

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย  
โดยใช้โปรแกรม MATLAB

GROUNDING SYSTEM DESIGN OF SUBSTATION  
BY USING MATLAB PROGRAM



จिरพันธ์ ปันประไพ  
JIRAPAN PANPRAPAI

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 60882  
วัน,เดือน,ปี..... 6 ก.ค. 2549

b..... 11591821  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2548  
ISBN 974-15-1732-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



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

**2005**

**ISBN 974-15-1732-7**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้โปรแกรม MATLAB
นักศึกษา	นายจิรพันธ์ ปิ่นประไพ
รหัสประจำตัว	44061013
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สมชาติ จิรีวิภากร

### บทคัดย่อ

จากการศึกษาวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินแบบต่างๆไปตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1] ซึ่งเป็นวิธีออกแบบที่ใช้อย่างแพร่หลายนั้น เมื่อพิจารณาตามหลักเศรษฐศาสตร์ พบว่าการออกแบบที่ได้ นั้นใช้จำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ทำให้ระบบต่อลงดินที่ปลอดภัยดังกล่าวใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่ มากเกินความจำเป็น ส่งผลต่อต้นทุนการก่อสร้างที่สูงตามไปด้วย แม้ว่าผู้ออกแบบจะทราบปัญหาดี และ พยายามลดปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการลองลดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความ ปลอดภัย แล้วทำการคำนวณออกแบบใหม่ เพื่อที่จะได้ระบบต่อลงดินที่ประหยัดและปลอดภัย แต่การ ออกแบบยังคงทำในลักษณะลองผิดลองถูกทำซ้ำหลายครั้ง จึงทำให้การออกแบบยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน [1] ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวถูกสร้างขึ้นและพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรมการออกแบบนี้ สามารถเลือกวิธีการออกแบบแบบต่างๆไป (Conventional Method) และยังสามารถเลือกวิธีการออกแบบ โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Design Method) [2] ได้ เพื่อประหยัดตัวนำ ไฟฟ้า โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงวิธีการใช้งาน โปรแกรม แสดงผลลัพธ์การออกแบบทั้งสองวิธี จากนั้น นำผลลัพธ์การออกแบบที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าวิธีการออกแบบโดยเทคนิคการใช้ แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสามารถลดปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าได้มากถึงร้อยละ 11.83 อีกทั้งยังลดเวลา การออกแบบจากวิธีเดิมลงอย่างมาก และโปรแกรมสามารถพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บ เป็นข้อมูล (Hard Copy) ได้ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้นำเสนอทฤษฎี วิธีการออกแบบ รวมทั้ง พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัย โดยจะพิจารณาจากเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และเกณฑ์ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ รวมทั้งปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าทั้งสอง เช่น ขนาดและจำนวนตัวนำไฟฟ้า รูปร่างของตะแกรง กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ตะแกรง ค่าความต้านทานดิน และอื่นๆ โดยโปรแกรมนี้สามารถจำลองการออกแบบเพื่อทดลองปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆเพื่อการเรียนรู้ และศึกษาว่าปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนนั้นส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage) และ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ในทิศทางอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Optimal Grounding System Design Technique for Substation by Using MATLAB Program
<b>Student</b>	Mr.Jirapan Panprapai
<b>Student ID</b>	44061013
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Adviser</b>	Assist.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn

### ABSTRACT

When using economical principle to consider widely accepted the conventional method, many disadvantages have been found namely the designed grounding system use too many conductors. This directly affects the cost of construction, which is very high. Although the designer recognizes this problem and try to reduce conductors in order to get the optimal design by decreasing factors influence safety and recalculating in order to get the most valuable and safe grounding system design, however, the design is trial and error and it is a numerical analysis method. Therefore, designing is complicated and complex. As a result, this article presents an effective grounding system design program for substation based on the requirement of IEEE Std.80-2000 [1]. This program was created and developed by MATLAB program. Using this program you can choose conventional method design or optimal method design [2] to reduce the number of conductors and ensure the safety of substation. This thesis also presents the instruction and results of such program for both two methods. Afterward the comparison of two results will be presented, which found that the optimal design method was able to reduce conductors for up to 11.83 %. In addition, it reduces designing time much more than the original method and the program is able to print out the hard copy as well. In addition to article, theory and methods of safety design and effecting factors of grounding system design are studied. Maximum touch & step voltage criteria are discussed. The program can vary value of various factors for study that how effect to these voltages and program is simply designed for using, can interface with designer by GUI, and produces results of design and using a little time for design which is the advantages of this program.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร ที่ให้โอกาส ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาทั้งงานวิจัย และอื่นๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.มณฑล ติลาจินดาไกรฤกษ์ และ ศศ.ดร.อนันท์วัฒน์ คุณากร กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจ คำปรึกษา การช่วยเหลือ และมอบสิ่งที่ดีเสมอมาแก่ข้าพเจ้า เพียงเพื่อมุ่งหวังให้ข้าพเจ้านั้นประสบความสำเร็จในชีวิต

สุดท้ายขอขอบคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย ของข้าพเจ้า ที่ให้โอกาส ให้การสนับสนุนการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบให้กับ บิดา มารดา และพี่ชาย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งรวมทั้ง ศศ.ดร.สมชาติ จิริวิภากร ที่เป็นมากกว่าผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าจนถึงทุกวันนี้

จิรพันธ์ ปั้นประไพ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
<b>บทที่ 2 จุดประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดินและเกณฑ์การพิจารณาความปลอดภัย.....</b>	<b>4</b>
2.1 จุดประสงค์การออกแบบระบบการต่อลงดิน.....	4
2.2 นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดิน.....	5
2.3 หลักการการพิจารณาการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	12
2.4 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย.....	12
2.5 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบต่อลงดิน.....	13
2.6 พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ร่างกายทนได้.....	15
2.7 การจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้.....	17
2.8 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ.....	21
2.9 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า .....	26
2.11 พื้นฐานเหตุการณ์การเกิดอันตรายต่อบุคคลเมื่อเกิดสภาวะที่ผิดปกติ.....	30
<b>บทที่ 3 องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน .....</b>	<b>34</b>
3.1 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน .....	34
3.2 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน .....	34
3.3 การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน .....	36
3.4 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grounding system resistance) .....	37
3.5 ค่ากระแสไฟฟ้าตะแกรง (Grid Current).....	39
3.6 การวิเคราะห์ความผิดปกติแบบ ไม่สมมาตร.....	42
<b>บทที่ 4 การออกแบบระบบต่อลงดิน.....</b>	<b>47</b>
4.1 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าตะแกรง และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุด .....	47
4.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 .....	54
4.3 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 .....	57
4.4 ทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	74
4.5 แนะนำโปรแกรม MATLAB.....	98
4.6 แนะนำโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	111
<b>บทที่ 5 ผลลัพธ์การออกแบบโดยใช้โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน .....</b>	<b>123</b>
5.1 การออกแบบระบบต่อลงดิน .....	123
5.2 การออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000:.....	123
5.3 การออกแบบด้วยเทคนิคออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม .....	127
<b>บทที่ 6 สรุปผลการทดลองการออกแบบ.....</b>	<b>132</b>
6.1 ผลการทดลองจากซอฟต์แวร์ โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น.....	132
6.2 ผลการออกแบบจากโปรแกรม EPRI TR-100622 สำหรับตะแกรงต่อลงดินที่จัด ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าที่เท่ากัน [1].....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการออกแบบจากโปรแกรม EPRI TR-100622 สำหรับตะแกรงต่อลงดินที่จัด ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าที่ไม่เท่ากัน [1].....	135
บรรณานุกรม.....	129
ประวัติผู้เขียน.....	131



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นแท่งตัวนำไฟฟ้า.....	38
2	รูปแบบและโอกาสของการเกิดความผิดปกติของแบบไม่สมมาตร.....	43
3	ดัชนีตัวแปรสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน .....	47
4	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการที่ 4.35.....	91
5	ค่าผลลัพธ์โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม .....	129



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาVIIเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของกระแสผิดพลาด (Fault current) และค่าของ $I_f$ , $I_r$ และ $D_f$ ในช่วงเวลาการเกิดความผิดพลาด $t_f$ .....	7
2.2 แสดงตะแกรงต่อลงดินขนาด 24 ช่องตะแกรงต่อเชื่อมกับหลักดิน 11 แห่ง.....	8
2.3 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน.....	9
2.4 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อหัวใจต่อน้ำหนักของสัตว์ในหลายๆพันธุกรรมซึ่งพิจารณาบนระยะเวลาของการช็อคของกระแสไฟฟ้า.....	19
2.5 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายต่อเวลา .....	20
2.6 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (1).....	23
2.7 แสดงวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันสัมผัส .....	23
2.8 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว .....	25
2.9 แสดงวงจรสมมูลขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว .....	25
2.10 แสดงการ โรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า .....	26
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_s$ กับ $h_f$ .....	30
2.12 รูปแบบการเกิดไฟฟ้าลัดวงจรผ่านร่างกาย ซึ่งมี 5 ลักษณะ .....	31
2.13 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transferred Potential).....	32
3.1 แสดงค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย $I_f$ , $I_r$ และค่า dc Offset ที่เกิดขึ้น [1] .	39
3.2 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อ ไม่มีการต่อนิวทรอลลงดิน .....	40
3.3 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อมีการต่อนิวทรอลลงดิน [1].....	41
3.4 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อมีการต่อนิวทรอลลงดิน [1].....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5	ไดอะแกรมของการเกิดความผิดพลาดระหว่างไลน์กับดินที่ขั้วเฟส a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิวทรัลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกแตนซ์ .....	44
3.6	การต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลดเมื่อเกิดความผิดพลาดระหว่างไลน์กับดินที่ขั้วของเฟส a.....	46
4.1	แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน [1].....	52
4.2	ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อเชื่อม .....	54
4.3	ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง ยาว 7.5 m จำนวน 20 แท่งต่อเชื่อมอยู่ด้วย .....	61
4.6	ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อเชื่อม.....	
4.7	ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งยาว 7.5 m จำนวน 20 แท่งต่อเชื่อมอยู่ด้วย.....	66
4.8	ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) จำนวน 38 แท่ง แต่ละแท่งยาว 10 m .....	70
4.9	ตะแกรงต่อลงดินรูปตัวแอลต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rods) 24 แท่งแต่ละแท่งยาว 7.5 m.....	73
4.10	ตะแกรงต่อลงดินแบบ ก. มีแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรง และค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าแบบ ข. ....	78
4.11	การแบ่งชั้นตามค่าความต้านทานของ IEEE Std. 80-2000 [1].....	82
4.12	การจัดตะแกรงต่อลงดินแบบ Exponent Regularity [2].....	83
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการบีบและแรงดันไฟฟ้าสัมผัส .....	86
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OCR กับค่าความหนาของดินชั้นบน $h$ .....	88
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า OCR และค่า $K$ เมื่อความยาวด้านของระบบต่อลงดินมีค่าเป็น 100 เมตร.....	89
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OCR และตะแกรงต่อลงดินที่มีค่า $K$ เท่ากับ -0.3.....	90
4.18	ตะแกรงต่อลงดินสำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อค่า OCR.....	92
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง OCR และค่า $K$ .....	92
4.20	เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมากที่สุด และค่า $K$ ในการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement).....	93
4.21	อิทธิพลของค่า $K$ ต่อค่า OCR.....	93

4.22	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดในการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในการจัดแบบเหมาะสมที่สุดภายใต้ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งที่ต่างกัน .....	94
4.23	แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ..	95
4.24	ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งยาว 9.2 เมตร จำนวน 25 แท่ง .....	97
4.25	โครงร่างแรงดันไฟฟ้าพื้นผิวแนวทแยงมุมสำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน .....	97
4.26	รุ่นของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้.....	100
4.27	องค์ประกอบของวินโดว์เพื่อใช้สร้าง GUI.....	102
4.28	โครงร่างของกราฟิกคร่าวๆบนกระดาษที่จะนำมาสร้างโดย GUIDE.....	103
4.29	เมื่อคลิกที่ Link ชื่อ Layout Editor with completed GUI Layout.....	104
4.30	เมื่อคลิก Link ที่ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File.....	104
4.31	การเปิดวินโดว์ Layout Editor โดยการพิมพ์ guide ที่ MATLAB prompt ที่หน้า Command Window.....	105
4.32	วินโดว์ GUIDE Quick Start.....	106
4.33	รูปแสดงวิธีการเพิ่มขนาดของพื้นที่การสร้าง GUI.....	107
4.34	วินโดว์ Property Inspector เพื่อการตั้งค่าของ Figure สำหรับ GUI.....	108
4.35	การสร้างองค์ประกอบ Object.....	108
4.36	แสดงวิธีการจัด Object.....	109
4.37	วินโดว์เตือนให้ Save ไฟล์ล่าสุด.....	110
4.38	วินโดว์ GUIDE เพื่อเลือกทางเดินของไฟล์ (Path).....	110
4.39	เมื่อลอง RUN โปรแกรมจะได้ดังรูป.....	111
4.40	วินโดว์แรกสู่การออกแบบระบบการต่อลงดิน .....	112
4.41	วินโดว์ลำดับที่สองสำหรับการคำนวณกระแสไฟฟ้าผิวดวง และสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์แวดล้อมเพื่อใช้ในการคำนวณค่า $K$ และ $C_s$ .....	113
4.42	ส่วนประกอบของวินโดว์ลำดับสองซีกซ้าย .....	114
4.43	ส่วนประกอบวินโดว์ลำดับที่สองซีกขวา .....	115
4.44	วินโดว์ลำดับที่สามของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน .....	115
4.45	ประเภทของวัสดุในป๊อปป์เมนูของ Material Constant Study.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.46	วินโดว์ Help บานที่ 1 เป็นตัวอย่างเพื่อช่วยในการป้อนข้อมูล.....	118
4.47	วินโดว์ Help บานที่ 2 เป็นตัวอย่างเพื่อช่วยในการป้อนข้อมูล.....	119
4.48	วินโดว์ผลลัพธ์ของโปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดินรูปที่ 4.44 การเลือกโหมดการ ออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสม (Optimal Design Method).....	120
4.49	การเลือกโหมดการออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสม (Optimal Design Method) เมื่อคลิกเลือกโหมดจาก Tool Bar แล้วจะพบวินโดว์ตามรูปที่ 4.45 ถูกเปิดขึ้น.....	121
4.51	วินโดว์ Optimal Grounding System Design.....	122
5.1	ลักษณะของตะแกรงที่ใช้ออกแบบระบบต่อลงดิน [1].....	124
5.2	วินโดว์แรกของ โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน .....	125
5.3	แถบเครื่องมือ และตัวเลือกการใช้งานของ โปรแกรม .....	125
5.4	วินโดว์สำหรับการคำนวณและป้อนค่าเบื้องต้น .....	126
5.5	วินโดว์สำหรับคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆหลังการออกแบบ .....	126
5.6	วินโดว์แนะนำการป้อนค่าให้ถูกต้อง .....	127
5.7	วินโดว์แสดงผลลัพธ์ออกแบบโดยวิธีออกแบบระบบต่อลงดินแบบต่างๆ ไป .....	128
5.8	วินโดว์ออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม.....	129
5.9	ลักษณะตะแกรงที่ถูกออกแบบ โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม .....	129
5.10	วินโดว์ที่ 3 หลังจากป้อนค่าตัวแปรที่ได้จากวิธี Optimal Design.....	130
5.11	วินโดว์แสดงผลลัพธ์การออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม .....	130
5.12	รายงานการออกแบบเมื่อถูกพิมพ์ออกมาจาก โปรแกรม .....	131
6.1	ตะแกรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อจัดให้ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากันโดยตะแกรง ต่อเชื่อมกับกราวด์หรือค้ำในดิน 2 ชั้น.....	134
6.2	เส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าสำหรับตะแกรงดังรูปที่ 6.1 ในแบบจำลองดิน 2 ชั้น.....	135
6.3	ตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างของตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันต่อเชื่อมกับกราวด์หรือค้ำ เมตร.....	136
6.4	แรงดันไฟฟ้าของตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าตามรูปที่ 6.3.....	136

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าข้อย่อยนั้นมีอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งในส่วนภาคกำลังและภาคควบคุมอยู่เป็นจำนวนมากมาที่ถูกรวมเข้าเป็นระบบเดียวกัน (Integrated System) เพื่อให้ทำงานประสานกัน ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ต้องการ

ระบบ (System) ที่ดีนั้นควรจะสามารถป้องกันความเสียหายของระบบได้ด้วยตัวระบบเอง เช่น การตรวจจับสิ่งผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น แรงดันไฟฟ้าเกิน (Over Voltage) หรือกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ (Fault Current) เป็นต้น ดังนั้นเมื่อเกิดเหตุการณ์ซึ่งเป็นเหตุที่ผิดปกติขึ้นมาแล้วก็ควรจะ สามารถป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านั้น ไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น ได้ ซึ่งบางครั้งความผิดปกติทางไฟฟ้า (Fault) ที่เกิดอาจเป็นแค่ความผิดปกติแบบชั่วคราว ดังนั้น เมื่อความผิดปกติถูกขจัดไปแล้ว ระบบทั้งระบบควรจะสามารถทำงานต่อได้ทันทีโดยที่อุปกรณ์ภายในระบบไม่ได้รับความเสียหายจากภาวะผิดปกติที่เกิดขึ้น

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าข้อย่อยจึงเป็นส่วนหนึ่งของแผนการป้องกัน (Protective Scheme) ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในระบบ โดยระบบต่อลงดินมีไว้เพื่อใช้เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้ลัดวงจรให้สามารถไหลลงดินได้อย่างเร็วที่สุด โดยที่จะไม่มีส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ ไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าตัวใดเลย

แต่สิ่งสำคัญที่สุดของการป้องกัน คือ การปกป้องชีวิตของผู้ปฏิบัติงานภายในพื้นที่สถานีให้ ได้รับความปลอดภัยจากภาวะที่ระบบอยู่ในภาวะผิดปกติ (Fault Situation) เพราะในขณะที่เกิด ภาวะดังกล่าว ความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าจะอุบัติขึ้นภายในและบริเวณรอบๆ ของสถานี ไฟฟ้าข้อย่อย ทำให้ผู้ปฏิบัติงานอยู่ในฐานะที่เสี่ยงต่อการ โดนไฟฟ้าช็อต ถ้าร่างกายอยู่ในลักษณะของ สะพานไฟฟ้าที่ตกร่วมศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับบาดเจ็บถึงเสียชีวิตได้ ถ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าเกณฑ์ที่มนุษย์นั้นทนได้

ดังนั้นการสร้างระบบต่อลงดินไว้เพื่อการป้องกันจึงมีความสำคัญมาก เพราะนอกจากจะป้องกัน ความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าแล้ว ยังแน่ใจหรือมั่นใจได้ว่าผู้ปฏิบัติงานภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้า ดังกล่าวจะมีความปลอดภัยจากการ โดนไฟฟ้าช็อต ซึ่งการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ข้อย่อยได้ถูกพัฒนา ค้นคว้ามาตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานการออกแบบที่นิยม และเป็นมาตรฐานสากล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Open Standard) มาตรฐานหนึ่ง คือ มาตรฐาน IEEE Std.80-2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับอย่างกว้างขวางทั่วโลก อีกทั้งยังมีการค้นคว้าวิจัยพัฒนาการออกแบบอย่างต่อเนื่องและก้าวหน้า

วิทยานิพนธ์นี้จึงหยิบประเด็นในส่วนของ การออกแบบระบบต่อลงดินที่ประหยัดแห่งตัวนำไฟฟ้า และการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB มาเป็นเครื่องมือในการค้นคว้าวิจัย เพื่อให้ได้ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ ใช้งานง่ายเหมาะกับการนำไปใช้ออกแบบได้จริงในทางปฏิบัติ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความปลอดภัยของบุคคลในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ดังนั้นการที่จะลดอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าทั้งสองได้นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องลดแรงดันไฟฟ้าที่กระจาย (Gradient Voltage) บนพื้นของสถานีไฟฟ้าย่อย และกำหนดทางเดินของกระแสไฟฟ้าผิดปกติ (Fault Current) ให้ไหลลงดินในช่องทางที่กำหนดไว้

ดังนั้นการสร้างตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid) ไว้ใต้ผิวดินและทำการเดินสายดินจากอุปกรณ์ไฟฟ้า โครงสร้างอาคาร และอื่นๆ ไปยังตะแกรงต่อลงดินก็เพื่อประโยชน์ในการลดค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง และจัดสร้างทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติให้ไหลลงสู่ดิน นั่นเอง

ปริมาณแห่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินมีผลอย่างมากในการช่วยกระจายกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติลงสู่ดิน เพราะแห่งตัวนำไฟฟ้าทั้งแนวนอน (Horizontal Conductor or Grid) และแห่งตัวนำไฟฟ้าทั้งแนวตั้ง (Ground Rod, Vertical Conductor or Vertical Electrode) จะช่วยนำกระแสไฟฟ้าผิดปกติเป็นอย่างดี เนื่องจากระบบต่อลงดินนั้นยังมีแห่งตัวนำไฟฟ้ามากเท่าไร ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินจะยิ่งต่ำมากเท่านั้น แต่การใช้แห่งตัวนำไฟฟ้าที่มากที่สุดเพียงเพื่อต้องการให้ระบบมีความปลอดภัย กลับมีข้อเสียตรงที่ ระบบต่อลงดินนั้น ใช้แห่งตัวนำไฟฟ้าที่เปลืองมากเกินความจำเป็น

ดังนั้นทำอย่างไรที่จะสามารถลดการใช้แห่งตัวนำไฟฟ้าโดยที่ระบบนั้นยังคงปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ในพื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อย และผู้ออกแบบเองนั้นก็ยังมีเครื่องมือสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้แห่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมได้

## 1.2 ความมุ่งหมายละวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาการออกแบบระบบต่อลงดิน เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์โปรแกรม มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อสร้างซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบระบบต่อลงดินที่มีความสามารถในการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 และซอฟต์แวร์ที่สร้างมานั้น สามารถออกแบบตะแกรงต่อลงดิน โดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมได้
2. เพื่อเป็นกรณีศึกษา ฐานข้อมูล ข้อสรุป และนำไปใช้อ้างอิง เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินในรูปแบบใหม่ๆ ให้มีความล้ำหน้าต่อไปในอนาคต
3. เพื่อเอื้อประโยชน์ และอำนวยความสะดวกต่อผู้ออกแบบ รวมทั้งผู้ที่สนใจทั่วไป
4. เพื่อขยายผลของการศึกษาไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ลดการนำเข้า ด้วยการผลิตซอฟต์แวร์โปรแกรมใช้เองภายในประเทศ ทำให้สามารถลดการนำเข้าซอฟต์แวร์โปรแกรมจากต่างประเทศ

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบระบบต่อลงดินสามารถทำให้ประหยัดแท่งตัวนำไฟฟ้าได้โดยใช้หลักการ และทฤษฎีการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดผสมผสานกับการออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000

โดยโปรแกรม MATLAB จะถูกนำมาใช้พัฒนาเพื่อเป็นตัวกลางสำหรับวิศวกรไฟฟ้าในฐานะผู้ออกแบบให้สามารถออกแบบระบบต่อลงดินที่ประหยัดแท่งตัวนำไฟฟ้า และสามารถสร้างความปลอดภัยให้แก่บุคคล และอุปกรณ์ไฟฟ้า ภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยได้

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

มาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 [1] ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบ และประยุกต์ทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม [2] โดยโปรแกรม MATLAB ถูกนำมาเป็นเครื่องมือเพื่อใช้แก้ปัญหาทางด้านการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยมีรายละเอียดของขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ ของ IEEE Std. 80-2000 [1] เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินในทางปฏิบัติ
2. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ งานวิจัยของ Weimin SUN, Qi SU, Jinliang HE and others [2] เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการประยุกต์ ของโปรแกรม MATLAB เพื่อเขียน โปรแกรม และการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (Graphical User Interface, *GUI*) [15] และ [16]
4. ซอฟต์แวร์โปรแกรมที่สร้างสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินที่พิจารณาเป็นดินชั้นเดียว (Uniform Soil)
5. สร้างซอฟต์แวร์โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน ภายหลังจากศึกษาหลักการต่างๆ เป็นอย่างดีแล้ว โดยพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB โดยซอฟต์แวร์โปรแกรมนั้นมีตัวเลือก (Options) เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายดังนี้
  - 5.1 ซอฟต์แวร์โปรแกรมสามารถออกแบบระบบต่อลงดินตามพื้นที่ต่างๆได้ 4 รูปแบบ คือ พื้นที่รูปสี่เหลี่ยม พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นที่รูปตัวแอล (L Shaped) และรูปตัวที (T-Shaped) สำหรับวิธีการออกแบบแบบทั่วไป (Conventional Design Method)
  - 5.2 ซอฟต์แวร์โปรแกรมสามารถออกแบบระบบต่อลงดินตามพื้นที่ต่างๆได้ 2 รูปแบบ คือ พื้นที่รูปสี่เหลี่ยม พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับวิธีออกแบบโดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Design)
  - 5.3 คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร แบบ Single Line to Ground Fault และสามารถกำหนดตำแหน่งลัดวงจรได้ เช่น บัสไฟฟ้าแรงดันสูง หรือ บัสไฟฟ้าแรงดันต่ำ ของหม้อแปลงไฟฟ้า
  - 5.4 เมื่อเกิดภาวะผิดปกติ (Fault) การศึกษานี้จะพิจารณาในสถานะคงตัว (Steady State)
  - 5.5 ไม่พิจารณาผลของดินที่ตำแหน่งไกลออกไปจากพื้นที่สถานีไฟฟ้า (Remote Ground)
6. เลือกโหมด หรือวิธีการออกแบบได้ 2 วิธี คือ
  - 6.1 วิธีการออกแบบแบบทั่วไป (Conventional Method)
  - 6.2 วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม (Optimal Design Method)
7. ซอฟต์แวร์ที่พัฒนามานั้น สามารถเก็บ และแสดงค่าจำเพาะของวัสดุนำไฟฟ้า (Material Constants) ตาม IEEE Std.80-2000 และรวมทั้งค่าต่างๆที่เป็นค่าคงที่ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลหรือฐานข้อมูล ให้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ ได้ทันทีโดยซอฟต์แวร์
8. สามารถจำลอง (Simulate) ออกแบบระบบต่อลงดินเพื่อประโยชน์ทางการศึกษาได้

## บทที่ 2

# จุดประสงค์การออกแบบระบบต่อลงดินและเกณฑ์การพิจารณา ความปลอดภัย

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าจะพิจารณาที่ความปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก โดยตัวแปรบ่งชี้ว่าการออกแบบระบบต่อลงดินนั้นมีมาตรฐาน และมีความปลอดภัยอย่างไรนั้น จะพิจารณาจากเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Touch and Step Voltage Criteria:  $E_{touch}$ ,  $E_{step}$ ) [1] ซึ่งคำนวณได้จากสูตรคำนวณตามมาตรฐานของการออกแบบ และนำค่าของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองมาใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัย เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage:  $E_m$ ) และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage:  $E_s$ ) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง ( $E_m$ ,  $E_s$ ) จะเป็นค่าที่คำนวณได้จากการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง ( $E_m$ ,  $E_s$ ) จะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบระบบต่อลงดินว่ามีจำนวนและขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้า รูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน และความถี่ของช่องตะแกรง เป็นอย่างไร ซึ่งการออกแบบระบบต่อลงดินที่ดีนั้นจะต้องมีค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ (Fault Current) นั้นสามารถกระจายลงดินได้ดี และยังสามารถลดแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_m$ ) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_s$ ) ได้อีกด้วย ซึ่งค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุดของระบบต่อลงดินจะแปรผกผันกับจำนวน พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่นำมาใช้ทำระบบต่อลงดิน นอกจากนี้การลดค่าความต้านทานจำเพาะของดินก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติสามารถกระจายลงสู่ดินได้ดีขึ้น

### 2.1 จุดประสงค์การออกแบบระบบการต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินมีจุดประสงค์หลัก 2 ข้อ คือ

1. เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าให้สามารถไหลลงดินได้สะดวก ทั้งในภาวะที่เกิดกระแสผิดปกติสูงเนื่องจากฟ้าผ่า หรือการลัดวงจรลงดินในระบบ ให้สามารถไหลลงดินได้ โดยไม่สร้างผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้งานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้า
2. เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้ผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับอันตราย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเมื่อมีกระแสปริมาณสูงไหลลงสู่ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับระบบต่อลงดิน

การศึกษาหลักการ และทฤษฎีการออกแบบระบบการต่อลงดิน จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ศึกษาจะต้องเข้าใจความหมาย การนิยาม คำศัพท์เฉพาะ เพื่อให้ผู้ศึกษามีมาตรฐานความเข้าใจที่ตรงกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการศึกษา และการวิจัยที่แพร่หลายและไปในทิศทางเดียวกัน โดยการให้คำนิยาม ผู้เขียนจะอ้างอิงตามมาตรฐานความปลอดภัยในการออกแบบระบบต่อลงดิน IEEE Std. 80-2000 เป็นหลักดังต่อไปนี้

**แท่งหลักสายดินช่วย (Auxiliary ground electrode)** หมายถึง แท่งหลักสายดินที่ถูกออกแบบร่วมกับระบบต่อลงดินเพื่อช่วยหรือเพิ่มช่องทางในการนำกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ (Ground fault current) ไหลลงสู่ดินได้ดีขึ้น

**เปลือกหุ้มต่อเนื่อง (Continuous enclosure)** หมายถึง เปลือกหุ้มบัสในส่วนที่ต่อเนื่องของโครงติดตั้งระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่มีเฟสเหมือนกันถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันเพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ต่อเนื่องไหลผ่านตลอดความยาวเปลือกหุ้มทั้งหมด การเชื่อมประสานแบบไขว้เป็นการต่อเปลือกหุ้มของเฟสอื่นๆ ทำที่ปลายสุดของการติดตั้งและที่จุดกึ่งกลาง

**ออฟเซต ดีซี (dc offset)** หมายถึง ค่าแตกต่างระหว่างคลื่นกระแสไฟฟ้าที่สมมาตร (Symmetrical current wave) และคลื่นกระแสไฟฟ้าที่แท้จริง (Actual current wave) ในระหว่างที่ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ในภาวะทรานเซียนต์ กระแสไฟฟ้าผิดปกติที่แท้จริง (Actual fault current) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับสมมาตร (Symmetrical alternating component) และองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง [Unidirectional (dc) component] องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเป็นขั้วใดขั้วหนึ่ง แต่จะไม่เปลี่ยนขั้วไฟฟ้า และจะลดลงที่อัตราการลดลงบางอัตราที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า ดูรูปที่ 2.1

**ตัวประกอบการลดลง (Decrement factor)** หมายถึง ตัวประกอบปรับเปลี่ยนถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวแปรกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติลงดินไม่สมมาตรในการคำนวณการต่อลงดินที่ปลอดภัย โดยกำหนดค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) สมมูลของคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไม่สมมาตรสำหรับระยะเวลาความผิดปกติ  $t_f$  ที่ให้มา การพิจารณาสำหรับผลของ dc offset แรกเริ่มและการทำให้ช่วงระยะเวลาที่เกิดความผิดปกติ (Fault) ลดน้อยลง

กระแสผิดพลาดไม่สมมาตรประสิทธิผล (Effective Asymmetrical Fault Current) หมายถึง ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square, *RMS*) ของคลื่นกระแสไม่สมมาตรในช่วงเวลาการเกิดความผิดพลาด (fault) ดังรูปที่ 2.1

$$I_f = D_f \times I_r \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $I_f$  คือ กระแสผิดพลาดไม่สมมาตรประสิทธิผล มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)  
 $I_r$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสผิดพลาด (fault current) ลงดินแบบสมมาตร มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)  
 $D_f$  คือ ตัวประกอบการลดลง

กระแสที่เปลือกหุ้ม (Enclosure currents) หมายถึง กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากแรงดัน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเปลือกหุ้มโลหะ โดยกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำไฟฟ้าที่ถูกรวม

ตัวประกอบการแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาด (Fault current division factor) หมายถึง ตัวแปรปัจจัยแทนอัตราส่วนผกผันระหว่างกระแสที่ดวงจรสมมาตรกับกระแสไฟฟ้าส่วนที่ไหลในตะแกรงของสายดินและพื้นดินดินบริเวณรอบๆ

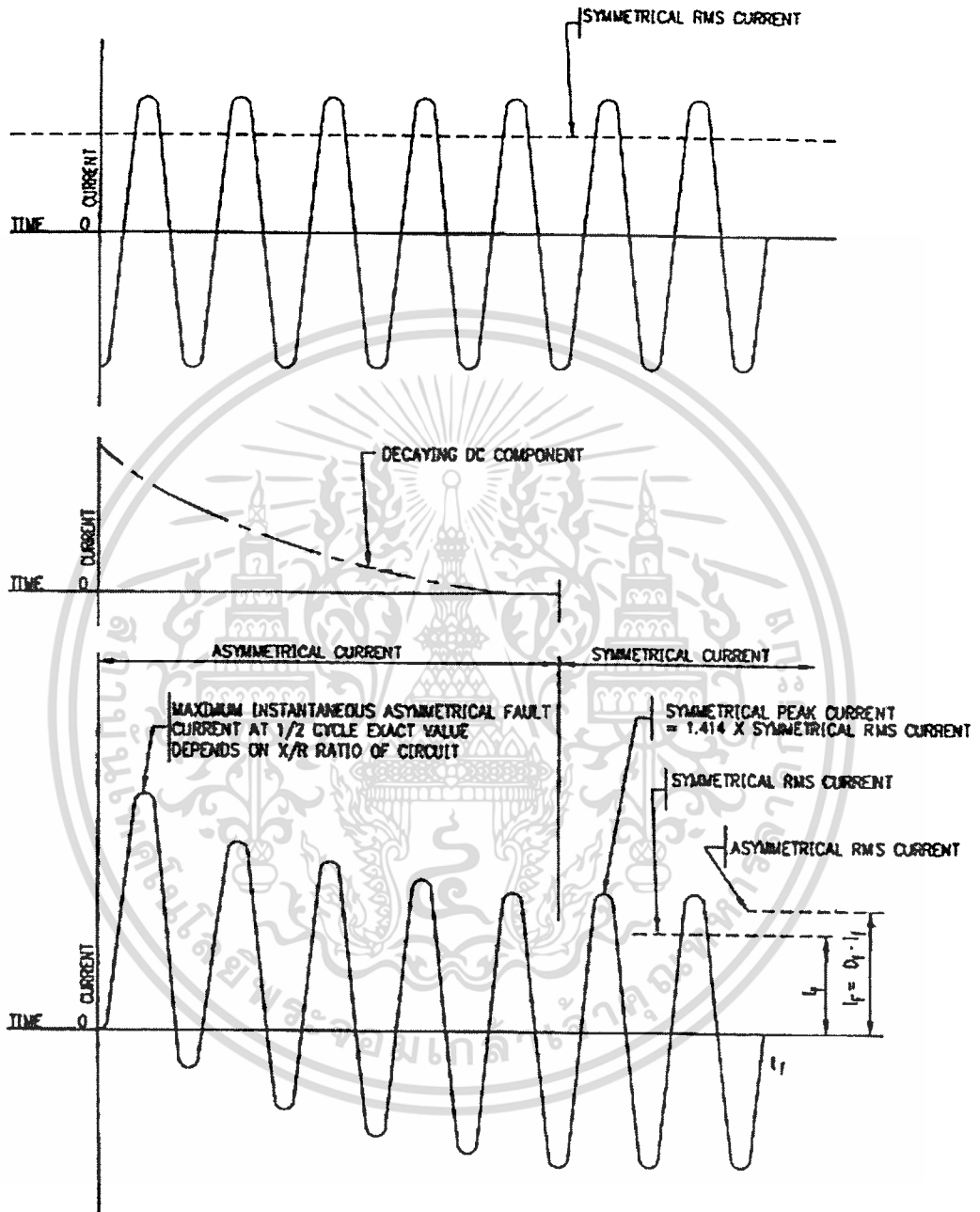
$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $S_f$  คือ ตัวแปรปัจจัยแทนการหารของกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาด (Fault current division factor)  
 $I_g$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงต่อลงดิน (grid current) สมมาตร ในหน่วยแอมแปร์ (A)  
 $I_0$  คือ กระแสผิดพลาดลำดับศูนย์ (The zero-sequence fault current) ในหน่วยแอมแปร์ (A)

สถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้อุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ที่มีก๊าซเป็นฉนวน (Gas-insulated substation) หมายถึง สถานีไฟฟ้าย่อยประเภทหนึ่งแต่แตกต่างกับสถานีไฟฟ้าย่อยทั่วไป ตรงที่อุปกรณ์ทั้งหมด เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ สวิตช์แยกวงจร สวิตช์เลือก สวิตช์ต่อลงดิน บัสบาร์ เหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ในเปลือกหุ้ม (Enclosure) และภายในเปลือกหุ้มจะมีก๊าซ  $SF_6$  เป็นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิน (Ground) หมายถึง ตัวนำทางไฟฟ้า ซึ่งถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างจงใจหรือบังเอิญ โดยที่ดิน (Ground) จะเป็นสถานที่ที่นำกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไหลมาสู่ที่นี้ ซึ่งจะมีการต่อตัวนำไฟฟ้าหรือร่างกายสัมผัสจากอุปกรณ์ไฟฟ้ามาสู่ดิน (Ground)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของกระแสผิดพลาด (Fault current) และค่าของ  $I_f$ ,  $I_r$  และ  $D_f$  ในช่วงเวลาการเกิดความผิดพลาด  $t_f$

การต่อลงดิน (Grounded) หมายถึง การนำ ระบบ วงจร หรืออุปกรณ์ไฟฟ้ามาต่อลงดิน เพื่อสร้างวงจรกลับทางดิน (Ground return circuit) และเพื่อรักษาศักย์ไฟฟ้าของมันให้มีค่าเทียบเท่ากับ ศักย์ไฟฟ้าของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**กระแสดิน (Ground current)** หมายถึง กระแสที่ไหลเข้าดินหรือกระแสที่ไหลออกจากดิน หรือ อุปกรณ์ที่เสมือนเป็นเหมือนดิน

**หลักสายดิน (Ground electrode)** หมายถึง แท่งตัวนำไฟฟ้าที่ฝังลงไปในดินและใช้เพื่อรวบรวม กระแสสายดินและกระจายกระแสสายดินลงดิน

**ศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน (Ground Potential Rise)** หมายถึง แรงดันไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ระบบต่อลงดิน (เมื่อเทียบกับศักดาไฟฟ้าของดินที่อยู่ไกล จากสถานีไฟฟ้าย่อย) ศักดาไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับผลคูณกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดที่ไหลผ่านตะแกรงต่อลงดิน ( $I_g$ ) กับค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ( $R_g$ )

หมายเหตุ-ในภาวะปกติ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อลงดินจะทำงานที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเกือบศูนย์โวลต์ นั่นคือ ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำนิวทรัล ที่ต่อลงดินมีค่าศักย์ไฟฟ้าของดินที่ตำแหน่งไกลออกไป (Remote earth) เหมือนกันทุกอย่าง ระหว่างที่เกิดความผิดปกติหรือลงดิน (Ground fault) ส่วนหนึ่งของกระแสที่ ผิดพร้อม ซึ่งถูกนำไปไหลผ่านตาข่ายสายดินของสถานีไฟฟ้าย่อยลงดิน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ ศักย์ไฟฟ้าของตาข่ายสายดิน เมื่ออ้างถึงดินที่ตำแหน่งไกลออกไป (Remote earth)

**วงจรกลับทางดิน (Ground return circuit)** หมายถึง วงจรที่มีดินหรือร่างกายซึ่งเกี่ยวข้องเป็น ส่วนหนึ่งของวงจร ซึ่งกระแสไหลไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายผ่านดินหรือร่างกายกลับมาครบวงจรที่ แหล่งจ่าย

**ตะแกรงดิน (Grounding grid)** หมายถึง ระบบต่อลงดินที่เกิดจากการนำแท่งตัวนำไฟฟ้ามา สร้างเป็นตะแกรงโลหะในแนวราบ แล้วทำการเชื่อม โลหะในแต่จุดต่อร่วมของแท่งตัวนำไฟฟ้าโดย วิธีเชื่อมโลหะแบบเฉพาะ

หมายเหตุ -ตะแกรงถูกฝังในแนวนอนใกล้ชั้นผิวดิน มีประสิทธิภาพในการควบคุมศักย์ไฟฟ้าเกร เดียนต์พื้นผิวอีกด้วย ตะแกรงต่อลงดินบ่อยครั้งที่จะต้องมีการเพิ่มจำนวนของหลักสายดิน และบาง ทีก็ต่อกับหลักสายดินช่วย เพื่อลดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน ถ้าตำแหน่งดินอยู่ไกล ออกไป (Remote earth)

ระบบการต่อลงดิน (Grounding system) หมายถึง แท่งตัวนำไฟฟ้าต่างๆซึ่งถูกใช้สำหรับนำกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินซึ่งถูกนำมาเชื่อมต่อให้เป็นระบบเดียวกันในพื้นที่ที่พิจารณาให้ต้องมีการสร้างระบบต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

บัสดินหลัก (Main ground bus) หมายถึง แท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเป็นจุดรวมการเชื่อมต่อของสายดินอื่นๆ หรือจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เพื่อต่อไปยังระบบต่อลงดิน ซึ่งบัสหลักดินจะมีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าลัดวงจรจากที่ต่างๆลงดินได้ดี โดยมากอยู่ในตู้ควบคุมไฟฟ้า หรือตู้สวิตช์เกียร์

กระแสตะแกรงสูงสุด (Maximum grid current) หมายถึง ค่าที่ออกแบบของกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงต่อลงดินสูงสุด นิยามดังนี้

$$I_G = D_f \times I_g \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I_G$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงสูงสุด ในหน่วยแอมแปร์ (A)

$D_f$  คือ แฟคเตอร์การลดลงสำหรับช่วงเวลาทั้งหมดของความผิดพลาด  $t_f$  ในหน่วยวินาที (s)

$I_g$  คือ รากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสตะแกรงแบบสมมาตร มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

แรงดันไฟฟ้าเมช (Mesh voltage) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดภายในช่องตะแกรงสี่เหลี่ยมของตะแกรงต่อลงดิน

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะสู่โลหะ (Metal-to-Metal Touch Voltage) หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัตถุหรือ โครงสร้างที่เป็นโลหะที่อยู่ภายในที่ตั้งสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งบางทีกระแสไฟฟ้าไหลข้ามจากมือข้างหนึ่งสู่มืออีกข้างหนึ่ง หรือไหลจากมือสู่เท้า ซึ่งเกิดจากการสัมผัส หมายถึง- แรงดันไฟฟ้าสัมผัสแบบโลหะสู่โลหะระหว่างวัตถุหรือ โครงสร้างที่เป็นโลหะที่ต่อกับตาข่ายของสายดินจะไม่นำมาพิจารณาในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบปกติทั่วไป อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะที่เกิดระหว่างวัตถุหรือ โครงสร้างที่เป็นโลหะที่ต่อกับตาข่ายสายดิน และวัตถุที่เป็น โลหะภายในที่ตั้งสถานีไฟฟ้าย่อย อาจเกิดขึ้นจากเครื่องกั้นที่แยกออกต่างหาก (Isolated fence) แต่เมื่อนำมาต่อกับตาข่ายสายดินบางทีไม่มีความสำคัญเมื่อนำมาพิจารณาในกรณีของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้อุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ที่มีก๊าซเป็นฉนวน (GIS) แรงดันไฟฟ้าสัมผัสแบบโลหะสู่โลหะระหว่างวัตถุหรือ โครงสร้างที่เป็นโลหะที่ต่อกับตาข่ายของสายดินบางทีก็

เป็นสิ่งสำคัญที่จะนำมาพิจารณา เพราะจะมีความผิดพลาดภายใน (Internal fault) หรือกระแสที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำในเปลือกหุ้มในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบปกติทั่วไป (Conventional substation) แรงดันไฟฟ้าสัมผัสในกรณีที่แย่งที่สุดบ่อยๆที่จะพบว่าเป็นความต่างศักย์ระหว่างมือและเท้าที่จุดของ ระยะเอื้อมมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการสัมผัสระหว่างโลหะกับโลหะ จากมือข้างหนึ่งสู่มืออีกข้างหนึ่ง หรือจากมือสู่เท้า ทั้งสองลักษณะควรจะนำมาพิจารณาสืบสาวสำหรับเงื่อนไขในการ เอื้อมที่แย่งที่สุดที่เป็นไปได้ รูปภาพที่ 12 และรูปภาพที่ 13 แสดงให้เห็นลักษณะเหตุการณ์เหล่านี้ สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้อุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ที่มีอากาศเป็นฉนวน (Air-insulated substation) และรูปภาพที่ 14 แสดงลักษณะเหตุการณ์เหล่านี้ในสถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้อุปกรณ์หรือ บริภัณฑ์ที่มีก๊าซเป็นฉนวน (GIS)

**เปลือกหุ้มไม่ต่อเนื่อง (Noncontinuous enclosure)** หมายถึง เปลือกหุ้มบัสกับส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง ของโครงติดตั้งของตัวนำที่มีเฟสเหมือนกันซึ่งถูกแยกจากกันทางไฟฟ้า (หรือ ถูกฉนวนสำหรับแต่ละ อัน) ดังนั้นจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในแต่ละส่วนของเปลือกหุ้ม

**หลักสายดินเบื้องต้น (Primary ground electrode)** หมายถึง หลักสายดินที่ถูกออกแบบ โดยเฉพาะ หรือถูกปรับเปลี่ยนสำหรับการคายประจุของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติลงดิน (Ground fault current) ลงสู่ดิน บ่อยๆที่รูปแบบการคายประจุโดยเฉพาะเป็นความต้องการของการออกแบบ ระบบการต่อลงดิน

**แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage)** หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างเท้าทั้งสองข้าง เนื่องจากเท้าทั้งสองข้างของมนุษย์ยืนอยู่บนเส้นศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่างกันบนพื้น เป็นผลให้เกิดเป็น ทางเดินกระแสไฟฟ้าจากเท้าข้างที่อยู่บนศักย์สูง ไหลขึ้นผ่านร่างกายและ ไหลลงสู่เท้าข้างที่ยืนอยู่ บนศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยมีช่วงก้าวห่างกัน 1 เมตรและอวัยวะส่วนอื่นๆสัมผัสกับวัตถุที่ต่อลงดิน ใดๆเลย

**รีแอกแตนซ์ลับทรานแซียนต์ (Subtransient reactance)** หมายถึง รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่จุดเริ่มต้นของความผิดปกติ (Fault) รีแอกแตนซ์นี้ถูกใช้ในการคำนวณสำหรับ กระแสไฟฟ้าผิดปกติสมมาตรเริ่มต้น กระแสไฟฟาลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่มันจะถูกสมมติว่ามั่นคง ตัว (Steady) ที่ค่าช่วงแรก ประมาณ 0.05 วินาทีหลังจากเกิดความผิดปกติ (Fault)

**วัสดุพื้นผิว (Surface material)** หมายถึง วัสดุที่อยู่บนผิวดิน เช่น หิน กรวด ยางมะตอย หรือ วัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นมา โดยที่วัสดุพื้นผิวนั้นจะมีผลกระทบต่อการไหลผ่านร่างกายเมื่อ เกิดแรงดัน ไฟฟ้าสัมผัส หรือแรงดัน ไฟฟ้าช่วงก้าว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของวัสดุพื้นผิว

แรงดันไฟฟ้าแตะแรงแสมมาตร (Symmetrical grid current) หมายถึง เป็นกระแสไฟฟ้า บางส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติลงดิน (Ground fault current) สมมาตร ซึ่งไหลระหว่างสาย สายดิน และดินที่อยู่รอบๆ ซึ่งแสดงในรูปสมการ (2.4)

$$I_g = S_f \times I_f \quad (2.4)$$

- เมื่อ  $I_g$  คือ กระแสไฟฟ้ารากกำลังสอง (RMS) เฉลี่ยตาข่ายสมมาตร ในหน่วย A  
 $I_f$  คือ กระแสไฟฟ้ารากกำลังสอง (RMS) เฉลี่ยผิดปกติลงดินสมมาตร ในหน่วย A  
 $S_f$  คือ ตัวประกอบการแบ่งกระแสไฟฟ้าสมมาตร

แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch voltage) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ร่างกายของบุคคล ระหว่าง Ground Potential Rise (GPR) และศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวที่จุดที่บุคคลนั้นยืนอยู่ในขณะที่มีมือ นั้นแตะกับโครงสร้างที่ไม่ต่อสายดิน

แรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transferred voltage) หมายถึง เป็นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสกรณีพิเศษ นั่น คือ แรงดันไฟฟ้าที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มาจากจุดที่ไกล ออกไปซึ่งอาจเป็นแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย

แรงดันไฟฟ้าเกินทรานเซียนต์ชนิดเร็วมาก (Very fast transient) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าเกิน ของระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดทรานเซียนต์ชนิดเร็วมาก (VFT) ในขณะที่ VFT เป็นหนึ่งใน ส่วนประกอบหลักของ VFTO ความถี่ต่ำบางความถี่ (ประมาณ 1MHz) เป็นองค์ประกอบบางที่ เสนอผลการ คายประจุของความจุไฟฟ้าที่เป็นก้อน (Lumped capacitance) (หม้อแปลง แรงดันไฟฟ้า) VFTO จะมีค่าไม่เกิน 2.0 pu. หากว่ามีค่าสูงกว่านี้เป็นไปได้ในกรณีเฉพาะ

อัตราส่วน X/R (X/R ratio) หมายถึง อัตราส่วนของรีแอกแตนซ์ ต่อความต้านทานของระบบ เป็นตัวบอกถึงอัตราการกักคร่อนของ dc offset ใดๆ อัตราส่วน X/R ที่สูงจะสอดคล้องกับค่าคงที่ ของเวลาที่สูงและอัตราการกร่อนที่ช้า

สำหรับการนิยามคำเพิ่มเติมสามารถดูเพิ่มเติมได้จาก The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 หลักการการพิจารณาการออกแบบระบบต่อลงดิน

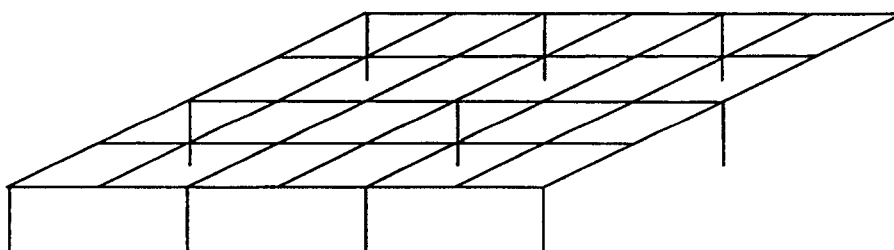
การพิจารณาการออกแบบระบบการต่อลงดินมีหลักการที่ต้องพิจารณาตามลำดับ ดังนี้

1. ศึกษาแบบแปลนของสถานีไฟฟ้าและตำแหน่งที่ต้องของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ
2. สำรวจ และหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
3. หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินสูงสุด และเวลาที่กระแสลัดวงจรไหลในระบบ
4. หาขนาดของตัวนำไฟฟ้าตะแกรงจากกระแสลัดวงจร
5. หาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์จะทนได้โดยไม่เกิดอันตราย
6. กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงสูงสุด
7. วางแนวการฝังตะแกรงต่อลงดินให้ครอบคลุมพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งหมด
8. กำหนดหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน
9. กำหนดหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้น

## 2.4 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจะใช้เป็นแบบตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid) แปะทั้งชั้น เพราะระบบต่อลงดินแบบตะแกรงที่นำมาวางที่ได้ผิวดินบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า จะมีข้อดีที่สำคัญ คือ

1. ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยแบบตะแกรงต่อลงดินนี้สามารถทนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงที่ไหลลงสู่ดินได้ดีกว่าแบบอื่นๆ
2. ระบบต่อลงดินแบบตะแกรงต่อลงดินนี้จะมีค่าความต้านทานน้อย เนื่องจากถ้าตะแกรงต่อลงดินนี้ยังมีแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมยิ่งมากค่าความต้านทานจะยิ่งต่ำ การนำไฟฟ้าจะยิ่งดี

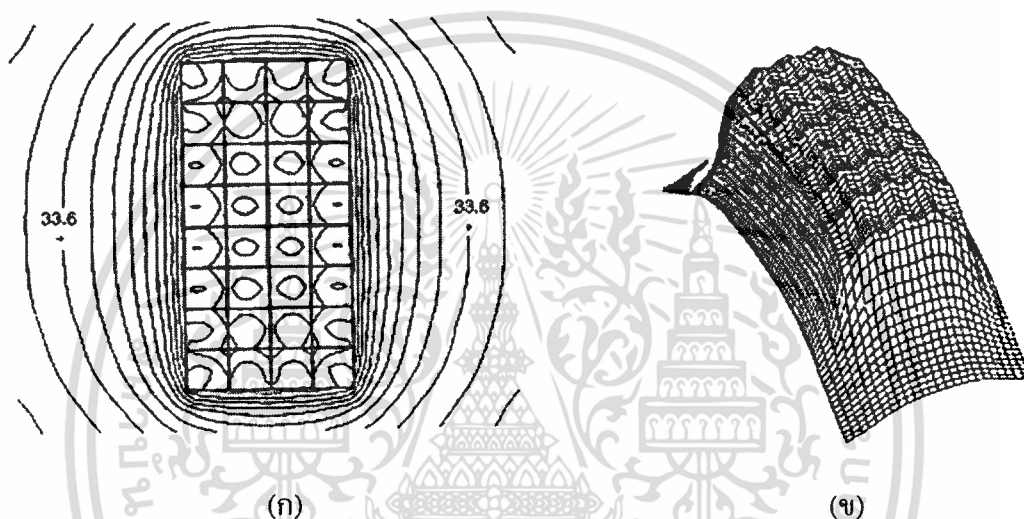


รูปที่ 2.2 แสดงตะแกรงต่อลงดินขนาด 24 ช่องตะแกรงต่อเชื่อมกับหลักดิน 11 แท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 สาเหตุการเกิดอุบัติเหตุภายในระบบต่อลงดิน

เมื่อเกิดสภาวะที่ผิดปกติเหตุภายในระบบต่อลงดิน (Ground Fault Condition) ในพื้นที่สถานีไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลลงดินจะสร้างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวดิน (Potential Gradients) แผ่ขยายไปยังบริเวณรอบๆจุดที่มีกระแสไหลลงดิน กล่าวคือจุดที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินจะให้จุดนั้นเป็นจุดศูนย์กลางและเป็นจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และศักย์ไฟฟ้าจะลดต่ำลงเรื่อยๆเมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางในแนวรัศมีออกไป ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดวงจรลงดิน (2)

- (ก) ตะแกรงต่อลงดินซึ่งในกรณีนี้อาจจะมีหรือไม่มีหลักดินก็จะมีแนวศักย์ไฟฟ้าดังรูปและเส้นสมศักย์ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบ ๆ (ข) แนวเส้นสมศักย์ 3 มิติ (Equipotential Contour)

ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินจะมีค่าที่ไม่เท่ากันในแต่ละแนวเส้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจุดที่เป็นเส้นทางไหลของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรหรือจุดเกิดเหตุจะเป็นจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และศักย์ไฟฟ้าจะลดต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อห่างจากจุดศูนย์กลางในแนวรัศมีออกไป ซึ่งเราจะให้คำจำกัดความนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าพื้นผิว (Potential Gradients, Gradient Voltage) ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอที่กระจายบนผิวดิน ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่เกิดความผิดปกติขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า และมีบุคคลที่อยู่ในพื้นที่เกิดเหตุ และบุคคลนั้นมีส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายสัมผัสหรือยืนอยู่บนแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น มือแตะ โครงตัวถังของอุปกรณ์ที่มีศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในขณะที่เท้าทั้งคู่ยืนอยู่บนศักย์ไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่า ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าช็อตร่างกายเพราะร่างกายจะเปรียบเสมือนสะพาน ไฟให้กระแสไฟฟ้าไหลจากมือสู่เท้าทั้งสองข้างได้ หรือในกรณีที่มือไม่ได้แตะอุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆเลยแต่บังเอิญว่าไม่ได้ยืนในท่าเท้าชิดกัน ซึ่งการยืนท่านี้อาจทำให้เท้าทั้งสองข้างอยู่บนเส้นศักย์ไฟฟ้าคนละเส้นและมีค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกัน ในกรณีเช่นนี้ก็เกิดไฟฟ้าช็อตร่างกายได้เหมือนกันเพราะเมื่อเท้ายืนอยู่บนเส้นศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่างกันตามมาตรฐานระยะห่างเท้าประมาณ 1 เมตร กระแสไฟฟ้าจะต้องไหลจากเท้าข้างที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านร่างกายและไหลลงสู่เท้าข้างที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งเหตุการณ์ลักษณะนี้ก็จะทำอันตรายถึงชีวิตได้ ดังนั้นจะเห็นว่าปัญหาของการเกิดอันตรายต่อบุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้า จะเป็นเรื่องของ การเกิดแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่างกัน เพราะฉะนั้นจึงต้องหาวิธีในการจำกัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถทำให้บุคคลที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับอันตรายถึงแก่ชีวิต สาเหตุที่บุคคลอาจจะได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เกิดศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าไม่สม่ำเสมอขึ้นบนผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณข้างเคียงสามารถสรุปได้ดังนี้ [1]

1. กระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบต่อลงดิน เพราะถ้าระบบต่อลงดินมีขนาดพื้นที่ที่เล็กเกินไปจนไม่สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติในปริมาณที่สูงได้ ระบบต่อลงดินนั้นก็จะไม่ช่วยในการลดศักย์ไฟฟ้าในแต่ละแนวเส้นให้มีค่าใกล้เคียงกันได้ และถ้าพิจารณาในตำแหน่งพื้นที่ที่ไกลออกไปจากจุดศูนย์กลางของจุดเกิดเหตุ ซึ่งเป็นจุดอยู่นอกพื้นที่ตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งเราเรียกว่า Remote Earth ก็จะเกิดศักย์ไฟฟ้าถ่ายโอนขึ้นได้ (Transferred Voltage)
2. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงทำให้เกิดการกระจายของกระแสไฟฟ้าลงดินมีค่าต่ำเป็นสาเหตุให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินมีค่าไม่สม่ำเสมอซึ่งบางจุดอาจจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงบางจุดอาจจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำเป็นต้น
3. มีส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายมนุษย์ทำหน้าที่เป็นสะพานไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุดที่มีค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันมาก กล่าวคือ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ร่างกายส่งผลให้เกิดปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายมากไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความต้านทานที่สัมผัสกับร่างกาย (Contact Resistance) หรือค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อยทำให้ไม่สามารถจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยได้
5. ช่วงระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจะมีผลต่อการเกิดอันตรายต่อบุคคล เช่น เมื่อกำหนดให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายด้วยปริมาณคงที่ค่าหนึ่ง อันตรายที่จะเกิดขึ้นต่อบุคคลผู้นี้จะแปรผันตามระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย

## 2.6 พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ร่างกายทนได้

ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตลอดทั้งร่างกาย จะขึ้นอยู่กับระยะเวลา ขนาด และความถี่ของกระแสไฟฟ้านี้ ผลลัพธ์การเกิดอันตรายโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับหัวใจ ซึ่งจะเกิดภาวะการกระตุกของหัวใจห้องล่าง (Ventricular fibrillation) ซึ่งจะมีผลต่อการไหลเวียนของโลหิตอย่างฉับพลันทันที

### 2.6.1 ผลของความถี่ (Effect of frequency)

มนุษย์จะได้รับอันตรายที่ความถี่ของกระแสไฟฟ้า 50Hz หรือ 60Hz กระแสไฟฟ้าประมาณ 0.1 A สามารถทำให้เสียชีวิตได้ ผลการวิจัยระบุว่าร่างกายมนุษย์สามารถทนได้อย่างน้อยที่สุดที่ความถี่ประมาณ 25 Hz ได้มากกว่าไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 5 เท่า (Dalziel และ Mansfield [B83]; Dalziel, Ogden, และ Abbott [B36]) และที่ความถี่ 3000-10000 Hz มนุษย์จะสามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณที่มากกว่า 50-60 Hz กล่าวคือ บุคคลจะสามารถทนต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายที่ความถี่สูงได้มากกว่าที่ความถี่ต่ำๆ ในบางกรณีร่างกายมนุษย์สามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงๆ ได้ เนื่องจากเสิร์จฟ้าผ่า The International Electrotechnical Commission ได้ให้กราฟสำหรับกระแสไฟฟ้าที่ร่างกายทนได้ในฟังก์ชันของความถี่และกระแสไฟฟ้าคาบประจุ [IEC 60479-2 (1987-03) [11]] การศึกษาอื่นๆ ของทั้งผลของไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าอิมพัลส์แกว่ง (Oscillatory impulse currents) ได้รายงานใน Dalziel [12][13]

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาพิเศษของระบบการต่อลงดินของไฟฟ้ากระแสตรงมีอยู่ในรายงานปี 1957 ของ AIEE Substation Committee ใน B21 [1] อันตรายของไฟฟ้าดูดก่อให้เกิดผลทางไฟฟ้าสถิตของสายส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะซึ่งได้นำมาทบทวนใหม่ใน ส่วนที่ 1 ของรายงานในปี 1972 ของ General Systems Subcommittee ใน B88 ของ [1] ข้อมูลเพิ่มเติมนอกจากนี้ในเรื่องผลของไฟฟ้าสถิตของสายส่งกำลังเหนือศีรษะสามารถดูได้ในบทที่ 8 ของ EPRI Transmission Line Reference Book 345 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ผลของขนาดไฟฟ้าและระยะเวลาที่ได้รับ (Effect of magnitude and duration)

ผลทางกายภาพของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายโดยมากจะมีดังนี้ คือ ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงระดับหนึ่งจะมีผลตั้งแต่ รู้สึกได้ (Threshold Perception) กล้ามเนื้อหดตัว (Muscular Contraction) ไม่รู้สึกตัว (Unconsciousness) เกิดภาวะกระตุกในหัวใจห้องล่าง (Fibrillation of The Heart) หายใจขัด (Respiratory nerve blockage) และมีแผลไหม้ (Burning) (Geddes and Baker ใน B74 ของ [1]; IEC 60479-1 (1994-09) ใน B82 ของ [1])

### กระแสไฟฟ้าขนาด 1 mA

เป็นจุดเริ่มต้นของการรับรู้ คือ รู้สึกได้ว่าโดนช็อต นั่นคือเป็นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่บุคคลรับรู้ได้และสามารถที่จะผละ (Fingertips) ออกจากจุดที่ไฟฟ้ารั่วได้

### กระแสไฟฟ้าขนาด 1-6 mA

เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สามารถไหลผ่านร่างกายมนุษย์ได้โดยที่ไม่สามารถทำอันตรายต่อมนุษย์ได้ และไม่มีผลกระทบต่อระบบประสาทในการควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อให้สามารถจับหรือปล่อยวัตถุได้

### กระแสไฟฟ้าขนาด 9-25 mA

กระแสไฟฟ้าในระดับนี้บางครั้งทำให้เกิดความเจ็บปวด และเป็นเรื่องยากที่บุคคลจะสามารถผละตัวหรือปล่อยมือส่วนที่นำไฟฟ้าผ่านร่างกายออกจากจุดที่มีไฟฟ้ารั่วได้ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่านี้ทำให้กล้ามเนื้อหดตัวและหายใจไม่สะดวก ผลเหล่านี้จะเกิดไม่ตลอดแต่จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกตัดออก นอกจากการหดตัวของกล้ามเนื้อที่รุนแรงมาก และการหายใจหยุดลงเป็นระยะเวลาๆหลายวินาที กรณีเหล่านี้บ่อยครั้งที่ยังสามารถฟื้นคืนชีพได้

### กระแสไฟฟ้าขนาด 60-100 mA

เกิดอาการการกระตุกของกล้ามเนื้อ หัวใจหยุดเต้น หรือการยับยั้งการหายใจ ซึ่งเป็นสาเหตุของการบาดเจ็บหรือเสียชีวิต บุคคลที่ได้รับการฝึกอบรมการกู้ชีพ (Cardiopulmonary resuscitation: CPR) จะสามารถช่วยชีวิตผู้เคราะห์ร้ายได้ในเบื้องต้นก่อนจะนำส่งผู้เคราะห์ร้ายรับการรักษาจากแพทย์

ดังนั้นมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 จะเน้นย้ำความสำคัญของจุดเริ่มต้นการกระตุกของกล้ามเนื้อ ถ้าขนาดกระแสไฟฟ้าที่ทำให้กล้ามเนื้อกระตุก สามารถรักษาระดับของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่านี้ด้วยการออกแบบระบบการต่อลงดินที่ระมัดระวัง มันก็จะสามารถหลีกเลี่ยงการบาดเจ็บ หรือเสียชีวิตได้

Dalziel และร่วมด้วยกับบุคคลอื่นๆ ได้แสดง ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ทำให้กล้ามเนื้อกระตุก  $I_{th}$  ที่ระยะเวลา 0.03-3.0 วินาที ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกดูดซึมโดยร่างกายมนุษย์ ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_B = (I_B)^2 \times t_s \tag{2.5}$$

เมื่อ

$I_B$  คือ ขนาดกระแสไฟฟ้ารากกำลังสอง (rms) ที่ไหลผ่านร่างกาย มีหน่วยเป็น A

$t_s$  คือ ช่วงระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย มีหน่วยเป็นวินาที

$S_B$  คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานการกระตุกทางไฟฟ้าที่ทนได้

โดยเปอร์เซ็นต์ของจำนวนประชากรทั้งหมดที่แน่นอน

## 2.7 การจำกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้

ขนาดและระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50-60 Hz ที่ไหลผ่านร่างกายควรมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อ (Ventricular Fibrillation) หัวใจ (Heart)

### 2.7.1 สูตรระยะเวลา (Duration formula)

ช่วงระยะเวลาสำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ที่สามารถทนได้โดยประชาชนส่วนใหญ่สัมพันธ์กับขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 6 บนพื้นฐานของผลลัพธ์ของการศึกษาของ Dalziel มันได้รับการสมมติว่า 99.5% ของคนทั้งหมดสามารถทนได้อย่างปลอดภัย โดยปราศจากการกระตุกของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่าง (Ventricular fibrillation) ขนาดของกระแสไฟฟ้า และช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย ถูกกำหนดโดยสูตรที่ตามมานี้ (2.6)

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \tag{2.6}$$

ซึ่งเป็นเทอมที่เพิ่มเติมมาจากสมการที่ (2.5) ก่อนหน้านี้

$$k = \sqrt{S_B} \tag{2.7}$$

Dalziel พบว่าพลังงานการกระตุกซึ่งสามารถทำให้รอดชีวิต 99.5% ของบุคคลที่มีน้ำหนักตัวประมาณ 50 kg (110 lb) จะมีค่า  $S_B = 0.0135$  ดังนั้น  $k_{50} = 0.116$  และสูตรสำหรับกระแสไฟฟ้าซึ่งยอมรับกลายเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (8) เมื่อ  $t_s=1s$  จะได้  $I_B=116mA$  และ  $t_s=0.1s$  จะได้  $I_B = 367mA$

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \text{ for 50 kg body weight} \quad (2.8)$$

สมการที่ (8) จะได้ค่า  $I_B$  เท่ากับ 116 mA เมื่อ  $t_s=1s$  และ  $I_B$  เท่ากับ 367 mA เมื่อ  $t_s=0.1s$  เนื่องจากสมการที่ (7) จะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำเมื่อระยะเวลาอยู่ในช่วง 0.03 s ถึง 3.0 s

หลายปีมาแล้วที่ นักวิจัยคนอื่นๆได้แนะนำค่า  $I_B$  ในปี 1936 Ferris ร่วมด้วยกับคนอื่นๆ ได้แนะนำค่า  $I_B = 100 \text{ mA}$  เป็นจุดเริ่มต้นของการกระตุ้นของกล้ามเนื้อ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย 100 mA ได้มาจากการทดลองที่กว้างขวางที่มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย ในการทดลองใช้สัตว์ซึ่งมีน้ำหนักร่างกาย และน้ำหนักของร่างกายที่พอเปรียบเทียบได้กับของมนุษย์ได้เสนอค่าระยะเวลาการกระตุ้นมากที่สุด 3 s การทดลองบางการทดลองเมื่อเร็วๆนี้ แนะนำจุดเริ่มต้นที่ชัดเจนที่มีอยู่ 2 ข้อ ข้อแรก ระยะเวลาการกระตุ้นสั้นกว่าระยะเวลาการเต้นของหัวใจ 1 ครั้ง และอีกข้อหนึ่ง คือ ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลนานกว่าการเต้นของหัวใจ 1 ครั้ง สำหรับผู้ใหญ่ที่มีน้ำหนักตัว 50 kg (110 lb) Biegelmeier เสนอค่าเริ่มต้นที่ 500 mA และ 50 mA ตามลำดับ การศึกษาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง หัวข้อนี้ประสบความสำเร็จโดย Lee และ Kouwenhoven สมการสำหรับกระแสไฟฟ้าที่ร่างกายมนุษย์สามารถทนได้ได้รับการพัฒนาโดย Dalziel เป็นพื้นฐานสำหรับการได้มาของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถทนได้ และได้นำมาใช้ในการแนะนำเล่มนี้

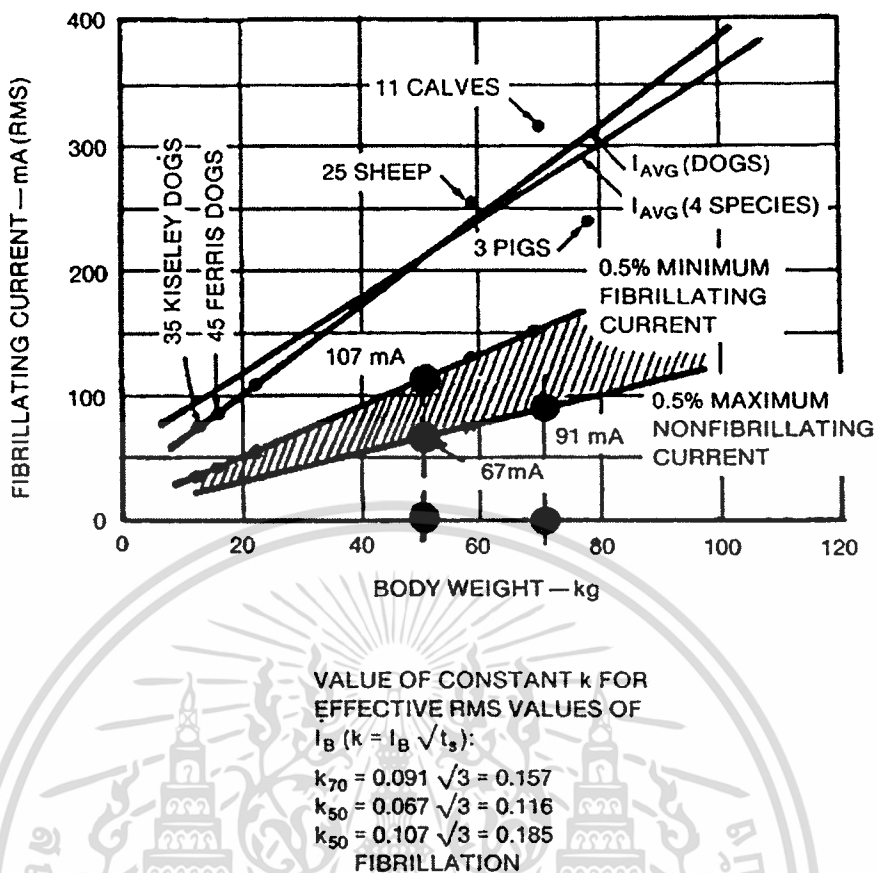
### 2.7.2 ข้อสมมติฐานในด้านอื่นๆ (Alternative assumptions)

กระแสไฟฟ้าที่เริ่มทำให้กล้ามเนื้อกระตุก (Fibrillation current) ถูกสมมติให้เป็นฟังก์ชันของน้ำหนักร่างกายของแต่ละคน ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ตามรูปภาพได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าวิกฤต และน้ำหนักของร่างกายสำหรับสัตว์หลายๆชนิดที่มีพันธุกรรมต่างกัน (ลูกวัว สุนัข แกะ และสุกร) และขอบเขตจุดเริ่มต้นต่างๆไป 0.5% สำหรับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ในปี 1961 ในการพิมพ์ครั้งหนึ่งของการแนะนำเล่มนี้ ค่าคงที่  $S_B$  และ  $k$  ในสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) ได้ให้ค่า 0.0272 และ 0.165 ตามลำดับ และสมมติค่าที่ชัดเจนที่มีเหตุผลสำหรับ 99.5% ของประชาชนทั้งหมดที่มีน้ำหนักประมาณ 70 kg (155lb) การศึกษาที่ไปไกลมากกว่านั้น โดย Dalziel] บนพื้นฐานของสมการที่ (7) นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าของ  $k=0.157$  และ  $S_B=0.0246$  ซึ่งสามารถนำมาใช้กับคนที่มีน้ำหนักของร่างกาย 70 kg (155lb) ดังนั้น

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \text{ for 70 kg body weight} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อหัวใจต่อน้ำหนักของสัตว์ ในหลายๆพันธุ์กรรมซึ่งพิจารณาบนระยะเวลาของการช็อคของกระแสไฟฟ้า

ผู้ใช้งานแนะนำเล่มนี้บางที่ใช้ค่า  $k=0.157$  โดยมีข้อแม้ว่าน้ำหนักของประชากรเฉลี่ยสามารถคาดหวังว่าจะมีน้ำหนักตัวอย่างน้อย 70 kg

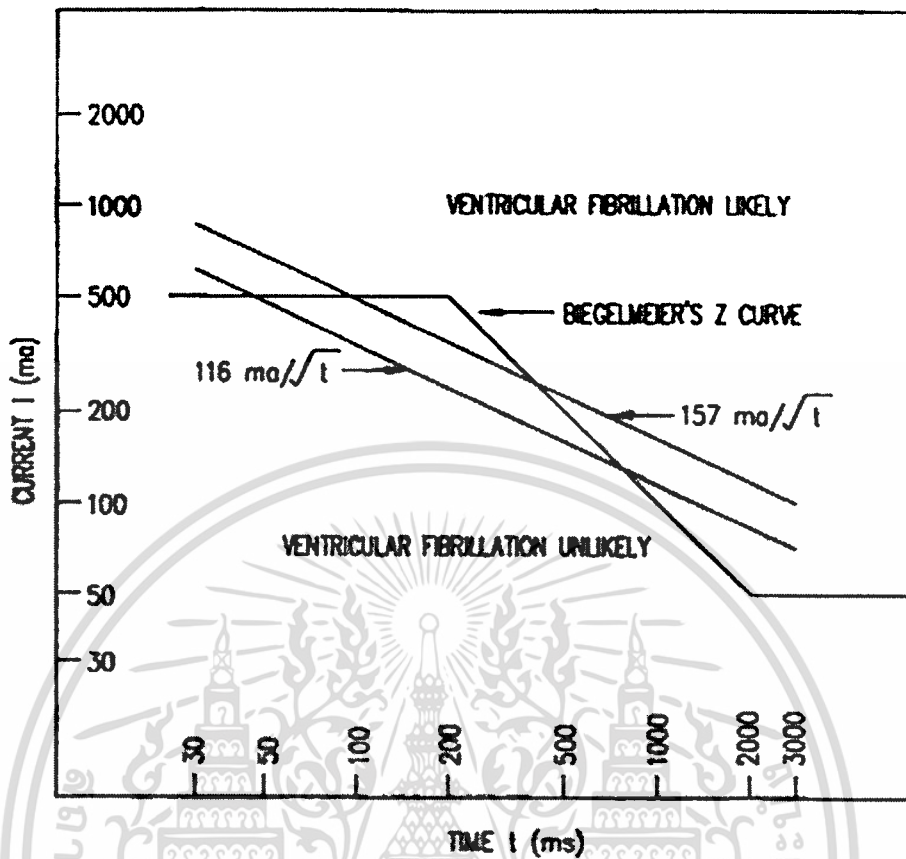
สมการที่ (2.6) ระบุว่ากระแสไฟฟ้าร่างกายสูงกว่ามากสามารถถูกยอมให้อุปกรณ์ป้องกันแบบทำงานเร็วมาก (Fast-operating protective devices) ขึ้นอยู่กับการจำกัดระยะเวลาที่ผิดพลาด การพิจารณาการตัดสินใจต้องการไม่ด้วยการใช้เวลาการจัดความผิดพลาดของรีเลย์ความเร็วสูงก็การป้องกันสำรอง บนพื้นฐานของการคำนวณ

### 2.7.3 การเปรียบเทียบระหว่างสมการของ Dalziel และเส้นโค้งของ Biegelmeier

(Comparison of Dalziel's equation and Biegelmeier's curve)

ในการเปรียบเทียบของสมการที่ (2.8) สมการที่ (2.9) และเส้น โค้งตัว Z ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายต่อเวลาที่พัฒนาโดย Biegelmeier ซึ่งตีพิมพ์โดย Biegelmeier และ Lee ซึ่งแสดงไว้ในรูปภาพที่ 5 เส้นโค้งรูปตัว Z จำกัดกระแสไฟฟ้าไว้ที่ 500 mA สำหรับเวลาที่มากกว่า 0.2 s และนอกจากนั้นลดลง 50 mA ที่ 2 s และที่เวลามากกว่า 2 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายต่อเวลา

การใช้สมการที่ (2.8) กระแสไฟฟ้าที่ร่างกายสามารถทนได้จะน้อยกว่าเส้นโค้งรูปตัว Z ของ Biegelmeier ที่เวลา 0.06 s ถึง 0.7 s

#### 2.7.4 ข้อสังเกตเกี่ยวกับการปิดซ้ำ (Note on Reclosing)

การปิดซ้ำภายหลังจากการเกิดความผิดปกติของลงดิน (ground fault) คือ การปฏิบัติการทำงานของเครื่องมือตัดต่อวงจรแบบสมัยใหม่โดยทั่วไป เช่น เหตุการณ์ที่บุคคลถูกไฟฟ้าดูดในครั้งแรก โดยปราศจากการบาดเจ็บที่ถาวร ต่อจากนั้นตัวปิดซ้ำอัตโนมัติ (Reclosure) ก็ทำการต่อวงจร เมื่อต่อวงจรในขณะที่บุคคลนั้นยังไม่ได้หลุดจากวงจรที่ผิดปกติก็ทำให้เกิดการกระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นครั้งที่สอง ตั้งแต่เริ่มต้นใช้เวลาน้อยกว่า 0.33 s เหตุการณ์การกระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าในครั้งที่สองมีระยะเวลาในช่วงเวลาที่สั้นก่อนที่บุคคลนั้นจะฟื้น ซึ่งบางทีก่อให้เกิดอุบัติเหตุที่ร้ายแรง จากคู่มือตัวปิดซ้ำอัตโนมัติ เป็นไปได้มากเลยที่การกระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าในครั้งที่สองจะลดลง เนื่องจากช่วงระยะเวลาการปิดซ้ำบางทีเป็นสิ่งสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนผลของเหตุการณ์ที่มีการกระตุกจากพลังงานไฟฟ้าสองครั้งหรือมากกว่านั้น ยังไม่มีการประเมินอย่างละเอียด แต่สามารถยอมรับได้ในเหตุผลซึ่งสามารถทำได้โดยการรวมระยะเวลาของการกระตุกเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงของการเกิดไฟฟ้าคูดหนึ่งครั้ง

## 2.8 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

### ความต้านทานของร่างกาย

สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 50-60 Hz ร่างกายมนุษย์จะสามารถถือได้ว่าเป็นตัวต้านทาน ซึ่งจะพิจารณากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลจากมือข้างหนึ่งสู่เท้าทั้งสอง หรือ จากเท้าสู่วัยวะอื่นๆ ค่าความต้านทานภายในร่างกายของมนุษย์จะมีค่าประมาณ 300 โอห์ม แต่ถ้าถ้ารวมค่าความต้านทานภายในกับค่าความต้านทานของผิวหนังด้วยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 500-3,000 โอห์ม ซึ่งได้เสนอแนะโดย Daziel Geddes และ Baker ค่าความต้านทานของร่างกายจะลดลงเมื่อผิวหนังนั้นใหม่จนทะลุถึงภายในที่จุดที่โดนไฟฟ้าช็อต

Denzial ได้พัฒนาการทดสอบออกไปโดยการใช้มือและเท้าจุ่มในน้ำเกลือให้เปียกเพื่อที่จะหากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกมา (Let-go Current) ที่ปลอดภัย โดยใช้ความถี่ 60 Hz สำหรับผู้ชาย และใช้ค่าต่างๆเหล่านี้ทดสอบ คือ กระแสไฟฟ้าขนาด 9.0 mA ที่แรงดันไฟฟ้า 21.0 V สำหรับการทดสอบแบบมือสู่มือ (Hand-to-Hand) และแรงดันไฟฟ้า 10.2 V สำหรับการทดสอบแบบมือสู่เท้าทั้งสองข้าง (Hand-to-feet) เมื่อลองวัดผลการทดสอบหาค่าความต้านทานหลังจากทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสสลับพบว่า การทดสอบแบบมือสู่มือสามารถคำนวณค่าความต้านทานออกมาได้ 2330 โอห์ม (21.0/0.009) และการทดสอบแบบมือสู่เท้าทั้งสองข้างคำนวณค่าออกมาได้ 1130 โอห์ม (10.2/0.009)

ดังนั้นวัตถุประสงค์ตามมาตรฐานการออกแบบระบบการต่อลงดิน IEEE Std.80-2000 จะกำหนดให้ค่าความต้านทานใดๆที่ต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานของมนุษย์ เป็นดังนี้

1. ค่าความต้านทานที่ติดต่อกับมือและเท้าจะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์โอห์ม
2. ค่าความต้านทานของถุงมือและรองเท้าจะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์โอห์ม

จากการทดลองของ Denzial ค่าที่คำนวณออกมาได้พิจารณาที่ค่าต่ำสุดของเหตุการณ์การเกิดทั้งสองกรณีพบว่า เหตุการณ์หลังมีค่าน้อยกว่า แต่การกำหนดเพื่อให้มีค่าเป็นมาตรฐานสำหรับการคำนวณนั้น เราจะเผื่อค่าไว้ (Safety Factor) ดังนั้นเราจะกำหนดค่าความต้านทานของร่างกายมนุษย์เท่ากับ 1,000 โอห์ม

$$R_B = 1,000 \ \Omega \quad (2.10)$$

## 2.9 วงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุ

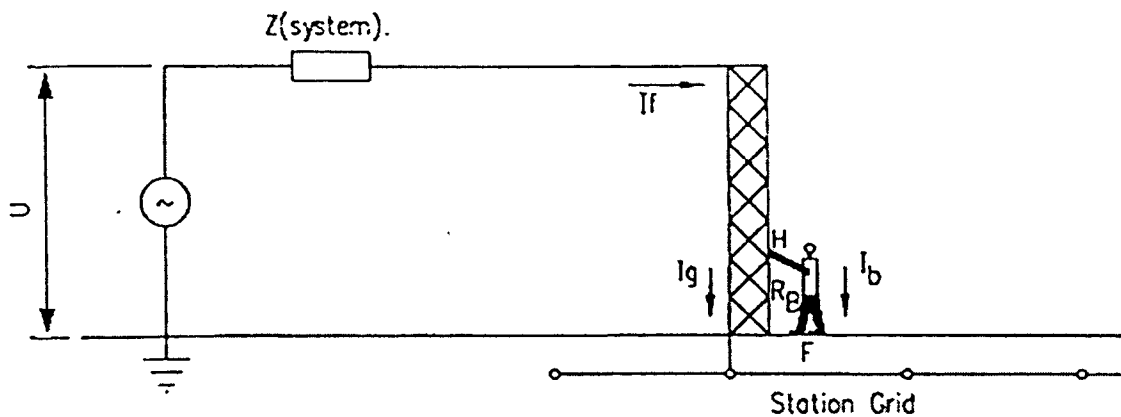
การใช้ค่าของกระแสไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้นั้นจะถูกนำมาใช้ในสมการที่ 2.3 และ สมการที่ 2.9 ประกอบกับค่าคงที่ที่เหมาะสม ก็จะสามารถที่จะหาแรงดันไฟฟ้าที่ทนได้ระหว่างจุดสองจุดที่สัมผัส สัญลักษณ์เหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุดังแสดงในรูปที่ 2.6

$I_B$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย (ร่างกายเป็นส่วนหนึ่งของวงจรอุบัติเหตุ) ในหน่วย A

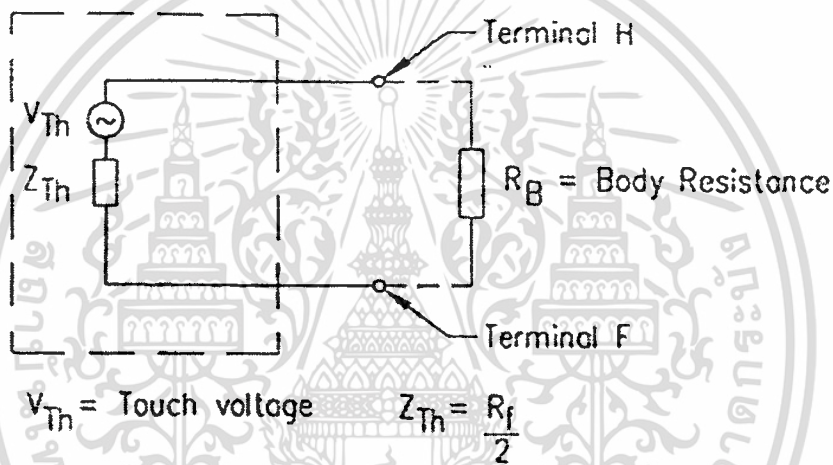
$R_A$  คือ ค่าความต้านทานประสิทธิภาพรวมของวงจรอุบัติเหตุในหน่วย  $\Omega$

$V_A$  คือ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลรวมของวงจรอุบัติเหตุ (แรงดันสัมผัสหรือแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว) ในหน่วย V

เมื่อเกิดค่าศักดาไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นบนพื้นผิวภายในสถานีไฟฟ้า เหนือระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบสถานีไฟฟ้า จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดหรือค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นในสถานีไฟฟ้าและรอบสถานีไฟฟ้า ผลของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะทำอันตรายต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าและบริเวณรอบสถานีไฟฟ้าได้ ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินนั้นจึงต้องทำการพิจารณาความปลอดภัยต่อมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก จึงได้ค่าความต่างศักย์หรือค่าแรงดันระหว่างจุดสองจุดที่มักจะทำอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้ามาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงเกณฑ์ความปลอดภัยของระบบต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าซึ่งก็คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ ในรูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มีมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะได้รับแรงดันสัมผัสตามลำดับ (1) ส่วนในรูปที่ 2.8 และ 2.9 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มีมนุษย์ได้รับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว และวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว (1) ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุเมื่อมนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (1)



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะมนุษย์ได้รับแรงดันสัมผัส (1)

มนุษย์ได้รับแรงดันสัมผัสเมื่อทำการสัมผัสกับ โครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินไว้กับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.6 โดยค่าความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่มือสัมผัสกับ โครงสร้างของอุปกรณ์ (H) กับตำแหน่งที่มนุษย์ยืน (F) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากมือข้างที่สัมผัสไปยังเท้าทั้งสองที่สัมผัสกับพื้นเพื่อใช้เป็นเส้นทางให้สำหรับ ไหลลงดินของกระแสจากรูปที่ 2.6 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลของมนุษย์ขณะที่ได้รับแรงดันได้ดังในรูปที่ 2.7 ดังนั้นจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายขณะที่ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสซึ่งก็คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรสมมูลนี้ ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$I_b = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 นี้จะพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดได้เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.4) และ (2.5) ซึ่งทำให้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.12)

$$E_{touch} = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B \quad (2.12)$$

สำหรับค่าความต้านทานของเท้าสามารถแสดงได้ดังในสมการที่ (2.13)

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ( $\Omega/m$ )

$b$  คือ รัศมีของเท้าในที่นี้เท้าแทนด้วยแผ่นโลหะวงกลมรัศมี 8 เซนติเมตร

จากสมการที่ (2.9) ทำให้ได้ค่าความต้านทานของเท้าโดยประมาณดังในสมการที่ (2.10)

$$R_f \approx 3\rho \quad (2.14)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.4), (2.6), (2.8) และ (2.10) จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม สามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.11)

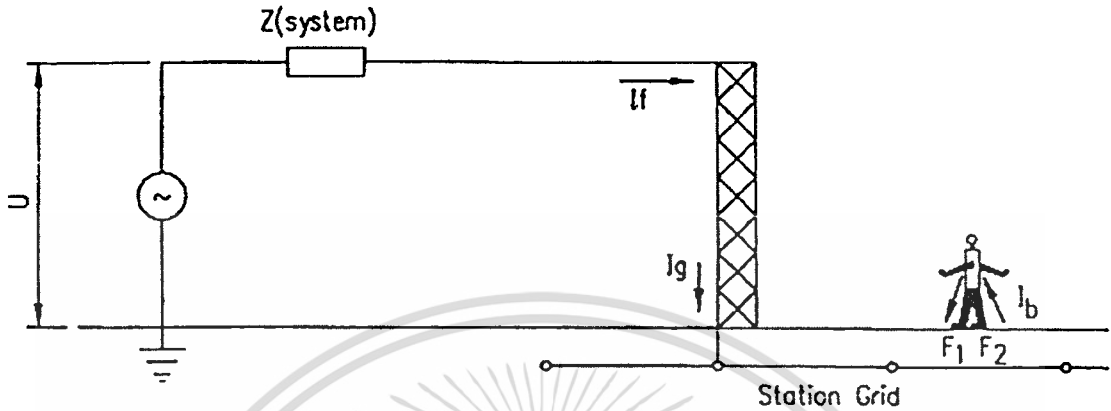
$$E_{touch50} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.15)$$

และจากสมการที่ (2.5), (2.6), (2.8) และ (2.10) จะได้สมการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.16)

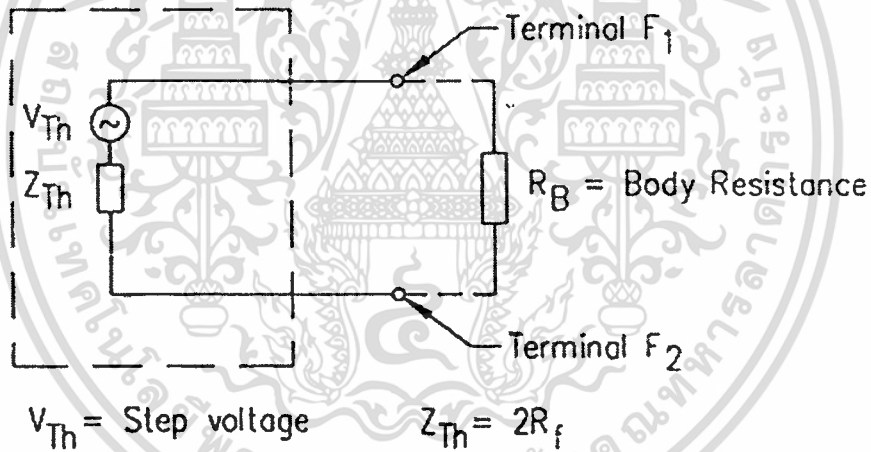
$$E_{touch70} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าแรงดันช่วงก้าวนั้นเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้าสองเท้า ซึ่งผลของค่าต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายจากเท้าข้างหนึ่ง ( $F_1$ ) ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง ( $F_2$ ) เพื่อใช้เป็นเส้นทางให้กระแสไหลลงดินได้ ดังในรูปที่ (2.8)



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรจำลองการเกิดอุบัติเหตุขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (1)



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสมมูลขณะที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (1)

ดังนั้นในกรณีที่มนุษย์ได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นจะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายได้จากสมการที่ (2.8) เนื่องจากค่า  $V_{Th}$  นำเสนอในวงจรสมมูลรูปที่ 2.9 นี้คือค่าแรงดันช่วงก้าว ดังนั้นจะได้สมการของแรงดันช่วงก้าวสูงสุดเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย ( $I_b$ ) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ดังในสมการ (2.4) และ (2.5) สามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวได้ดังในสมการที่ (2.17)

$$E_{\text{step}} = (R_B + 2R_f)I_B \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ (2.4), (2.6), (2.8) และ (2.13) ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.18)

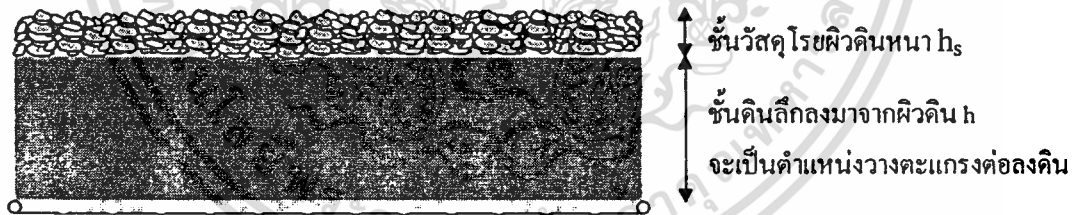
$$E_{\text{touch}50} = (1000 + 6\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.5), (2.6), (2.8) และ (2.13) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดสำหรับมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัมสามารถทนได้ดังในสมการที่ (2.19)

$$E_{\text{touch}70} = (1000 + 6\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.19)$$

สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินในประเทศไทยนั้นจะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดของมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัมเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าความปลอดภัย

## 2.10 ผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 แสดงการ โรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้า

การ โรยวัสดุที่ผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้านี้จะใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงกว่าดิน เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้าของมนุษย์ซึ่งปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันอันตรายให้กับมนุษย์ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าจากการได้รับค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ดังนั้นสามารถแสดงลักษณะการ โรยวัสดุบนพื้นผิวภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าดังรูปที่ 2.10 โดยส่วนมากวัสดุที่ใช้ในการ

รอยผิวดินภายในบริเวณสถานีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเพิ่มค่าความต้านทานที่เท้าของมนุษย์นั้น มักจะใช้ หินกรวดที่มีความหนาระหว่าง 8 - 15 เซนติเมตร และผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินนี้จะทำให้ค่าความต้านทานของเท้าที่หาได้จากสมการที่ (2.9) เปลี่ยนไปซึ่งสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (2.20)

$$R_r = (\rho_r/4.b).C_s \quad (2.20)$$

โดยที่  $C_s$  คือ ค่าตัวคูณลดที่เกิดเนื่องจากความหนาของวัสดุที่โรยบนผิวดิน

การคำนวณหาค่าในการคำนวณหาค่า  $C_s$  นี้ในปี 1986 (1) ได้ระบุสมการที่ใช้สำหรับหาค่าไว้ดังในสมการที่ (2.21)

$$C_s = 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q}{K^n} \quad (2.21)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + (2nX)^2}} \quad (2.22)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.23)$$

$$X = \frac{h_s}{b} \quad (2.24)$$

ต่อมาในปี 1994 Thapar, Gerez และ Kejniwal ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่า  $C_s$  ขึ้นมาใหม่เนื่องจากสมการเดิมที่ใช้อยู่ค้นหาได้จากการทดลองแทนเท้าด้วยเครื่องทรงกลมรัศมี 8 เซนติเมตร แต่เท้าจะประพุดิตัวคล้ายกับแผ่นโลหะกลมรัศมี 8 เซนติเมตร โดยสมการที่นำเสนอขึ้นมาใหม่นี้ได้แสดงไว้ในสมการที่ (2.25)

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

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.26)$$

$$R_{m(2nh_s)} = \frac{V_{D2}}{I} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{D2} = \frac{1}{\pi b^2 \int (2\pi \pi \cdot v_{r,z}) dx} \quad (2.28)$$

$$v_{r,z} = \frac{I \cdot \rho_s}{4\pi \pi} \sin^{-1} \left[ \frac{2b}{\sqrt{(r-b)^2 + z^2} + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (2.29)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.30)$$

$$z = 2nh_s \quad (2.31)$$

โดยที่  $R_{m(2nh_s)}$  คือ ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างแผ่นโลหะที่ใช้แทนเท้าทั้งสองข้างที่เกิดขึ้นเป็นระยะทาง  $(2nh_s)$  ในตัวนำที่มีค่าความหนาแน่นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ  $\rho_s$

จากสมการที่ (2.21) ค่า  $C_s$  จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ( $\rho_s$ ) มีค่าเท่ากับในรูปที่ 2.11 - 2.20 นำเสนอค่า  $C_s$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.21) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า  $K$  ตั้งแต่ -0.1 ถึง -0.99 และค่าความหนาของของชั้นหินที่โรยตั้งแต่ 0 ถึง 30 เซนติเมตร แต่เนื่องจากการพิจารณาหาค่า  $C_s$  จากสมการที่ (2.21) นั้นเป็นวิธีที่ไม่สะดวกเพราะมีการคำนวณที่ยุ่งยาก จึงได้มีการนำเสนอสมการเพื่อใช้หาค่าโดยประมาณของค่า  $C_s$  ขึ้นมาใช้งานเพื่อให้มีความรวดเร็วในการคำนวณด้วยมือได้ โดยในปี 1994 Thapar, Gerez และ Kejrival (3) ได้นำเสนอสมการที่ (2.28) ขึ้นมาเพื่อใช้คำนวณหาค่า  $C_s$  โดยประมาณ ดังในสมการที่ (2.28)

$$C_s = \frac{1+K}{1-K} - \frac{4K}{\pi(1-K)} \tan^{-1} (2h/b) - 0.21K^2 (e^{-7h} - e^{-30h}) \quad (2.32)$$

ต่อมาในปี 2000 (2) ได้นำเสนอสมการที่จะใช้ในการคำนวณหาค่า  $C_s$  โดยประมาณขึ้นตั้งในสมการที่ (2.29)

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของการโรยวัสดุที่ผิวดินภายในสถานีไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความต้านทานของพื้นนี้ จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสมการที่ (2.18) และ (2.19) ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนสำหรับมนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัม เมื่อมีการโรยวัสดุที่ผิวดินได้ตั้งในสมการที่ (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

$$E_{\text{touch}50} = \frac{(1000 + 1.5\rho_s C_s)^{0.116}}{\sqrt{t_s}} \quad (2.34)$$

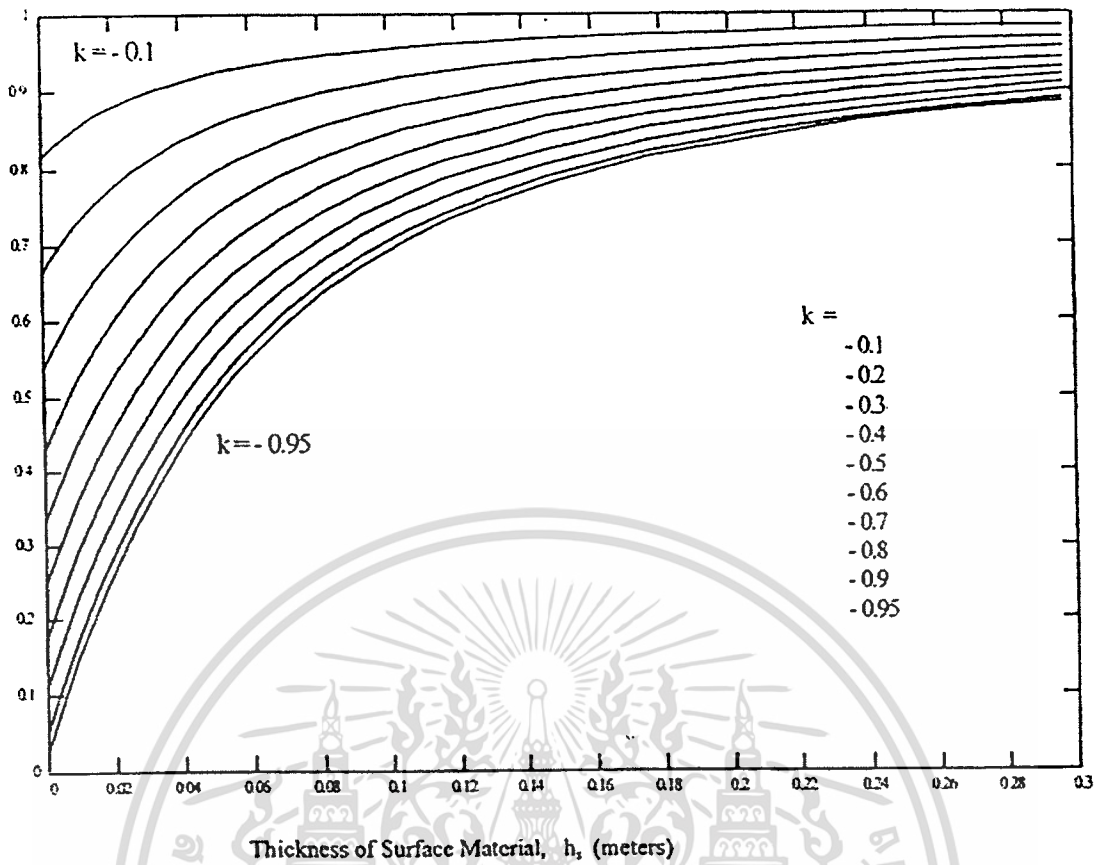
$$E_{\text{touch}70} = \frac{(1000 + 1.5\rho_s C_s)^{0.157}}{\sqrt{t_s}} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 50 และ 70 กิโลกรัม ที่สามารถทนได้ เมื่อมีการโรยวัสดุที่ผิวดินได้ตั้งในสมการที่ (2.36) และ (2.37) ตามลำดับ

$$E_{\text{step}50} = \frac{(1000 + 6\rho_s C_s)^{0.116}}{\sqrt{t_s}} \quad (2.36)$$

$$E_{\text{step}70} = \frac{(1000 + 6\rho_s C_s)^{0.157}}{\sqrt{t_s}} \quad (2.37)$$

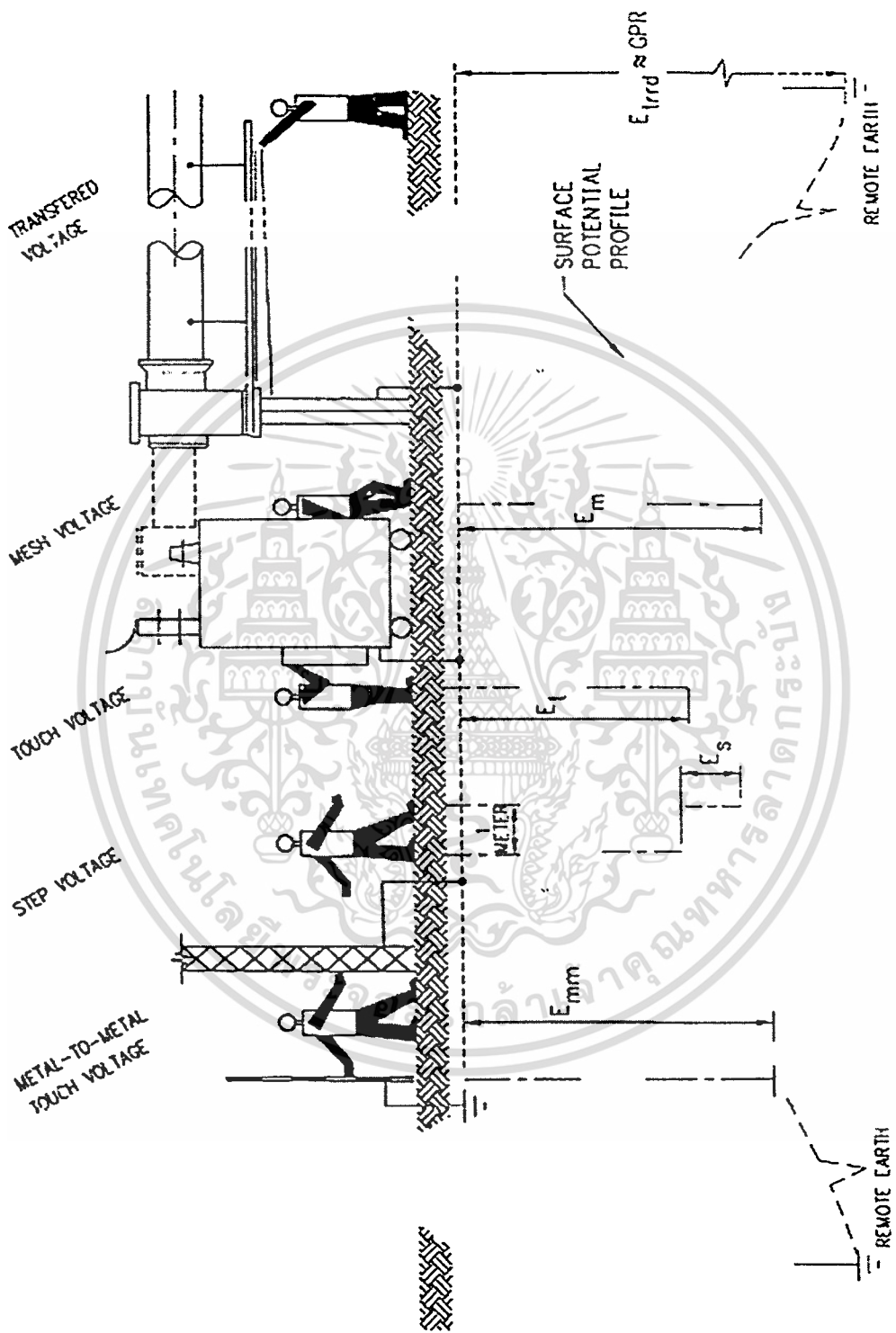
สมการที่ (2.34) ถึง (2.37) ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงค่าความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินในกรณีที่มีการโรยวัสดุที่ผิวดิน



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Cs กับ h,

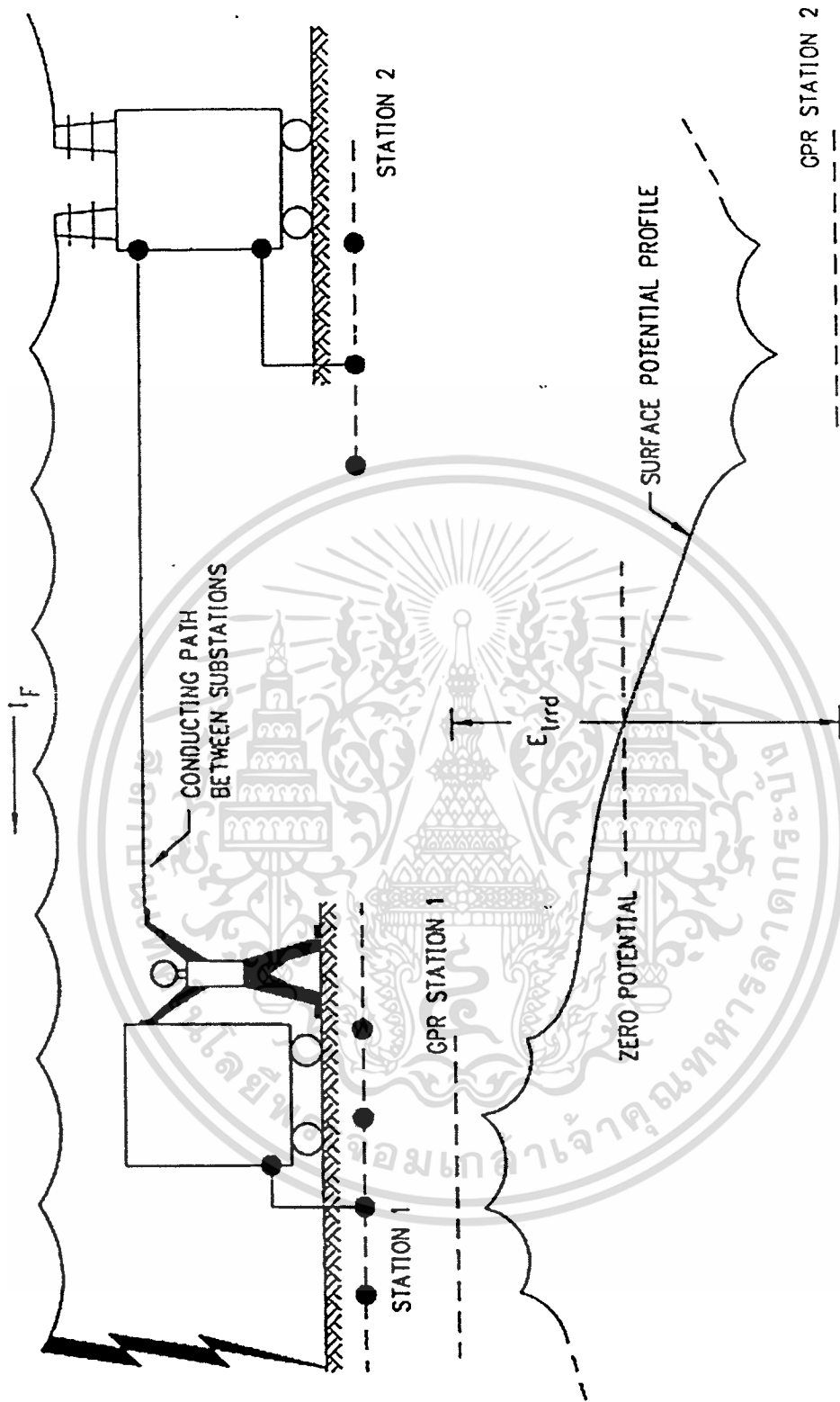
## 2.11 พื้นฐานเหตุการณ์การเกิดอันตรายต่อบุคคลเมื่อเกิดสถานะที่ผิดปกติ

รูปภาพที่ 2.12 และรูปภาพที่ 2.13 แสดงเหตุการณ์พื้นฐาน 5 เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับบุคคลและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อสายดิน



รูปที่ 2.12 รูปแบบการเกิดไฟฟ้าลัดวงจรผ่านร่างกาย ซึ่งมี 5 ลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดแรงดันไฟฟ้าถ่ายโอน (Transferred Potential)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าข้อยเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งหน้าที่หลักของสถานีไฟฟ้าข้อย คือ ทำหน้าที่เชื่อมต่อโยงระบบไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ และเป็นสถานีเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลง แน่นอนภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าจะต้องมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในพื้นที่เพื่อทำการติดตั้ง หรือซ่อมบำรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ภายในสถานีไฟฟ้าข้อย ดังนั้นความปลอดภัยของผู้ที่ปฏิบัติงานจึงเป็นเรื่องที่ต้องตระหนักถึงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการลัดวงจรลงดินที่จุดใดจุดหนึ่งของระบบไฟฟ้าภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าข้อย ซึ่งการลัดวงจรลงดินอาจเป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่านร่างกายของผู้ที่ปฏิบัติงาน ถ้าส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายของผู้ปฏิบัติงานสัมผัสจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน และถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายมีค่าสูงมากเกินที่มนุษย์จะทนได้ก็อาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ ดังนั้นจึงได้มีการใช้ระบบการต่อลงดินมาใช้ภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าข้อย เพื่อลดความต่างศักย์ไฟฟ้างกล่าว ซึ่งจะช่วยป้องกันอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอหลักการที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าข้อย ปรับปรุงการออกแบบระบบการต่อลงดินให้มีความปลอดภัย และยังมีความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบ รวมทั้งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อความปลอดภัย คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ค่ากระแสไฟฟ้ากริด (Grid Current,  $I_g$ ) ขนาดและจำนวนของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงต่อลงดิน ความหนาของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน ( $h_r$ ) และองค์ประกอบ 2 ตัวที่สำคัญที่สุด คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด (Touch Voltage Criteria,  $E_{touch}$ ) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Step Voltage Criteria,  $E_{step}$ ) ที่มนุษย์ทนได้ ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความปลอดภัยของระบบต่อลงดิน ซึ่งในที่นี้จะยึดถือมาตรฐานการออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน [1] เป็นหลัก

## บทที่ 3

### องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้นจะต้องทำการพิจารณาเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินให้มีความเหมาะสม และจะต้องทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน และค่าน่ากระแสกริดที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาหาค่าแรงดัน ไฟฟ้าเมฆ และค่าแรงดัน ไฟฟ้าช่วงก้าวที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติของสายตัวนำที่จะนำไปใช้สร้างระบบต่อลงดิน นำเสนอสมการที่ใช้ในการเลือกขนาดของสายตัวนำที่จะนำไปใช้ในระบบต่อลงดิน การคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและการพิจารณาหาค่ากระแสไฟฟ้ที่ตะแกรง

#### 3.1 คุณสมบัติของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน [1,2]

ตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนั้น จะต้องมืคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) สูง เพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดัน ไฟฟ้า
2. สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงโดยไม่เกิดการหลอมละลาย เนื่องจากจะต้องทนกระแสไฟฟ้าปริมาณมากที่ไหลผ่านในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ
3. มีความแข็งแรงทางกลสามารถทนต่อการถูกร่อน
4. สามารถใช้งานได้อย่างปกติ เมื่อได้มีการถูกร่อนที่ผิวของวัสดุและอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม

#### 3.2 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน [1]

##### 3.2.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็น โลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี และไม่มีปัญหาในเรื่องของการถูกร่อนเพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบ (Cathodic) เมื่อนำมาฝังในดิน โดยทำการเปรียบเทียบกับโลหะอื่น ๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 เหล็กชุบทองแดง (Copper-Clad Steel)

เหล็กชุบทองแดงนั้นนิยมใช้เป็นแท่งหลักดิน (Ground rod) และเป็นตะแกรงต่อลงดิน เพื่อทำการหลีกเลี่ยงการถูกกัดขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินออกไปขาย

### 3.2.3 อลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบธรรมดา เนื่องจากมีข้อเสียดังต่อไปนี้

1. อลูมิเนียมจะมีการผุกร่อน เมื่อมีการฝังลงในดิน และจะไม่สามารถใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้เมื่อเกิดการผุกร่อน
2. เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการผุกร่อนที่ผิวของอลูมิเนียม ทั้งนี้เพราะว่าอลูมิเนียมประพฤติตัวเป็นขั้วบวก (anodic) เมื่อทำการฝังดิน โดยเทียบกับโลหะอื่นฝังอยู่ในบริเวณเดียวกัน โดยส่วนมากแล้วอลูมิเนียมจะใช้เป็นเปลือกหุ้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS (Gas Insulated Substation)

### 3.2.4 เหล็ก (Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินและใช้เป็นแท่งหลักดิน แต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องทำการแก้ปัญหาเรื่องการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวของเหล็ก หรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็ก เพื่อให้ประพฤติตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดินในระบบต่อลงดินถึงแม้จะทำการเลือกใช้ ทองแดง หรือเหล็กชุบทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดินเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการผุกร่อนที่ผิวตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน แต่ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากการผุกร่อนของโลหะและโลหะผสมที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดิน เพราะว่าทองแดงและเหล็กนั้นจะประพฤติตัวเสมือน Galvanize Cell โดยมีดินทำหน้าที่เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า โดยที่เหล็กจะประพฤติตัวเสมือนขั้วบวก และทองแดงจะประพฤติตัวเสมือนขั้วลบ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาการผุกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินได้ดังนี้

1. ทำการเคลือบผิววัสดุของที่ประพฤติตัวเป็นขั้วบวกเมื่อฝังลงในดิน โดยการพันเทปพลาสติก หรือใช้ Asphalt ผสมเคลือบที่ผิวของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การกำหนดความแนวท่อในบริเวณที่มีการฝังระบบต่อลงดินนั้นจะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีอาการเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการผุกร่อน
3. ใช้คุณสมบัติของขั้วลบบในการป้องกันการผุกร่อนหรือควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบ
4. หลีกเลี่ยงการใช้ท่อเหล็ก โดยเลือกใช้ท่อพลาสติกแทน

### 3.3 การเลือกขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

การเลือกขนาดของสายตัวนำที่จะใช้ในระบบต่อลงดินนั้นมีความสำคัญต่อการออกแบบ เนื่องจากตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินต้องมีขนาดที่จะสามารถทนต่อกระแสปริมาณมากที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินได้ภายในระยะเวลาสั้น ๆ โดยไม่เกิดการหลอมละลายและการเลือกขนาดสายตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินนี้จะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.1)

$$I = A_{\text{mm}^2} \cdot \sqrt{\left( \frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad (3.1)$$

โดยที่	$I$	คือ	ค่า rms. ของกระแสลัดวงจรลงดินสูงสุดแบบสมมาตร (kA)
		คือ	ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ ( $\text{mm}^2$ )
$T_m$		คือ	อุณหภูมิสูงสุดที่สายตัวนำสามารถทนได้ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a$		คือ	อุณหภูมิที่สายตัวนำใช้งาน ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_r$		คือ	อุณหภูมิอ้างอิงเป็นค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิด ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\alpha_r$		คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $1/^{\circ}\text{C}$ )
$\alpha_0$		คือ	thermal coefficient of resistivity ที่อุณหภูมิ $0^{\circ}\text{C}$ ( $1/^{\circ}\text{C}$ )
$\rho_r$		คือ	ค่าความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )
$K_0$		คือ	$1/\alpha_0$ หรือ $(1/\alpha_r) - T_r(^{\circ}\text{C})$
$t_c$		คือ	ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลสู่ระบบต่อลงดิน (วินาที)
TCAP		คือ	thermal capacity per unit volume ( $\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำเป็นตาราง มิลลิเมตร ได้ดังในสมการที่ (3.2)

$$A_{mm2} = I \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (3.2)$$

และสามารถหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำเป็น kcmils ได้ดังในสมการที่ (3.3)

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (3.3)$$

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำต้องลงคินที่คำนวณได้นั้นจะใช้เกณฑ์สำหรับเลือกขนาดสาย โดยจะทำการเลือกขนาดพื้นที่สายตัวนำขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่คำนวณได้ สำหรับค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นสายตัวนำต้องคินนั้นสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 3.1

### 3.4 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Grounding system resistance)

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินในทางอุดมคติควรจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ นั้นทำได้ยากมาก ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าขนาดใหญ่ควรมีค่าความต้านทานไม่เกิน 1  $\Omega$  และค่าความต้านทานภายในระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าขนาดเล็กควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1  $\Omega$  ถึง 5  $\Omega$  ซึ่งการจะทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้านั้นมีค่าความต้านทานจริงเท่าใด จะต้องทำการวัดจากระบบต่อลงดินหลังจากทำการก่อสร้างเสร็จแล้ว แต่ในการออกแบบนั้นจะอาศัยการประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยใช้สมการที่มีการนำเสนอไว้ต่อไปนี้ โดยค่าความต้านทานต่ำสุดที่สุดของสถานีไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ (3.4) ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดลองวางแผ่น โลหะกลมบนผิวดินและหาค่าความสัมพันธ์

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้เป็นแท่งตัวนำไฟฟ้า

Material	Conductivity (%)	$T_m$ °C	$K_f$
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

ต่อมา Laurent และ Niemann ได้เสนอสมการที่ใช้ในการพิจารณาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินซึ่ง โดยพิจารณาถึงผลจากความยาวของตัวนำที่ใช้เป็นระบบต่อลงดินดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (3.5)$$

ต่อมา Sverak ก็ได้เสนอสมการที่ใช้ในการประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน โดยสมการนี้ถูกกำหนดให้เป็นสมการที่ใช้ประมาณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินซึ่งกำหนดอยู่ใน IEEE-Std 80-2000 ซึ่งแสดงอยู่ในสมการที่ (3.6)

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (3.6)$$

โดยที่  $R_g$  คือ ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายในสถานไฟฟ้า ( $\Omega$ )

$L_T$  คือ ค่าความยาวของตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในระบบต่อลงดิน (m)

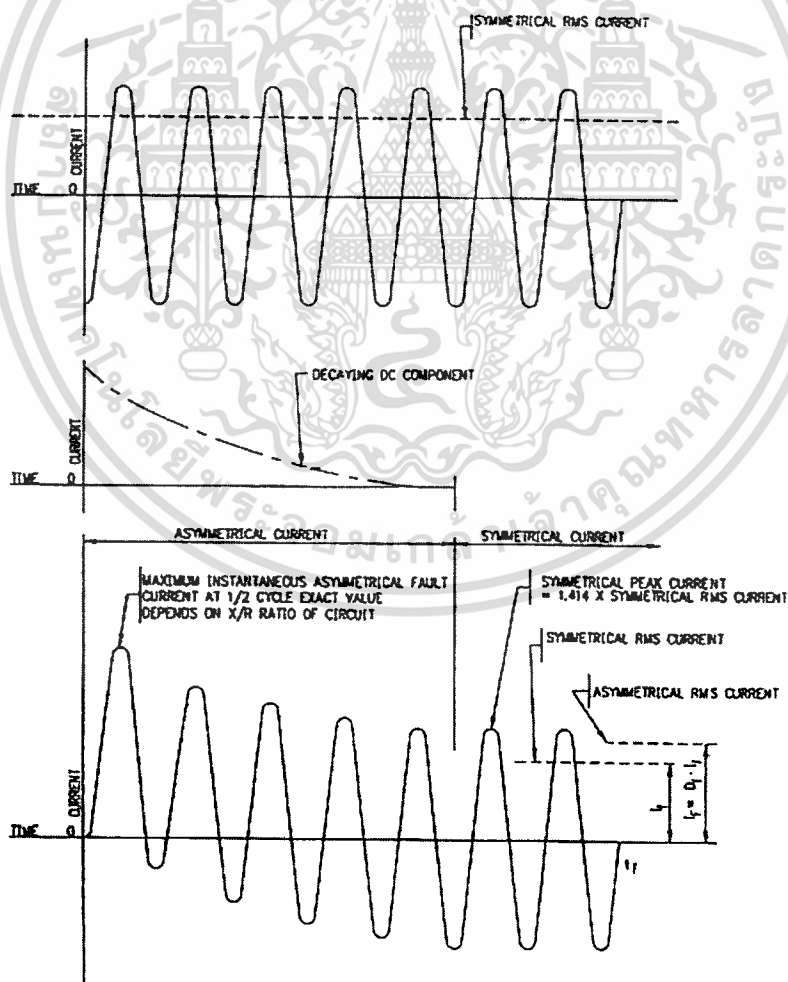
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h$  คือ ความลึกจากผิวดินที่ใช้ในการฝังระบบต่อลงดิน (m)

$A$  คือ ขนาดพื้นที่ของระบบต่อลงดิน ( $m^2$ )

### 3.5 ค่ากระแสไฟฟ้าตะแคง (Grid Current)

ค่ากระแสไฟฟ้าตะแคง คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินที่ไหลสู่ดินโดยผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าตะแคงนี้จะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง ได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้น ตำแหน่งการเกิดลัดวงจร การเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายนอก เป็นต้น สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าตะแคงที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินนี้จะต้องพิจารณาจากค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบไม่สมมาตร เนื่องจากขณะเกิดการลัดวงจรดินนั้นค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบไม่สมมาตรนั้นจะมีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบสมมาตรเพราะมีผลของค่า dc offset เข้ามาเกี่ยวข้องดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนั้นในการพิจารณาหาค่ากระแสไฟฟ้าตะแคงแบบไม่สมมาตรจะหาได้จากสมการที่ (3.7)



รูปที่ 3.1 แสดงค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย  $I_f$ ,  $I_r$  และค่า dc Offset ที่เกิดขึ้น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_G = I_g \cdot D_f \tag{3.7}$$

โดยที่  $I_G$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากระแสแรงแบบไม่สมมาตร (A)

$I_g$  คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากระแสแรงแบบสมมาตร (A)

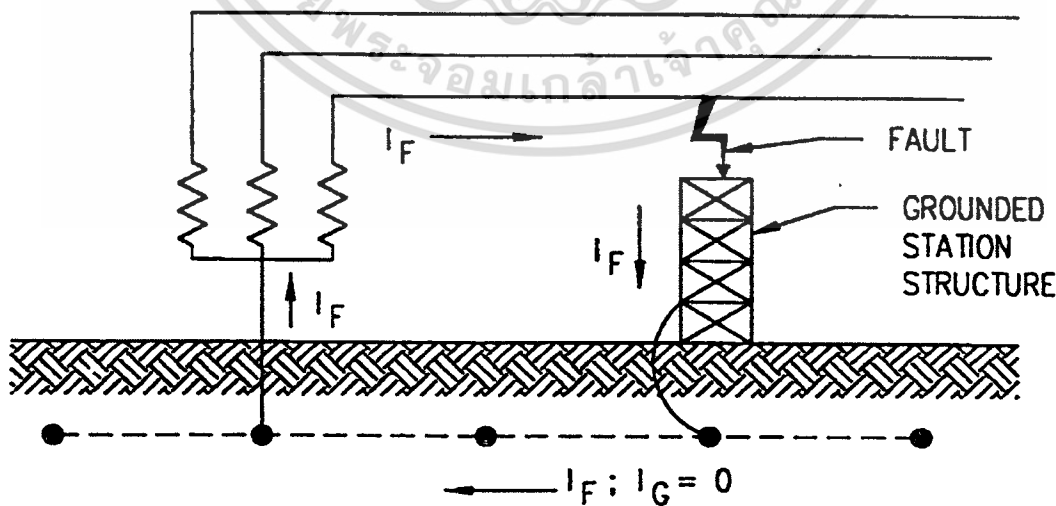
$D_f$  คือ Decrement Factor ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ dc offset

จากสมการที่ (3.7) ค่า  $D_f$  จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินก่อนที่อุปกรณ์ป้องกันจะทำงาน ( $t_r$ ) ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า (f) และค่า X/R ของระบบขณะเกิดการลัดวงจรดังแสดงในสมการที่ 3.8 และแสดงค่า  $D_f$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.8)

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_r} \left( 1 - e^{-\frac{2t_r}{T_a}} \right)} \tag{3.8}$$

$$T_a = \frac{X}{2\pi R} \tag{3.9}$$

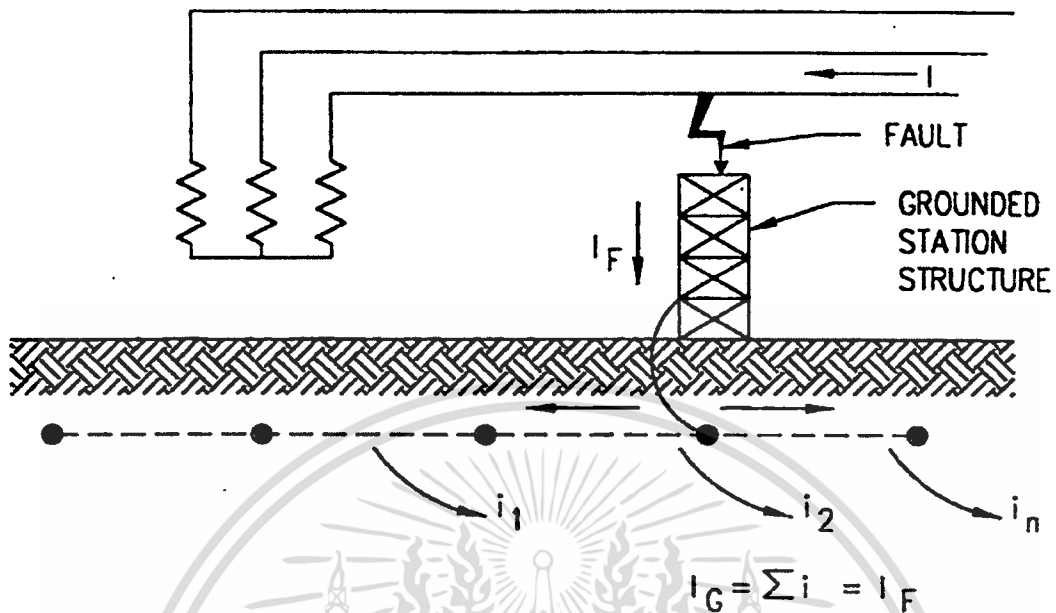
การพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินนั้นจะต้องทราบถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าและตำแหน่งที่เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน ซึ่งตำแหน่งที่เกิดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสแรงสูงสุดจะเป็นการเกิดการลัดวงจรลงดินภายในสถานีไฟฟ้า สำหรับลักษณะการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้ากับระบบภายนอกจะมีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรกระแสแรงโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทางด้านพฤติกรรมของหม้อแปลงมีการต่อลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อไม่มีการต่อนิวทรอลลงดิน



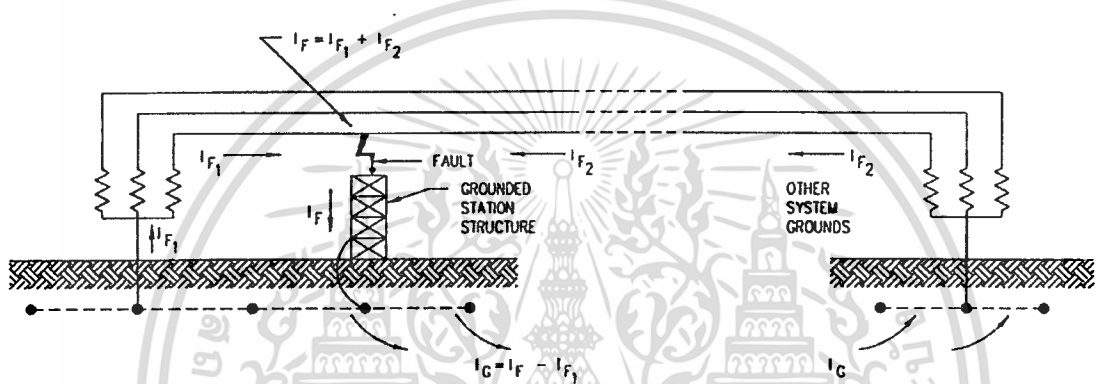
รูปที่ 3.3 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดิน ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อมีการต่อนิวทรอลลงดิน [1]

กรณีที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดิน ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดินและไม่มีการต่อนิวทรอลลงดินที่ภายนอกสถานีไฟฟ้าดังในรูปที่ 3.2 แล้วจะพบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแล้วจะทำให้ไม่มีกระแสกริดเกิดขึ้น เพราะปริมาณกระแสลัดวงจรจะอาศัยระบบต่อลงดินเป็นทางเดินของกระแส เพื่อไหลกลับไปยังหม้อแปลง

กรณีที่ 2 กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิไม่มีการต่อนิวทรอลลงดิน ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดินและมีการต่อนิวทรอลลงดินที่ภายนอกสถานีไฟฟ้าแล้ว ในกรณีนี้ไม่พิจารณาการเกิดการลัดวงจรลงดินทางด้านทุติยภูมิ เพราะไม่ทำให้เกิดกระแสกริดแต่จะพิจารณาการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีจ่ายไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าขึ้นทางด้านปฐมภูมิจึ้นกระแสลัดวงจรทั้งหมด ( $I_F$ ) ที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าและกระจายออกสู่ดินเพื่อใช้ดินเป็นตัวนำเพื่อ

เคทางกลับไปยังนิวทรอลของระบบภายนอกที่ต่อลงดินไว้ ซึ่งค่ากระแสกริด ( $I_G$ ) จะเท่ากับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด ( $I_F$ ) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3

กรณีที่ 3 หม้อแปลงที่ติดตั้งภายในสถานีจ่ายไฟฟ้ามีการต่อนิวทรอลลงดินทั้งทางด้านปฐมภูมิ ทางด้านทุติยภูมิและภายนอกสถานีไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ทางด้านปฐมภูมิจะทำให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมด ( $I_F$ ) แบ่งออกเป็นสองส่วน โดยกระแสลัดวงจรส่วนหนึ่ง ( $I_{F2}$ ) ซึ่งก็คือ กระแสกริดกระแสกริด ( $I_G$ ) ไหลผ่านดินไปยังระบบภายนอกที่มีการต่อนิวทรอลลงดินไว้และกระแสลัดวงจรอีกส่วนหนึ่ง ( $I_{F1}$ ) ไหลไปยังนิวทรอลของหม้อแปลงภายในสถานีไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการเกิดการลัดวงจรภายในสถานีไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยที่มีทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีการต่อนิวทรอลลงดิน และระบบภายนอกที่เชื่อมต่อนิวทรอลลงดิน [1]

### 3.6 การวิเคราะห์ความผิดปกติแบบไม่สมมาตร

ความผิดปกติที่เกิดภายในระบบกำลังไฟฟ้าโดยส่วนมากแล้วจะเป็นความผิดปกติแบบไม่สมมาตร หรือแบบไม่สมดุล

1. การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Short Circuit) เป็นการลัดวงจรของตัวนำนอกเหนือจากการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล
2. ความผิดปกติแบบไม่สมมาตรผ่านอิมพีแดนซ์ (Unsymmetrical Faults through Impedance) ความผิดปกติส่วนมากที่เกิดขึ้นบนวงจรของสายส่งมักเป็นความผิดปกติระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับดิน เช่น เมื่อเกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ระหว่างหนึ่งตัวนำหรือสองตัวนำกับเสาโครงเหล็ก (Tower) ในกรณีเช่นนี้จะเกิดอาร์กอิมพีแดนซ์ จากเสาโครงเหล็กและความต้านทานดินของฐานเสาโครงเหล็ก (Tower Footing Resistance) ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อกระแสและแรงดันในระหว่างที่เกิดความผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สายตัวนำไฟฟ้าขาดออกจากกัน (Open Conductors) เมื่อวงจรของระบบไฟฟ้าควบคุมด้วยฟิวส์ หรืออุปกรณ์ใดๆ ที่ไม่สามารถเปิดวงจรได้พร้อมกันทั้ง 3 เฟส โดยฟิวส์เฟสหนึ่งหรือสองเฟสอาจจะขาดหรือเปิดวงจรแต่ในขณะที่ฟิวส์เหลืออีกเฟสหนึ่งยังไม่ขาด หรืออาจเกิดจากเงื่อนไขที่มีอุบัติเหตุจนทำให้ตัวนำหนึ่งหรือสองตัวนำขาดออกจากกัน
- สำหรับรูปแบบและโอกาสของการเกิดความผิดปกติพร้อมแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รูปแบบและโอกาสของการเกิดความผิดปกติพร้อมแบบไม่สมมาตร

รูปแบบของการเกิดความผิดปกติพร้อมแบบไม่สมมาตร	โอกาสของการเกิดความผิดปกติ (%)
1. ความผิดปกติระหว่างไลน์กับดิน (Single line to Ground Faults)	70
2. ความผิดปกติระหว่างไลน์ (Line to Line Faults)	15
3. ความผิดปกติระหว่างสองไลน์กับดิน (Double Line to Ground Faults)	10

ความผิดปกติพร้อมแบบไม่สมมาตรเป็นต้นเหตุให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบไม่สมดุล ดังนั้นวิธีการของส่วนประกอบสมมาตรจึงมีประโยชน์อย่างมากเมื่อนำมาวิเคราะห์หากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในทุกส่วนของระบบหลังจากที่ความผิดปกติได้เกิดขึ้น ในขั้นตอนแรกนี้เราพิจารณาความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ไม่มีโหลดก่อน แล้วจึงพิจารณาความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของเทวินินเพื่อหากระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ โดยการแทนระบบทั้งหมดด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 หน่วย และอิมพีแดนซ์อนุกรม และสุดท้ายเราจะศึกษาวิธีการของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ที่นำมาใช้วิเคราะห์ความผิดปกติพร้อมแบบไม่สมมาตร

ถ้าไม่คำนึงถึงว่าเกิดความผิดปกติชนิดใดขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สมการแรงดันไฟฟ้าในรูปเมทริกซ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 7.1

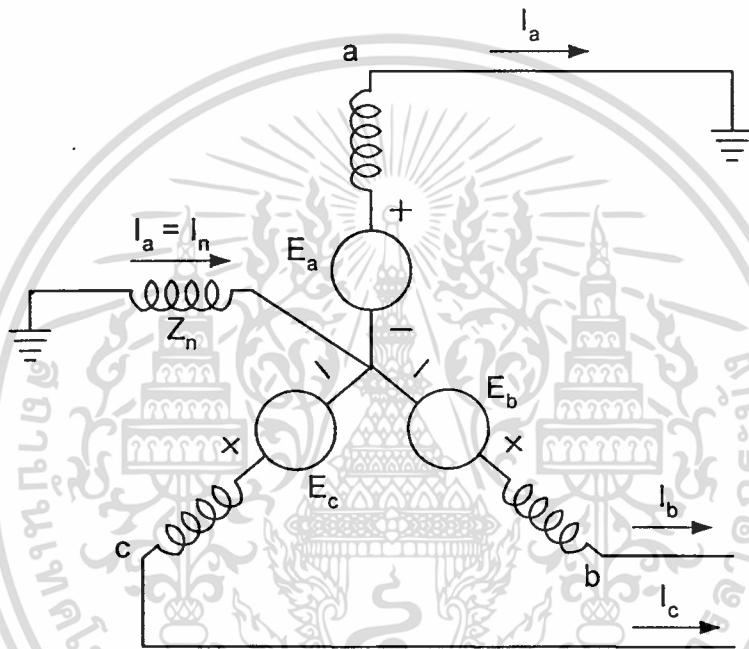
$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

สำหรับการเกิดความผิดปกติแต่ละชนิดเราจะใช้สมการที่ 3.10 ร่วมกับสมการเฉพาะของความผิดปกติชนิดนั้นๆ เพื่อหาค่ากระแส  $I_{a1}$  ในเทอมของ  $E_a$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  และ  $Z_0$

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าโอกาสของการเกิดความผิดปกติที่เป็นไปได้มากที่สุด คือ การเกิดความผิดปกติระหว่างไลน์กับดิน นั่นเอง ดังนั้นการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ จะศึกษาเฉพาะความผิดปกติในกรณีดังกล่าว ดังต่อไปนี้

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลดและมีการต่อขดลวดแบบวายโดยนิวทรัลต่อลงดิน ด้วยการผ่านรีแอกแตนซ์ เมื่อเกิดความผิดปกติระหว่างไลน์กับดินขึ้นที่ขั้วเฟส a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงโดยอะแกรมตามรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถเขียนสมการของการเกิดความผิดปกติแบบนี้ได้คือ

$$V_a = 0 \quad I_b = 0 \quad I_c = 0$$



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมของการเกิดความผิดปกติระหว่างไลน์กับดินที่ขั้วเฟส a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิวทรัลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกแตนซ์

เมื่อกระแส  $I_b = 0$  และ  $I_c = 0$  ส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไฟฟ้าคือ

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น  $I_{a0}$ ,  $I_{a1}$  และ  $I_{a2}$  จะเท่ากับ  $I_a/3$  และ

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.10 นำค่า  $I_{a1}$  ไปแทน  $I_{a2}$  และ  $I_{a0}$  เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

นำเมทริกซ์แถว [1 1 1] คูณตลอดสมการที่ 3.12 จะได้

$$[1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = [1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - [1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} I_{a1}Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{a1}Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & I_{a1}Z_2 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} &= E_a - I_{a1}Z_0 - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \\ V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} &= -I_{a1}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0$  เราแก้สมการที่ (3.13) เพื่อหาค่ากระแส  $I_{a1}$  จะได้

$$I_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0) = E_a$$

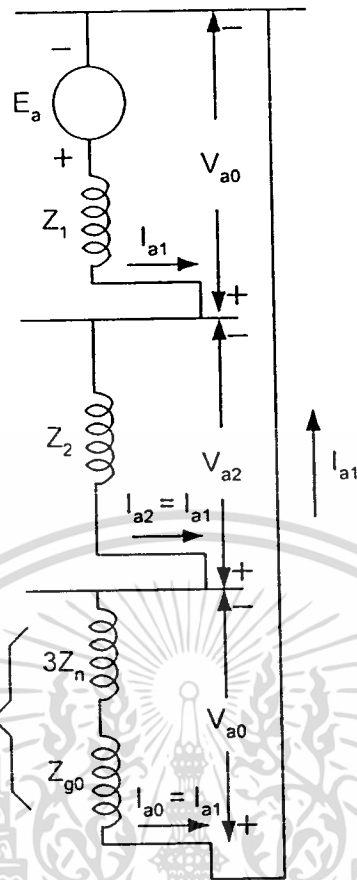
ดังนั้น

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3.14)$$

และ

$$I_a = 3I_{a1}$$

สมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.14) เป็นสมการเฉพาะของความคิดพ่วงระหว่างไลน์กับดิน เรานำมาใช้ร่วมกับสมการที่ (3.10) และความสัมพันธ์ของส่วนประกอบสมมาตร เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่จุดเกิดความผิดปกติ จากสมการที่ (3.11) จะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้า  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$  ดังนั้นถ้าดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีการต่ออนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ (3.6)



รูปที่ 3.6 การต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลด เมื่อเกิดความผิดปกติระหว่างไลน์กับดินที่ขั้วของเฟส a

การต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 3.6 จะมีแรงดัน  $E_a$  และลำดับของอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 ลำดับ ต่ออนุกรมกัน ซึ่งสามารถทำให้ง่ายต่อการจดจำสมการสำหรับการแก้ปัญหาความผิดปกติระหว่างไลน์กับดิน

ถ้านิวัตต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้ต่อลงดิน ก็เหมือนกับว่าวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์เปิดวงจร ( $Z_0 = \infty$ ) ดังนั้นสมการที่ (3.14) จะแสดงค่า  $I_{a1} = 0$  เมื่อ  $Z_0 = \infty$  และจากสมการที่ (3.11) ค่ากระแส  $I_{a2}$  และ  $I_{a0}$  ต้องเท่ากับศูนย์ด้วย ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลในสายตัวนำ a เมื่อผลรวมของส่วนประกอบทั้งหมดเพื่อให้ได้  $I_a$  มีค่าเท่ากับศูนย์

## บทที่ 4

### การออกแบบระบบต่อลงดิน

#### 4.1 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าตะแคง และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

##### 4.1.1 เกณฑ์การออกแบบ (Design Criteria)

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อจัดหาเส้นทางกราวด์สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติให้สามารถไหลกระจายลงดินให้ได้มากที่สุด เพื่อป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องในระบบไม่ให้เกิดความเสียหายจากกระแสไฟฟ้าผิดปกติที่มีขนาดกระแสสูงมาก
2. เพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าจะปลอดภัยจากไฟฟ้าดูดเมื่อเกิดภาวะผิดปกติขึ้นภายในระบบ อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกตัวในระบบได้ถูกต่อลงดินไว้แล้ว

ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินจะกล่าวอธิบายในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความปลอดภัยแก่บุคคลภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้จากแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) และแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage)

โดยมากแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) จะมีอันตรายน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าช่องตะแคง (Mesh Voltage)

การออกแบบในด้านการคำนวณนั้นมีสัญลักษณ์ตัวแปรหลายตัวมากที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ ซึ่งจำเป็นที่ผู้ออกแบบจะต้องทราบและมีความเข้าใจรวมทั้งต้องสามารถแยกแยะได้ว่าสัญลักษณ์ตัวแปรต่างๆ คืออะไรเพื่อช่วยต่อการทำความเข้าใจและคำนวณ ซึ่งตัวแปรต่างๆทั้งหมดนั้นจะแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน

สัญลักษณ์	ความหมายในภาษาอังกฤษ	ความหมายในภาษาไทย	หน่วย
$\rho$	Soil resistivity	ความต้านทานจำเพาะของดิน	$\Omega \cdot m$
$\rho_s$	Surface layer resistivity	ความต้านทานของชั้นดินหรือวัสดุที่ใช้โรยผิวดินที่เป็นชั้นบนสุด	$\Omega \cdot m$
$3I_n$	Symmetrical fault current in substation for conductor sizing	กระแสไฟฟ้าผิดปกติที่ไหลในแท่งตัวนำไฟฟ้า	A
$A$	Total area enclosed by ground grid	พื้นที่ของระบบต่อลงดิน	$m^2$
$C_s$	Surface layer derating factor	แฟกเตอร์การลดลงของชั้นดินหรือวัสดุที่ใช้โรยผิวดินที่เป็นชั้นบนสุด	-

$d$	Diameter of grid conductor	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำระบบต่อลงดิน	m
$D$	Spacing between parallel conductors	ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระยะช่องตะแกรงของด้านใดด้านหนึ่งของที่พิจารณา	m
$D_s$	Decrement factor for determining $I_s$	แฟกเตอร์การเพิ่มขึ้นสำหรับการหาค่ากระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด $I_s$	-
$D_m$	Maximum distance between any two points on the grid	ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดภายในตะแกรงต่อลงดินที่มีค่ามากที่สุด	V
$E_m$	Mesh voltage at the center of the corner mesh for the simplified method	แรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรง ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่คกคร่อมระหว่างมุมใดมุมหนึ่งของช่องตะแกรงสี่เหลี่ยม 1 ช่องกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของช่องตะแกรงสี่เหลี่ยมนั้น	V
$E_s$	Step voltage between a point above the outer corner of the grid and a point 1 m diagonally outside the grid for the simplified method	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ที่คกคร่อมระหว่างเท้าทั้งสองข้าง เมื่อทำนั้นแยกจากกันเป็นระยะ 1 เมตร	V
$E_{step50}$	Tolerable step voltage for human with 50 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ โดยพิจารณาให้น้ำหนักร่างกายเป็น 50 กิโลกรัม	V
$E_{step70}$	Tolerable step voltage for human with 70 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ โดยพิจารณาให้น้ำหนักร่างกายเป็น 70 กิโลกรัม	V
$E_{touch50}$	Tolerable touch voltage for human with 50 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ โดยพิจารณาให้น้ำหนักร่างกายเป็น 50 กิโลกรัม	V
$E_{touch70}$	Tolerable touch voltage for human with 70 kg body weight	แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ โดยพิจารณาให้น้ำหนักร่างกายเป็น 70 กิโลกรัม	V
$h$	Depth of ground grid conductors	ความลึกของตะแกรงต่อลงดิน โดยเริ่มวัดจากรอยต่อของดินชั้นที่ 1 และดินของชั้นที่ 2 ลงไป	m
$h_s$	Surface layer thickness	ความหนาของดินชั้นบน หรือความหนาของวัสดุโรยผิวดิน	m
$I_s$	Maximum grid current that flows between ground grid and surrounding earth (including dc offset)	กระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าผิดพียงที่ใหญ่ระหว่างตะแกรงต่อลงดินกับดินที่อยู่ล้อมรอบตะแกรงต่อลงดิน	A
$I_g$	Symmetrical grid current	กระแสไฟฟ้าตะแกรงสมมาตร ซึ่งเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย	A
$K$	Reflection factor between different resistivities	แฟกเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นที่ 1 (วัสดุผิวดิน) และดินชั้นที่ 2 มีค่าต่างกัน	-
$K_s$	Corrective weighting factor that emphasizes the effects of grid depth. simplified method	แฟกเตอร์น้ำหนักที่ทำให้ถูกต้องซึ่งเน้นที่ผลกระทบจากความลึกของตะแกรงต่อลงดิน	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_1$	Correction factor for grid geometry, simplified method or The irregularity factor	แฟกเตอร์ที่ทำให้ถูกต้องสำหรับรูปร่าง ตะแกรงต่อลงดิน	-
$K_2$	Corrective weighting factor that adjusts for the effects of inner conductors on the corner mesh, simplified method	แฟกเตอร์น้ำหนักที่ทำให้ถูกต้องที่ปรับผล ของแท่งตัวนำไฟฟ้าภายในบนช่องตะแกรง หัวมุม	-
$K_3$	Spacing factor for mesh voltage, simplified method	แฟกเตอร์ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วาง ขนานกันสำหรับการหาแรงดันไฟฟ้าช่อง ตะแกรง หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แฟกเตอร์รูปร่างตะแกรง	-
$K_4$	Spacing factor for step voltage, simplified method or The geometrical factor	แฟกเตอร์ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วาง ขนานกันสำหรับการหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว	-
$L_c$	Total length of grid conductor or The total length of the conductor in the horizontal grid	ความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำ ตะแกรงต่อลงดิน พิจารณาแท่งตัวนำไฟฟ้า แนวราบ (Grid Conductor)	m
$L_{s1}$	Effective length of $L_c + L_R$ for mesh Voltage or The effective buried length	ผลรวมของความยาวประสิทธิภาพระหว่าง $L_c$ และ $L_R$ สำหรับการหาแรงดันไฟฟ้าช่อง ตะแกรง	m
$L_p$	The peripheral length of the grid	ความยาวเส้นรอบรูปของตะแกรงต่อลงดิน	m
$L_R$	Total length of all ground rods	ความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ที่เป็นส่วนประกอบของ ตะแกรงต่อลงดิน	m
$L_r$	Length of ground rod at each location	ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ที่ตำแหน่งใดๆ ในระบบต่อลง ดิน	m
$L_s$	Effective length of $L_r + L_R$ for step voltage	ผลรวมของความยาวประสิทธิภาพระหว่าง $L_r$ และ $L_R$ สำหรับการหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว	m
$L_T$	Total effective length of grounding system conductor, including grid and ground rods	ความยาวประสิทธิภาพรวมของแท่งตัวนำ ไฟฟ้าที่ใช้ทำระบบต่อลงดินซึ่งพิจารณาทั้ง แนวราบ (Grid Conductor) และแนวตั้ง (Ground Rod)	m
$L_x$	Maximum length of grid conductor in x direction	ความยาวในแนวแกน x ที่มากที่สุดของ ตะแกรงต่อลงดิน	m
$L_y$	Maximum length of grid conductors in y direction	ความยาวในแนวแกน y ที่มากที่สุดของ ตะแกรงต่อลงดิน	m
$n$	Geometric factor composed of factors $n_x, n_y, n_z$ , and $n_d$ or The number of parallel conductors	แฟกเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน ซึ่ง ประกอบไปด้วยแฟกเตอร์ $n_x, n_y, n_z$ และ $n_d$	-
$n_R$	Number of rods placed in area	จำนวนของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในตะแกรง ต่อลงดิน	$\Lambda$
$R_g$	Resistance of grounding system	ความต้านทานของระบบต่อลงดิน	$\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S_f$	Fault current division factor (split factor)	แฟกเตอร์การแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาด	-
$t_f$	Duration of fault current for sizing ground conductor	ระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาดที่ไหลผ่านแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อดิน	s
$t_d$	Duration of fault current for determining decrement factor	ระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาดสำหรับการหาแฟกเตอร์การลดลง	s
$t_s$	Duration of shock for determining allowable body current	ระยะเวลาของกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาดที่ไหลผ่านร่างกายที่ยอมรับได้	s

#### 4.1.2 ปัจจัยวิกฤต (Criteria Parameters)

ตัวแปรต่อไปนี้เป็นตัวแปรที่เป็นปัจจัยกระทบต่อเกณฑ์ความปลอดภัยของตะแกรงต่อดินที่ได้ออกแบบขึ้น อันได้แก่ กระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด (Maximum Grid Current  $I_G$ ) ระยะเวลาที่เกิดภาวะผิดพลาด (Fault Duration  $t_f$ ) เวลาที่เกิดไฟฟ้าช็อตต่อบุคคล (Shock Duration  $t_s$ ) ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity  $\rho$ ) ความต้านทานของวัสดุโรยผิวดิน (Surface material Resistivity  $\rho_s$ ) และรูปทรงของตะแกรงต่อดิน (Grid Geometry) ซึ่งปัจจัยในส่วนของรูปทรงของตะแกรงต่อดิน (Grid Geometry) ก็ยังมีตัวแปรหลายๆตัวที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้า เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวนำไฟฟ้า ที่ใช้ทำระบบต่อดินทั้งในแนวราบ และแนวตั้ง

ระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้า (Conductor Spacing) และความถี่ของตะแกรงต่อดินจะมีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage) ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งตัวนำไฟฟ้า (Conductor Diameter) และความหนาของชั้นวัสดุพื้นผิวกลับมีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage) น้อยมาก

#### 4.1.3 แรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรง (Mesh Voltage)

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรง สามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 โดยค่าแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรงนี้เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณของ Geometrical Factor  $K_m$ , Corrective factor  $K_i$ , ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ( $\rho$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเปอร์ยูนิตของความยาวประสิทธิผลของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อดินที่ถูกฝังในดิน ( $I_G/L_M$ )

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (4.1)$$

สำหรับ Geometrical Factor  $K_m$  นั้นจะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4.2)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $D$  คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกัน

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไฟฟ้าที่ทำการบดต่อลงดิน

$h$  คือ ความลึกของตะแกรงต่อลงดิน

$n$  คือ แฟลคเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน

$K_{ii}$  คือ แฟลคเตอร์น้ำหนักที่ทำให้ถูกต้องที่ปรับผลกระทบของแท่งตัวนำไฟฟ้า

ภายในบ่อนช่องตะแกรงหุ้ม

$K_h$  คือ แฟลคเตอร์น้ำหนักที่ทำให้ถูกต้องที่เน้นในส่วนของผลกระทบของความลึกตะแกรง

$K_m$  คือ แฟลคเตอร์ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกันสำหรับการหาแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรง หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแฟลคเตอร์รูปร่างตะแกรง

สำหรับการเลือกใช้ค่า  $K_{ii}$  นั้นจะต้องพิจารณาจากการจัดเรียงกันของตะแกรงต่อลงดิน ถ้าตะแกรงต่อลงดินมีการเชื่อมต่อกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) จะกำหนดให้  $K_{ii} = 1$  แต่ถ้าไม่มีการติดตั้งของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) จะหาค่า  $K_{ii}$  ได้จากสมการที่ (4.3)

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n) \frac{2}{n}} \quad (4.3)$$

สำหรับค่า  $K_h$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (4.4)

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (4.4)$$

โดยที่  $h_0$  คือ ระดับอ้างอิงที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมตร

การหาแฟลคเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน ( $n$ ) จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งสามารถหาค่าแฟลคเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน ( $n$ ) ได้จากสมการที่ (4.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (4.5)$$

โดยที่ค่า  $n_a$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (4.6)

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (4.6)$$

$n_b = 1$  สำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยม

$n_c = 1$  สำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยม และตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$n_d = 1$  สำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และตะแกรงรูปตัวแอล

สำหรับกรณีอื่นๆ สามารถหาค่า  $n_b$ ,  $n_c$  และ  $n_d$  ได้ดังสมการที่ (4.7) (4.8) และ (4.9)

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (4.7)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7 \cdot A} \quad (4.8)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (4.9)$$

โดยที่  $L_c$  คือ ความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน

$L_p$  คือ ความยาวเส้นรอบรูปของตะแกรงต่อลงดิน

$A$  คือ พื้นที่ของระบบต่อลงดิน

$L_x$  คือ ความยาวในแนวแกน  $x$  ที่มากที่สุดของตะแกรงต่อลงดิน

$L_y$  คือ ความยาวในแนวแกน  $y$  ที่มากที่สุดของตะแกรงต่อลงดิน

$D_m$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดภายในตะแกรงต่อลงดินที่มีค่ามากที่สุด

สำหรับการพิจารณาค่า Correction Factor for Grid Geometry  $K_g$  นั้นจะเกี่ยวข้องกับแฟกเตอร์รูปร่างตะแกรงต่อลงดิน ( $n$ ) ซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (4.10)$$

การหาค่า  $L_M$  นั้นจะมีสองเงื่อนไขในการหา กล่าวคือ ถ้าระบบต่อลงดินที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบมานั้นมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) อยู่ด้วย ไม่ว่าจะติดตั้งที่ตำแหน่งใดของตะแกรงต่อลงดินก็ตาม เช่น ที่บริเวณขอบรอบนอกของตะแกรงต่อลงดิน มุมของตะแกรงต่อลงดิน หรือภายในตะแกรงต่อลงดิน  $L_M$  จะมีค่าดังสมการที่ (4.11)

$$L_M = L_C + L_R \quad (4.11)$$

เมื่อ  $L_R$  คือ ความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod)

แต่ถ้าตะแกรงต่อลงดินนั้นไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ต่อเชื่อมอยู่กับตะแกรงต่อลงดินค่าของ  $L_M$  จะมีค่าดังสมการที่ (4.12)

$$L_M = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (4.12)$$

เมื่อ  $L_r$  คือ ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ที่ตำแหน่งใดๆในระบบต่อลงดิน

สำหรับค่าความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod)  $L_R$  นั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.13)

$$L_R = L_r \cdot n_r \quad (4.13)$$

เมื่อ  $L_r$  คือ ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) แต่ละแท่ง

$n_r$  คือ จำนวนของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ของตะแกรงต่อลงดิน

$L_R$  คือ ความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) ที่เกิดขึ้นจริงจากตะแกรงต่อลงดินที่ออกแบบ

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณผลคูณของ Spacing Factor  $K_s$ , Correction Factor  $K_i$ , ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน  $\rho$  และกระแสไฟฟ้าเปอร์ยูนิตของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินที่ถูกฝังในดิน ( $I_G/L_M$ ) เฉลี่ย เป็นดังสมการที่ (4.14)

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (4.14)$$

การค่า  $L_s$  จะไม่มีเงื่อนไขเหมือนการหาค่า  $L_M$  นั่นคือ ไม่ว่าจะตะแกรงต่อลงดินที่สร้างขึ้นนั้นจะมีแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้ง (Ground Rod) หรือไม่ก็ตาม ก็จะใช้สมการที่ (4.15) หาค่า  $L_s$  เหมือนกัน

$$L_s = 0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R \quad (4.15)$$

ค่า  $K_s$  ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตะแกรงต่อลงดินและลักษณะการจัดวางของตัวนำไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ (4.16) แต่สมการนี้จะมีข้อจำกัดเนื่องจากการฝังตะแกรงต่อลงดิน โดยที่ความลึกที่ใช้ในการฝังตะแกรงต่อลงดินควรอยู่ในช่วง 0.25 เมตร ถึง 2.5 เมตร

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (4.16)$$

## 4.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบการต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000

การออกแบบระบบการต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 จะมีหลักการออกแบบระบบต่อลงดินซึ่งแสดงได้ดังแผนภาพตามรูปที่ 4.1 ส่วนขั้นตอนรายละเอียดการออกแบบนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** สำรวจพื้นที่เพื่อให้ได้ข้อมูลมาเพื่อใช้ในการคำนวณในขั้นอื่นๆต่อไป คือ การหาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดิน ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณในขั้นตอนอื่นๆต่อไป เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่จะมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งโดยมากสามารถหาข้อมูลได้จากแบบแปลนก่อสร้างของสถานี

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดหาขนาดของตัวนำไฟฟ้าเพื่อนำมาสร้างตะแกรงต่อลงดิน เป็นขั้นตอนหาขนาดของตัวนำไฟฟ้าเพื่อให้สามารถทนต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่อาจจะเกิดขึ้นได้

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดหาเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ( $E_{touch}$ ) และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_{step}$ ) สูงสุดที่มนุษย์ทนได้ เป็นขั้นตอนการคำนวณเพื่อใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานของระบบต่อลงดินในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบต่อลงดินที่จะทำการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 4 การออกแบบระบบต่อลงดินเบื้องต้น โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างช่องตะแกรงต่อลงดิน รวมทั้งลักษณะรูปทรงของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดหาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน เพื่อใช้ค่าความต้านทานของตะแกรงที่คำนวณได้ไปคำนวณในขั้นตอนอื่นๆต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงสูงสุด

ขั้นตอนที่ 7 กำหนดหาค่า Ground Potential Rise (GPR) ถ้ามีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ( $E_{touch}$ ) ในขั้นตอนที่ 3 ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 12

ขั้นตอนที่ 8 กำหนดหาค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_m$ ) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_s$ ) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องพิจารณาถึงลักษณะรูปร่างของตะแกรง หรือของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 9 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_m$ ) ที่ได้คำนวณในขั้นตอนที่ 8 กับค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ( $E_{touch}$ ) ในขั้นตอนที่ 3 โดยถ้า  $E_m < E_{touch}$  ให้ทำในขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวไม่เป็นจริงให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 11

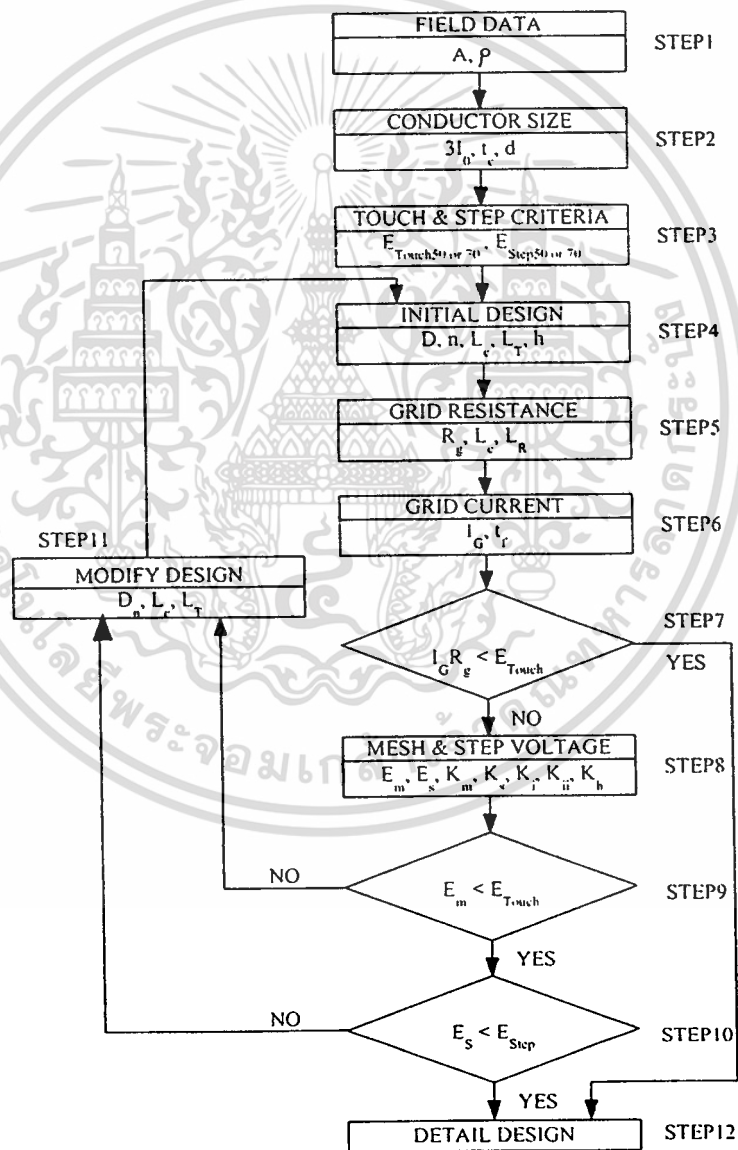
ขั้นตอนที่ 10 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_s$ ) ที่ได้คำนวณในขั้นตอนที่ 8 กับค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวในขั้นตอนที่ 3 โดยถ้า  $E_s < E_{step}$  ให้ทำในขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวไม่เป็นจริงให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 ปรับปรุงการออกแบบ เมื่อมาถึงขั้นตอนที่ 11 ได้แสดงว่าผู้ออกแบบยังออกแบบระบบต่อลงดินที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ออกแบบจะต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้องให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีมากขึ้น เช่น เพิ่มปริมาณตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในระบบให้มากขึ้น ลดระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้า หรือช่องตะแกรงให้น้อยลงเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดิน (Gradient Voltage) หรืออาจจะเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้ง (Ground Rod) ก็ได้ จากนั้นก็กลับไปสู่ขั้นตอนที่ 1 ใหม่เพื่อเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบหาความปลอดภัยอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด กล่าวคือ การออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่าการออกแบบระบบต่อลงดินที่ได้กระทำนั้นปลอดภัย จากนั้นจะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือตะแกรงต่อลงดิน การต่อเชื่อมสายดินเข้าไปยังตู้ควบคุมไฟฟ้า หรือสถานเฝ้าไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดิน ซึ่งจะต้องทำควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดิน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000

ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบต่อลงดินจะอ้างอิงจากภาคผนวกของมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 ซึ่งการแสดงการคำนวณ และการประยุกต์ใช้สมการ ตาราง และกราฟ สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 มีวัตถุประสงค์ คือ

1. เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้ของสมการตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การออกแบบที่ปลอดภัยดังความต้องการของผู้ออกแบบ
2. เพื่อแสดงให้เห็นสิ่งที่แตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณอย่างง่ายจากขั้นตอนตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 กับผลลัพธ์การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งนำมาใช้แก้ปัญหาการออกแบบ
3. เพื่อแสดงให้เห็นเงื่อนไขของการออกแบบ สำหรับการคำนวณอย่างง่ายตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000

สำหรับตัวอย่างการคำนวณตั้งแต่หัวข้อที่ 4.3.1 จนถึง 4.3.4 จะใช้ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อนำไปใช้ออกแบบ ดังต่อไปนี้

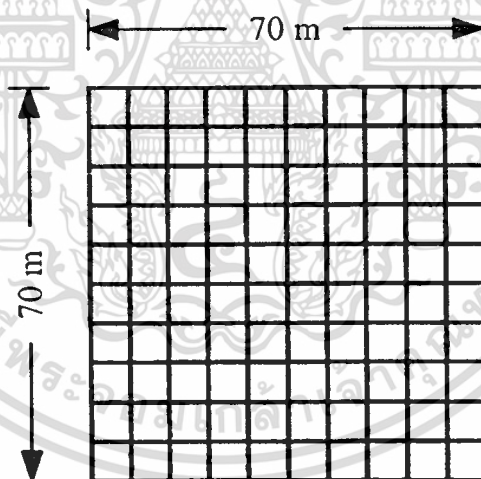
ปัจจัย	ค่าคงที่และประเภท	หน่วย
Fault duration, $t_f$	= 0.5	sec.
Positive sequence equivalent system impedance, $Z_1$ (115 kV side)	= 4.00 + j10.0	$\Omega$
Zero sequence equivalent system impedance, $Z_0$ (115 kV side)	= 10.0 + j40.0	$\Omega$
Current division factor, $S_r$	= 0.6	sec.
Line-to-line Voltage at worst-fault location	= 115,000	v
Soil resistivity, $\rho$	= 400	$\Omega.m$
Crushed rock resistivity (wet), $\rho_s$	= 2500	$\Omega.m$
Thickness of crushed rock surfacing, $h_s$	= 0.102	m (4 in)
Depth of grid burial $h$	= 0.5	m
Transformer impedance, ( $Z_1$ and $Z_0$ ) ; (13 kV) ( $Z = 9\%$ at 15 MVA, 115/13kV)	= 0.034 + j1.014	$\Omega$
Grid Conductor	Copper-clad steel wire 30%	-
Grid Shape	Square grid	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่จะยกต่อไปนี้มีข้อตกลงในเบื้องต้นซึ่งจะต้องทำความเข้าใจต่อผู้อ่าน กล่าวคือ ค่าความต้านทานจำเพาะของหินกรวด (Crushed Rock Resistivity) จะสมมติให้มีค่าความต้านทานบนพื้นฐานของการวัดตัวอย่างของหินกรวดจริง ค่าอิมพีแดนซ์ผิวดินประสมมูล และแฟคเตอร์การแบ่งกระแสไฟฟ้าผิวดิน  $S$ , ถูกกำหนดให้เป็นกรณีที่รุนแรงสุด (Worst Fault Type) ทั้งด้านของประเภทความผิวดิน และตำแหน่งการเกิดภาวะผิวดิน โดยที่ตัวอย่างของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างการคำนวณสมมติให้เป็นสถานีไฟฟ้าแบบสามขั้วที่มีมากกว่า 25 ขั้ว ดังนั้นจะไม่มีปัจจัยใดๆที่จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยเข้าไปในระบบของสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้ นอกจากนั้นยังสมมติให้สถานีไฟฟ้าย่อยดังกล่าวต่อไปนี้มีเซอร์กิต เบรกเกอร์ เพื่อใช้ในการขจัด (Clear) ความผิวดิน (Faults) และไม่มีระบบการปิดซ้ำอัตโนมัติใดๆ (Automatic Reclosing Scheme) ทั้งสิ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เกิดความผิวดิน  $t_f$  (Fault Duration) และระยะเวลาของบุคลิกที่ถูกไฟฟ้าช็อค  $t_s$  (Shock Duration) จะกำหนดให้มีค่าที่เท่ากัน

#### 4.3.1 ตะแกรงต่อลงดินแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อลงดินแนวดิ่ง

ตัวอย่างการคำนวณออกแบบนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนตามแผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดินดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่งต่อเชื่อม

#### ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลสนาม (Field Data)

แม้ว่าตะแกรงต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยจะถูกสร้างภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 63 m ยาว 84 m ( $5292 \text{ m}^2$ ) แต่สำหรับการเริ่มการออกแบบ จะสมมติให้พื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 70 m X 70 m และไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่งต่อเชื่อมกับตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งพื้นที่จะมีขนาด  $4900 \text{ m}^2$  และสมมติให้ดินมีค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับ  $400 \Omega \cdot \text{m}$  ซึ่งเป็นค่าที่มีรากฐานจากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาขนาดแท่งตัวนำไฟฟ้า (Conductor Size)

ในกรณีนี้จะไม่คิดค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้า และ Symmetrical ground fault current =  $I_f$  =  $3I_0$  จาก

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_3) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (4.17)$$

สำหรับบัสแรงดันไฟฟ้า 115 kV แทนสมการจะได้

$$3I_0 = \frac{3(115,000/\sqrt{3})}{3 \cdot 0 + (4.0 + 4.0 + 10.0) + j(10.0 + 10.0 + 4.0)}$$

ดังนั้นขนาดของ  $3I_0$

$$|3I_0| = 3,180 \text{ A และ X/R Ratio} = 3.33$$

สำหรับบัสแรงดันไฟฟ้า 13 kV ค่าอิมพีแดนซ์ที่คิดพร้อมสมมูลย์ของบัส 115 kV จะถูกนำมาถ่ายโอนมายังด้านบัสแรงดันไฟฟ้า 13 kV เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าต่อแบบ Delta-Wye ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับขวงเท่านั้นที่ถูกถ่ายโอน

$$Z_1 = \left(\frac{13}{115}\right)^2 (4.0 + j10.0) + 0.034 + j1.014 = 0.085 + j1.142$$

$$Z_0 = 0.034 + j1.014$$

$$3I_0 = \frac{3(13,000/\sqrt{3})}{3 \cdot 0 + (0.085 + 0.085 + 0.034) + j(1.142 + 1.142 + 1.014)}$$

ดังนั้นขนาดของ  $3I_0$

$$|3I_0| = 6,814 \text{ A และ X/R Ratio} = 16.2$$

ค่า 6,814 A ของบัสแรงดันไฟฟ้า 13 kV จะถูกนำมาใช้สำหรับหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้าจากสูตรหาขนาดแท่งตัวนำไฟฟ้า

$$A_{\text{kcmil}} = I \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (4.18)$$

$$A_{\text{kcmil}} = 6.814 \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{3.85}{0.05 \cdot 0.00378 \cdot 5.862}\right) \ln\left(\frac{245 + 700}{245 + 40}\right)}} = 65.9 \text{ kcmils หรือ } 33.4 \text{ mm}^2$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

(Touch Voltage & Step Voltage Criteria)

ความหนาของหินกรวดโรยผิวดิน  $h_s = 0.102 \text{ m (4 in)}$

ความต้านทานของหินกรวดโรยผิวดิน  $\rho_s = 2500 \ \Omega \cdot \text{m}$

ความต้านทานจำเพาะของดิน  $\rho = 400 \ \Omega \cdot \text{m}$

แฟคเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานแตกต่างระหว่างชั้นหินกรวดกับชั้นดินที่มีค่าความต้านทานกระจายสม่ำเสมอ  $K$  คำนวณได้ดังนี้

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (4.19)$$

$$K = \frac{400 - 2500}{400 + 2500} = -0.72$$

รูปภาพที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าสำหรับ  $K = -0.72$  ค่าของแฟคเตอร์ลดลงของชั้นหินกรวดซึ่งใช้เป็นวัสดุที่ใช้โรยผิวดินซึ่งเป็นชั้นบนสุด  $C_s$  มีค่าประมาณ 0.74 ซึ่งเป็นการดูจากกราฟ อย่างไรก็ตามค่า  $C_s$  นี้สามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.20) ดังนี้

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (4.20)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{400}{2500}\right)}{2(0.102) + 0.09}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้บุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าข้อมีน้ำหนักอย่างน้อยประมาณ 70 kg ดังนั้น จะใช้สมการ 2.35 และสมการ 2.37 เพื่อหาค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส

$$E_{\text{step70}} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.21)$$

$$E_{\text{step70}} = (1000 + 6(0.74)2500) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 2686.6 \text{ V}$$

$$E_{\text{touch70}} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.22)$$

$$E_{\text{touch70}} = (1000 + 1.5(0.74)2500) \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 832.2 \text{ V}$$

#### ขั้นตอนที่ 4 การออกแบบเบื้องต้น (Initial Design)

สมมติให้พื้นที่เป็นตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกันมีค่าเท่ากัน และมีขนาดพื้นที่ = 70 m X 70 m ดังรูปที่ 4.2 โดยที่แท่งตัวนำไฟฟ้ามีระยะห่าง  $D = 7 \text{ m}$  ความลึกที่ใช้ฝังตะแกรงจากระดับผิวดิน  $h = 0.5 \text{ m}$  และไม่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) ต่อเชื่อมกับตะแกรงแต่อย่างใด และมีความยาวรวมของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดินรวม  $L_T = 2 \times 11 \times 70 \text{ m} = 1540 \text{ m}$

#### ขั้นตอนที่ 5 หาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance)

ใช้สมการที่ (4.23) ในการหาโดย  $L = 1540 \text{ m}$  และพื้นที่  $A = 4900 \text{ m}^2$  ดังนั้นค่าความต้านทานคือ

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4.23)$$

$$R_g = 400 \left[ \frac{1}{1540} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 4900}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{20/4900}} \right) \right] = 2.78 \ \Omega$$

#### ขั้นตอนที่ 6 หาค่ากระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด $I_G$ (Grid current)

สมการการหาค่า  $I_G$  จะใช้สมการ (4.24) ในการหาค่า และกำหนดให้  $D_f = 1$  และให้แฟกเตอร์การแบ่งกระแสไฟฟ้าผิดปกติ  $S_f = 0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_f = \frac{I_g}{3 \cdot I_0}$$

$$\text{และ } I_G = D_f \cdot I_g \quad (4.24)$$

ตามทีบัส 13 kV มีค่ากระแสไฟฟ้าผุดพร้อม 6814 A ซึ่งมีค่ามากกว่าบัส 115 kV ซึ่งมีค่า 3180 A เนื่องจากขดลวดหม้อแปลงด้านบัส 13 kV เป็นแบบ Wye-grounded คือ แหล่งจ่าย Local ของกระแสไฟฟ้าผุดพร้อม และมันจะไม่ทำให้เกิด GPR ดังนั้นกระแสไฟฟ้าแตะแรงสูงสุด คือ 3180 A

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot 3 \cdot I_0$$

$$I_G = (1) \cdot (0.6) \cdot 3 \cdot (3180) = 1908 \text{ A}$$

### ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่า GPR

ตอนนี้ไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ  $I_G$  และ  $R_g$  ต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (4.25)$$

$$GPR = 1908 \cdot 2.78 = 5304 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่ากับเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{\text{touch}}$ ) ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่า ค่า  $GPR = 5304 \text{ V}$  มีค่ามากกว่าค่า  $E_{\text{touch}} = 838.2 \text{ V}$  กว่ามาก ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึง ค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $E_{\text{touch}}$  จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

### ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าแตะแรง $E_m$ (Mesh Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว $E_s$ (Step Voltage)

โดยทำการคำนวณดังนี้

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \left[ \ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (4.26)$$

$$\text{เมื่อ } K_{ii} = \frac{1}{\frac{2}{(2 \cdot n)^n}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{ii} = \frac{1}{\frac{2}{(2 \cdot 11)^{11}}} = 0.57$$

$$\text{และ } K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (4.27)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

แทนค่าหา  $K_m$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{7^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.01} + \frac{(7 + 2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 7 \cdot 0.01} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.01} \right] + \frac{0.57}{1.225} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot 11 - 1)} \right] \quad (4.28)$$

$$K_m = 0.89$$

แฟกเตอร์  $K_i$  จะใช้สมการที่ (4.29) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (4.29)$$

$$\text{เมื่อ } n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (4.30)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2 \cdot 1540}{280}$$

$$n_b = 1 \text{ สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส}$$

$$n_c = 1 \text{ สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส}$$

$$n_d = 1 \text{ สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส}$$

ดังนั้น

$$n = 11 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11$$

เพราะฉะนั้น ค่า  $K_i$  มีค่าเป็น

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot 11 = 2.272$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ  $E_m$  ดังนั้น  $E_m$  จะมีค่าเป็น

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (4.31)$$

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.89 \cdot 2.272}{1540} = 1002.1 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 9 เปรียบเทียบค่า  $E_m$  กับ  $E_{step 70}$

จากการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_m$ ) พบว่ามีค่ามากกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{step 70}$ ) ( $1002.1 \text{ V} > 832.2 \text{ V}$ ) ดังนั้นตะแกรงที่ออกแบบนี้ยังไม่ปลอดภัย และตะแกรงจะต้องนำไปออกแบบใหม่เพื่อให้มีความปลอดภัยมากขึ้น จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนที่ 1 เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยอีกครั้ง

จากตัวอย่างที่ผ่านมาเป็นการคำนวณด้วยมือ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับ โปรแกรม EPRI TR-100622 ปรากฏว่าได้ผลลัพธ์ของค่าความต้านทานตะแกรงเป็น  $2.67 \Omega$  และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้เป็น  $984.3 \text{ V}$

#### 4.3.2 ตะแกรงต่อลงดินแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อลงดินแนวตั้ง

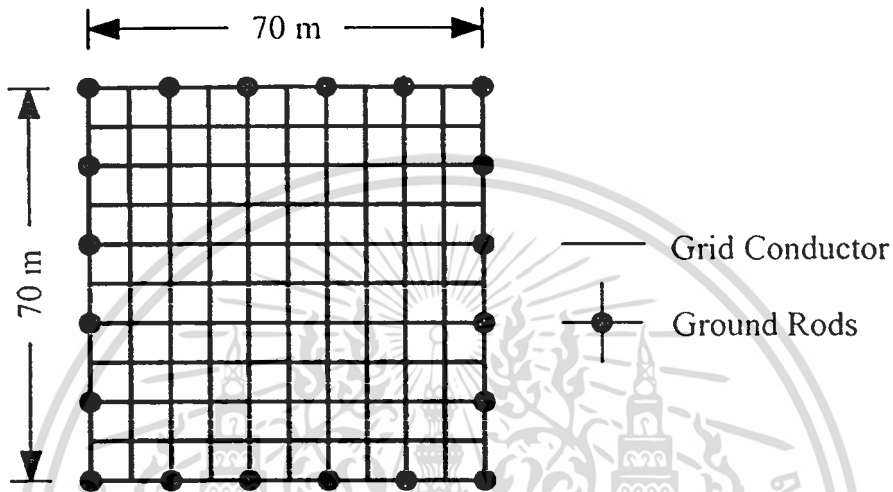
จากตัวอย่างที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าขั้นตอนที่ 10 ไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_m$ ) ยังไม่ผ่าน โดยทั่วไปแล้วการปรับเปลี่ยนในส่วนประกอบโครงสร้างของตะแกรงต่อลงดินให้สามารถผ่านเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ มีข้อสำคัญ 2 ข้อ คือ

1. ลดค่า GPR ให้มีค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{touch}$ ) หรือค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่ได้จากการคำนวณครั้งใหม่ต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{touch}$ )
2. ลดค่ากระแสไฟฟ้าผิดปกติที่มีอยู่ในระบบ

โดยทั่วไปแล้วการลดค่ากระแสไฟฟ้าผิดปกติที่มีอยู่ในระบบเป็นเรื่องที่ยากมากหรืออาจเป็นไปได้เลยในทางปฏิบัติ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและตำแหน่งตะแกรงต่อลงดินจะเป็นเรื่องที่สามารถทำได้ง่ายกว่า ซึ่งการปรับเปลี่ยนโครงสร้างตะแกรงนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ลดระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกัน (Grid Conductor Spacing) ฝังตะแกรง

ต่อลงดินให้ลึกมากขึ้น (Grid Depth) เพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) กับตะแกรงต่อลงดิน

ในตัวอย่างนี้จะใช้ตะแกรงที่มีลักษณะเหมือนกับตัวอย่างที่ผ่านมาแต่จะเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) กับตะแกรงต่อลงดินเป็นจำนวน 20 แท่ง โดยแต่ละแท่งมีความยาว 7.5 m ซึ่งแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) จะต่อเชื่อมกับตะแกรงบริเวณขอบตะแกรงทั้งสี่ด้านดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่งยาว 7.5 m จำนวน 20 แท่งต่อเชื่อมอยู่ด้วย

ในการคำนวณออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้จะเริ่มที่ขั้นตอนที่ 5 เนื่องจากขั้นตอนที่ 1-4 ได้อธิบายไปแล้วในตัวอย่างที่ผ่านมา ดังนั้นจะนำค่าที่ได้มาใช้เลย

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance)

$$L_T = 1540 + (20 \cdot 7.5) = 1690 \text{ m}$$

$$A = 4900 \text{ m}^2$$

เพราะฉะนั้น  $R_g$  มีค่าเท่ากับ

$$R_g = 400 \left[ \frac{1}{1690} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 4900}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right] = 2.75 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 6 หาค่ากระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด  $I_G$  (Grid current)

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot 3 \cdot I_0$$

$$I_G = (1) \cdot (0.6) \cdot 3 \cdot (3180) = 1908 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่า GPR

ตอนนี้ไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ  $I_G$  และ  $R_g$  ต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

$$GPR = 1908 \cdot 2.75 = 5247 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่ากับเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{\text{touch}}$ ) ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่า ค่า  $GPR = 5247 \text{ V}$  มีค่ามากกว่าค่า  $E_{\text{touch}} = 838.2 \text{ V}$  กว่ามาก ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึง ค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $E_{\text{touch}}$  จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง  $E_m$  (Mesh Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว  $E_s$  (Step Voltage)

โดยทำการคำนวณดังนี้

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

เนื่องจากตะแกรงต่อลงดินมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) ต่อเชื่อมอยู่ด้วย ดังนั้น

$$K_{ii} = 1$$

$$\text{และ } K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

แทนค่าหา  $K_m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{7^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.01} + \frac{(7+2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 7 \cdot 0.01} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.01} \right] + \frac{0.57}{1.225} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot 11 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0.77$$

แฟกเตอร์  $K_i$  จะใช้สมการที่ (4.10) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n$$

เมื่อ  $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2 \cdot 1540}{280}$$

$n_b = 1$  สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_c = 1$  สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$n_d = 1$  สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ดังนั้น

$$n = 11 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11$$

เพราะฉะนั้น ค่า  $K_i$  มีค่าเป็น

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot 11 = 2.272$$

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ  $E_m$  ดังนั้น  $E_m$  จะมีค่าเป็น

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \text{ และ } L_M = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.77 \cdot 2.272}{1540 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] \cdot 150} = 747.4 \text{ V}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $E_m$  กับ  $E_{\text{touch}}$  ในขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า  $E_m$  มีค่าน้อยกว่า  $E_{\text{touch}}$  ( $747.4 \text{ V} < 838.2 \text{ V}$ ) ดังนั้นให้ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว  $E_s$  ต่อไป

การหาค่า  $E_s$  จำเป็นที่จะต้องรู้ค่า  $L_s$ ,  $K_s$  และ  $K_i$  เพื่อมาแทน ในสมการ  $E_s$  แต่ค่า  $K_i$  ยังคงมีค่าเท่ากับ 2.272

จากสมการที่ (4.17)

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot 0.5} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11-2}) \right] = 0.406$$

จากสมการที่ (4.14)

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$$

จากสมการที่ (4.15)

$$L_s = 0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R$$

แทนในสมการที่ (4.14) จะได้

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R}$$

$$E_s = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.406 \cdot 2.272}{0.75 \cdot 1540 + 0.85 \cdot 150} = 548.9 \text{ V}$$

**ขั้นตอนที่ 9 เปรียบเทียบค่า  $E_m$  กับ  $E_{\text{touch}70}$  ( $E_m$  Versus  $E_{\text{touch}70}$ )**

ค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_m$ ) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบตะแกรงต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{\text{touch}70}$ ) ( $747.4 \text{ V} < 838.2 \text{ V}$ ) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 10

### ขั้นตอนที่ 10 เปรียบเทียบค่า $E_s$ กับ $E_{critical}$ ( $E_s$ Versus $E_{critical}$ )

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_s$ ) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบตะแกรงต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{critical}$ ) ( $548.9 \text{ V} < 2686.6 \text{ V}$ ) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 12

### ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด (Detailed Design)

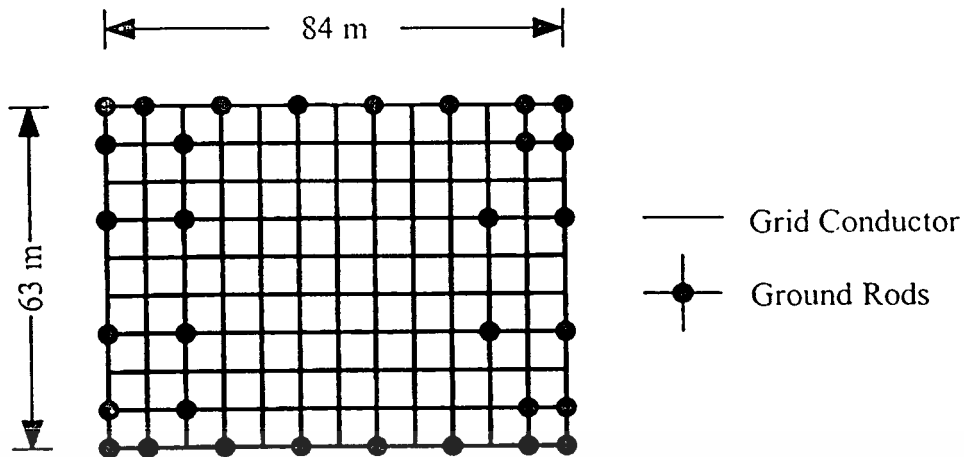
การออกแบบตะแกรงต่อลงดินที่ได้ทำมานั้นมีความปลอดภัยเพียงพอต่อบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าแล้ว ดังนั้นขั้นตอนนี้จะป็นงานลากสายดินจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่บนลานไคไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในตู้คอนโทล โดยในแต่ละกลุ่มของอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจจะต่อสายดินมารวมกันไว้ที่บัสดิน (Ground Bus) แล้วจึงค่อยต่อเชื่อมไปยังตะแกรงต่อลงดินที่ฝังใต้ผิวดิน ซึ่งจะต้องทำควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

สำหรับการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ด้วยมือกับโปรแกรม EPRI TR-100622 พบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม EPRI TR-100622 มีค่าที่คำนวณได้ต่างๆดังนี้ ค่าความต้านทานตะแกรงมีค่า  $2.52 \Omega$  ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่า  $756.2 \text{ V}$  และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวมีค่าเป็น  $459.1 \text{ V}$

#### 4.3.3 ตะแกรงต่อลงดินแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อลงดินแนวดิ่ง

กำหนดให้ตะแกรงต่อลงดินสำหรับตัวอย่างนี้ มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้า  $D = 7 \text{ m}$  มีขนาดพื้นที่ตะแกรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็น  $63 \text{ m} \times 84 \text{ m}$  มีจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน  $y$  รวม 13 แท่ง มีจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน  $x$  รวม 10 แท่ง เมื่อรวมความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบซึ่งถูกใช้ทำตะแกรงจะมีค่าเท่ากับ  $13 \times 63 \text{ m} + 10 \times 84 \text{ m} = 1659 \text{ m}$  และสมมติให้ตะแกรงต่อลงดินนี้มีการเชื่อมต่อแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod) จำนวน 38 แท่ง โดยแต่ละแท่งยาว  $10 \text{ m}$  ดังรูปที่ 4.4

ในการคำนวณออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้จะเริ่มที่ขั้นตอนที่ 5 เนื่องจากขั้นตอนที่ 1-4 ได้อธิบายไปแล้วในตัวอย่างที่ผ่านมา (4.3.1) ดังนั้นจะนำค่าที่ได้มาใช้เลย



รูปที่ 4.4 ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวดิ่ง (Ground Rod)  
จำนวน 38 แท่ง แต่ละแท่งยาว 10 m

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance)

$$L_T = 1540 + (38 \cdot 10) = 2039 \text{ m}$$

$$A = 63 \text{ m} \times 84 \text{ m} = 5292 \text{ m}^2$$

เพราะฉะนั้น  $R_g$  มีค่าเท่ากับ

$$R_g = 400 \left[ \frac{1}{2039} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 5292}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{5292}}} \right) \right] = 2.62 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 หาค่ากระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด  $I_G$  (Grid current)

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot 3 \cdot I_0$$

$$I_G = (1) \cdot (0.6) \cdot 3 \cdot (3180) = 1908 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่า GPR

ตอนนี้ไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ  $I_G$  และ  $R_g$  ต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

$$GPR = 1908 \cdot 2.62 = 4998.96 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่ากับเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{\text{touch}}$ ) ที่คำนวณได้จาก

ขั้นตอนที่ 3 พบว่า ค่า GPR = 4998.96 V มีค่ามากกว่าค่า  $E_{\text{touch}} = 838.2 \text{ V}$  กว่ามาก ดังนั้นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบ หมายถึง ค่า GPR ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $E_{touch}$  จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง  $E_m$  (Mesh Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว  $E_s$  (Step Voltage)

โดยทำการคำนวณดังนี้

$$\text{จาก } n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2 \cdot 1540}{280} = 11$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{294}{4 \cdot \sqrt{5292}}} = 1.005$$

$$n_c = 1 \text{ สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า}$$

$$n_d = 1 \text{ สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า}$$

ดังนั้น

$$n = 11.29 \cdot 1.005 \cdot 1 \cdot 1 = 11.35$$

$$K_{ii} = 1 \text{ สำหรับตะแกรงที่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อเชื่อมอยู่ด้วย}$$

$$\text{และ } K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าหา  $K_m$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{7^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.01} + \frac{(7+2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 7 \cdot 0.01} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.01} \right] + \frac{1.0}{1.225} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot 11.35 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0.77$$

แฟกเตอร์  $K_i$  จะใช้สมการที่ (4.10) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n$$

เพราะฉะนั้น ค่า  $K_i$  มีค่าเป็น

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot 11.35 = 2.324$$

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ  $E_m$  ดังนั้น  $E_m$  จะมีค่าเป็น

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \text{ และ } L_M = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R$$

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

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.77 \cdot 2.324}{1659 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{10}{\sqrt{63^2 + 84^2}} \right) \right] \cdot 380} = 595.8 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 9 เปรียบเทียบค่า  $E_m$  กับ  $E_{touch70}$  ( $E_m$  Versus  $E_{touch70}$ )

ค่าแรงดันไฟฟ้าแตะแรง ( $E_m$ ) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบตะแกรงต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{touch70}$ ) ( $595.8 \text{ V} < 838.2 \text{ V}$ )

เมื่อลองมาวิเคราะห์ดูจะพบว่า การที่เราเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ที่มีความยาวรวม  $L_R = 230 \text{ m}$  มาทำการต่อเชื่อมกับตะแกรง และเพิ่มปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวราบที่ใช้ทำตะแกรงขึ้นอีกรวม  $119 \text{ m}$  จะยิ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าแตะแรงยังมีค่าลดลงมากขึ้น เมื่อลองเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 4.3.3

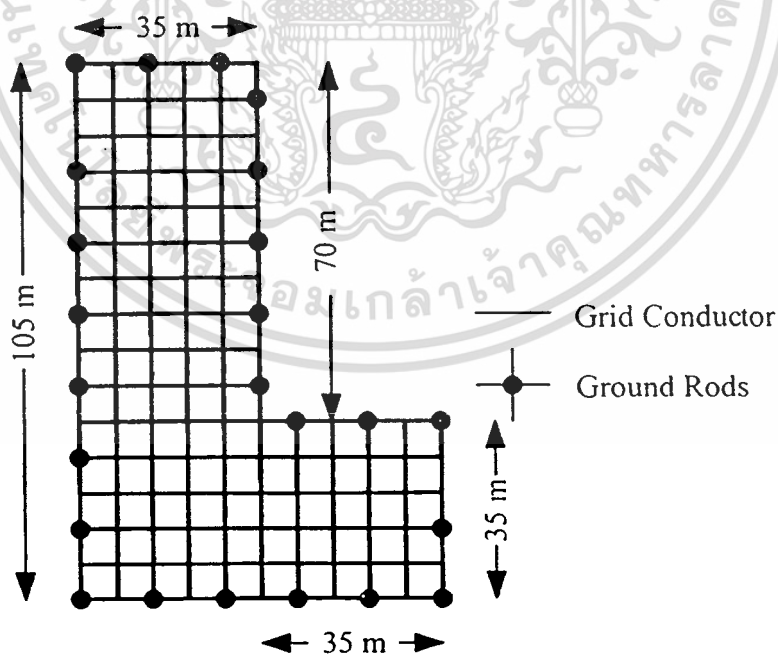
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว ( $E_g$ ) ไม่จำเป็นต้องหาแล้วก็ได้เพราะโดยมากแล้วถ้าค่าของแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_{gr}$ ) ผ่าน แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว ( $E_g$ ) ก็ผ่านเหมือนกันเพราะค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว ( $E_{cap}$ ) จะมีค่าที่สูงมากทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำว ( $E_g$ ) ที่คำนวณได้จริงมักจะผ่าน ดังนั้นสิ่งที่เรามักจับจ้อง (Concentrate) จะอยู่ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_{gr}$ ) ที่ใช้เปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ( $E_{touch}$ )

สำหรับการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ด้วยมือกับ โปรแกรม EPRI TR-100622 พบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม EPRI TR-100622 มีค่าที่คำนวณได้ต่างๆดังนี้ ค่าความต้านทานตะแกรงมีค่า  $2.28 \Omega$  ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่า  $519.4 \text{ V}$  และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวมีค่าเป็น  $349.7 \text{ V}$

#### 4.3.4 ตะแกรงต่อลงดินรูปตัวแอลมีแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อลงดินแนวตั้ง

กำหนดให้ตะแกรงต่อลงดินสำหรับตัวอย่างนี้ มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้า  $D = 7 \text{ m}$  มีขนาดพื้นที่ตะแกรงเป็นดังรูปที่ 4.5 มีจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน  $y$  และ มีจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวแกน  $x$  เป็นดังรูปที่ 4.5 เมื่อรวมความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบซึ่งถูกใช้ทำตะแกรงจะมีค่าเท่ากับ  $(35 \times 10) + (70 \times 6) + (35 \times 5) + (105 \times 6) = 1575 \text{ m}$  และสมมติให้ตะแกรงต่อลงดินนี้มีการเชื่อมต่อแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) จำนวน 24 แท่ง โดยแต่ละแท่งยาว  $7.5 \text{ m}$  ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตะแกรงต่อลงดินรูปตัวแอลต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rods) 24 แท่ง แต่ละแท่งยาว  $7.5 \text{ m}$

ในการคำนวณออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้จะเริ่มที่ขั้นตอนที่ 5 เนื่องจากขั้นตอนที่ 1-4 ได้อธิบายไปแล้วในตัวอย่างที่ผ่านมา (4.3.1) ดังนั้นจะนำค่าที่ได้มาใช้เลย

**ขั้นตอนที่ 5** หาค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (*Grid Resistance*)

$$L_T = 1575 + (24 \cdot 7.5) = 1755 \text{ m}$$

$$A = 35 \text{ m} \times 105 \text{ m} + 35 \text{ m} \times 35 \text{ m} = 4900 \text{ m}^2$$

เพราะฉะนั้น  $R_g$  มีค่าเท่ากับ

$$R_g = 400 \left[ \frac{1}{1755} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 4900}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right] = 2.74 \ \Omega$$

**ขั้นตอนที่ 6** หาค่ากระแสไฟฟ้าตะแกรงสูงสุด  $I_G$  (*Grid current*)

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot 3 \cdot I_0$$

$$I_G = (1) \cdot (0.6) \cdot 3 \cdot (3180) = 1908 \text{ A}$$

**ขั้นตอนที่ 7** คำนวณหาค่า *GPR*

ตอนนี้ไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ  $I_G$  และ  $R_g$  ต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้

$$GPR = I_G \cdot R_g$$

$$GPR = 1908 \cdot 2.74 = 5228 \text{ V}$$

ทำการเปรียบเทียบค่ากับเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{\text{touch}}$ ) ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พบว่า ค่า  $GPR = 5228 \text{ V}$  มีค่ามากกว่าค่า  $E_{\text{touch}} = 838.2 \text{ V}$  กว่ามาก ดังนั้นการออกแบบจะยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านี้ จะต้องทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป การสิ้นสุดการออกแบบหมายถึง ค่า  $GPR$  ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $E_{\text{touch}}$  จึงจะกระโดดไปสู่ขั้นตอนที่ 12 ได้

**ขั้นตอนที่ 8** คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง  $E_m$  (*Mesh Voltage*) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว  $E_s$  (*Step Voltage*)

โดยทำการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก } n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p}$$

$$n_a = \frac{2 \cdot 1575}{350} = 9$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{350}{4 \cdot \sqrt{4900}}} = 1.12$$

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

$$n_c = \left[ \frac{70 \cdot 105}{4900} \right]^{\frac{0.7 \cdot 4900}{70 \cdot 105}} = 1.21$$

$$n_d = 1 \text{ สำหรับตะแกรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า}$$

ดังนั้น

$$n = 9 \cdot 1.12 \cdot 1.21 \cdot 1 = 12.2$$

$$K_{ii} = 1 \text{ สำหรับตะแกรงที่มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อเชื่อมอยู่ด้วย}$$

$$\text{และ } K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

จาก

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

แทนค่าหา  $K_m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \frac{7^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.01} + \frac{(7+2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 7 \cdot 0.01} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.01} \right] + \frac{1.0}{1.225} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot 12.2 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0.76$$

แฟกเตอร์  $K_i$  จะใช้สมการที่ (4.10) มาทำการคำนวณ

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n$$

เพราะฉะนั้น ค่า  $K_i$  มีค่าเป็น

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot 12.2 = 2.45$$

เมื่อนำค่าต่างๆมาแทนในสมการ  $E_m$  ดังนั้น  $E_m$  จะมีค่าเป็น

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \text{ และ } L_M = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R$$

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

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.76 \cdot 2.45}{1575 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 105^2}} \right) \right] \cdot 180} = 761.1 \text{ V}$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $E_m$  กับ  $E_{\text{touch}}$  ในขั้นตอนที่ 3 พบว่าค่า  $E_m$  มีค่าน้อยกว่า  $E_{\text{touch}}$  ( $761.1 \text{ V} < 838.2 \text{ V}$ ) ดังนั้นให้ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว  $E_s$  ต่อไป

การหาค่า  $E_s$  จำเป็นที่จะต้องรู้ค่า  $L_s$ ,  $K_s$  และ  $K_i$  เพื่อมาแทน ในสมการ  $E_s$  แต่ค่า  $K_i$  ยังคงมีค่าเท่ากับ 2.272

จากสมการที่ (4.17)

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot 0.5} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{12.2-2}) \right] = 0.41$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.14)

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s}$$

จากสมการที่ (4.15)

$$L_s = 0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R$$

แทนในสมการที่ (4.14) จะได้

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R}$$

$$E_s = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.41 \cdot 2.245}{0.75 \cdot 1575 + 0.85 \cdot 180} = 574.6 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 9 เปรียบเทียบค่า  $E_m$  กับ  $E_{touch70}$  ( $E_m$  Versus  $E_{touch70}$ )

ค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง ( $E_m$ ) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบตะแกรงต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{touch70}$ ) ( $761.1 \text{ V} < 838.2 \text{ V}$ ) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 10

ขั้นตอนที่ 10 เปรียบเทียบค่า  $E_s$  กับ  $E_{step70}$  ( $E_s$  Versus  $E_{step70}$ )

ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ( $E_s$ ) ที่คำนวณได้ภายหลังการออกแบบตะแกรงต่อลงดินมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์ทนได้ ( $E_{step70}$ ) ( $574.6 \text{ V} < 2686.6 \text{ V}$ ) ให้ไปทำขั้นตอนที่ 12

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด (Detailed Design)

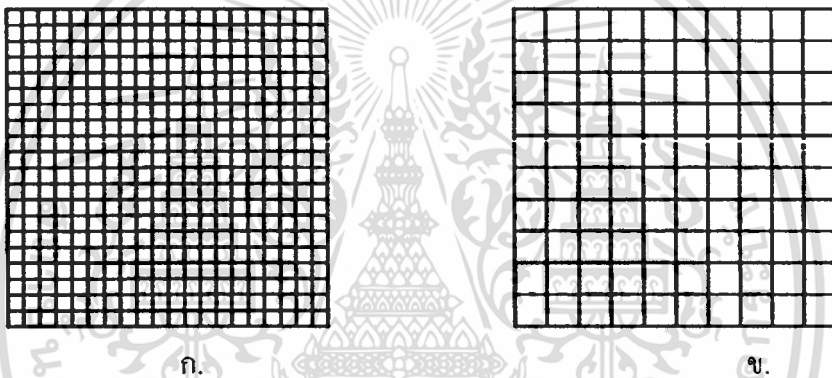
การออกแบบตะแกรงต่อลงดินที่ได้ทำมานั้นมีความปลอดภัยเพียงพอต่อบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าแล้ว ดังนั้นขั้นตอนนี้จะป็นงานลากสายดินจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่บนลาน ไกไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในตู้คอนโทล โดยในแต่ละกลุ่มของอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจจะต่อสายดินมารวมกันไว้ที่บัสดิน (Ground Bus) แล้วจึงค่อยต่อเชื่อมไปยังตะแกรงต่อลงดินที่ฝังใต้ผิวดิน ซึ่งจะต้องทำควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

สำหรับการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ด้วยมือกับ โปรแกรม EPRI TR-100622 พบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม EPRI TR-100622 มีค่าที่คำนวณได้ต่างๆดังนี้ ค่าความต้านทานตะแกรงมีค่า  $2.34 \Omega$  ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่า  $742.9 \text{ V}$  และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวมีค่าเป็น  $441.8 \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ทฤษฎีการออกแบบระบบต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

การที่จะทำให้ระบบต่อลงดินนั้นมีความปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าไม่ใช่เรื่องยาก เพราะเพียงแค่มิงบประมาณที่ไม่จำกัดสำหรับการสร้างระบบต่อลงดินก็สามารถสร้างระบบต่อลงดินที่มีความปลอดภัยสูงสุดต่อบุคคลได้แล้ว เพราะความปลอดภัยต่อบุคคลจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวนำไฟฟ้า กล่าวคือยิ่งตะแกรงต่อลงดินนั้นมีความถี่ของช่องตะแกรงมากเท่าไร ความปลอดภัยก็จะมากขึ้นเท่านั้น แต่การที่ตะแกรงมีความถี่ของช่องตะแกรงมาก ปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้ารวมที่ใช้ทำตะแกรงก็ยิ่งมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ยิ่งตะแกรงถี่มากขึ้น ช่องตะแกรงยิ่งเล็กค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินก็จะลดลงด้วย ( $R_u$ ) แรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage:  $E_m$ ) ก็จะมีน้อยลง และ ดังรูปที่ 4.6 ตะแกรง ประเภท ก. ย่อมมีความปลอดภัยมากกว่าตะแกรงประเภท ข.



รูปที่ 4.6 ตะแกรงต่อลงดินแบบ ก. มีแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรง และค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าแบบ ข.

เมื่อลองพิจารณาในด้านผู้รับเหมาก่อสร้างหรือผู้ขายระบบต่อลงดิน หรือจะพิจารณาในด้านผู้บริหารงบประมาณ โครงการ ฝ่ายจัดซื้อจัดจ้างในการสร้างระบบต่อลงดิน คงไม่มีผู้ใดที่จะตั้งงบประมาณอย่างไม่จำกัดอย่างแน่นอน เพราะทุกฝ่ายในองค์กรใดๆ ที่เกี่ยวข้องต้องอยากได้ “ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในขณะที่ระบบมีราคาต่ำที่สุด” ดังนั้นจะอย่างไรให้สามารถสร้างระบบต่อลงดินนี้มีความปลอดภัยสูงสุด ในขณะที่มีราคาต่ำสุด (Minimum Cost) ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของต้นทุนแล้วจะมีอยู่ 2 ปัจจัยหลัก คือ ต้นทุนวัสดุ (Material Cost) และต้นทุนด้านแรงงาน (Labor Cost)

ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดในการลดต้นทุนจาก 2 ปัจจัยนี้ คือ การลดค่าแรงงาน เช่น ลดค่าการออกแบบลง ลดจำนวนคนงานก่อสร้างลง ลดการใช้เครื่องมือเครื่องจักรลง หรือ บริหารการก่อสร้างให้สำเร็จให้เร็วที่สุด เพื่อลดค่าแรงประจำวันลง แต่การลดต้นทุนด้านค่าแรงงานในความเห็นของบริษัท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับออกแบบ และสร้างระบบต่อลงดิน ต้องกล่าวว่ามันคุ้มอย่างแน่นอน เพราะไม่มีกำไรที่เกิดขึ้นจากโครงการนั้นๆ และการลดต้นทุนด้านแรงงาน บริษัทไหนๆที่เป็นคู่แข่งขายระบบต่อลงดินก็สามารถทำได้ เพราะไม่ได้เป็นความรู้เฉพาะ (Know How) และเมื่อลดต้นทุนด้านแรงงานก็สามารถลดต้นทุนได้เพียงเล็กน้อย เพราะโดยมากแล้วส่วนค่าแรงจะเป็นส่วนของกำไร (Profit) ของโครงการนั้นๆ ซึ่งอยู่กับฝีมือผู้บริหาร โครงการ (Project Director) หรือผู้จัดการโครงการ (Project Manager) ในการบริหารงาน

ดังนั้นการลดต้นทุน (Cost Reduction) จึงให้ความสำคัญที่การลดต้นทุนด้านวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำไฟฟ้า (Material Cost) นอกจากการ... แหล่งวัตถุดิบราคาถูกแล้ว การลดการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าสำหรับสร้างระบบต่อลงดินเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะสามารถลดต้นทุนได้เป็นจำนวนมาก เพราะการลดวัสดุที่ใช้ทำแท่งตัวนำไฟฟ้า เมื่อพิจารณาดีๆพบว่าจะทำให้ลดงานที่เป็นกระบวนการต่อเนื่องลงได้ เช่น จุดต่อเชื่อม (Material Welding) ก็จะลดลง ซึ่งจะทำให้ลดต้นทุนในส่วนของการเชื่อม ตัวจับยึด การออกแบบ ซึ่งเป็นกระบวนการต่อเนื่องลดลงได้

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือ ทำอย่างไรให้ระบบต่อลงดินมีความปลอดภัยต่อบุคคลสูงสุด และมีต้นทุนการก่อสร้างที่ต่ำสุด ซึ่งเราเรียกการออกแบบนี้ว่า การออกแบบระบบต่อลงดินที่ใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Grounding System Design)

#### 4.4.1 แนะนำการออกแบบระบบการต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

หน้าที่หลักของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า คือ ป้องกันเครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องภายในระบบกำลังไฟฟ้าให้ปลอดภัยจากกระแสไฟฟ้าผิดปกติ (Fault Current) และป้องกันบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าให้ปลอดภัยจากไฟฟ้าดูดจากการสัมผัส หรือระยะช่วงก้าวของบุคคลนั้น

ความปลอดภัยของอุปกรณ์ไฟฟ้าในภาคกำลังนั้นสามารถทำได้โดย ลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน และ ลดค่า Ground Potential Rise (GPR) ของสถานีไฟฟ้านั้น แต่ความปลอดภัยของบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าสามารถลดได้โดยการทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่กระจายผิวดิน (The Potential Distribution of Ground Surface) แต่ละแนวเส้นศักย์มีค่าที่เท่ากัน และลดค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันช่วงก้าวลง (Touch & Step Voltages)

ดังนั้นทำอย่างไรที่ศักย์ไฟฟ้าที่กระจายผิวดิน (The Potential Distribution of Ground Surface)

เหนือระบบต่อลงดิน แต่ละแนวเส้นศักย์ให้มีค่าที่เท่ากัน เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งเป็นกฎเกณฑ์นำไปสู่การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบระบบต่อลงดินที่มั่นใจได้ในความปลอดภัย ดังนั้นการออกแบบระบบต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นจะต้องสามารถมั่นใจได้ว่า ระบบต่อลงดินที่ออกแบบมานั้นสามารถทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่กระจายผิวดิน (The Potential Distribution of Ground Surface) แต่ละแนวเส้นศักย์มีค่าที่เท่ากัน

การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้เทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้านั้น เป็นการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบ (The Horizontal Grounding Conductor) หรือก็คือตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำตะแกรงต่อลงดิน (Ground Grid) ซึ่งไม่ใช่แท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ให้มีความเหมาะสม โดยที่ยังสามารถกระจายกระแสไฟฟ้ารั่วไหล และกระจายศักย์ไฟฟ้าผิวดินได้อย่างสม่ำเสมอ และในท้ายที่สุดของการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินนี้จะส่งผลให้ลดแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสลงได้ รวมทั้งแน่ใจได้ว่าบุคคลที่อยู่ภายในพื้นที่ที่มีระบบต่อลงดินดังกล่าวอยู่จะปลอดภัยจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

การออกแบบระบบต่อลงดินโดยการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมนี้ได้รับการศึกษา ถกเถียงในด้านวิชาการ มาตั้งแต่ปี 1975 โดย F. Dawalibi และ D. Mukhedkar [4]-[6] ซึ่งทั้งสองได้นำเสนองานวิจัยทางด้านการออกแบบตะแกรงต่อลงดินโดยใช้เทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมถึง 3 ชิ้น ปี 1976 J.G. Sverak [7] ก็ได้้นำเสนองานวิจัยชื่อ Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Techniques ซึ่งเป็นแนวความคิดในการจัดระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าในแต่ละคู่แตกต่างกัน

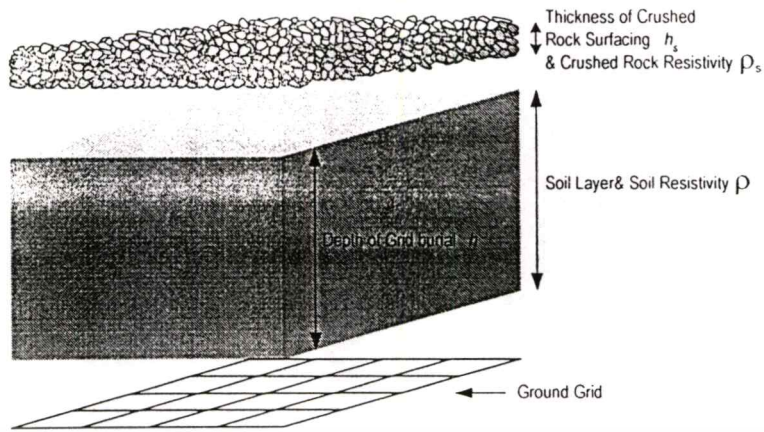
หลักเกณฑ์ในการพิจารณาการจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกันให้มีค่าแตกต่างกันนั้น ได้ถูกคิดค้น วิเคราะห์ โดยการทดลองที่จำลองขึ้นจำนวนมาก และวิเคราะห์ผลลัพธ์ในมหาวิทยาลัย Chongqing ในสาธารณรัฐประชาชนจีน [2] การถกเถียงทั้งหมดนั้นมุ่งไปที่ดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอ (Uniform Soil) หรือ ดินชั้นเดียว ซึ่งในความเป็นจริงดินในลักษณะดังกล่าวพบได้ยากมากในธรรมชาติ และโครงสร้างดินจริงๆ (The Actual Soil Structure) สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองดินหลายชั้น (Multi-Layer Soil Model) ทั้งในแนวตั้ง (Vertical) และแนวราบ (Horizontal)

ก่อนที่จะนำสู่หัวข้อการศึกษาต่อไป มีบางสิ่งที่คุณศึกษาจะต้องทำความเข้าใจในงานวิจัยของ J.G. Sverak [7] ที่ได้นำเสนองานวิจัยชื่อ Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Techniques กับมาตรฐานการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย IEEE Std. 80-2000 [1] โดยมีความสำคัญดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงตามธรรมชาติเมื่อพิจารณาคลื่นลึกลงไปในแนวดิ่งจะพบว่าดินจะมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความลึกเพราะดินมาจากองค์ประกอบที่มีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ และความลึก ดังนั้นจึงพิจารณาดินให้มีลักษณะเป็นชั้นดิน โดยแยกชั้นตามค่าความต้านทาน ซึ่งจะพบว่าเมื่อแยกชั้นดินตามค่าความต้านทานแล้ว จะเกิดชั้นดินเป็นจำนวนมากจึงพิจารณาดินลักษณะนี้ว่าเป็น แบบจำลองดินหลายชั้น (Multi-Layer Soil Model) กล่าวคือ พิจารณาดินตั้งแต่ดินชั้นที่ 1 ( $\rho_1$ ) จนถึงดินชั้นที่ n ( $\rho_n$ ) มาคำนวณออกแบบ ซึ่งการออกแบบโดยพิจารณาดินในลักษณะดังกล่าวค่อนข้างสร้างความยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบจริง เพราะต้องคำนวณ โดยวิธี Numerical Method มาร่วมด้วย ดังนั้นเพื่อความง่ายและเหมาะกับการไปใช้ในการออกแบบจริงในทางปฏิบัติ จึงพิจารณาดินแค่เพียงชั้นเดียว คือ พิจารณาดินที่มีค่าความต้านทานหลายๆค่า ให้เป็นเพียงค่าๆเดียวโดยการใช้มีเตอร์วัดและเฉลี่ยค่าความต้านทาน [1] ซึ่งเรียกดินลักษณะดังกล่าวว่า ดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอ (Uniform Soil) แล้วนำมาคำนวณซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ก็ยังเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณา [1] จะพบว่าเป็นการพิจารณาดินเพียงชั้นเดียว คือ ชั้นดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอ (Uniform Soil) ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะเป็น  $\rho$  และไปด้วยวัสดุโรยผิวดิน (Crushed Rock Layer) ที่มีค่าความต้านทานเป็น  $\rho_r$  เพื่อต้องการให้เกณฑ์แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้นั้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยลักษณะของตะแกรงต่อลงดิน และชั้นดินแสดงดังรูปที่ 4.7

จากการพิจารณาการค้นคว้าวิจัยของ [2] พบว่าเป็นการศึกษาแบบจำลองดินสองชั้น (Double Layer Soil Model) โดยแยกพิจารณาเป็นดินชั้นบน (Upper-Layer Soil) และดินชั้นล่าง (Bottom-Layer Soil) ดังนั้นถ้าต้องการนำผลการค้นคว้าวิจัยของ [2] มาประยุกต์ใช้ให้เป็นแบบจำลองดินชั้นเดียวนั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาสมการ  $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$  โดยสมการนี้เป็นสมการเฉพาะสำหรับดินชั้นบนและดินชั้นล่าง จากนั้นกำหนดให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง ( $\rho_2$ ) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน ( $\rho_1$ ) เพราะไม่พิจารณาดินแยกชั้นกัน ดังนั้นค่าความต้านทานจำเพาะของดินจึงมีเพียงค่าเดียว ทำให้  $K$  มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงพิจารณาที่  $K$  มีค่าเป็นศูนย์ พิจารณากราฟรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ของ [2]



รูปที่ 4.7 การแบ่งชั้นตามค่าความต้านทานของ IEEE Std. 80-2000 [1]

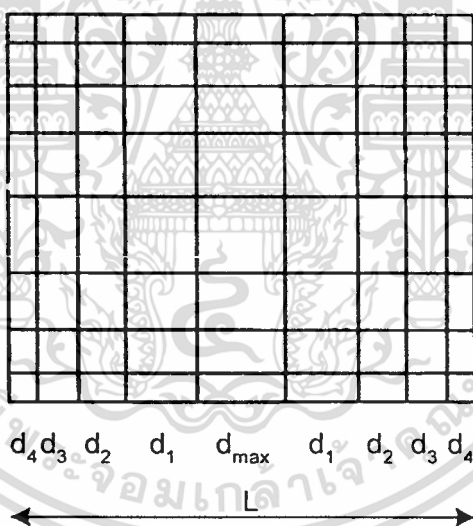
ในความเป็นจริงตามธรรมชาติเมื่อพิจารณาดินลึกลงไปในแนวดิ่งจะพบว่าดินจะมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความลึกเพราะดินมาจากองค์ประกอบที่มีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ และความลึก ดังนั้นจึงพิจารณาดินให้มีลักษณะเป็นชั้นดิน โดยแยกชั้นตามค่าความต้านทาน ซึ่งจะพบว่าเมื่อแยกชั้นดินตามค่าความต้านทานแล้ว จะเกิดชั้นดินเป็นจำนวนมากจึงพิจารณาดินลักษณะนี้ว่าเป็น แบบจำลองดินหลายชั้น (Multi-Layer Soil Model) กล่าวคือ พิจารณาดินตั้งแต่ดินชั้นที่ 1 ( $\rho_1$ ) จนถึงดินชั้นที่ n ( $\rho_n$ ) มาคำนวณออกแบบ ซึ่งการออกแบบโดยพิจารณาดินในลักษณะดังกล่าวค่อนข้างสร้างความยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบจริง เพราะต้องคำนวณโดยวิธี Numerical Method มาร่วมด้วย ดังนั้นเพื่อความง่ายและเหมาะกับการไปใช้ในการออกแบบจริงในทางปฏิบัติ จึงพิจารณาดินแค่เพียงชั้นเดียว คือ พิจารณาดินที่มีค่าความต้านทานหลายๆค่า ให้เป็นเพียงค่าๆเดียวโดยการใช้มิเตอร์วัดและเฉลี่ยค่าความต้านทาน [1].[9] ซึ่งเรียกดินลักษณะดังกล่าวว่า ดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอ (Uniform Soil) แล้วนำมาคำนวณซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ก็ยังเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณา IEEE Std. 80-2000 [1] จะพบว่าเป็นการพิจารณาดิน 2 ชั้น คือ ชั้นวัสดุโรยผิวดิน (Crushed Rock Layer) ที่มีค่าความต้านทานเป็น  $\rho_s$  และชั้นดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอ (Uniform Soil) ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะเป็น  $\rho$  ซึ่งมีลักษณะของตะแกรงต่อลงดิน และชั้นดินที่ถูกแยกแต่ละชั้นจากกันเพื่อความชัดเจนแสดงเป็นดังรูปที่ 4.7

ดังนั้นเพื่อป้องกันความสับสนในการระบุจำนวนชั้นดิน ขอให้ผู้ศึกษาใช้ค่าความต้านทานในแต่ละชั้นเป็นเกณฑ์การพิจารณา หรือใช้ค่าความต้านทานในการแบ่งจำนวนชั้น

#### 4.4.2 หลักการหาค่าอัตราส่วนการบีบ (Optimum Compression Ratio)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการออกแบบระบบการต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินให้มีความเหมาะสม เพื่อที่จะทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วไหล และศักย์ไฟฟ้าที่กระจายผิวดินมีค่าเท่ากัน ซึ่งการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าวนี้ จะต้องส่งผลให้สามารถลดแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage) และแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) ลงด้วย

การจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าต่อลงดินด้วยการจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่วางขนานกันให้มีค่าแตกต่างกัน จะใช้หลักที่เรียกว่า Exponent Regularity คือ เป็นการจัดตะแกรงให้ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเรื่อยๆ จากตำแหน่งศูนย์กลางตะแกรงมายังขอบของตะแกรง ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ ไม่เพียงแต่ลดศักย์ไฟฟ้าที่กระจายผิวดิน (The Potential Gradient of The Ground Surface) แต่ยังสามารถประหยัดการใช้ปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าด้วย นั่นก็คือคุณสมบัติของเราว่า “เราจะกำหนดกฎการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าอย่างไร”



รูปที่ 4.8 การจัดตะแกรงต่อลงดินแบบ Exponent Regularity [2]

ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตะแกรงต่อลงดิน ( $d_{max}$ ) ซึ่งเป็นระยะห่างมากที่สุดนั้นสามารถหาได้จากสมการ ที่ (4.32) ถ้าจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าเป็นจำนวนคู่ และจากสมการที่ (4.33) ถ้าจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าเป็นจำนวนคี่ ถัดจากช่องตะแกรงตรงกลางมาทางด้านซ้าย และทางด้านขวา จะกำหนดให้เป็นระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ( $d_n$ ) จนสุดความยาวของพื้นที่ที่ใช้สร้างระบบต่อลงดิน (L) ดังรูปที่ 4.8 โดยระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ( $d_n$ ) หาได้จากสมการที่ (4.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนคู่

$$d_{\max} = \frac{L(1-C)}{1+C-2C^{(N/2+1)}} \quad (4.32)$$

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนคี่

$$d_{\max} = \frac{L(1-C)}{2(1-C^{(N-1)/2})} \quad (4.33)$$

เมื่อแท่งตัวนำไฟฟ้าได้จัดในรูปแบบของ Exponent Regularity ดังนั้นระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จากจุดศูนย์กลางของตะแกรง คือ

$$d_n = d_{\max} C^n \quad (4.34)$$

เมื่อ  $C$  คือ อัตราส่วนการบีบ (The Compression Ratio)

สำหรับพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตะแกรงต่อลงดิน ( $d_{\max}$ ) และระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ( $d_n$ ) ที่คำนวณได้จากความยาวด้านด้านหนึ่ง สามารถนำค่าที่ได้ไปจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าสำหรับด้านอีกด้านหนึ่งได้ด้วย แต่พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะต้องคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตะแกรงต่อลงดิน ( $d_{\max}$ ) และระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ( $d_n$ ) แยกจากกัน เนื่องจากความยาวด้านนั้นมีค่าไม่เท่ากัน

หลักการเพื่อที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ของตัวแปรทางไฟฟ้า (The Electrical Parameters) ของระบบต่อลงดินในดินหลายชั้น (Multi-Layer Soil) นั้น ได้ถูกนำเสนอแล้วใน [8] และจะไม่นำมากล่าวถึงในที่นี้อีก ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวของระบบต่อลงดินภายใต้โครงสร้างดินที่ต่างกัน พื้นที่ระบบต่อลงดินที่ต่างกัน จำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ต่างกัน ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ต่างกันของระบบต่อลงดิน ค่าอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด (The Optimum Compression Ratio: OCR) ซึ่งได้มาจากการเปรียบเทียบและการวิเคราะห์จากผลลัพธ์การคำนวณ ทั้งหมดที่กล่าวถึงจะนำมาวิเคราะห์ เพื่อหากฎการจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะแกรงเพื่อกำหนดค่าระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าจากตำแหน่งศูนย์กลางตะแกรงมายังขอบของตะแกรง (Exponent Regularity)

ดินสองชั้น (Double Layer) ทั้งหมดสามารถอธิบายโดยความหนา (Thickness:  $h$ ) ของดินชั้นบน และค่าแฟกเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นบน และดินชั้นล่างมีค่าต่างกัน (The Reflective Coefficient:  $K$ )

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

เมื่อ  $\rho_1$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน

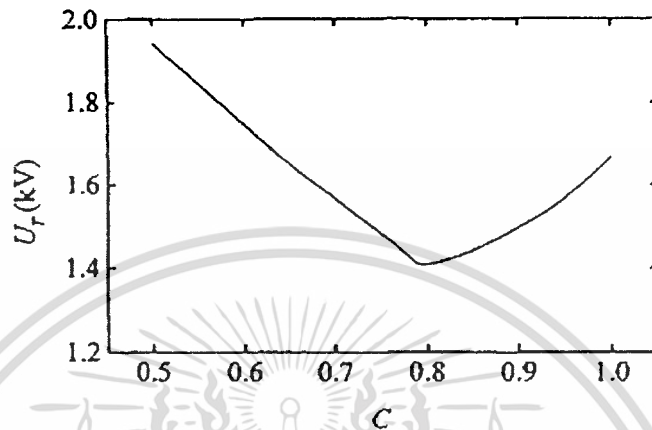
$\rho_2$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง

อัตราส่วนการบีบ (The Compression Ratio:  $C$ ) มีความสัมพันธ์กับความยาวด้านของระบบต่อลงดิน ก่อนอื่นจะกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นดังนี้ คือ พื้นที่มีขนาด  $80 \times 80 \text{ m}^2$   $h = 5 \text{ m}$   $K = -0.6$  ต่อจากนั้นค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน แรงดันไฟฟ้าสัมผัส และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว ก็คำนวณภายใต้อัตราส่วนการบีบที่ต่างกัน

เมื่อกล่าวอ้างผลวิเคราะห์ พบว่า โค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานระบบต่อลงดิน และแรงดันไฟฟ้าสัมผัส มีรูปร่างเป็นตัว “U” อย่างชัดเจน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อพิจารณาในช่วงแรกพบว่ากราฟมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆ เมื่อลดลงถึงค่าๆหนึ่งก็มีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับอัตราส่วนการบีบที่มีค่าเพิ่มขึ้น คือกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานแปรผันตรงกับค่าอัตราส่วนการบีบ จากการพิจารณากราฟพบว่ามีจุดที่ต่ำที่สุดอย่างชัดเจน แม้ว่าค่าอัตราส่วนการบีบหรือค่าความต้านทานตะแกรงจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่โดยพื้นฐานแล้วค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดิน ( $R_p$ ) จะถูกกำหนดโดยพื้นที่ของตะแกรงต่อลงดิน หรือปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้า อัตราส่วนการบีบต่อความต้านทานของระบบต่อลงดินมีผลเล็กน้อยมาก ดังนั้นในกรณีที่กำหนดค่าอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด (OCR) โดยมากจะพิจารณาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวและแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่ต่ำที่สุดของแต่ละแรงดันไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage:  $U_T$ ) กับค่าอัตราส่วนการบีบ (The Compression Ratio:  $C$ ) และ แสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อ  $C = 0.79$  แรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะมีค่าต่ำสุด คุณสมบัติของการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าตามกฎ Exponent Regularity คือ การปล่อยกระแสไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รั่วไหลจากแท่งตัวนำไฟฟ้าทั้งหมดไหลลงสู่ดินที่มีค่าความต้านทานกระจายสม่ำเสมอ และแท่งตัวนำไฟฟ้าทุกๆแท่งจะถูกใช้อย่างเต็มที่ในการใช้ลดค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน กระแสไฟฟ้ารั่วไหลจากแท่งตัวนำไฟฟ้าไหลลงสู่ดินที่สม่ำเสมอมากกว่าจะทำให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำกว่าด้วย



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการบีบและแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

ในทางกลับกันเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage:  $U_s$ ) และอัตราส่วนการบีบ (The Compression Ratio:  $C$ ) พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันเพื่อใช้ในการตั้งกฎเกณฑ์ได้อย่างชัดเจน แต่ก็มีแนวโน้มดังนี้ คือ เมื่ออัตราส่วนการบีบมีค่าน้อย และค่าที่มาก แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวจะเพิ่มตามอัตราส่วนการบีบที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่เมื่อค่าอัตราส่วนการบีบอยู่ในช่วงค่าตรงกลาง ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวจะมีค่าต่ำที่สุด แต่ก็ไม่เป็นกฎเกณฑ์ที่ตายตัว

ค่าเกณฑ์ที่ได้จากการคำนวณของแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) จาก IEEE Std. 80-2000 [1] หรือ มาตรฐานการต่อลงดินของจีน (DL/T621-1997) [14] จะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage)

ในการออกแบบระบบต่อลงดิน จะสังเกตได้ว่า ค่าที่คำนวณหรือค่าที่วัดได้ของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวมาก ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดเท่านั้นที่ต้องการนำมาพิจารณา กล่าวคือ ถ้าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสอยู่ในย่านที่ปลอดภัยแล้ว แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวก็จะอยู่ในย่านที่ปลอดภัยด้วยเช่นกัน

ตามที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ เราจะเลือกแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เป็นฟังก์ชันเป้าหมายในการหาค่าอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด (OCR) โดยที่ค่า OCR จะเป็นค่า ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้าสัมผัสนั้นมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำสุด ในขณะที่ความต้านทานของระบบต่อลงดินก็จะมีค่าต่ำที่สุดเช่นกัน เพราะคิดง่าย ๆ ว่า แรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงกับความต้านทาน ส่วนแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวบางที่จะมีค่าไม่ต่ำที่สุด แต่ก็เกือบต่ำสุด ซึ่งยังคงอยู่ในย่านที่ปลอดภัย

#### 4.4.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด (OCR)

ต่อจากนี้จะถกเถียงกันว่าปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนการบีบ ซึ่งจากการวิเคราะห์จาก J.G. Savarak พบว่ามีปัจจัยอยู่ 3 ปัจจัย ที่มีผลคือ ความหนาของดินชั้นบน (Top Soil Thickness) แพลคเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นบนและดินชั้นล่างมีค่าต่างกัน (Reflective Coefficient) และพื้นที่ระบบต่อลงดิน (Grounding System Area)

##### 4.4.3.1 อิทธิพลความหนาของดินชั้นบนต่ออัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด

การออกแบบระบบต่อลงดิน โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสามารถมั่นใจได้ในความปลอดภัยต่อบุคคล และอุปกรณ์ไฟฟ้า อิทธิพล (Influence) ของค่าแพลคเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นบน และดินชั้นล่างมีค่าต่างกัน (The Reflective Coefficient:  $K$ ) ของดินชั้นบน ความหนาของดินชั้นบน พื้นที่ตะแกรงต่อลงดินเมื่อจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ถูกวิเคราะห์โดย การวิเคราะห์แบบวนซ้ำ (Numerical Method) เมื่อกล่าวอ้างอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด (OCR) จะถูกกำหนดโดย แรงดันไฟฟ้าสัมผัส ณ จุดที่มีค่าต่ำที่สุด

พิจารณาสมการสำหรับหาค่าแพลคเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นบน และดินชั้นล่างมีค่าต่างกัน (The Reflective Coefficient:  $K$ ) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า สมการหาค่า  $K$  อีกครั้ง

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

จากสมการสามารถสรุปค่า  $K$  ออกเป็น 3 ช่วง

$K$  มีค่าเป็นบวก เมื่อ  $\rho_2 > \rho_1$  ค่าความต้านทานดินชั้นล่าง  $>$  ดินชั้นบน และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อ ความหนาของดินชั้นบน มีค่ามากกว่าความลึกของตะแกรงเล็กน้อย

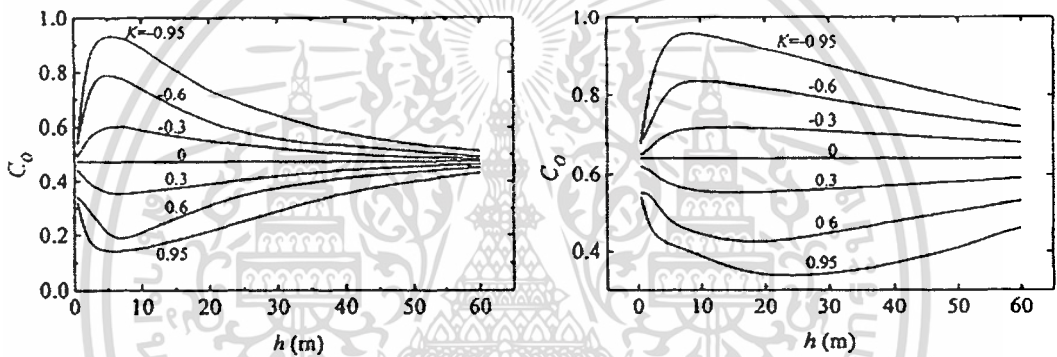
$K$  มีค่าเป็นลบ เมื่อ  $\rho_2 < \rho_1$  ค่าความต้านทานดินชั้นล่าง  $<$  ดินชั้นบน และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อ ความหนาของดินชั้นบน มีค่าน้อยกว่าความลึกของตะแกรง หรือ ไม่ก็ความหนาของดินชั้นบนนั้นมีค่ามากกว่าความลึกของตะแกรงมาก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K$  มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ  $\rho_2 = \rho_1$  ค่าความต้านทานดินชั้นล่าง = ดินชั้นบน

เมื่อค่า  $OCR$  ลดลงในขณะที่ค่า  $K$  เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นในกรณีที่ค่าความต้านทานดินชั้นล่างน้อยกว่า ดินชั้นบน การจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบจะมีค่าจะมีความสม่ำเสมอ (Uniform) มากกว่าการ ที่ดินชั้นล่างมีค่าความต้านทานมากกว่าดินชั้นบน

จากผลการคำนวณเป็นจำนวนมาก ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 3 ตัว คือ ค่า  $OCR$  ความหนาของดินชั้นบน  $h$  และค่า  $K$  ดังรูปที่ 4.10 จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟภายใต้พื้นที่ระบบต่อลง ดินที่แตกต่างกันสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้



ก. ตะแกรงต่อลงดินขนาด 100X100 m<sup>2</sup>

ข. ตะแกรงต่อลงดินขนาด 200x200 m<sup>2</sup>

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $OCR$  กับค่าความหนาของดินชั้นบน  $h$

- (1) เมื่อค่า  $K$  กำหนดให้มีค่าเป็นลบ ค่าของ  $OCR$  ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของดินชั้นบน  $h$  และเมื่อ  $h$  ถึงค่าที่แน่นอน (Certain Value) จากกราฟประมาณ 6-9 เมตร ค่า  $OCR$  จะมีค่ามากที่สุด จากนั้นค่า  $OCR$  จะลดลง เมื่อ  $h$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าความหนา  $h$  ของดินชั้นบนอยู่ในช่วง 6-9 เมตร การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความสม่ำเสมอมากที่สุด (The Best Uniform) เพราะความหนาของดินชั้นบน  $h$  จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform) มากกว่า

- (2) เมื่อค่า  $K$  กำหนดให้มีค่าเป็นบวก ค่าของ  $OCR$  ในช่วงแรกจะลดลงตามความหนาของดินชั้นบน  $h$  และเมื่อ  $h$  ถึงค่าที่แน่นอน (Certain Value) จากกราฟประมาณ 8-15 เมตร ค่า  $OCR$

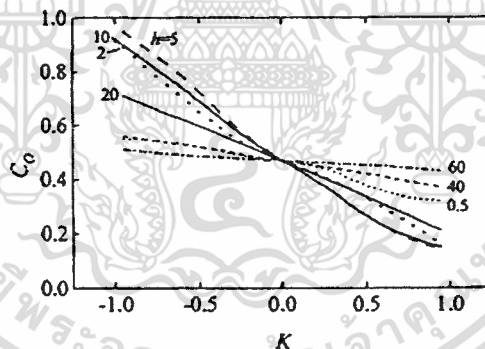
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าต่ำที่สุด จากนั้นค่า  $OCR$  จะเพิ่มขึ้น เมื่อ  $h$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าค่าความต้านทานของดินชั้นล่างมีค่ามากกว่าดินชั้นบน และความหนา  $h$  ของดินชั้นบนอยู่ในช่วง 8-15 เมตร การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความไม่สม่ำเสมอมากที่สุด (The Best Nonuniform) เพราะความหนาของดินชั้นบน  $h$  จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความสม่ำเสมอ (Uniform) มากกว่า

- (3) เมื่อค่า  $K$  มีแนวโน้มเป็นศูนย์ อิทธิพลของความหนาของดินชั้นบน  $h$  มีผลต่อ  $OCR$  น้อยมาก

#### 4.4.3.2 อิทธิพลแฟกเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นบนและดินชั้นล่างมีค่าต่างกันต่ออัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $OCR$  และค่า  $K$  ของดินสองชั้นนั้น อธิบายได้ดังรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11 แล้วสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $OCR$  และค่า  $K$  เมื่อความยาวด้านของระบบต่อลงดินมีค่าเป็น 100 เมตร

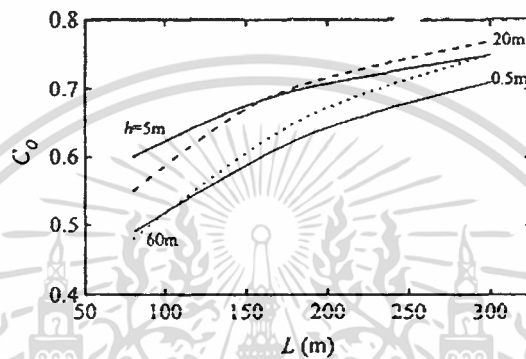
- (1) เมื่อความหนาของดินชั้นบน  $h$  ถูกกำหนดให้มีค่าตายตัว ค่า  $OCR$  จะลดลงเมื่อค่า  $K$  เพิ่มขึ้น นั่นอาจกล่าวได้ว่า การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความไม่สม่ำเสมอมากกว่า (The More Nonuniform) เพราะค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมีค่าสูงมาก
- (2) เมื่อลองไม่คำนึงถึงว่าค่าความหนาของดินชั้นบน  $h$  มีค่าเท่าไร ค่า  $OCR$  ในช่วงที่ค่า  $K$  เป็นลบ การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบของระบบต่อลงดิน เมื่อค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะของดินชั้นบนมีค่ามากกว่าดินชั้นล่าง การกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความสม่ำเสมอ (Uniform) มากกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่าน้อยกว่าดินชั้นล่าง

#### 4.4.3.3 อิทธิพลของพื้นที่ระบบต่อลงดินต่ออัตราส่วนการบีบที่เหมาะสมที่สุด

การเพิ่มขึ้นของค่า  $OCR$  ต่อพื้นที่ของระบบต่อลงดิน กล่าวได้ว่า ยิ่งพื้นที่ของระบบต่อลงดินมีขนาดใหญ่เท่าไร ก็จะมีค่าความสม่ำเสมอ (Uniform) มากเท่านั้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $OCR$  และตะแกรงต่อลงดินที่มีค่า  $K$  เท่ากับ -0.3

ถ้า  $K$  มีค่า -0.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวด้านของระบบต่อลงดิน และค่า  $OCR$  ดังรูปที่ 4.12 สังเกตได้ว่า  $OCR$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวด้านมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าของระบบต่อลงดินในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความสม่ำเสมอมากกว่า

#### 4.4.4 สูตรการคำนวณหาอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสม (Optimum Compression Ratio)

การแสดงการคำนวณเพื่อหาค่า  $OCR$  ของดินสองชั้น หาได้จากสมการกำลังสองสูงสุด ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นจำนวนมาก ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $OCR$  ค่า  $h$  และ ค่า  $K$  ถูกนำมาทำให้มีความสัมพันธ์กันในเชิงสมการคณิตศาสตร์ ตามความยาวด้านของระบบต่อลงดิน โดยค่า  $OCR$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.35)

$$OCR = a_0 + a_1 \exp(0.0001h) + a_2 \exp(bh) \quad (4.35)$$

$$\text{เมื่อ } b = -0.3503 - 9.6311 \exp(-0.03666L)$$

$$\begin{cases} a_0 = a_{01} + a_{02}K + a_{03}K^2 \\ a_1 = a_{11} + a_{12}K + a_{13}K^2 \\ a_2 = a_{21} + a_{22}K \end{cases}$$

เมื่อความยาวด้านของระบบต่อลงดินมีค่าที่แตกต่างกัน และค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการแทนสมการ (4.35) เพื่อหาค่า *OCR* มีค่าดังตารางที่ 4.2

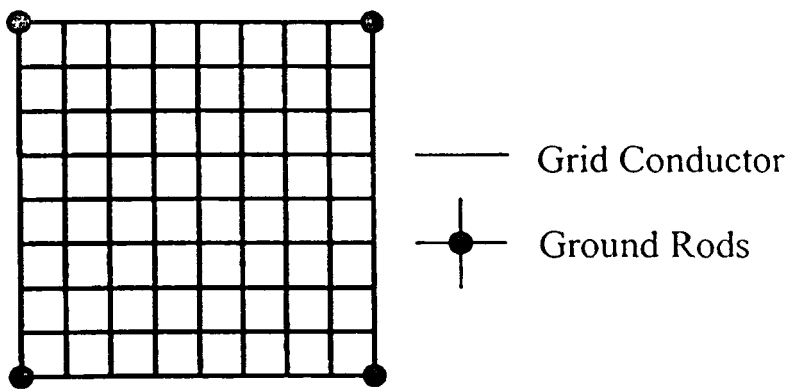
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการที่ 4.35

Coefficients	$L \leq 100 \text{ m}$	$100 \text{ m} < L \leq 175 \text{ m}$	$175 \text{ m} < L \leq 250 \text{ m}$	$L > 250 \text{ m}$
$a_{01}$	0.44	0.38	-0.51	0.32
$a_{02}$	-77.43	-50.65	-33.81	-15.41
$a_{03}$	15.63	13.88	18.49	13.42
$a_{11}$	0.033	0.19	1.15	0.38
$a_{12}$	76.9	50.21	32.82	15.16
$a_{13}$	-15.56	-13.83	-18.44	-13.38
$a_{21}$	-0.067	-0.037	-0.029	-0.022
$a_{22}$	0.50	0.41	0.34	0.26

ถ้าผู้ออกแบบรู้ความยาวด้านของพื้นที่ที่ใช้สร้างระบบต่อลงดิน และพิจารณาชั้นดินเป็นแบบจำลองดินสองชั้น (Double Layer Soil Model) จากนั้นหาค่า *OCR* ตามสมการที่ (4) และจัดวางแท่งตัวนำไฟฟ้าตามสมการที่ (1)-(3) จะได้ระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยที่ประหยัดตัวนำไฟฟ้า และปลอดภัย [2]

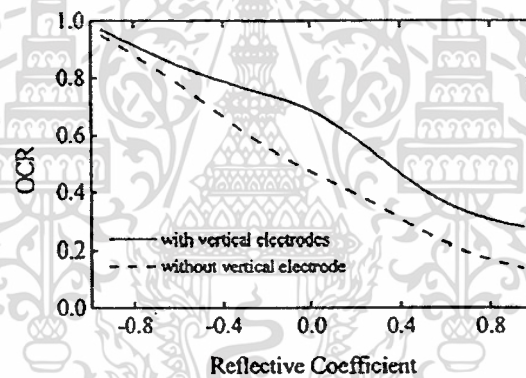
#### 4.4.5 อิทธิพลของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่ออัตราส่วนการบีบที่เหมาะสม (*OCR*)

เพื่อที่จะวิเคราะห์อิทธิพล (Influence) ของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อค่า *OCR* จะกำหนดค่าของตัวแปรเบื้องต้นดังนี้ พื้นที่ตะแกรงต่อลงดินมีขนาด  $80 \times 80 \text{ m}^2$  ในแต่ละด้านมีแท่งตัวนำไฟฟ้าด้านละ 9 แท่ง และมีแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งต่อเชื่อมอยู่ที่มุมทั้งสิ้น จำนวน 4 แท่ง ดังรูปที่ 4.13



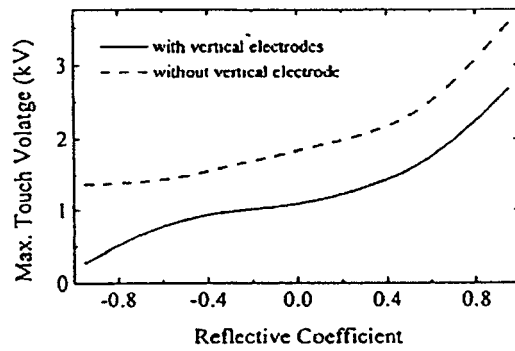
รูปที่ 4.13 ตะแกรงต่อลงดินสำหรับการวิเคราะห์หัตถิพลของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อค่า  $OCR$

มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนเท่ากับ  $200 \Omega.m$  และมีความหนาของดินชั้นบน  $h$  เท่ากับ  $5 \text{ m}$  แท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งนั้นถูกจัดไว้ที่มุมทั้งสี่ด้าน เพื่อที่จะป้องกันผลที่เกิดระหว่างตะแกรงต่อลงดิน กับแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้ง และใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งอย่างเต็มที่



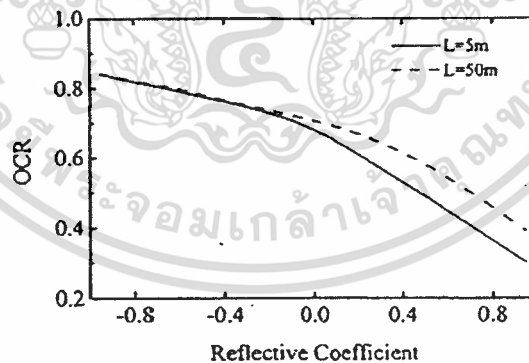
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $OCR$  และค่า  $K$

จากรูปที่ 4.14 เราสังเกตได้ว่าค่า  $OCR$  เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งเข้าไปในตะแกรงต่อลงดิน เหตุผลก็คือกระแสไฟฟ้าที่ผิวดร้งบางส่วนจะไหลผ่านแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้ง เลยทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตะแกรงลงดินลดน้อยลง และการป้องกันผลกระทบระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวราบลดลง และกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงดินจากแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งทุกแท่งกลายเป็นคงที่ ดังนั้นการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement) จะมีความสม่ำเสมอ (Uniform) มากกว่า สังเกตรูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดภายใต้การจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจะลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งต่อเชื่อมกับตะแกรงต่อลงดิน



รูปที่ 4.15 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมากที่สุด และค่า K ในการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าแบบเหมาะสมที่สุด (The Optimum Arrangement)

นอกจากการวิเคราะห์อิทธิพล (Influence) ของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Vertical Electrode, Ground Rod) ต่อค่า OCR แล้ว อิทธิพลของความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อค่า OCR (The Length of Vertical Electrode) ก็ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เช่นกัน ก่อนอื่นจะกำหนดค่าตัวแปรของพื้นที่ตะแกรงต่อลงดินเบื้องต้นดังนี้ พื้นที่ของตะแกรงต่อลงดินยังคงมีขนาดเท่าเดิม คือ  $80 \times 80 \text{ m}^2$  และมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งจำนวน 4 แท่งอยู่ที่มุมทั้งสี่ด้านของตะแกรงต่อลงดิน โดยจะพิจารณาตะแกรงต่อลงดิน 3 ตะแกรงต่อเชื่อมแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งที่แตกต่างกันดังนี้ 5 m 10 m และ 50 m และวิเคราะห์จากตะแกรงต่อลงดินที่มีค่าความยาวแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่างกันมาพิจารณาแสดงดังรูปที่ 4.16

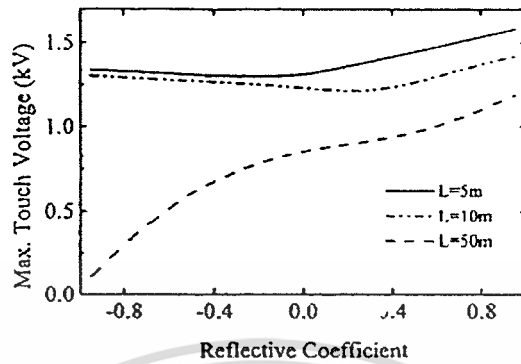


รูปที่ 4.16 อิทธิพลของค่า K ต่อค่า OCR

อิทธิพล (Influence) ของความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งต่อค่า OCR แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าค่า OCR เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งเพิ่มขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ผลไม่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งที่ยาว ผลกระทบมีเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกัน ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งจะมีผล (Influence) อย่างมากต่อแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch

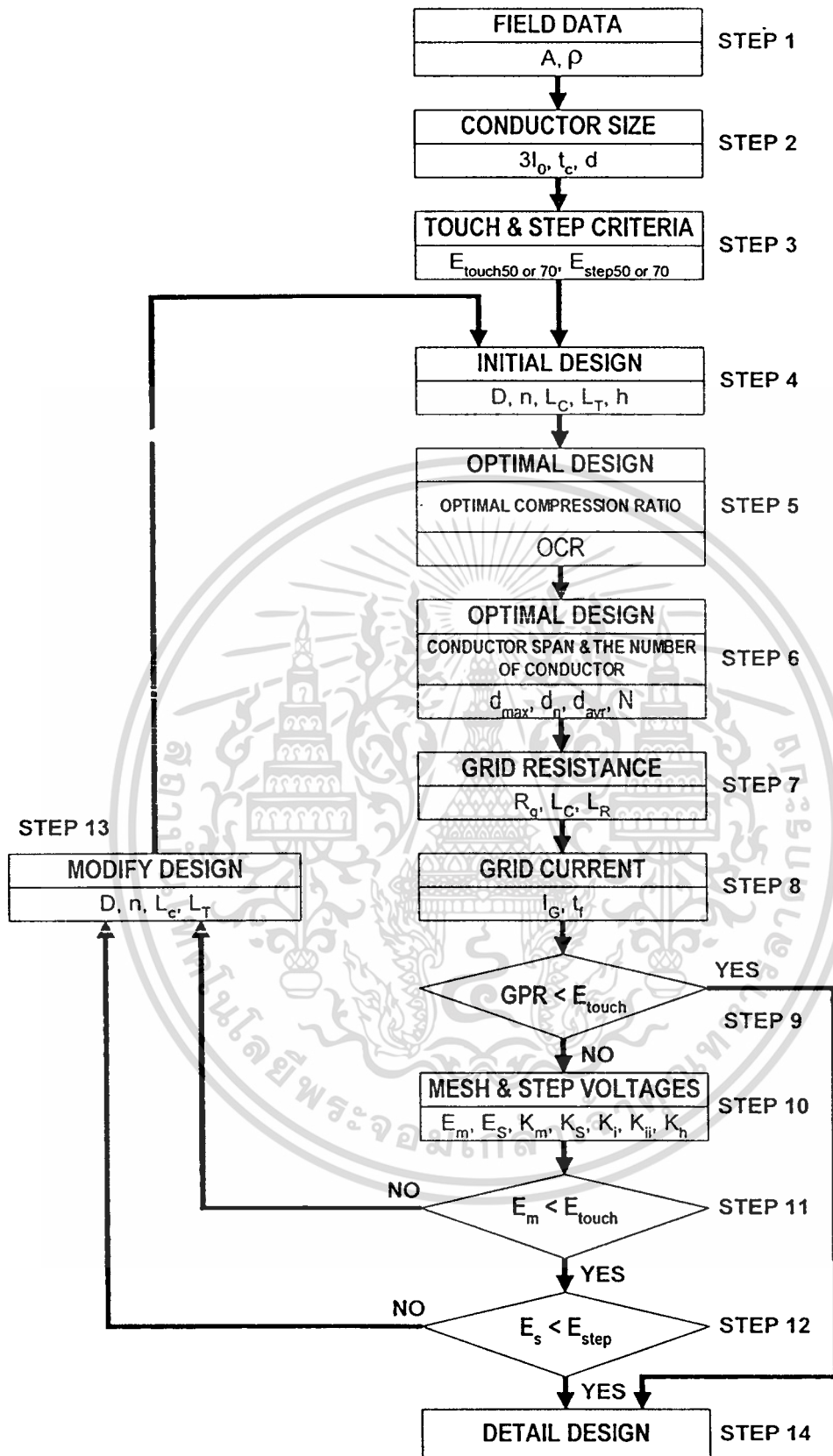
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage) ดังรูปที่ 4.17 โดยเฉพาะเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมีค่าที่น้อย และความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งมีความยาวมาก



รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดในการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในการจัดแบบเหมาะสมที่สุด ภายใต้ความยาวของแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งที่ต่างกัน

4.4.6 สรุปขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นจะมีความคล้ายคลึงกับมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 เพราะการออกแบบยังคงยึดมาตรฐานดังกล่าวเป็นเกณฑ์ โดยแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แผนภูมิการออกแบบระบบต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 สรุปทฤษฎีการออกแบบระบบการต่อลงดินโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เมื่อกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่า  $OCR$  จะถูกกำหนดโดยการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสในฐานะที่เป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (Target Function) อัตราส่วนการบีบสำหรับการศึกษาบนพื้นฐานของดินสองชั้น (Double Layer) เมื่อค่าแฟกเตอร์การสะท้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของดินชั้นบน และดินชั้นล่างมีค่าต่างกัน (The Reflective Coefficient:  $K$ ) มีค่าเป็นลบ ค่า  $OCR$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของดินชั้นบน (The Thickness of The Top Soil Layer:  $h$ ) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และต่อจากนั้นก็จะมีค่าลดลง เมื่อค่า  $K$  มีค่าเป็นบวก ค่า  $OCR$  จะมีค่าลดลงตามความหนาของดินชั้นบน ( $h$ ) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และต่อจากนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า ( $K$ ) มีแนวโน้มเป็นศูนย์ อิทธิพลจากความหนา  $h$  มีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า  $OCR$

การเพิ่มขึ้นของค่า  $OCR$  ตามความยาวด้านที่เพิ่มขึ้น ความยาวด้านที่ยาวกว่าจะมีการกระจายของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่สม่ำเสมอมากกว่าด้านของระบบต่อลงดินที่สั้นกว่า

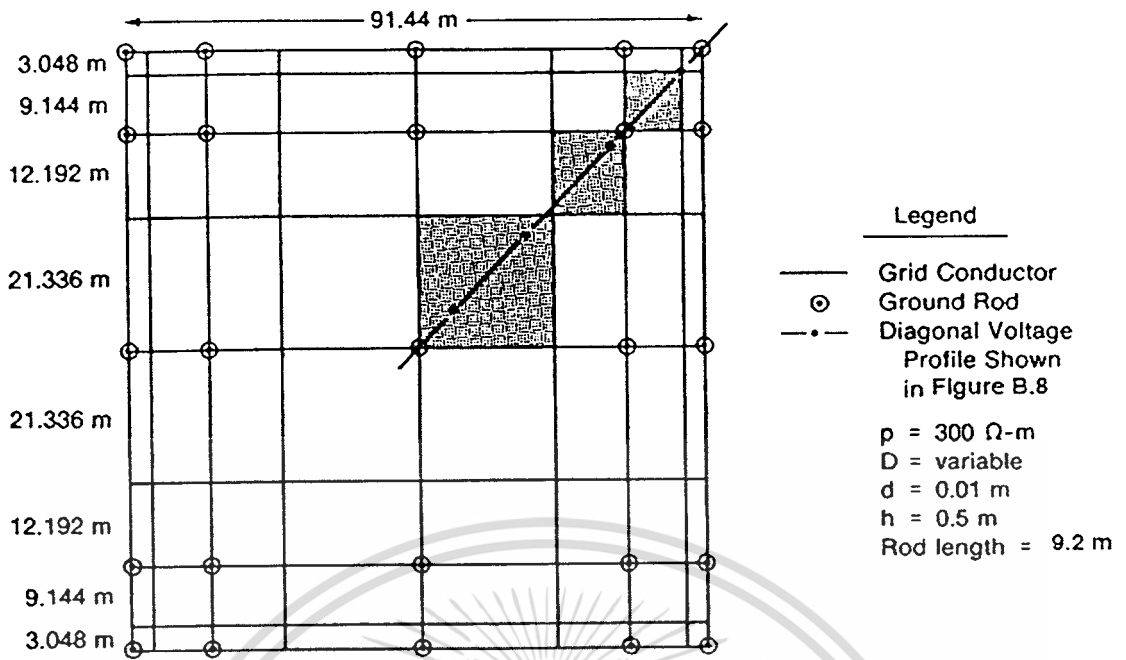
สูตรการคำนวณเพื่อหาค่า  $OCR$  ของดินสองชั้นถูกพิสูจน์มาได้ จึงสะดวกต่อผู้ออกแบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินให้มีความปลอดภัย

#### 4.4.8 ผลลัพธ์การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 วิเคราะห์ตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะช่องตะแกรงที่ไม่เท่ากันในดินที่มีค่าความต้านทานกระจายสม่ำเสมอ

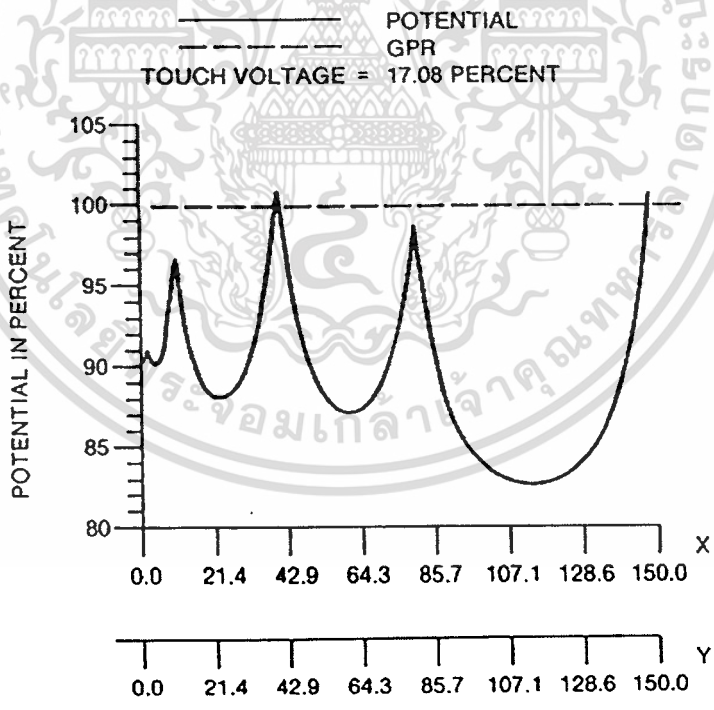
การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 เพื่อวิเคราะห์ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันดังรูปที่ 4.19

ค่าที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 คำนวณออกมาให้ นั้นจะมีค่าของ ความต้านทานตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance:  $R_g$ ) กราฟโครงร่างแรงดันไฟฟ้าพื้นผิว (Surface Voltage Profile) 1 รูป และแรงดันไฟฟ้าที่มุมตะแกรงต่อลงดิน (The Corner Mesh Voltage) ดังรูปที่ 4.20

ดังรูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าที่มุมตะแกรงต่อลงดินมีค่าเพียง 9.29% ของค่า  $GPR$  ในขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในช่องตะแกรงที่ใหญ่ที่สุด 1 ช่องมีค่า 17.08% ของค่า  $GPR$



รูปที่ 4.19 ตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน ต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งยาว 9.2 เมตร จำนวน 25 แท่ง



รูปที่ 4.20 โครงร่างแรงดันไฟฟ้าพื้นผิวแนวทแยงมุมสำหรับตะแกรงต่อลงดินรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดจะไม่เกิดขึ้นที่ช่องตะแกรงตำแหน่งมุมตะแกรง สำหรับระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดบางที่อาจจะเกิดเหนือช่องตะแกรงอื่นๆในบางช่อง ดังนั้นระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน แรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะต้องสืบสาวจากทุกส่วนของตะแกรงต่อลงดิน และเกณฑ์สำหรับการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าภายในช่องตะแกรงเดี่ยวไม่พอเพียง ในทางกลับกันค่าความต้านทาน  $R_x$  ไม่ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบ และแนวตั้งที่แน่นอน เช่น  $L_T = (18 \times 91.44) \text{ m} + (25 \times 9.2) \text{ m} = 1876 \text{ m}$  เมื่อทำการคำนวณด้วยมือมีค่า  $1.61 \Omega$  ซึ่งน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 ที่คำนวณได้  $1.416 \Omega$  ประมาณ 14%

#### 4.5 แนะนำโปรแกรม MATLAB

โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลขซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในการแก้ปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการศึกษาเพื่อใช้งานเพราะเป็นโปรแกรมในลักษณะ Interactive การเขียนโปรแกรมไม่ยุ่งยาก ตลอดจนมีฟังก์ชันต่างๆ ให้เลือกใช้มากมาย

MATLAB เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ขั้นสูง (High-Level Language) สำหรับการคำนวณทางเทคนิคที่ประกอบด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข กราฟฟิกที่ซับซ้อน และการจำลองแบบเพื่อให้เห็นภาพพจน์ที่ชัดเจน ชื่อของ MATLAB ย่อมาจาก MATrix LABoratory เดิมโปรแกรม MATLAB ได้เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณทาง Matrix หรือเป็น Matrix Software ที่พัฒนามาจากโปรเจ็คชื่อ LINKPACK และ EISPACK

MATLAB ได้พัฒนามาด้วยการแก้ปัญหาที่ส่งมาจากหลายๆผู้ใช้มาเป็นระยะเวลาหลายปีจึงทำให้โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันต่างๆให้เลือกใช้มากมาย ในบางมหาวิทยาลัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นหลักสูตรพื้นฐานในการศึกษาทางด้านคณิตศาสตร์ วิศวกรรม และวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ตลอดจนในด้านอุตสาหกรรมได้ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือสำหรับใช้งานวิจัย พัฒนาและวิเคราะห์

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 (Statistics

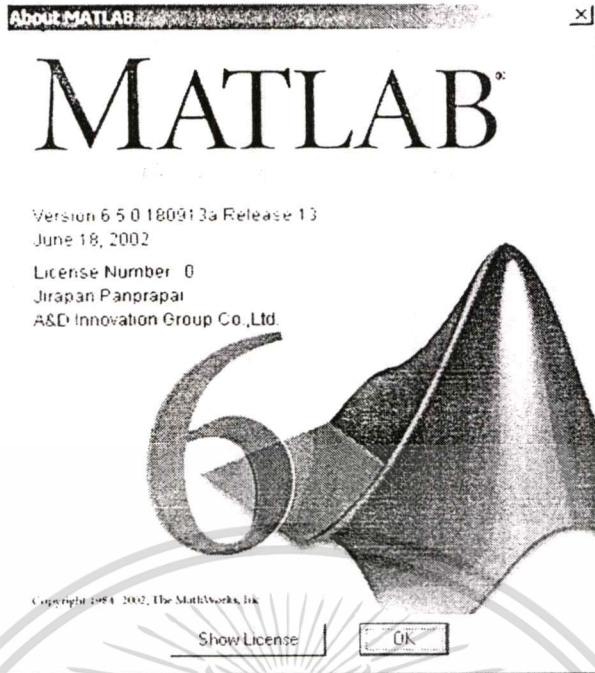
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Toolbox) และสาขาอื่นๆอีกมากมาย ภายใน Toolbox แต่ละสาขาก็จะมีฟังก์ชันต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาในสาขานั้นๆให้เลือกประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามการใช้งาน MATLAB ในการคำนวณคณิตศาสตร์บน M-File หรือการคำนวณใดๆที่เป็นฟังก์ชันพื้นฐาน ผู้เขียนไม่ขอแนะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เพราะหนังสือ หรือคู่มือการใช้งานเบื้องต้นพอมีให้หาอ่านในรูปแบบภาษาไทยบ้าง ถึงแม้ว่าจะยังมีจำนวนไม่มาก ดังเช่น [15] [16] แต่ถึงอย่างไรก็ตามตามความเห็นของผู้เขียน คู่มือที่ดีที่สุดที่จะช่วยให้ผู้สนใจใน MATLAB ก็คือ Help ภายในโปรแกรม MATLAB นั่นเอง ซึ่ง Help ก่อนข้างช่วยได้อย่างมากในการเรียนรู้การใช้งานโปรแกรม MATLAB แม้กระทั่งผู้ที่แต่งหนังสือในรูปแบบภาษาไทยเองก็ยังไม่แปล และเรียบเรียงมาจาก Help นี้ นอกจาก Help ภายในโปรแกรม MATLAB ผู้แต่งขอแนะนำให้หาอ่านได้จากการดาวน์โหลดไฟล์ Adobe Acrobat จาก [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) หรือถ้าติดปัญหาการใช้งานโปรแกรมก็ยังสามารถโพสต์ข้อสงสัยทิ้งไว้ที่เว็บไซต์ก็ได้ ทาง MathWorks มีทีมรองรับทางเทคนิค (Technical Support) ช่วยท่านอยู่

ดังนั้นผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ขอเน้นการนำเสนอไปในเรื่องการใช้งานในด้านการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ทางรูปภาพ (Graphical User Interface: GUI) ซึ่งสามารถสร้างได้จาก GUI Development Environment (GUIDE) ภายใน โปรแกรม MATLAB ซึ่งผู้เขียนเห็นว่ายังมีผู้เขียนคู่มือในด้านนี้น้อยมาก และในทางปฏิบัติยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง

อนึ่งเนื่องจากผู้เขียนนั้นได้ศึกษาและถนัด โปรแกรม MATLAB ในรุ่น 6.5.0.180913 Release 13 ดังรูปที่ xxx ดังนั้นผู้เขียนจะขอแนะนำเสนอจากโปรแกรม MATLAB ในรุ่นดังกล่าว ซึ่งถึงแม้ว่า MathWorks จะมี MATLAB รุ่นใหม่ๆออกมา แต่ผู้แต่งยังคงเชื่อว่าโครงสร้างหลักๆของ โปรแกรม ไม่น่าที่จะแตกต่างจากเดิมเท่าไรนัก



#### รูปที่ 4.21 รุ่นของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้

##### 4.5.1 ความต้องการของระบบคอมพิวเตอร์ก่อนการติดตั้งโปรแกรม

โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Window 9x หรือ Window XP ซึ่งทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติอย่างน้อยดังนี้

- Pentium, Pentium Pro, Pentium II-IV, Intel Xeon, AMD Athlon หรือ Athlon XP
- Microsoft Windows 98, Windows ME, Windows NT 4.0, Windows 2000 หรือ Windows XP
- 128 MB Ram minimum, 256 MB RAM recommended
- Hard disk 256 MB minimum
- 8 bit graphics adapter and display (for 256 simultaneous colors)

##### 4.5.2 ข้อดีของโปรแกรม MATLAB

1. มีฟังก์ชันคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้ในการคำนวณมากมาย และยังสามารถสร้างฟังก์ชันขึ้นมาใช้งานได้
2. อัลกอริทึม (Algorithm) พัฒนาได้ง่าย สามารถแก้ไขปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้ง่าย และรวดเร็วกว่าโปรแกรมภาษาอื่นๆ เช่น C, Fortran หรือ Basic เป็นต้น
3. มีโครงสร้างแบบจำลอง (Simulink) ซึ่งเป็น package ที่สามารถนำไปสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ทดสอบ และประเมินผล ระบบ Dynamic ต่างๆก่อนนำไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ด้านกราฟฟิก MATLAB สามารถแสดงภาพ หรือ กราฟ ตั้งแต่สองมิติที่เป็น Rectangular, Polar, Stair และ Bar รวมทั้งภาพสามมิติในรูปแบบพื้นผิว (Surface) และระดับสูงต่ำ (Contour) ตลอดจนสามารถนำภาพมาต่อกัน และเก็บไว้เพื่อที่จะสร้างภาพเคลื่อนไหวได้อีกด้วย
5. ประยุกต์ใช้ในการสร้างรูปแบบ Graphical User Interface (GUI) [10] เพื่อผู้ออกแบบสามารถพัฒนาโปรแกรมให้ปฏิสัมพันธ์ได้ระหว่างผู้ใช้โปรแกรมกับเครื่องคอมพิวเตอร์

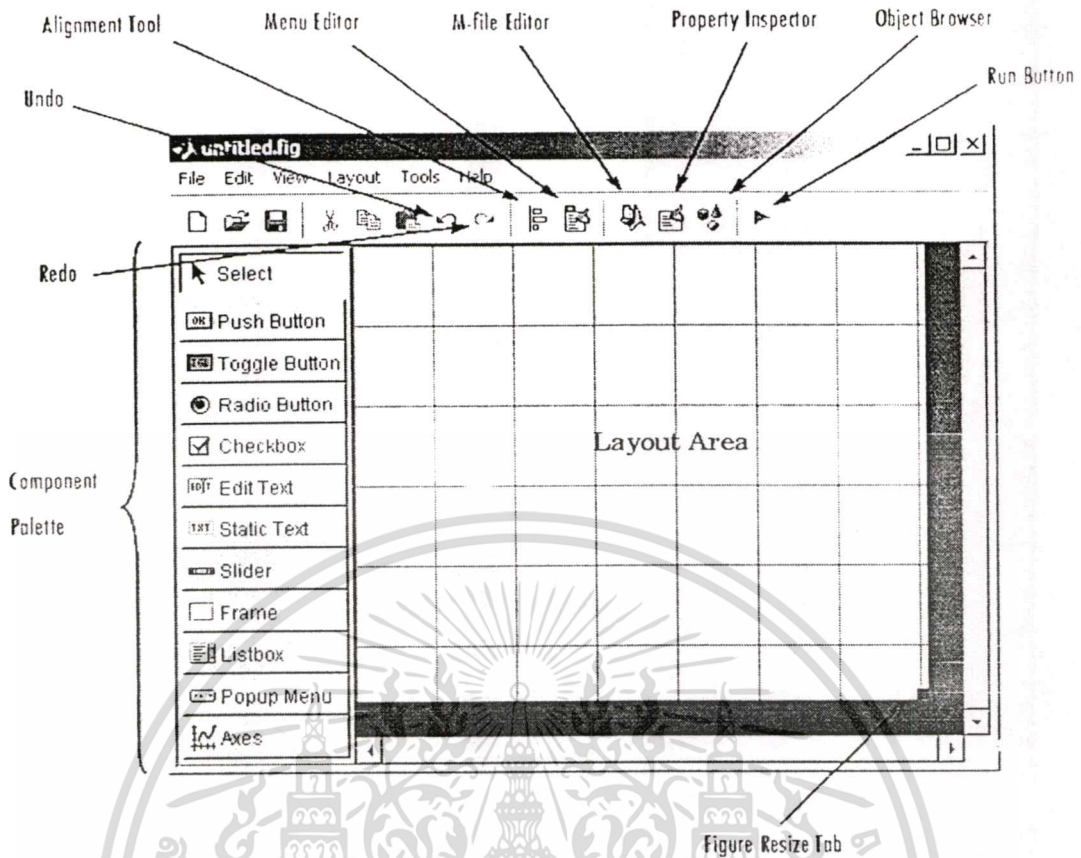
#### 4.5.3 การเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB เบื้องต้น

เนื่องจากการเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB นั้นค่อนข้างที่มีเนื้อหาที่เยอะมาก อยู่ที่ว่าผู้ศึกษาต้องการหยิบ หรือสนใจในเรื่องใดของ MATLAB ดังนั้นจะไม่ขอเอ่ยในวิทยานิพนธ์นี้ เกาญัก แต่จะแนะนำให้ผู้ศึกษาต่อเพิ่มเติม โดยในปัจจุบันมีผู้เขียนตำราที่เป็นภาษาไทยไว้ให้ศึกษากันในเบื้องต้นค่อนข้างมากดังเช่น [15] [16]

#### 4.5.4 การปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ทางรูปภาพ (Graphical User Interface)

โปรแกรม MATLAB นอกจากจะมีฟังก์ชันในการคำนวณทางคณิตศาสตร์แล้ว แต่โปรแกรม MATLAB ยังมีฟังก์ชันทางด้านการเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้โปรแกรมหรือผู้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์กับโปรแกรมหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่าโดยทั่วไปว่า 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 จากชั้นของอุปกรณ์ มายังพื้นที่ที่ต้องการสร้างโครงร่าง ภาพดังรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็น Layout Editor



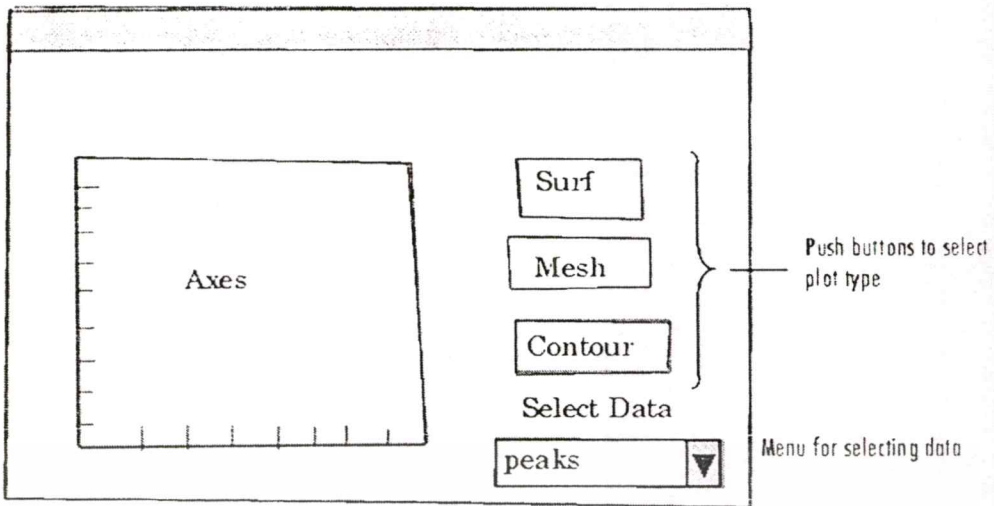
รูปที่ 4.22 องค์ประกอบของวินโดวเพื่อใช้สร้าง GUI

4.5.5 แนวคิดพื้นฐานการสร้าง Object ต่างๆในโปรแกรมให้ทำงานประสานกัน หัวข้อนี้จะนำเสนอตัวอย่างที่จะแสดงให้เห็นว่าเราจะสร้างการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ทางรูปภาพ (GUI) โดยใช้ GUIDE ของ MATLAB

#### 4.5.5.1 การออกแบบ GUI (Designing the GUI)

GUI ที่ถูกใช้ในตัวอย่างนี้จะมี Axes เพื่อใช้ในการแสดงกราฟในรูปแบบของ Surface Mesh หรือ Contour ของข้อมูลที่ถูกเลือกจาก Pop-Up Menu รูปที่ 4.23 แสดงการเค้าโครงบนกระดาษที่จะนำมาสร้างเป็นวินโดวรูปภาพเพื่อให้มันสามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ได้ในท้ายที่สุด

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



รูปที่ 4.23 โครงร่างของกราฟที่ควรวางบนกระดาษที่จะนำมาสร้างโดย GUIDE

#### 4.5.5.2 การสร้างโครงร่าง GUI (Laying Out the GUI)

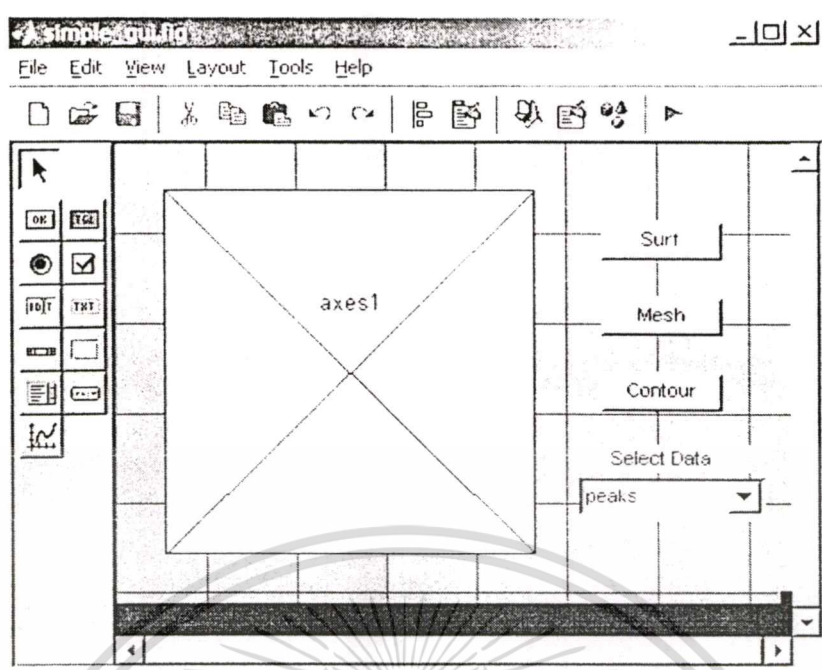
ในหัวข้อการสร้างโครงร่าง GUI นี้จะแสดงให้เห็นว่าการสร้างส่วนประกอบของ GUI เช่น การควบคุมการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (User Interface Control) ได้แก่ ปุ่มกด (Push Button) Pop-up Menu ข้อความ (Static Text) และอื่นๆว่าสามารถสร้างได้อย่างไร และขอให้คุณนั้นสร้าง GUI ด้วยตัวของคุณเอง ซึ่งมันจะเป็นหนทางที่ดีที่สุดของการเรียนรู้

หัวข้อนี้จะอธิบายว่าเราจะสร้างโปรแกรมการทำงานมันได้อย่างไรตามหัวข้อเหล่านี้

##### 4.5.5.2.1 การเปิด Layout และ Code ตัวอย่าง

การศึกษาดด้วยตัวเองจาก Help นั้น ใน Help จะมี ตัวอย่าง Layout และ Code ซึ่งเป็น M-file ให้ศึกษาเพื่อเรียนรู้การใช้งาน ซึ่งจะทำให้ผู้ศึกษานั้นสามารถแกะโปรแกรม และ Object แต่ละตัวได้ว่า Object แต่ละตัวนั้นทำงานสัมพันธ์กับ Code ใน M-file นั้นอย่างไร ซึ่งเมื่อเปิด Help แล้วให้ Search หาหัวข้อ Creating Graphical User Interface จากนั้นเข้ามาที่หัวข้อ Laying Out the GUI จากนั้นเข้ามาที่ Layout and Code Example ที่หน้าจะมี Link เพื่อเปิด Layout นั้น คือชื่อ 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 4.24 และถ้าคลิก Link ที่ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File เป็นดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 เมื่อกดคลิกที่ Link ชื่อ Layout Editor with completed GUI Layout

```

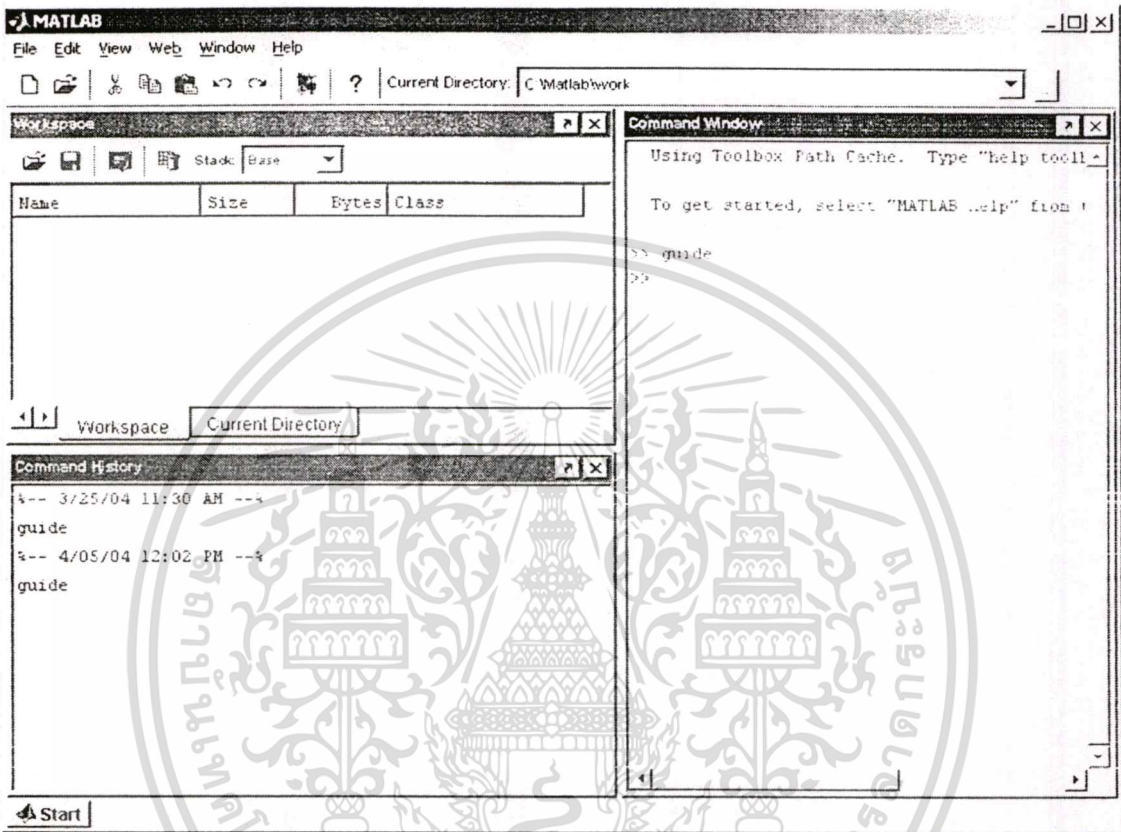
C:\Matlab\help\techdoc\creating_gui\examples\simple_gui.m [Read Only]
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 function varargout = simple_gui(varargin)
2 % SIMPLE_GUI Application M-file for simple_gui.fig
3 % SIMPLE_GUI, by itself, creates a new SIMPLE_GUI or raises the existing
4 % singleton*.
5 %
6 % h = SIMPLE_GUI returns the handle to a new SIMPLE_GUI or the handle to
7 % the existing singleton*.
8 %
9 % SIMPLE_GUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
10 % function named CALLBACK in SIMPLE_GUI.M with the given input arguments.
11 %
12 % SIMPLE_GUI('Property','Value',...) creates a new SIMPLE_GUI or raises the
13 % existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
14 % applied to the GUI before simple_gui_OpeningFcn gets called. An
15 % unrecognized property name or invalid value makes property application
16 % stop. All inputs are passed to simple_gui_OpeningFcn via varargin.
17 %
18 % *See GUI Options on GUIDE's website for how to control the GUI's
19 % appearance and behavior.
20 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
21 %
22 % Edit the above text to modify the response to help simple_gui
23 %
24 % Last Modified by GUIDE v2.5.6 06-Apr-2002 16:26:05
25 %
26 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
27 gui_Singleton = 1;
28 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
29                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
30                  'gui_OpeningFcn', @simple_gui_OpeningFcn, ...
31                  'gui_OutputFcn',  @simple_gui_OutputFcn, ...
32                  'gui_LayerFcn',    [], ...
33                  'gui_Callback',    []);
34 if nargin & isstr(varargin{1})
35     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
36 end
37
38 if nargin
39     varargout{1:nargout} = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
40
41
  
```

รูปที่ 4.25 เมื่อกดคลิก Link ที่ชื่อ MATLAB Editor with completed M-File

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

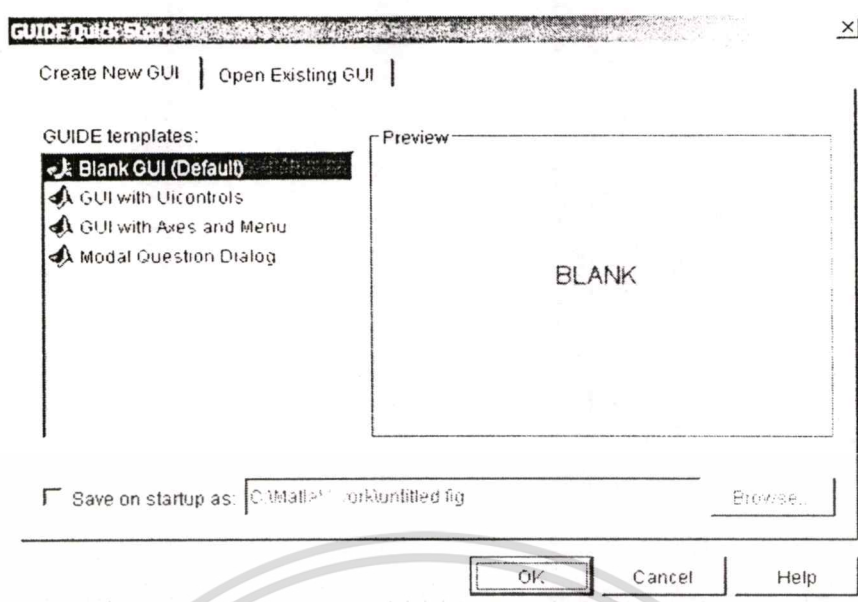
#### 4.5.5.2.2 การเปิด GUI ใน Layout Editor

เปิด GUIDE โดยการพิมพ์คำว่า `guide` ที่ MATLAB prompt ดังรูปที่ 4.26 การเข้าไปที่วินโดว์ Layout Editor จะเป็นวิธีการที่เร็วและสะดวกมาก ซึ่งเมื่อพิมพ์และกดปุ่ม Enter ที่ Keyboard ก็จะมีปรากฏดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 การเปิดวินโดว์ Layout Editor โดยการพิมพ์ `guide` ที่ MATLAB prompt ที่หน้า Command Window

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

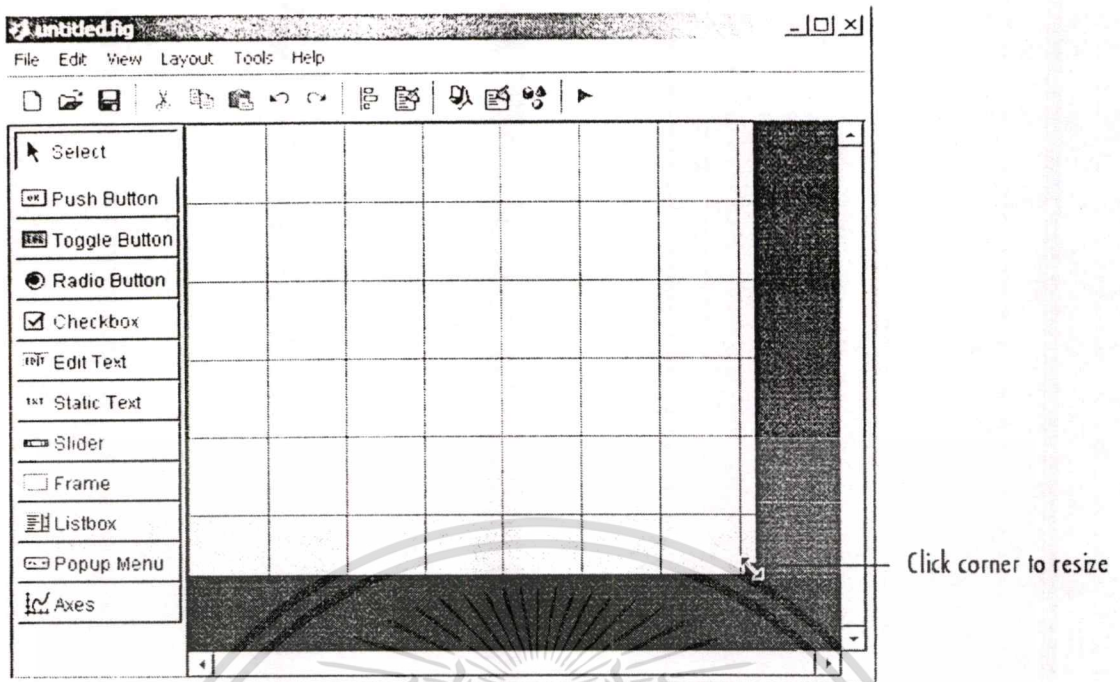


รูปที่ 4.27 วินโดว์ GUIDE Quick Start

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

#### 4.5.5.2.3 การตั้งขนาดของพื้นที่วินโดว์

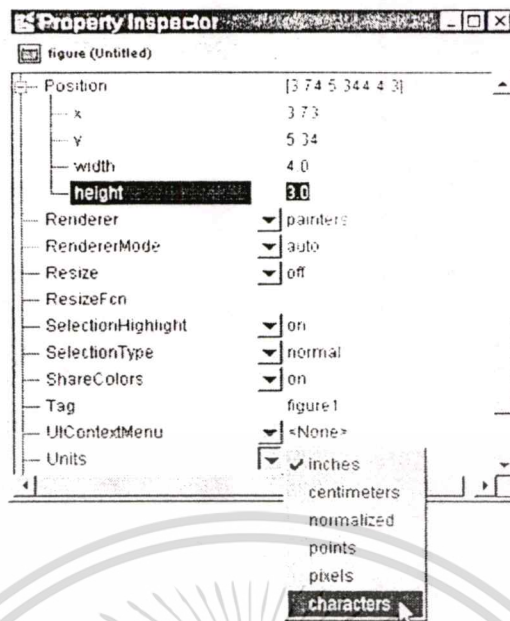
เมื่อ Layout Editor เปิดขึ้นมาให้คลิกที่ File และเลือก New เพื่อเปิดไฟล์ GUI ใหม่ การตั้งขนาดของ GUI จะใช้การเพิ่มลดขนาด (Resizing) บนพื้นที่ที่เป็น Grid โดยการคลิกที่มุมขวาล่างและเลื่อนเมาส์



รูปที่ 4.28 รูปแสดงวิธีการเพิ่มลดขนาดของพื้นที่การสร้าง GUI

ถ้าคุณต้องการตั้งค่าตำแหน่งของ GUI ให้มีตำแหน่งที่แน่นอน ให้ทำดังนี้

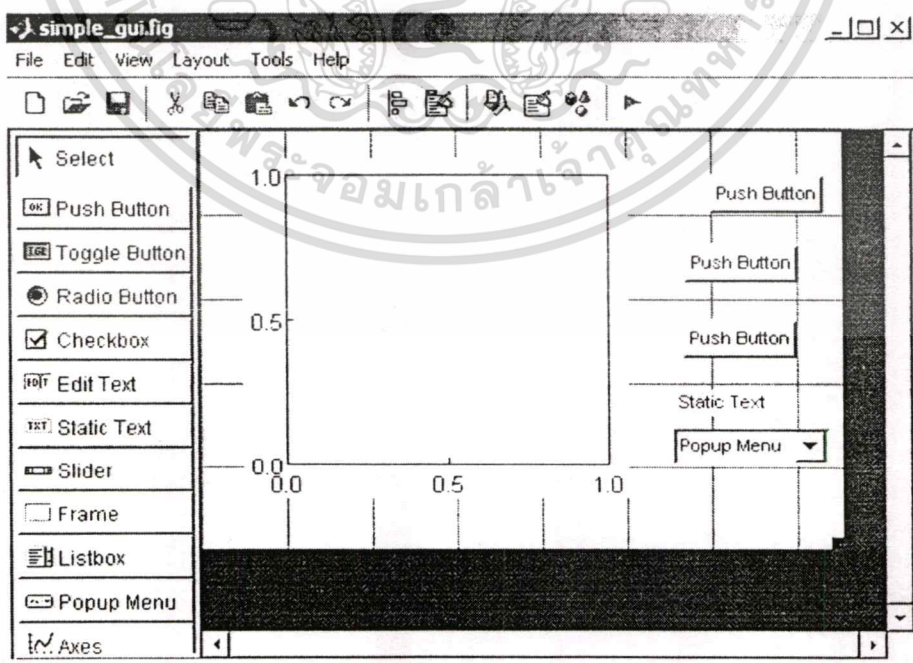
1. เลือก Property Inspector จากเมนู View หรือดับเบิลคลิกบนพื้นที่ของ GUI
2. เลือกปุ่ม Pop-up Menu ที่ชื่อว่า Unit ภายในหน้าต่าง Property Inspector เพื่อเปลี่ยนหน่วยเป็น นิ้ว (Inch) ดังรูปที่ 4.29
3. เลือกเครื่องหมายบวกของหัวข้อชื่อ Position เพื่อขยายหัวข้อย่อยตามรูปที่ xxx เมื่อขยายแล้วจะพบ x y width และ height
4. จากนั้นให้เติมค่าที่ต้องการทางด้านขวาดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 วินโดว์ Property Inspector เพื่อการตั้งค่าของ Figure สำหรับ GUI

#### 4.5.5.2.4 การสร้างองค์ประกอบ

เลือก Object ต่างๆที่ต้องการจาก Palette และทำการ Drag มาวางพื้นที่ที่เป็น Layout นอกจากนั้นคุณยังสามารถที่จะเพิ่มขนาดของ Object ต่างๆได้ด้วยการคลิกที่มุมของ Object ต่างๆ เหล่านั้น ซึ่งในตัวอย่างนี้คุณจะต้องดึง Push Button 3 ปุ่ม Static Text 1 ชิ้น Pop Up Menu 1 ชิ้น และ Axes 1 ชิ้น จาก Palette จากนั้นให้จัดองค์ประกอบความสวยงามดังภาพที่ 4.30



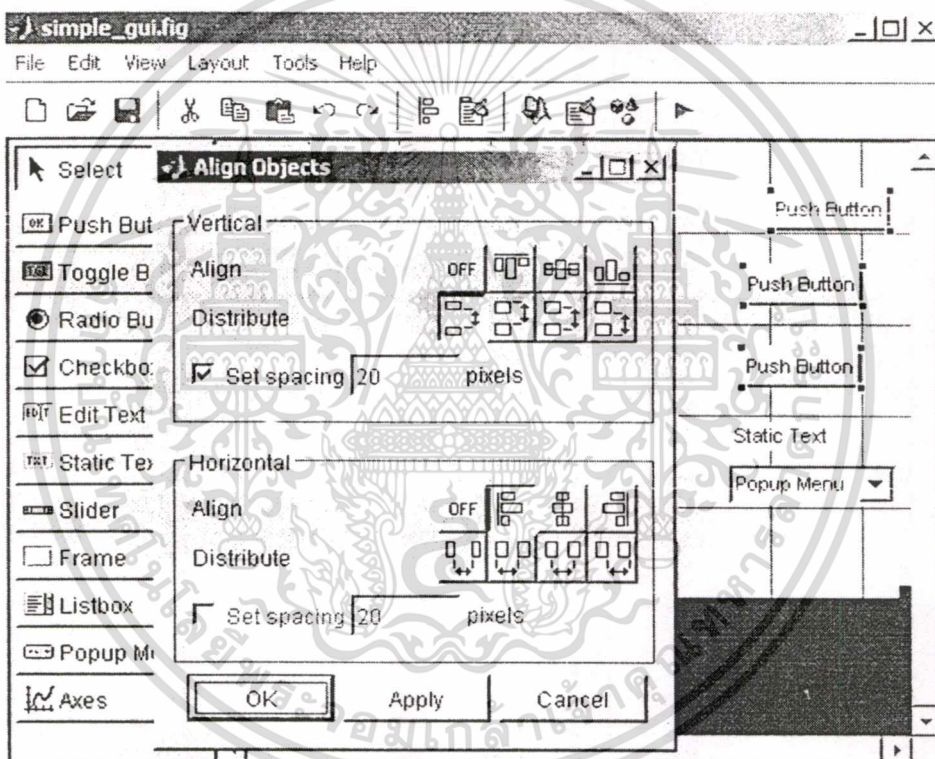
รูปที่ 4.30 การสร้างองค์ประกอบ Object

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.5.2.5 การจัดองค์ประกอบ

คุณสามารถที่จะจัด Object บน Layout ของคุณ ได้โดยใช้เครื่องมือช่วย นั่นคือ Alignment Tool ในตัวอย่างนี้จะยกตัวอย่างการจัดปุ่ม Push Button 3 ปุ่มให้เรียงกัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือก Push Button ทั้ง 3 ปุ่มโดยกดปุ่ม Ctrl และคลิกปุ่มเหล่านั้นหรือใช้เมาส์ลากให้คลุมปุ่มเหล่านั้นทั้งหมด
2. เลือก Align Objects จาก Tool Menu
3. ทำการตั้งค่าการจัด ซึ่งแสดงดังรูป 4.31
  - 3.1 ระยะห่าง 20 pixels ระหว่างปุ่มในแนวดิ่ง
  - 3.2 จัดปุ่มให้เป็นแถวโดยยึดทางซ้าย
4. คลิก OK



รูปที่ 4.31 แสดงวิธีการจัด Object

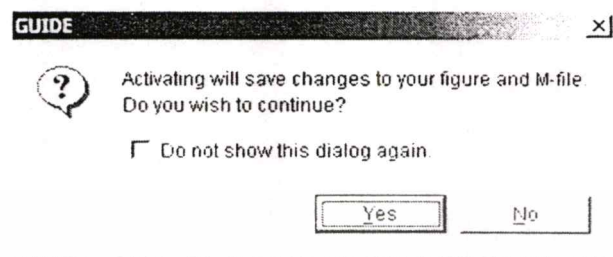
#### 4.5.5.3 การทำโปรแกรม GUI (Programming the GUI)

การทำโปรแกรมนั้นหลักๆจะต้องทำการตั้ง (Set) ค่า Properties ของ Object แต่ละตัว ในวินโดว์ Properties Inspector จากนั้นจึงนำไปเขียน Code เช่น เขียนฟังก์ชันการ Callback ให้สัมพันธ์กับ Object ต่างๆใน MATLAB M-File จากนั้นจึงทำการ Run Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

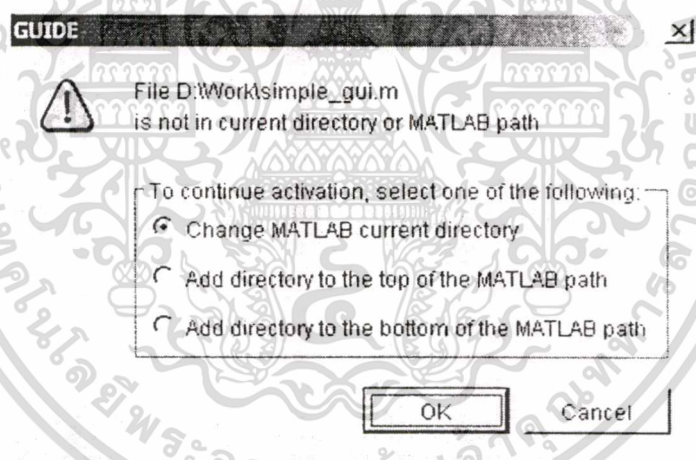
#### 4.5.5.4 การ Save และการ Run โปรแกรม (Saving and Running the GUI)

ภายหลังจากเขียนฟังก์ชัน Callback คุณสามารถที่จะ RUN GUI ของคุณด้วยการเลือก RUN จาก Tool Menu หรือคลิกปุ่ม RUN บน GUIDE ToolBar ถ้าคุณยังไม่ SAVE ไฟล์ที่ทำก่อนที่จะกด RUN คุณจะพบข้อความดังนี้ ตามรูปที่ 4.32



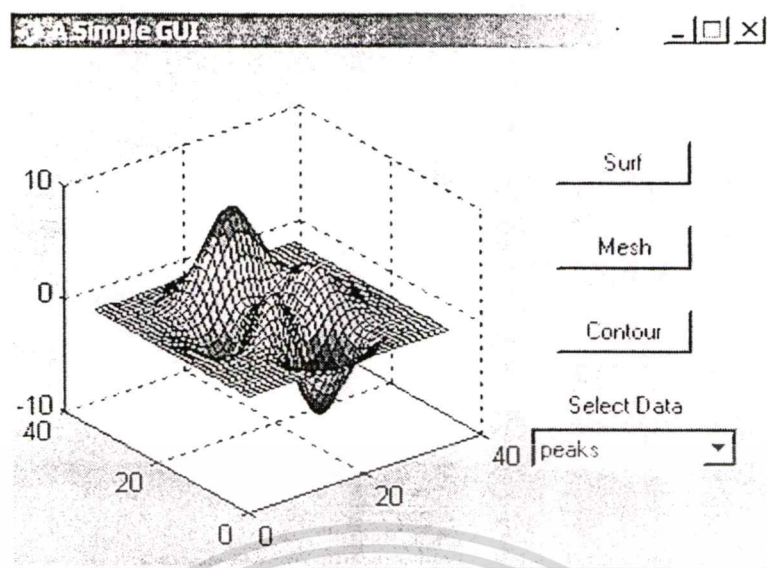
รูปที่ 4.32 วิน โคว์เตือนให้ Save ไฟล์ล่าสุด

ถ้าเจอเหตุการณ์ดังนี้ ให้คลิก Yes จากนั้น โปรแกรมจะทำการ Save แต่ถ้า Directory ที่คุณ Save ไม่ใช่ทางเดิน (Path) ที่ตั้งไว้ใน โปรแกรม GUIDE จะเปิดวิน โคว์ แสดงข้อความดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 วิน โคว์ GUIDE เพื่อเลือกทางเดินของไฟล์ (Path)

คลิก OK มันจะทำการเปลี่ยน Directory ปัจจุบันให้ จากนั้น GUIDE จะเปิด รูปภาพที่สร้าง Layout ไว้ก่อนหน้านี้ ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 เมื่อตอง RUN โปรแกรมจะ ได้ดังรูป

#### 4.6 แนะนำโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

##### 4.6.1 ขอบเขตและเงื่อนไขสำหรับการออกแบบด้วยโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

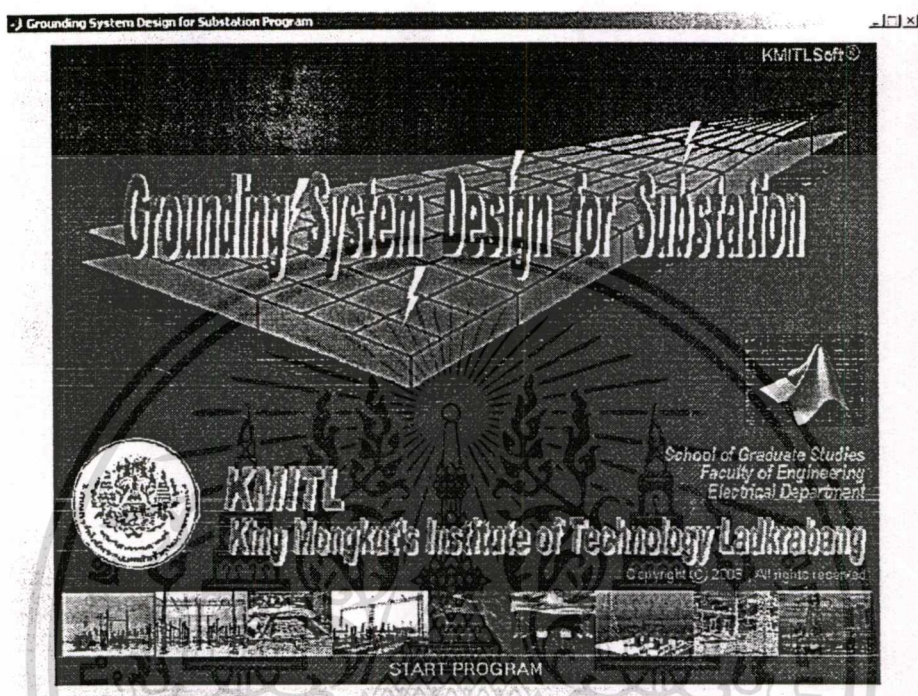
ความสามารถของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้สามารถที่จะออกแบบระบบต่อลงดินดังลักษณะต่อไปนี้

1. โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสามารถออกแบบพื้นที่ที่มีลักษณะต่างกันได้ 4 ประเภท คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นที่รูปตัวแอล และพื้นที่รูปตัวที
2. แบบจำลองดินที่มีค่าความต้านทานดินสม่ำเสมอ (Uniform Soil) คือ ดินชั้นเดียว
3. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร แบบ Single Line to Ground Fault และสามารถกำหนดตำแหน่งลัดวงจรได้ เช่น บัสไฟฟ้าแรงดันสูง หรือ บัสไฟฟ้าแรงดันต่ำ ของหม้อแปลงไฟฟ้า
4. เลือกโหมดวิธีการออกแบบได้ 2 วิธี
  - 4.1 วิธีการออกแบบแบบทั่วไป (Conventional Design Method)
  - 4.2 วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสม (Optimal Design Method)
5. เรียกดูค่าจำเพาะของวัสดุนำไฟฟ้า (Material Constants) [1] เพื่อใช้ในการคำนวณได้
6. จำลอง (Simulate) การออกแบบได้
7. พิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล (Hard Copy) ได้
8. มี Help แนะนำการใช้งานบนแถบเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 ส่วนประกอบและวิธีการใช้งานโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

โปรแกรมการออกแบบระบบการต่อลงดินนี้ มีส่วนประกอบที่เป็นวินโดวอยู่ 5 วินโดว กล่าวคือ เมื่อทำการเรียกโปรแกรมจะพบวินโดวแรกเป็นวินโดวต้อนรับสู่การออกแบบระบบต่อลงดินดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 วินโดวแรกสู่การออกแบบระบบการต่อลงดิน

เมื่อคลิกปุ่ม **START PROGRAM** จะเป็นการเรียกวินโดวส์การคำนวณเพื่อออกแบบระบบการต่อลงดิน หลังจากคลิกปุ่ม **START PROGRAM** จะพบวินโดวส์ดังรูปที่ 4.36

หลังจากที่วินโดวส์ดังรูปที่ 4.36 ปรากฏขึ้นที่หน้าจอของคอมพิวเตอร์ วินโดวส์หน้านี้มีหน้าที่สำหรับการคำนวณค่าต่างๆในเบื้องต้น ซึ่งเมื่อเทียบกับแผนภูมิขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 ก็จะถูกอยู่ในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ของแผนภูมิการออกแบบดังรูปที่ 4.1 ดังนั้น ผู้ออกแบบระบบต่อลงดินจะต้องมีข้อมูลต่างๆที่พร้อมสำหรับการป้อนค่าต่างๆในวินโดวส์

ในวินโดวส์นี้มีองค์ประกอบที่สามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ส่วนได้แก่

1. การคำนวณหากระแสไฟฟ้าผิดปกติ (Fault Current)
2. การคำนวณหาค่า  $K$  และค่า  $C_s$
3. ผลลัพธ์การคำนวณจากข้อ 1 และข้อ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.36 วินโดว์ลำดับที่สองสำหรับการคำนวณกระแสไฟฟ้าผิดพลาดและสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์เวกเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่า K และ C

### Ground Short Circuit Current

ส่วนนี้เป็นการคำนวณหาค่ากระแสผิดพลาด (Fault Current) สำหรับโปรแกรมนี้จะเป็นการคำนวณหากระแสผิดพลาดระหว่างไลน์กับดิน (Single Line to Ground Fault) ชนิดแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ซึ่งการคำนวณหากระแสไฟฟ้าผิดพลาดดังกล่าวนี้จะอยู่ในวินโดว์ที่หัวข้อมีชื่อว่า Ground Short Circuit Current ซึ่งการคำนวณหากระแสไฟฟ้าผิดพลาดนี้สามารถเลือกการคำนวณได้ 2 โหมด คือ User Specified และ Short Circuit Study ซึ่งทั้งสองวิธีการคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาดนั้น มีความแตกต่างกันดังนี้คือ ในกรณีที่ผู้ออกแบบระบบต่อลงดินมีข้อมูลขนาดของกระแสไฟฟ้าผิดพลาด และค่าอัตราส่วน X/R แล้วก็ให้เลือกโหมดแรกคือ User Specified นั่นคือโปรแกรมจะรับค่าไว้เพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้าสำหรับทำตะแกรงต่อลงดิน แต่ถ้าผู้ออกแบบรู้เพียงแรงดันไฟฟ้าบัส และอิมพีแดนซ์ ของทั้งบัสไฟฟ้าแรงดันสูง และบัสไฟฟ้าแรงดันต่ำให้ผู้ออกแบบเลือกโหมด Short Circuit Study ซึ่งโหมดนี้จะทำการคำนวณค่าของกระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาด และค่าอัตราส่วน X/R และแสดงผลการคำนวณตรงพื้นที่ด้านขวาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วินโดว์ในหัวข้อที่ชื่อว่า Single Line to Ground Fault ซึ่งอยู่ภายใต้หัวข้อ Results Display ทั้งนี้ที่ผู้ออกแบบนั้นคลิกตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดว่าเกิดที่บัสแรงดันสูง หรือบัสแรงดันต่ำ

ชื่อโครงการการออกแบบระบบต่อลงดิน พิมพ์ที่นี้เพื่อที่จะนำไปใช้พิมพ์บนรายงานการออกแบบ

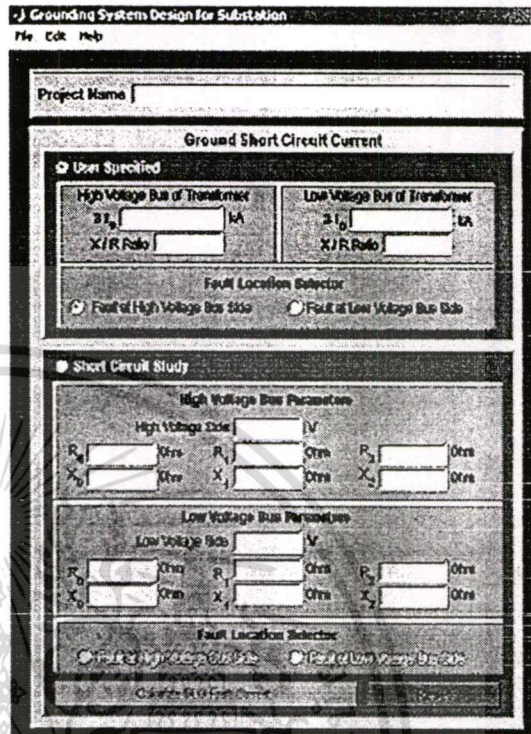
ผู้ออกแบบมีข้อมูลเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าผิดพลาด และอัตราส่วน X/R แล้วให้คลิกปุ่มที่ RadioButton นี้เพื่อป้อนข้อมูล

สำหรับกำหนดตำแหน่งที่เกิดผิดพลาด

ผู้ออกแบบต้องการให้โปรแกรมคำนวณค่าให้คลิกที่นี้พร้อมทั้งป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

สำหรับกำหนดตำแหน่งที่เกิดผิดพลาด

ปุ่มกดสำหรับการคำนวณ



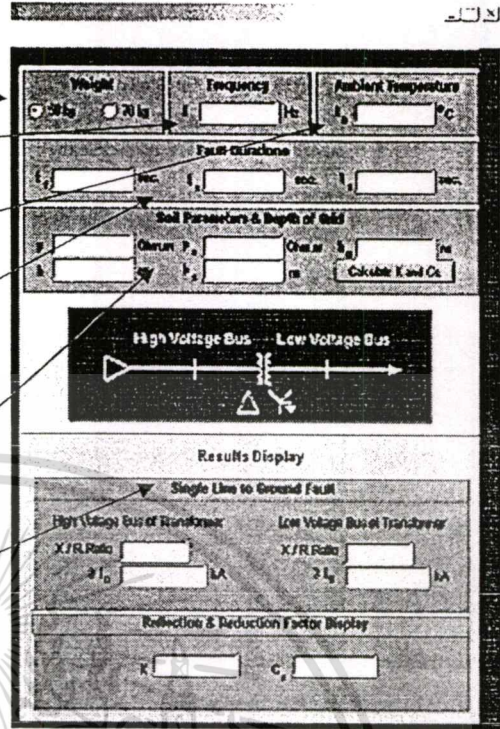
รูปที่ 4.37 ส่วนประกอบของวินโดว์ลำดับสองซีกซ้าย

ที่ด้านขวาของวินโดว์ดังรูปที่ 4.38 จะมีส่วนแสดงผลการคำนวณกระแสผิดพลาด และอัตราส่วน X/R แสดงไว้ทางด้านล่างภายใต้ชื่อ Results Display และทางด้านบนของวินโดว์จะมีช่องให้ป้อนข้อมูลเวดลุ่มซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น เช่น น้ำหนักที่ใช้คำนวณเป็น 50 kg หรือ 70 kg ซึ่งจะมีความสำคัญเพราะโปรแกรมจะเลือกสูตรที่เหมาะสมนำมาใช้คำนวณหาเกณฑ์แรงดันไฟฟ้า ค่าความต้านทานดิน ความลึกของการฝังตะแกรง ความหนาของชั้นวัสดุโรยผิวดิน และอื่นๆเพื่อที่จะให้นำมาคำนวณค่า K และค่า C<sub>s</sub> เมื่อท่านป้อนข้อมูลต่างๆจนครบทุกช่องให้ท่านคลิกเมาส์ที่ปุ่ม **Calculate K and Cs** โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาทางด้านล่างภายใต้ชื่อ Results Display ของวินโดว์ดังรูปที่ 4.38

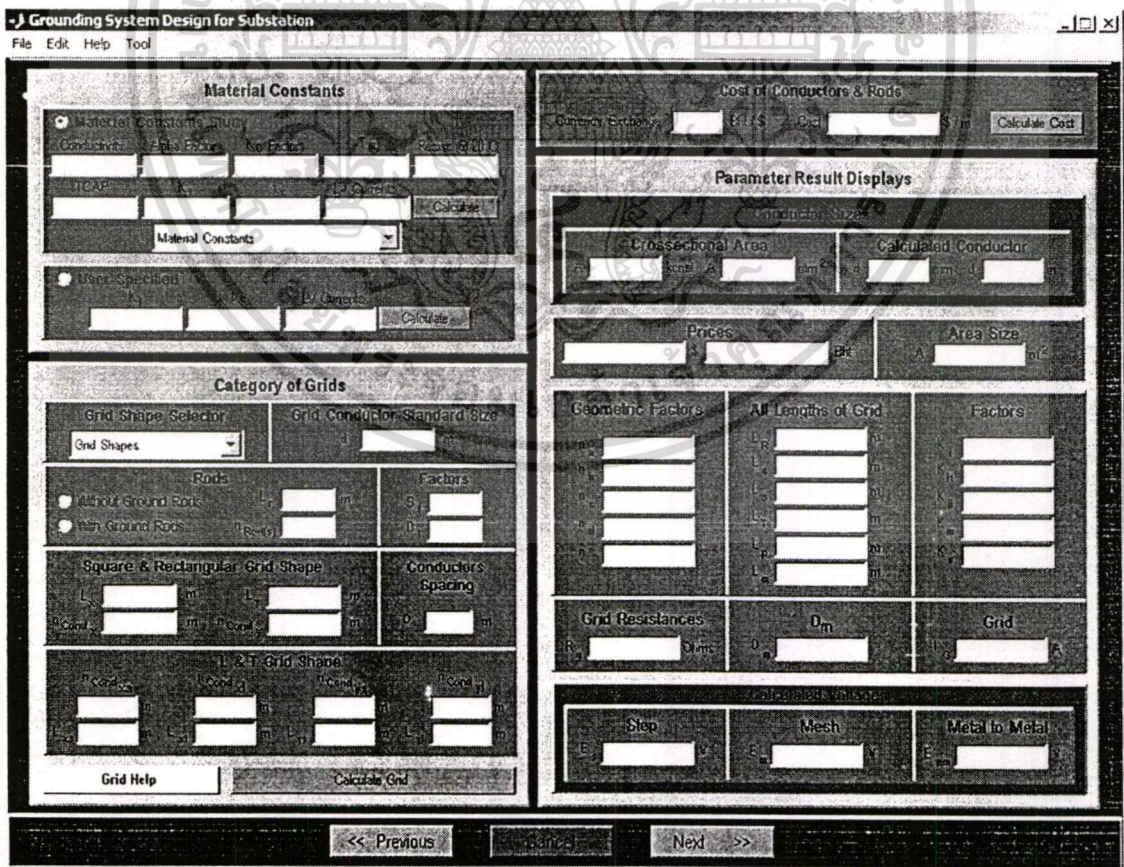
เมื่อทำการคำนวณและแสดงผลลัพธ์ครบหมดแล้ว ให้คลิกเมาส์ที่ปุ่ม **Next >>** จะพบว่าวินโดว์ที่ได้ทำการคำนวณเมื่อสักครู่ได้ถูกปิดลง และปรากฏวินโดว์ใหม่ขึ้นมาแทน ดังรูปที่ 4.39 โดยค่าที่คำนวณได้จากวินโดว์ล่าสุดนั้นจะยังคงเก็บค่าไว้เพื่อนำมาใช้ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งวินโดว์ที่กำลังเปิดอยู่ก็จะนำมาใช้ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักที่ผู้ออกแบบจะต้องเลือกระหว่าง 50 kg หรือ 70 kg  
 ความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศนั้นๆ  
 อุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งจะถูกนำมาใช้คำนวณขนาดแท่งตัวนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบต่อลงดิน  
 ระยะเวลาการเกิดความคิดพ้อง โดยมากแล้วเราจะให้  $t_e$  และ  $t_r$  มีค่าที่เท่ากัน  
 ค่าความต้านทานดิน รวมทั้งความลึกของการฝังตะแกรงและอื่นๆจะป้อนในส่วนนี้  
 ซึ่งตรงส่วนนี้จะมีปุ่มกดสำหรับการคำนวณค่า K และ C ซึ่งถ้าป้อนค่าหมดแล้วสามารถกดเพื่อคำนวณ ได้ทันที  
 ผลลัพธ์การคำนวณจะแสดงตรงพื้นที่นี้ภายใต้หัวข้อชื่อ Results



รูปที่ 4.38 ส่วนประกอบวินโดว์ลำดับที่สองซึ่งขวา



รูปที่ 4.39 วินโดว์ลำดับที่สามของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้อื่นผู้ใดเห็นใบเซอร์ไอเซนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.39 พบว่ามีรายละเอียดของข้อมูลที่ต้องป้อนเข้าไปและแสดงผลออกมาค่อนข้างเยอะมาก อย่างไรก็ตามก็สามารถแบ่งลักษณะหน้าที่การคำนวณได้ดังต่อไปนี้

### Material Constants

ส่วนแรกอยู่ในเฟรมที่ชื่อว่า Material Constants ส่วนนี้เป็นการคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งจะต้องคำนวณออกมาว่าจะใช้ขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่าไร โดยโปรแกรมจะนำค่าไฟฟ้าที่ผิดพลาดจากการคำนวณในขั้นตอนก่อนหน้านี้จากวินโดว์ลำดับที่สองมาทำการคำนวณ

โดยการคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้าภายใต้หัวข้อชื่อ Material Constants จะมีวิธีหรือแนวทางการคำนวณหาอยู่สองวิธีตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 อยู่สองวิธี ซึ่งอาจกล่าวง่ายๆว่า ผู้ออกแบบต้องการคำนวณละเอียด หรือต้องการการคำนวณคร่าวๆ โดยโหมดการคำนวณที่ละเอียดนั้นผู้ออกแบบจะต้องทำการเลือกที่เรดิโอบัททอนชื่อ Material Constants Study และจากนั้นผู้ออกแบบจะต้องเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแท่งตัวนำไฟฟ้าว่าเป็นประเภทใด ซึ่งจะอ้างอิงกับตารางตามมาตรฐานของ IEEE Std. 80-2000 จาก Pop up Menu ที่ชื่อ Material Constants เมื่อผู้ออกแบบทำการเลือกวัสดุแล้วค่าคงที่ต่างๆจะถูกนำมาแสดงที่ช่องต่างๆดังรูปที่ 4.40

**Material Constants**

<input checked="" type="radio"/> Material Constants Study				
Conductivity	Alpha Factor	K <sub>0</sub> Factor	T <sub>m</sub>	Resist. @ 20 C
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
TCAP	K <sub>f</sub>	I <sub>c</sub>	LV Currents	<input type="button" value="Calculate"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Material Constants				
Material Constants				
<input checked="" type="radio"/> User Spec				
K <sub>f</sub>	<input type="text"/> <ul style="list-style-type: none"> <li>Material Constants</li> <li>Copper, annealed soft-drawn</li> <li>Copper, commercial hard-drawn</li> <li>Copper-clad steel wire 40%</li> <li><b>Copper-clad steel wire 30%</b></li> <li>Copper-clad steel rod</li> <li>Aluminum, EC Grade</li> <li>Aluminum, 5005 alloy</li> <li>Aluminum, 6201 alloy</li> <li>Aluminum-clad steel wire</li> <li>Steel, 1020</li> <li>Stainless-clad steel rod</li> <li>Zinc-coated steel rod</li> <li>Stainless steel, 304</li> </ul>			<input type="button" value="Calculate"/>
<input type="text"/>				
<b>Grid Shapes</b>		<b>Standard Size</b>		
<input type="button" value="Grid Shapes"/>	<input type="text"/>		m	
<input type="radio"/> Without Ground		<b>Factors</b>		
<input type="radio"/> With Ground		S <sub>f</sub>		<input type="text"/>
		D <sub>f</sub>		<input type="text"/>

รูปที่ 4.40 ประเภทของวัสดุในป๊อปอัพเมนูของ Material Constant Study

#### Category of grids

เฟรม Category of grids เป็นหัวข้อการคำนวณเกี่ยวกับตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งจะต้องมีการระบุประเภทของตะแกรง และลักษณะต่างๆไปของตะแกรงต่อลงดิน เช่นขนาดกว้างยาวของตะแกรงต่อลงดิน ตะแกรงต่อลงดินนั้นมีแท่งดินแนวดิ่งต่อรวมอยู่ด้วยหรือไม่ ส่วนทางด้านขวาของวินโดว์นั้นเป็นการแสดงค่าการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับตะแกรงต่อลงดิน รวมทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าช่องตะแกรงสูงสุด และค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวสูงสุดที่คำนวณได้จากตะแกรงที่ออกแบบ

อย่างไรก็ดีการป้อนค่าต่างๆนั้น ถ้าผู้ออกแบบยังไม่ชำนาญในการใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ตัวนี้ ผู้ออกแบบสามารถที่จะคลิกไปที่ปุ่ม Help เพื่อดูตัวอย่างการป้อนค่าต่างๆได้ดังรูปที่ 4.41 และรูปที่ 4.42

\_ | □ | × |

## GRID HELP

This is examples for input your grid parameters on program which is described below.

Parameters Introduction

**Lx** : Length of grid area in x axis  
**Ly** : Length of grid area in y axis  
**nCondx** : a number of ground conductors in x axis  
**nCondy** : a number of ground conductors in y axis  
**nCondxs** : a number of ground conductors in x axis but they have to be short conductors  
**nCondys** : a number of ground conductors in y axis but they have to be short conductors  
**nCondxl** : a number of ground conductors in x axis but they have to be long conductors  
**Lxs** : Length of grid area in short x axis side  
**Lys** : Length of grid area in short y axis side  
**Lxl** : Length of grid area in long x axis side  
**Lyl** : Length of grid area in long y axis side  
**D** : Spacing between parallel conductors  
**Lr** : Length of ground rod  
**nRod** : a number of ground rods

Bellow examples are introduced according to Annex B of Std IEEE 80-2000 (Revision of Std IEEE 80-1986)

**Square grid without Ground Rods**

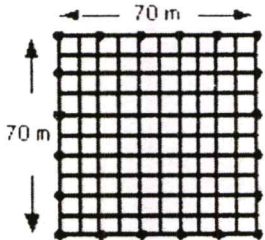
$L_x = 70 \text{ m}$   
 $L_y = 70 \text{ m}$   
 $D = 7 \text{ m}$   
 $n_{\text{Condx}} = 11 \text{ conductors}$   
 $n_{\text{Condy}} = 11 \text{ conductors}$

Next >>

รูปที่ 4.41 วิน โดว์ Help บานที่ 1 เป็นตัวอย่างเพื่อช่วยในการป้อนข้อมูล

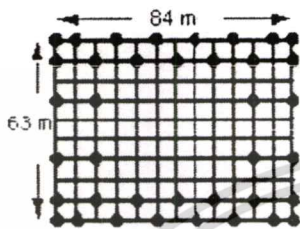
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grid Help
[-] [ ] [X]



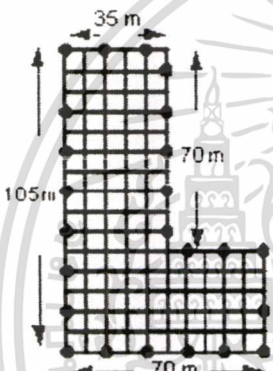
**Square grid with Ground Rods**

- $L_x = 70\text{ m}$
- $L_y = 70\text{ m}$
- $D = 7\text{ m}$
- $n_{\text{Condx}} = 11\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condy}} = 11\text{ conductors}$
- $L_r = 7.5\text{ m}$
- $n_{\text{Rod}} = 20\text{ ground rods}$



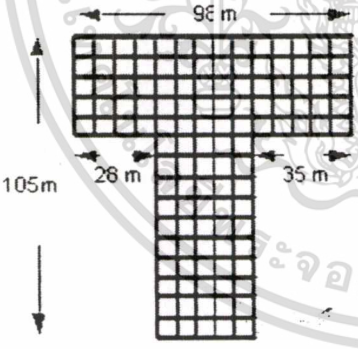
**Rectangular grid with Ground Rods**

- $L_x = 84\text{ m}$
- $L_y = 63\text{ m}$
- $D = 7\text{ m}$
- $n_{\text{Condx}} = 13\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condy}} = 10\text{ conductors}$
- $L_r = 10\text{ m}$
- $n_{\text{Rod}} = 31\text{ ground rods}$



**Rectangular grid with Ground Rods**

- $L_{xs} = 35\text{ m}$     $L_{xl} = 70\text{ m}$
- $L_{ys} = 35\text{ m}$     $L_{yl} = 105\text{ m}$
- $D = 7\text{ m}$
- $n_{\text{Condxs}} = 10\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condxl}} = 5\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condyl}} = 6\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condyd}} = 6\text{ conductors}$
- $L_r = 7.5\text{ m}$
- $n_{\text{Rod}} = 24\text{ ground rods}$



**T-Shaped grid without Ground Rods**

- $L_{xs} = 63\text{ m}$     $L_{xl} = 98\text{ m}$
- $L_{ys} = 35\text{ m}$     $L_{yl} = 105\text{ m}$
- $D = 7\text{ m}$
- $n_{\text{Condxs}} = 10\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condxl}} = 9\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condyd}} = 6\text{ conductors}$
- $n_{\text{Condyd}} = 6\text{ conductors}$
- $L_r = 0\text{ m}$
- $n_{\text{Rod}} = 0\text{ ground rods}$

<< PREVIOUS
CLOSE

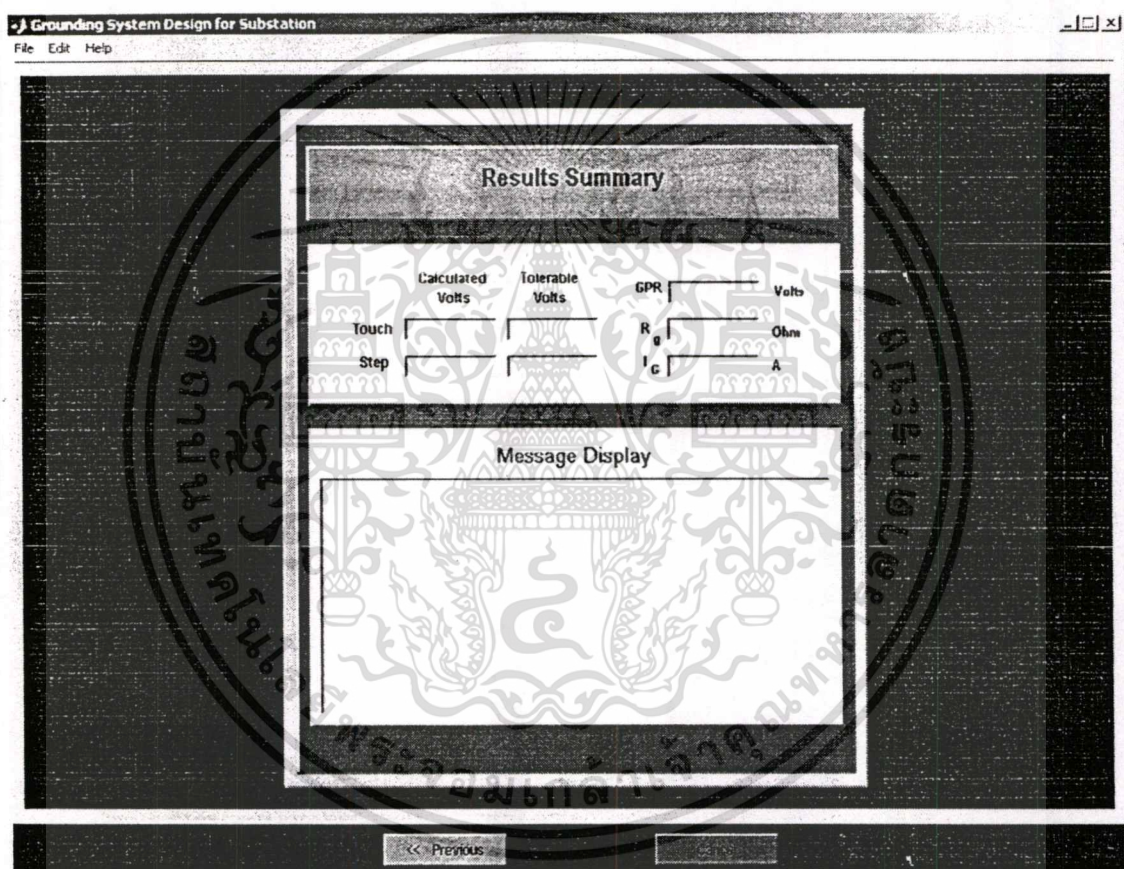
รูปที่ 4.42 วิน โดว์ Help บานที่ 2 เป็นตัวอย่างเพื่อช่วยในการป้อนข้อมูล

**Parameter Results Displays**

จะเป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณต่างๆที่จะใช้ในการออกแบบต่อไป ซึ่งได้แก่ขนาดแท่งตัวนำไฟฟ้า ราคาของแท่งตัวนำไฟฟ้าทั้งหมด ค่าความต้านทานดิน ค่าพารามิเตอร์ต่างของแต่ละเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างของพื้นที่ และแรงดันไฟฟ้าต่างๆที่คำนวณ ได้จากการออกแบบจริงๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าเมฆ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว และแรงดันไฟฟ้าโลหะสู่โลหะ

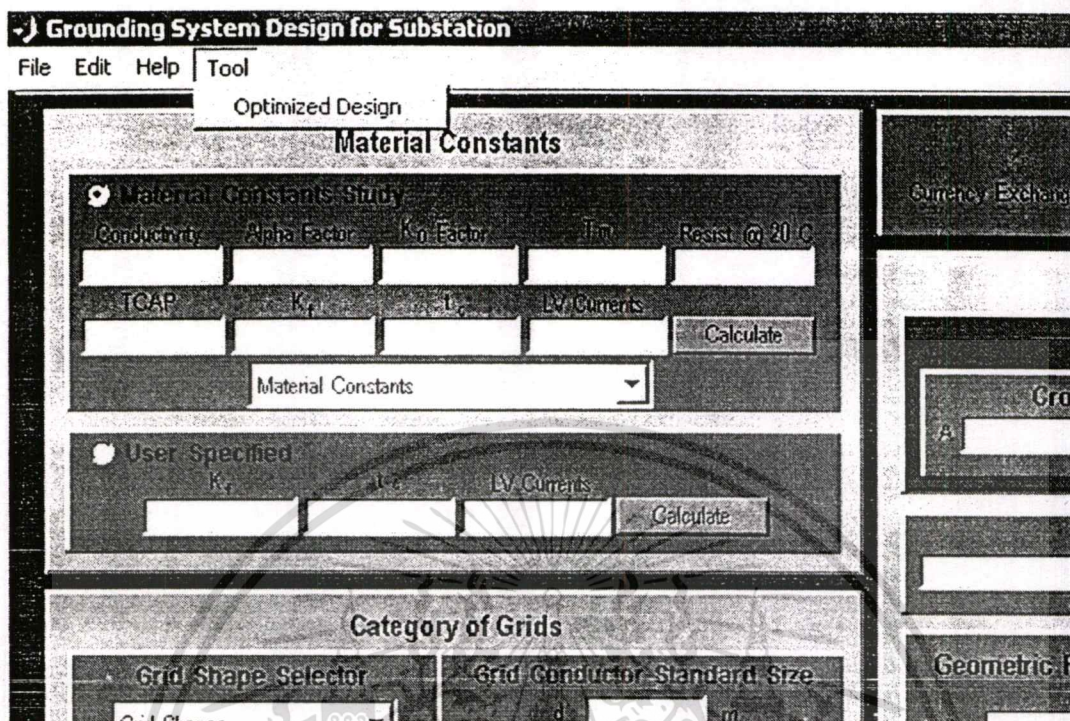
เมื่อกำหนดทุกอย่างในหน้านี้เสร็จแล้วตามรูปที่ 4.39 ให้คลิกปุ่ม Next จะพบวินโดว์สุดท้ายเป็น วินโดว์ผลลัพธ์การออกแบบ นั่นคือที่หน้านี้จะแสดงผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้าเกณฑ์ และแรงดันไฟฟ้าที่คำนวณได้จากตะแกรงต่อลงดิน เปรียบเทียบกัน และจะแสดงข้อความบอกกับผู้ออกแบบด้วยว่าตะแกรงที่ได้ออกแบบอยู่นี้ปลอดภัยหรือไม่ นอกจากนั้นค่าตัวแปรที่สำคัญก็จะแสดงที่หน้านี้ด้วยเช่นกัน เช่นค่าความต้านทานของตะแกรง ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ตะแกรง และค่า GPR ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 วินโดว์ผลลัพธ์ของโปรแกรมออกแบบระบบต่อลงดิน

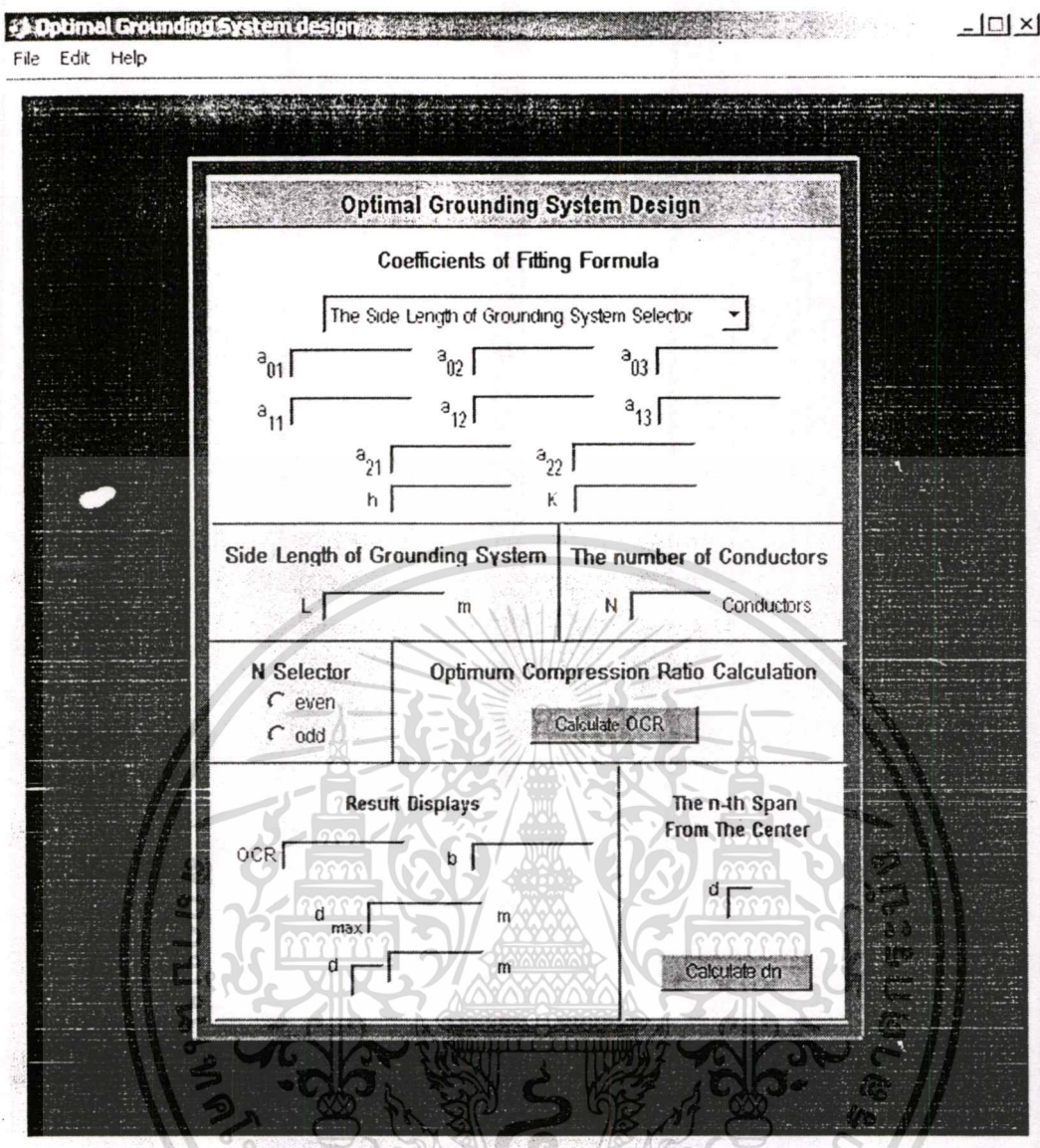
ในกรณีที่ออกแบบในโหมด ออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสม (Optimal Design Method) นั้น ก็จะไล่การตรวจสอบค่าต่างตามวินโดว์ที่ 4.36 จนถึง 4.39 แต่ในวินโดว์นี้ จะต้องคลิกที่ Tool Bar เพื่อเลือก Tool ชื่อ Optimized Design ดังรูปที่ 4.44 และจะปรากฏวินโดว์ Optimal Grounding System Design ดังรูปที่ 4.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 การเลือก โหมดการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม (Optimal Design Method) เมื่อคลิกเลือก โหมดจาก Tool Bar แล้วจะพบวินโดว์ตามรูปที่ 4.45 ถูกเปิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 วินโดว์ Optimal Grounding System Design

ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมนั้นจะอยู่ในบทถัดไป ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีใช้งานโปรแกรมอย่างละเอียดว่าจะต้องป้อนค่าอย่างไรบ้าง เพื่อให้โปรแกรมนั้นสามารถตรวจสอบค่าความปลอดภัยได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# ผลลัพธ์การออกแบบโดยใช้โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

### 5.1 การออกแบบระบบต่อลงดิน

ต่อจากนี้เป็นการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบในด้านการใช้ปริมาณตัวนำไฟฟ้าระหว่างวิธีการออกแบบแบบทั่วไปตามมาตรฐาน [1] และวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมของแท่งตัวนำไฟฟ้า [2] นอกจากนี้ยังแสดงวิธีการใช้โปรแกรม ซึ่งข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินจะอ้างอิงตามภาคผนวกของมาตรฐาน [1] มีดังนี้

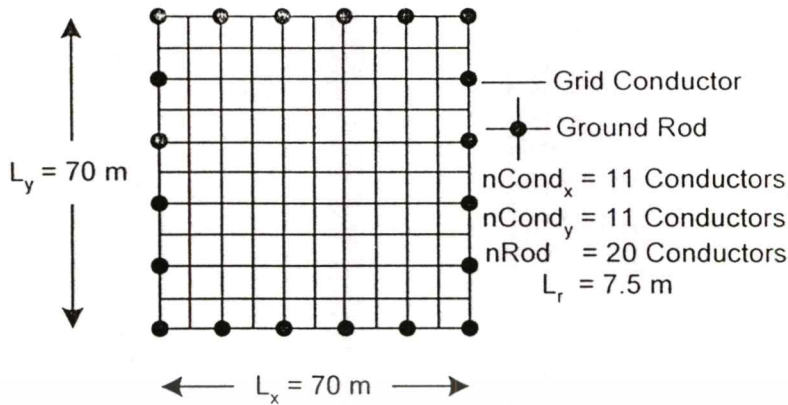
Fault duration, $t_f$	= 0.5	sec.
Positive sequence equivalent system impedance, $Z_1$ (115 kV side)	= $4.00 + j10.0$	$\Omega$
Zero sequence equivalent system impedance, $Z_{01}$ (115 kV side)	= $10.0 + j40.0$	$\Omega$
Current division factor, $S_f$	= 0.6	
Line-to-line Voltage at worst-fault location	= 115,000	V
Soil resistivity, $\rho$	= 400	$\Omega.m$
Crushed rock resistivity (wet), $\rho_s$	= 2500	$\Omega.m$
Thickness of crushed rock surfacing, $h_s$	= 0.102	m (4 in)
Depth of grid burial $h$	= 0.5	m
Transformer impedance, ( $Z_1$ and $Z_0$ ); (13 kV) ( $Z = 9\%$ at 15 MVA, 115/13kV)	= $0.034 + j1.014$	$\Omega$
Grid Conductor		Copper-clad steel wire 30%
Grid Shape		Square grid

### 5.2 การออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้นนอกจากจะใช้ข้อมูลข้างต้นแล้วในระบบต่อลงดินยังมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้ง (Ground Rod) ยาว 7.5 เมตร จำนวน 20 แท่ง เชื่อมต่ออยู่กับระบบต่อลงดินดังรูปที่ 5.1

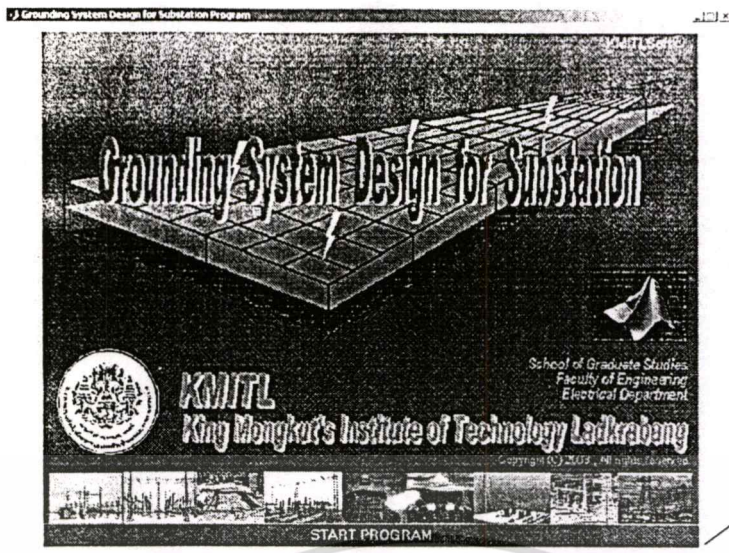
จากข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง และอิมพีแดนซ์ที่บัส 115 kV เมื่อแปลงค่าอิมพีแดนซ์มายังด้านบัส 13 kV จะได้  $Z_{01} = 0.034 + j1.014 \Omega$ ,  $Z_1 = Z_2 = 0.085 + j1.142 \Omega$  [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ลักษณะของตะแกรงที่ใช้ออกแบบระบบต่อลงดิน [1]

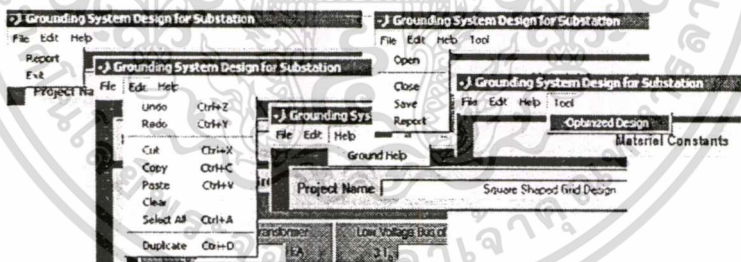
เมื่อเปิดโปรแกรมจะพบวินโดว์แรกดังรูปที่ 5.2 เมื่อคลิกเมาส์ ปุ่ม **START PROGRAM** โปรแกรมจะแสดงวินโดว์ที่ 2 ดังรูปที่ 5.4 โดยวินโดว์นี้มีหน้าที่หลักๆ 3 ส่วนคือ กำหนดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ Single Line to Ground Fault รับค่าจากการป้อนข้อมูลเบื้องต้นของสถานีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณในขั้นตอนต่อไป และแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่า  $K$  และ ค่า  $C_s$  ซึ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรสามารถเลือกโหมดได้ 2 แบบคือ User Specified ใช้เมื่อมีค่ากระแสลัดวงจรอยู่แล้ว และ Short Circuit Study ใช้เมื่อต้องการให้โปรแกรมทำการคำนวณกระแสลัดวงจรให้ โดยจะต้องป้อนค่า แรงดันไฟฟ้าบัส และค่าอิมพีแดนซ์ของสถานีไฟฟ้าให้กับโปรแกรม และกำหนดจุดที่ผิดปกติ (Fault) ซึ่งการออกแบบนี้จะให้โปรแกรมทำการคำนวณให้ โดยคลิกที่ **Short Circuit Study** จากนั้นป้อนค่าต่างๆ และกำหนดจุดที่ผิดปกติ ดังรูปที่ 5.4 คลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate SLG Fault Current** จะแสดงค่าการคำนวณออกมา จากนั้นป้อนข้อมูลเบื้องต้น และคำนวณ ค่า  $K$  และ ค่า  $C_s$  คลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate K and Cs** จะแสดงค่าการคำนวณออกมา ดังรูปที่ 5.4 จากนั้นให้คลิกเมาส์ ปุ่ม **Next >>**



คลิกเมาท์  
ปุ่ม START PROGRAM  
เพื่อเข้าสู่โปรแกรม  
การคำนวณออกแบบ

รูปที่ 5.2 วินโดว์แรกของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

หลังจากคลิกปุ่ม Next จะปรากฏวินโดว์ที่ 3 ดังรูปที่ 5.5 โดยวินโดว์นี้มีหน้าที่หลักๆ 4 ส่วนคือ ส่วนการคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนการรับค่าจากการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับตะแกรงต่อลงดินเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกั้ว แรงดันไฟฟ้าตะแกรง รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าโลหะสู่โลหะ ส่วนของการคำนวณราคาแท่งตัวนำไฟฟ้า และส่วนการแสดงค่าผลลัพธ์จากการคำนวณ



รูปที่ 5.3 แถบเครื่องมือ และตัวเลือกการใช้งานของโปรแกรม

การคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้าสามารถเลือกการคำนวณได้ 2 วิธี คือ Material Constants Study เมื่อเลือกใช้โหมดนี้จะค่อนข้างสะดวกเพราะโปรแกรมจะมีค่าจำเพาะของวัสดุตามมาตรฐานเก็บค่าเอาไว้ซึ่งสามารถเรียกค่าต่างๆมาเพื่อใช้ในการคำนวณได้ทันที ทันทีที่เลือกประเภทของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ Pop up Menu การคำนวณหาแท่งตัวนำไฟฟ้าโดยโหมดนี้จะคำนวณค่อนข้างละเอียด และอีกวิธีคือ User Specified เป็นการคำนวณหาแท่งตัวนำไฟฟ้าหยาบๆ ผลลัพธ์การคำนวณจากทั้งสองวิธีจำเป็นต้องเทียบหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้ามาตรฐานจากผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



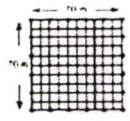
**GRID HELP**

This is a help file for the grid parameter program and its associated tools.

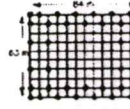
Parameters Introduction

- Lx** Length of grid area in x axis
- Ly** Length of grid area in y axis
- nCondx** a number of ground conductors in x axis
- nCondy** a number of ground conductors in y axis
- nCondxs** a number of ground conductors in x axis but they have to be short conductors
- nCondys** a number of ground conductors in y axis but they have to be short conductors
- nCondds** a number of ground conductors in x axis but they have to be long conductors
- Lxs** Length of grid area in short x axis side
- Lys** Length of grid area in short y axis side
- Lxl** Length of grid area in long x axis side
- Lyl** Length of grid area in long y axis side
- D** Spacing between parallel conductors
- Lr** Length of ground rod
- nRod** a number of ground rods

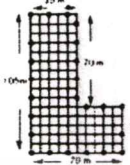
Below examples are introduced according to Annex B of Std IEEE 80-2000 (Revision of Std IEEE 80-1996)



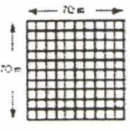
**Square grid with Ground Rods**  
 $L_x = 70\text{ m}$   
 $L_y = 70\text{ m}$   
 $D = 7\text{ m}$   
 $n_{Condx} = 11$  conductors  
 $n_{Condy} = 11$  conductors  
 $n_{Rod} = 20$  ground rods



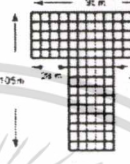
**Rectangular grid with Ground Rods**  
 $L_x = 84\text{ m}$   
 $L_y = 63\text{ m}$   
 $D = 7\text{ m}$   
 $n_{Condx} = 13$  conductors  
 $n_{Condy} = 10$  conductors  
 $n_{Rod} = 31$  ground rods



**Rectangular grid with Ground Rods**  
 $L_x = 35\text{ m}$ ,  $L_y = 70\text{ m}$   
 $L_{xl} = 35\text{ m}$ ,  $L_{yl} = 105\text{ m}$   
 $D = 7\text{ m}$   
 $n_{Condx} = 10$  conductors  
 $n_{Condy} = 5$  conductors  
 $n_{Condxs} = 6$  conductors  
 $n_{Condys} = 6$  conductors  
 $L_r = 7.5\text{ m}$   
 $n_{Rod} = 24$  ground rods



**Square grid without Ground Rods**  
 $L_x = 70\text{ m}$   
 $L_y = 70\text{ m}$   
 $D = 7\text{ m}$   
 $n_{Condx} = 11$  conductors  
 $n_{Condy} = 11$  conductors



**T-Shaped grid without Ground Rods**  
 $L_x = 63\text{ m}$ ,  $L_y = 98\text{ m}$   
 $L_{xl} = 35\text{ m}$ ,  $L_{yl} = 105\text{ m}$   
 $D = 7\text{ m}$   
 $n_{Condx} = 10$  conductors  
 $n_{Condy} = 5$  conductors  
 $n_{Condxs} = 6$  conductors  
 $n_{Condys} = 6$  conductors  
 $L_r = 3\text{ m}$   
 $n_{Rod} = 0$  ground rods

Next >>      << PREVIOUS      CLOSE

### รูปที่ 5.6 วินโดว์แนะนำการป้อนค่าให้ถูกต้อง

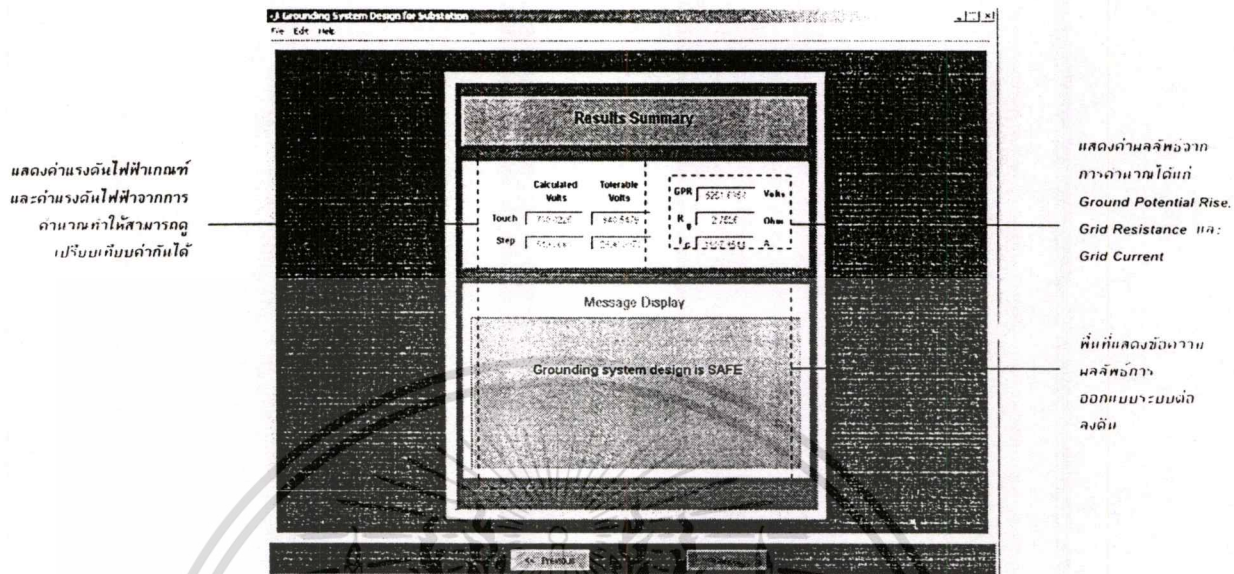
เมื่อป้อนค่าต่างๆครบหมดแล้ว ให้คลิกเมาส์ปุ่ม **Calculate Grid** ค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องจากการคำนวณจะแสดงออกมาในส่วนของ Parameter Result Displays ดังรูปที่ 5.5 จากนั้นให้คลิกเมาส์ปุ่ม **Next >>** เพื่อผลลัพธ์การออกแบบพบว่า โปรแกรมแสดงผลการออกแบบระบบต่อลงดินว่าปลอดภัย (Safe) ตามรูปที่ 5.7 โดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตะแคงที่คำนวณได้ (730.0026 V) มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (840.5479 V) และแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้ (549.0689 V) มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (2696.0971 V) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 ทั้งนี้ถ้าเกิดกรณีการออกแบบมีผลลัพธ์ที่ไม่ปลอดภัย โปรแกรมจะเตือนเป็นข้อความ และให้ผู้ออกแบบกลับไปแก้ไขค่าบางตัวเช่น เพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดหรือจำนวนของแท่งตัวนำไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้า หรืออาจเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งเข้าไปในระบบต่อลงดินก็ได้

### 5.3 การออกแบบด้วยเทคนิคออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม

การทดสอบโปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบโดยใช้โหมดการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมเพื่อทดสอบดูว่าโปรแกรมสามารถออกแบบ และให้ผลลัพธ์การใช้ปริมาณของตัวนำไฟฟ้าได้น้อยลงเพียงใด โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการออกแบบแบบต่างๆไปดังตัวอย่างที่ผ่านมา โดยข้อมูลจะยังคงใช้เหมือนเดิม [1]

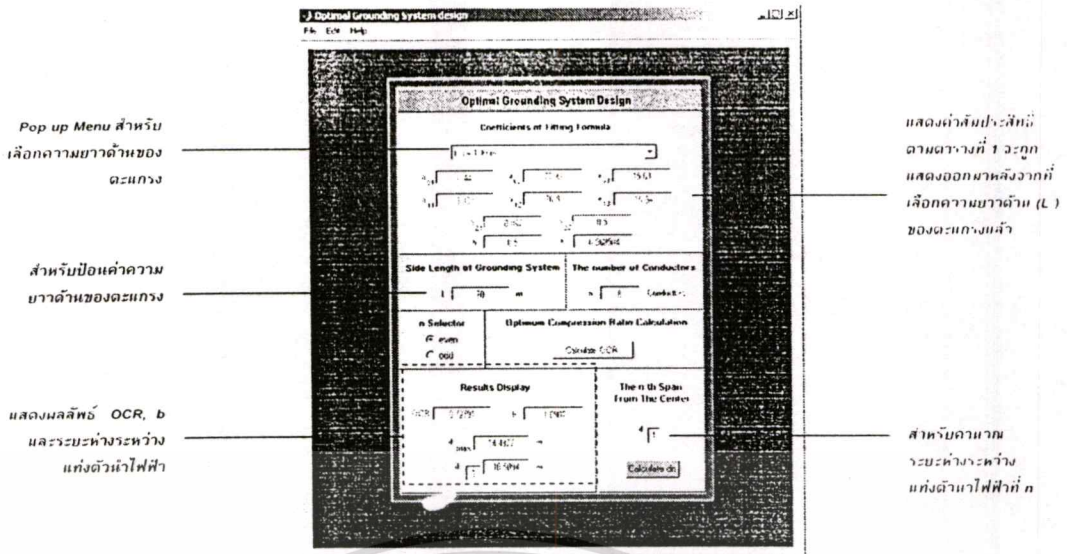
การออกแบบเริ่มต้น โดยกำหนดให้ตะแคงต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหมือนดังตัวอย่างที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.1 แต่ตะแคงถูกออกแบบให้มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวราบจำนวน 10 แท่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งยาว 7.5 เมตร จำนวน 12 แท่ง ดังรูปที่ 5.9 เนื่องจากความยาวด้านในแนวแกน x และแนวแกน y มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงพิจารณาแนวแกน x เพียงด้านเดียวก็ได้ แล้วนำผลที่ได้ไปออกแบบในแนวแกน y

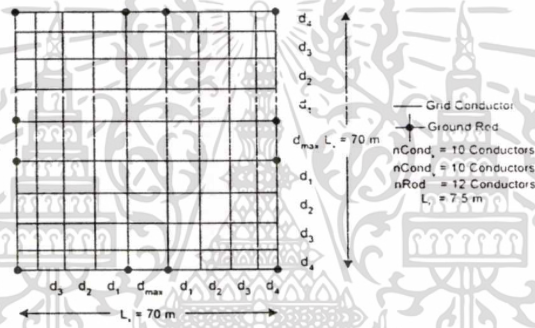


รูปที่ 5.7 วินโดว์แสดงผลพร้อมออกแบบโดยวิธีออกแบบระบบต่อลงดินแบบต่างๆไป

หลังจากที่กำหนดลักษณะของตะแกรงแล้ว ให้เปิดโปรแกรมการออกแบบ แล้วทำการป้อนค่าดังรูปที่ 5.4 ผลลัพธ์การออกแบบเป็นดังรูปที่ 5.5 จากนั้นคลิกเมาส์ปุ่ม **Next >>** จะพบวินโดว์ที่ 3 ของโปรแกรมถูกเปิดขึ้น ดังรูปที่ 5.5 ให้คลิกที่ Tool บนแถบเครื่องมือ ดังรูปที่ 5.8 เลือกคลิกหัวข้อ Optimized Design จะปรากฏวินโดว์ Optimal Grounding System Design ดังรูปที่ 5.8 จากนั้นคลิกที่ Popup Menu เพื่อเลือกความยาวด้าน โดยเลือก  $L \leq 100$  m ทั้งนี้ที่เลือก ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไว้ใช้สำหรับคำนวณดังตารางที่ 1 จะถูกแสดงบนวินโดว์ จากนั้นเลือก even คลิกเมาส์ปุ่ม **Calculate OCR** จะได้ค่าผลลัพธ์ของ OCR, b, และ  $d_{max}$  แสดงออกมา



รูปที่ 5.8 วินโดว์ออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม



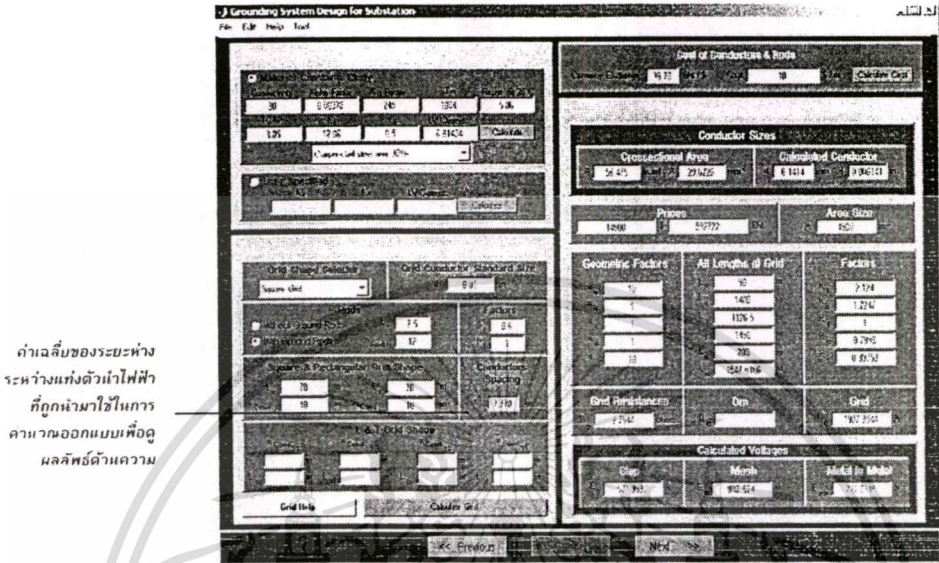
รูปที่ 5.9 ลักษณะตะแกรงที่ถูกออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม

ตารางที่ 2 ค่าผลลัพธ์โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม

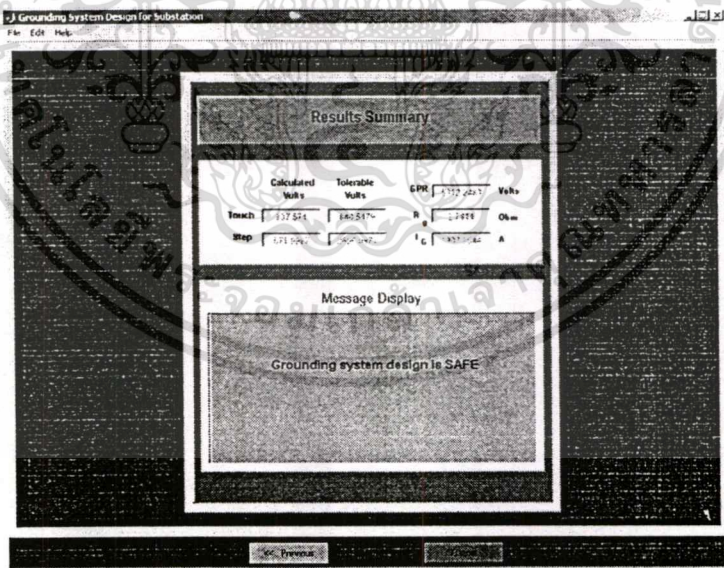
Calculated Optimal Design Parameters				
$d_{max}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
14.4377	10.5094	7.6499	5.5685	4.0534
OCR = 0.72791		b = -1.0902		

ส่วนระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ( $d_n$ ) ให้ป้อนค่า  $n$  ทีละค่าโดยเริ่มจาก 1 แล้วคลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate dn** ซึ่งค่าต่างๆที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 2 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 2 มาออกแบบระยะห่างช่องตะแกรงตามรูปที่ 5.9 จากนั้นลองตรวจสอบว่าตะแกรงที่ได้ออกแบบมานั้นปลอดภัย (Safe) หรือไม่ โดยการป้อนค่าระยะห่างระหว่างช่องตะแกรง (D) ที่วินโดว์ที่ 3 ซึ่งได้จากการหาค่าเฉลี่ยของ  $d_{max}$  และ  $d_n$  รวมกันตลอดความยาวด้าน (L) และค่าต่างๆตามที่ได้กล่าวอธิบายมาแล้ว ดังรูปที่ 5.10 จากนั้นคลิกเมาส์ ปุ่ม **Next >>** จะปรากฏวินโดว์แสดงผลดังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 ผลการออกแบบสรุปว่าปลอดภัย (Safe) ต่อจากนั้นก็สามรถออกแบบในรายละเอียดต่อไปได้ตาม Flow Chart ดังรูปที่ 1 นอกจากนี้ถ้าต้องการพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล (Hard Copy) ให้เลือก File ที่ แถบเครื่องมือ แล้วคลิกคำสั่ง Print จะได้รายงานการออกแบบดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 วิน โคว์ที่ 3 หลังจากป้อนค่าตัวแปรที่ได้จากวิธี Optimal Design



รูปที่ 5.11 วิน โคว์แสดงผลลัพธ์การออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Grounding System Design Report IEEE Std. 80-2000

Project Name : Square Shaped Grid Design

Soil Resistivity : 400  
 Surface Resistivity : 2500  
 Symmetrical Fault Current  
 in Substation for Conductor Sizing : 6.814  
 Conductor Calculated Sizing : 58.475 kcmil  
 : 29.6226 mm<sup>2</sup>

### Optimal Design Method

Number of Ground Rod : 12 m  
 Length of Ground Rod : 7.5 m  
 Total Length of Ground Rod : 90 m  
 Total Length of Grid Conductor : 1400 m  
 Total Length of Ground Conductor : 1490 m  
 Maximum Grid Current : 1907.8544 A  
 Conductor Price : 592722

R <sub>g</sub>	GPR	Touch Potential		Step Potential	
		Calculated Volts	Tolerable Volts	Calculated Volts	Tolerable Volts
2.7844	5312.2483	837.574	840.5479	571.9987	2696.0971

รูปที่ 5.12 รายงานการออกแบบเมื่อถูกพิมพ์ออกมาจากโปรแกรม

## สรุปผลการทดลองการออกแบบ

### 6.1 ผลการทดลองจากซอฟต์แวร์โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบระบบต่อลงดินระหว่างวิธีการออกแบบแบบทั่วไป (Conventional Design Method) และวิธีการออกแบบโดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Design Method) พบว่าวิธีออกแบบระบบต่อลงดินแบบทั่วไปใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร หรือพื้นที่หน้าตัด 29.623 ตารางมิลลิเมตร (58.475 kcmil) ยาวทั้งหมด 1,690 เมตร ในขณะที่การออกแบบโดยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมนั้น พบว่าใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร หรือพื้นที่หน้าตัด 29.623 ตารางมิลลิเมตร (58.475 kcmil) ยาวทั้งหมดเพียง 1,490 เมตร ซึ่งเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกันพบว่า วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมสามารถลดปริมาณของแท่งตัวนำไฟฟ้าลงไปถึงร้อยละ 11.83

เมื่อพิจารณาด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage,  $E_m$ ) กับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage,  $E_s$ ) ของทั้งสองวิธี ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดบนตะแกรงต่อลงดินเมื่อพิจารณาให้กระแสไฟฟ้าที่ฉีดพรมองนั้นเกิดขึ้นที่ (Inject) ตำแหน่งตรงกลางของตะแกรง พบว่าวิธีออกแบบแบบทั่วไป (Conventional Method) ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage,  $E_m$ ) มีค่าเท่ากับ 730.023 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage,  $E_s$ ) มีค่าเท่ากับ 549.069 โวลต์ ในขณะที่วิธีออกแบบโดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Design Method) ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage,  $E_m$ ) มีค่าเท่ากับ 837.574 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (Step Voltage,  $E_s$ ) มีค่าเท่ากับ 571.999 โวลต์

การที่วิธีออกแบบโดยใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Design Method) มีค่าของแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (Mesh Voltage,  $E_m$ ) สูงกว่าวิธีออกแบบโดยทั่วไป เพราะวาระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่ามากกว่าวิธีออกแบบโดยทั่วไปจึงทำให้ช่องของตะแกรงมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมมีความแตกต่างที่มากขึ้นด้วย

ในด้านของค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance,  $R_g$ ) พบว่าเมื่อออกแบบระบบต่อลงดินโดยวิธีใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Design Method) จะได้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน (Grid Resistance,  $R_g$ ) เท่ากับ 2.7844 โอห์ม สูงกว่าค่า

ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินเมื่อออกแบบโดยวิธีทั่วๆ ไป (Conventional Method) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.7526 โอห์ม ซึ่งมีค่าแตกต่างอยู่ 0.0318 โอห์ม ทั้งนี้เป็นเพราะการออกแบบด้วยวิธีใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (Optimal Design Method) เป็นการลดแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ทำตะแกรงลงนั่นเอง แต่ทั้งนี้ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือการไฟฟ้านครหลวง [17] นั้นจะยอมให้ค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม

เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงต่อลงดิน (Grid Current,  $I_G$ ) พบว่า ไม่มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากการออกแบบตะแกรงต่อลงดินไม่ให้ผลที่เกี่ยวข้องกันกับกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงแต่กระแสไฟฟ้าที่ลัดวงจรจะมากหรือน้อยเป็นผลโดยตรงมาจากตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติที่ว่าตำแหน่งที่เกิดมีแรงดันไฟฟ้าสูงหรือไม่ กล่าวคือปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแปรผันโดยตรงกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า

เมื่อนำโปรแกรมการออกแบบที่ถูกสร้างขึ้นและพัฒนาบน MATLAB นำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน พบว่าเมื่อออกแบบโดยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม (Optimal Grounding System Design) โปรแกรมสามารถออกแบบระบบต่อลงดินที่มั่นใจได้ในความปลอดภัยตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1] และยังสามารถลดปริมาณตัวนำไฟฟ้าโดยรวมลงได้ ตามวัตถุประสงค์ ทำให้ได้ระบบต่อลงดินที่ประหยัดวัสดุนำไฟฟ้าสำหรับระบบต่อลงดิน ประหยัดงบประมาณการก่อสร้างและการออกแบบ อีกทั้ง โปรแกรมยังช่วยลดเวลาการออกแบบ และใช้งานง่าย ทำให้ระบบต่อลงดินที่ได้สามารถมั่นใจได้ในความปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ในพื้นที่สถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1]

ในด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์โปรแกรมนี้ต่อไปในอนาคต จะเป็นการพัฒนาให้ซอฟต์แวร์มีความสามารถในการออกแบบระบบต่อลงดิน ให้สามารถพิจารณาชั้นดินตั้งแต่สองชั้น (Double Layer Soil Model) ขึ้นไปจนถึงชั้นดินที่มีโครงสร้างดินหลายชั้น (Multi Layer Soil Model) โดยแบ่งชั้นดินตามค่าความต้านทาน (Soil Resistivity,  $\rho$ ) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ดินนั้นมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าการออกแบบระบบต่อลงดินเมื่อวิเคราะห์ดินเพียงชั้นเดียว (Uniform Soil)

## 6.2 ผลการออกแบบจากโปรแกรม EPRI TR-100622 สำหรับตะแกรงต่อลงดินที่จัดระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าที่เท่ากัน [1]

เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 ออกแบบระบบตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าเท่ากัน (Equally Spaced Grid) ในแบบจำลองดินสองชั้น

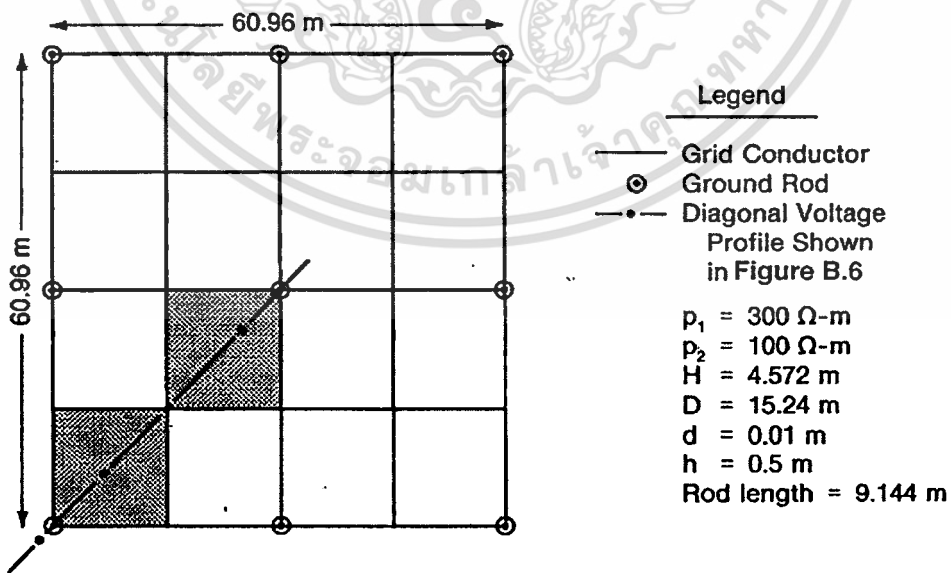
จากรูปที่ 6.1 ตะแกรงต่อลงดินมีขนาด 61 m x 61 m ต่อเชื่อมกับกราวด์รีด 9 แท่ง ยาวแท่งละ 9.2 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0127 เมตร ตะแกรงมีด้านละสี่ช่อง โดยแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวราบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 ฟังลิกลงไปได้ลึกลง 0.5 เมตร ความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบนมีค่า 300 โอห์ม-เมตร และหนา 4.6 เมตร ส่วนความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่างมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม-เมตร

ผลลัพธ์การคำนวณค่าความต้านทานของตะแกรง แรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่ตำแหน่งหัวมุม และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มากที่สุดที่จะเกิดบนตะแกรง เป็นดังนี้

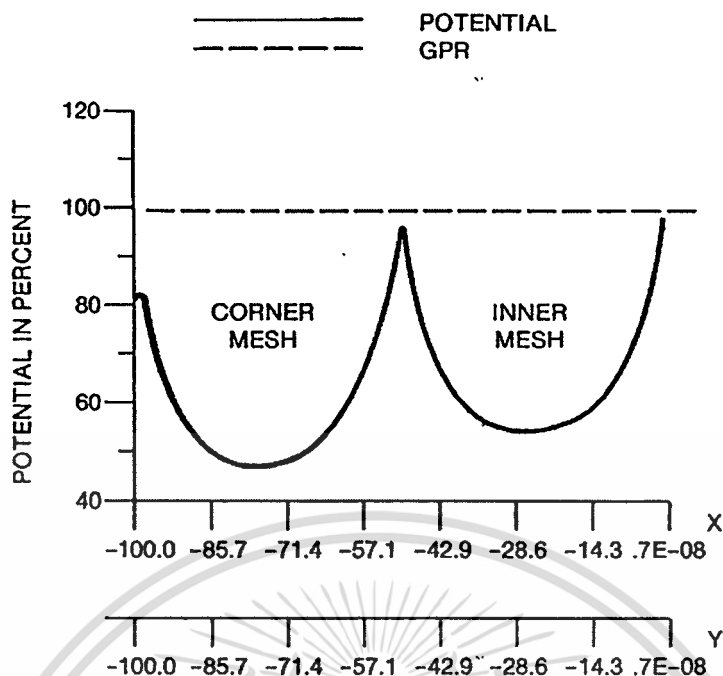
$$R_g = 1.353 \Omega \quad E_m = 49.66\% \text{ ของ GPR} \quad E_s = 18.33\% \text{ ของ GPR}$$

ซึ่งเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดมากที่สุดอยู่ที่ตรงกลางตะแกรง เช่นเดียวกับผลการออกแบบดังหัวข้อที่ 6.1

จากรูปที่ 6.2 แรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่ตำแหน่ง X = -75 ฟุต และ Y = -75 ฟุต เป็นตำแหน่งที่ใกล้จุดศูนย์กลางของตะแกรง แรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มากที่สุด (ไม่ได้แสดง) ถูกคำนวณนอกพื้นที่ตะแกรง ที่พิกัดระหว่าง (X,Y = 100 ft) และพิกัด (X,Y = -102.12 ft) นั่นคือเป็นระยะประมาณ 1 ก้าวจากขอบของตะแกรงทั้งสี่ด้านออกไป



รูปที่ 6.1 ตะแกรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อจัดให้ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน โดยตะแกรงต่อเชื่อมกับกราวด์รีดฝังในดิน 2 ชั้น



รูปที่ 6.2 เส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าสำหรับตะแกรงดังรูปที่ 6.1 ในแบบจำลองดิน 2 ชั้น

### 6.3 ผลการออกแบบจากโปรแกรม EPRI TR-100622 สำหรับตะแกรงต่อลงดินที่จัด

ระยะห่างของแท่งตัวนำไฟฟ้ามีค่าที่ไม่เท่ากัน [1]

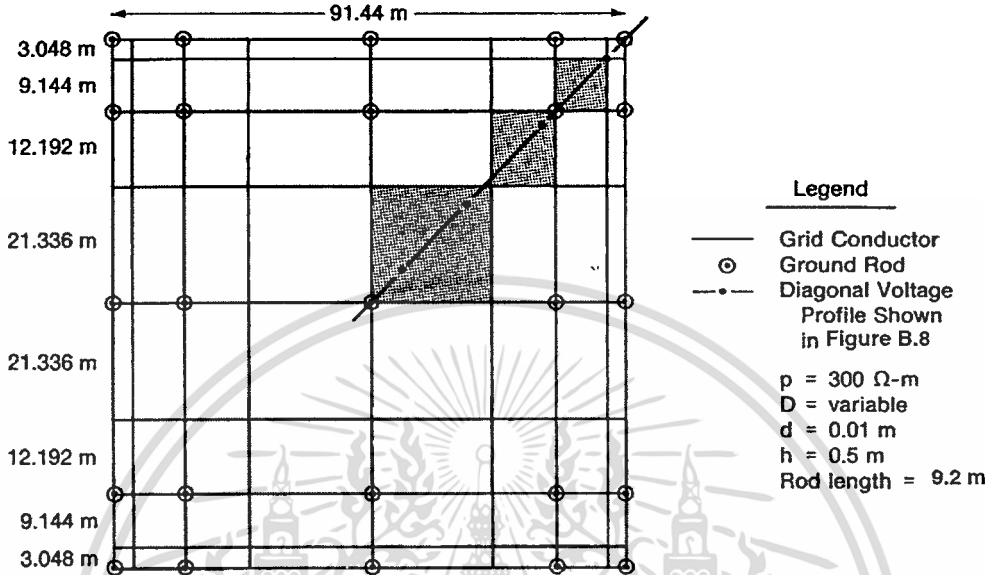
เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 ออกแบบระบบตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Unequally Spaced Grid) ในแบบจำลองดินสองชั้น

ผลลัพธ์การคำนวณค่าความต้านทานของตะแกรง แรงดันไฟฟ้าพื้นผิว แรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่ตำแหน่งหัวมุม และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้ำวที่มากที่สุดที่จะเกิดบนตะแกรง เป็นดังนี้

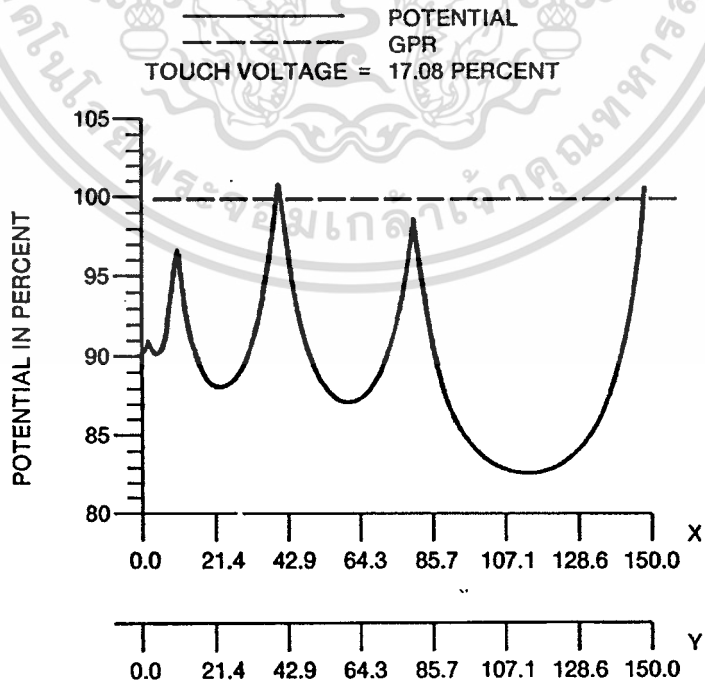
ในรูปที่ 6.3 แรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่ตำแหน่งหัวมุมมีค่า 9.29% ของค่า GPR เท่านั้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุด จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของตะแกรงที่มีขนาดของช่องใหญ่ที่สุด โดยมีค่าประมาณ 17.08% ของ GPR ซึ่งเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดมากที่สุดอยู่ที่ตรงกลางตะแกรง เช่นเดียวกับผลการออกแบบดังหัวข้อที่ 6.1

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดจะไม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งช่องตะแกรงหัวมุม ในกรณีอื่นๆ เช่น ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นบนตะแกรง บางทีเกิดขึ้นบนช่องตะแกรงอื่นๆ ดังนั้นการจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน แรงดันไฟฟ้าสัมผัสจะต้องหาจากทุกตำแหน่งบนตะแกรง และเกณฑ์ง่ายที่สุดสำหรับการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่ตำแหน่งมุมที่เดิวนั้นไม่พอ

ค่าความต้านทานตะแกรงไม่ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดลักษณะรูปร่างตะแกรง ในกรณีนี้  $R_g$  มีค่าเท่ากับ 1.61 โอห์ม เมื่อใช้สมการตาม [1] ค่าตัวเลข ซึ่งสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ EPRI TR-100622 อยู่ประมาณ 14 % ความยาวรวมของตัวนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1876 เมตร



รูปที่ 6.3 ตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างของตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน ต่อเชื่อมกับกราวด์รีด 9.2 เมตร



รูปที่ 6.4 แรงดันไฟฟ้าของตะแกรงต่อลงดินที่มีระยะห่างแห่งตัวนำไฟฟ้าตามรูปที่ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] ANSI-IEEE Standard 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc., New York 2000
- [2] Weimin SUN, Qi SU, Jinliang HE and others, "Optimal Design Analysis of Grounding Grids for Substations Built in Nonuniform Soil," IEEE Journal 2000 ISBN:0-7803-6338-8
- [3] L. Huang, X, Chen, and H. Yan, "Study of unequally spaced grounding grids," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.10, no.2, April 1995, pp.716-722
- [4] F.Dawalibi, D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure, Part I: analytical study," IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.94, no.2, Mar.1995, pp.252-261.
- [5] F.Dawalibi, D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure, Part II: comparison between theoretical and experimental results," IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.94, no.2, Mar.1995, pp.262-266.
- [6] F.Dawalibi, D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in a twolayer earth structure, Part III: Study of Grounding Grids Performance and New Electrode Configuration. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.94, no.2, Mar.1995, pp.267-272
- [7] J.G. Sverak, "Optimized grounding grid design using variable spacing techniques," IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.95, no.1, Jan.1976, pp.362-374
- [8] W.M. Sun, J L. He, R.Zeng, "Influence of seasonal factors on the safety of grounding systems for substations and Power plants," Journal of CESS (in Chinese), Vol.20, no.1, Feb.2000, pp.15-18.
- [9] F. P. Dawalibi, J. Ma, J. He, Q. Meng, 'A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity region',IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.14, No.3, July 1999
- [10] The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, Six Edition.
- [11] IEC 60479-2 (1987-03, Effect of Current passing through human body-Part II: Special aspects)
- [12] Dalziel, C.F., "A Study of the hazards of impulse currents," AIEE Transaction on

- Power Apparatus and Systems, Part III, vol. 72, pp. 132-1043, Oct.1953
- [13] Dalziel, C.F., "Effect of wave form on let-go currents," AIEE Transacron on Power Apparatus and Systems, vol. 62, pp. 739-744, 1943
- [14] China Electrical Power Ministry DL/T621-1997, Grounding of AC electrical equipment. Beijing: China Electrical and Hydraulic Eng. Press, 1998
- [15] Chapman, Stephen J. MATLAB Programming for engineers. 2nd ed, BROOKS/COLE, 2002
- [16] ดร.มนัส สัจวรศิลป์ และวรรรัตน์ ภัทรอมรกุล. 2543. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ : อินโฟเพรส., ISBN 974-8237-91-5.
- [17] การไฟฟ้านครหลวง 2538. กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ.2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจิรพันธ์ ปั้นประไพ
วัน เดือน ปีเกิด	15 กรกฎาคม 2522
ที่อยู่	28 ซอยสุวรรณคี 3 ถนนริมคลองประปา แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทร 0-2587-4683, 0-2910-2797
E-mail	jirapan_adinnovation@yahoo.com, a_d@thailand.com
ประวัติการศึกษา	2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต

### ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1.) ระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย และการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม (Optimal Grounding System Design)
- 2.) พัฒนา และแก้ปัญหาของระบบควบคุมกระบวนการผลิตด้วย PLC SCADA และ DCS
- 3.) ระบบควบคุมอัตโนมัติและการขับเคลื่อน (Automation & Drives) เช่น SIEMENS, MOELLER, Allen-Bradley YOKOKAWA และ OMRON
- 4.) INDUSTRIAL COMMUNICATION APPLICATION เช่น Industrial Ethernet, CONTROL NET, PROFIBUS, AS-Interface
- 5.) ประยุกต์การใช้งาน GUIs ด้วยโปรแกรม MATLAB

### ประสบการณ์ทำงานและการวิจัย

2546-ปัจจุบัน

ตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอ แอนด์ ดี อินโนเวชั่น กรุป จำกัด ตัวแทนจำหน่าย (Authorized Distributor) และผู้รวมระบบ (Authorized System Integrator SI) การควบคุมอัตโนมัติและการขับเคลื่อนที่ได้รับการแต่งตั้งจาก บริษัท โมลเลอร์ อิเล็กทริค (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ซีเมนส์ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2548

ผู้ฝึกอบรม การทำโปรแกรมเพื่อการควบคุมและประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์  
ไฟฟ้าในกลุ่ม Automation ของ SIEMENS และ MOELLER  
บทความวิจัย “การออกแบบระบบการต่อลงดิน โดยใช้เทคนิคการ  
ออกแบบตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้  
โปรแกรม MATLAB”  
วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปี  
ที่ 28 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2548



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้