 [1, 11, 12, 17]

ตารางที่ 2.2 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน

สัญลักษณ์	ความหมายภาษาอังกฤษ	คำอธิบายภาษาไทย	หน่วย
ρ	Soil resistivity	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	$\Omega\text{-m}$
ρ_1, ρ_2	Soil resistivity	ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นที่ 1 และ 2	$\Omega\text{-m}$
ρ_s	Surface layer resistivity	ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวดินชั้นบน	$\Omega\text{-m}$
$3I_0$	Symmetrical current in substation for conductor sizing	กระแสไฟฟ้าผัดพร้อมที่ไหลในแท่งตัวนำไฟฟ้า	A
A	Total area enclosed by ground grid	พื้นที่ของระบบต่อลงดิน	m^2
C_s	Surface layer derating factor	แฟคเตอร์ปรับลดลงของวัสดุที่ใช้โรยผิวดินชั้นบนสุด	-
d	Diameter of grid conductor	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้าที่นำมาใช้ในระบบต่อลงดิน	m
D	Spacing between parallel conductors	ระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่นำมาวางขนานกัน	m
D_f	Decrement factor for determining I_G	แฟคเตอร์ปรับเพิ่มสำหรับกระแสไฟฟ้ากริดสูงสุด I_G	-
D_m	Maximum distance between any two points on the grid	ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดภายในกริดที่มีค่ามากที่สุด	m
E_m	Mesh voltage at the center of the corner mesh for this simplified method	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างตะแกรงของเมชกริด 1 ช่องตะแกรง พิจารณาที่จุดศูนย์กลางของตะแกรง	V
E_s	Step voltage between a point above the out corner of the grid and a point m diagonally outside the grid for the simplified method	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่ตกคร่อมระหว่างเท้าทั้งสองข้าง เมื่อเท้าแยกออกจากกันเป็นระยะห่าง 1 เมตร	V
$E_{\text{step}50, 70}$	Tolerable step voltage for human with 50 , 70 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์พอนทนได้ โดยพิจารณาน้ำหนักร่างกายที่ 50,70 กิโลกรัม	V
$E_{\text{touch}50, 70}$	Tolerable touch voltage for human with 50 , 70 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์พอนทนได้ โดยพิจารณาน้ำหนักร่างกายที่ 50,70 กิโลกรัม	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมายภาษาอังกฤษ	คำอธิบายภาษาไทย	หน่วย
h	Depth of ground grid conductors	ความลึกของกริดที่ฝังลงดิน เริ่มวัดจากรอยต่อของดินชั้นที่ ρ_s ลงสู่ดินชั้นล่าง	m
h_s	Surface layer thickness	ความหนาของวัสดุที่นำมาโรยผิวดินชั้นบน	m
I_G	Maximum grid current that flows between ground grid and surrounding earth (include dc offset)	กระแสที่ไหลผ่านกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งของกระแสลัดวงจรลงดินหรืออาจจะมีขนาดเท่ากับกระแสลัดวงจรลงดิน	A
I_g	Symmetrical grid current	กระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกในดิน	A
K	Reflection factor between different resistivities	แฟคเตอร์การสะท้อน เนื่องจากค่าความต้านทานของดิน 2 ชั้นที่มีค่าต่างกัน	-
K_h	Corrective weighting factor that emphasizes the effect of grid depth simplified method	แฟคเตอร์น้ำหนักที่ถูกต้อง เป็นผลกระทบความลึกของตะแกรงต่อลงดิน	-
L_c	Total length of grid conductor, m	ความยาวทั้งหมดของตัวนำกริด	m
L_M	Effective length of $L_c + L_R$ for mesh voltage, m	ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งรอต สำหรับแรงดันไฟฟ้าเมโซลท์เตจ	m
L_R	Total length of ground rods	ความยาวทั้งหมดของกราวด์รอต	m
L_r	Length of ground rod at each location	ความยาวของกราวด์รอตแต่ละแท่ง	m
L_S	Effective length of $L_c + L_R$ for step voltage	ผลกระทบของความยาวกริดกับความยาวของแท่งรอต สำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวโวลท์เตจ	m
L_T	Total effective length of grounding system conductor, including grid and ground rods, m	ค่าความยาวของตัวทั้งหมดที่ใช้ในระบบต่อลงดิน	m
L_x	Maximum length of grid conductor in x direction	ตัวนำในแกน x ที่มีความยาวมากที่สุด	m
L_y	Maximum length of grid conductors in y direction	ตัวนำในแกน y ที่มีความยาวมากที่สุด	m
n	Geometric factor composed of factors $n_a, n_b, n_c,$ and n_d	จำนวนของตัวนำที่วางขนานกันอยู่ภายในดิน จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของตะแกรงต่อลงดิน	-
n_R	Number of rods placed in area A	จำนวนแท่งกราวด์รอตทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่	-
R_g	Resistance of grounding system	ความต้านทานของระบบต่อลงดิน	Ω
S_f	Fault current division factor (split factor)	แฟคเตอร์การแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมายภาษาอังกฤษ	คำอธิบายภาษาไทย	หน่วย
t_c	Duration of fault current for sizing ground conductor	ระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าผิดพลาดที่ไหลผ่านแท่งตัวนำไฟฟ้า	s
t_f	Duration of fault current for determining decrement factor	ระยะเวลากระแสไฟฟ้าผิดพลาดสำหรับการหาแฟคเตอร์การลดลง	s
t_s	Duration of shock for determining allowable body current	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าผิดพลาดไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มีได้	s

2.6.11.2 ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน เป็นตัวแปรที่เป็นปัจจัยกระทบต่อเกณฑ์ความปลอดภัยของตะแกรงต่อลงดินที่ได้ออกแบบขึ้นได้แก่กระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด (Maximum Grid Current : I_G) ระยะเวลาที่ภาวะผิดพลาด(Fault Duration : t_f) เวลาที่เกิดไฟฟ้าดูดต่อบุคคล (Shock Duration t_s) ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity: ρ) ความต้านทานของวัสดุโรยผิวดิน(Surface material Resistivity : ρ_s) และรูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Geometry) ยังมีตัวแปรหลายๆตัวที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดของตัวนำไฟฟ้า ที่ใช้ทำระบบต่อลงดิน ทั้งในแนวราบและแนวตั้งระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้า(Conductor Spacing) และความลึกของตะแกรงต่อลงดินจะมีผลกระทบอย่างมากต่อแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage)

2.6.11.3 ความต้านทานระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ถือเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญมากในการออกแบบระบบการต่อลงดินเพื่อให้มีความปลอดภัยต่อบุคคลและความมั่นคงของระบบ กล่าวคือเมื่อเกิดความผิดพลาดหรือเกิดการลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้า ระบบกราวด์กริดจะถูกออกแบบให้สำหรับช่วยกระจายกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาดลงสู่ดิน กระแสผิดพลาดที่ไหลในกราวด์กริดจะทำให้แรงดันที่กราวด์กริดเพิ่มขึ้นและดินที่อยู่รอบๆ กราวด์กริดที่ห่างออกไปจะมีแรงดันเกิดขึ้นด้วย ซึ่งความปลอดภัยของบุคคลในพื้นที่สถานีไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ดังนั้นการที่จะลดอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าทั้งสองได้นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องลดแรงดันไฟฟ้าที่กระจายบนพื้นของสถานีไฟฟ้าและกำหนดทางเดินของกระแสไฟฟ้าผิดพลาดให้ไหลลงดินในช่องทางที่กำหนดไว้

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินที่มีค่าต่ำจะช่วยนำกระแสผิดพลาดได้ดี ซึ่งการจะทราบว่าค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีค่าความต้านทานจริงเท่าใด จะต้องทำการวัดจากระบบต่อลงดินหลังจากทำการก่อสร้างเสร็จแล้ว

2.6.11.3.1 ความต้านทานกราวด์กริด[18]

เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้แบบโครงสร้างเป็นดินสองชั้น มีสมการดังนี้

$$R_g = \frac{\rho_2}{4\sqrt{\frac{\pi}{A}}} \quad \text{เมื่อ } \rho_2 < \rho_1, h < h_b \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_g = \frac{\rho_2 \sqrt{\pi A} + h \rho_1 \pi \left(23.16 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9 \right) - 78 \right) \times \left(1 + 1.95 e^{-20 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.3 e^{-0.5 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}{4A + 4h \sqrt{\pi A} \left(23.16 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9 \right) - 78 \right) \times \left(1 + 1.95 e^{-20 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.3 e^{-0.5 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}$$

เมื่อ $\rho_2 < \rho_1$, $h \geq h_b$ (2.34)

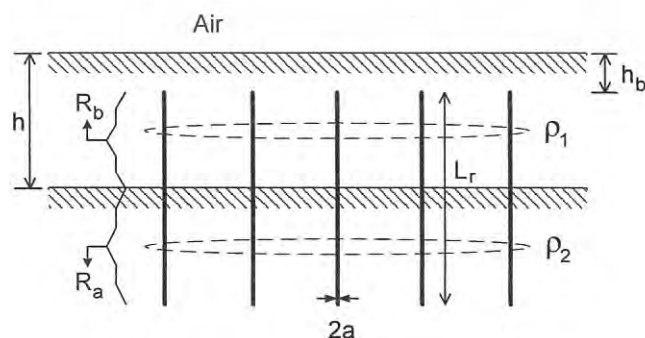
$$R_g = \frac{\rho_2 \sqrt{\pi A} + h \rho_1 \pi \left(23.16 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9 \right) - 78 \right) \times \left(1 + 1.55 e^{-15 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.1 e^{-0.25 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0.2 e^{\frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}{4A + 4h \sqrt{\pi A} \left(23.16 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9 \right) - 78 \right) \times \left(1 + 1.55 e^{-15 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.1 e^{-0.25 \frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0.2 e^{\frac{h \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}$$

เมื่อ $\rho_2 \geq \rho_1$ (2.35)

- เมื่อ R_g คือ ความต้านทานกราวด์กริด ในหน่วย โอห์ม (Ω)
 A คือ พื้นที่กราวด์กริด ในหน่วย ตารางเมตร (m^2)
 ρ_1 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$)
 ρ_2 คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ในหน่วย โอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$)
 h คือ ความลึกของดินชั้นบน ในหน่วย เมตร (m)
 h_b คือ ความลึกของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)

2.6.11.3.2 ความต้านทานแท่งกราวด์รูด [29]

ในการหาความต้านทานแท่งกราวด์รูด พารามิเตอร์สำหรับคำนวณหาความต้านทานแท่งกราวด์รูดในแบบจำลองของดินสองชั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 โดยความต้านทานแท่งกราวด์รูดหาได้จากสมการที่ (2.36) ดังนี้



รูปที่ 2.20 แท่งกราวด์รูดในดินสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (2.36)$$

โดยที่

$$R_a = \frac{\rho_2 g_0 F_0}{(L_r + h_b - h)n_r} \quad (2.37)$$

$$R_b = \frac{\rho_1 g_0 F_0}{(h - h_b)n_r} + \frac{\rho_1 \phi_0}{h} \quad (2.38)$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2.37) และ (2.38) หาได้ดังนี้

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2L_r}{a} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2)h_b}{L_r}} \right] \quad (2.39)$$

$$F_0 = F \left[\frac{L_r}{L_r - 1 - 0.9K} \right] \quad (2.40)$$

$$F = 1 + \left(n_r + \frac{1}{\sqrt{n_r}} \right) \frac{R_s}{R_r} \quad (2.41)$$

$$\frac{R_s}{R_r} = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{rl} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{L_r}{L_r + \left(\frac{rl}{2} \right)} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}}{\ln \left(\frac{4L_r}{a} \right) - 1} \quad (2.42)$$

$$rl = \frac{A}{2\pi L_r} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\varphi_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right) \sqrt{\left(\frac{n_r}{F_0} - 1 \right)^2 + 1} \quad (2.44)$$

เมื่อ	R_t	คือ ความต้านทานกราวด์รูด ในหน่วย โอห์ม (Ω)
	R_a	คือ ความต้านทานกราวด์รูดในเนื้อดินชั้นล่าง ในหน่วย โอห์ม (Ω)
	R_b	คือ ความต้านทานกราวด์รูดในเนื้อดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม (Ω)
	ρ_1	คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ในหน่วย โอห์ม-เมตร ($\Omega\text{-m}$)
	ρ_2	คือ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ในหน่วย โอห์ม-เมตร ($\Omega\text{-m}$)
	h	คือ ความลึกของดินชั้นบน ในหน่วย เมตร (m)
	h_b	คือ ความลึกของกราวด์กริด ในหน่วย เมตร (m)
	n_r	คือ จำนวนแท่งกราวด์รูด
	L_r	คือ ความยาวแท่งกราวด์รูด ในหน่วย เมตร (m)
	a	คือ รัศมีของแท่งกราวด์รูด ในหน่วย เมตร (m)
	K	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

อธิบายรูปที่ 2.20 ได้ว่า เมื่อแท่งกราวด์รูดมีการจัดวางเป็นแนวตั้งและมีส่วนของแท่งกราวด์รูดอยู่ระหว่างเนื้อดินชั้นบนกับดินชั้นล่าง ค่าความต้านทานจะแบ่งการคำนวณออกเป็นสองส่วนโดยกำหนดค่าที่ตำแหน่งบริเวณเนื้อดินชั้นบนและดินชั้นล่างเท่ากับ R_b และ R_a ตามลำดับ กำหนดจำนวนแท่งกราวด์รูดมีทั้งหมดเท่ากับ n_r แท่ง แต่ละแท่งมีรัศมีเท่ากับ a เมตร และมีความยาวเท่ากับ L_r เมตร

ผลรวมของความต้านทานที่ตำแหน่งเนื้อดินชั้นบนและชั้นล่างจะเท่ากับ R_t ดังแสดงในสมการที่ (2.36) แต่ทั้งนี้เมื่อแท่งกราวด์รูดติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งในเนื้อดินชั้นบนทั้งหมดตลอดส่วนความยาว ค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รูดจะหาได้จากสมการที่ (2.45) ดังนี้

$$R_t = R_b \quad (2.45)$$

และเมื่อแท่งกราวด์รูดติดตั้งอยู่บริเวณตำแหน่งในเนื้อดินชั้นล่างทั้งหมดตลอดส่วนความยาว จะหาค่าความต้านทานของแท่งกราวด์รูดได้จากสมการที่ (2.46) ดังนี้

$$R_t = R_a \quad (2.46)$$

2.6.11.3.3 ความต้านทานระบบต่อลงดิน [29]

ค่าความต้านทานการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าได้จากการรวมความต้านทานกราวด์กริดและความต้านทานแท่งกราวด์รูด เมื่อผลรวมความต้านทานกราวด์กริดและแท่งกราวด์รูดของระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าประกอบด้วยกราวด์กริดและแท่งกราวด์รูดที่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นความต้านทานรวมทั้งหมดจะได้จากสมการที่ (2.47) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_T = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g}\right)^3 + \left(\frac{1}{R_t}\right)^3}} \quad (2.47)$$

- เมื่อ R_T คือ ความต้านทานระบบต่อลงดิน ในหน่วย โอห์ม (Ω)
 R_g คือ ความต้านทานกราวด์กริด ในหน่วย โอห์ม (Ω)
 R_t คือ ความต้านทานกราวด์รูด ในหน่วย โอห์ม (Ω)

2.6.11.4 GPR

GPR (Ground Potential Rise) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน และค่ากระแสกริด ดังสมการที่ (2.48)

$$GPR = I_G \times R_T \quad (2.48)$$

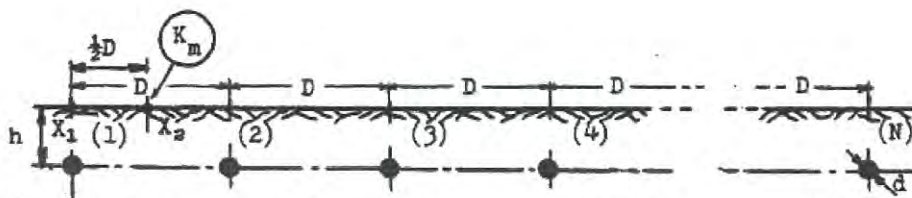
- เมื่อ R_T คือ ความต้านทานระบบต่อลงดิน ในหน่วย โอห์ม (Ω)
 I_G คือ กระแสกริดสูงสุด ในหน่วย แอมแปร์ (A)

2.6.11.5 แรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage)

Mesh voltage[17, 19, 34] ค่าแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรงประกอบด้วย Geometrical Factor K_m , Corrective factor K_i , ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(ρ) และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเปอร์ยูนิตต่อความยาวประสิทธิผลของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินที่ถูกฝังในดิน (I_G / L_M)

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (2.49)$$

สำหรับค่าตัวคูณเป็นการพิจารณาจากรูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน (Geometrical Factor K_m) สมการที่(2.49) ซึ่งมีหลักการคิด[17]



รูปที่ 2.21 หลักในการพิจารณา Factor Km จากความต่างกัต่างกันของแรงดันไฟฟ้า ระหว่างจุด X1 และ X2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_m = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{D^2}{16.h.d} + \frac{(D+2.h)^2}{8.D.d} - \frac{h}{4.d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2.n-1)} \right] \quad (2.50)$$

โดยที่ D คือระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกัน(เมตร)

H คือ ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน(เมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่เลือกใช้ในระบบต่อลงดิน(เมตร)

h_o คือ ระดับอ้างอิงที่ใช้ในการฝังเท่ากับตะแกรงต่อลงดินซึ่งเท่ากับ 1 เมตร

K_{ii} คือ ค่าตัวคูณจากการจัดวางตัวนำ สำหรับการเลือกใช้ค่า K_{ii} ต้องพิจารณาการจัดเรียงตัวกันของตะแกรงต่อลงดิน ถ้าตะแกรงต่อลงดินมีการเชื่อมต่อกับกราวด์รอตที่มุมของตะแกรง กำหนดให้ $K_{ii}=1$ แต่ถ้าไม่มีการเชื่อมต่อกับกราวด์รอต หรือมีการติดตั้งนำเพียงเล็กน้อยที่ไม่ใช่บริเวณรอบนอกของตะแกรงแล้วค่า K_{ii} หาได้จากสมการที่ (2.51)

$$K_{ii} = \frac{1}{(2.n)^n} \quad (2.51)$$

โดยที่ K_h คือค่าตัวคูณที่เกิดจากผลของการฝังตัวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (2.52)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (2.52)$$

โดยที่ n คือพารามิเตอร์ที่พัฒนาจากส่วนประกอบรูปแบบของกริดทั้ง 4 รูปแบบ ดังจากสมการ (2.53)

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (2.53)$$

ค่า n_a นั้นสามารถหาได้จากสมการที่(2.54)

$$n_a = \frac{2.I_c}{L_p} \quad (2.54)$$

$n_b = 1$ สำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยม

$n_c = 1$ สำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยม และตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$n_d = 1$ สำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยม และตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปตัวแอล

ค่า $n_b n_c n_d$ หาได้ดังสมการที่ (2.55)(2.56)(2.57)

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (2.55)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad (2.56)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (2.57)$$

โดยที่ L_p คือความยาวเส้นรอบรูปของตะแกรงต่อลงดิน

L_x คือความยาวในแนวแกน x ของตะแกรงต่อลงดินที่ยาวที่สุด

L_y คือความยาวในแนวแกน y ของตะแกรงต่อลงดินที่ยาวที่สุด

D_m คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดภายในตะแกรงต่อลงดินที่มีค่ามากที่สุด

สำหรับการพิจารณาหาค่า Correction Factor for grid Geometry K_i จะเกี่ยวข้องกับแฟคเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน(n) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่(2.58)

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (2.58)$$

L เป็นผลของ electrode ที่ฝังอยู่ดิน พารามิเตอร์ L แทนตัวแปรเป็น L_s เมื่อพิจารณา Step Voltage และแทนตัวแปร L_m เมื่อพิจารณา touch voltage หรือ $L=L_m=L_s$ การพิจารณาจะมีสองเงื่อนไข กล่าวคือถ้าระบบต่อลงดินผู้ออกแบบ ได้ออกแบบมานั้นมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) อยู่ด้วย ไม่ว่าจะติดตั้งที่ตำแหน่งใดของตะแกรงต่อลงดินก็ตาม เช่นที่บริเวณขอบรอบนอกของตะแกรงต่อลงดิน มุมของตะแกรงต่อลงดิน หรือภายในตะแกรงต่อลงดิน L จะมีค่าดังสมการที่ (2.59)

$$L = L_C + L_R \quad (2.59)$$

แต่ถ้าตะแกรงต่อลงดินนั้นไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง(Ground Rod) ต่อเชื่อมอยู่กับตะแกรงต่อลงดิน ค่าของ L จะมีค่าดังสมการที่(2.60)

$$L = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (2.60)$$

เมื่อ L_r คือ ความยาวแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง(Ground Rod) หน่วย เมตร ที่ตำแหน่งใดๆในระบบต่อลงดิน สำหรับความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้ง(Ground Rod) L_R นั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่(2.61)

$$L_R = L_r \cdot n_r \quad (2.61)$$

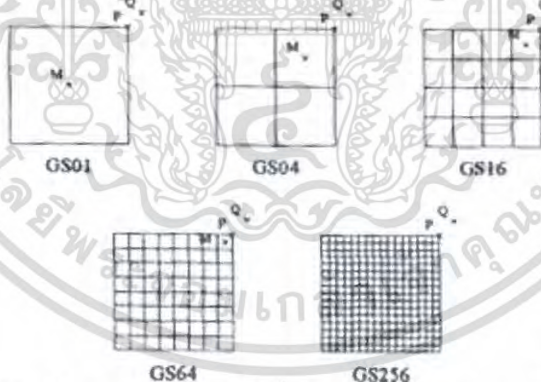
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L_r คือ ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) แต่ละแท่ง
 n_r คือ จำนวนของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod)
 L_R คือ ความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง(Ground Rod)

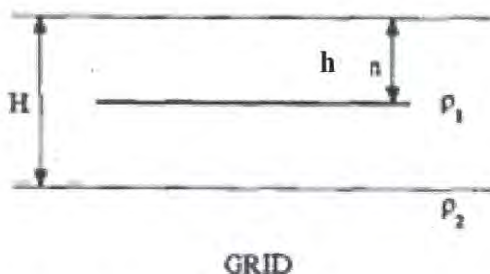
2.6.11.5.1 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า mesh voltage หลักเกณฑ์ที่สำคัญในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าคือ ความสัมพันธ์ของกราวด์อิเล็กโทรดต่อ mesh voltage การกำหนดพารามิเตอร์สามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณซึ่งจะมีความผิดพลาดน้อยมาก การประมาณค่า maximum mesh voltage จากการคำนวณต้องมีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เกินจากมาตรฐาน[1][10] ข้อกำหนดการแบ่งชั้นดินมีการแนะนำเพื่อให้การออกแบบมีความเหมาะสมนำไปออกแบบใช้งานได้จริงเมื่อกริดที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และกริดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกริดที่มีการต่อรวม และไม่ต่อรวมกับกราวด์รอต ดังรูป 2.22 Em กรณี Nonuniform soil พิจารณาที่ส่วนมุมของเมชกริด เมื่อ ground electrode ฝังอยู่ในชั้นดินแบบสองชั้นที่ค่าความต้านทานของดินชั้นบนและความต้านทานของดินชั้นล่างเป็น ρ_1 และ ρ_2 ตามลำดับ ดังรูป 2.23 แต่เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ต่างกันจึงต้องพิจารณา nonuniformity correction factor c_m ร่วมด้วย ดังสมการที่(2.63)

$$E_m = C_m K_m K_i \rho_1 \frac{I_g}{L} \tag{2.62}$$

ค่า Maximum mesh voltage เป็นการสมมติฐานความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่จุด M ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของ mesh grid กับส่วนมุมของ mesh กริด ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ตำแหน่งความต่างศักย์ Em จากรูปแบบของ Electrode



รูปที่ 2.23 โครงสร้างชั้นดิน ที่แบ่งออกเป็น 2 ชั้น

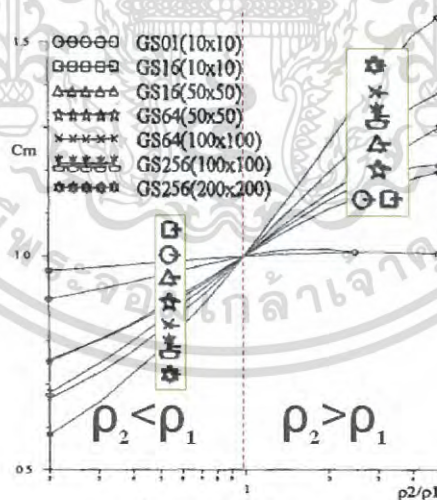
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ factor C_m ได้จากการปรับค่าของพารามิเตอร์ $A, H, \rho_1 / \rho_2$ โดยมีพารามิเตอร์ x เป็นส่วนประกอบซึ่งหาได้ตามสมการที่(2.63) factor C_m ได้จากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าของ A และ H

$$C_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \quad (2.63)$$

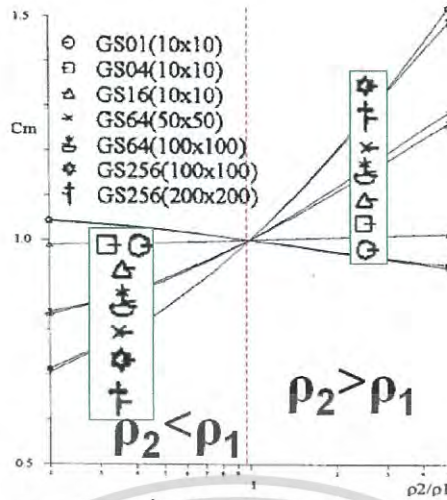
$$x = \begin{cases} 0.075 \left(\log_{10} \frac{\sqrt{A}}{H} \right)^2 & \text{เมื่อ } H < \sqrt{A} \\ 0 & \text{เมื่อ } H \geq \sqrt{A} \end{cases} \quad (2.64)$$

รูปที่ 2.24 ถึง 2.26 แสดงลักษณะกราฟของ C_m มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อ ρ_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยกำหนดค่าของพารามิเตอร์กรวดคือเส้นโค้งที่หน้าให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.01 เมตร และกรวดรูดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.064 เมตร พิจารณาดินชั้นบนที่ความหนา 1 เมตร 5 เมตร และ 10 เมตร ความต้านทานดินชั้นบน (ρ_1) และความต้านทานของดินชั้นล่าง (ρ_2) อยู่ภายในช่วง (0.2, 5)

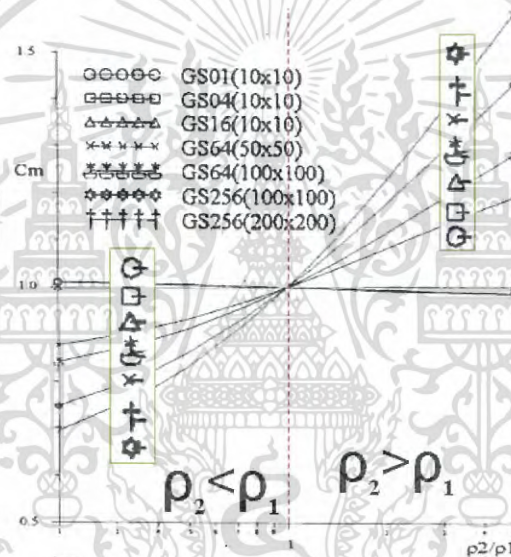


รูปที่ 2.24 ค่าของ Factor C_m เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา $H = 1$ เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ค่าของ Factor Cm เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนา H = 5 เมตร



รูปที่ 2.26 ค่าของ Factor Cm เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา H = 10 เมตร

และเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่(2.63) สามารถใช้สมการที่ (2.64) เพื่อรับรองความถูกต้องของค่า factor Cm ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ กับค่าของ E_m และ E_{mu}

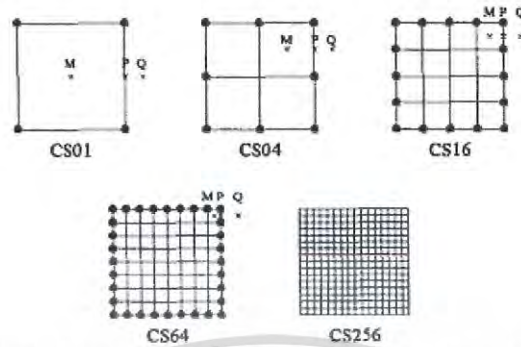
$$C_m = \frac{E_m}{E_{mu}} \tag{2.65}$$

เมื่อ E_{mu} เป็นความต่างศักย์แรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียวกับ electrode ที่ฝังลงในชั้นดิน uniform soil และ E_m เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่หาได้จากสมการที่(2.62)

2.6.11.5.2 แรงดันไฟฟ้าเมฆสูงสุดเมื่อออกแบบให้กรวดกริดต่อร่วมกับกรวดรูด โดยกำหนดให้กรวดรูดมีช่องว่างเท่าๆกันมีผลการกระทบต่อค่า Maximum mesh voltage ที่

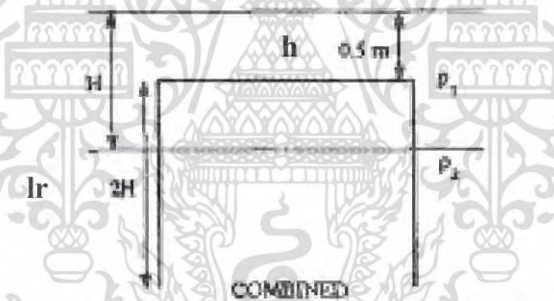
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนใหญ่ผลกระทบจะเกิดจากพารามิเตอร์ของกราวด์ electrode ซึ่งมีความสัมพันธ์กันทางคณิตศาสตร์ ผลของการออกแบบจะให้ผลที่ดีกว่าที่ออกแบบตามข้อที่ 2.5.11.5.1



รูปที่ 2.27 ตำแหน่งความต่างศักย์ไฟฟ้าของ mesh Voltage ที่นำมาพิจารณา

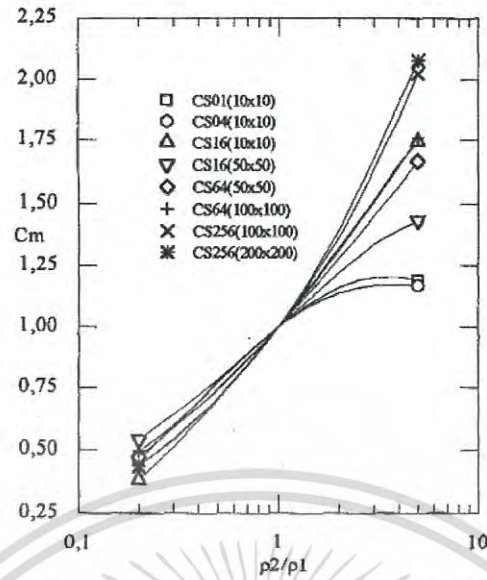
จากรูปที่ 2.29 ถึง 2.31 เป็นตัวอย่างการประมาณค่า factor cm จากการกำหนดชั้นดินเป็น nonuniform soil ให้กราวด์กริดต่อร่วมกับกราวด์รอต ได้จากการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ที่แกน x เป็นค่าที่ได้จากการกำหนดปรับค่า ratio ของ ρ_2/ρ_1 และกำหนดความหนาดินชั้นบน



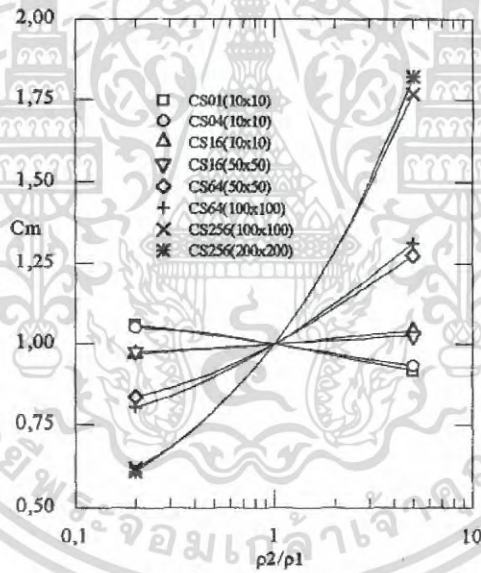
รูปที่ 2.28 กราวด์กริด และกราวด์รอตฝังอยู่ในโครงสร้างชั้นดินแบบ 2 ชั้น

เมื่อพิจารณา factor Cm ตามสมการ(2.63) และพารามิเตอร์ของ x ตามสมการ(2.64)โดยปรับค่าพารามิเตอร์ A, H และ ค่า ratio ρ_2/ρ_1 ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ 2.29 ถึง 2.31 ลักษณะกราฟ Cm มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อ ρ_2 มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยกำหนดค่าของพารามิเตอร์ของกราวด์อิเล็กโทรดมีค่าดังนี้ ตัวนำของกราวด์กริดมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.01 เมตร และกราวด์รอตมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.064 เมตร พิจารณาดินชั้นบนที่ความหนา 1 เมตร 5 เมตร 10 เมตร และความต้านทานดินชั้นบน(ρ_1) มีความสัมพันธ์กับ Ratio ความต้านทานของดินชั้นล่าง (ρ_2) อยู่ภายในช่วง (0.2 , 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

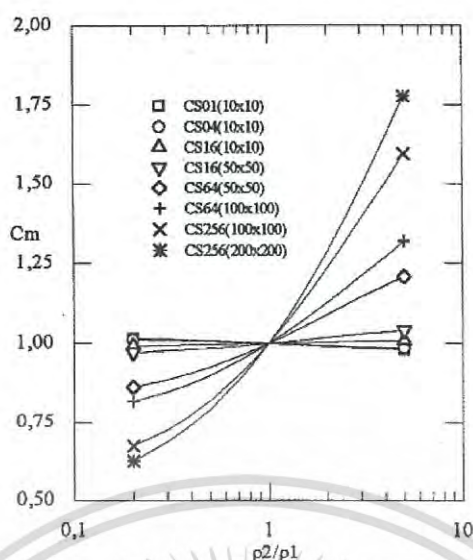


รูปที่ 2.29 Factor Cm ของกรวดกกริตที่ต่อร่วมกับกรวดรอต เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา 1 เมตร



รูปที่ 2.30 Factor Cm ของกรวดกกริตที่ต่อร่วมกับกรวดรอต เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบน หนา 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 Factor Cm ของกราวด์กริดที่ต่อร่วมกับกราวด์รอต เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดิน ชั้นบนหนา 10 เมตร

$$x = \begin{cases} 0.042 \log_{10}(3.53H)(\log_{10} N)^2 - 0.5 \log_{10} \left(\frac{H}{6} \right) & \rho_2 < \rho_1 \\ 0.12 \log_{10}(N\sqrt{A}) - 0.16 \log_{10}(4.6H) & \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (2.66)$$

เมื่อ H is in m and A in m²

2.6.11.6 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) [17, 19, 35]

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเป็นจากการคำนวณผลคูณของ Spacing Factor K_s สมการ(2.69) , Correction Factor K_i สมการ(2.59) ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็น ρ

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (2.67)$$

การหาค่า L_s จะไม่มีเงื่อนไขเหมือนการหาค่า L_M นั่นคือไม่ว่าตะแกรงต่อลงดินที่สร้างขึ้นนั้นจะมีแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้ง (Ground Rod) หรือไม่ก็ตาม ก็จะใช้สมการที่(2.68) หาค่า L_s เหมือนกัน

$$L_s = L_C + 2L_R \quad (2.68)$$

ค่า K_s ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตะแกรงต่อลงดิน และลักษณะการจัดวางของตัวนำไฟฟ้างแสดงในสมการที่(2.69) แต่สมการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากการฝังต่อลงดิน โดยความลึกในการฝังตะแกรงต่อลงดินควรจะอยู่ในช่วง 0.25 เมตร ถึง 2.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2.h} + \frac{1}{D+h} + \frac{W'}{D} \right] \quad (2.69)$$

เมื่อ

$$W' = \begin{cases} 0.5 + 0.9 \log_e \left(\frac{n-1}{2} \right) & \text{for } n > 2 \\ 0 & \text{for } n = 2 \end{cases}$$

$$D = \sqrt{\frac{A}{N}}$$

สำหรับการพิจารณาหาค่า Correction Factor for grid Geometry K_i จะเกี่ยวข้องกับแฟคเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน(n) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่(2.70)

$$K_i = 0.94 + 0.047n \quad (2.70)$$

Step voltage เป็นความต่างศักย์ที่เป็นผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ระหว่าง จุด P และจุด Q เป็นตำแหน่งมุมของ mesh มีระยะห่าง 1 เมตร ซึ่งอยู่ในบริเวณส่วนมุมของกราวด์อิเล็กโทรด ดังรูปที่ (2.22) กราวด์กริดไม่ต่อรวมกับกราวด์รอต และเมื่อกราวด์กริด ต่อรวมกับกราวด์รอต ดังรูปที่ (2.27) ผังอยู่ในโครงสร้างชั้นดินแบบสองชั้น ดังรูปที่ (2.28) มีหลักเกณฑ์การคำนวณ ตามสมการที่ (2.71) เป็นกรณี Uniform Soil กำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดินให้ $\rho_s = \rho_1$ และกรณี Nonuniform Soil แทนค่าความต้านทาน จำเพาะ ดินชั้นบนด้วย ρ_1 และความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างแทนด้วย ρ_2

$$E_s = C_s K_s K_i \rho_1 \frac{I_g}{L_s} \quad (2.71)$$

สมการที่ (2.71) ประกอบด้วย พารามิเตอร์ K_s เป็น factor ของ electrode เกี่ยวข้องกับ รูปทรงของ ตะแกรงกริดที่ทำการออกแบบ หาได้ตามสมการที่(2.69) และมีพารามิเตอร์ C_s เป็นความสัมพันธ์ที่พิจารณาจาก Ratio ρ_2 / ρ_1 หรือพิจารณาความสัมพันธ์ E_s/E_{su} ตามสมการที่(2.72)(2.73) ตามลำดับ E_{su} คือแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว uniform soil และ E_s คือแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว nonuniform soil เมื่อนำผลของการคำนวณค่า C_s จากทั้งสอง สมการมาเปรียบเทียบพบว่าค่าที่เท่ากัน

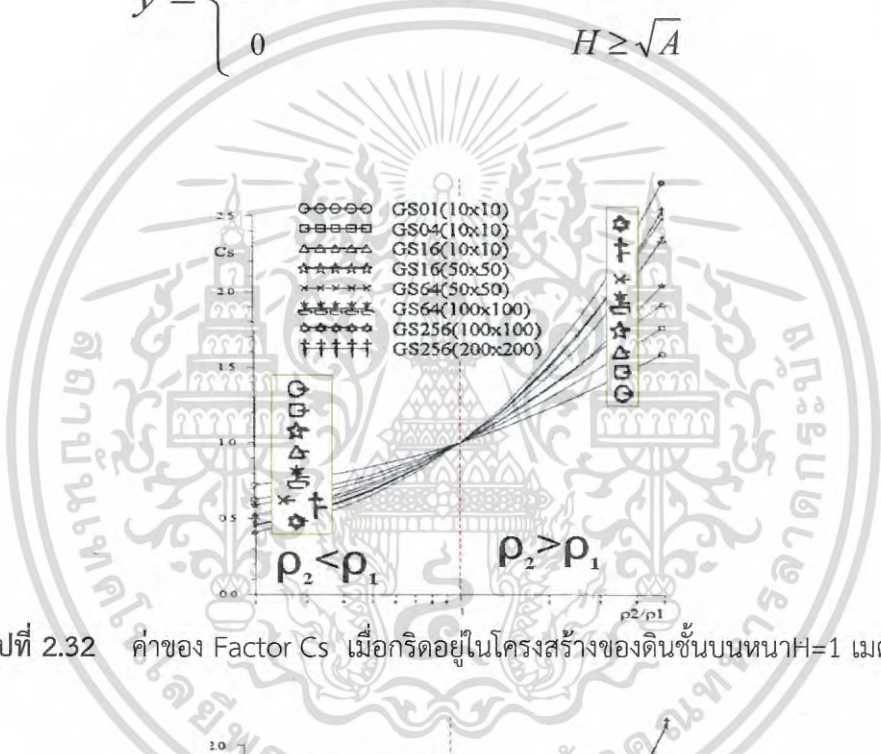
$$C_s = \left(\frac{E_s}{E_{su}} \right) \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

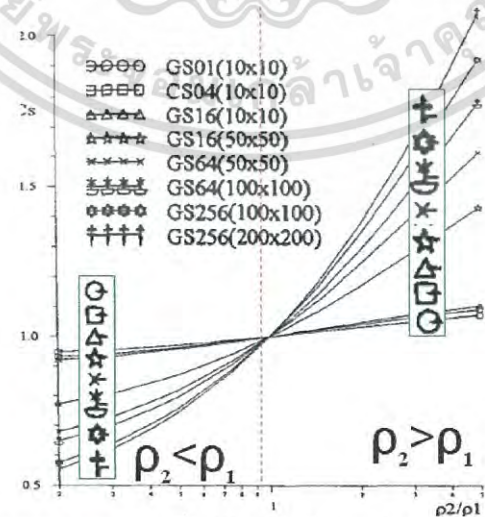
$$C_s = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^y \tag{2.73}$$

2.6.11.6.1 ค่าแรงดันช่วงก้าวสูงสุดจากการออกแบบกรวดกริต พารามิเตอร์ y จากสมการที่(2.73)(2.74) จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อ $\rho_2 > \rho_1$ รูปที่ 2.32 ถึง 2.34 เป็นรูปกราฟที่ได้จากการปรับความหนาของดินชั้นบน(H) และปรับขนาดของพื้นที่(A) เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบจากสมการที่(2.74)

$$y = \begin{cases} \left(\frac{2h}{H} \right)^{1/3} (0.3 \log_{10} \frac{L}{\sqrt{A}} + 0.1) & H < \sqrt{A} \\ 0 & H \geq \sqrt{A} \end{cases} \tag{2.74}$$

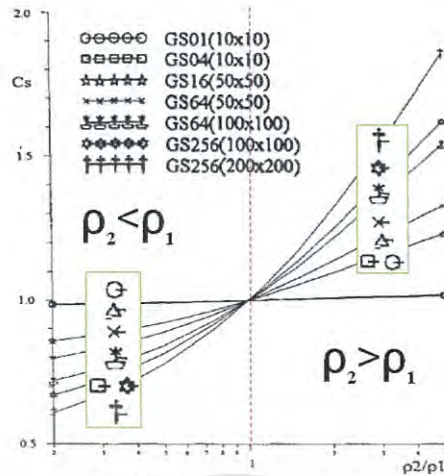


รูปที่ 2.32 ค่าของ Factor Cs เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนาH=1 เมตร



รูปที่ 2.33 ค่าของ Factor Cs เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนาH=5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



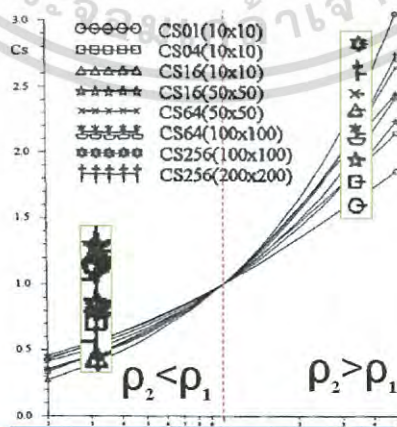
รูปที่ 2.34 ค่าของ Factor Cs เมื่อกริดอยู่ในโครงสร้างของดินชั้นบนหนา H=10 เมตร

สังเกตจากรูปที่ 2.32 ถึง 2.34 เห็นได้ว่าค่าCsจะมีค่ามากที่สุดที่ส่วนปลายของ Ratio ρ_2 / ρ_1 เมื่อกริดเป็น Cs01 และ Cs4 เท่านั้น ค่า factor Cs ที่ได้จากการคำนวณมี Error ต่ำกว่า 10%

2.6.11.6.2 ค่าแรงดันช่วงก้ำวสูงสุดเมื่อออกแบบให้กรวดกริดต่อกับกรวดรอต การวิเคราะห์รูปแบบของกรวดกริดที่ต่อกับกรวดรอตกำหนดพารามิเตอร์เหมือนกับหัวข้อที่ 2.5.11.5.1 หากพารามิเตอร์ y ได้จากสมการ(2.75)

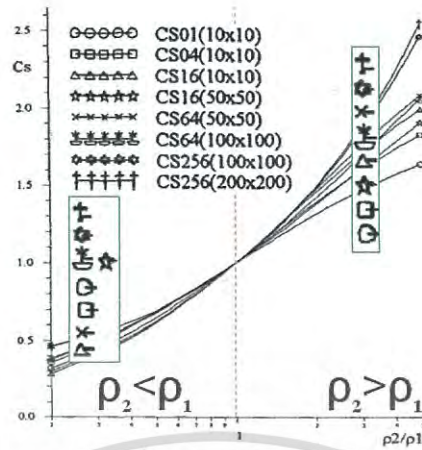
$$y = \begin{cases} 0.475 \log_{10} \left(140 \sqrt{\frac{NA_o}{A}} \right) + 0.14 \log_{10} \frac{H}{H_o} & \rho_2 < \rho_1 \\ 0.032 \log_{10} (2850W) \cdot \log_{10} (2810 \frac{H_o}{H}) & \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (2.75)$$

เมื่อออกแบบกรวดกริดมีการต่อกับกรวดรอต ใช้สมการที่(2.71) ร่วมกับสมการที่ (2.73) คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว

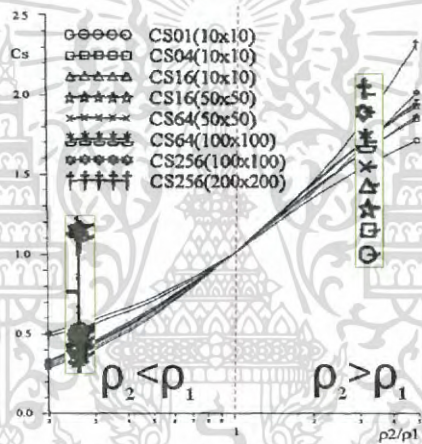


รูปที่ 2.35 ค่าของ Factor Cs เมื่อกรวดกริดต่อกับกรวดรอต โครงสร้างของดิน ชั้นบน หนา H = 1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 ค่าของ Factor Cs เมื่อกราวด์คริตต่อกับกราวด์รอต โครงสร้างของดิน
ชั้นบน หนา H = 5 เมตร



รูปที่ 2.37 ค่าของ Factor Cs เมื่อกราวด์คริตต่อกับกราวด์รอต โครงสร้างของดิน
ชั้นบน หนา H = 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โปรแกรม CDEGS

โปรแกรม CDEGS (CURRENT DISTRIBUTION, ELECTROMAGNETIC FIELDS, GROUNDING AND SOIL STRUCTURE ANALYSIS) เป็นโปรแกรมที่จัดทำขึ้นกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) ประเทศแคนาดา ซึ่งประกอบด้วย 8 โมดูลย่อย [2] ดังนี้

1. RESAP (Analysis of Earth Resistivity Measurement) เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับหาพารามิเตอร์โครงสร้างดินที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในภาคสนาม

2. MALT (Low Frequency Analysis of Buried Conductor Networks) เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน เช่น คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินกระแสที่ไหลออกจากสายดิน แรงดันไฟฟ้าบนผิวดินแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

3. FCDIST (Simplified Fault Current Distribution) เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับหากระแสที่ไหลผ่านสายดินซึ่งอากาศและระบบต่อลงดินอย่างง่าย เพื่อใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินแทนการใช้กระแสลัดวงจรลงดิน

4. MALZ (Frequency Domain Grounding Analysis) มีความสามารถคล้ายๆ กับ MALT แต่ MALZ สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงดินและสามารถคำนวณหาแรงดันตกคร่อมแต่ละจุดของกราวด์กริดได้

5. TRALIN (TRANSMISSION LINE parameters) เป็นโมดูลที่ใช้คำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวนำ เช่น Series, Shunt และ Mutual impedance ของสายส่งและสายจำหน่าย ทั้งสายเปลือยหรือสายหุ้มฉนวน

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

7. HIFREQ (Electromagnetic Fields Analysis) เป็นโมดูลที่ใช้ศึกษาการตอบสนองต่อความถี่จากการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากการไหลของกระแสในตัวนำที่อยู่ใต้ดินหรืออากาศหรือกราวด์กริดต่อความถี่สูง

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

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะใช้โปรแกรม CDEGS เพียง 2 โมดูล คือ RESAP และ MALT

3.1 โมดูล RESAP

วัตถุประสงค์ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินก็เพื่อช่วยในการประมาณค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน ขนาดแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรลงดินผ่านระบบต่อลงดิน ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงความสามารถของระบบต่อลงดิน

โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบระบบต่อลงดิน โครงสร้างของดินจะจำลองเป็นแบบดินชั้นเดียวหรือ ดินสองชั้น การจำลองแบบดินสองชั้นจะให้ความถูกต้องกับโครงสร้างของดินหลายๆประเภทได้ดี ในขณะที่แบบจำลองดินหลายชั้น(multi-layer) มักจะใช้กับโครงสร้างของดินที่ค่อนข้างจะยุ่งยาก ซับซ้อนมากกว่าเพื่อที่จะได้ทราบโครงสร้างของดินจากค่าที่วัดได้ จึงจำเป็นต้องแปลความหมายจากค่าที่วัดได้จากภาคสนาม ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีการฟิสิกหรือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมาณค่าพารามิเตอร์ของดิน ซึ่งโมดูล RESAP เป็นโมดูลหนึ่งของโปรแกรม CDEGS ซึ่งสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของดินจากค่าที่วัดได้ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้โมดูลดังกล่าว

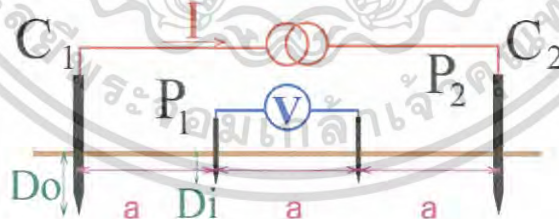
3.1.1 การวัด

RESAP สามารถนำ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินหรือค่าความต้านทานดินที่วัดได้จากภาคสนามด้วยวิธีต่าง ๆ มาแปลความหมายหาแบบจำลองของดิน โดยวิธีการวัดจะเป็นแบบ 4 โพรบเท่านั้น ซึ่งจะประกอบด้วย 3 แบบ ขึ้นอยู่กับการวางโพรบ ดังนี้

1. Wenner
2. Schlumberger
3. General

การวัดแบบ Wenner ดังรูปที่ 3.1 จะเป็นวิธีการวัดที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งจะวางโพรบทั้งสี่ให้มีระยะห่างเท่ากันในแนวเดียวกัน โดยค่าความต้านทานปรากฏ, ρ_a ที่วัดได้จากแบบ Wenner คือ

$$\rho_a = 2\pi aR \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 การวัดแบบ Wenner

เมื่อ a คือ ระยะห่างของโพรบ มีหน่วยเป็น m และ R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้ มีหน่วยเป็น Ω โดยใน RESAP จะมีให้เลือกแบบ Wenner Short Filter และ Wenner - long Filter ซึ่ง Wenner Short

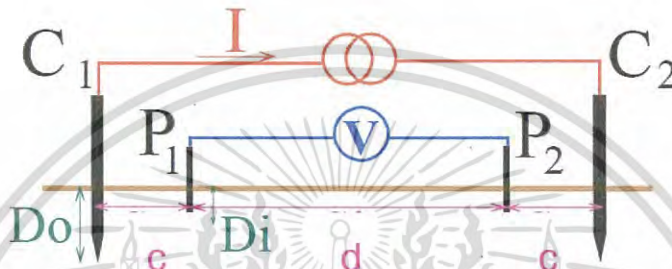
Filter จะเหมือนแบบ Wenner ยกเว้นการประมาณค่าพารามิเตอร์จะให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่าในการคำนวณเมื่อมีการกำหนดชั้นของดิน ส่วนแบบ Wenner - long Filter จะเหมือนแบบ Wenner มาตรฐานและเป็น default ของโมดูล RESAP ในกรณีที่ให้ระยะห่างระหว่างโพรบแรงดันที่อยู่ด้านใน

ไม่เท่ากับระยะห่างระหว่างโพรบแรงดันกับโพรบกระแสแล้ว การวัดแบบนี้จะเรียกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Schlumberger ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งวิธีนี้จะดีกว่าแบบ Wenner เมื่อโพรบมีระยะห่างมากๆ เพราะขนาด ศักย์ไฟฟ้าระหว่างโพรบแรงดันจะมีค่าน้อยเพื่อการวัดเชื่อถือได้ การเพิ่มระยะห่างของโพรบแรงดันจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและไวกว่าการวัดแบบ Wenner โดยค่าความต้านทานปรากฏ, ρ_a ที่วัดได้จากแบบ Schlumberger คือ

$$\rho_a = \frac{\pi R c(c+d)}{d} \quad (3.2)$$

เมื่อ c และ d คือระยะห่างระหว่างโพรบ ดังรูปที่ 3.2 มีหน่วยเป็น m



รูปที่ 3.2 การวัดแบบ Schlumberger

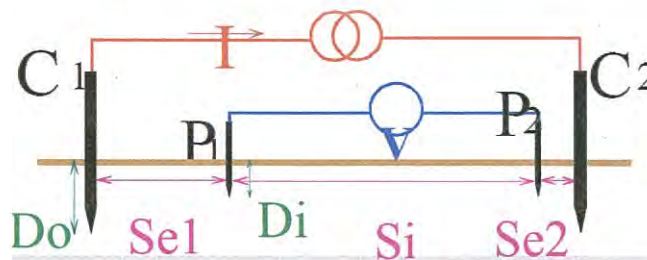
เพื่อความคล่องตัวสำหรับผู้ใช้ในการกรณีที่ไม่สามารถที่จะปักโพรบให้ได้ระยะตามแบบ Wenner หรือ แบบ Schlumberger ได้ ก็ให้ใช้แบบ General ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งโพรบทั้งสี่ไม่จำเป็นต้องเท่ากัน โดยค่าความต้านทานปรากฏ, ρ_a ที่วัดได้จากแบบ General คือ

$$\rho_a = \frac{2\pi R}{G} \quad (3.3)$$

เมื่อ G คือ geometric factor ซึ่งหาได้ดังนี้

$$G = \frac{1}{Se1} + \frac{1}{Se1} - \frac{1}{Se1+Si} - \frac{1}{Se2+Si} \quad (3.4)$$

โดย $Se1$, $Se2$ และ Si คือระยะห่างระหว่างโพรบ ดังรูปที่ 3.3 มีหน่วยเป็น m



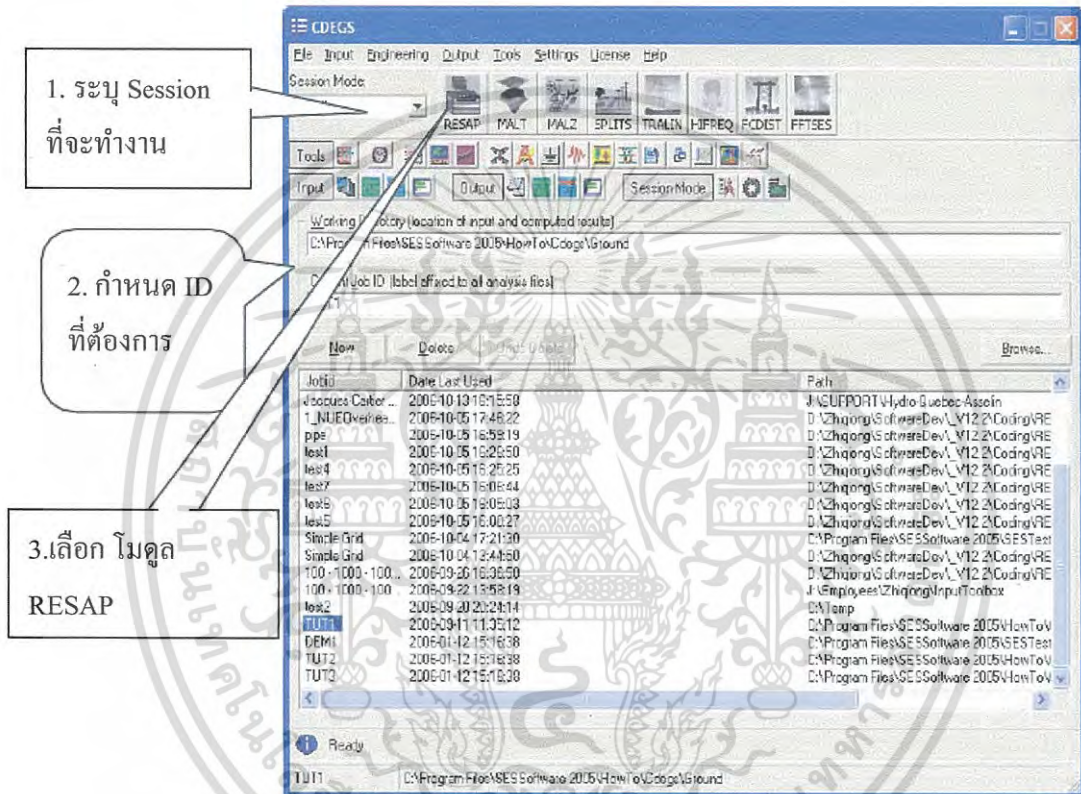
รูปที่ 3.3 การวัดแบบ General

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการวัดทั้ง 3 แบบ ระยะห่างของโพรบต้องมากกว่าความลึกของโพรบ หากต้องการพิจารณาความลึกของโพรบเข้าไปด้วย RESAP ก็ให้ป้อนค่าความลึกนั้นเข้าไปได้ ซึ่งความลึกของโพรบจะประกอบด้วย Do และ Di ดังแสดงในรูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 โดย Do คือ ความลึกของโพรบกระแสมิหนวยเป็น m และ Di ความลึกของโพรบกระแส มิหนวยเป็น m

3.1.2 การใช้ โมดูล RESAP

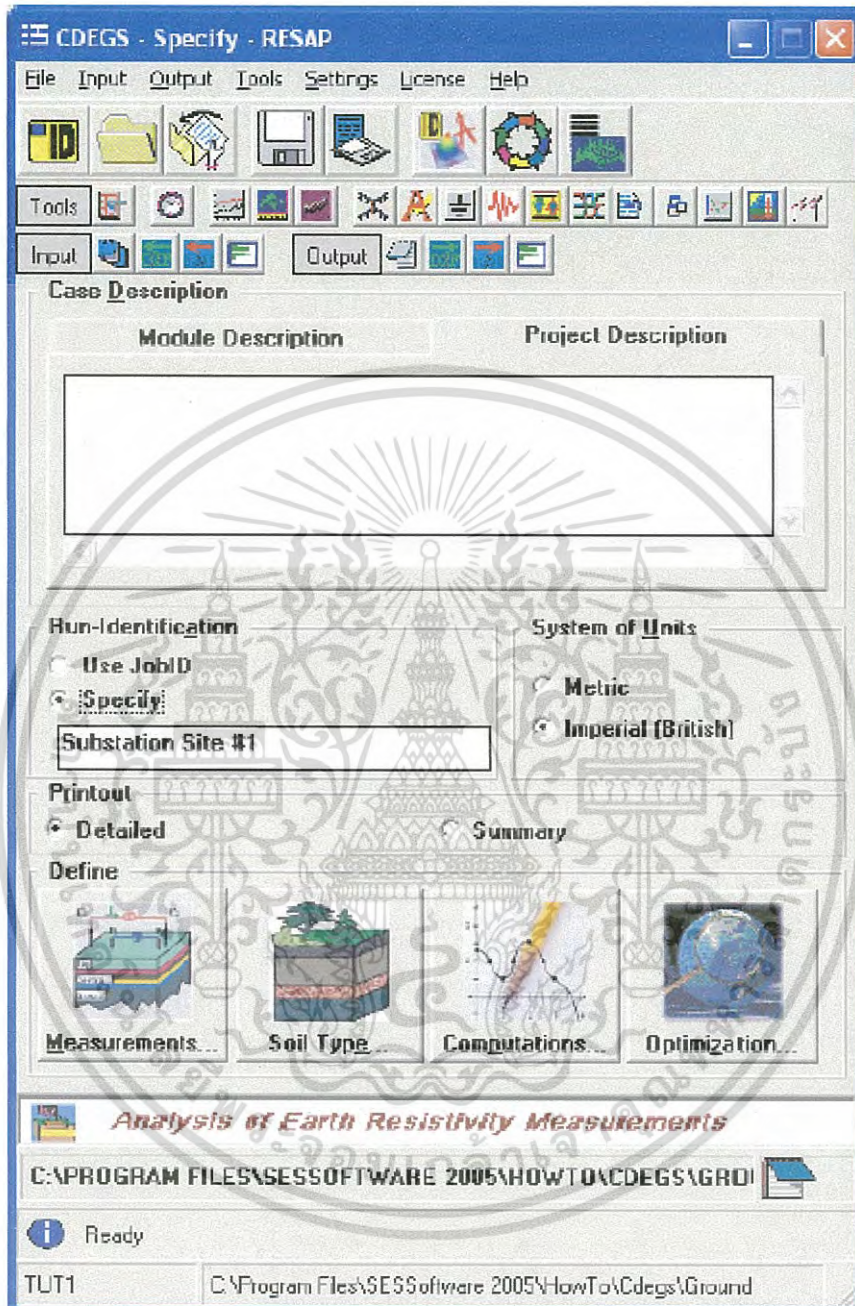
3.1.2.1 เปิดใช้งานโดย Start/Program/SES ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 CDEGS Start-Up Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 คลิก RESAP ใน Toolbox จะได้หน้าจอ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 RESAP Specific windows

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 คลิก Measurements จะได้น้ำจอตงรูปที่ 3.6

Wenner, Long Filter เป็นค่า default และเป็นวิธีมาตรฐาน ของ Wenner ส่วน Wenner, Short Filter จะเหมือนกับ Long Filter แต่จะให้ความถูกต้องน้อยกว่า ซึ่งจะใช้เมื่อมีการจำกัดชั้นของดิน

ป้อนข้อมูล ได้ทั้งค่าความต้านทานของดิน(R)หรือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ)

จะพิจารณาความลึกของโพรบหรือ ไม่ก็ได้

ข้อมูลที่ป้อนอย่างน้อยต้องมี 5 ข้อมูล

รูปที่ 3.6 การป้อนข้อมูล

3.1.2.4 คลิก Soil type จะได้น้ำจอตงรูปที่ 3.7

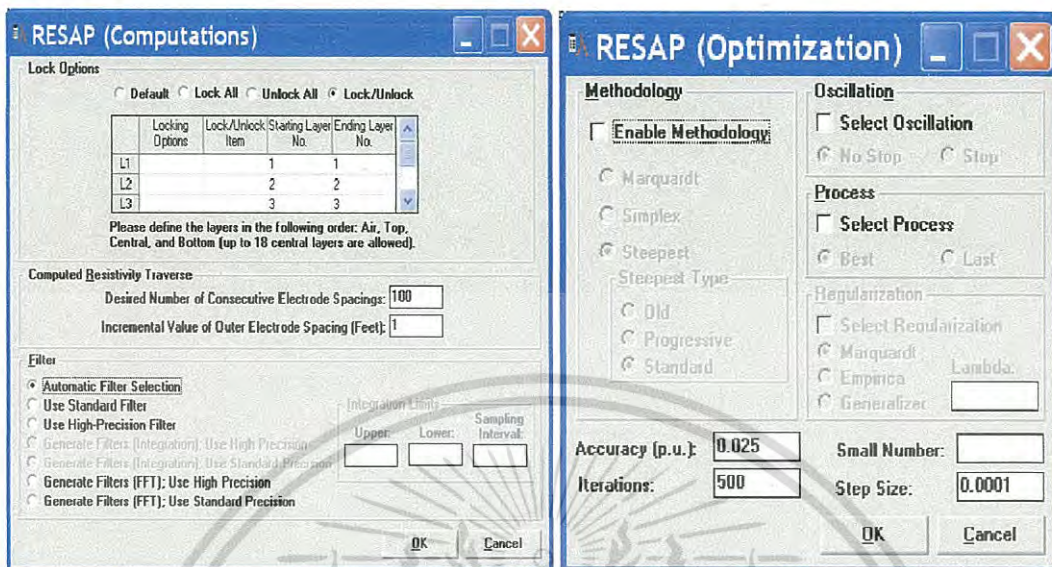
เลือกประเภทของชั้นดิน

จะให้ RESAP กำหนดจำนวนชั้นของดินอย่างอัตโนมัติหรือผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเอง

รูปที่ 3.7 การเลือกแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.5 คลิก Computations และ Optimization จะได้น้ำจอตงรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การตั้งค่า

บนหน้าจอ RESAP จะให้ผู้ใช้อธิบายรายละเอียดของโครงการที่จะทำการออกแบบหรือศึกษา ระบบกราวด์กริด ซึ่งในหน้าจอส่วนนี้จะแสดงปุ่มที่สำคัญต่างๆดังนี้

- Measurement เลือกวิธีที่ใช้วัดค่าจากภาคสนาม
- Soil Type เลือกโครงสร้างของดินที่ต้องการ
- Computations ต้องการลือคหรือไม่ลือคพารามิเตอร์ใดบ้างและเลือก Filter ของการแก้ปัญหา
- Optimization เลือกวิธีการแก้ปัญหาหรือความถูกต้อง
- New Case ต้องการสร้างใหม่
- Save บันทึกแฟ้ม
- Load เรียกข้อมูลเดิม ซึ่งสามารถเรียกข้อมูลที่มีนามสกุล MT_*.WTB และ MT_*.INP
- OK/Submit ส่งข้อมูลที่ป้อนเพื่อคำนวณในส่วน Engineering
- Escape ออกจากโมดูลนี้
- Cancel ยกเลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ตัวอย่างการรันโมดูลกรณีกำหนดให้เป็นดินสองชั้น

ตารางที่ 3.1 ความต้านทานดินที่ภาคสนาม สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

ระยะห่างของ โพรบ(m)		ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)								
		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10	15
ตำแหน่งวัด										
1		9	3.45	1.64	0.97	0.71	0.496	0.31	0.31	0.107
2		8.97	4.16	1.65	1.04	0.76	0.552	0.278	0.278	0.106
3		11.9	3.46	1.55	0.78	0.556	0.38	0.19	0.19	0.077
4		13.87	3.94	1.5	0.93	0.55	0.39	0.212	0.212	0.077
5		-	-	-	-	-	-	-	-	-
6		-	-	-	-	-	-	-	-	-
R (Ω) (AVERAGE)	$\Sigma R/N$	10.94	3.75	1.59	0.93	0.64	0.45	0.25	0.25	0.09
ρ (Ω -m) (AVERAGE)	$2\pi aR$	34.35	23.58	19.92	17.53	16.19	14.28	11.66	15.55	8.65

Report #1:

```

===== < R E S I S T I V I T Y ( SYSTEM INFORMATION SUMMARY ) > =====
Run ID.....: TUT1
System of Units .....: Meters
Soil Type Selected.....: Multi-Layer Horizontal
RMS error between measured and calculated...: 15.8200 in percent
resistivities (Note RMS=SQRT(average(Di**2))).

<--- LAYER CHARACTERISTICS --->
Layer      Resistivity      Thickness      Reflection      Resistivity
Number     (ohm-m)         (Meters)      Coefficient     Contrast
=====      =====      =====      =====      =====
1          infinite        infinite      0.0             1.0
2          26.78590       1.873756     -1.0000        0.26786E-18
3          10.06972       infinite      -0.45356       0.37593

```

รูปที่ 3.9 ผลค่าความต้านทานจำเพาะของดินสองชั้นของโมดูล RESAP

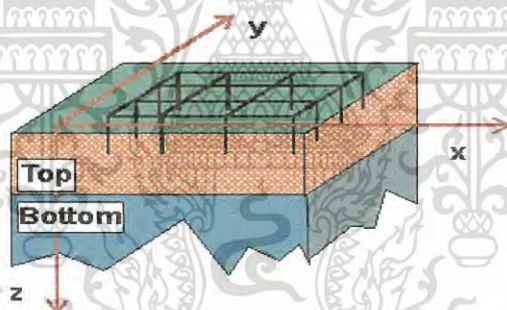
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โมดูล MALT

โมดูล MALT เป็นโมดูลที่ใช้วิเคราะห์ระบบต่อลงดิน ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการศึกษาการนำกระแสผ่านดิน ซึ่งโดยทั่วไป MALT สามารถวิเคราะห์และออกแบบระบบต่อลงดินได้ทั้งในโรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้าของระบบ HVAC และ HVDC หรือใช้ในการศึกษา cathodic protection โดย MALT สามารถวิเคราะห์ระบบต่อลงดินที่สลับซับซ้อนที่ประกอบด้วยสายตัวนำเปลือยฝังดินที่มีโครงสร้างเป็นชั้นในแนวตั้ง แนวนอน เป็นทรงกลมหรือเป็นทรงกระบอก แม้กระทั่งดินที่เป็นปริมาตรที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่างกัน โดยทั่วไป MALT จะใช้ศึกษาปัญหาทั้งหมดที่มีการป้อนกระแสตรงหรือกระแสสลับที่ความถี่ไฟฟ้ากำลังให้กับระบบต่อลงดิน โดยไม่พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ตามยาว(longitudinal impedance)ของสายตัวนำดังนั้นตำแหน่งที่ป้อนกระแสจึงไม่重要的事情ที่ความถี่สูงหรือระบบต่อลงดินมีขนาดใหญ่ ค่าอิมพีแดนซ์ตามยาวไม่สามารถจะตัดทิ้งได้ MALT จะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง ในกรณีนี้ควรใช้ MALZ

3.2.1 แบบจำลองของดินใน MALT

แบบจำลองของดินใน MALT มีอยู่หลายแบบให้ผู้ใช้สามารถเลือกให้เหมาะสมกับโครงสร้างของดินที่แท้จริง โดยบางแบบจำลองอาจจะได้จากการแปลความหมายจากค่าที่วัดได้โดยใช้โมดูล RESAP วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้แบบจำลองดินสองชั้นในแนวนอน



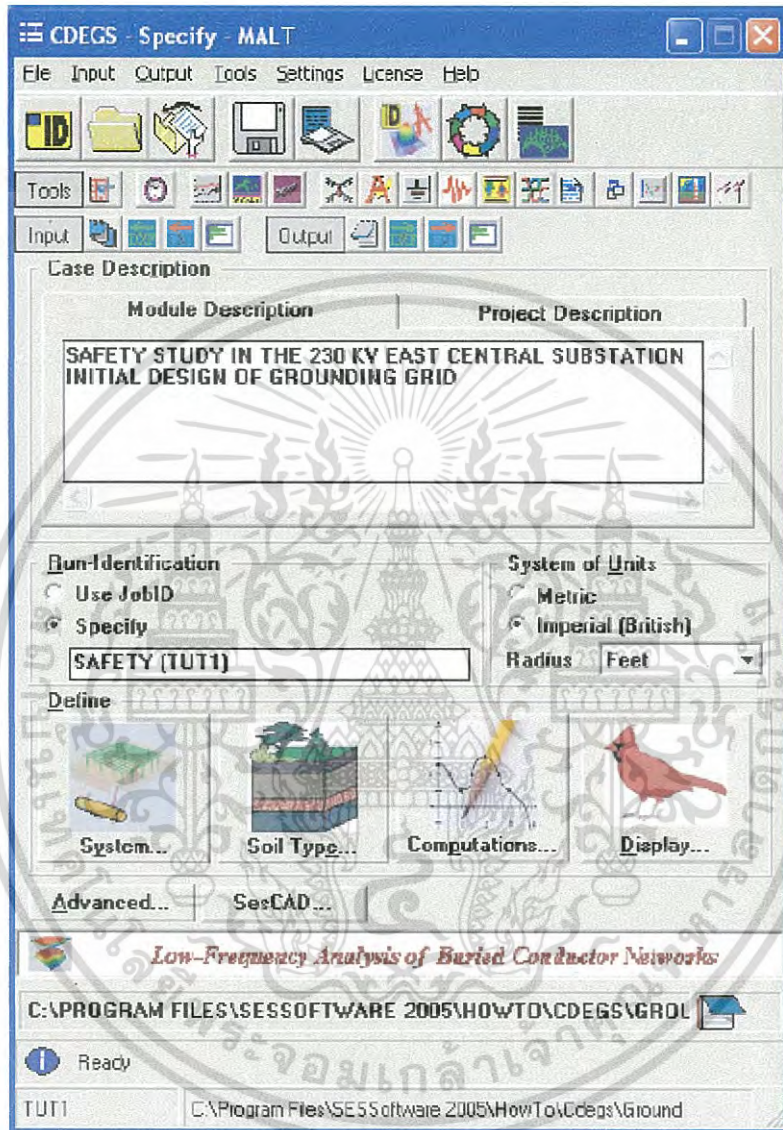
รูปที่ 3.10 ดินสองชั้นในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การใช้ โมดูล MALT

3.2.2.1 เปิดใช้งานโดย Start/Program/SES

3.2.2.2 คลิก MALT ใน Toolbox จะได้หน้าจอตั้งรูปที่ 3.11

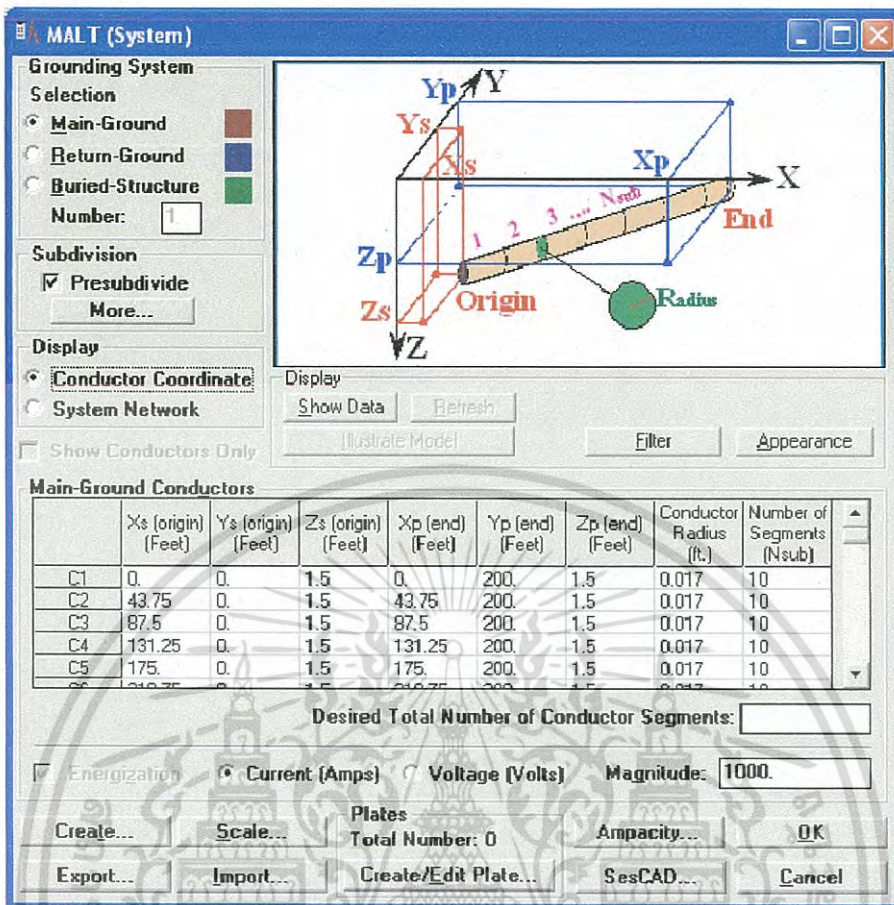


รูปที่ 3.11 MALT Specific windows

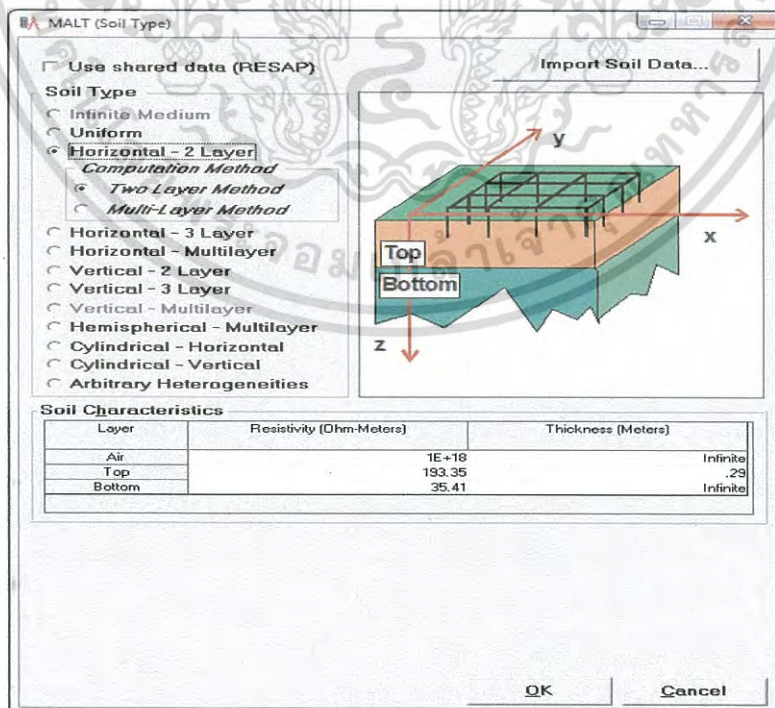
3.2.2.3 คลิก Systems จะได้หน้าจอตั้งรูปที่ 3.12 ทำการสร้างแบบจำลองของกราวด์กริด หรืออาจจะนำไฟล์จาก AutoCAD มาใช้ได้ โดยผ่านปุ่ม Import

3.2.2.4 คลิก Soil type จะได้หน้าจอตั้งรูปที่ 3.13 ทำการเลือกประเภทของดิน และกรอกข้อมูลของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



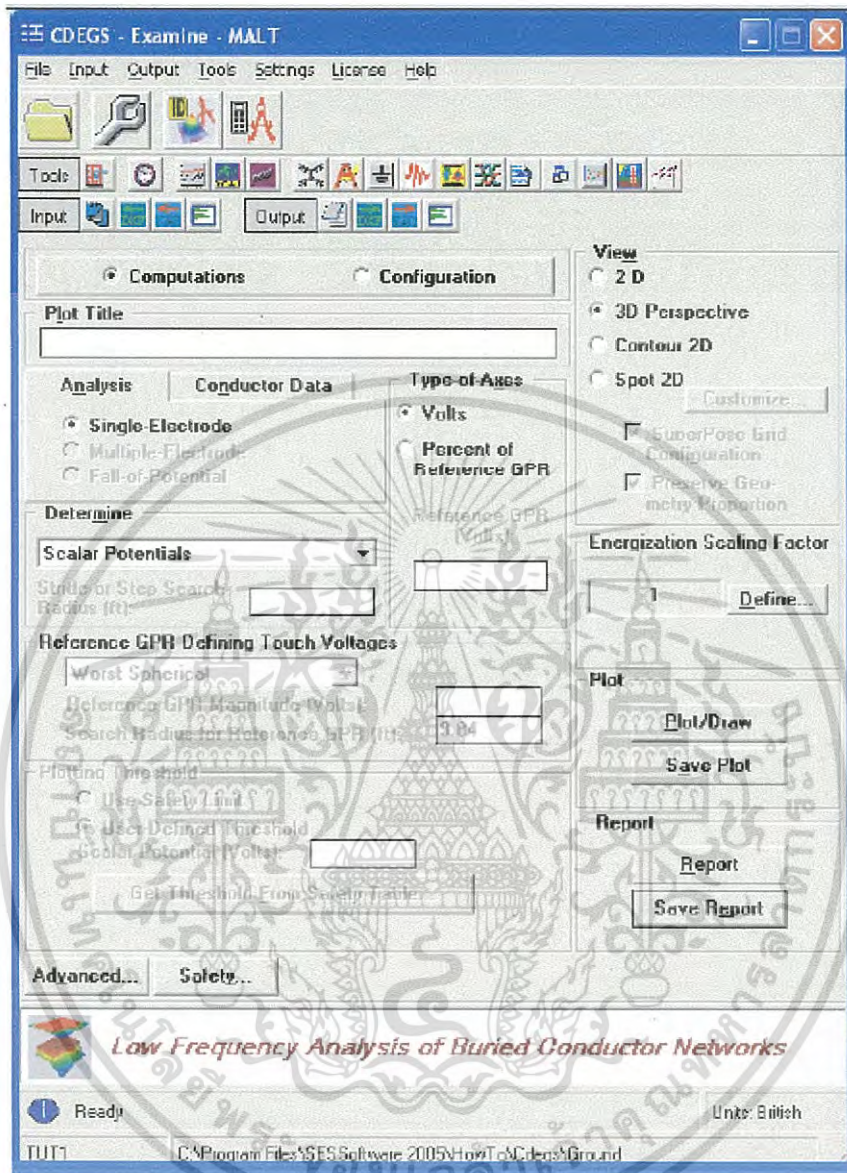
รูปที่ 3.12 การสร้างแบบจำลองกราวด์กริด



รูปที่ 3.13 ข้อมูลของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.5 คลิก Computations จะได้หน้าจอตั้งรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 หน้าจอของการ PLOT/REPORT/PRINT โมดูล MALT

ปุ่ม Analysis จะเป็นการแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ดังนี้

- Scalar Potentials เป็นการแสดงผลศักย์ไฟฟ้าที่เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ระยะไกล
- Touch Voltages เป็นการแสดงผลแรงดันไฟฟ้าสัมผัสทุกๆตำแหน่งตามที่กำหนด
- Reach Touch Voltages เป็นการแสดงผลแรงดันไฟฟ้าสัมผัสทุกๆตำแหน่ง เฉพาะที่อยู่ภายในระยะที่กำหนดใน Search Radius for Reference GPR (m)
- Step Voltages (Gradient) เป็นการแสดงผลแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มีหน่วยเป็น V/m ซึ่งจะหมายถึงค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยที่ขนานหรือตั้งฉากกับแนว Profile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Step Voltages (Spherical) เป็นการแสดงแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มีหน่วยเป็น V ซึ่งจะเป็นแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวจริง ตามระยะก้ำวที่ผู้ใช้สามารถกำหนดได้ใน Stride or Step Search Radius (m) ถ้าไม่ได้กำหนด โมดูลจะคำนวณที่รัศมี 1 m

3.2.3 ตัวอย่างการแสดงผล

การแสดงผลที่เป็นรายงานโดยย่อสามารถสั่งให้แสดงหรือพิมพ์ได้โดยคลิกปุ่ม Report ในรูปที่ 3.15 หรือวาดกราฟของศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดได้จากการคลิกปุ่ม Draw ในรูปที่ 3.16,3.17

```
Run ID.....: TUT1
System of Units .....: Metric
Earth Potential Calculations.....: Single Electrode Case
Mutual Resistance Calculations.....: NO
Main Ground Resistance and GPR Calculations.: Representative Point Method
Type of Electrodes Considered.....: Main Electrode ONLY
Soil Type Selected.....: Uniform or Two-Layer
Horizontal
SPLITS/FCDIST Scaling Factor.....: 0.60000
1
```

EARTH PARAMETERS FOR HORIZONTALLY-LAYERED SOIL

```
TOP LAYER RESISTIVITY = 26.786 ohm-meters
BOTTOM LAYER RESISTIVITY = 10.000 ohm-meters
REFLECTION COEFFICIENT = -0.453559 per unit
TOP LAYER HEIGHT = 1.8737 METERS
1
```

CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE

```
Original Electrical Current Flowing In Electrode...: 31500. amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)...: 0.60000
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode...: 18900. amperes
Number of Conductors in Electrode.....: 49
Resistance of Electrode System.....: 0.71017E-01 ohms
```

SUBDIVISION

```
Grand Total of Conductors After Subdivision.: 278

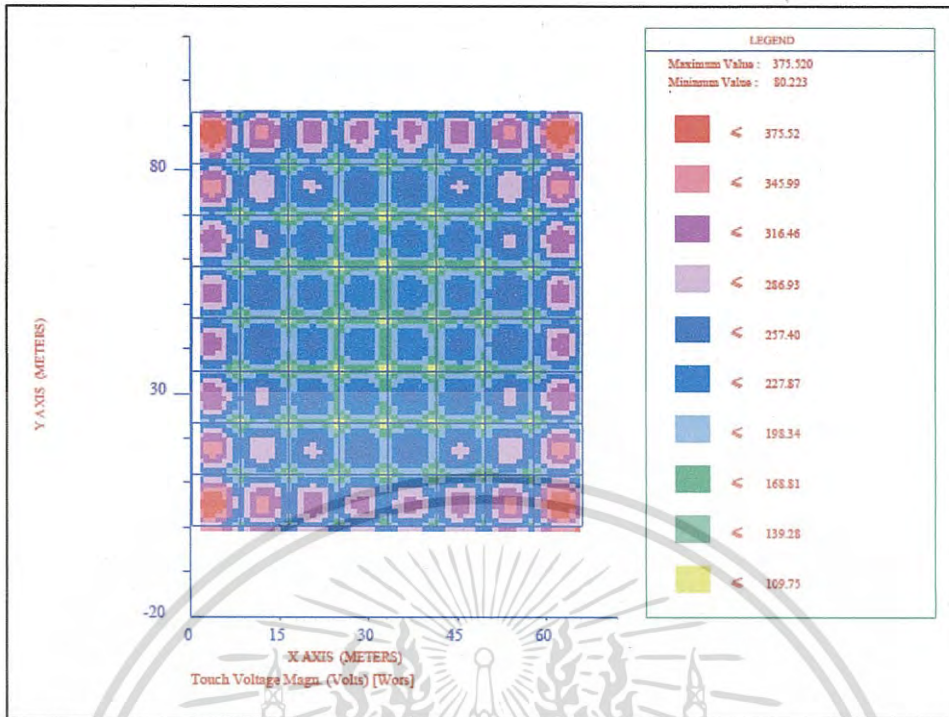
Total Current Flowing In Main Electrode.....: 18900. amperes
Average Current Density of Conductor Segments: 12.402 amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode.....: 1524.0 meters
```

EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS

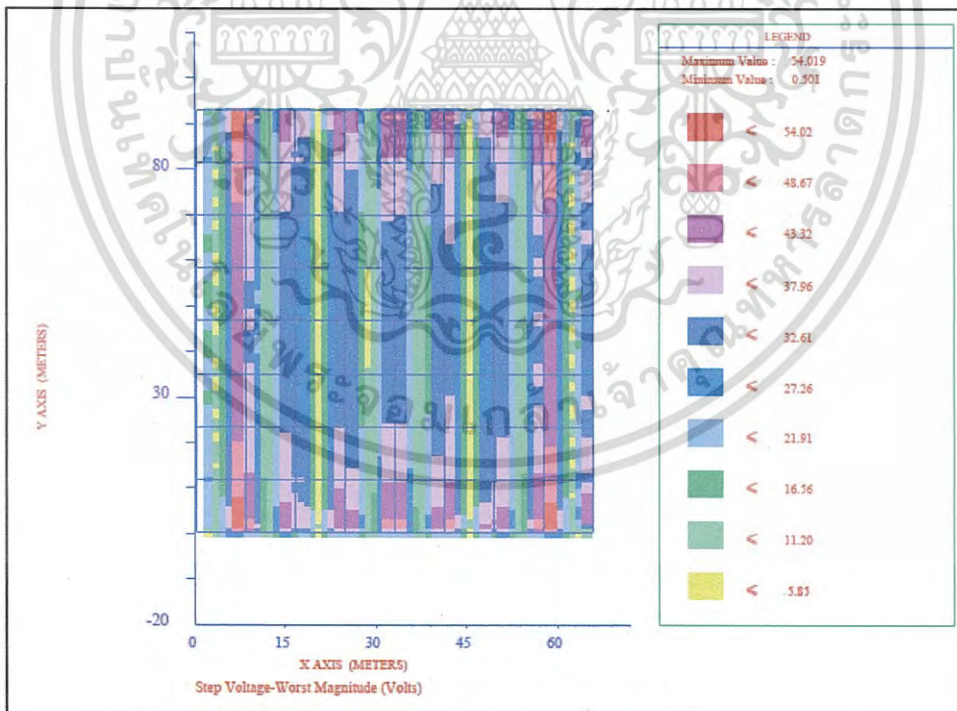
```
Main Electrode Potential Rise (GPR).....: 1342.2 volts
(based on two representative points)
```

รูปที่ 3.15 ตัวอย่าง Report จากโมดูล MALT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงแรงดันไฟฟ้าสัมผัส



รูปที่ 3.17 แสดงแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ออกแบบระบบต่อลงดิน

การประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ในกรณีที่เนื้อดินไม่มีความสม่ำเสมอ (Nonuniform soil) เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของตัวแปรจากการคำนวณตั้งสมการที่แสดงในบทที่ 2 และสามารถนำมาใช้ทดแทนโปรแกรม CDEGS ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 การออกแบบได้นำวิธีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้(GUI) มาใช้ประโยชน์ โดยจะมีช่องให้ผู้ป้อนข้อมูลการออกแบบที่เป็นตัวเลขลงไป หลังจากผู้ใช้สั่งให้โปรแกรมทำงาน ผู้ใช้จะทราบว่าผลของการออกแบบมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าหรือไม่

4.1 แนะนำโปรแกรม MATLAB[3]

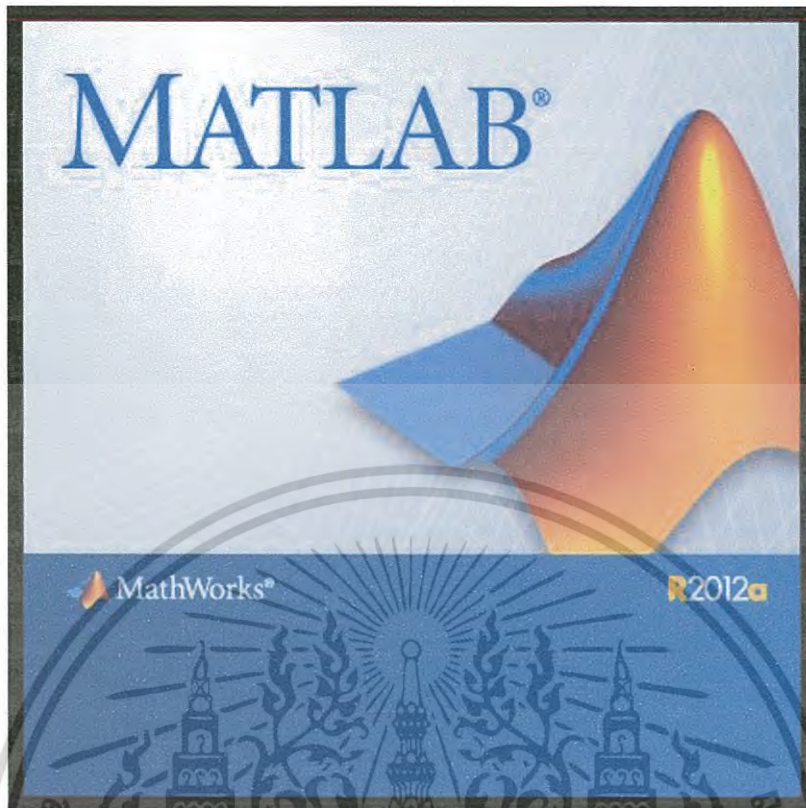
โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลขซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในการแก้ปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการศึกษาเพื่อใช้งานเพราะเป็นโปรแกรมในลักษณะ Interactive การเขียนโปรแกรมไม่ยุ่งยาก ตลอดจนมีฟังก์ชันต่างๆให้เลือกใช้มากมาย

MATLAB เขียนภาษาคอมพิวเตอร์ชั้นสูง (High-Level Language) สำหรับการคำนวณทางเทคนิคที่ประกอบด้วย การคำนวณเชิงตัวเลข กราฟิกที่ซับซ้อน และการจำลองแบบเพื่อให้มองเห็นภาพพจน์ที่ชัดเจน ชื่อของ MATLAB ย่อมาจาก MATrix LABoratory เดิมโปรแกรม MATLAB ได้เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณทาง Matrix หรือเป็น Matrix Software ที่พัฒนามาจากโปรเจกต์ชื่อ LINKPACK และ EISPACK

โปรแกรม MATLAB จะมีกล่องเครื่องมือที่ใช้ในการหาคำตอบเรียกว่า Toolbox โดยโปรแกรม MATLAB จะมี Toolbox ในแต่ละสาขา เช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing Toolbox) ระบบควบคุม (Control System Toolbox) โครงข่ายประสาท (Neural Network Toolbox) ฟัชซีลอจิก (Fuzzy Logic Toolbox) การติดต่อสื่อสาร (Communication Toolbox) สถิติ (Statics Toolbox) ซึ่งภายใน Toolbox แต่ละสาขาก็จะมีฟังก์ชันต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาในสาขานั้นๆให้เลือกประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามการใช้งาน MATLAB ในการคำนวณคณิตศาสตร์บน M-File หรือการคำนวณใดๆที่เป็นฟังก์ชันพื้นฐาน ผู้เขียนไม่ขอแนะนำในวิทยานิพนธ์นี้ เพราะหนังสือหรือคู่มือการใช้งานเบื้องต้นพอมีให้หาอ่านในรูปแบบภาษาไทยบ้าง ดังเช่น [3] ดังนั้นผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ขอเน้นการนำเสนอไปในเรื่องการใช้งานในด้านการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ทางรูปภาพ (Graphical User Interface: GUI) ซึ่งสามารถสร้างได้จาก GUI Development Environment (GUIDE) ภายในโปรแกรม MATLAB

อนึ่งเนื่องจากผู้เขียนนั้นได้ศึกษาและถนัดโปรแกรม MATLAB Version 7.14 Release 2012a ดังรูปที่ 4.1 ดังนั้นผู้เขียนจะขอแนะนำเสนอจากโปรแกรม MATLAB รุ่นดังกล่าว ซึ่งถึงแม้ว่า MathWorks จะมี MATLAB รุ่นใหม่ๆออกมา แต่ผู้แต่งยังคงเชื่อว่าโครงสร้างหลักๆของโปรแกรมไม่น่าที่จะแตกต่างจากเดิมเท่าไรนัก



รูปที่ 4.1 รุ่นของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้

4.1.1 ความต้องการของระบบคอมพิวเตอร์ก่อนการติดตั้งโปรแกรม

โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านี้ เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Window ซึ่งทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติอย่างน้อยดังนี้

- CPU Intel Pentium, Athlon or higher (PC)
- Windows 10, Windows 8.1, Windows 8, Windows 7, Windows Server 2016, Windows Server 2012
- 1024 MB RAM minimum, 2048 MB RAM recommended
- Hard disk 1 GB minimum

4.1.2 ข้อดีของโปรแกรม MATLAB

1. มีฟังก์ชันคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้ในการคำนวณมากมาย และยังสามารถสร้างฟังก์ชันขึ้นมาใช้งานได้
2. อัลกอริทึม (Algorithm) พัฒนาได้ง่าย สามารถแก้ไขปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้ง่ายและรวดเร็วกว่าโปรแกรมภาษาอื่นๆ เช่น C, Fortran หรือ Basic เป็นต้น
3. มีโครงสร้างแบบจำลอง (Simulink) ซึ่งเป็น Package ที่สามารถนำมาสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ทดสอบ และประเมินผล ระบบ Dynamic ต่างๆก่อนนำไปใช้งานจริง
4. ประยุกต์ใช้ในการสร้างรูปแบบ Graphical User Interface (GUI) เพื่อผู้ออกแบบสามารถพัฒนาโปรแกรมให้ปฏิสัมพันธ์ได้ระหว่างผู้ใช้โปรแกรมกับเครื่องคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

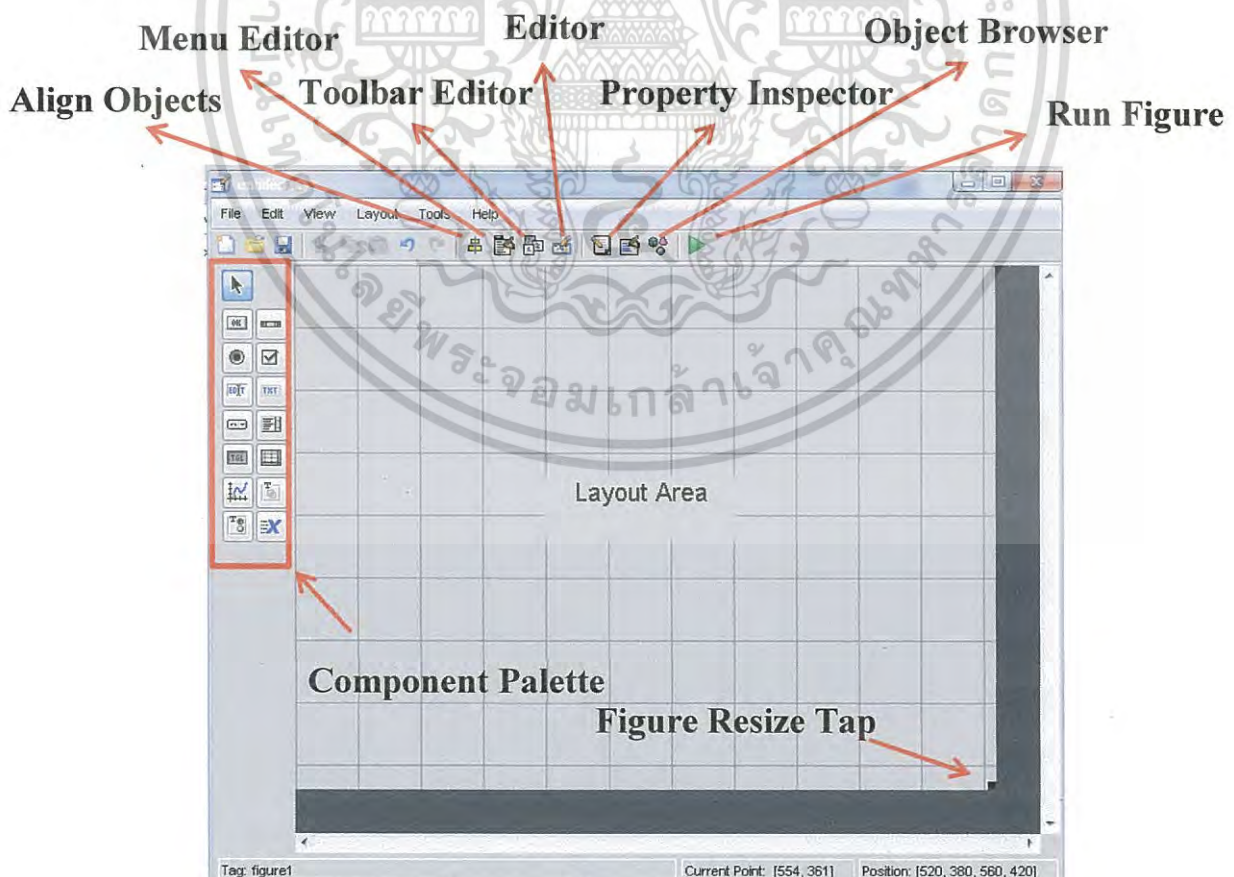
4.1.3 การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB เบื้องต้น

การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB นั้นค่อนข้างมีเนื้อหาที่เยอะมาก อยู่ที่ว่าผู้ศึกษาต้องการหยิบหรือสนใจในเรื่องใดของ MATLAB ดังนั้นจะไม่ขอพูดถึงในวิทยานิพนธ์นี้นักนัก แต่จะแนะนำให้ศึกษาต่อเพิ่มเติม โดยในปัจจุบันมีผู้เขียนตำราที่เป็นภาษาไทยไว้ให้ศึกษากันในเบื้องต้นค่อนข้างมาก ดังเช่น [3]

4.1.4 การปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ทางรูปภาพ (Graphical User Interface)

โปรแกรม MATLAB นอกจากจะมีฟังก์ชันในการคำนวณทางคณิตศาสตร์แล้ว แต่โปรแกรม MATLAB ยังมีฟังก์ชันทางการเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้โปรแกรมหรือผู้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์กับโปรแกรมหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า Graphical User Interface หรือ GUI แต่ทาง The MathWorks, Inc. ได้พัฒนาและเรียกฟังก์ชันนี้ว่า GUIDE ย่อมาจาก GUI Development Environment

GUIDE ได้จัดหาชุดเครื่องมือ (Tools) สำหรับการสร้าง GUIs ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้ใช้งานได้ง่ายสำหรับทำโครงร่างกราฟิก และการทำโปรแกรมการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ ในหัวข้อนี้จะแนะนำคุณสู่ GUIDE เมื่อคุณเปิด GUI ใน GUIDE มันจะแสดงหน้าต่างโครงร่างสำหรับผู้สร้าง (Layout Editor) ซึ่งแผงการควบคุมสำหรับเครื่องมือทั้งหมดของ GUIDE หน้าต่างโครงร่างสำหรับผู้สร้าง (Layout Editor) จะทำให้คุณวาง Layout ได้อย่างง่ายและรวดเร็วด้วยการลากและนำมาวางวัตถุ (Dragging Components) เช่น Push Button Pop-Up Menu หรือ Axes จากชั้นของอุปกรณ์มายังพื้นที่ที่ต้องการสร้างโครงร่าง ดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็น Layout Editor



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของวินโดว์เพื่อใช้สร้าง GUI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

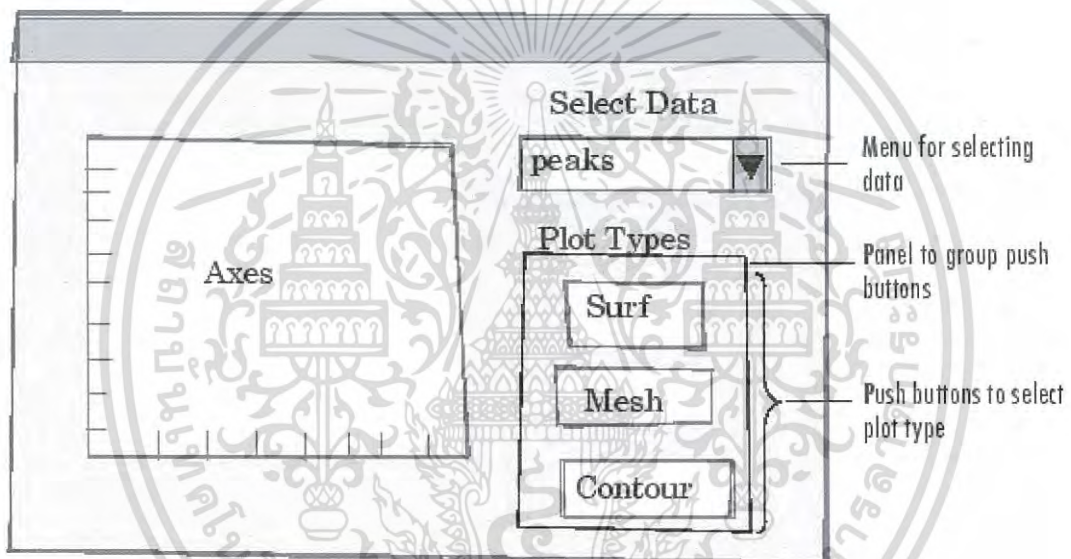
4.1.5 แนวคิดพื้นฐานการสร้าง Object ต่างๆในโปรแกรมทำงานประสานกัน

หัวข้อนี้จะนำเสนอตัวอย่างที่จะแสดงให้เห็นว่าเราจะสร้างการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (GUI) โดยใช้ GUIDE ของ MATLAB

4.1.5.1 การออกแบบ GUI (Designing the GUI)

GUI ที่ถูกใช้ในตัวอย่างนี้จะมี Axes เพื่อใช้ในการแสดงกราฟในรูปแบบของ Surface Mesh หรือ Contour ของข้อมูลที่ถูกเลือกจาก Pop-Up Menu รูปที่ 4.3 แสดงการเค้าโครงบนกระดาษที่จะนำมาสร้างเป็นวินโดว์รูปภาพเพื่อให้มันสามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ได้ในท้ายที่สุด

Pop-up Menu จะมีข้อความ (String) บรรจุอยู่ภายใน 3 ข้อความ ได้แก่ “peaks” “membrane” และ “sine” ซึ่งจะเกี่ยวข้องในฟังก์ชันการคำนวณของ MATLAB ผู้ใช้สามารถที่จะเลือกข้อมูลจาก 1 ใน 3 ข้อความใน Pop-Up Menu เพื่อที่จะนำมาพล็อตกราฟ



รูปที่ 4.3 โครงร่างของกราฟิกราวๆบนกระดาษที่จะนำมาสร้างโดย GUI

4.1.5.2 การสร้างโครงร่าง GUI (Laying Out the GUI)

ในหัวข้อการสร้างโครงร่าง GUI นี้จะแสดงให้เห็นว่าการสร้างส่วนประกอบของ GUI เช่น การควบคุมการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (User Interface Control) ได้แก่ ปุ่มกด (Push Button) Pop-Up Menu ข้อความ (Static Text) และอื่นๆที่สามารถสร้างได้อย่างไร และขอให้คุณนั้นสร้าง GUI ด้วยตัวของคุณเอง ซึ่งมันจะเป็นหนทางที่ดีที่สุดของการเรียนรู้

หัวข้อเหล่านี้จะอธิบายว่าเราจะสร้างโปรแกรมการทำงานมันได้อย่างไรตามหัวข้อเหล่านี้

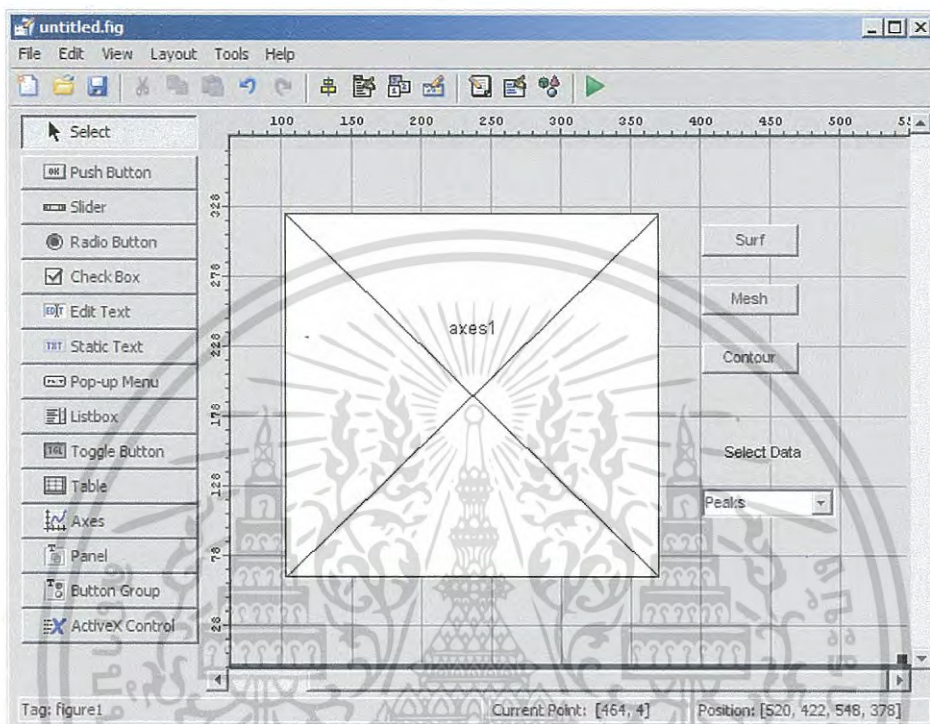
4.1.5.2.1 การเปิด Layout และ Code ตัวอย่าง

การศึกษาด้วยตัวเองจาก Help นั้น ใน Help จะมีตัวอย่าง Layout และ Code ซึ่งเป็น M-file ให้ศึกษาเพื่อเรียนรู้การใช้งาน ซึ่งจะช่วยให้ผู้ศึกษานั้นสามารถแกะโปรแกรม และ Object แต่ละตัวได้ว่า Object แต่ละตัวนั้นทำงานสัมพันธ์กับ Code ใน M-file นั้นอย่างไร ซึ่งเอเปิด Help แล้วให้ Search หาหัวข้อ Creating Graphical User Interface จากนั้นเข้ามาที่หัวข้อ Laying Out the GUI จากนั้นเข้ามาที่ Layout and Code Example ที่หน้านี้นี้จะมี Link เพื่อเปิด Layout นั้น คือชื่อ

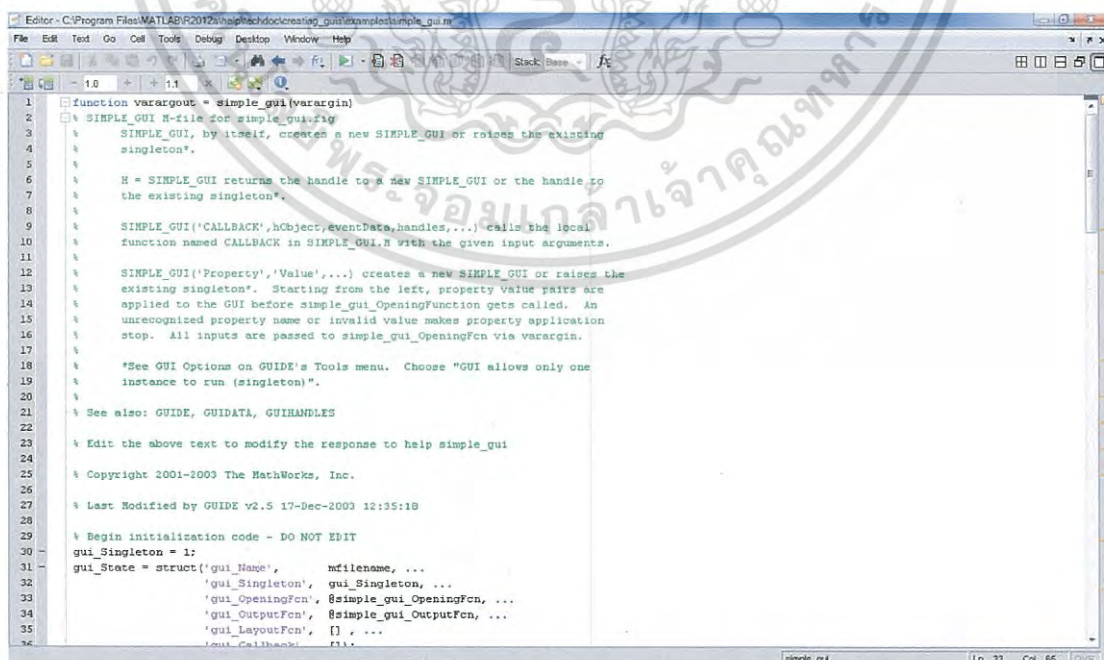
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Layout Editor with completed GUI Layout และถ้าต้องการเปิด Code ที่อยู่ใน M-File ให้คลิก Link ที่ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File

เมื่อคลิกที่ Link ชื่อ Layout Editor with completed GUI Layout จะปรากฏวินโดว์ดังรูปที่ 4.4 และถ้าคลิก Link ที่ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File เป็นดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 เมื่อคลิกที่ Link ชื่อ Layout Editor with completed GUI Layout

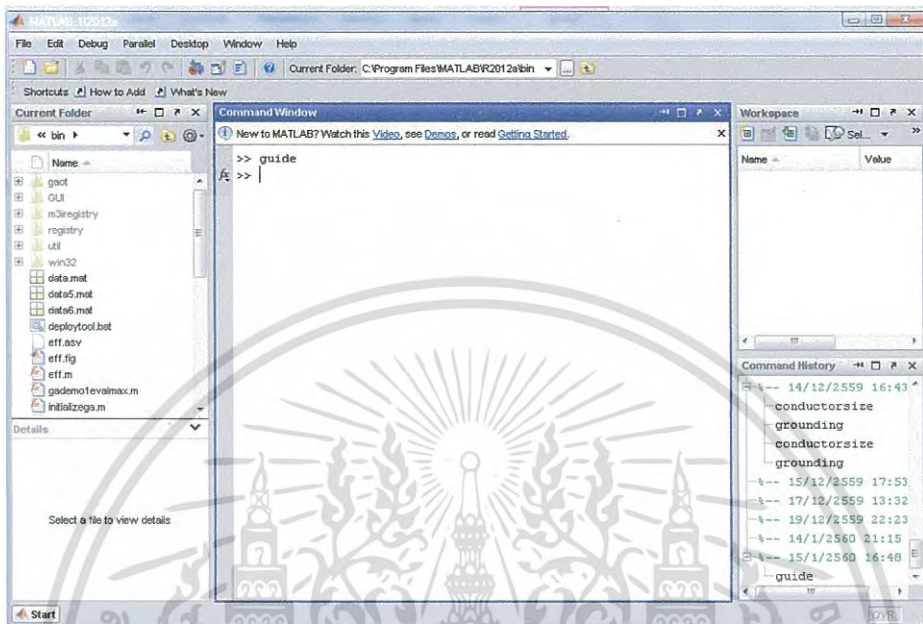


รูปที่ 4.5 เมื่อคลิกที่ Link ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File

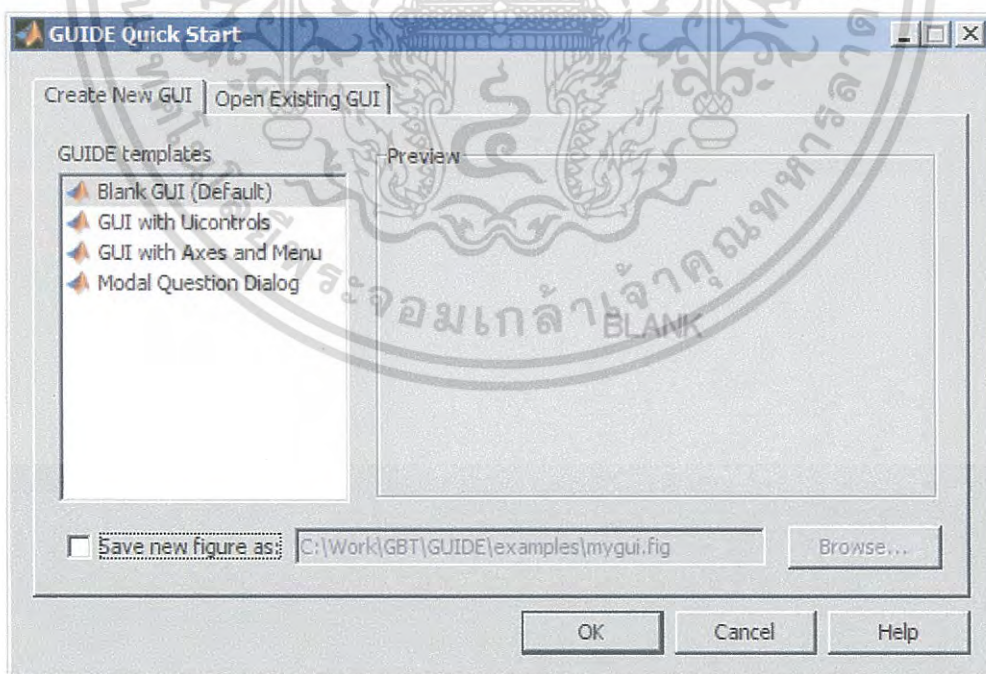
4.1.5.2.2 การเปิดวินโดว์ Layout Editor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิด GUIDE โดยการพิมพ์คำว่า guide ที่ MATLAB prompt ดังรูปที่ 4.6 การเข้าไปที่วินโดว์ Layout Editor จะเป็นวิธีการที่เร็วและสะดวกมาก ซึ่งเมื่อพิมพ์และกดปุ่ม Enter ที่ Keyboard ก็จะมีปรากฏดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การเปิดวินโดว์ Layout Editor โดยการพิมพ์ guide ที่ MATLAB prompt ที่หน้าต่าง Command Window



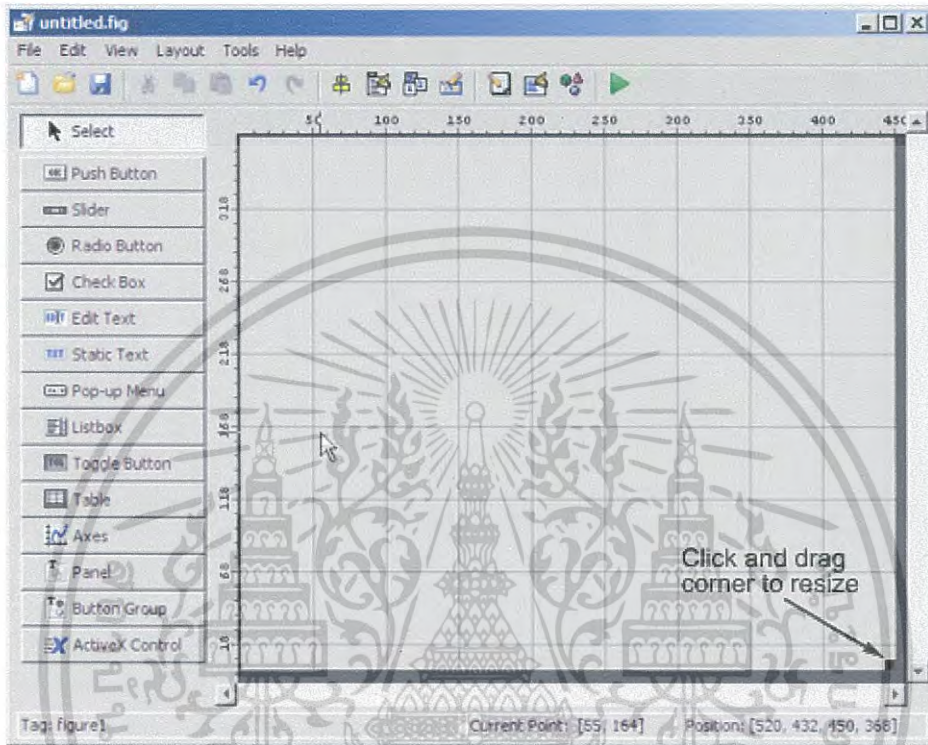
รูปที่ 4.7 วินโดว์ GUIDE Quick Start

เมื่อวินโดว์ GUIDE Quick Start ถูกเปิดขึ้นให้สร้าง GUI ไฟล์ใหม่โดยการเลือก Blank GUI (Default) จาก Tab ที่ชื่อ Create New GUI แล้วคลิกปุ่ม OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5.2.3 การตั้งขนาดของพื้นที่วินโดว์

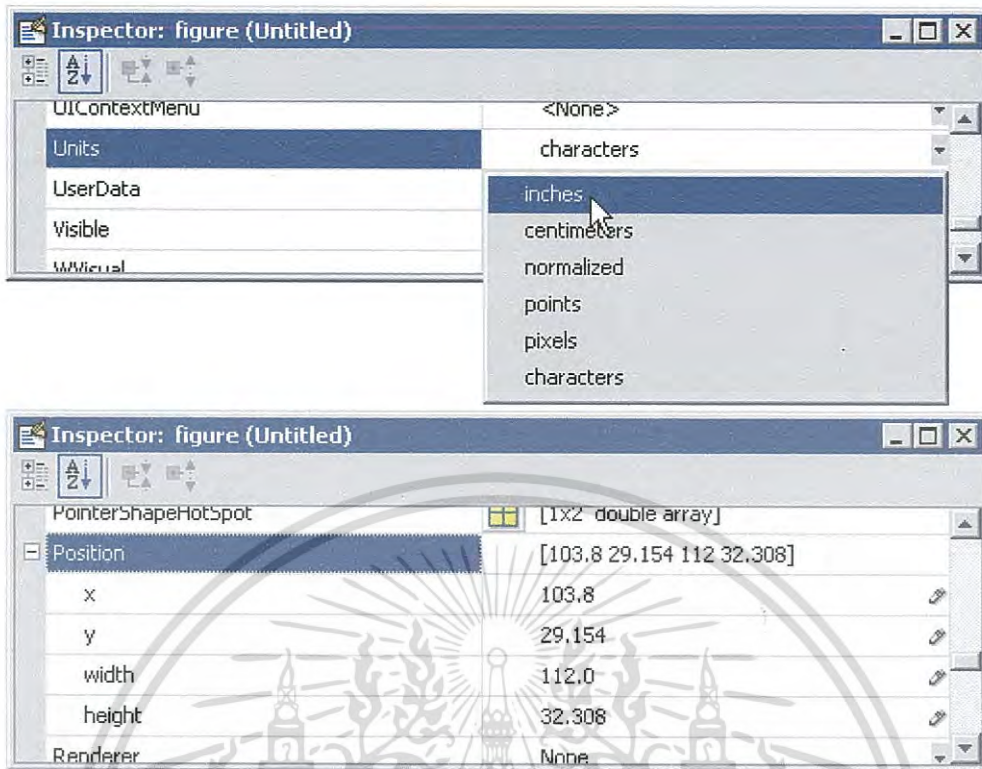
เมื่อ Layout Editor เปิดขึ้นมาให้คลิกที่ File และเลือก New เพื่อเปิดไฟล์ GUI ใหม่ การตั้งขนาดของ GUI จะใช้การเพิ่มลดขนาด (Resizing) บนพื้นที่ที่เป็น Grid โดยการคลิกที่มุมขวาและเลื่อนเมาส์ ดังรูป 4.8



รูปที่ 4.8 วิธีการเพิ่มลดขนาดของพื้นที่การสร้าง GUI

ถ้าคุณต้องการตั้งค่าตำแหน่งของ GUI ใหม่ตำแหน่งที่แน่นอน ให้ทำดังนี้

1. เลือก Property Inspector จากเมนู View หรือดับเบิลคลิกบนพื้นที่ของ GUI
2. เลือกปุ่ม Pop-up Menu ที่ชื่อว่า Unit ภายในหน้าต่าง Property Inspector เพื่อเปลี่ยนหน่วยเป็น นิ้ว (Inch) ดังรูปที่ 4.9
3. เลือกเครื่องหมายของหัวข้อชื่อ Position เพื่อขยายหัวข้อย่อยตามรูปที่ 4.9 เมื่อขยายแล้ว จะพบ x y width และ height
4. จากนั้นให้เติมค่าที่ต้องการทางด้านขวาดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วินโดว์ Property Inspector เพื่อการตั้งค่าของ Figure สำหรับ GUI

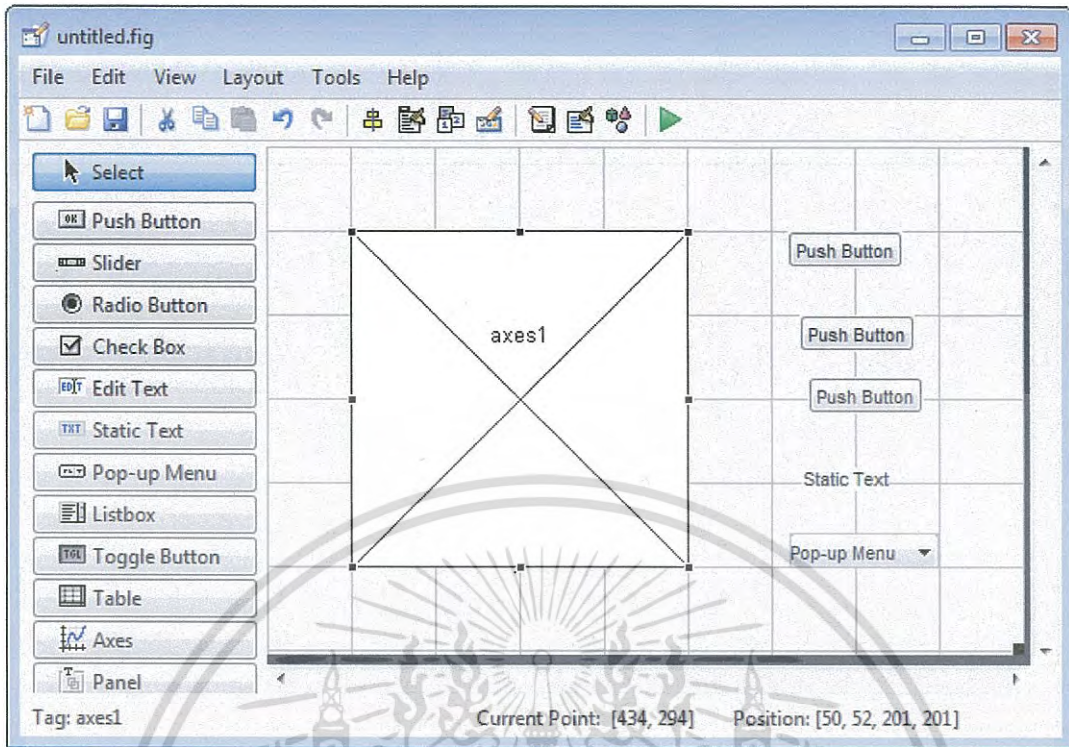
4.1.5.2.4 การสร้างองค์ประกอบ

เลือก Object ต่างๆที่ต้องการจาก Palette และทำการ Drag มายังพื้นที่ที่เป็น Layout นอกจากนั้นคุณยังสามารถที่จะเพิ่มขนาดของ Object ต่างๆ ได้ด้วยการคลิกที่มุมของ Object ต่างๆ เหล่านั้น ซึ่งในตัวอย่างนี้คุณจะต้องดึง Push Button 3 ปุ่ม Static Text 1 ขึ้น Pop Up Menu 1 ขึ้น และ Axes 1 ขึ้น จาก Palette จากนั้นให้จัดองค์ประกอบความสวยงามดังภาพที่ 4.10

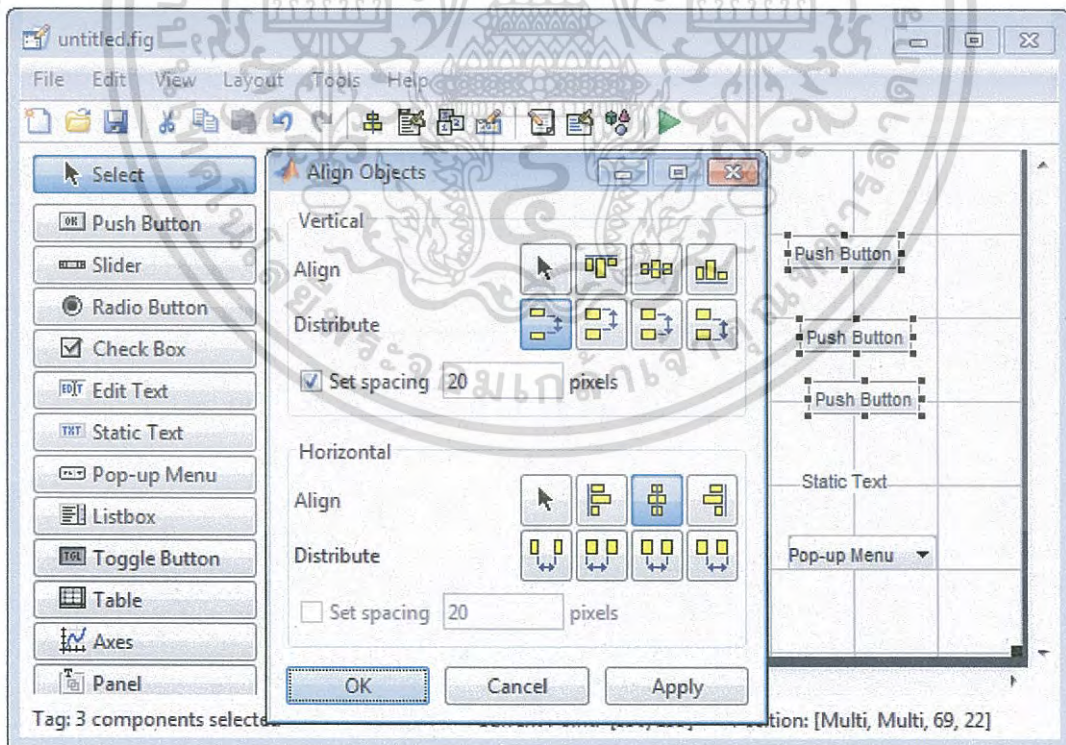
4.1.5.2.5 การจัดวางองค์ประกอบ

คุณสามารถจัด Object บน Layout ของคุณได้โดยใช้เครื่องมือช่วย นั่นคือ Alignment Tool ในตัวอย่างนี้จะยกตัวอย่างการจัดปุ่ม Push Button 3 ปุ่มให้เรียงกัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือก Push Button ทั้ง 3 ปุ่ม โดยกดปุ่ม Ctrl และคลิกปุ่มเหล่านั้นหรือใช้เมาส์ลากให้คลุมปุ่มเหล่านั้นทั้งหมด
2. เลือก Align Objects จาก Tool Menu
3. ทำการตั้งค่าการจัด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11
 - 3.1 ระยะห่าง 20 pixels ระหว่างปุ่มในแนวตั้ง
 - 3.2 จัดปุ่มให้เป็นแถวโดยยึดทางซ้าย
4. คลิก OK



รูปที่ 4.10 การสร้างองค์ประกอบ Object



รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการจัด Object

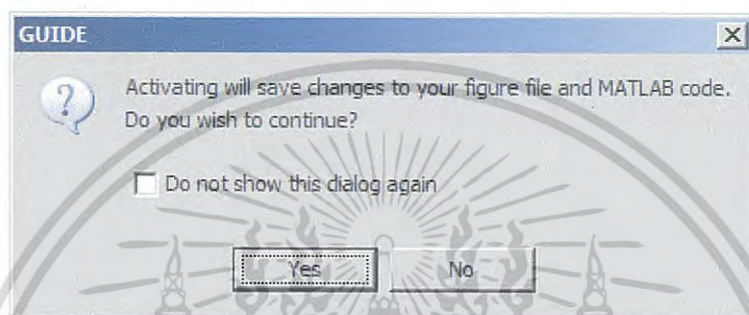
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5.3 การทำโปรแกรม GUI (Programming the GUI)

การทำโปรแกรมนั้นหลักๆจะต้องทำการตั้ง (Set) ค่า Properties ของ Object แต่ละตัวใน วินโดว์ Properties Inspector จากนั้นจึงนำไปเขียน Code เช่น เขียนฟังก์ชันการ Callback ให้สัมพันธ์กันกับ Object ต่างๆใน MATLAB M-File จากนั้นจึงทำการ Run Program

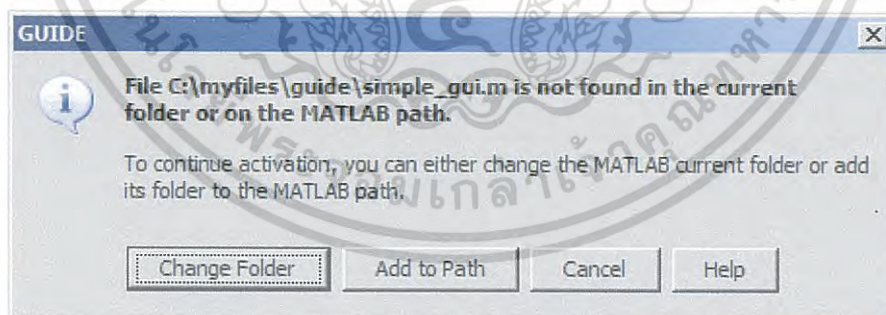
4.1.5.4 การ Save และการ Run โปรแกรม (Saving and Running the GUI)

ภายหลังการเขียนฟังก์ชัน Callback คุณสามารถที่จะ Run GUI ของคุณด้วยการเลือก Run จาก Tool Menu หรือคลิกปุ่ม Run บน GUIDE Toolbar ถ้าคุณยังไม่ Save ไฟล์ที่ทำก่อนที่จะกด Run คุณจะพบข้อความดังนี้ ตามรูปที่ 4.12



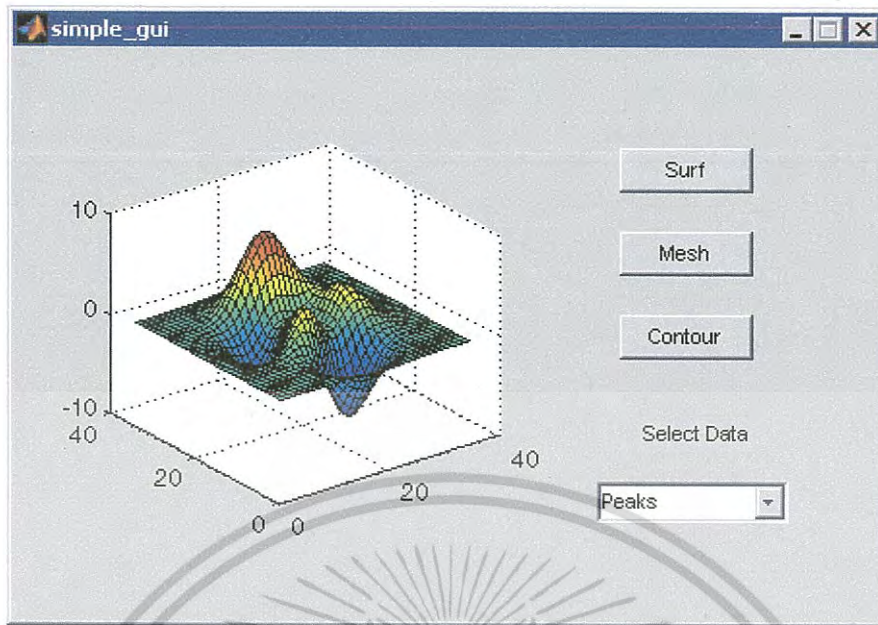
รูปที่ 4.12 วินโดว์เตือนให้ Save ไฟล์ล่าสุด

ถ้าเจอเหตุการณ์ดังนั้นก็ให้คลิก Yes จากนั้นโปรแกรมจะทำการ Save แต่ถ้า Directory ที่คุณ Save ไม่ใช่ทางเดิน (Path) ที่ตั้งไว้ในโปรแกรม GUIDE จะเปิดวินโดว์ แสดงข้อความดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 4.13

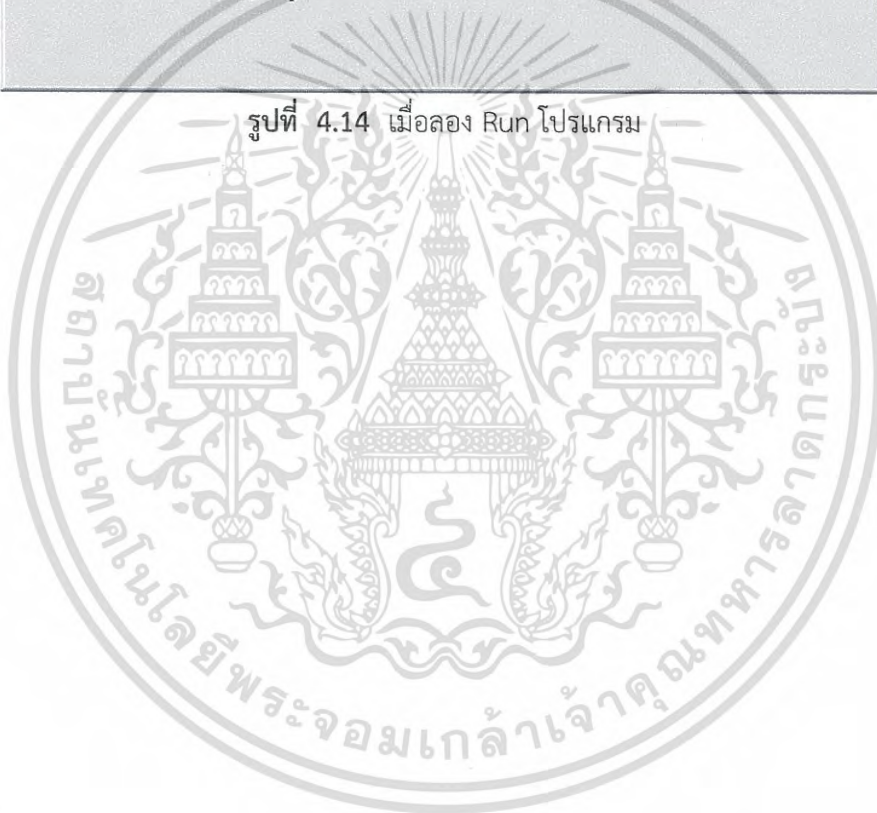


รูปที่ 4.13 วินโดว์ GUIDE เพื่อเลือกทางเดินของไฟล์

คลิก OK มันจะทำการเปลี่ยน Directory ปัจจุบันให้ จากนั้น GUIDE จะเปิด รูปภาพที่สร้าง Layout ไว้ก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เมื่อลอง Run โปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 แนะนำโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

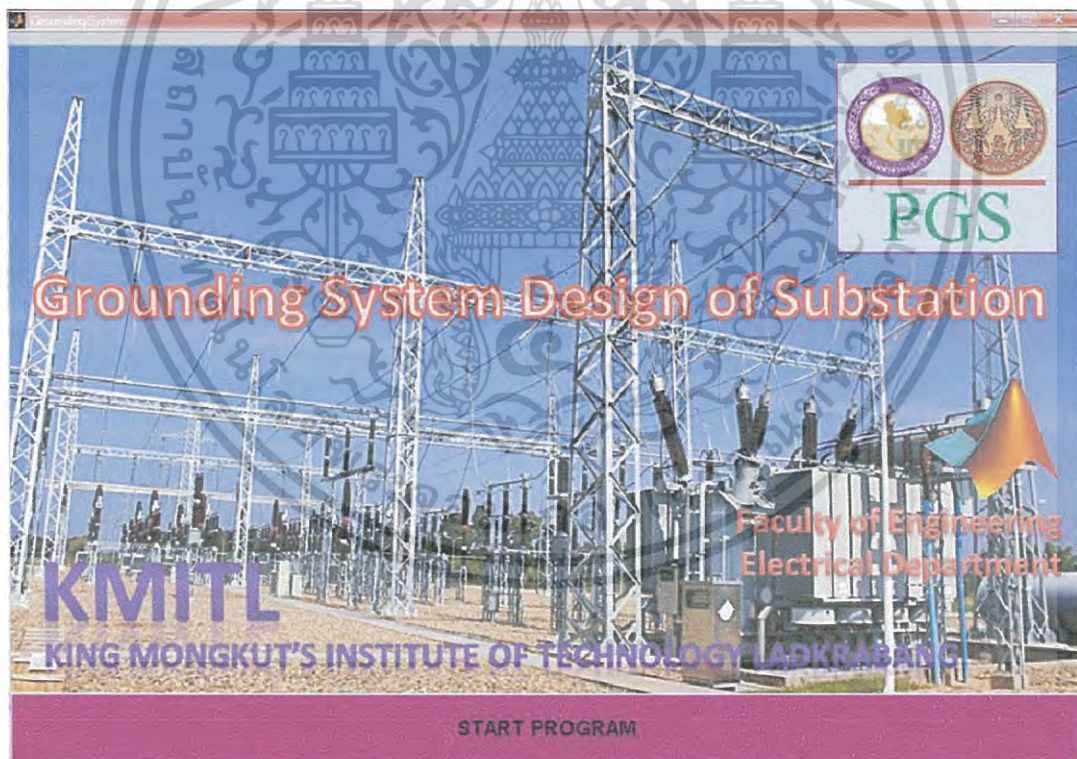
4.2.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการออกแบบด้วยโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

ความสามารถของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้สามารถที่จะออกแบบระบบต่อลงดินดังลักษณะต่อไปนี้

1. โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสามารถออกแบบพื้นที่ที่มีลักษณะต่างกันได้ 2 ประเภท คือ พื้นที่ที่สื่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่ที่สื่เหลี่ยมผืนผ้า
2. แบบจำลองดินที่มีค่าความต้านทานดินแบบไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform soil) โดยพิจารณาเป็นดินสองชั้น
3. คำนวณหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับได้
4. จำลอง (Simulate) การออกแบบได้
5. ประเมินการค่าใช้จ่ายระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าได้

4.2.2 การใช้โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน มีส่วนประกอบที่เป็นวินโดว์อยู่ 5 วินโดว์ กล่าวคือ เมื่อทำการเรียกโปรแกรมจะพบวินโดว์แรกเป็นวินโดว์ต้อนรับสู่การออกแบบระบบต่อลงดินดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วินโดว์แรกของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

เมื่อคลิกปุ่ม START PROGRAM จะเป็นการเรียกวินโดว์การคำนวณเพื่อออกแบบระบบต่อลงดิน หลังจากคลิกปุ่ม START PROGRAM จะพบวินโดว์ดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design Grounding Grid of Substation

Substation:

Input Data

Ground grid Data

1. Total area enclosed by ground grid: Lx x Ly m²

2. Distance between Conductor: Dx m Dy m

3. Choice of material for conductors: Copper, annealed soft-drawn (100% conductivity)

4. Depth of Burial Grid conductor: hg m

Current Fault Data

1. Ground Fault current: 0 kA

2. Current Devision Factor: 0

3. Fault Duration Time: 0 s

4. Duration of shock time: 0 s

5. Ambient Temperature: 0 °C

Soil Data

1. Apparent soil resistance (Wenner method):

Rod Data

1. Diameter of Rod Conductor: 0 m

2. Length of A Ground Rod: Lr m

3. Number of Ground Rod: 0 PCS.

Surface material Data

1. Thickness of Crushed Rock: hs m

2. Crushed Rock Resistivity: 0 ohm-m.

รูปที่ 4.16 วินโดว์ลำดับที่สองสำหรับป้อนข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน

หลังจากที่วินโดว์ดังรูปที่ 4.16 ปรากฏขึ้นที่หน้าจอของคอมพิวเตอร์ วินโดว์หน้านี้มีหน้าที่สำหรับให้ผู้ใช้โปรแกรมป้อนค่าข้อมูลต่างๆที่จำเป็นสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า


ข้อมูลที่ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องป้อนแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่

1. ชื่อสถานีไฟฟ้าที่จะทำการออกแบบระบบต่อลงดิน
2. ข้อมูลของกราวด์กริด ประกอบไปด้วย พื้นที่ของกราวด์กริด, ชนิดตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด, ความลึกของกราวด์กริด และจำนวนเมฆของกราวด์กริด
3. ข้อมูลของกระแสกระแสไฟฟ้าผิดพลาด ประกอบด้วย ขนาดของกระแสกระแสไฟฟ้าผิดพลาด, ค่าตัวประกอบแบ่งกระแสไฟฟ้าผิดพลาด, ระยะเวลาการเกิดกระแสไฟฟ้าผิดพลาด, ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าผิดพลาดไหลผ่านร่างกายที่ยอมให้มิได้ และอุณหภูมิแวดล้อม
4. ข้อมูลของดิน ได้แก่ค่าความต้านทานของดินจากภาคสนามที่ระยะอิเล็กโทรดต่างๆที่ได้จากการวัดโดยวิธีของเวนเนอร์
5. ข้อมูลของแท่งกราวด์รูด ประกอบไปด้วย เส้นผ่าศูนย์กลางแท่งกราวด์รูด, ความยาวของแท่งกราวด์รูด และจำนวนแท่งกราวด์รูด
6. ข้อมูลวัสดุรอยผิวดิน ประกอบไปด้วย ความหนาของวัสดุรอยผิวดิน และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุรอยผิวดิน

เมื่อทำการป้อนข้อมูลต่างๆครบหมดแล้ว ให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม SAVE เพื่อให้โปรแกรมทำการบันทึกข้อมูลต่างๆไว้เพื่อใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินต่อไป หลังจากนั้น ให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม NEXT จะพบว่าหน้าจอคอมพิวเตอร์จะปรากฏวินโดว์การหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยวินโดว์นี้จะนำข้อมูลที่ผู้ใช้โปรแกรมได้ป้อนข้อมูลไว้ในวินโดว์ที่ก่อนหน้านี้มาใช้แสดงด้วย

Parameter Estimation of Horizontal two-layer Soil

Substation PHITSANULOK 3




Input		Optimization	
Probe Spacing (m)	Resistance (Ohm)	Apparent Resistance (Ohm)	
0.5	10.94	<input type="text"/>	The depth of the upper level (h1) (m)
1	3.75	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	1.59	<input type="text"/>	The upper layer soil resistivity (p1) (ohm-m)
3	0.93	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	0.64	<input type="text"/>	The lower layer soil resistivity (p2) (ohm-m)
5	0.45	<input type="text"/>	<input type="text"/>
7.5	0.25	<input type="text"/>	<input type="text"/>
10	0.25	<input type="text"/>	<input type="text"/>
15	0.09	<input type="text"/>	ERROR
0	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>

รูปที่ 4.17 วินโดว์ลำดับที่สามสำหรับการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ

หลังจากนั้นคลิกเมาส์ที่ปุ่ม **START** โปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับโดยใช้วิธีทางพันธุกรรมให้ พร้อมกับบันทึกข้อมูลไว้ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าในวินโดว์ถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.18

Parameter Estimation of Horizontal two-layer Soil

Substation PHITSANULOK 3



Input		Optimization	
Probe Spacing (m)	Resistance (Ohm)	Apparent Resistance (Ohm)	
0.5	10.94	8.3827	The depth of the upper level (h1) (m)
1	3.75	4.0662	1.9414
2	1.59	1.7590	The upper layer soil resistivity (p1) (ohm-m)
3	0.93	0.9708	26.4671
4	0.64	0.6145	The lower layer soil resistivity (p2) (ohm-m)
5	0.45	0.4321	9.9616
7.5	0.25	0.2419	ERROR
10	0.25	0.1698	0.22482
15	0.09	0.1086	
0	0	0	

รูปที่ 4.18 โปรแกรมทำการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ

ขั้นตอนต่อไปให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม NEXT จะพบว่าหน้าจอคอมพิวเตอร์จะปรากฏวินโดว์การหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด ดังแสดงในรูปที่ 4.19 สังเกตว่าโปรแกรมได้นำข้อมูลที่ผู้ใช้โปรแกรมได้ป้อนไว้ในวินโดว์ก่อนหน้านี้มาแสดงไว้ให้แล้ว หลังจากนั้นให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม CALCULATE โปรแกรมจะทำการหาขนาดสายตัวนำที่ใช้สำหรับทำกราวด์กริดให้ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

Sizing of Groundgrid Conductor

Substation PHITSANULOK 3

Input Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Fault Duration Time (Tc)	0.6	s
Ambient Temperature (Ta)	33	°C

Properties of Material Conductor

Copper,commercial hard-drawn (97% conductivity)

Maximum Allowable Temperature (Tm)	1084	°C
Thermal Coefficient of Resistivity (Tr)	0.00381	1/°C
Ko	242	°C
The Resistivity of The Ground Conductor (pr)	1.78	uohm-cm
Thermal Capacity Factor (TCAP)	3.42	J/cm3. °C

Result

Conductor Size

Select Conductor Size

รูปที่ 4.19 วินโดว์ลำดับที่สี่สำหรับการหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด

Sizing of Groundgrid Conductor

Substation PHITSANULOK 3

Input Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Fault Duration Time (Tc)	0.6	s
Ambient Temperature (Ta)	33	°C

Properties of Material Conductor

Copper,commercial hard-drawn (97% conductivity)

Maximum Allowable Temperature (Tm)	1084	°C
Thermal Coefficient of Resistivity (Tr)	0.00381	1/°C
Ko	242	°C
The Resistivity of The Ground Conductor (pr)	1.78	uohm-cm
Thermal Capacity Factor (TCAP)	3.42	J/cm3. °C

Result

Conductor Size

86.6284

Select Conductor Size

95

รูปที่ 4.20 โปรแกรมทำการหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม REPORT เพื่อทำการสร้างรายงานการหาขนาดของสายตัวนำ
ดังแสดงในรูปที่ 4.21



Conductor Ampacity Calculation Report

Report #: 17 April 2017 18:36:22

=====<G R O U N D I N G (SYSTEM INFORMATION SUMMARY)>=====	
SUBSTATION	พินฉนวน 3
Mutual Resistance Calculations	NO
Main Ground Resistance and GPR Calculations	Representative Point Method
Type of Electrodes Considered	Main Electrode ONLY
Soil Type Selected	Two-Layer Horizontal
=====<EARTH PARAMETERS FOR HORIZONTALLY-LAYERED SOIL>=====	
TOP LAYER RESISTIVITY	26.4899 ohm-meters
BOTTOM LAYER RESISTIVITY	9.9667 ohm-meters
TOP LAYER HEIGHT	1.9353 meters
<u>Computation Results</u>	
Minimum conductor size	95 sq.mm
<u>Computation criteria</u>	
Ground fault current	31.5 kA
Maximum fault duration	0.6 second
Ambient temperature	33 °C
<u>Material Constant of Conductor</u>	
Name	Copper,commercial hard-drawn (97% conductivity)
Reference temperature for material constant	20 °C
Thermal coefficient of resistivity at reference temperature	0.00381/ °C
Fusing temperature of conductor	1084 °C
Resistivity of conductor at reference temperature	1.78 microohm-cm
Thermal capacity for unit value	3.42 J/cm ³ . °C
Working Directory	D:\Project\gaof\Conductor Ampacity Calculation Report

1

รูปที่ 4.21 รายงานการหาขนาดของสายตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำรายงานเสร็จ คลิกเมาส์ที่ปุ่ม NEXT จะพบว่าหน้าจอคอมพิวเตอร์จะปรากฏ วินโดว์การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.22

Calculation & Design Substation Grounding Grid

Substation: PHITSANULOK 3

Input Data

Current Fault Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Current Devision Factor	0.6	
Duration of shock time	1	s

Soil Data

Upper Soil Resistivity	26.4671	ohm-m
Lower Soil Resistivity	9.9616	ohm-m
Depth of upper Soil	1.9414	m

Surface material Data

Thickness of Crushed Rock	0.3	m
Crushed Rock Resistivity	3000	ohm-m

Conductor Data

Diameter of Grid Conductor	0.0126	m
Depth of Burial Grid Conductor	0.92	m
Length of grid in X-axis	93	m
Length of grid in Y-axis	66	m
Distance parallel conductor in X	11.625	m
Distance parallel conductor in Y	8.25	m

Rod Data

Diameter of rod Conductor	0.018	m
Length of A Ground Rod	3	m
Number of Ground Rod	32	PCS.

Results

Grid Resistance and GPR Results

Rg	GPR	Etouch-GPR

Touch Voltage Results

Etouch	Em	Etouch-Em

Step Voltage Results

Estep	Es	Estep-Es

CALCULATE REPORT <<< PREVIOUS CLOSE >>>

รูปที่ 4.22 วินโดว์ลำดับที่ห้าสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

หลังจากนั้นคลิกเมาส์ที่ปุ่ม CALCULATE โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความต้านทานกราวด์กริด, GPR, แรงดันไฟฟ้าเมฆ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ เพื่อดูว่าการออกแบบมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.23

Calculation & Design Substation Grounding Grid

Substation: PHITSANULOK 3

Input Data

Current Fault Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Current Devision Factor	0.6	
Duration of shock time	1	s

Soil Data

Upper Soil Resistivity	26.4671	ohm-m
Lower Soil Resistivity	9.9616	ohm-m
Depth of upper Soil	1.9414	m

Surface material Data

Thickness of Crushed Rock	0.3	m
Crushed Rock Resistivity	3000	ohm-m

Conductor Data

Diameter of Grid Conductor	0.0126	m
Depth of Burial Grid Conductor	0.92	m
Length of grid in X-axis	93	m
Length of grid in Y-axis	66	m
Distance parallel conductor in X	11.625	m
Distance parallel conductor in Y	8.25	m

Rod Data

Diameter of rod Conductor	0.018	m
Length of A Ground Rod	3	m
Number of Ground Rod	32	PCS.

Results

Grid Resistance and GPR Results

Rg	GPR	Etouch-GPR
0.067538	1276.4605	-706.2008

Touch Voltage Results

Etouch	Em	Etouch-Em
570.2597	378.6557	191.604

Step Voltage Results

Estep	Es	Estep-Es
1933.039	61.5049	1871.5341

CALCULATE REPORT <<< PREVIOUS CLOSE >>>

รูปที่ 4.23 โปรแกรมทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นคลิกเมาส์ที่ปุ่ม REPORT เพื่อทำรายงานการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25



Grounding Resistance Calculation Report

Report #2: 17 April 2017 15:03:03

===== < G R O U N D I N G (S Y S T E M I N F O R M A T I O N S U M M A R Y) > =====

SUBSTATION : ฟิสิกส์โลก 3

Mutual Resistance Calculations : NO

Main Ground Resistance and GPR Calculations : Representative Point Method

Type of Electrodes Considered : Main Electrode ONLY

Soil Type Selected : Two-Layer Horizontal

===== < E A R T H P A R A M E T E R S F O R H O R I Z O N T A L L Y - L A Y E R E D S O I L > =====

TOP LAYER RESISTIVITY : 26.4899 ohm-meters

BOTTOM LAYER RESISTIVITY : 9.9667 ohm-meters

TOP LAYER HEIGHT : 1.9353 meters

Ground grid characteristic

Depth of ground grid conductor : 0.92 meters

Total area enclosed by ground grid : 6,138 sq.m

Rod characteristic

Length of ground rod : 3 meters

Diameter of ground rod : 0.018 meters

Number of ground rod : 32 Pcs.

Grounding resistance computation

Total Buried Length of Main Electrode : 1,527 meters

Grounding System Resistance : 0.0678 ohm

Ground Potential Rise : 1,280.8 volts

Working Directory : D:\Project\gaot\ Grounding Resistance Calculation Report

รูปที่ 4.24 รายงานการหาค่าความต้านทานกราวด์กริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mesh and Step Voltage Calculation Report

Report #3: 17 April 2017 17:21:43

===== <G R O U N D I N G (SYSTEM INFORMATION SUMMARY)> =====	
SUBSTATION	: พิษณุโลก 3
Mutual Resistance Calculations	: NO
Main Ground Resistance and GPR Calculations	: Representative Point Method
Type of Electrodes Considered	: Main Electrode ONLY
Soil Type Selected	: Two-Layer Horizontal
System Frequency	(Hertz): 50.000
Body Resistance Calculation	: IEEE Std.80-2000
Fibrillation Current Calculation	: IEEE Std.80-2000 (50kg)
Surface Layer Thickness	: 0.3 meters
Surface Layer Resistivity	: 3000 ohm-meters
Lx : Maximum length of grid conductor in x-axis	: 93 meters
Ly : Maximum length of grid conductor in y-axis	: 66 meters
Dx : Distance between parallel conductor in x-axis	: 11.625 meters
Dy : Distance between parallel conductor in y-axis	: 8.25 meters
===== <EARTH PARAMETERS FOR HORIZONTALLY-LAYERED SOIL> =====	
TOP LAYER RESISTIVITY	: 26.4899 ohm-meters
BOTTOM LAYER RESISTIVITY	: 9.9667 ohm-meters
TOP LAYER HEIGHT	: 1.9353 meters
Mesh and Step Voltage Computations	
Tolerable touch voltage	: 570.2606 volts
Tolerable step voltage	: 1,933.055 volts
Mesh voltage (Em)	: 379.5767 volts
Step voltage (Es)	: 61.8699 volts
Working Directory	: D:\Project\gaot\ Mesh and Step Voltage Calculation Report

1

รูปที่ 4.25 รายงานการหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในวิทยานิพนธ์นี้ จะขอ นำเสนอสถานีไฟฟ้าตัวอย่าง 2 สถานี ได้แก่ สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 และสถานีไฟฟ้านางรอง สาเหตุที่ นำสองสถานีไฟฟ้ามาออกแบบเนื่องจาก สถานีไฟฟ้าทั้งสองมีค่าองค์ประกอบของดินที่มีรูปแบบ แตกต่างกัน ทำให้สามารถตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมได้ว่า สามารถออกแบบระบบต่อลงดิน ของสถานีไฟฟ้าได้ ไม่ว่าจะองค์ประกอบของดินจะเป็นรูปแบบไหนก็ตาม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ นำผลลัพธ์ ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS

5.1 สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

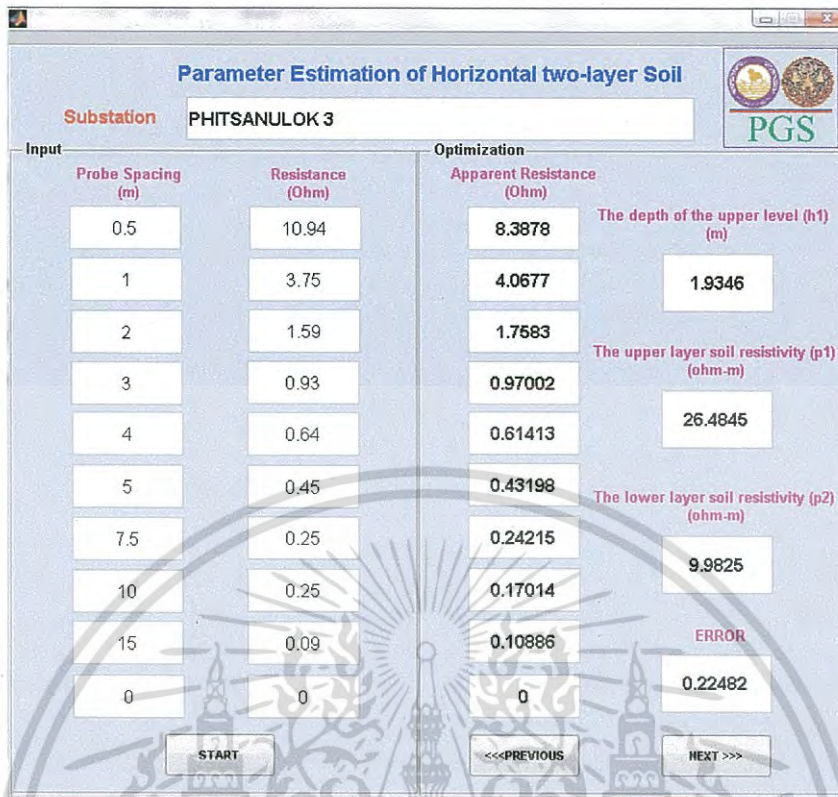
5.1.1 การหาค่าองค์ประกอบของดิน

ทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินจากภาคสนามด้วยวิธีของเวนเนอร์ ข้อมูลความ ต้านทานจำเพาะที่ระยะอิเล็กโตรดต่างๆของดินในสถานีพิษณุโลก 3 แสดงดังตารางที่ 5.1

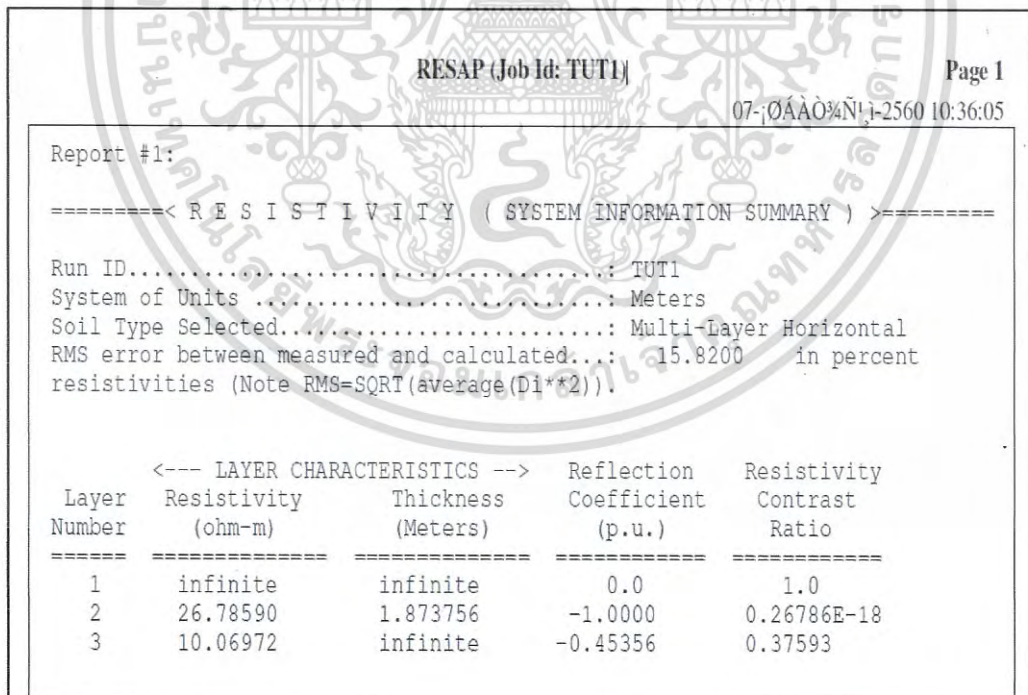
ตารางที่ 5.1 ความต้านทานจำเพาะปรากฏ (apparent resistivity) ที่วัดได้จากภาคสนามสถานี พิษณุโลก 3

ระยะห่างของ อิเล็กโตรด(m)	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)									
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10	15	
1	9	3.45	1.64	0.97	0.71	0.496	0.31	0.31	0.107	
2	8.97	4.16	1.65	1.04	0.76	0.552	0.278	0.278	0.106	
3	11.9	3.46	1.55	0.78	0.556	0.38	0.19	0.19	0.077	
4	13.87	3.94	1.50	0.93	0.55	0.39	0.212	0.212	0.077	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$R(\Omega)$ (average)	$\Sigma R/N$	10.94	3.75	1.59	0.93	0.64	0.45	0.25	0.25	0.09
$\rho(\Omega)$ (average)	$2\pi aR$	34.35	23.58	19.92	17.53	16.19	14.28	11.66	15.55	8.65

หลังจากนั้นนำค่าความต้านทานของดินที่ได้จากการวัดภาคสนามมาป้อนใส่โปรแกรม MATLAB และโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS เพื่อหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้น ผลที่ได้ แสดงดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 โดยใช้ MATLAB



รูปที่ 5.2 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 โดยใช้โมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 5.2 จะแสดงค่าองค์ประกอบของโครงสร้างของดินสองชั้นในแนวระดับของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 โดยการใช้โปรแกรม MATLAB กับโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS และแสดงความคลาดเคลื่อนของค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

ตารางที่ 5.2 ค่าองค์ประกอบต่างๆของชั้นดินสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

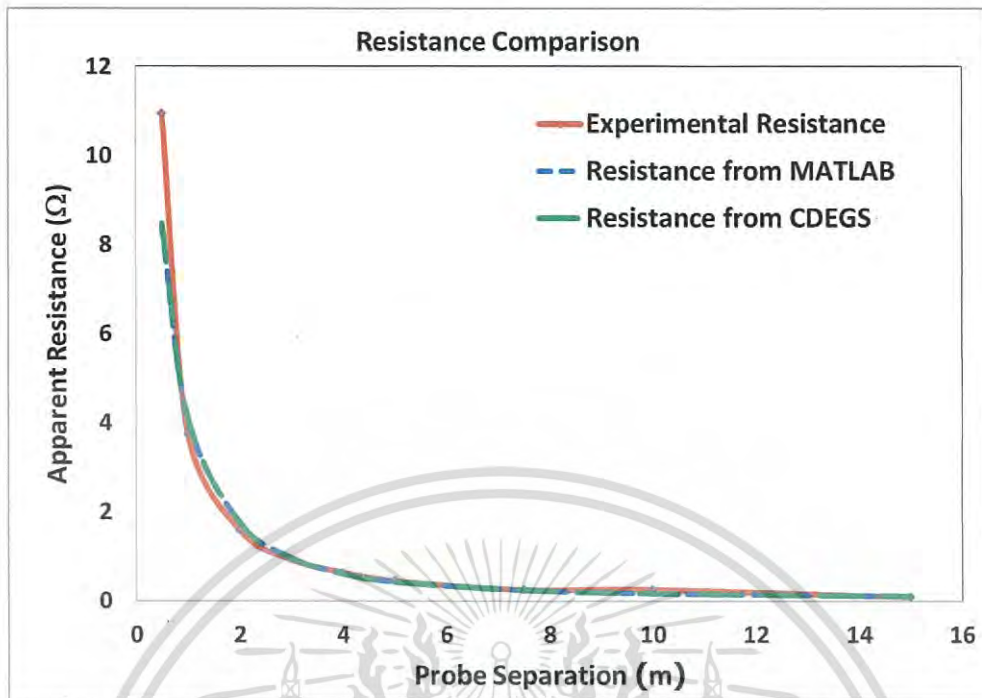
	CDEGS	MATLAB	ERROR(%)
ρ_1 (Ω -m)	26.7859	26.4845	1.12
ρ_2 (Ω -m)	10.0697	9.9825	0.86
h_1 (m)	1.8737	1.9346	3.25

ในตารางที่ 5.3 จะแสดงการเปรียบเทียบความต้านทานของดินที่คำนวณหาจากค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโปรแกรม MATLAB และโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS กับความต้านทานของดินที่วัดได้จากภาคสนาม และนำค่าความต้านทานของดินทั้ง 2 วิธีมาสร้างกราฟเทียบกับค่าความต้านทานดินที่ได้จากการวัดภาคสนามดังรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

Probe Spacing (m)	Experimental (Ω)	CDEGS (Ω)	MATLAB (Ω)
0.5	10.94	8.4780	8.3878
1	3.75	4.1000	4.0677
2	1.59	1.7560	1.7583
3	0.93	0.9626	0.9700
4	0.64	0.6084	0.6141
5	0.45	0.4287	0.4320
7.5	0.25	0.2420	0.2421
10	0.25	0.1708	0.1701
15	0.09	0.1096	0.1089
ERROR		0.2250	0.2248

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

สรุปผลการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 พบว่าค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % ดังแสดงในตารางที่ 5.2 นอกจากนี้เมื่อนำค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองไปคำนวณหาความต้านทานของดินพบว่าค่าความต้านทานดินที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดภาคสนามมากกว่าค่าความต้านทานดินที่ได้จากโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3

5.1.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบดังนี้

- พื้นที่ของสถานีไฟฟ้า	กว้าง 66 เมตร ยาว 93 เมตร
- ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำกราวด์กริด	Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)
- ความลึกของกราวด์กริด	0.92 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำแกน x	11.625 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำแกน y	8.25 เมตร
- ขนาดของกระแสลัดวงจร	31.5 kA
- Current Division Factor	0.6
- ระยะเวลาการเกิดกระแสลัดวงจร	0.6 วินาที
- Duration of shock time	1 วินาที
- อุณหภูมิแวดล้อม	33 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน	26.48	Ω -m	(จากหัวข้อที่แล้ว)
- ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง	9.98	Ω -m	(จากหัวข้อที่แล้ว)
- ความลึกของดินชั้นบน	1.93	เมตร	(จากหัวข้อที่แล้ว)
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกราวด์รอต	0.018	เมตร	
- ความยาวกราวด์รอต	3	เมตร	
- จำนวนกราวด์รอต	32	เมตร	
- ความหนาของหินโรยผิวดิน	0.3	เมตร	
- ความต้านทานจำเพาะของหิน	3000	Ω -m	

เมื่อเราทราบพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ให้นำข้อมูลทั้งหมดป้อนให้กับโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 5.4

Design Grounding Grid of Substation

Substation: PHITSANULOK 3

Input Data

Ground grid Data

- Total area enclosed by ground grid: 93 x 66 m²
- Distance between Conductor: 11.625 m x 8.25 m
- Choice of material for conductors: Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)
- Depth of Burial Grid conductor: 0.92 m

Current Fault Data

- Ground Fault current: 31.5 kA
- Current Devision Factor: 0.6
- Fault Duration Time: 0.6 s
- Duration of shock time: 1 s
- Ambient Temperature: 33 °C

Soil Data

- Apparent soil resistance (Wenner method): import

Rod Data

- Diameter of Rod Conductor: 0.018 m
- Length of A Ground Rod: 3 m
- Number of Ground Rod: 32 PCS.

Surface material Data

- Thickness of Crushed Rock: 0.3 m
- Crushed Rock Resistivity: 3000 ohm-m.

SAVE NEXT >>>

รูปที่ 5.4 วินโดว์แสดงการป้อนข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้า พิษณุโลก 3

หลังจากป้อนข้อมูลเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปโปรแกรมก็จะทำการหาขนาดตัวนำที่ใช้กราวด์กริด ดังแสดงในรูปที่ 5.5

Sizing of Groundgrid Conductor

Substation: PHITSANULOK 3

PGS

Input Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Fault Duration Time (T _f)	0.6	s
Ambient Temperature (T _a)	33	°C

Properties of Material Conductor

Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)

Maximum Allowable Temperature (T _m)	1084	°C
Thermal Coefficient of Resistivity (T _r)	0.00381	1/°C
K ₀	242	°C
The Resistivity of The Ground Conductor (ρ _r)	1.78	μohm-cm
Thermal Capacity Factor (TCAP)	3.42	J/cm ³ . °C

Result

Conductor Size: 86.6284

Select Conductor Size: 95

CALCULATE REPORT

<<< PREVIOUS NEXT >>>

รูปที่ 5.5 วินโดว์แสดงการหาขนาดของตัวนำกราวด์กริดสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3

เมื่อได้ขนาดของตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริดแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 โดยโปรแกรม MATLAB จะหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ดังแสดงในรูปที่ 5.6

Calculation & Design Substation Grounding Grid

Substation: PHITSANULOK 3

PGS

Input Data

Current Fault Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Current Devision Factor	0.6	
Duration of shock time	1	s

Soil Data

Upper Soil Resistivity	26.4845	ohm-m
Lower Soil Resistivity	9.98253	ohm-m
Depth of upper Soil	1.93458	m

Surface material Data

Thickness of Crushed Rock	0.3	m
Crushed Rock Resistivity	3000	ohm-m.

Conductor Data

Diameter of Grid Conductor	0.014	m
Depth of Burial Grid Conductor	0.92	m
Length of grid in X-axis	93	m
Length of grid in Y-axis	66	m
Distance parallel conductor in X	11.825	m
Distance parallel conductor in Y	8.25	m

Rod Data

Diameter of rod Conductor	0.018	m.
Length of A Ground Rod	3	m
Number of Ground Rod	32	PCS.

Results

Grid Resistance and GPR Results

R _g	GPR	E _{touch} -GPR
0.057624	1278.099	-707.8391

Touch Voltage Results

E _{touch}	E _m	E _{touch} -E _m
570.26	371.4856	198.7744

Step Voltage Results

E _{step}	E _s	E _{step} -E _s
1933.0399	61.6105	1871.4294

CALCULATE REPORT

<<< PREVIOUS CLOSE >>>

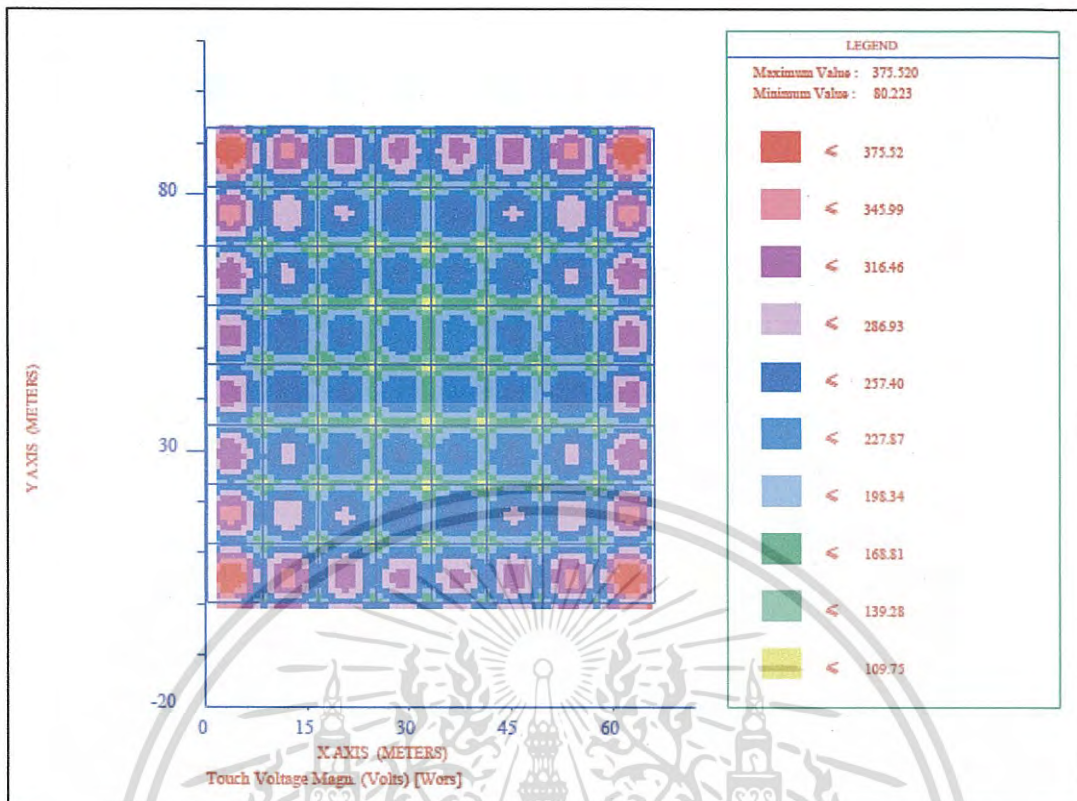
รูปที่ 5.6 วินโดว์แสดงการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 ของโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

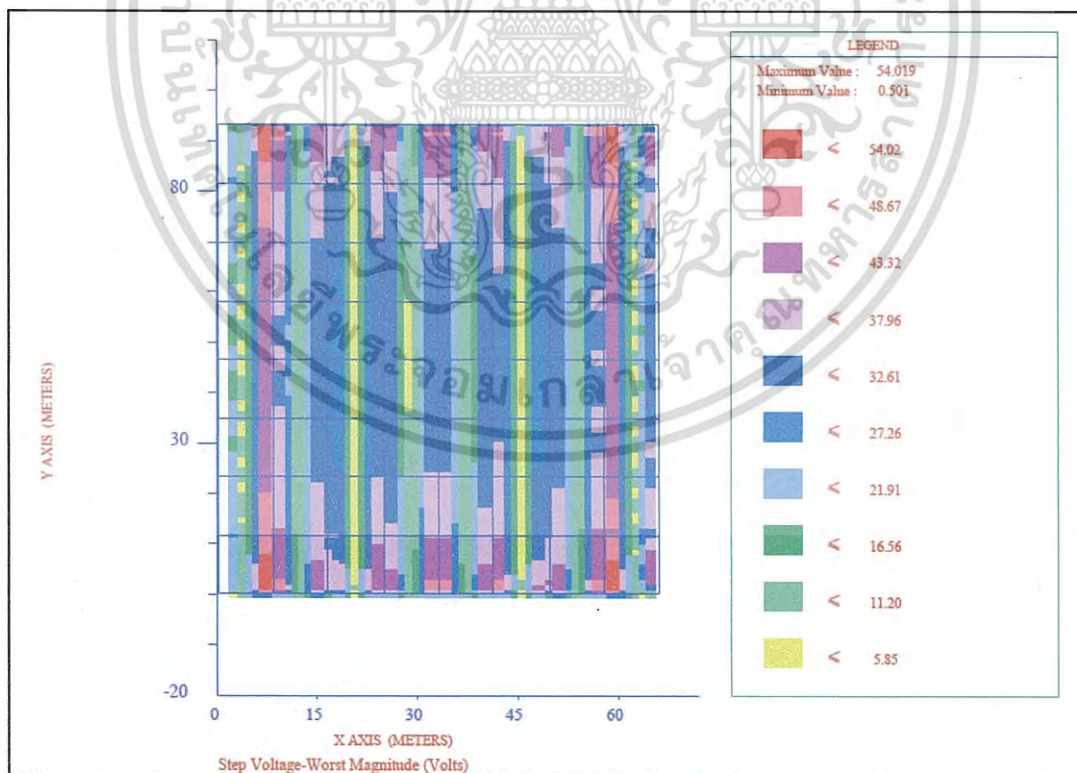
ในขณะที่เดียวกันก็นำพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเหล่านี้ไปออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 โดยใช้โมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ซึ่งโปรแกรมก็จะทำการหาค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ให้ดังแสดงในรูปที่ 5.7, รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ตามลำดับ

EARTH PARAMETERS FOR HORIZONTALLY-LAYERED SOIL		
TOP LAYER RESISTIVITY	=	26.900 ohm-meters
BOTTOM LAYER RESISTIVITY	=	10.220 ohm-meters
REFLECTION COEFFICIENT	=	-0.449353 per unit
TOP LAYER HEIGHT	=	1.8400 METERS
I		
CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE		
Original Electrical Current Flowing In Electrode...	31500.	amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDISI/specified)...	0.60000	
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode...	18900.	amperes
Number of Conductors in Electrode.....	50	
Resistance of Electrode System.....	0.69236E-01	ohms
SUBDIVISION		
Grand Total of Conductors After Subdivision..	280	
Total Current Flowing In Main Electrode.....	18900.	amperes
Average Current Density of Conductor Segments:	12.377	amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode.....	1527.0	meters
EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS		
Main Electrode Potential Rise (GPR).....	1308.6	volts
(based on two representative points)		
End of Report #1		

รูปที่ 5.7 ค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g) และ Grid Potential Rise (GPR) ของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 จากโปรแกรม CDEGS



รูปที่ 5.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซ(E_m) ของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 จากโปรแกรม CDEGS



รูปที่ 5.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก3 จากโปรแกรม CDEGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 5.4 จะแสดงการเปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมช(E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB กับโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
R_g [Ω]	0.06923	0.06762	2.32
GPR [V]	1308.6	1278.099	2.32
E_m [V]	375.52	371.4856	1.07
E_s [V]	54.02	61.6125	14.05

จากตารางที่ 5.4 จะพบว่าค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมช(E_m) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก โมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% แต่ในขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB ยังมีความคลาดเคลื่อนจากโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 14%

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 ที่ทำการออกแบบโดยพิจารณาองค์ประกอบของดินเป็นแบบ Uniform Soil ด้วยโปรแกรม CDEGS มาเปรียบเทียบกับการออกแบบโดยพิจารณาองค์ประกอบของดินเป็นแบบดินสองชั้นด้วยโปรแกรม MATLAB ผลที่ได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 ระหว่าง Uniform Soil กับ Nonuniform Soil

PARAMETERS	Excel Uniform Soil	MATLAB Nonuniform Soil	DIFFERENT (%)
R_g [Ω]	0.1169	0.06762	42.15
GPR [V]	2210.24	1278.099	42.15
E_m [V]	594.543	371.4856	37.52
E_s [V]	218.405	61.6125	254.48

จากตารางที่ 5.5 จะพบว่าจากการออกแบบโดยพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil กับการออกแบบโดยพิจารณาดินเป็นแบบดินสองชั้นของสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 ค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ได้แก่ค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g) และ Grid Potential Rise (GPR) มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 42% , ค่า

แรงดันไฟฟ้าเมฆ(E_m) มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 38% และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 254%

5.2 สถานีไฟฟ้านางรอง

5.2.1 การหาค่าองค์ประกอบของดิน

ทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินจากภาคสนามด้วยวิธีของเวนเนอร์ ข้อมูลความต้านทานจำเพาะที่ระยะอิเล็กโทรดต่างๆของดินในสถานีนางรอง แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ความต้านทานจำเพาะปรากฏ (apparent resistivity) ที่วัดได้จากภาคสนามสถานีนางรอง

ระยะห่างของอิเล็กโทรด(m)	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)									
	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	7.0	10	14	20	
1	6.02	2.00	0.95	1.07	0.87	0.65	0.41	0.47	0.37	
2	5.27	2.20	1.36	10.90	0.88	0.86	0.70	0.35	0.20	
3	7.05	5.79	3.42	2.61	1.84	0.97	0.36	0.22	0.20	
4	8.59	6.19	2.47	1.46	0.98	0.71	0.31	0.21	0.14	
5	5.88	3.27	1.95	1.38	0.98	0.93	0.64	0.43	0.19	
6	5.30	2.41	1.56	1.35	1.05	0.87	0.54	0.31	0.32	
7	4.77	2.32	1.14	0.99	0.76	0.69	0.60	0.48	0.29	
8	7.43	2.41	1.51	1.18	0.78	0.60	0.31	0.22	0.16	
$R(\Omega)$	ΣR	50.31	26.59	14.36	20.94	8.140	6.280	3.870	2.690	1.870
		0	0	0	0					
$R(\Omega)$ (average)	$\Sigma R/N$	6.289	3.324	1.795	2.618	1.018	0.785	0.484	0.336	0.234

หลังจากนั้นนำค่าความต้านทานของดินที่ได้จากการวัดภาคสนามมาป้อนใส่โปรแกรม MATLAB และโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS เพื่อหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ

Parameter Estimation of Horizontal two-layer Soil

Substation **NANGRONG**

Input

Probe Spacing (m)	Resistance (Ohm)
0.5	6.289
1	3.324
2	1.795
3	2.618
5	1.018
7	0.785
10	0.484
14	0.336
20	0.234
0	0

START

Optimization

Apparent Resistance (Ohm)	Parameter
6.1162	The depth of the upper level (h1) (m)
3.4593	0.7442
2.0676	The upper layer soil resistivity (p1) (ohm-m)
1.497	18.3969
0.96008	The lower layer soil resistivity (p2) (ohm-m)
0.70331	31.9844
0.50017	ERROR
0.36024	0.23604
0.25336	
0	

รูปที่ 5.10 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้า nangrong โดยใช้ MATLAB

RESAP (Job Id: TUT1) Page 1

07-04-2560 10:43:01

Report #1:

===== < R E S I S T I V I T Y (SYSTEM INFORMATION SUMMARY) > =====

Run ID.....: TUT1
 System of Units: Meters
 Soil Type Selected.....: Multi-Layer Horizontal
 RMS error between measured and calculated...: 16.2076 in percent
 resistivities (Note RMS=SQRT(average(Di**2))).

Layer Number	--- LAYER CHARACTERISTICS ---		Reflection Coefficient (p.u.)	Resistivity Contrast Ratio
	Resistivity (ohm-m)	Thickness (Meters)		
1	infinite	infinite	0.0	1.0
2	18.75040	0.8034624	-1.0000	0.18750E-18
3	32.09683	infinite	0.26248	1.7118

รูปที่ 5.11 ผลการหาค่าองค์ประกอบของดิน สถานีไฟฟ้า nangrong โดยใช้โมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 5.7 จะแสดงค่าองค์ประกอบของโครงสร้างของดินสองชั้นในแนวระดับของสถานีไฟฟ้านางรอง โดยการใช้โปรแกรม MATLAB กับโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS และแสดงความคลาดเคลื่อนของค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสถานีไฟฟ้านางรอง

ตารางที่ 5.7 ค่าองค์ประกอบต่างๆของชั้นดินสถานีไฟฟ้านางรอง

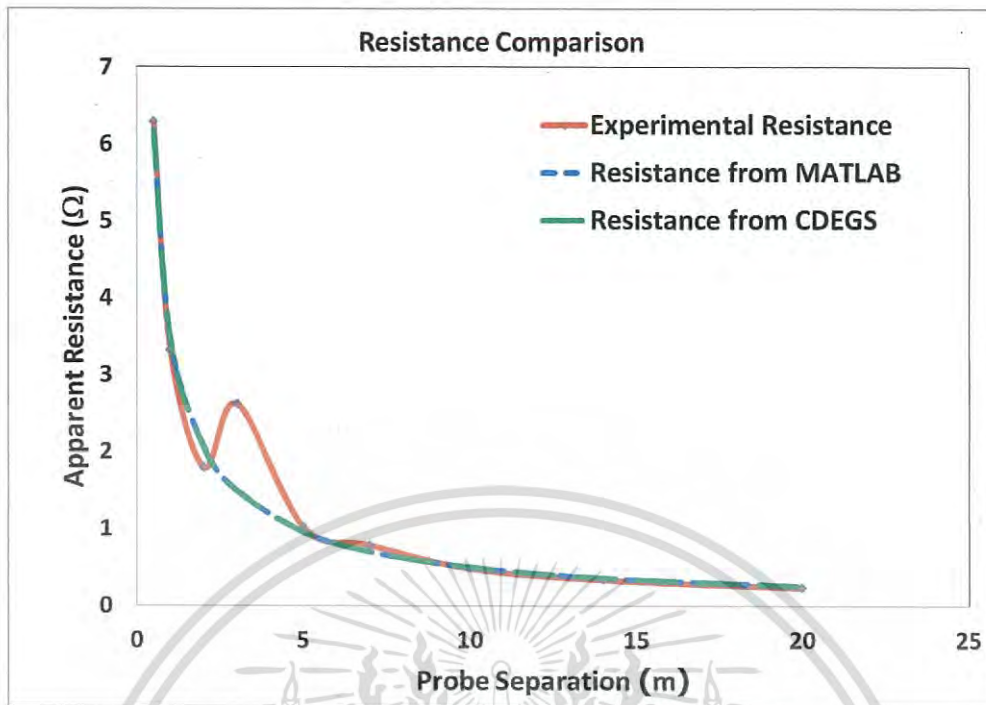
	CDEGS	MATLAB	ERROR(%)
ρ_1 (Ω -m)	18.7504	18.3869	1.94
ρ_2 (Ω -m)	32.0968	31.9844	0.35
h_1 (m)	0.8034	0.7442	7.37

ในตารางที่ 5.8 จะแสดงการเปรียบเทียบความต้านทานของดินที่คำนวณหาจากค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโปรแกรม MATLAB และโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS กับความต้านทานของดินที่วัดได้จากภาคสนาม และนำค่าความต้านทานของดินทั้ง 2 วิธีมาสร้างกราฟเทียบกับค่าความต้านทานดินที่ได้จากการวัดภาคสนามดังรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้านางรอง

Probe Spacing (m)	Experimental (Ω)	CDEGS (Ω)	MATLAB (Ω)
0.5	6.2890	6.1855	6.1094
1	3.3240	3.4495	3.4579
2	1.7950	2.0523	2.0676
3	2.6180	1.4895	1.4971
4	1.0180	0.9588	0.9602
5	0.7850	0.7037	0.7034
7.0	0.4840	0.5011	0.5002
10	0.3360	0.3612	0.3603
14	0.2340	0.2541	0.2534
20	6.2890	6.1855	6.1094
ERROR		0.2364	0.2360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานของดิน สถานีไฟฟ้านางรอง

สรุปผลการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับของสถานีไฟฟ้านางรอง พบว่า ค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 8 % ดังแสดงในตารางที่ 5.7 นอกจากนี้เมื่อนำค่าองค์ประกอบของดินที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองไปคำนวณหาความต้านทานของดิน พบว่าค่าความต้านทานดินที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดภาคสนามมากกว่าเล็กน้อยค่าความต้านทานดินที่ได้จากโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และรูปที่ 5.12

5.2.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง

กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบดังนี้

- พื้นที่ของสถานีไฟฟ้า	กว้าง 29 เมตร ยาว 42 เมตร
- ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำกราวด์กริด	Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)
- ความลึกของกราวด์กริด	0.5 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำแกน x	3.625 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำแกน y	5.25 เมตร
- ขนาดของกระแสลัดวงจร	31.5 kA
- Current Division Factor	0.6
- ระยะเวลาการเกิดกระแสลัดวงจร	0.6 วินาที
- Duration of shock time	0.6 วินาที
- อุณหภูมิแวดล้อม	33 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน	18.39	Ω -m	(จากหัวข้อที่แล้ว)
- ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง	31.98	Ω -m	(จากหัวข้อที่แล้ว)
- ความลึกของดินชั้นบน	0.74	เมตร	(จากหัวข้อที่แล้ว)
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกราวด์รอต	0.018	เมตร	
- ความยาวกราวด์รอต	3	เมตร	
- จำนวนกราวด์รอต	12	เมตร	
- ความหนาของหินโรยผิวดิน	0.1	เมตร	
- ความต้านทานจำเพาะของหิน	3000	Ω -m	

เมื่อเราทราบพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ให้นำข้อมูลทั้งหมดป้อนให้กับโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 5.13

Design Grounding Grid of Substation

Substation: NANGRONG

Input Data

Ground grid Data

1. Total area enclosed by ground grid: 42 x 29 m²

2. Distance between Conductor: 5.25 m, 3.625 m

3. Choice of material for conductors: Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)

4. Depth of Burial Grid conductor: 0.5 m

Current Fault Data

1. Ground Fault current: 31.5 kA

2. Current Devision Factor: 0.6

3. Fault Duration Time: 0.6 s

4. Duration of shock time: 0.6 s

5. Ambient Temperature: 33 °C

Soil Data

1. Apparent soil resistance (Wenner method): Import

Rod Data

1. Diameter of Rod Conductor: 0.018 m

2. Length of A Ground Rod: 3 m

3. Number of Ground Rod: 12 PCS.

Surface material Data

1. Thickness of Crushed Rock: 0.1 m

2. Crushed Rock Resistivity: 3000 ohm-m.

SAVE | NEXT >>>

รูปที่ 5.13 วินโดว์แสดงการป้อนข้อมูลที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้านางรอง

หลังจากป้อนข้อมูลเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปโปรแกรมก็จะทำการหาขนาดตัวนำที่ใช้กราวด์กริด ดังแสดงในรูปที่ 5.14

Sizing of Groundgrid Conductor

Substation: NANGRONG

Input Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Fault Duration Time (Tc)	0.6	s
Ambient Temperature (Ta)	33	°C

Properties of Material Conductor

Copper, commercial hard-drawn (97% conductivity)

Maximum Allowable Temperature (Tm)	1084	°C
Thermal Coefficient of Resistivity (Tr)	0.00381	1/°C
Ko	242	°C
The Resistivity of The Ground Conductor (pr)	1.78	uohm-cm
Thermal Capacity Factor (TCAP)	3.42	J/cm3. °C

Result

Conductor Size: 86.6284

Select Conductor Size: 95

CALCULATE REPORT

<<< PREVIOUS NEXT >>>

รูปที่ 5.14 วินโดว์แสดงการหาขนาดของตัวนำกราวด์กริดสถานีไฟฟ้านางรอง

เมื่อได้ขนาดของตัวนำที่ใช้ทำกราวด์กริดแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็ออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง โดยโปรแกรม MATLAB จะหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ดังแสดงในรูปที่ 5.15

Calculation & Design Substation Grounding Grid

Substation: NANGRONG

Input Data

Current Fault Data

R.M.S. Ground Fault Current	31.5	kA
Current Devision Factor	0.6	
Duration of shock time	0.6	s

Soil Data

Upper Soil Resistivity	18.3869	ohm-m
Lower Soil Resistivity	31.9844	ohm-m
Depth of upper Soil	0.744201	m

Surface material Data

Thickness of Crushed Rock	0.1	m
Crushed Rock Resistivity	3000	ohm-m

Conductor Data

Diameter of Grid Conductor	0.0126	m
Depth of Burial Grid Conductor	0.5	m
Length of grid in X-axis	42	m
Length of grid in Y-axis	29	m
Distance parallel conductor in X	5.25	m
Distance parallel conductor in Y	3.625	m

Rod Data

Diameter of rod Conductor	0.018	m
Length of A Ground Rod	3	m
Number of Ground Rod	12	PCS

Results

Grid Resistance and GPR Results

R_g	GPR	Etouch.GPR
0.36622	6921.6469	-6305.7831

Touch Voltage Results

Etouch	Em	Etouch-Em
615.8638	800.6536	-184.7897

Step Voltage Results

Estep	Es	Estep-Es
2014.1892	477.2419	1536.9473

CALCULATE REPORT

<<< PREVIOUS CLOSE >>>

รูปที่ 5.15 วินโดว์แสดงการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรองของโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

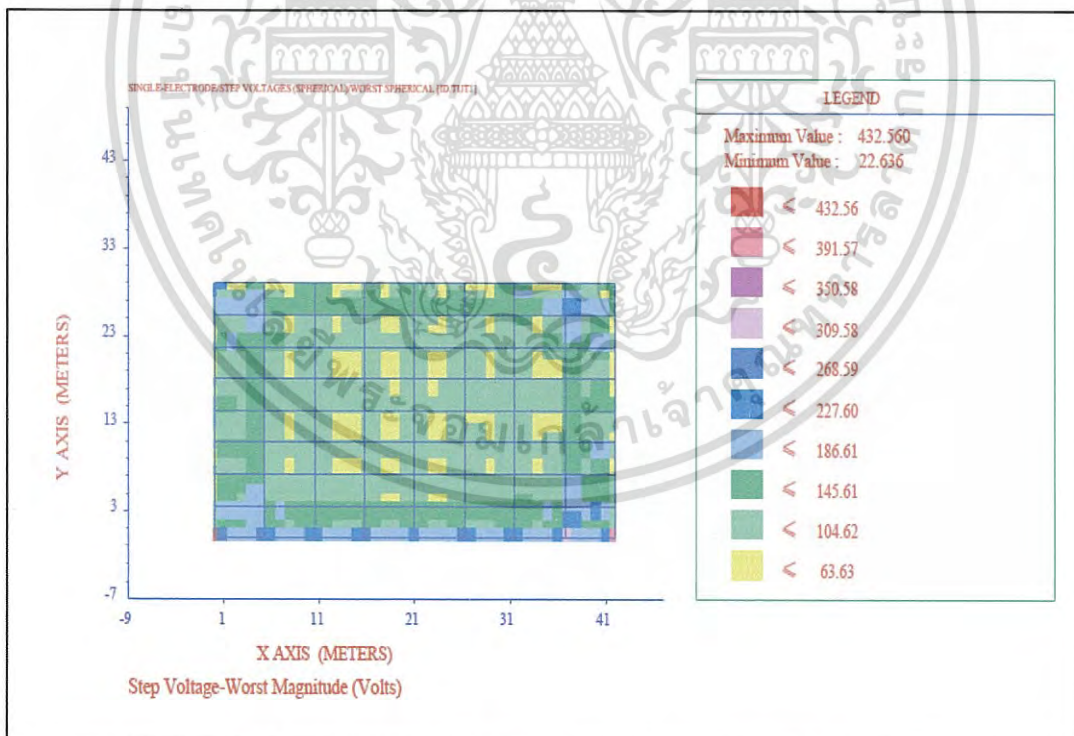
ในขณะที่เดียวกันก็นำพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเหล่านี้ไปออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าแรงรอง โดยใช้โมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ซึ่งโปรแกรมก็จะทำการหาค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมซ(E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ให้ดังแสดงในรูปที่ 5.16, รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 ตามลำดับ

EARTH PARAMETERS FOR HORIZONTALLY-LAYERED SOIL		
TOP LAYER RESISTIVITY	=	18.750 ohm-meters
BOTTOM LAYER RESISTIVITY	=	32.097 ohm-meters
REFLECTION COEFFICIENT	=	0.262490 per unit
TOP LAYER HEIGHT	=	0.80340 METERS
1		
CONFIGURATION OF MAIN ELECTRODE		
Original Electrical Current Flowing In Electrode...	31500.	amperes
Current Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)...	0.60000	
Adjusted Electrical Current Flowing In Electrode...	18900.	amperes
Number of Conductors in Electrode.....	30	
Resistance of Electrode System.....	0.36519	ohms
SUBDIVISION		
Grand Total of Conductors After Subdivision..:	249	
Total Current Flowing In Main Electrode.....:	18900.	amperes
Average Current Density of Conductor Segments:	28.000	amperes /meter
Total Buried Length of Main Electrode.....:	675.00	meters
EARTH POTENTIAL COMPUTATIONS		
Main Electrode Potential Rise (GPR).....:	6902.2	volts
(based on two representative points)		
End of Report #1		

รูปที่ 5.16 ค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g) และ Grid Potential Rise (GPR) ของสถานีไฟฟ้าแรงรอง จากโปรแกรม CDEGS



รูปที่ 5.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมช(E_m) ของสถานีไฟฟ้านางรอง จากโปรแกรม CDEGS



รูปที่ 5.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ของสถานีไฟฟ้านางรอง จากโปรแกรม CDEGS

ในตารางที่ 5.9 จะแสดงการเปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าเมซ(E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB กับโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
R_g [Ω]	0.36519	0.3662	0.27
GPR [V]	6902.2	6921.6469	0.27
E_m [V]	825.44	800.6535	3.00
E_s [V]	432.56	477.2419	10.32

จากตารางที่ 5.9 จะพบว่าค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมซ(E_m) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก โมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% แต่ในขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB ยังมีความคลาดเคลื่อนจากโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10%

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง ที่ทำการออกแบบโดยพิจารณาองค์ประกอบของดินเป็นแบบ Uniform Soil ด้วยโปรแกรม CDEGS มาเปรียบเทียบกับกรออกแบบโดยพิจารณาองค์ประกอบของดินเป็นแบบดินสองชั้นด้วยโปรแกรม MATLAB ผลที่ได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ตารางเปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง ระหว่าง Uniform Soil กับ Nonuniform Soil

PARAMETERS	Excel Uniform Soil	MATLAB Nonuniform Soil	DIFFERENT (%)
R_g [Ω]	0.4242	0.3662	13.68
GPR [V]	8018.81	6921.6469	13.68
E_m [V]	1085.136	800.6535	26.22
E_s [V]	947.289	477.2419	49.62

จากตารางที่ 5.10 จะพบว่าจากการออกแบบโดยพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil กับการออกแบบโดยพิจารณาดินเป็นแบบดินสองชั้นของสถานีไฟฟ้านางรอง ค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ได้แก่ค่าความต้านทานกราวด์กริด (R_g) และ Grid Potential Rise (GPR) มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 14 % , ค่าแรงดันไฟฟ้าเมซ (E_m) มีค่าความคลาดเคลื่อนมากประมาณ 26% และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB วัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ทดแทนโปรแกรมสำเร็จ CDEGS ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นลิขสิทธิ์ของ Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) ประเทศแคนาดา โดยทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ซื้อลิขสิทธิ์ของโปรแกรมมาเพื่อใช้งาน 2 user ซึ่งปัจจุบันอยู่ที่กองวิจัยกับแผนกออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำนักงานใหญ่ แต่การออกแบบสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะแยกออกเป็น 2 กรณี คือ การออกแบบสถานีไฟฟ้าถาวร และการออกแบบสถานีไฟฟ้าชั่วคราว สำหรับการออกแบบสถานีไฟฟ้าถาวร แผนกออกแบบสถานีไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำนักงานใหญ่ จะเป็นผู้รับผิดชอบในการออกแบบ ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CDEGS ช่วยในการออกแบบได้ ส่วนการออกแบบสถานีไฟฟ้าชั่วคราว แผนกวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิศวกรรมและวางแผน การไฟฟ้าเขต จะเป็นผู้รับผิดชอบในการออกแบบ ซึ่งทั่วประเทศมีการไฟฟ้าเขตอยู่ 12 ที่ โดยแต่ละที่จะทำการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม excel ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขียนขึ้น ช่วยในการออกแบบ โดยการออกแบบจะพิจารณาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform soil)

โปรแกรม CDEGS ประกอบด้วย 8 โมดูลย่อย แต่สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะใช้โปรแกรม CDEGS เพียง 2 โมดูล คือ โมดูล RESAP ใช้สำหรับหาพารามิเตอร์โครงสร้างดินที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในภาคสนาม และโมดูล MALT ใช้สำหรับวิเคราะห์ระบบต่อลงดิน เช่น คำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินกระแสที่ไหลออกจากสายดิน แรงดันไฟฟ้าบนผิวดินแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

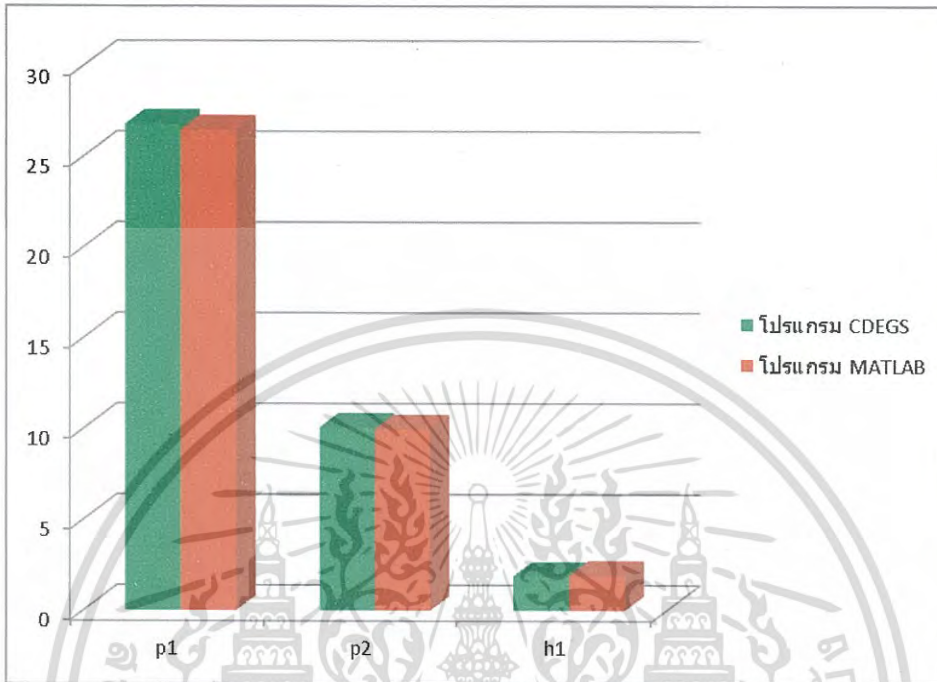
โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ตัวโปรแกรมได้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆคือ 1.การประมาณค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นในแนวระดับ ได้แก่ ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1), ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) และความหนาของดินชั้นบน (h_1) และ 2.การคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า เช่น ค่าความต้านทานกราวด์กริด(R_g), Grid Potential Rise (GPR), แรงดันไฟฟ้าเมฆ(E_m) และ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว(E_s)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB กับโปรแกรม CDEGS ซึ่งจะนำสถานีไฟฟ้าตัวอย่างมาทำออกแบบด้วยโปรแกรม 2 สถานี ได้แก่ สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 และสถานีไฟฟ้านางรอง สาเหตุที่พิจารณาเลือกสองสถานีนี้มาออกแบบ เพราะ สถานีไฟฟ้าทั้งสองมีลักษณะขององค์ประกอบของดินที่แตกต่างกัน คือ สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3 มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมากกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\rho_1 > \rho_2$) ในขณะที่สถานีไฟฟ้านางรอง มีความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนน้อยกว่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ($\rho_1 < \rho_2$) โดยผลลัพธ์ของการออกแบบเป็นดังนี้

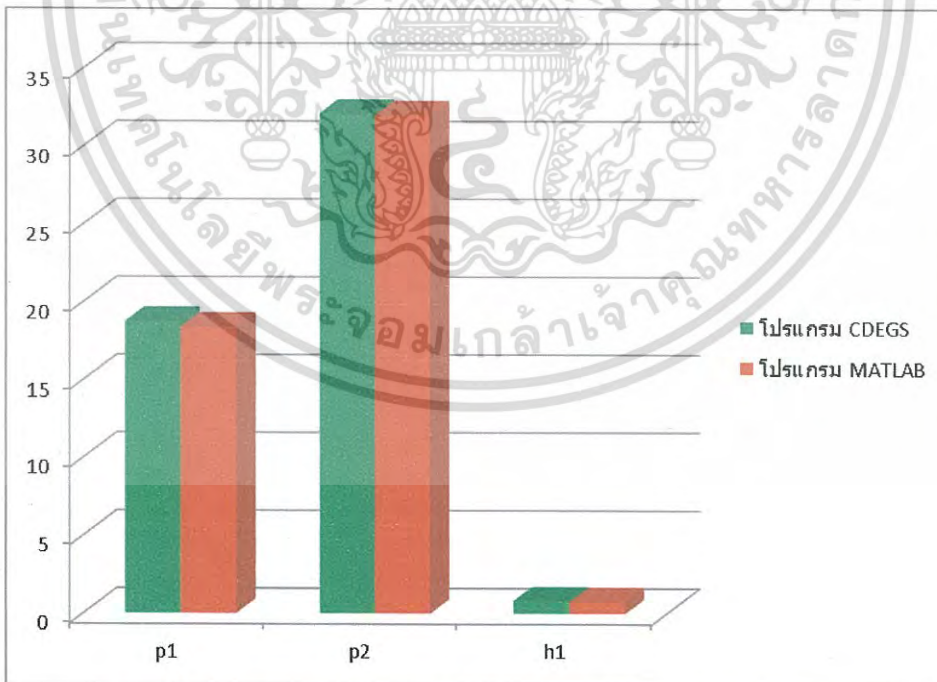
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.1 การหาค่าองค์ประกอบของดิน

จากการใช้โปรแกรม MATLAB และโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS ในการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับของทั้งสองสถานีไฟฟ้า ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของดินสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก 3



รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของดินสถานีไฟฟ้านางรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 พบว่า การหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับโดยใช้โปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หาโดยโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS

6.1.2 การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

จากการใช้โปรแกรม MATLAB และโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ในการหาค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของทั้งสองสถานีไฟฟ้า โดยพิจารณาดินเป็นดินสองชั้น ผลที่ได้เป็นตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า พืชุนโลก 3

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
$R_g [\Omega]$	0.06923	0.06762	2.32
GPR [V]	1308.6	1278.099	2.32
E_m [V]	375.52	371.4856	1.07
E_s [V]	54.02	61.6125	14.05

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า นางรอง

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
$R_g [\Omega]$	0.36519	0.3662	0.27
GPR [V]	6902.2	6921.6469	0.27
E_m [V]	825.44	800.6535	3.00
E_s [V]	432.56	477.2419	10.32

จากผลลัพธ์ที่ได้ดังตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 พบว่า การหาค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หาโดยโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ยกเว้นค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่ยังค่อนข้างแตกต่างกัน และจากการเปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าระหว่างการพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า พืชุนโลก 3 ระหว่างดินแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น

PARAMETERS	Excel Uniform Soil	MATLAB Nonuniform Soil	DIFFERENT (%)
$R_g [\Omega]$	0.1169	0.06762	42.15
GPR [V]	2210.24	1278.099	42.15
E_m [V]	594.543	371.4856	37.52
E_s [V]	218.405	61.6125	254.48

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านางรอง ระหว่างดินแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น

PARAMETERS	Excel Uniform Soil	MATLAB Nonuniform Soil	DIFFERENT (%)
$R_g [\Omega]$	0.4242	0.3662	13.68
GPR [V]	8018.81	6921.6469	13.68
E_m [V]	1085.136	800.6535	26.22
E_s [V]	947.289	477.2419	49.62

จากผลลัพธ์ที่ได้ตั้งตารางที่ 6.3 และตารางที่ 6.4 พบว่า การหาค่าตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าโดยการพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น ค่าที่ได้ค่อนข้างแตกต่างกัน โดยเฉพาะแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) มีค่าที่แตกต่างกันมาก

ดังนั้นจากผลการวิจัยทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าโปรแกรม MATLAB สามารถนำมาใช้ทดแทนโมดูล RESAP ของโปรแกรม CDEGS ในการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นได้ ในขณะที่เดียวกันโปรแกรม MATLAB ก็สามารถนำมาใช้ทดแทนโมดูล MALT ของโปรแกรม CDEGS ในการหาค่าตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าได้ ถึงแม้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) จะยังแตกต่างกันเล็กน้อย แต่สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า สูตรที่ใช้ในการออกแบบแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้สูตรที่นักวิจัยได้พัฒนาแล้ว อีกทั้งยังเป็นการออกแบบที่เพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) ผ่านมาตรฐานความปลอดภัย ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ก็จะผ่านเช่นเดียวกัน เราจึงให้ความสำคัญกับแรงดันไฟฟ้าเมฆ (E_m) เป็นอันดับแรก

ขณะที่ผลการวิจัยการเปรียบเทียบการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าระหว่างการพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil กับแบบดินสองชั้น (Nonuniform Soil) ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดจากภาคสนามมีค่าแตกต่างกันมาก การพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil จะทำให้การหาค่าตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนมาก ไม่เหมาะที่จะนำมาออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ซอฟต์แวร์โปรแกรมช่วยออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานจำเพาะของดินตั้งแต่สามชั้นขึ้นไปได้ จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรม CDEGS ช่วยในการคำนวณหา ดังนั้นจะต้องพัฒนาความสามารถในการออกแบบระบบต่อลงดินของซอฟต์แวร์โปรแกรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ให้สามารถพิจารณาชั้นดินตั้งแต่สามชั้นขึ้นไปจนถึงชั้นดินที่มีโครงสร้างดินหลายชั้น โดยแบ่งชั้นดินตามค่าความต้านทานจำเพาะ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าการออกแบบระบบต่อลงดินเมื่อวิเคราะห์ดินเพียงชั้นเดียว

2. งานวิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ได้กำหนดให้พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เท่านั้น ดังนั้นจะต้องพัฒนาความสามารถในการออกแบบระบบต่อลงดินของซอฟต์แวร์โปรแกรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ให้สามารถออกแบบพื้นที่ของสถานีไฟฟ้ารูปทรงอื่นๆได้

3. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ยกตัวอย่างกรณีศึกษาการหาความต้านทานระบบต่อลงดินสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสองแห่ง โดยค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่วัดได้จากภาคสนามเป็นการวัดที่ดินเดิมก่อนจะมีการสร้างสถานีไฟฟ้าจริงเพื่อนำไปออกแบบระบบต่อลงดินให้ถูกต้องตามความปลอดภัยทางวิศวกรรมและประมาณค่าใช้จ่ายกำหนดเป็นราคากลาง ในการประกวดราคา แต่เมื่อจะทำการก่อสร้างจริงที่ดินเป็นที่ลุ่มอาจทำให้เกิดน้ำท่วมได้ จึงจำเป็นที่จะต้องถมให้สูงขึ้นด้วยดินที่มีความต้านทานจำเพาะที่ต่างออกไปจากของเดิม และเมื่อทำการถมดินด้วยดินที่มีความต้านทานจำเพาะใหม่จะต้องทำการวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยอีกครั้งว่าระบบต่อลงดินที่ได้ออกแบบไปนั้นเป็นอย่างไร

ดังนั้นการเปรียบเทียบการสันนิษฐานการออกแบบการใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินสองชั้นในการคำนวณหาความต้านทานระบบต่อลงดินกับค่าที่เกิดขึ้นจริงนั้น ผู้ที่ต้องการศึกษาจะต้องทำการวัดภาคสนามที่สถานีไฟฟ้าที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งจะทำให้การสันนิษฐานนั้นมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่หาได้จากโปรแกรมเพียงอย่างเดียว

4. การออกแบบสถานีไฟฟ้าชั่วคราว ของแผนกวางแผนระบบไฟฟ้า กองวิศวกรรมและวางแผน การไฟฟ้าเขต ซึ่งทั่วประเทศมีการไฟฟ้าเขตอยู่ 12 ที่ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิกาคนั้น ควรออกแบบโดยพิจารณาโครงสร้างดินเป็นแบบสองชั้น เพราะผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นแล้วว่าค่าตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบโดยพิจารณาดินเป็นแบบ Uniform Soil มีความแตกต่างจากการออกแบบโดยพิจารณาโครงสร้างดินเป็นแบบสองชั้นอยู่มาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. “โครงการวิจัยรูปแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าและการต่อลงดินระบบจำหน่ายแรงสูงและแรงต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.” 2548.
- [2] กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. “คู่มือการใช้งานโปรแกรม CDEGS.” 2548.
- [3] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์กรุงเทพฯ: อินโฟเพรส. 2543.
- [4] อลงกรณ์ พรหมสวัสดิ์. “การศึกษาและการออกแบบระบบต่อลงดิน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [5] สมชาติ จิริวิภากร. “การศึกษาความต้านทานของตะแกรงในดินที่มีความสม่ำเสมอ โดยใช้แบบจำลองในการทดสอบ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [6] บัณฑูร พิทักษ์วงศ์. “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้คอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [7] ชาญชัย เล่าห์พงศ์ไพศาล. “การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาผลของชั้นดิน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [8] อิติ เอื้อมงคล. “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [9] จิรพันธ์ ปั้นประไพ. “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้โปรแกรม MATLAB.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [10] จีรพัฒน์ นวอนุรักษ์. “การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.
- [11] วิศิษฐ์ ดีสวัสดิ์. “การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้า พิจารณาโครงสร้างชั้นดินแบบ Nonuniform Soil โดยใช้โปรแกรม MATLAB.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [12] พลฉัตร กัลยา. “การออกแบบระบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยพิจารณาความปลอดภัยด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [13] สิริธร พลับเล็ก. “การออกแบบระบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ใช้สวิตช์เกียร์ฉนวนก๊าซติดตั้งในอาคารที่มีพื้นที่จำกัด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2555.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] เพียงตา สาทรักษ์. ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ผิวดิน. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.2550.
- [15] รุณี ไกรทอง. “ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีวิวัฒนาการทางาร่วมกัน เพื่อสร้างกลยุทธ์การซื้อขายหลักทรัพย์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. 2557.
- [16] IEEE Std 81-2012, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”, 28 December 2012.
- [17] IEEE Std 80-2000, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 30 January 2000.
- [18] Xiaobin Cao, Guangning Wu, Weiming Zhou, Ruifang Li, “New Method for Calculating Ground Resistance of Grounding Grids Buried in Horizon Two-Layer Soil” International Conference on High Voltage Engineering and Application. pp.241-244, November 2008
- [19] J.M.Nahman , V.B Djordjevic “ Nonuniformity Correction factors for maximum mesh - and step-voltages of ground grids and combined ground electrodes ” , IEEE transaction on power Delivery ,Vol.10 , No3 July 1995
- [20] Blattner, C. J., “Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1758–1763, Sept./Oct., 1980.
- [21] Blattner, C. J., “Study of driven ground rods and four point soil resistivity data,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 101, no. 8, pp. 2837–2850, Aug. 1982.
- [22] F. Dawalibi and C. J. Blattner, “Earth Resistivity Measurement Interpretation Technique.” IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 2, pp. 374 – 382. Feb. 1984.
- [23] A. P. Meliopoulos, A. D. Papalexopoulos, R. P. Webb, and C. Blattner, “Estimation of soil parameters from driven rod measurement,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, no. 9, pp. 2579–2587, Sep. 1984.
- [24] Meliopoulos, A. P., and Papelexopoulos, A. D., “Interpretations of soil resistivity measurement experience with the model SOMIP,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-1, no. 4, pp.142–151, Oct. 1986.
- [25] Schwarz, S. J., “Analytical expression for resistance of grounding systems,” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 73, no. 13, part III-B, pp. 1011–1016, Aug. 1954.
- [26] Thapar, B., Gerez, V., Balakrishnan, A., and Blank, D., “Simplified equations for mesh and step voltages in an AC substation,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 601–607, Apr. 1991.

- [27] YL. Chow, M.M.A. Salama, "A simplified Method for Calculating the Substation Grounding Resistance", *IEEE Transactions in Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp 736 - 742. , 1994.
- [28] M.M.A.Salama , M.M.Ei Sherbiny , Y.L.Chow " A Formula for Resistance of substation Grounding Grid in two layer Soil " , *IEEE Transaction on power Delivery* , Vol.10,No3.July 1995
- [29] Y. L. Chow, M. M. Sherbiny, and M. M. A. Salama, "Resistance formulas of grounding system in two-layer earth," *IEEE Transactions on Power Delivery.*, vol. 11, no. 3, pp. 1330–1336., April 1996.
- [30] Thapar, Ziad A. Alaywan., "Increasing of Ground Resistance of Human Foot in Substations Yards," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No.3, pp.1695-1700, Jan. 1989
- [31] Thapar B., Gerez V., Balakrishnan A., Blank D.A., "Substation grounding grids intertied with buried conductors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7, 3, pp. 1207-1212. July 1992.
- [32] Thapar, B., Gerez, V., and Emmanuel, P., "Ground resistance of the foot in substation yards," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, Jan. 1993.
- [33] Thapar, B., Sunil K. Madan., "Current for Design of Grounding Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PAS-103, no. 9, pp. 2633 - 2638, Sept. 1984.
- [34] J.M.Nahman , V.B Djordjevic "Nonuniformity Correction factors for maximum mesh -voltages of combined grids – multiple rods electrodes", *IEEE Transaction on power Delivery* , Vol.11 ,No3. July 1996
- [35] J.M. Nahman , V.B Djordjevic " Maximum step voltage of combined grid – multiple rods ground electrodes " , *IEEE Transaction on Power Delivery* , Vol.13 , No.3 , July 1998
- [36] Lazzara, J., and Barbeito, N., "Simplified two-layer model substation ground grid design methodology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1741–1750, Nov. 1990.
- [37] Meliopoulos, A. P. S., Xia, F., Joy, E. B., Cokkonides, G. J., "An advanced computer model for grounding system analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 13–23, Jan. 1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a large, circular emblem in the background. It features a central sunburst with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sunburst is a tiered umbrella (parasol) supported by two mythical creatures (Gajasingha and Singha). The entire emblem is surrounded by a circular border containing the university's name in Thai script: "มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์".

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ประทีป คาศิจารณ์. “การประมาณค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นในแนวระดับโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39, เล่มที่ 1, พฤศจิกายน 2559, หน้า 29-32.

การประมาณค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นในแนวระดับโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม

Parameter Estimation of Horizontal two-layer Soil Using Genetic Algorithm

ประทีป กาฬารณ์ สิริวัฒน์ โทษเวชกุล และพีรฤติ ยุทธโควิท

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ถนนจลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

E-mail: max_kmitl_ayw@hotmail.com, kpsiriwa@kmitl.ac.th, kypeeraw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาจุดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม ซึ่งวิธีนี้จะใช้กลุ่มข้อมูลของค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินที่ได้มาจากการวัดค่าในดิน เพื่อหาค่าองค์ประกอบต่างๆของดินสองชั้นในแนวระดับ วัดคุณสมบัติของบทความนี้ เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับระหว่างวิธีทางพันธุกรรม กับวิธีที่ใช้กราฟเส้นแบบความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ วิธีทางพันธุกรรมมีความถูกต้องมากกว่าวิธีที่ใช้กราฟเส้นแบบความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ

คำสำคัญ: วิธีทางพันธุกรรม, กราฟเส้นแบบความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ, องค์ประกอบของดิน, ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ

Abstract

In this paper, an optimized methodology based on a genetic algorithm (GA) for soil parameter determination has been proposed. The method uses a set of soil resistivity from measurements to determine the horizontal two-layer soil parameters. To confirm the accuracy and performance of the proposed method, the determined results by the proposed are compared with those determined by the master resistivity curve method in some example cases. From the calculated results, the proposed method provides the better accuracy than the master resistivity curve method.

Keywords: Genetic algorithm, Master resistivity curves method, Soil parameter, Soil resistivity

1. บทนำ

ระบบสายดินมีความสำคัญ ด้านความปลอดภัยต่อผู้ใช้ไฟ และด้านประสิทธิภาพและคุณภาพการทำงานของระบบไฟฟ้าและระบบป้องกันต่างๆ รวมถึงการป้องกันผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า การต่อลงดินช่วยจัดความผิดปกติ (fault) ที่เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายได้ทันที เมื่อจะต้องติดตั้งระบบสายดิน จำเป็นที่จะต้องรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของดินบริเวณนั้น ค่าองค์ประกอบของโครงสร้างของดิน (ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดิน และ ความหนาของชั้นดิน) เป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับ

แบบจำลองของระบบสายดิน การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินจะต้องมีการจำลองโครงสร้างของดินอย่างน้อย 2 ชั้นขึ้นไป

ในบทความนี้ได้แบ่งโครงสร้างของดินออกเป็นสองชั้น โดยความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นบนคือ ρ_1 , ความหนาของดินชั้นบนคือ h_1 , ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นล่างคือ ρ_2 , และความหนาของดินชั้นล่างเป็นค่าอนันต์

วิธีของวอนเนอร์ จะทำการปักขั้วอิเล็กโทรดลงดิน 4 หลัก แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในดินและวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดิน

เดิมการหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างของดินสองชั้นจะใช้วิธีการใช้ Master Resistivity Curves หลักการก็คือจะนำค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้มาจากการวัดจริงของวอนเนอร์ นำมาพล็อตกราฟแล้วนำไปเทียบกับ Master Resistivity Curves หลังจากนั้นก็คำนวณหาค่า ρ_1 , ρ_2 และ h_1 ออกมา แล้วนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้โดยการประมาณจึงมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้

วิธีการที่ถูกพัฒนาในบทความนี้จะเป็นการใช้วิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ช่วยคำนวณหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างของดินสองชั้นทั้งหมดได้แก่ ρ_1 , ρ_2 และ h_1 โดยจะทำการกำหนดสมการเป็นแบบที่นำไปหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้มาจากการคำนวณโดยใช้ตัวแปร ρ_1 , ρ_2 และ h_1 กับความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้มาจากการวัดจริงของวอนเนอร์ ที่ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

ข้อสรุปของการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะจากการคำนวณโดยใช้ตัวแปร ρ_1 , ρ_2 และ h_1 ที่ได้จากรูปทางพันธุกรรมหรือ GA กับวิธีที่ใช้ Master Resistivity Curves. ผลที่ได้คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้จากรูปทางพันธุกรรมมีความถูกต้องมากกว่าวิธีที่ใช้ Master Resistivity Curves. ดังนั้นการใช้วิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะสามารถหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสองชั้นได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการจำลองการทำงานของระบบสายดินที่จะถูกติดตั้งในดินบริเวณนั้น

2. การคำนวณความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดิน

ความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินคำนวณโดยใช้เครื่องมือวัดที่มี 4 ขั้ว คือ T_1 , T_2 , T_3 และ T_4 ตามรูปที่ 1 ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 4 ปักลึกไปในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P โดยระยะห่างของแต่ละจุดเท่ากับ a เรียกจุดเหล่านี้ว่า q_1, q_2, q_3 และ q_4 [1] วิธีนี้สนับสนุนโดย Wenner [2] เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไปทั่วทั้ง T_1 และไหลกลับมายังขั้ว T_2 กระแสนี้จะไหลผ่านดินระหว่างจุด q_1 และ q_2 ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างจุด q_2 และ q_3 ศักย์ไฟฟ้าที่จุด q_2 และ q_3 จะหาได้จากสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$V_{q_2} = \frac{\rho a \cdot I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2+(2P)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2+(2P)^2}} \right] \quad (1)$$

$$V_{q_3} = \frac{\rho a \cdot I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2+(2P)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2+(2P)^2}} \right] \quad (2)$$

ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าของจุด q_2 และ q_3 จะหาได้โดย

$$V_{q_2} - V_{q_3} = \frac{\rho a \cdot I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2+(2P)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2+(2P)^2}} \right] \quad (3)$$

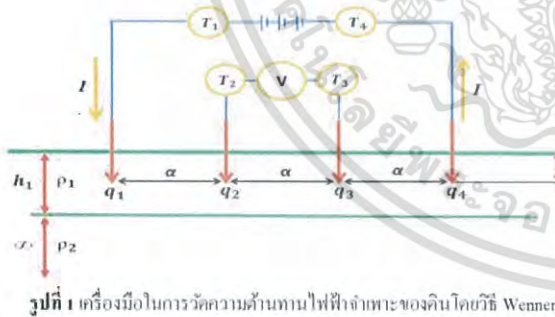
การหารความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าจะให้ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน R

$$R = \frac{V_{q_2} - V_{q_3}}{I} \quad (4)$$

$$R = \frac{\rho a}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2+(2P)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2+(2P)^2}} \right] \quad (5)$$

จากนั้นจัดสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูป ρ_s ก็จะทำได้สมการความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินได้โดย

$$\rho_s(a) = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+(2P)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2+(2P)^2}}} \quad (6)$$



3. วิธีทางพันธุกรรม (GA)

GA จะหาค่าที่เหมาะสมขององค์ประกอบของดินสองชั้นได้แก่ ρ_1, ρ_2 และ h_1 ที่เกิดจากการสุ่ม [3] หลักการของ GA จะอาศัยกระบวนการสร้างใหม่ การข้าม การปรับเปลี่ยนของตัวแปร เพื่อเข้าถึงจุดที่เหมาะสมที่สุด การเริ่มต้นหาตัวแปร GA จำเป็นต้องตั้งค่าตัวแปรเริ่มต้นหรือที่เรียกว่าประชากรเริ่มต้น P_0 หลังจากนั้นจะทำการสุ่มจำนวนประชากรเริ่มต้น ซึ่งประชากรชุดนี้จะถูกแปลงเป็นตัวเลขฐานสองและถือว่าเป็นโครโมโซมที่แท้จริงของลำดับ "0" และ "1" ขั้นตอนต่อไปคือการจับคู่

ของจุดเหล่านี้ที่จะให้เป็นต้นแบบเพื่อทำการสร้างชุดข้อมูลใหม่ คู่ของข้อมูลต้นแบบจะทำการผสมกันและพัฒนาหาชุดข้อมูลชุด N_c ที่ดีกว่าเดิม และนี่คือความสำเร็จของการข้ามสายพันธุ์ หลังจากที่ย้ำสายพันธุ์มีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดการกลายพันธุ์ของชุดข้อมูล สมมติว่าคู่ของต้นแบบก่อให้เกิดชุดข้อมูลขึ้นมาใหม่ ดังนั้น GA จะสร้างรูปแบบเริ่มต้นและได้รับฟังก์ชันเป้าหมาย การดำเนินการดังกล่าวข้างต้นจะดำเนินการรุ่นต่อรุ่นทำให้มีประชากรถูกเกิดขึ้น จาการสร้างใหม่ของประชากรทำให้มีชุดข้อมูลต้นแบบมากขึ้น ประชากรใหม่จะมีสมาชิก $P_0 + N_c \cdot P_0/2$ หลังจากนั้นขั้นตอนการคัดเลือกโดยธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้ ตามขั้นตอนนี้เพียงสมาชิกประชากรต้นแบบที่รอดมาจากสมาชิกของ $P_0 + N_c \cdot P_0/2$ สมาชิกต้นแบบนี้จะถูกเลือกให้เป็นสมาชิกที่มีค่าดีที่สุดของ F (ฟังก์ชันเป้าหมาย) ตั้งแต่ปัญหาการหาค่าดีที่สุดถูกแก้ปัญหาก็ การทำซ้ำไปซ้ำมาของการสร้างใหม่ภายใต้การข้ามสายพันธุ์และการกลายพันธุ์และการคัดเลือกตามธรรมชาติ GA จะสามารถหาค่าดีที่สุดของ F ได้ [3]-[4]

ปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสม เริ่มจากปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมทางคณิตศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่เชื่อมโยงกับสูตรอื่นๆ หรือการแก้ปัญห่อื่นๆ แนวคิดพื้นฐานเพื่อแก้ปัญหาที่คือการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้จากการวัดจริงโดยวิธีของเวนเนอร์ กับค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้จากโปรแกรม GA

ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่ได้จาก GA เกิดจากการคำนวณโดยใช้ตัวแปร ρ_1, ρ_2 และ h_1 ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ในทางปฏิบัติมีค่าได้มากมาย แต่โปรแกรม GA จะเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง [3]

4. Master resistivity curves

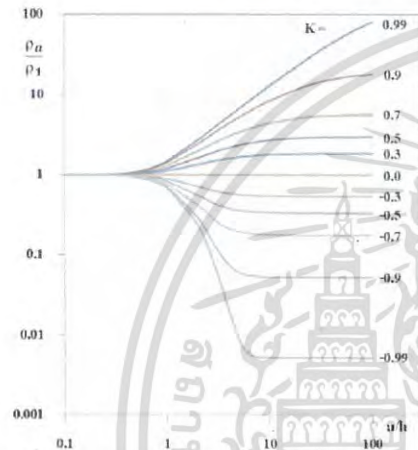
การหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสองชั้น สามารถใช้ Master resistivity curves ได้ ซึ่ง Master resistivity curves เป็นกราฟที่ได้จากการเก็บข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินแบบใช้ขั้วอิเล็กโทรด 4 จุดของเวนเนอร์ ดังรูปที่ 2

ขั้นตอนการหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสองชั้นเริ่มจากหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินที่ได้จากการวัด มาพล็อตใส่กราฟลอการิทึมที่เป็นกระดาษโปร่งใสและมีมาตราส่วนเดียวกับ Master resistivity curves หลังจากนั้นวางกราฟที่เขียนจากข้อมูลภาคสนามลงบน Master resistivity curves แล้วเลื่อนกราฟที่เขียนจากข้อมูลภาคสนามเพื่อหาตำแหน่งที่ข้อมูลจุดต่างๆวางอยู่บน Master resistivity curves เส้นใดเส้นหนึ่ง หรือใกล้เคียงกับ Master resistivity curves เส้นใดเส้นหนึ่งมากที่สุด การเลื่อนหรือขยายกราฟจะต้องให้แกนแนวนิ่งและแนวอนของกราฟทั้งสองขนานกัน ดังรูปที่ 3 เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสม โดยแกนแนวนิ่งและแนวอนของกราฟข้อมูลและ Master resistivity curves วางซ้อนทับและขนานกัน ค่าความหนาของดินชั้นบน h_1 ก็คือค่าที่แกนแนวอนของกราฟข้อมูล ตรงกับแกนแนวอนของ Master resistivity

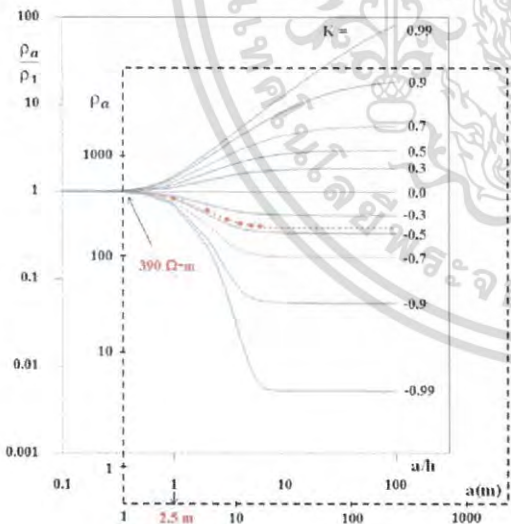
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

curves ที่มีค่าเป็น 1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นบนคือค่าที่แกนแนวดิ่งของกราฟข้อมูล ตรงกับแกนแนวดิ่งของ Master resistivity curves ที่มีค่าเป็น 1 ดังรูปที่ 3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นล่างหาได้จากค่า k ที่แสดงไว้ใน Master resistivity curves แต่ละเส้น ถ้าข้อมูลทับกับเส้น Master resistivity curves พอดี สามารถอ่านค่า k ของเส้นกราฟได้ แต่หากข้อมูลอยู่ระหว่างเส้นกราฟให้ทำการเทียบบัญญัติโดรยางค์เพื่อหาค่า k เมื่อหาค่า k ได้แล้ว สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นล่างได้จากสมการที่ (7)

$$\rho_2 = \left(\frac{1+K}{1-K} \right) \times \rho_1 \quad (7)$$



รูปที่ 2 Master resistivity curves ของดินสองชั้นในแนวระดับ



รูปที่ 3 การใช้ Master resistivity curves

5. การหาค่าองค์ประกอบของดิน 2 ชั้นในแนวระดับโดย GA

การคำนวณหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสองชั้นในแนวระดับ เป็นปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณขององค์ประกอบ 3 ตัว (ρ_1 , ρ_2 และ h_1) และเป็นค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันเป้าหมาย

ในบทความนี้ฟังก์ชันเป้าหมายใช้ฟังก์ชันเป้าหมายพิเศษ ที่นำค่าความผิดพลาดมายกกำลังสอง ดังสมการที่ (8)

$$F_g = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c}{\rho_{ai}^m} \right)^2 \quad (8)$$

ที่ ρ_{ai}^m คือค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะแต่ละค่าที่วัด โดยใช้วิธีของเวนเนอร์ ที่ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดคือ α ต่างๆกัน และ ρ_{ai}^c คือค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะแต่ละค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด α ต่างๆกัน N คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ การคำนวณความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะใช้ตามสมการที่ (9-12) [4]-[5]

$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \cdot \left(1 + 4 \sum_n K^n \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (9)$$

ที่ $n = 1, \dots, \infty$
K คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ดังสมการที่ (10)

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (10)$$

A และ B คือสององค์ประกอบ ซึ่งจะได้รับจากสมการดังต่อไปนี้

$$A = 1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{\alpha} \right)^2 \quad (11)$$

$$B = A + 3 \quad (12)$$

การใช้ GA เพื่อหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างดินสองชั้นในแนวระดับจะใช้โปรแกรม MATLAB (เป็น โปรแกรมประมวลผล การนำ GA มาใช้จะเริ่มต้นจากการสุ่มสร้างประชากรของ $P_1 = 1000$ โครโมโซม หลังจากนั้นจะสุ่มสร้างค่าของความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นบน 1000 ค่า ($0 < \rho_1 < 1000$), สุ่มสร้างค่าของความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของดินชั้นล่าง 1000 ค่า ($0 < \rho_2 < 1000$) และสุ่มสร้างค่าของความหนาของดินชั้นบน 1000 ค่า ($0 < h_1 < 6$) ค่าที่ได้จากการสุ่มแต่ละตัวจะถูกนำไปแทนในฟังก์ชันเป้าหมาย ประชากรตัวที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด จะถูกเลือกให้เป็นประชากรต้นแบบเพื่อทำการสุ่มครั้งต่อไป โดยจะทำการสุ่มอย่างนี้ทั้งหมด 100 ครั้ง จนได้ประชากรที่ดีที่สุดซึ่งนั่นก็คือ องค์ประกอบที่เราต้องการ

6. ผลลัพธ์

ในส่วนนี้จะนำเสนอผลที่ได้รับจากการหาค่าองค์ประกอบของโครงสร้างของดินสองชั้นในแนวระดับ ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบผลที่ได้รับจากการใช้ GA กับผลที่ได้รับจากการใช้ Master resistivity curves โดยใช้ข้อมูลค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะที่วัดโดยวิธีของเวนเนอร์ ดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินจากการทดลอง

Probe spacing (m)	Experimental Resistivity (Ω .m)
0.50	473.8
0.70	455.7
1.00	377.0
1.25	305.5
1.50	263.0
2.00	202.3
2.50	160.8
3.00	140.4
3.50	132.2
4.00	128.2

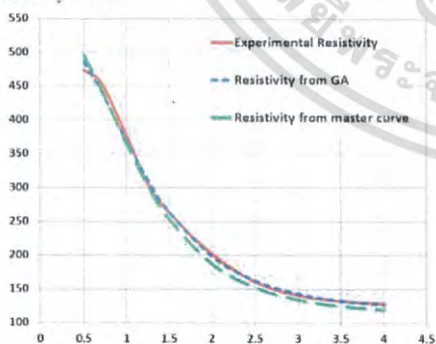
GA จะใช้ข้อมูลที่ได้ออกการทดลอง (ตารางที่ 1) โดยได้อธิบายไว้ในส่วนที่ 2 ค่าของ α และ ρ_{ai}^m จะถูกใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของโปรแกรม GA โดยได้อธิบายไว้ในส่วนที่ 5

ในตารางที่ 2 แสดงถึง ค่าองค์ประกอบที่เหมาะสมของโครงสร้างดินสองชั้นในแนวระดับและค่าความผิดพลาดของวิธี GA กับวิธีที่ใช้ Master resistivity curves

ตารางที่ 2 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินจากการทดลอง

Parameter	Master resistivity curves	Genetic Algorithm
Upper resistivity, ρ_1 (Ω .m)	540	523.278
Lower resistivity, ρ_2 (Ω .m)	108.25	113.653
Thickness of Upper layer soil, h_1 (m)	0.8	0.834
Error (%)	2.35	0.32

ในรูปที่ 4 เป็นกราฟที่พล็อตระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้ออกการทดลอง, ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้จากโปรแกรม GA และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้จาก Master resistivity curves



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้จากการทดลองกับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้จาก GA และ Master resistivity curves

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ โดยวิธีการใช้โปรแกรม GA ค่าองค์ประกอบจะมีความถูกต้องและความละเอียดของตัวแปรมากกว่าวิธีการใช้ Master resistivity curves รวมถึงความเร็วของการหาค่าองค์ประกอบแบบ

วิธีใช้โปรแกรม GA ก็จะมีความเร็วมากกว่าแบบวิธีการใช้ Master resistivity curve

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน ที่ได้จากการใช้โปรแกรม GA มีความใกล้เคียงกับเส้นกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้จากการวัดจริงโดยวิธีของเวนเนอร์ มากกว่าเส้นกราฟความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ได้จากการใช้ Master resistivity curves

7. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) และความหนาของดินชั้นบน (h_1) โดยการใช้วิธีทางพันธุกรรม ซึ่งการคำนวณและหาค่าที่เหมาะสมนั้นจะใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดต่างๆ ที่ได้จากการวัดโดยวิธีของเวนเนอร์ มาเป็นข้อมูลนำเข้าในการคำนวณค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับ นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธี Master resistivity curves พบว่าวิธีที่นำเสนอมีความถูกต้องและความละเอียดที่มากกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการหาค่าองค์ประกอบของดินสองชั้นในแนวระดับโดยวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำและเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานได้จริง ในทางปฏิบัติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. L. Chow, J. J. Yang, and K. D. Srivastava, "Grounding resistance of buried electrodes in multi-layer earth predicted by simple voltage measurements along earth surface: A theoretical discussion," IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 2, pp. 707-715, Apr. 1995.
- [2] F. A. Wenner, "Method of measuring earth resistivity," Bull. Nat. Bureau Std., Washington D.C., vol. 12, 1916.
- [3] Z. Michalewicz and D. B. Fogel, How to Solve It: Modern Heuristics. Berlin, Germany: Springer, 1999.
- [4] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [5] Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No 1, pp. 100-106, January 2005.



ประทีป กาพิธารณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจด้านการออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบ และทดสอบการต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with a crown on top, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sunburst is a decorative banner with Thai script. The entire emblem is surrounded by a circular border containing the university's name in Thai: "มหาวิทยาลัยราชภัฏบรือรัมย์" (Mahavithayalai Rajabhat Buriram).

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

2. PRATEEP KAPIJAN. "Grounding System Design of Substation Using Matlab Program." The 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON2017), 8-10 march 2017

Grounding System Design of Substation Using Matlab Program

Prateep Kapijan

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
max_kmitl_ayw@hotmail.com

Siriwat Potivejkul and Peerawut Yutthagowith
Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
kpsiriwa@kmitl.ac.th, kypeeraw@kmitl.ac.th

Abstract—Substation grounding system of Provincial Electricity Authority (PEA) are normally designed using CDEGS software. However, the copyright and limited user licenses affect the practical use. Therefore, using an alternative software should be more beneficial and cost-effective. MATLAB, an engineering software, has been utilized in this study to design the substation grounding system of non-uniform soil. The formulas used in this program are cited from previous literatures and followed the IEEE80-2000. The parameters, including grid resistance (R_g), grid potential rise (GPR), mesh voltage (E_m), and step voltage (E_s), are in accordance with the results from CDEGS software.

Keywords— genetic algorithm; grid resistance; grid potential rise; touch voltage; mesh voltage; step voltage;

I. INTRODUCTION

The purpose of grounding system design of substation is to ensure the reliability and safety of power system and also the safety of operator in the situation of grounding fault in power system, evaluated by the comparison of a touch and step voltage critical (E_{touch} , E_{step}) and a maximum mesh and step voltage (E_m , E_s). Currently, The Provincial Electricity Authority (PEA) has been using Current, Distribution, Electromagnetic Field, Grounding and Soil structure analysis (CDEGS) software in designing the substation grounding system. The CDEGS software is a powerful set of integrated engineering software tools designed to accurately analyze problems involving grounding, electromagnetic fields, electromagnetic interference including AC/DC interference mitigation studies and various aspects of cathodic protection and anode bed analysis with a global perspective, starting literally from the ground up that uses IEEE 80-2000[1] calculations as a base. The CDEGS software consists of eight modules, but the design of the grounding system uses only two modules, 1. RESAP module is normally used to determine equivalent earth structure models based on measured soil resistivity data and 2. MALT module is used to analyze the grounding system such as the resistance of the grounding system, the current flowing out of the ground grid, grid potential rise, touch voltage and step voltage. But the CDEGS software is copyright of Safety Engineering Services & Technologies Limited, (SES) Canada and PEA has to spend millions for maintaining only few licenses which are not sufficient in practical uses.

The aim of this paper is to present the design of grounding system by considering non-uniform soil using MATLAB program at Phitsanulok 3 and Nangrong substation which are different in soil components. The formulas used in the program were taken from the well-developed research for the maximum accuracy.

II. ANALYSIS OF HORIZONTAL TWO-LAYER SOIL PARAMETERS

Calculation of the parameters of horizontal two-layer soil which are resistivity of top soil layer (ρ_1), resistivity of bottom soil layer (ρ_2) and thickness of top soil layer (h_1) was performed using genetic algorithm (GA) which $F(x)$ was a deviation value, used as evaluation function (1). The ρ_1 , ρ_2 and h_1 can be obtained by minimizing the $F(x)$

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_{\alpha i}^m - \rho_{\alpha i}^c}{\rho_{\alpha i}^m} \right)^2 \quad (1)$$

where $\rho_{\alpha i}^m$ are the values of the experimental apparent resistivity of the soil, $\rho_{\alpha i}^c$ are the values of the theoretically-optimized apparent resistivity which can be obtained from equation (2-5) as follows [2]

$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \cdot \left(1 + 4 \sum_n K^n \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (2)$$

where $n = 1, \dots, \infty$

K is the reflection coefficient:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3)$$

A and B are two parameters, which are given by the following equations:

$$A = 1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{\alpha} \right)^2 \quad (4)$$

$$B = A + 3 \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III. DESIGN OF GROUNDING SYSTEM FOR SUBSTATION

A. Resistance of ground grid (R_g)

The resistance of ground grid (R_g) is given by [3]

$$R_g = \rho_2 / 4\sqrt{\pi/A} \quad (\rho_2 < \rho_1, h_1 < h_b)$$

$$R_g = \frac{\left(\rho_2\sqrt{\pi A} + h_1\rho_1\pi(23.16 \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9\right) - 78) \right) \times \left(1 + 1.95e^{-20\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.3e^{-0.5\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}{\left(4A + 4h_1\sqrt{\pi A}(23.16 \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9\right) - 78) \right) \times \left(1 + 1.95e^{-20\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.3e^{-0.5\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}$$

$$(\rho_2 < \rho_1, h_1 \geq h_b)$$

$$R_g = \frac{\left(\rho_2\sqrt{\pi A} + h_1\rho_1\pi(23.16 \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9\right) - 78) \right) \times \left(1 + 1.55e^{-15\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.1e^{-0.25\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0.2e^{-\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}{\left(4A + 4h_1\sqrt{\pi A}(23.16 \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31.9\right) - 78) \right) \times \left(1 + 1.55e^{-15\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0.1e^{-0.25\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0.2e^{-\frac{h_1\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}$$

$$(\rho_2 \geq \rho_1) \quad (6)$$

B. Resistance of ground rod (R_r)

The resistance of ground rod (R_r) is given by [4]

$$R_r = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad (7)$$

$$R_a = \frac{\rho_2}{l_r + h_b - h_1} g_0 \frac{F_0}{N} \quad (8)$$

$$R_b = \frac{\rho_1}{h_1 - h_b} g_0 \frac{F_0}{N} + \frac{\rho_1}{h_1} \phi \quad (9)$$

$$g_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \frac{2l_r}{a} - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2)h_b}{l_r}} \right] \quad (10)$$

where l_r is length of driven rod and a is radius of driven rod. The F factor of N rods in a homogeneous earth can be calculated by

$$F = 1 + \left(N - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \frac{R_s}{R_t} \quad (11)$$

The multiple reflections of the two-layer earth effectively changes the rod length of each rod, then

$$F_0 = F | l_r \rightarrow \frac{l_r}{1 - 0.9K} \quad (12)$$

The above arrow means the replacement of l_r by $l_r/(1 - 0.9K)$

The F in (11) can be calculated by replacing $\frac{R_s}{R_t}$ and r obtained from (13), (14)

$$\frac{R_s}{R_t} = \sqrt{\frac{\frac{l_r}{r} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{l_r}{l_r + \frac{r}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}{\ln \left(\frac{4l_r}{a} \right) - 1}} \quad (13)$$

$$r = \frac{A}{2\pi l_r} \quad (14)$$

The additional effect of the two-layer earth on the N rod assembly is given in (15)

$$\phi = \frac{\frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{1-K} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 \left(\frac{l_r + h_b}{h_1} \right)^2 + 1}} \quad (15)$$

C. Resultant resistance of the grid and rod (R_r)

The resultant resistance of the grid and rod (R_r) can be determined as follows:

$$R_r = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{1}{R_g} \right)^3 + \left(\frac{1}{R_t} \right)^3}} \quad (16)$$

D. Criteria of Touch and Step Voltage

The equations which are used to calculate the minimum touch and minimum step voltage for humans with 50 kg body weight are as follows [1]:

$$E_{touch} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (1.5c_s\rho_s + 1000) \quad (17)$$

$$E_{step} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (6c_s\rho_s + 1000) \quad (18)$$

E. Ground Potential Rise

The ground potential rise can be directly computed by using the equation from IEEE Standard 80-2000 edition as follows[1]:

$$GPR = I_G R_T \quad (19)$$

where

$$I_G = D_f S_f I_f \quad (20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F. Mesh Voltage

The maximum mesh voltage for a ground electrode buried in two layer soil can be determined by [5]:

$$E_m = C_m K_m K_i \rho_1 \frac{I_g}{L_m} \quad (21)$$

The K_m , K_i , and L_m can be obtained from the geometrical parameters of the electrode [1].

where C_m is the nonuniformity correction factor for mesh-voltages which can be determined by [5]

$$C_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \quad (22)$$

where

$$x = \begin{cases} 0.042 \log_{10}(3.53H)(\log_{10} N)^2 - 0.5 \log_{10}\left(\frac{H}{6}\right) & \text{for } \rho_2 < \rho_1 \\ 0.12 \log_{10}(N\sqrt{A}) - 0.16 \log_{10}(4.6H) & \text{for } \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (23)$$

In (23) H is in m and A in m².

G. Step Voltage

The maximum step voltage for a ground electrode buried in two layer soil can be determined by [6]:

$$E_s = C_s K_s K_i \rho \frac{I_g}{L_s} \quad (24)$$

The K_s , K_i , L_s , can be obtained from the geometrical parameters of the electrode [6].

where C_s is the nonuniformity correction factor for step-voltages which can be determined by [6]

$$C_s = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^y \quad (25)$$

where

$$y = \begin{cases} 0.475 \log_{10} \left(140 \sqrt{\frac{NA_0}{A}} \right) + 0.14 \log_{10} \left(\frac{H}{H_0} \right) & \text{for } \rho_2 < \rho_1 \\ 0.032 \log_{10}(2850N) \cdot \log_{10} \left(2810 \frac{H_0}{H} \right) & \text{for } \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (26)$$

where N is the total number of grid meshes.

IV. COMPARISON OF RESULTS

The comparison results based on the two substations are represented in 2 sections.

A. Analysis of two-layer soil parameters.

The experimental apparent soil resistance values obtained from filed measurement at the two substations used to calculate ρ_1 , ρ_2 and h_1 using MATLAB program and RESAP module of CDEGS software as shown in Table I-II.

TABLE I PARAMETERS RESULTS OF PHITSANULOK 3 SUBSTATION

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
ρ_1 [Ω m]	26.7859	26.4845	1.12
ρ_2 [Ω m]	10.0697	9.9825	0.86
h_1 [m]	1.8737	1.9346	3.25

TABLE II PARAMETERS RESULTS OF NANGRONG SUBSTATION

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
ρ_1 [Ω m]	18.7504	18.3869	1.94
ρ_2 [Ω m]	32.0968	31.9844	0.35
h_1 [m]	0.8034	0.7442	7.37

According to the results, the value of horizontal two-layer soil parameters (ρ_1 , ρ_2 and h_1) calculated from MATLAB and CDEGS are similar, the differences in parameter values are less than 10 percent. Unexpectedly, the theoretical apparent resistance values calculated from ρ_1 , ρ_2 and h_1 using MATLAB are slightly similar to experimental apparent resistance values rather than using CDEGS as shown in (Figs 1&2).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

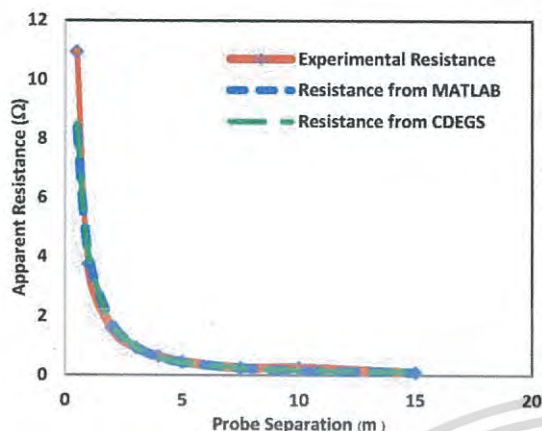


Fig. 1. Comparison of experimental and theoretical apparent soil resistance values at Phitsanulok 3 substation.

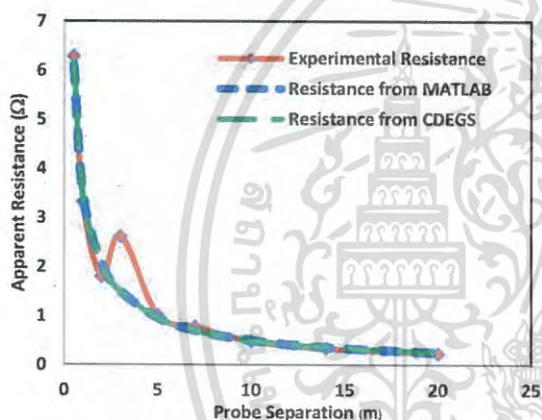


Fig. 2. Comparison of experimental and theoretical apparent soil resistance values at Nangrong substation.

B. Calculation of parameters for safety evaluation.

Following to IEEE80-2000 standard, the values of R_g , GPR, E_m and E_s were calculated for ensuring the operator safety. These values from the two substations were obtained using MATLAB program and MALT module of CDEGS software as shown in Table III-IV.

TABLE III. RESULTS COMPARISON OF PHITSANULOK 3 SUBSTATION

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
R_g [Ω]	0.06923	0.06762	2.32
GPR [V]	1308.6	1278.099	2.32
E_m [V]	375.52	371.4856	1.07
E_s [V]	54.02	61.6125	14.05

TABLE IV. RESULTS COMPARISON OF NANGRONG SUBSTATION

PARAMETERS	CDEGS	MATLAB	DIFFERENT (%)
R_g [Ω]	0.36519	0.3662	0.27
GPR [V]	6902.2	6921.6469	0.27
E_m [V]	825.44	800.6535	3.00
E_s [V]	432.56	477.2419	10.32

According to the calculation results, in table III and IV, the R_g and the GPR obtained from MATLAB are similar to CDEGS within 2 percent different. However, the E_m and the E_s are slightly different. Possibly, results obtained from MATLAB were calculated using more updated formulas [5-6].

V. CONCLUSION

The designed substation grounding system of non-uniform soil using MATLAB program compared to CDEGS software was represented. The parameters of horizontal two-layer soil values computed by MATLAB program are similar to the values obtained from CDEGS software indicating that this calculation using MATLAB can be an alternative aside from using RESAP module of CDEGS software.

Additionally, the values of parameters for safety evaluation are somewhat comparable indicating that the values obtained from MATLAB can be an option apart from using MALT module of CDEGS software.

However, this designed using MATLAB may substitute only some parts of the two modules which were mentioned earlier. Therefore, additional design should be performed to extend the utilization of MATLAB program for not only more cost-effective but practical alternative.

REFERENCES

- [1] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for safety in AC substation grounding," New York, U.S.A, 2000.
- [2] I.F. Gonos and I.A. Stathopoulos, "Estimation of multilayer soil parameters" IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 100-106, Jan. 2005.
- [3] C. Xiaobin, W. Guangning, "New method for calculating ground resistance of grounding grids buried in horizon two-layer" Proceedings of the International Conference on High Voltage Engineering and Application, China, November 9-13, 2008.
- [4] Y. L. Chow, M. M. Elsherbiny and M. M. Salama, "Resistance formulas of grounding systems in two-layer earth," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, pp. 1330-1336, 1996.
- [5] Nahman, J. M., and Salamon, D., "Maximum step voltages of combined grid-multiple rods ground electrodes" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1343-1348, July, 1996.
- [6] Nahman, J. M., and Salamon, D., "Nonuniformity correction factors for maximum mesh-voltages of combined grid-multiple rods electrodes" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 3, pp. 757-761, July, 1998.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายประทีป คาพิจารณ์
วัน เดือน ปีเกิด	22 มิถุนายน 2531 ที่จังหวัดอ่างทอง
ที่อยู่	695/ช หมู่ 2 ตำบลป่าโมก อำเภอป่าโมก จังหวัดอ่างทอง 14130 โทร.086-055-9936
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2553
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบ และทดสอบการต่อลงดิน 2.) การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน 3.) การประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
ผลงานทางวิชาการ	1.ประทีป คาพิจารณ์. “การประมาณค่าองค์ประกอบของชั้นดินสองชั้นใน แนวระดับโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม.” การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39, เล่มที่ 1, พฤศจิกายน 2559, หน้า 29-32. 2.Prateep Kapijan. “Grounding System Design of Substation Using Matlab Program.” The 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON2017), 8-10 march 2017
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2554 – พ.ศ. 2555 วิศวกรไฟฟ้า บริษัท ดับเบิล เอ (1991) จำกัด (มหาชน) พ.ศ. 2555 – พ.ศ. 2557 วิศวกรระดับ 4 แผนกปฏิบัติการและบำรุงรักษา การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอวังน้อย พ.ศ. 2557 – ปัจจุบัน วิศวกรระดับ 5 แผนกปฏิบัติการและบำรุงรักษา การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอวังน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้