



ค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้ามนุษย์ในลานไถไฟฟ้าแรงสูงและ
การออกแบบระบบกราวนด์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

EFFECTIVE GROUND RESISTANCE OF THE HUMAN FEET IN HIGH
VOLTAGE SWITCHYARDS AND COMPUTER AIDED DESIGN
FOR GROUNDING SYSTEM



โดย
นายเฉลิมพร เฉลยกิจ

วัน เดือน ปี..... ๑1 ก.ค. ๒5๔๐
เลขทะเบียน..... ๐37052
เลขเรียกหนังสือ..... T ๑๕125 น. 4๘1 ค

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

037052

ปีการศึกษา 2538

ค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้ามนุษย์ในลานไถไฟฟ้าแรงสูงและการออกแบบระบบกราวนด์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

EFFECTIVE GROUND RESISTANCE OF THE HUMAN FEET IN HIGH
VOLTAGE SWITCHYARDS AND COMPUTER AIDED DESIGN
FOR GROUNDING SYSTEM



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศุภี บรรจงจิตร

อ. สมชาติ จีรวินากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

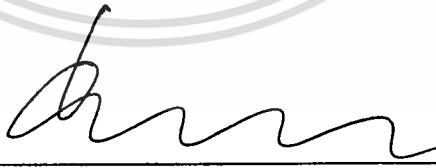
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

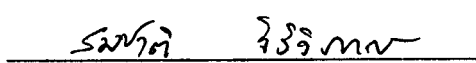
เรื่อง ค่าประสิทธิผลความต้านทานของแท่งมนุษย์ในลานไถไฟฟ้าแรงสูงและการ
ออกแบบระบบกราวด์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผู้จัดทำ

นายเฉลิมพร เฉลยกิจ

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ศุภี บรรจงจิตร)

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. สมชาติ จีรวีภากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(I)

ค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้ามนุษย์ในลานไถไฟฟ้าแรงสูงและการ
ออกแบบระบบกราวด์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

นายเฉลิมพร เฉลยกิจ

รศ.ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.สมชาติ จีรวិภากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

ค่าความต้านทานของเท้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการหากระแสที่ไหลในร่าง
กายมนุษย์ที่ได้รับอันตรายเนื่องจากการสัมผัสอุปกรณ์ในสถานี่ไฟฟ้าอ้อย ค่านี้จะมีการปรับปรุง
โดยความใกล้เคียงกันของเท้าทั้งสองข้างและพลังงานที่ปรากฏของแผ่นกราวด์กริชที่อยู่ใต้เท้าทั้งสอง
วิธีการต่างๆไปในการหาค่าความต้านทานของเท้า และการปรับปรุงปัจจัยทั้งสองที่ได้กล่าวแล้ว
ข้างต้นได้นำเสนอในรายงานฉบับนี้โดยการคำนวณจะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีเทอวินิน วิธีการ
ที่น่าเสนอถูกพิสูจน์ให้เห็นจริงโดย การออกแบบจำลองในการทดสอบซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า
สถานการณ์ต่างๆในทางปฏิบัติส่วนมากแล้ว ผลของค่า Modifying Factor ทั้งสองสามารถที่จะ
ตัดทิ้งได้เลย และสภาวะต่างๆ ซึ่งต้องพิจารณาถึงผลของค่า Modifying Factor ทั้งสองนี้จะถูก
กล่าวถึงในการคำนวณไว้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(II)

EFFECTIVE GROUND RESISTANCE OF THE HUMAN FEET IN HIGH
VOLTAGE SWITCHYARDS AND COMPUTER AIDED DESIGN FOR
GROUNDING SYSTEM

Chalemporn Chaleykit

Assc.Prof. Suree Bunjongjit Advisor

Somchat Jirivibhakorn Advisor

1996

ABSTRACT

The ground resistance of the feet is an important factor that determines the current flow in the body of a person exposed dangerous touch voltage in a high voltages witchyard. It is modified by the proximity of the two feet and the presence of the energized grounding grid below the feet.. Based on the Thevenin approach a general method for determining the effective ground resistance of the feet that takes into account the two above mentioned modifying factors is presented in this paper. The proposed method is verified with the help of analog model study. Results show that in most practical situations the effect of the two modifying factors can be ignored. The situations where it is necessary to consider these factors are also identified.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานทั่วไป	3
2.1 ปัญหาพื้นฐานที่เกิดขึ้นกับระบบต่อลงดิน	3
2.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย	5
2.2.1 ร่างกายมนุษย์	5
2.2.2 กระแสที่ผ่านร่างกายมนุษย์	5
2.2.3 เส้นทางของกระแสที่ผ่านร่างกาย	8
2.2.4 ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติ	9
2.2.5 ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน	11
2.3 ขอบเขตของความปลอดภัย	12
2.4 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า	14
บทที่ 3 ทฤษฎีในการคำนวณ	16
3.1 ค่าความต้านทานของเท้า	16
3.2 การหาค่าความต้านทานของเท้าโดยการวิเคราะห์โดย IEEE Standard-80	17
3.3 การหาค่าความต้านทานของเท้าโดยการวิเคราะห์โดย IMPROVED METHOD	20
3.4 เปรียบเทียบความแตกต่างของฟังก์ชัน $F(X)$ ของการวิเคราะห์โดย IEEE Standard-80 และฟังก์ชัน $H(X)$ และ $G(Y)$ ของการวิเคราะห์โดย IMPROVED METHOD	24
3.5 ความปลอดภัยในสถานีไฟฟ้าย่อยและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	25
3.6 การคำนวณหาสมการค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้าในสถานีไฟฟ้าย่อยขั้นด้านการคำนวณ	27

บทที่ 4	แบบจำลองในการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบ	31
บทที่ 5	โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า	43
บทที่ 5	สรุปผลและวิจารณ์	58
เอกสารอ้างอิง		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(III)

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การสัมผัสแบบแตะต้อง(Touch Contact)	12
รูปที่ 2.2 การสัมผัสแบบย่างก้าว(Step Contact)	13
รูปที่ 3.1 แสดงค่า function $F(X)$ และความหนาของชั้นหินกรวด(h) ที่ค่า K ต่างๆ	19
รูปที่ 3.2 แสดงการวางตำแหน่ง Plate	20
รูปที่ 3.3 แสดงกราฟของ $H(X)$ กับ h สำหรับค่า K ที่ค่าต่างๆ	23
รูปที่ 3.4 แสดงกราฟของ $G(Y)$ กับ h สำหรับค่า K ที่ค่าต่างๆ	24
รูปที่ 4.1 แสดงระบบสถานีไฟฟ้าย่อยจำลอง	32
รูปที่ 4.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบ	40
รูปที่ 4.3 แสดงแผ่นตัวนำเท้ารูปวงกลมและสี่เหลี่ยม	40
รูปที่ 4.4 แสดงแผ่นกราวด์กริชที่ใช้ในการทดสอบ 4 ชนิด	41
รูปที่ 4.5 แสดง Supply และ Volt-meter ที่ทำหน้าที่ควบคุม Voltage	41
รูปที่ 4.6 แสดง Amp-meter 2 ตัวและ Volt-meter 2 ตัวที่ใช้ในการวัด	42
รูปที่ 4.7 การต่อ Junction Box ที่ดัดแปลงมาเป็น Switch	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(IV)

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1-1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	10
ตาราง 3-1 แสดงค่าต่างๆของ $F(X)$, $H(X)$, $G(Y)$ และอัตราส่วนของ $G(Y)/H(X)$	25



บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยทั่วไปจะต้องมีระบบกราวด์ที่ดี ทั้งนี้เพราะในขณะที่เกิดการผิดปกติ เช่น เกิดมีกระแสลัดวงจร (Fault Current) ขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าแล้ว ทุกๆจุดในสถานีไฟฟ้าจะต้องมีความปลอดภัยพอสมควร ซึ่งความปลอดภัยจะเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากระบบกราวด์ที่ออกแบบมาอย่างดีเท่านั้น

โดยปกติระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้าทั่วไปนั้น จะเป็นการนำแท่งตัวนำมาประกอบกันเป็นตะแกรงและประกอบด้วยช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆเรียกว่าเมช (mesh) และตะแกรงนี้จะฝังอยู่ในพื้นดินซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำและมีการโรยหินกรวดที่มีความหนาของชั้นหินกรวดนี้โดยประมาณ 0.25 เมตร ซึ่งชั้นของหินกรวดนี้เป็นชั้นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีชั้นที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงอยู่ใต้เท้าของบุคคล ส่วนของตะแกรงที่ฝังอยู่ภายใต้ดินตามความลึกที่ออกแบบนี้ จะมีสายต่อดินจากอุปกรณ์หรือโครงสร้างต่างๆมาต่อเข้ากับแผ่นระบบต่อลงดินนี้เพื่อประกอบกันเป็นระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นๆ

ในปริญญาโทฉบับนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานของแท่งมนุษย์ในสถานีไฟฟ้าเช่น ความหนาของชั้นหินกรวดและลักษณะของแผ่นกราวด์กริช จำนวนเมชของแผ่นกราวด์กริช โดยทำการออกแบบแบบจำลองในการทดสอบซึ่งจะใช้ทฤษฎีที่จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 และแสดงแบบระบบจำลองสถานีไฟฟ้าที่มีการย่อส่วนลง 10 เท่า และใช้ในการวัดค่าดังจะแสดงการออกแบบและการวัดในบทที่ 4 และในบทที่ 5 จะเป็นการออกแบบระบบต่อลงดินที่มีชั้นเดียวคือชั้นของดินโดยใช้การคำนวณจากคอมพิวเตอร์ ในขณะที่มีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นจะมีศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวดิน (Earth Surface Potential) และศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏที่ตะแกรง (Grid Potential Rise) เป็นสำคัญซึ่งค่าทั้งสองนี้จะนำไปสู่การหาค่าของแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าว (Step Voltage) และค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) ซึ่งค่าแรงดันทั้งสองนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง เพื่อตรวจสอบว่าแบบที่ได้รับมานั้นมีความปลอดภัยจริงหรือไม่ นอกจากนี้ยังมีการคำนวณหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน โดยวิธีการคำนวณและผลจากการคำนวณนี้จะแสดงขนาดความยาวของตัวนำและชนิดอีกทั้งแสดงประสิทธิภาพความปลอดภัยจากการออกแบบนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานทั่วไป

ในการออกแบบและสร้างระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า นอกจากจะต้องคำนึงถึงความมั่นคงคือ ความคงทนต่อแรงทางกลและความร้อนที่เป็นผลมาจากกระแสอันเนื่องมาจากการเกิดความผิดปกติในระบบเช่น ขณะเกิดกระแสลัดวงจรจะทำอย่างไรที่จะกำจัดกระแสส่วนนี้ออกจากระบบให้เร็วและมีประสิทธิภาพดีที่สุด และยังคงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยแก่บุคคลและสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นระบบกราวด์จึงเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากในการพิจารณาออกแบบที่จะละเอียดเสียมิได้ ซึ่งได้มีการค้นคว้าในการออกแบบระบบกราวด์ที่มีความถูกต้องและพัฒนากการออกแบบจนได้แนวทางในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าขึ้น

2.1 ปัญหาพื้นฐานที่เกิดขึ้นกับระบบต่อลงดิน

ภายใต้สภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในสถานีไฟฟ้าแห่งหนึ่งนั้น การไหลของกระแสผิดปกติลงสู่พื้นดิน (Ground Fault Current) โดยผ่านระบบที่ต่อลงดินจะมีผลทำให้เกิดแกระเดียนของศักดาไฟฟ้าขึ้นภายในและรอบๆสถานีไฟฟ้า ดังนั้นถ้าระบบต่อลงดินนั้นไม่ได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้อง แกระเดียนของศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของบริเวณที่ถูกครอบคลุมโดยตะแกรงต่อลงดินนั้นอาจมีค่าสูงเกินไปจนเกิดอันตรายต่อบุคคลที่อยู่ในบริเวณนั้นได้ ค่าความต่างศักย์ที่เป็นอันตรายจะเกิดขึ้นระหว่างโครงสร้างหรือโครงของอุปกรณ์ซึ่ง ถูกต่อลงดินกับพื้นดินบริเวณใกล้เคียงและรอบๆบริเวณสถานีไฟฟ้า นั้น หรืออาจเกิดระหว่างจุดสองจุดใดๆบนพื้นผิวดินภายในสถานีไฟฟ้านั้นๆซึ่งอาจมีเท้าของบุคคลนั้นสัมผัสอยู่ ในทางตรงกันข้ามนั้นถ้าระบบต่อลงดินออกแบบมาอย่างถูกต้องก็จะสามารถป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากความต่างศักย์เหล่านั้นได้

ที่ผ่านๆมาในอดีตบุคคลจำนวนมากคิดว่าวัตถุใดๆก็แล้วแต่ เมื่อมีการต่อลงดินแล้วจะสามารถสัมผัสได้อย่างปลอดภัย ความเข้าใจที่ผิดนี้เป็นเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุต่อบุคคลและถึงแก่ชีวิตมาแล้วเป็นจำนวนมาก แต่ในปัจจุบันปัญหานี้ได้นำไปสู่การค้นหาสาเหตุที่ทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุบัติเหตุเหล่านั้นว่าเกิดขึ้นมาเนื่องจากอะไร และจากการอาศัยข้อมูลและความรู้ใหม่ๆ จำนวนมากทำให้สามารถหาสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ซึ่งสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้คือ

1. การมีกระแสไฟฟ้าค่านสูงไหลสู่ดิน เมื่อเทียบกับขนาดของระบบต่อลงดินที่มีอยู่ และความต้านทานจำเพาะของพื้นดินในบริเวณนั้น

2. ค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดินมีค่าค่อนข้างสูง และการกระจายของกระแสลงสู่พื้นดินมีค่าต่ำ เป็นเหตุทำให้เกิดแรงดันของศักดาไฟฟ้าขึ้นสูงมากในบางจุดหรือหลายๆจุดบนพื้นบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย

3. มีส่วนของร่างกายของคนทำหน้าที่เป็นสะพานไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างจุดสองจุด ที่ตำแหน่งหนึ่งๆ ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งมีค่าความต่างศักย์ที่มีค่าค่อนข้างสูงคร่อมอยู่ระหว่างจุดสองจุดนั้น

4. การไม่มีหรือมีค่าความต้านทานสัมผัส (Contact Resistance) เนื่องจากผู้สัมผัสไม่ได้มีการใช้อุปกรณ์ป้องกันเบื้องต้นเช่น ถุงมือ รองเท้าที่เป็นฉนวนที่ห่อหุ้มเท้าอย่างดีหรือเครื่องแบบที่รัดกุม ทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าไม่เพียงพอที่จะจำกัดกระแสที่ผ่านร่างกายให้มีค่าที่ปลอดภัยในสภาวะที่เกิดมีความผิดปกติขึ้น

5. ช่วงเวลาที่มีการเกิดความผิดปกติและการไหลของกระแสผ่านร่างกายทางจุดสัมผัสทั้งสองดังกล่าวนั้นเป็นเวลายาวนานเกินกว่าที่ร่างกายของบุคคลจะทนทานได้ การที่เกิดความผิดปกติที่ยาวนานอาจเกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์อาจมีความผิดปกติทำให้ใช้เวลาในการทรีฟานาน หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตรวจพบความผิดปกติได้ ที่กล่าวมานี้พอที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายขึ้นเนื่องจากระดับความเข้มของกระแสตามที่ได้กำหนด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นนั้นอาจจะพิจารณาได้ในแง่ที่เป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยนั่นเอง แต่ปัญหาที่สำคัญในการที่จะลดอุบัติเหตุที่เป็นอันตรายต่อคน ลงให้ได้มากที่สุดก็คือการพยายามที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติให้ลดลงไปอย่างรวดเร็วที่สุด ซึ่งก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง

มีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยเหล่านั้นเป็นสำคัญ

2.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัย

สำหรับองค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยนั้นจะกล่าวรวมๆเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2.1 ร่างกายของมนุษย์

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคของการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องตะแกรงต่อลงดินในแง่ของความปลอดภัยต่อบุคคลนั้น จำเป็นจะต้องเข้าใจถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของส่วนที่สำคัญที่สุดของวงจรก็คือร่างกายของมนุษย์นั่นเอง เนื่องจากว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดอาการช็อค ร่างกายของเราเป็นความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ตามสภาวะแวดล้อมและมีค่าที่ต่างกันทุกๆคน ซึ่งในการทดสอบที่ผ่านมาในอดีต เพื่อที่จะหาค่าความต้านทานต่ำสุดของร่างกายคนเรานั้นมีค่าตั้งแต่ 400-600 โอห์ม แต่เมื่อวัดความต้านทานทั้งหมดจากมือหนึ่งไปอีกมือหนึ่งจะมีค่าประมาณ 2300 โอห์ม และเมื่อวัดจากมือถึงเท้าจะมีค่าประมาณ 1100 โอห์ม เพื่อความเป็นแบบแผนเดียวกัน ดังนั้น IEEE STANDARD 80-1976 แนะนำให้ใช้ค่าความต้านทาน 1000 โอห์ม โดยประมาณสำหรับค่าความต้านทานของมนุษย์

ในสภาพที่เป็นจริงนั้นค่าความต้านทานที่ผิวหนังหรือจุดสัมผัสเป็นตัวการสำคัญที่จำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ว่าการสัมผัสจะผ่านอวัยวะส่วนใด ดังนั้นสภาพของผิวหนังบริเวณจุดสัมผัสจะมีผลโดยตรงต่ออันตรายที่จะเกิดขึ้น เช่น ผิวหนังที่เปียกชื้นจะมีโอกาสเกิดอันตรายได้ง่ายและรุนแรงกว่าที่ผิวหนังที่แห้งสนิท

2.2.2 กระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (Body Current)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ที่เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดอาการช็อคซึ่งเป็นอุบัติเหตุที่อาจจะเป็นอันตรายถึงกับเสียชีวิตได้ความรุนแรงของอุบัติเหตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้จะขึ้นอยู่กับค่า ความถี่ ขนาดและช่วงเวลาของกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่ที่สำคัญของร่างกาย ซึ่งจะแยกกันพิจารณาดังต่อไปนี้

- ความถี่

ที่ความถี่ 50 Hz นี้ค่าความต้านทานของร่างกายจะเป็นความต้านทานชนิด resistive แต่เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น ความต้านทานของร่างกายจะเริ่มทำหน้าที่คล้ายวงจร R-C ซึ่งมีผลให้ความต้านทานของร่างกายต่อกระแสไฟฟ้าจะลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ความต้านทานที่จุดสัมผัสต่ำลงมากอีกด้วย

- ขนาดของกระแส

ขนาดของกระแสจะมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการโต้ตอบของร่างกายมนุษย์และอันตรายที่จะอาจเกิดขึ้นกับร่างกายของคนเราที่ขนาดกระแสระดับต่างๆกัน

- ระยะเวลาการถูกไฟฟ้าช็อค

ระยะเวลาในการถูกไฟฟ้าช็อคจะเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญมากอันหนึ่งในการที่จะกำหนดขนาดของกระแสที่ร่างกายสามารถทนได้ในช่วงเวลานั้นๆ โดยไม่เกิดอันตรายต่อร่างกาย กล่าวคือร่างกายของคนเราสามารถจะทนกระแสสูงมากๆได้เป็นระยะเวลายาวๆ แต่ในทางตรงกันข้ามร่างกายมนุษย์จะทนกระแสได้น้อยลงเมื่อระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายมีค่ามากขึ้น สมการของ Dalziel ได้แสดงให้เห็นว่า 99.5% ของคนปกติทั่วไป สามารถจะทนกระแสที่ไหลผ่านหัวใจซึ่งกำหนดได้โดยสมการต่อไปนี้

$$I_b = \frac{0.016}{\sqrt{T}} \quad (2.1)$$

โดยที่

I_b คือ กระแสที่ไหลผ่านร่างกายได้มากที่สุด (Maximum Body Current) หน่วย แอมแปร์

T คือ ช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย หน่วย วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในการกำจัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น โดยปกติแล้วมักจะเลือกใช้ค่า Clearing Time ของ Regular High Speed Relay

นอกจากนี้ช่วงเวลาดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงผลของการ Reclosure หลังการเกิดความผิดปกติด้วยถ้ามีอุปกรณ์ Reclosure อยู่ภายในระบบนั้น ทั้งนี้ก็เพราะเนื่องจากการทำงานของหัวใจต้องใช้เวลาประมาณ 5 นาที จึงจะกลับคืนภาวะปกติภายหลังจากประสบกับอาการช็อคอย่างรุนแรง นั่นก็หมายความว่าถ้ามีการทำงานของ Reclosure การช็อคที่มีระยะห่างไกลๆกัน จะเสมือนกับการช็อคเพียงครั้งเดียว ซึ่งมีระยะเวลาเท่ากับผลรวมของระยะเวลาของการช็อคแต่ละครั้ง

ข้อมูลแสดงผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร่างกาย

1. ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 0.7 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด ไม่มีผลต่อร่างกาย ร่างกายไม่รับรู้ปริมาณกระแสขนาดนี้

2. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.7 - 2 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด เกิดความรู้สึกจุกจิก

3. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 - 8 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท เจ็บปวดอย่างรุนแรงเกิดอาการช็อคที่ไม่ถึงขั้นอันตราย

4. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 8-20 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท ไม่สามารถควบคุมการแบมือหรือกำมือเนื่องจากการหดตัวของกล้ามเนื้อได้ ถ้าถูกกระแสขนาด 20 มิลลิแอมแปร์โดยทันทีทันใดจะได้รับอันตรายจากการเกิดกล้ามเนื้อฉีก

5. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 20-50 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาทคือ กล้ามเนื้อหน้าอกหดตัวอย่างรุนแรงและมีอากาศขบอบอยู่ในปอดมากผิดปกติทำให้ปอดทำงานไม่เต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถปล่อยมือออกมาได้ เกิดของเสียขึ้นที่ในกระแสโลหิตมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางผิดปกติขึ้นในเซลล์สมอง ทำให้สั้นชีวิตในเวลาเพียง 2 ถึง 3 นาที

6. ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50-1,000 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด มีผลกระทบกระเทือนต่อระบบประสาท หัวใจเริ่มต้นในลักษณะไม่ค่อยประสานงานกันคือ ไม่เป็นจังหวะตามปกติมีผลให้การหมุนเวียนโลหิตหยุดลงแม้ใช้เวลาแค่ 0.1 วินาที ถ้ากระแสผ่านร่างกายมากกว่า 1 วินาทีหรือถ้า นานกว่านั้นทำให้หัวใจสูบฉีดเลือดไม่ได้

7. ปริมาณกระแสไฟฟ้ามากกว่า 1,000 มิลลิแอมแปร์

ผลที่เกิด เนื้อเยื่อไหม้อย่างรุนแรงอย่างรวดเร็วและมีโอกาสเสียชีวิตอย่างทันทีทันใดอย่างมาก ถ้ามีโอกาสรอดต้องมีการดูแลรักษาจากแพทย์อย่างดี โดยให้ดื่ม Sodium Bicarbonate แต่ส่วนใหญ่ไม่ค่อยรอดเพราะภายในจะเกิดการรวมตัวของมายโอโกลบิน ทำให้มีเมือกทั้งร่างกายทำให้กล้ามเนื้อตาย

2.2.3 เส้นทางของกระแสที่ผ่านร่างกาย

โดยธรรมชาติแล้วกระแสไฟฟ้าจะเลือกไหลไปตามเส้นทางที่สะดวกที่สุด เช่นเดียวกันสำหรับกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของคนเรา กระแสก็จะเลือกเส้นทางที่จะลงสู่ดินสะดวกที่สุด ซึ่งการไหลของกระแสไฟฟ้าส่วนมากจะผ่านส่วนต่างๆของร่างกาย ซึ่งประกอบด้วยอวัยวะที่สำคัญต่างๆรวมทั้งหัวใจด้วย เส้นทางกรไหลของกระแสผ่านร่างกายของคนเรานั้นมีได้หลายทิศทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดสัมผัสของร่างกายกับบริเวณที่ความต่างศักย์เกิดขึ้น ซึ่งแต่ละเส้นทางนั้นก็จะมีผลอันตรายจากกระแสที่ไหลผ่านนั้นไม่เท่ากัน เนื่องจากการที่มีกระแสไหลผ่านในปริมาณที่ต่างกันเช่น เส้นทางที่กระแสไหลจากมือสู่มือ หรือมือสู่ขาทั้งสองจะมีอันตรายมากกว่ากระแสที่ไหลจากขาสู่ขา ซึ่งทั้งนี้มีการทดสอบในอดีตที่ผ่านมาเป็นที่ยืนยันว่า กระแสผิดปกติที่ต้องการในการทำให้เกิดกระแสขนาดเท่ากันผ่านบริเวณหัวใจสำหรับเส้นทางของขาสู่ขา จะมากกว่าสำหรับมือสู่ขา หรือในอีกแง่หนึ่งก็คือ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากมือสู่ขาในปริมาณที่

สูงกว่าการไหลจากขาสู่ขากายใต้สภาวะผิดปกติอันเดียวกัน

2.2.4 คัดดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเกิดความผิดปกติ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าคัดดาไฟฟ้าที่จุดใดๆบนพื้นผิวดินภายในและรอบๆสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสผิดปกติที่ไหลลงสู่พื้นดินโดยผ่านทางแผ่นรองต่อลงดิน ดังนั้นถ้ามีส่วนของร่างกายของคนเป็นสะพานไฟต่อเชื่อมระหว่างจุดสองจุดใดๆ ซึ่งอาจจะเป็นโครงสร้างหรือโครงของอุปกรณ์ที่ถูกต่อลงดินกับพื้นดินบริเวณใกล้เคียงที่คนยืนอยู่ หรืออาจเป็นจุดสองจุดใดๆซึ่งอยู่บนพื้นดินได้เท่าทั้งสองของคนๆนั้น คัดดาไฟฟ้าที่จุดสองจุดดังกล่าว นั้นจะเป็นต้นเหตุให้เกิดความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าคร่อมตัวคนๆนั้นอยู่ได้ ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านร่างกายซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้นั้นได้ ขนาดของกระแสจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ดังกล่าวว่าเกิดขึ้นมากหรือน้อย และความต่างศักย์นี้ก็ขึ้นโดยตรงกับค่าคัดดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะมุ่งความสนใจเริ่มแรกไปที่คัดดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวเสียก่อน

คัดดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบริเวณพื้นผิวดินนั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่างด้วยกัน คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน กระแสผิดปกติลงสู่ดินที่อาจเกิดขึ้นได้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งแยกพิจารณาออกเป็นส่วนๆดังต่อไปนี้

- ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ground Resistivity)

ความต้านทานจำเพาะของดินภายในบริเวณที่ตั้งของสถานีไฟฟ้านั้น จะมีความสำคัญต่อการกระจายของกระแสผิดปกติ และกระแสจะกระจายออกสู่พื้นดินบริเวณรอบๆตัวนำของตะแกรงต่อลงดินอย่างมาก ถ้าพื้นดินบริเวณนั้นมีความต้านทานจำเพาะต่ำ กระแสผิดปกติจะกระจายออกสู่พื้นดินภายในพื้นผิวดินมีค่าสูง แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าพื้นดินบริเวณนั้นมีความต้านทานจำเพาะสูง กระแสผิดปกติจะกระจายออกสู่พื้นดินมีค่าต่ำ ซึ่งมีผลให้คัดดาไฟฟ้าที่จุดต่างๆภายในพื้นผิวดินมีค่าสูงมากด้วย ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในพื้นที่หนึ่งๆมักจะมีค่าไม่แน่นอน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดิน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นของดิน อุณหภูมิของดินและสารเคมีที่เจือปนอยู่ในดินเป็นต้น สำหรับค่าความต้านทานของดินและหินชนิดต่างๆแสดงตัวอย่างในตารางที่ 1-1

REPRESENTATIVE VALUES OF SOIL RESISTIVITIES	
TYPE OF GROUND	RESISTIVITY IN OHM-METERS
wet organic soil	10
moist soil	10^2
dry soil	10^3
bed rock	10^4

ตารางที่ 1-1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

สำหรับการคำนวณหาค่าศักดาไฟฟ้าที่จุดต่างๆภายในพื้นดินนี้ มักจะพิจารณาให้พื้นดินนั้นเป็นเนื้อเดียวกันตลอด คือมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากันตลอดเนื้อดินนั่นเอง ซึ่งก็ตรงกับคุณสมบัติของพื้นดินทั่วไป แต่ในบางสภาพพื้นดินนั้นอาจจะมีลักษณะที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันตลอด คือภายในพื้นดินนั้นมีความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันออกไป ซึ่งพื้นดินในลักษณะนี้จะถูกพิจารณาให้มีโครงสร้างที่พิเศษออกไป ในลักษณะของโครงสร้างพื้นดินแบบหลายชั้น

- กระแสผิดปกติ (Fault Current)

กระแสผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นได้นี้ ก็เป็นองค์ประกอบที่มีผลโดยตรงต่อศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น คือถ้าขนาดของกระแสอันนี้สูงมาก ก็ย่อมจะทำให้ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวสูงขึ้นมาเช่นกัน การหาขนาดของกระแสผิดปกติสำหรับการต่อระบบตะแกรงลงดินหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{3V}{3Rg + (R1 + R2 + R0) + j(X1 + X2 + X0)} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

- I คือ ขนาดของกระแสผิดปกติสูงสุด (Amp)
- V คือ Phase to Neutral Voltage (Volts)
- R_g คือ Grid Resistance to Earth (Ohm)
- R_2 คือ Negative Sequence System Resistance (Ohm)
- R_1 คือ Positive Sequence System Resistance (Ohm)
- R_0 คือ Zero Sequence Faultpath Resistance (Ohm)
- X_2 คือ Negative Sequence System Reactance (Ohm)
- X_1 คือ Positive Sequence System Reactance (Ohm)
- X_0 คือ Zero Sequence Faultpath Reactance (Ohm)

ในการประมาณค่ากระแสดังกล่าวจะต้องนำเอาการขยายตัวของระบบในอนาคตเข้ามาพิจารณาด้วย

- รูปทรงเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดิน

ศักดาไฟฟ้าที่จุดใดๆ นอกจากจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังกล่าวมาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของตะแกรงต่อลงดินซึ่งรวมไปถึงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำและระยะห่างระหว่างตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็นตะแกรงต่อลงดิน ความลึกในการฝังตัวนำ การกระจายของกระแสตลอดตะแกรงต่อลงดิน และตำแหน่งที่กระแสไหลลงสู่ตะแกรงต่อลงดินเป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ จะถูกนำมาใช้ควบคุมศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ ภายในและรอบๆ สถานีไฟฟ้าย่อย และให้อยู่ในขอบเขตที่จะไม่ทำให้เกิดความต่างศักย์เกินค่าที่ร่างกายคนเราจะสามารถทนได้ในทางปฏิบัติการคำนวณค่าศักดาไฟฟ้า และองค์ประกอบบางอย่างที่กล่าวถึงข้างต้นอาจถูกละเลยไปจากการพิจารณาได้โดยที่ทำให้ค่าที่ได้มาไม่ผิดไปเท่าไรนัก

2.2.5 ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดิน

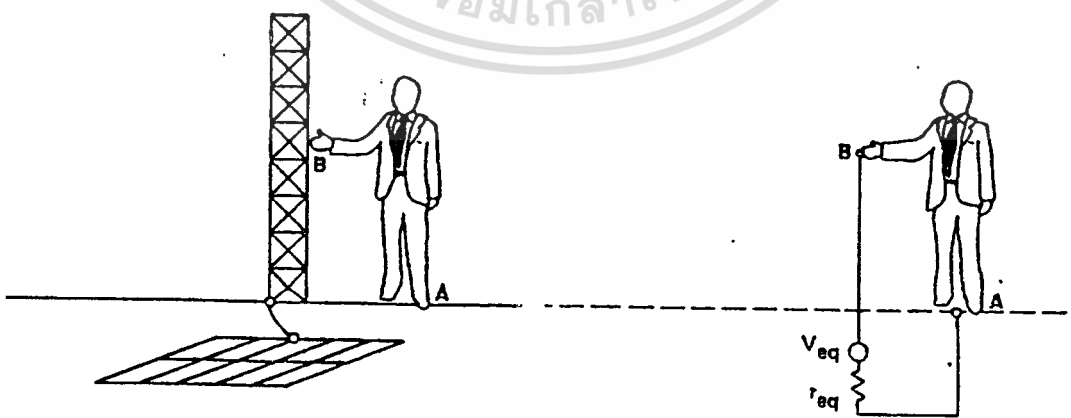
ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินนั้น จะถูกมองในแง่ของการวัดความสามารถของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะแกรงต่อลงดิน ในการกระจายของกระแสผิดปกติลงสู่พื้นดิน ความต้านทานอันนี้ไม่ได้เป็นตัวกำหนดความปลอดภัยในสถานะไฟฟ้าโดยตรง การที่ความต้านทานของระบบต่อลงดินอันนี้มีค่าต่ำมากก็ไม่จำเป็นว่าต้องปลอดภัยเสมอไป ในทางตรงกันข้ามสถานะไฟฟ้าที่มีความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินสูง ก็อาจจะทำให้ปลอดภัยได้โดยการออกแบบระบบต่อลงดินอย่างระมัดระวังและถูกต้องตามข้อกำหนด ความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินจะสามารถใช้ยืนยันความปลอดภัยได้ก็ต่อเมื่อมีค่าต่ำจนกระทั่งกระแสผิดปกติสูงสุดไหลผ่านตัวตะแกรงต่อลงดินนี้ไม่ทำให้เกิดการเพิ่มของค่าความต่างศักย์จนถึงค่าที่เป็นอันตรายต่อคน

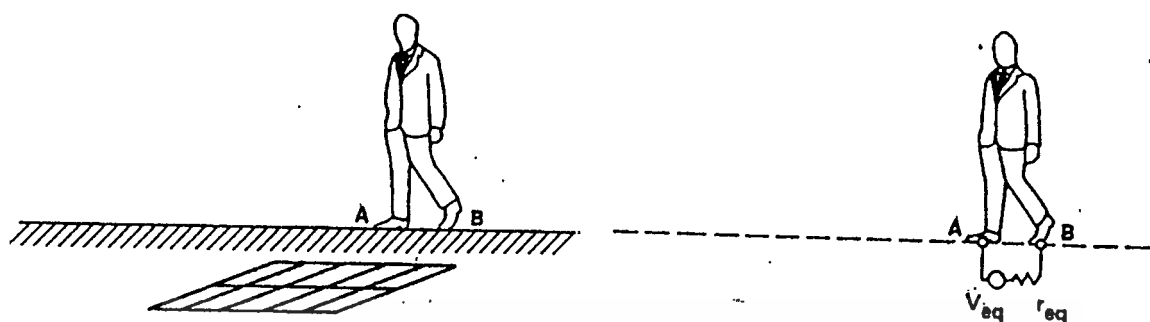
2.3 ขอบเขตของความปลอดภัย

องค์ประกอบที่มีผลต่อความปลอดภัยที่ได้กล่าวผ่านไปแล้วนั้น บางส่วนจะถูกนำมาใช้ช่วยในการกำหนดขอบเขตของความปลอดภัย สำหรับการกำหนดขอบเขตความปลอดภัยนั้น องค์ประกอบที่จะนำมาใช้ช่วยในการกำหนดขอบเขตจะประกอบด้วยกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน เส้นทางการไหลของกระแสหรือลักษณะการสัมผัสกับจุดสองจุดใดที่มีศักดาไฟฟ้าอยู่ วงจรความต้านทานที่มีคนเป็นส่วนประกอบและความต้านทานจำเพาะของดิน ถ้าเราพิจารณาตามรูปที่ 2.1 และ 2.2 จะเป็นลักษณะการสัมผัสซึ่งทำให้เกิดการช็อกที่อาจจะเกิดอันตรายขึ้นได้มากสองลักษณะและแผนผังวงจรความต้านทานสมมูลย์ของการสัมผัสแต่ละลักษณะ



รูปที่ 2.1 การสัมผัสแบบแตะต้อง (Touch Contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การสัมผัสแบบย่างก้าว (Step Contact)

รูปที่ 2.1 เป็นลักษณะการสัมผัสแบบ touch contact ซึ่งในลักษณะเช่นนี้กระแสจะไหลจากส่วนของมือที่สัมผัสอยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ถูกต่อลงดินไปยังขาทั้งสองข้างที่ยืนอยู่บนผิวดิน

รูปที่ 2.2 เป็นลักษณะการสัมผัสแบบ step contact ซึ่งในลักษณะเช่นนี้กระแสจะไหลจากขาข้างหนึ่งไปยังขาอีกข้างหนึ่ง ซึ่งยืนอยู่บนผิวดินโดยระยะระหว่างจุดที่เท้าทั้งสองสัมผัสอยู่บนผิวดินมักจะกำหนดให้มีค่าเป็น 1 เมตร

ในแต่ละกรณีดังกล่าวกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนจะถูกขับโดยความต่างศักย์ระหว่างจุด A และจุด B

ปกติเท้าของคนเราที่สัมผัสอยู่กับพื้นดินนั้นจะเสมือนกับเป็นขั้วต่อดินที่เป็นวงกลมมีความต้านทานจำเพาะประมาณ $3\rho_s$ ลักษณะของเท้าที่ขนานกันจะมีความต้านทานประมาณ $1.5\rho_s$ และอนุกรมกันจะมีค่าประมาณ $6\rho_s$ ดังนั้นวงจรความต้านทานที่มีส่วนร่างกายเป็นส่วนประกอบสำหรับการสัมผัสแต่ละลักษณะคือ

$$\text{สำหรับการสัมผัสแบบ touch } R = 1000 + 1.5\rho_s \quad (2.3)$$

$$\text{สำหรับการสัมผัสแบบ step } R = 1000 + 6\rho_s \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดิน หน่วย โอห์ม-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสัมผัสในแต่ละลักษณะกระแสที่ร่างกายคนสามารถที่จะทนได้นั้นกำหนดได้จากสมการที่(2.1) แต่เนื่องจากว่าความต่างศักย์ง่ายต่อการคำนวณและการวัดมากกว่ากระแสและจากที่เราทราบถึงวงจรความต้านทานของลักษณะการสัมผัสทั้งสองนั้นทำให้เราสะดวกที่จะกำหนดขอบเขตของความปลอดภัยในรูปความต่างศักย์ดังนี้คือ

ความต่างศักย์หรือแรงดันอย่างก้าวสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้ (Maximum Tolerable Step Voltage)

$$E_{\text{step}} = (1000 + 6\rho_s) \frac{0.016}{\sqrt{T}} \quad (2.5)$$

ความต่างศักย์หรือแรงดันสัมผัสสูงสุดที่ร่างกายสามารถทนได้ (Maximum Tolerable Touch Voltage)

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1.5\rho_s) \frac{0.016}{\sqrt{T}} \quad (2.6)$$

โดยปกติค่า E_{step} จะมีค่าสูงกว่า E_{touch} นั่นคือการสัมผัสแบบ step จะเกิดอันตรายน้อยกว่าแบบ touch นอกจากนี้ถ้าพื้นผิวของสถานีถูกโรยด้วยหินกรวดหรือสารอื่น ๆ ที่มีความต้านทานจำเพาะปนอยู่ ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นหินนี้ควรนำมาคำนวณหาขอบเขตความปลอดภัยตามสมการที่ (2.5) และ (2.6) ซึ่งมีผลให้ความปลอดภัยมีค่าสูงขึ้นด้วย

2.4 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

ก่อนที่จะมีการพิจารณาเกี่ยวกับความปลอดภัยในสถานีไฟฟ้าขณะที่เกิดความผิดปกติเราจำเป็นต้องมีการหาข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นเสียก่อน โดยสรุปแล้วข้อมูลที่จำเป็นจะต้องทราบมีดังนี้

1. ความต้านทานจำเพาะของดิน ทั้งที่พื้นผิวและที่ระดับความลึกที่ตะแกรงต่อลงดินนั้นถูกฝังอยู่
2. ความต้านทานจำเพาะของพื้นผิวพิเศษที่ปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิวดิน
3. ช่วงเวลาประมาณของการเกิดความผิดปกติลงสู่ดิน (GROUND FAULT DURATION)
4. ความถี่ระบบไฟฟ้า
5. X / R Ratio ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ค่า Symmetrical Ground Fault Current สูงสุดในปัจจุบันและต่อไปในอนาคต
7. แบบของตะแกรงต่อลงดิน ซึ่งแสดงถึงขนาดของตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ และระดับความลึกที่แน่นอนในการฝังตัวนำ
8. พิกัดตำแหน่งที่จะคำนวณหาศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ตะแกรงต่อลงดิน
นอกจากนี้จะต้องมีการคำนวณขอบเขตความปลอดภัยตามสมการที่ (2.5) และ (2.6)
เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันสัมผัสและแรงดันย่างก้าวเพื่อพิจารณาถึงความปลอดภัย
ในสถานีไฟฟ้านั้นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีในการคำนวณหาค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้า

3.1 ค่าความต้านทานของเท้า(Ground Resistance of Foot)

ในการออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าอ่อนนั้น สำหรับความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าอ่อนแล้ว ความต้านทานของระบบกราวด์สถานีไฟฟ้าอ่อนควรมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานของเท้ามาก ค่าความต้านทานของระบบกราวด์เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากในการประเมินค่าความปลอดภัยสำหรับบุคคลที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าอ่อนอันเนื่องมาจากผลของการเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งการเกิดความผิดปกตินี้เป็นค่าที่กำหนดค่าของค่าโวลต์เตจสัมผัส(Touch Voltage) และโวลต์เตจย่างก้าว(Step Voltage) ในการวิเคราะห์จะแทนลักษณะของเท้าด้วยแผ่นตัวนำโลหะรูปวงกลม

การแทนด้วยแผ่นตัวนำโลหะวงกลมแทนเท้าในการวิเคราะห์แบบนี้จะใช้แผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี b เมตรวางตัวในแนวระนาบขนานกับพื้นดิน และมีค่าความต้านทานของเท้าที่แทนด้วยแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี b เมตร สมมติให้แผ่นวางอยู่บนพื้นดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวและมีค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดิน(Homogeneous Earth of Resistivity ; ρ_s) มีค่าคงที่และแสดงได้ดังสมการ

$$R_f = \frac{\rho_s}{4b} \quad (3.1)$$

เมื่อ R_f คือ ค่าความต้านทานของเท้า(Ground Resistance of foot) หน่วย โอห์ม

ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดินที่มีลักษณะเนื้อเดียว(Homogeneous Earth of Resistivity) หน่วย โอห์ม-เมตร

b คือ รัศมีของแผ่นตัวนำทรงกลมที่ใช้แทนเท้าในการทดลอง หน่วย เมตร

แผ่นตัวนำที่ใช้ในการวิเคราะห์จะใช้แผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี 0.08 เมตร จะได้ค่าความต้านทานของเท้า(R_f) คือ

$$R_f = 3\rho_s \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.2) พบว่าค่าความต้านทานของเท้าจะมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทาน
จำเพาะของดิน

ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ปฏิบัติงานกันอยู่ทั่วไปแล้ว ระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น
จะเป็นการนำแท่งโลหะตัวนำมาประกอบกันเป็นตะแกรงสี่เหลี่ยมประกอบด้วยส่วนย่อยๆ
จำนวนมากเรียกว่าเมช (mesh) และบางแห่งอาจจะมีการประกอบแท่งต่อลงดิน (ground rod)
และระบบกราวด์นี้จะฝังอยู่ใต้ดินโดยมีสายเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆภายในสถานีไฟฟ้าลงมา
ที่ระบบกราวด์ ที่เหนือผิวดินจะมีชั้นของหินที่ประกอบด้วยกรวดหินที่แตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย
โรยอยู่บนผิวดินทั่วตลอดสถานีไฟฟ้าย่อย โดยชั้นของหินนี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาระบบ
กราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยด้วย และชั้นของหินกรวดที่โรยอยู่บนผิวดินในสถานีไฟฟ้าย่อยนี้
จะเป็นชั้นที่มีค่าความต้านทานค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีชั้นที่มีค่าความต้านทานสูงอยู่ใต้เท้าของ
บุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

3.2 การหาค่าความต้านทานของเท้าโดยการวิเคราะห์ของ IEEE Standard-80

เท้าของบุคคลที่ยืนอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยตามความเป็นจริงแล้วจะยืนอยู่บนชั้นของ
กรวด ไม่ได้ยืนอยู่บนพื้นดินตามที่สมการที่ (3.1) กำหนดไว้ ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทาน
ของเท้าที่ได้จากสมการที่ (3.1) มีค่าไม่ค้อยถูกต้องนัก ปกติแล้วความหนาของชั้นหินกรวดที่
โรยอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีความหนาของชั้นหินประมาณ 8 - 20 เซนติเมตร และจะเห็นได้
ว่าชั้นหินกรวดนี้ไม่มีความหนาพอที่จะประมาณค่าได้ว่า ชั้นหินมีลักษณะเป็นชั้นเดียวกันที่อยู่
ในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นโลก (Vertical - Axis) และเมื่อพิจารณาโดยให้ชั้นหินมีลักษณะบางอย่างอยู่
เหนือพื้นดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่ำกว่า จะทำให้ค่าความต้านทานของเท้ามีค่าน้อย
กว่าค่าที่ได้จากสมการที่ (3.2) เพราะในสมการที่ (3.2) นั้นใช้ในกรณีที่เท้าคนยืนอยู่บนพื้นที่
มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นในการหาค่าความต้านทานของเท้าในสถานีไฟฟ้าในกรณีนี้
จะพิจารณารวมถึงเรื่องของความหนาของชั้นหินที่บางๆไว้ด้วย โดยที่ IEEE Standard-80 ได้
แสดงในการหาค่าความต้านทานของเท้าที่ถูกต้องกว่าในสมการที่ (3.2) โดยสมการของ IEEE
Standard-80 นี้จะมีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายในการหาค่าความต้านทานของเท้าใน

สถานีไฟฟ้าย่อยแต่ก็ยังมีค่าที่ผิดพลาดมาก เมื่อกำหนดให้ความหนาของชั้นหินมีค่าน้อยมาก และอัตราส่วนของค่าความต้านทานจำเพาะระหว่างชั้นหินต่อชั้นดินที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยมีค่ามาก สมการของ IEEE Standard-80 ในการหาค่าความต้านทานของเท้าในสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีชั้นหินกรวดอยู่ข้างบนและชั้นดินอยู่ข้างล่างตามสมการ

$$R_f = (\rho_s/4b)FX \quad (3.3)$$

$$FX = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad (3.4)$$

$$Q = K^n / [1 + (2nX)^2]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s) \quad (3.6)$$

เมื่อ

ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นหินกรวด หน่วย โอห์ม-เมตร(Ω -m)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน หน่วย โอห์ม-เมตร(Ω -m)

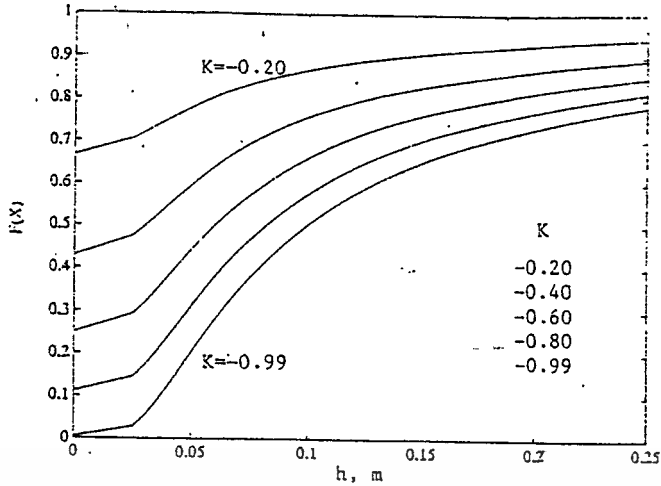
X คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นหินกรวดต่อรัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมที่ใช้แทนเท้า ($\frac{h}{b}$)

h คือ ความหนาของชั้นหินกรวด หน่วย เมตร(m)

b คือ รัศมีของแผ่นตัวนำวงกลมที่ชี้แทนเท้า มีค่า 0.08 เมตร

สมการที่ (3.3) ถึง (3.6) ที่กล่าวมาแล้วข้างบนนี้ค่าฟังก์ชัน FX ถูกคำนวณโดยค่าความหนาของชั้นหินกรวดที่มีความหนาในช่วงค่อนข้างจำกัดคือ 0.03 ถึง 0.25 เมตรและค่า K เป็นค่าตัวแปรที่มีค่าแปรอยู่ระหว่าง -0.2 ถึง -0.99 โดยแสดงกราฟของ FX และความหนาของชั้นหินกรวด(h) โดยที่ FX เป็นแกนตั้งและ h เป็นแกนนอน ที่ค่า K ต่างๆนำมา plot กราฟพร้อมแสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงค่าฟังก์ชัน F(X) และความหนาของชั้นหินกรวด(h)ที่ค่า K ต่างๆ

จากสมการที่(3.4) ถึง (3.6) ค่าความชันของกราฟจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามค่าความหนาของชั้นกรวดที่ลดลงและเมื่อเชื่อมต่อกกราฟที่จุด h มีค่าเป็น 0 แล้วพบว่าความชันของกราฟลดลงเมื่อ h มีค่าน้อยๆ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในกราฟทำให้เกิดค่าที่มีความผิดพลาดขึ้น ถ้าทำการพิจารณาอย่างละเอียดถึงที่มาของสมการที่(3.3) ถึง (3.5) จะพบว่าสมการยังไม่ค่อยถูกต้องนัก สมการที่(3.3) ถึง (3.5) นี้มาจากสมมติฐานที่ว่าแท่งถูกแทนด้วยแผ่นตัวนำรูปวงกลมที่มีรัศมี b และใช้วิธี Method of Image โดยค่าความต้านทานของแผ่นวงกลม(R_o)ที่มีรัศมี b เซนติเมตรในตัวกลางสารเนื้อเดียวกันขนาดไม่จำกัดที่มีค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าคือ ρ_s กำหนดโดยสมการ

$$R_o = \rho_s / (8b) \tag{3.7}$$

และค่า Mutual Ground Resistance(R_{mc}) ระหว่างแผ่นตัวนำวงกลมรัศมี b เซนติเมตรวางขนานกันในตัวกลางขนาดไม่จำกัดแสดงดังสมการ

$$R_{mc} = \rho_s / (8\sqrt{s^2 + b^2}) \tag{3.8}$$

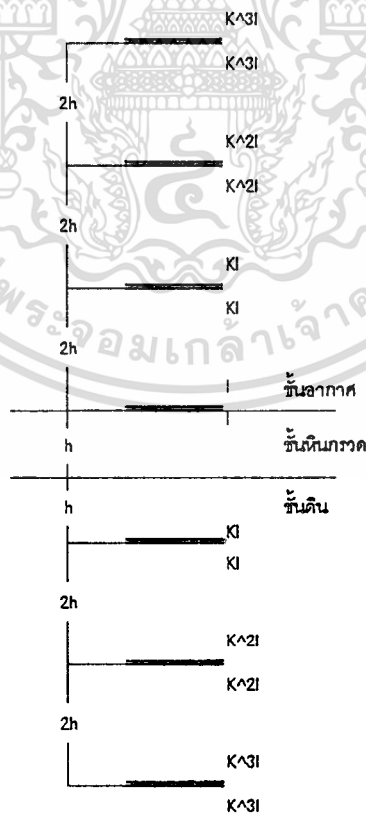
เมื่อ s คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น

สำหรับแผ่นอิเล็กโทรดใดๆที่สามารถปล่อยกระแส(discharge) ได้ในตัวกลางขนาดไม่จำกัด ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดมากขึ้นจะมีค่าเท่ากับค่าความต่างศักย์ของแผ่นวงกลม จากสมการที่(3.8) เมื่อ s มีค่ามากๆแล้วค่า R_{mc} จะมีค่าลดลงจนเข้า

ใกล้ $\rho_s/8s$ จะพบว่าสมการยังไม่ค่อยถูกต้องมากนัก สมการนี้จะใช้ได้ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่นมีค่าน้อยกว่ารัศมีของตัวนำมากๆ ดังนั้นในสมการที่(3.3) ถึง (3.5) จะให้ค่าความต้านทานของเท้าที่มีค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมาก

3.3 การหาค่าความต้านทานของเท้าโดยการวิเคราะห์ของ IMPROVED METHOD

การหาค่า Mutual Ground Resistance ระหว่างแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี b ที่วางในแนวขนานกับตัวกลางที่มีขนาดไม่จำกัด และตำแหน่งของแผ่นตัวนำนี้วางอยู่ที่ผิวของชั้นหินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะคือ ρ_s และอยู่เหนือพื้นดินที่มีค่าความต้านจำเพาะคือ ρ ความหนาของชั้นหินมีค่า h สามารถหาค่า Ground Resistivity ของแผ่นตัวนำได้โดยการใช้วิธี Method of Images โดยที่แผ่นตัวนำจะมีกระแสที่ปล่อยออกมา(discharge) เกิดขึ้นและกระแสส่วนนี้จะลงสู่พื้น โดยแผ่นตัวนำนี้มีค่าของกระแสที่ขอบเขตของระนาบสองระนาบที่อยู่ระหว่าง อากาศ หิน และดินจะแสดงภาพลำดับอนันต์สองทิศทางของภาพ(Two Way Infinite Sequence of Images) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการวางตำแหน่งของ plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นตัวนำจะปล่อยกระแสไปยังตัวกลางที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s ถ้าภาพนั้นอยู่บนขอบเขตระหว่างอากาศกับหินกระแสนี้คงมีค่าเท่าเดิม แต่ถ้าเมื่อแผ่นตัวนำนั้นวางอยู่บนขอบเขตระหว่างชั้นหินและดินกระแสที่ปล่อย (Discharge) จะถูกลดส่วนลงโดยอัตราส่วน(K) มีค่าตามสมการ

$$K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s) \tag{3.9}$$

กระแสที่ถูกปล่อย(Discharge) ออกมาตามภาพที่ 3.2 นี้จะกระจายลงสู่เนื้อที่ว่างรอบๆ ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s ค่าความต่างศักย์ของแผ่นตัวนำที่เกิดจากกระแสที่ปล่อยออกมาแสดงได้ตามสมการดังนี้

$$V = I [2R + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \{ K^n R_{m(2nh)} \}] \tag{3.10}$$

เมื่อ

R คือค่า Ground Resistance ของแผ่นตัวนำในตัวกลางที่ไม่จำกัดที่มีค่าความต้านทานจำเพาะคือ ρ_s

$R_{m(2nh)}$ คือค่า Mutual Ground Resistance ระหว่างแผ่นตัวนำสองอันที่วางขนานกันและมีระยะห่างระหว่างกัน $2nh$

จากสมการที่ (3.10) สามารถหาค่า ground resistance ของแผ่นตัวนำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_p &= V / I \\ &= 2R + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \{ K^n R_{m(2nh)} \} \end{aligned} \tag{3.11}$$

ลักษณะของแผ่นตัวนำ(Plate) ที่ใช้คือแผ่นตัวนำที่เป็นรูปวงกลมและแผ่นตัวนำที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

CIRCULAR PLATE

กำหนดให้แผ่นตัวนำที่ใช้มีลักษณะวงกลมและมีรัศมี b เซนติเมตร ค่า R และค่า $R_{m(2nh)}$ สามารถหาได้โดยสมการ

$$R = \rho_s / 8b \tag{3.12}$$

$$R_{m(2nh)} = \{ \rho_s / (4\pi(2nh)) [1 - (7b^2 / 12(2nh)^2) + [33b^4 / 40(2nh)^4]] \} \tag{3.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (3.13) นี้จะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความหนาของชั้นหินกรวดต่อรัศมีมีค่ามากกว่า 2

RECTANGULAR PLATE

กำหนดให้แผ่นตัวนำที่ใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง a และยาว L ค่า R และ $R_{m(2nh)}$ หาได้จากสมการ

$$R = \rho_s / 2\pi L (\ln 2L/a + 1/2) \quad (3.14)$$

$$R_{m(2nh)} = \rho_s / 2\pi L \{ \ln (L + \sqrt{(2nh)^2 + L^2}) / 2nh + 2nh/L - (\sqrt{(2nh)^2 + L^2}) / L \} \quad (3.15)$$

สมการที่ (3.15) นี้จะให้ค่าที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อความหนาของชั้นหินกรวดมากกว่าครึ่งหนึ่งของความกว้าง

สำหรับสมการที่ (3.11), (3.14) และ (3.15) ค่าความต้านทานของแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (R_{rp}) สามารถหาได้ดังนี้

$$R_{rp} = \rho_s / \pi L \{ \ln 2L/a + 1/2 \} (1 + 2 / (\ln 2L/a + 1/2) \sum_{n=1}^{\infty} P) \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.12) และ (3.14) ค่าความต้านทานของแผ่นตัวนำรูปวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะเท่ากันเมื่อ

$$\text{สมการที่ (3.12)} = \text{สมการที่ (3.14)}$$

$$\begin{aligned} \rho_s / 8b &= \rho_s / 2\pi L (\ln 2L/a + 1/2) \\ L &= \frac{4b}{\pi} [\ln 2L/a + 1/2] \end{aligned} \quad (3.17)$$

กำหนดค่า b มีค่า 8 เซนติเมตร อัตราส่วนของ L/a มีค่า 5 จะได้ค่า L จากสมการที่ (3.17) มีค่า 0.2854 เมตร

เมื่อทำถูกแทนด้วย plate รูปวงกลมจะได้สมการหาค่าความต้านทานของหัวดังสมการต่อไปนี้เป็น

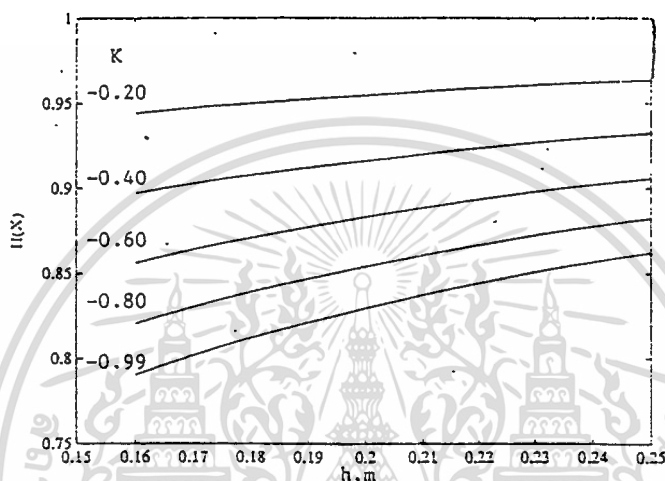
$$R_f = (\rho_s / 4b) H(X) \quad (3.18)$$

$$H(X) = 1 + 4/\pi \sum_{n=1}^{\infty} S \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = K^n / 2nX \{1 - [7/12(2nh)^2] + [33/40(2nh)^4]\}. \quad (3.20)$$

สมการที่กล่าวมาแล้วข้างบนนี้ค่อนข้างจะมีข้อจำกัดในการใช้ซึ่งสมการจะถูกต้องเมื่อความหนาของชั้นหินกรวดต่อรัศมีควมมากกว่า 2 นั่นคือความหนาของชั้นหินกรวดควรมีค่ามากกว่า 16 เซนติเมตร ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.3 แสดงกราฟของ $H(x)$ กับ h สำหรับค่า K ที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟของ $H(x)$ กับ h สำหรับค่า K ที่ค่าต่างๆ

เท่านั้นสามารถแทนด้วยแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่า Ground Resistance ของแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง a ยาว L บนพื้นผิวดินเนื้อเดียวที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s แสดงดังสมการ

$$R_f = \rho_s / \pi L [\ln 2L/a + 1/2] \quad (3.21)$$

ค่าอัตราส่วน L/a จะไม่เป็นค่าที่วิกฤตเมื่อ $L/a = 5$ และ $L = 0.2854$ ค่า R_f ที่ได้จากสมการที่ (3.21) นี้จะมีค่าเท่ากับค่า Ground Resistance ของแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี 8 เซนติเมตร การแทนที่ด้วยแผ่นตัวนำสี่เหลี่ยมผืนผ้าและใช้วิธี Method of Images จะแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$R_f = (\rho_s/4b) G(Y) \quad (3.22)$$

$$G(Y) = 1 + 0.714 \sum_{n=1}^{\infty} P \quad (3.23)$$

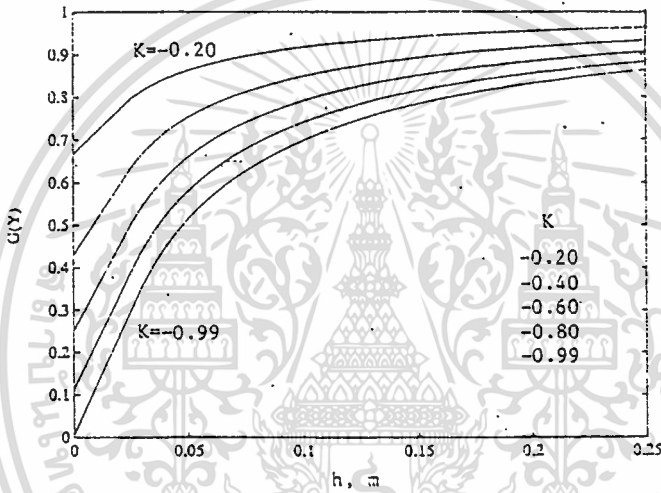
$$Y = h/L \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = K^n \left\{ \ln \left(L + \sqrt{(2nh)^2 + L^2} \right) / 2nh + 2nh/L - \left(\sqrt{(2nh)^2 + L^2} \right) / L \right\} \quad (3.25)$$

$$L = 0.2854 \text{ เมตร} \quad (3.26)$$

สมการนี้มีความถูกต้องสำหรับเมื่อ $h > a/2$, $L/a = 5$ และ $L = 0.2854$ แทนค่า $L = 0.2854$ ในสมการจะได้ $a = 0.057$ เมตร สมการที่กล่าวมาแล้วจึงมีความถูกต้องเมื่อความหนาของชั้นหินมีความหนามากกว่า 0.028 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ในรูปที่ 3.4 นี้ ที่ความหนาของชั้นกรวดที่มากกว่า 25 เซนติเมตรค่าฟังก์ชัน $G(Y)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่ารูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟของค่า $G(Y)$ กับความหนา(h) ที่ค่า K ต่างๆ

3.4 เปรียบเทียบความแตกต่างของฟังก์ชัน $F(X)$ ของการวิเคราะห์โดย IEEE Standard-80 และฟังก์ชัน $H(X)$ และ $G(Y)$ ของการวิเคราะห์โดยIMPROVED METHOD

ค่าฟังก์ชัน $H(X)$ และ $G(Y)$ ได้มาจากแบบจำลองที่แตกต่างกัน โดยค่าฟังก์ชัน $H(X)$ ได้มาจากแบบจำลองแผ่นตัวนำรูปวงกลมโดยการวิเคราะห์ของ IMPROVED METHOD ส่วนค่าฟังก์ชัน $G(Y)$ ได้มาจากแบบจำลองที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยการวิเคราะห์ของ IMPROVED METHOD เช่นกัน เมื่อความหนาของชั้นหินกรวดมีค่าเข้าใกล้ 0 ทั้ง $H(X)$ และ $G(Y)$ ควรจะมีค่าเข้าใกล้ p/p_0 แสดงตารางค่าต่างๆของ $F(X)$, $H(X)$, $G(Y)$ และ อัตราส่วน $G(Y) / H(X)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K	h(cm)	IEEE 80 F(X)	Suggested Values		G(Y) / F(X)
			Circ.Plate	Rect.Plate	
			H(X)	G(Y)	
-0.3	5	0.681	-	0.806	1.18
-0.3	10	0.807	-	0.883	1.09
-0.3	16	0.873	0.92	0.921	1.05
-0.3	20	0.897	0.935	0.936	1.04
-0.5	5	0.514	-	0.705	1.37
-0.5	10	0.703	-	0.82	1.17
-0.5	16	0.804	0.876	0.879	1.09
-0.5	20	0.841	0.899	0.901	1.07
-0.7	5	0.373	-	0.619	1.66
-0.7	10	0.612	-	0.766	1.25
-0.7	16	0.744	0.838	0.842	1.13
-0.7	20	0.793	0.869	0.871	1.1
-0.9	5	0.252	-	0.545	2.16
-0.9	10	0.533	-	0.718	1.35
-0.9	16	0.691	0.804	0.81	1.17
-0.9	20	0.75	0.841	0.844	1.13

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าต่างๆของ F(X) , H(X) , G(Y) และ อัตราส่วน G(Y) / H(X)

วิธีของ IEEE Standard-80 จะให้ค่า Ground Resistance of Foot มีค่าที่ต่ำมากโดยเฉพาะเมื่อความหนาของชั้นดินกรวดมีค่าน้อยๆ ส่วนวิธีของ IMPROVED METHOD จะให้ค่า Ground Resistance of Foot ที่มีความถูกต้องมากกว่าของ IEEE Standard-80

3.5 ความปลอดภัยในสถานีไฟฟ้าย่อยและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่กล่าวเกี่ยวกับทฤษฎีในการหาค่า Ground Resistance of Foot มาแล้วข้างต้น ในระบบกราวนด์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นควรมีการออกแบบมาเพื่อความปลอดภัย เพื่อให้ค่าของ ศักย์ไฟฟ้าอย่างก้าว และ ศักย์ไฟฟ้าสัมผัส มีค่าอยู่ในสภาวะที่ร่างกายของบุคคลที่อยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าหรือบริเวณใกล้เคียงสามารถรับได้ ซึ่งค่าของศักย์ไฟฟ้าสัมผัสจะมีค่าที่มีอันตรายมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าอย่างก้าว เนื่องจากเมื่อมีการเกิดศักย์ไฟฟ้าสัมผัสขึ้นจะมีกระแสไหลจากอุปกรณ์ผ่านลงไปในร่างกายและแยกเป็นสองส่วนไปที่ขาทั้งสองข้างในลักษณะที่วางตัวขนานอยู่

ความต้านทานของร่างกายนั้นจะรวมไปถึงอุปกรณ์ที่ประกอบกับบุคคล เช่น ความต้านทานของถุงมือ ถุงเท้า และรองเท้า ค่าความต้านทานของจุดที่บุคคลสัมผัสกับจุดที่ยืนอยู่บนสถานีไฟฟ้านั้นจะคำนวณจากค่าสูงสุดของศักย์ไฟฟ้าสัมผัส ผลรวมของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างจะอิสระโดยไม่สนใจว่าจะมีบุคคลสัมผัสอยู่หรือไม่เพราะว่าผลรวมของค่า System Impedance และ Human Impedance จะมีค่ามากกว่าความต้านทานของระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้ามาก ปกติแล้วค่าความต้านทานของบุคคลแต่ละคนมีค่าไม่เท่ากันซึ่ง มีมาตรฐานของ IEEE Standard-80 ได้แนะนำให้ใช้ค่า 1000 Ohm ในการคำนวณหาค่า Shock Current โดยค่า Ground Resistance of Foot เป็นค่าที่มีความสำคัญที่สุดในการควบคุมการไหลของ Shock Current ส่วนความต้านทานของถุงมือ ถุงเท้าและรองเท้ามีค่าไม่แน่นอนและมีค่าต่ำมาก ประมาณให้มีค่าเป็น 0 ได้ ปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการไหลของกระแสที่ผ่านร่างกายนั้นโดยผ่านเท้าทั้งสองที่ขนานกันจะอยู่ในรูปตัวแปรต่างๆคือ

1. ขนาดของเท้าแต่ละบุคคลและระยะห่างระหว่างเท้าทั้งสองโดยปกติให้มีค่าประมาณ 1 เมตร
2. ความหนาของชั้นหินกรวดและค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นหินที่โรยในสถานีไฟฟ้าย่อย
3. ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน
4. ค่า Energized Grounding Grid ได้เท้าทั้งสอง

การหาค่าความต้านทานของเท้าอย่างง่ายนั้นจะต้องตัดค่า energized grounding grid ที่ตั้งเมื่อเท้าทั้งสองอยู่ใกล้กัน และเมื่อเท้าทั้งสองอยู่ใกล้กันจะทำให้ค่า mutual ground resistance ระหว่างเท้าทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นแต่สามารถตัดทิ้งได้ ปกติแล้วค่า energized grounding grid และ mutual ground resistance ที่กล่าวมานี้จะคิดในกรณีที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้ใช้ computer ในการคำนวณจะไม่สามารถหาค่า proximity of energized grounding grid เพื่อที่จะหาค่าความต้านทานของเท้าได้

3.6 การคำนวณหาสมการค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้าในสถานีไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่(3.1) ค่าความต้านทานของเท้ากับพื้นดินที่ไกลๆ(Remote Ground) สามารถแทนได้ด้วยค่า ground resistance ของแผ่นตัวนำวงกลมที่มีรัศมี b เซนติเมตร และวางตัวในแนวระนาบบนพื้นดินที่มีเนื้อเดียวที่มีค่า resistivity ρ_s

$$R_f = \rho_s / (4b)$$

และจากสมการของ IMPROVED METHOD ที่ใช้ plate สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$R_f = (\rho_s / 4b) G(Y)$$

$$G(Y) = 1 + 0.714 \sum_{n=1}^{\infty} P$$

$$Y = h/L$$

$$P = K^n \left(\ln \left(L + \sqrt{(2nh)^2 + L^2} \right) / 2nh + 2nh/L - \left(\sqrt{(2nh)^2 + L^2} \right) / L \right)$$

$$L = 0.2854 \text{ เมตร}$$

ถ้าเท้าทั้งสองห่างกันออกไปค่า mutual ground resistance ระหว่างเท้าทั้งสองสามารถตัดทิ้งได้ ในกรณีนี้ค่าความต้านทานของเท้าในลักษณะที่ขนานกัน(Ground Resistance of Two Feet in Parallel; R_{2fp}) มีค่าตามสมการ

$$\begin{aligned} R_{2fp} &= R_f / 2 \\ &= \rho_s G(Y) / 8b \end{aligned} \quad (3.27)$$

ที่รัศมีของแผ่นตัวนำมีค่า 8 เซนติเมตร

$$R_{2fp} = 1.5 \rho_s G(Y) \quad (3.28)$$

แต่ถ้าในการเกิด touch voltage นั้น เท้าของบุคคลแยกออกจากกันคือมีระยะระหว่างเท้า 20 ถึง 70 เซนติเมตร ในกรณีเช่นนี้เราไม่สามารถตัดค่า mutual ground resistance ทิ้งไปได้ และเมื่อทำการพิจารณาค่า ground resistance ของเท้าในลักษณะขนาน(R_{2fpm}) ทั้งสองใหม่

จะได้ตามสมการ

$$R_{2fpm} = (R_f + R_{fm})/2 \quad (3.29)$$

ผลของค่า R_{fm} จะเพิ่มค่า ground resistance ของเท้าโดยมีการกำหนดค่า feet proximity factor(α) โดย

$$\alpha = R_{2fpm} / R_{2fp} \quad (3.30)$$

ค่า mutual ground resistance ระหว่างเท้าทั้งสองที่ห่างกัน d เมตรบนพื้นดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ ρ_s และเราแทนเท้าทั้งสองด้วยครึ่งทรงกลมอันหนึ่งจะได้สมการคือ

$$R_{fm} = \rho_s / 2\pi d \quad (3.31)$$

จากสมการ (3.22) , (3.28) ถึง (3.31) จะได้

$$R_{2fm} = (\alpha / 2) R_f \quad (3.32)$$

$$\alpha = 1 + 2b/\pi d \quad (3.33)$$

ในแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบถ้าจะให้ค่าที่ได้มีค่าถูกต้องนั้นควรให้ d มีค่ามากกว่ารัศมีมาก ๆ และเท้าจะถูกแทนด้วยตัวนำสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 5.7 เซนติเมตร และยาว 28.54 เซนติเมตร จากการแทนค่าด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่านี้นพบว่าค่าต่างๆที่วัดออกมาได้จะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้แผ่นวงกลมรัศมี 8 เซนติเมตร ลักษณะของแผ่น ground grid ที่ใช้กันอยู่ในสถานีไฟฟ้านั้นจะมีผลต่อการไหลของกระแสลงสู่พื้นดิน และจะช่วยลดค่า ground resistance ของเท้า ซึ่งการลดลงนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความลึกของแผ่น ground grid , ตำแหน่งของเท้าทั้งสอง และขนาดของ mesh การลดลงนี้จะมีค่ามากเมื่อขนาดของ mesh และตัวนำ grid มีขนาดเล็ก เพื่อที่จะให้มีการคำนวณที่ง่ายขึ้นจึงกำหนดให้ขนาดของ grid เป็นแผ่นตัวนำที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงค่า parameter บางค่า เช่น ขนาดของแผ่นตัวนำ ขนาดช่องระหว่างตัวนำ ดังนั้นค่า ground resistance ของเท้าบนดินกับแผ่นโลหะขนาดใหญ่ที่มีความลึก H แสดงได้ดังสมการ

$$R_{fg} = \beta R_f \quad (3.34)$$

$$\beta = 1 - [0.693(2b) / \pi H] \quad (3.35)$$

เมื่อเท้ายืนอยู่ในสถานีไฟฟ้าที่มีชั้นของหินกรวดดังนั้นสมการที่(3.33)จะถูกปรับปรุงใหม่คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = 1 - [0.693(2b) / \pi H] [p/p_s] [1/G(Y)] \quad (3.36)$$

ค่าตัวประกอบ α และ β เป็นค่าที่สามารถรวมกันเพื่อใช้หาค่า ground resistance ของแท่งที่มีลักษณะขนานกันและยื่นอยู่บนชั้นดินในสถานีไฟฟ้า ค่า ground resistance (R_{2fpg}) นี้จะพิจารณาประกอบกับ unenergized grounding system ของสถานีไฟฟ้าและความใกล้เคียงของแท่งด้วย สมการแสดงโดย

$$R_{2fpg} = \alpha \beta R_f / 2 \quad (3.37)$$

เมื่อมีการสัมผัสอุปกรณ์ที่มีกระแสไหลจะเกิดศักย์ดาไฟฟ้าสัมผัสขึ้น และกระแสส่วนหนึ่งจะไหลแยกเข้าสู่ร่างกายบุคคลและแยกไหลผ่านเท้าทั้งสองข้างตามสมการ

$$I_f = I_g + I_b \quad (3.38)$$

เมื่อ

- I_f คือ กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น (Amp)
- I_g คือ กระแสส่วนที่แยกไหลลงระบบกราวด์ (Amp)
- I_b คือ กระแสส่วนที่แยกไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (Amp)

ในทฤษฎีของเทอวินิน (Thevenin Theort) ได้กำหนดขั้นตอนในการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ (I_b) ที่เกิดศักย์ดาไฟฟ้าสัมผัสตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ให้สมมติไม่มีคนในระบบแล้วใช้แผ่นตัวนำแทนเท้าของคนบนพื้นดิน
2. หาค่า thevenin voltage (V_{th}) ซึ่งเป็นศักย์ดาไฟฟ้าที่คร่อมระหว่างจุดที่สัมผัสกับเท้าที่ยื่นอยู่ เพราะฉะนั้นค่านี้คือค่าศักย์ดาไฟฟ้าสัมผัสนั่นเอง โดยที่ค่าสูงสุดในสถานีไฟฟ้านี้คือค่า Mesh Voltage (E_m)

$$V_{th} = E_m \quad (3.39)$$

3. หา Thevenin Impedance (Z_{th}) ซึ่งเป็นค่า impedance ของระบบที่มองจากจุดสัมผัสกับจุดที่ยื่น ในกรณีทั่วไปค่า ground resistance ระหว่างแผ่นตัวนำซึ่งแทนเท้าทั้งสอง จะได้ว่าค่าความต้านทานนี้คือ (R_{2fpe})

$$\begin{aligned} R_{2fpe} &= R_{2fpg} + R_g - 2R_m \\ &= [\alpha \beta R_f / 2] + R_g - 2R_m \end{aligned} \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

R_g คือ Ground Resistance ของแผ่นกริซ

R_m คือ ผลรวมของ Ground Resistance ระหว่างแผ่นกริซกับเท้าทั้งสอง

4. คำนวณหาค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนได้ตามสมการ

$$I_b = V_{th} / Z_{th} + R_b \quad (3.41)$$

$$I_b = E_m / R_{2fpe} + R_b \quad (3.42)$$

ค่า mutual ground resistance ระหว่างกริซกับเท้าจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเท้าที่จุดที่บุคคลเกิดศักดาไฟฟ้าสัมผัสขึ้น ค่า Mutual Ground Resistance (R_m) สามารถหาได้ตามสมการ

$$R_m = (I_g R_g - E_m) / I_g \quad (3.43)$$



บทที่ 4

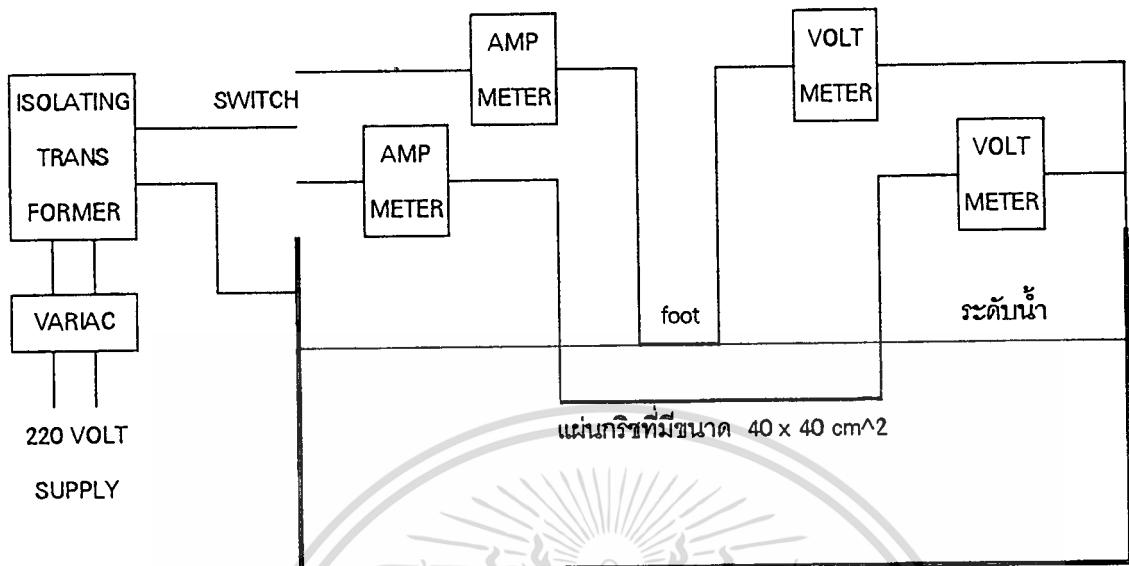
แบบจำลองในการทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบ

ในการออกแบบจำลองในการทดสอบค่าจะใช้ทำการลดส่วนออกมาเป็นแบบจำลอง 10 เท่า (Scale Factor 1:10) เท้าจะถูกออกแบบจำลองโดยมีสองชนิดคือกำหนดให้เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 0.57 เซนติเมตร และยาว 2.84 เซนติเมตร และอีกแบบหนึ่งคือเป็นแผ่นตัวนำรูปวงกลมที่มีรัศมี 0.8 เซนติเมตร และVariac จ่ายศักดาไฟฟ้า 60 Volts ในแบบจำลองนี้แผ่นกราวด์กริซจะถูกแขวนในแนวระนาบและสามารถปรับระดับที่ความลึกต่างๆและมีแผ่นตัวนำแทนเท้าที่อยู่ใต้น้ำ โดยจะทำการทดสอบที่ระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกริซคือ 2 , 5 และ 12 เซนติเมตรตามลำดับ แผ่นตัวนำที่แทนเท้าจะถูกวางในตำแหน่งที่ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเกิดขึ้นได้ ซึ่งแผ่นกริซที่ใช้ทดสอบทำจากลวดทองแดง AWG 20 จัดรูปแบบแผ่นเบคคาไลท์ มีลักษณะดังนี้คือ

1. กรณีที่แผ่นกราวด์กริซประกอบด้วย 1 Mesh มีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตรและยาว 24 เซนติเมตร เท้าจะถูกวางที่ตำแหน่งตรงกับกึ่งกลางของ Mesh
2. กรณีที่แผ่นกราวด์กริซประกอบด้วย 4 Mesh มีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตรและยาว 24 เซนติเมตร เท้าจะถูกวางที่ตำแหน่งตรงกับกึ่งกลางของ Mesh ทั้งสี่ที่มุมใดมุมหนึ่ง
3. กรณีที่แผ่นกราวด์กริซประกอบด้วย 16 Mesh มีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตรและยาว 24 เซนติเมตร เท้าจะถูกวางในตำแหน่งตรงกับกึ่งกลางของ Mesh ทั้งสี่ที่มุมทั้งสี่ที่มุมใดมุมหนึ่ง
4. กรณีที่แผ่นกราวด์กริซประกอบด้วย Mesh จำนวนมากมาย คือ เป็นแผ่นตัวนำนั่นเอง มีขนาดกว้าง 30 เซนติเมตรและยาว 30 เซนติเมตร เท้าจะถูกวางที่มุมใดมุมหนึ่งของ Plate

จุดที่มีการวางตำแหน่งเท้าคือจุดที่มีค่า Mesh Voltage สูงสุด จุดที่มีค่า Mesh Voltage สูงที่สุดก็คือจุดที่กล่าวมาแล้วในสี่ข้อข้างต้น แบบจำลองของระบบกราวด์ที่ทำการออกแบบคือ เป็นตัวถังที่ทำด้วยแผ่นโลหะตัวนำที่มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง คือ 1x1x1 เมตร ตามลำดับ แสดงรูปแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงระบบสถานีไฟฟ้าย่อยจำลอง

แผ่นตัวนำที่อยู่ใต้อ่างน้ำแทนเท้าของบุคคลที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยการศึกษามีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้คือ

1. แผ่นกราวด์กริชและแผ่นตัวนำแทนเท้ามีลักษณะตามรูปที่ 4.1 โดยแทนที่ร่องแผ่นกราวด์กริชสามารถปรับเคลื่อนลงโดยมีระยะห่างจากแผ่นตัวนำเท้าที่ระยะต่างๆตามต้องการในข้อนี้ให้ทั้งแผ่นกราวด์กริชและเท้าอยู่ในระบบ (คำว่าอยู่ในระบบในที่นี้หมายถึง ถูกจ่ายพลังงานโดยแหล่งกำเนิด ซึ่งในที่นี้ใช้ Variac) ค่าต่างๆจะถูกวัดคือ

- 1.1 กระแสที่ไหลผ่านแผ่นกราวด์กริช (I_g)
- 1.2 กระแสที่ไหลผ่านแผ่นเท้าที่ฉนวน (I_f)
- 1.3 ค่าศักดาไฟฟ้าของแผ่นกราวด์กริชและเท้าเทียบกับตัวถัง (V)

2. ตัดเท้าออกจากระบบ จะมีแต่แผ่นกราวด์กริชเท่านั้นที่อยู่ในระบบพบว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของกระแสที่ไหลผ่านแผ่นกราวด์กริชหรือค่าความต่างศักย์เทียบกับตัวถัง ทำการวัดค่าศักดาไฟฟ้าของเท้าเทียบกับตัวถัง (V_{f0})

3. จ่ายพลังงานให้เฉพาะเท้าโดยทำการตัดแผ่นกราวด์กริชออกจากระบบและทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่อไปนี้

3.1 กระแสที่ไหลผ่านเท้า(I_{fg})

3.2 ศักดาไฟฟ้าของเท้าเทียบกับตัวถัง(V_{fg})

จากการวัดค่าดังกล่าวแล้วค่าต่างๆจะถูกคำนวณหาค่า Ground Resistance of Foot(R_{fg})

และ unenergized grid โดย

$$R_{fg} = V_{fg} / I_{fg} \quad (4.1)$$

ค่า Ground Resistance ของแผ่นกราวด์กริช(R_g)

$$R_g = V / I_g \quad (4.2)$$

ค่า Mutual Ground Resistance ของแผ่นกราวด์กริชและเท้า (R_m)

$$R_m = V_{fo} / I_g \quad (4.3)$$

ค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัส(Touch voltage; V_t)

$$V_t = V - V_{fo} \quad (4.4)$$

จากการทดสอบที่ผ่านมาจะได้ค่าประสิทธิภาพผลความต้านทานของเท้ามนุษย์ (R_{fe}) ที่ได้

จากการทดสอบแบบจำลองมีสองค่าคือ

1. ค่าที่ได้จากการวัดโดยตรงและหาได้ตามสมการ V_t / I_f
2. ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ $R_{fg} + R_g - 2R_m$

การคำนวณหาค่า Ground Resistance ของเท้าในสถานีไฟฟ้านี้ ค่าที่ได้จากการคำนวณ

จากสมการ V_t / I_f และจากสมการ $R_{fg} + R_g - 2R_m$ ควรที่จะมีความใกล้เคียงกันโดยควรให้มีค่า

ความแตกต่าง (Perunit Difference ; ϵ) น้อยที่สุด ตามสมการ

$$\epsilon = (R_{2fpe} - R_{2fp}) / R_{2fpe} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง

1. ใช้แผ่นเท้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกราว์นกริช 0.02 เมตร

ชนิดของแผ่นกราว์นกริช	PLATE	1-MESH	4-MESH	16-MESH
ระยะห่างระหว่างแผ่นกราว์นกริชและเท้า(เมตร)	0.02	0.02	0.02	0.02
Ig(A)	5.15	1.73	1.85	1.93
If(A)	0.13	0.10	0.09	0.09
V(Volts)	58.60	58.50	58.80	58.50
Vfo(Volts)	39.70	38.00	42.80	43.50
I _{fg} (Volts)	0.40	0.27	0.31	0.35
V _{fg} (Volts)	59.20	59.00	59.20	59.20
R _{fg} (Ohms)	149.87	220.56	194.10	169.14
R _g (Ohms)	11.38	33.91	31.78	30.31
R _m (Ohms)	7.71	22.03	23.14	22.54
V _t (Volts)	18.90	20.50	16.00	15.00
R _{fe} : การวัด	146.51	213.54	183.91	163.04
R _{fe} : คำนวณ	145.83	210.42	179.61	154.38
% Error	-0.46	-1.49	-2.39	-5.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้แผ่นทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกราว์นกริช 0.05 เมตร

ชนิดของแผ่นกราว์น	PLATE	1-MESH	4-MESH	16-MESH
ระยะห่างระหว่างแผ่นกราว์นกริชและเท้า(เมตร)	0.05	0.05	0.05	0.05
Ig(A)	5.75	2.00	2.20	2.36
If(A)	0.12	0.14	0.13	0.13
V(Volts)	58.80	59.50	59.00	59.50
Vfo(Volts)	36.00	32.50	36.50	36.00
I _{fg} (Volts)	0.32	0.29	0.33	0.32
V _{fg} (Volts)	59.20	58.30	59.20	59.00
R _{fg} (Ohms)	185.00	198.30	179.39	185.83
R _g (Ohms)	10.23	29.75	26.82	25.21
R _m (Ohms)	6.26	16.25	16.59	15.25
V _t (Volts)	22.80	27.00	22.50	23.50
R _{fe} : การวัด	186.89	191.49	177.17	186.51
R _{fe} : คำนวณ	182.70	195.55	173.03	180.53
% Error	-2.29	2.08	-2.39	-3.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้แผ่นทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกราวด์กริช 0.12 เมตร

ชนิดของแผ่นกราวด์	PLATE	1-MESH	4-MESH	16-MESH
ระยะห่างระหว่างแผ่นกราวด์กริชและเท้า(เมตร)	0.12	0.12	0.12	0.12
$I_g(A)$	6.25	2.18	2.45	2.75
$I_f(A)$	0.09	0.19	0.17	0.18
$V(Volts)$	58.00	59.20	58.80	59.40
$V_{fo}(Volts)$	41.00	21.20	23.50	23.20
$I_{fg}(Volts)$	0.31	0.30	0.30	0.30
$V_{fg}(Volts)$	59.90	59.80	59.50	59.80
$R_{fg}(Ohms)$	193.23	199.33	198.33	202.71
$R_g(Ohms)$	9.28	27.22	24.00	21.60
$R_m(Ohms)$	6.56	9.75	9.59	8.44
$V_t(Volts)$	17.00	38.00	35.30	36.20
R_{fe} : การวัด	191.01	197.92	202.87	205.68
R_{fe} : คำนวณ	189.39	207.06	203.15	207.44
% Error	-0.86	4.41	0.14	0.85

4. ใช้แผ่นทำเป็นรูปวงกลมมีระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกราวด์

กริด 0.02 เมตร

ชนิดของแผ่นกราวด์	PLATE	1-MESH	4-MESH	16-MESH
ระยะห่างระหว่าง แผ่นกราวด์กริด และเท้า(เมตร)	0.02	0.02	0.02	0.02
Ig(A)	5.15	1.67	1.84	1.93
If(A)	0.13	0.09	0.08	0.10
V(Volts)	58.50	59.00	58.80	59.20
Vfo(Volts)	39.50	37.20	44.00	42.50
I _{fg} (Volts)	0.39	0.24	0.30	0.34
V _{fg} (Volts)	59.00	58.50	59.00	59.20
R _{fg} (Ohms)	152.26	240.74	200.00	176.72
R _g (Ohms)	11.36	35.33	31.96	30.67
R _m (Ohms)	7.67	22.28	23.91	22.02
V _t (Volts)	19.00	21.80	14.80	16.70
R _{fe} : การวัด	147.29	234.41	189.74	172.16
R _{fe} : คำนวณ	148.28	231.52	184.13	163.35
% Error	0.67	-1.25	-3.05	-5.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้แผ่นทำเป็นรูปวงกลมมีระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกราวด์
กริด 0.05 เมตร

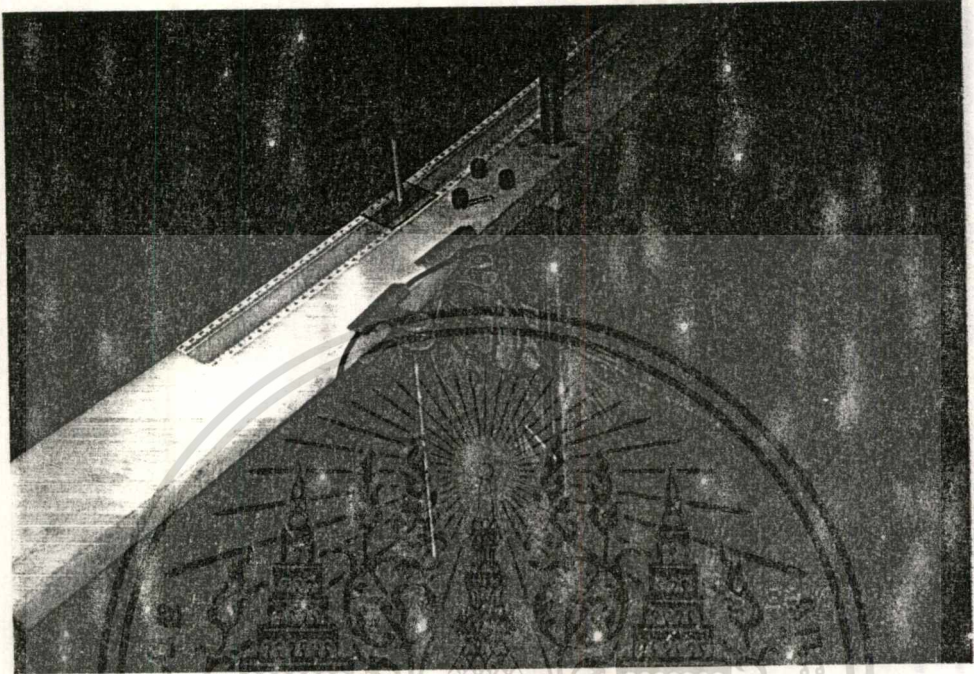
ชนิดของแผ่นกราวด์	PLATE	1-MESH	4-MESH	16-MESH
ระยะห่างระหว่าง แผ่นกราวด์กริด และเท้า(เมตร)	0.05	0.05	0.05	0.05
Ig(A)	5.80	2.00	2.23	2.38
If(A)	0.14	0.14	0.12	0.13
V(Volts)	58.50	59.50	59.20	59.20
Vfo(Volts)	35.50	31.50	36.50	34.50
I _{fg} (Volts)	0.35	0.29	0.32	0.32
V _{fg} (Volts)	59.20	58.50	59.00	59.20
R _{fg} (Ohms)	169.14	203.83	187.30	185.00
R _g (Ohms)	10.09	29.75	26.61	24.93
R _m (Ohms)	6.12	15.75	16.40	14.53
V _t (Volts)	23.00	28.00	22.70	24.70
R _{fe} : การวัด	167.88	202.90	189.17	184.33
R _{fe} : คำนวณ	166.99	202.08	181.10	180.87
% Error	-0.54	-0.40	-4.45	-1.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

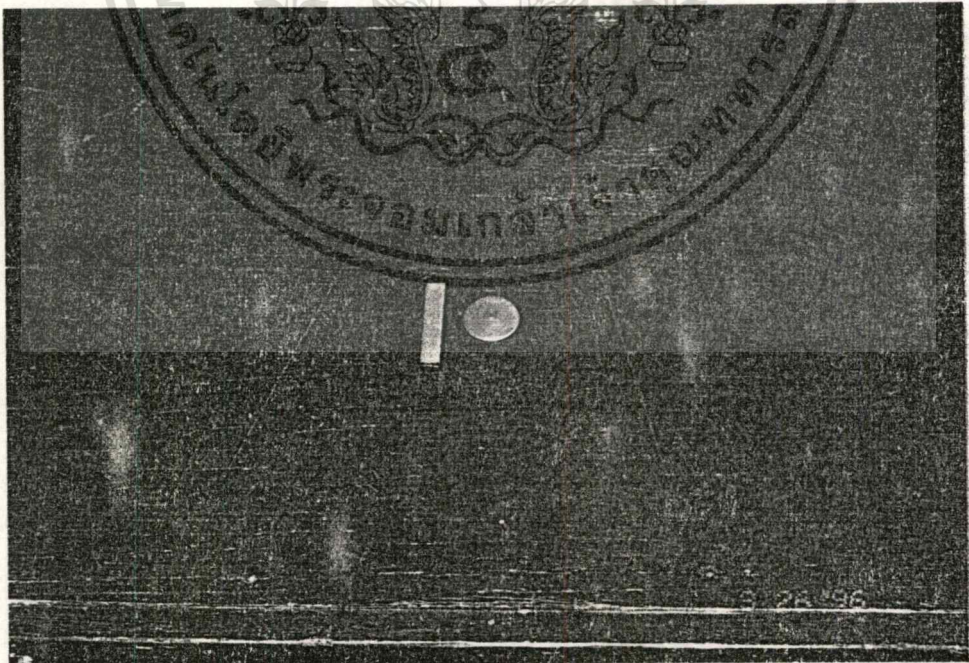
6. ใช้แผ่นทำเป็นรูปวงกลมมีระยะห่างระหว่างเท้าและแผ่นกราวด์
กริด 0.12 เมตร

ชนิดของแผ่นกราวด์	PLATE	1-MESH	4-MESH	16-MESH
ระยะห่างระหว่าง แผ่นกราวด์กริด และเท้า(เมตร)	0.12	0.12	0.12	0.12
Ig(A)	6.90	2.33	2.65	2.93
If(A)	0.18	0.21	0.18	0.17
V(Volts)	58.20	59.20	59.50	59.20
Vfo(Volts)	27.50	20.30	22.50	21.75
I _{fg} (Volts)	0.34	0.31	0.29	0.26
V _{fg} (Volts)	59.20	59.00	59.10	59.00
R _{fg} (Ohms)	176.72	190.32	203.79	229.13
R _g (Ohms)	8.43	25.46	22.45	20.24
R _m (Ohms)	3.99	8.73	8.49	7.44
V _t (Volts)	30.70	38.90	37.00	37.45
R _{fe} : การวัด	172.96	189.76	205.56	226.97
R _{fe} : คำนวณ	177.18	198.32	209.26	234.49
% Error	2.38	4.32	1.77	3.21

ภาพถ่ายแบบจำลองอุปกรณ์ในการทดสอบ

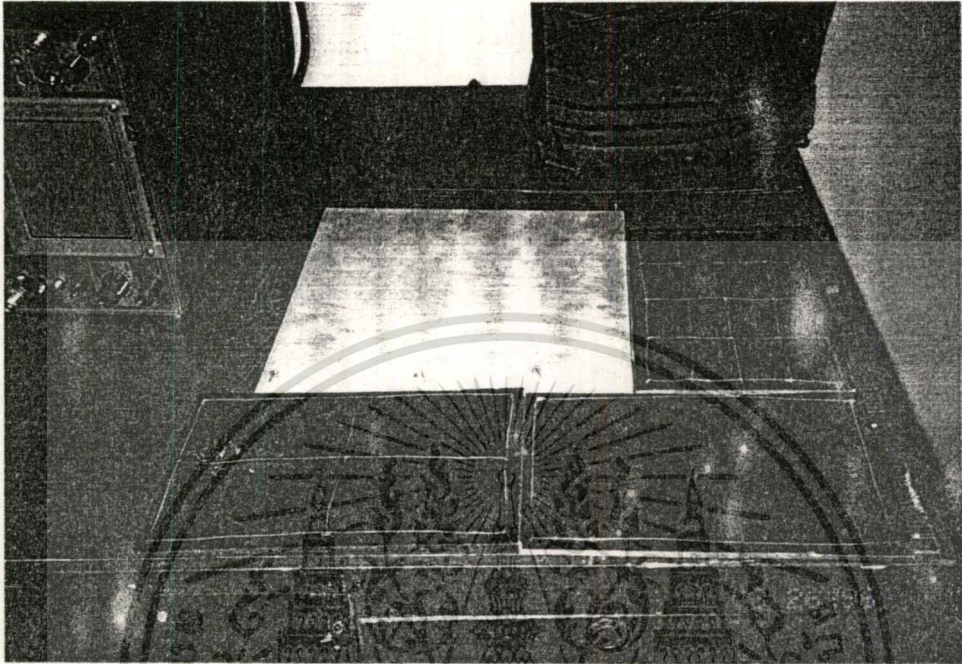


รูปที่ 4.2 แสดงการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ในการทดสอบ

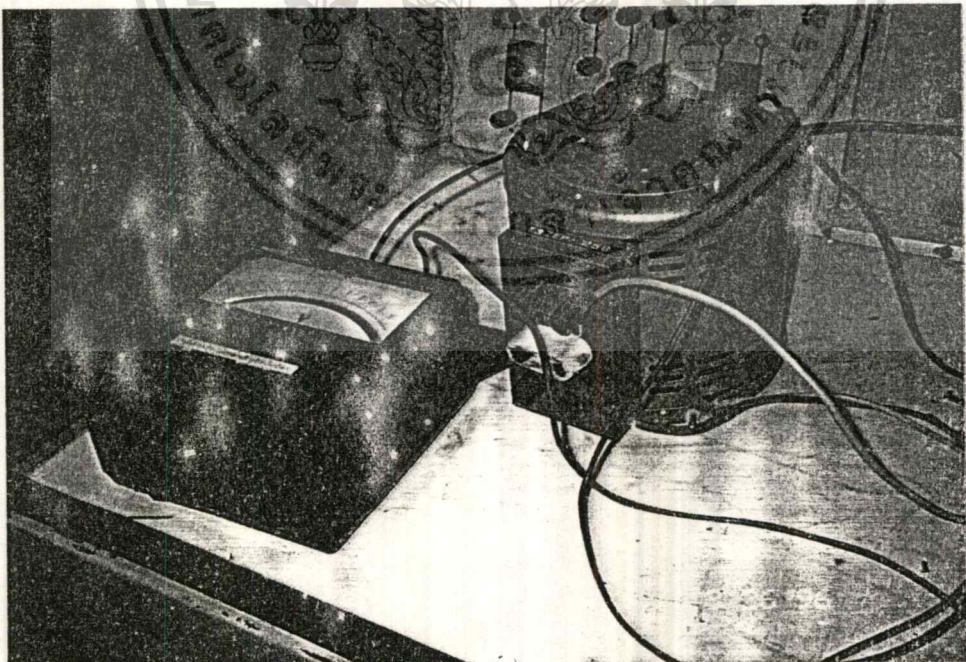


รูปที่ 4.3 แสดงแผ่นตัวนำเท้ารูปวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

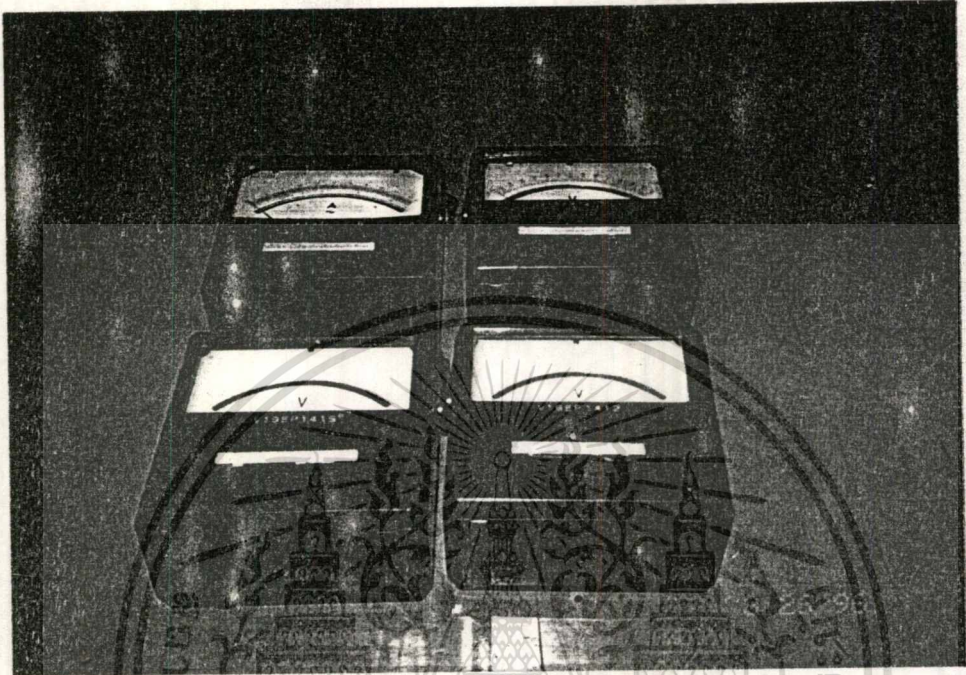


รูปที่ 4.4 แสดงแผ่นกราวด์กริดที่ใช้ทดสอบทั้งหมด 4 ชนิด

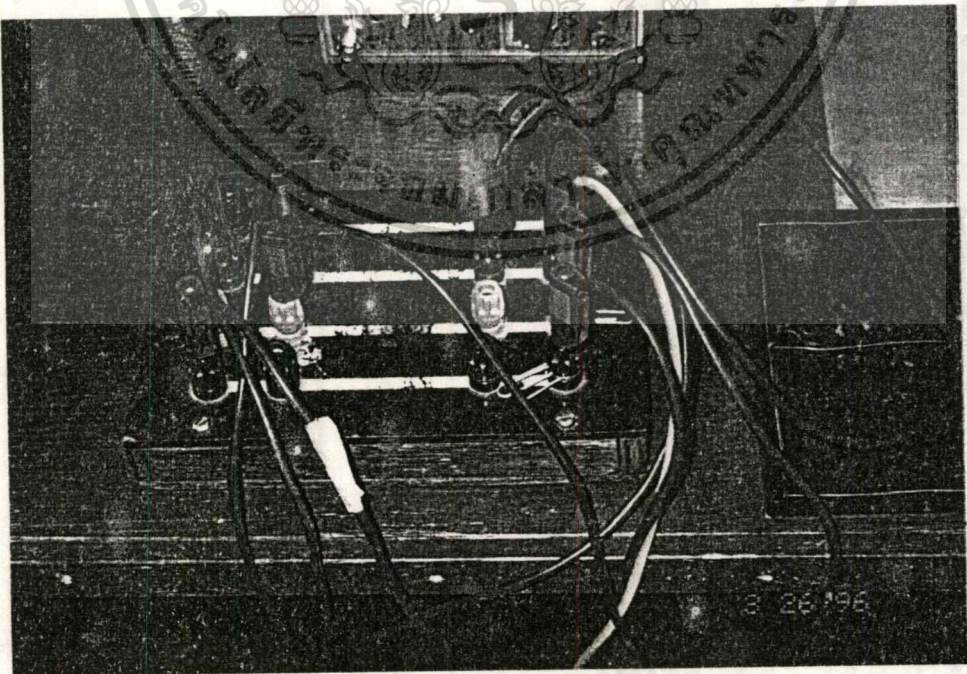


รูปที่ 4.5 แสดง Supply และ Voltmeter ที่ทำหน้าที่ควบคุม Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดง Ammeter 2 ตัว และ Voltmeter 2 ตัวที่ใช้วัด



รูปที่ 4.7 การต่อ Junction Box ที่ดัดแปลงเป็น Switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นประการที่มีความสำคัญที่สุดในการออกแบบคือ ความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าแห่งนั้น ในการออกแบบมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ ขนาดของกระแสลัดวงจร ขนาดของตัวนำที่ใช้ในการต่อลงดิน ศักดาไฟฟ้าสัมผัส (Touch Voltage) ศักดาไฟฟ้าย่างก้าว (Step Voltage) และ ศักดาไฟฟ้าทรานเฟอร์ (Transferred Potentials) การที่จะออกแบบขนาดของตัวนำที่ต่อลงดินได้นั้นเราจำเป็นที่จะต้องทราบขนาดของกระแสสูงสุดที่ไหลไปในส่วนต่างๆของระบบต่อลงดินและต้องทราบศักดาสูงสุดที่เกิดจากกระแสที่จุดนั้นๆ ปัจจัยที่มีผลอีกประการหนึ่งคือ การที่ความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าสูงนั้นทำให้เมื่อเกิดมีกระแสลัดวงจร จะมีการกระจายกระแสลงดินได้ไม่ดี เราอาจลดค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินโดยการใส่สารเคมีช่วยเพื่อลดความต้านทานจำเพาะของดินหรือสร้างระบบต่อลงดิน (Auxiliary Grid or Remote Ground) เพื่อช่วยในการกระจายกระแสลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรู้ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการออกแบบ ซึ่งจะต้องประกอบด้วย

1. กระแสลัดวงจร (Amp)
2. การ Interrupt ของอุปกรณ์ป้องกัน (Sec)
3. พื้นที่ของสถานีไฟฟ้า (Sq.m)
4. ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและพื้นบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย
5. ขนาดและชนิดของตัวนำที่นำมาใช้เป็นระบบต่อลงดิน (Sq.mm)

จากข้อมูลดังกล่าว กระแสลัดวงจรมันจะมีผลต่อขนาดและรูปร่างของระบบต่อลงดินโดยเริ่มจากการคำนวณโดยหาค่าขนาดของกระแสลัดวงจร ในการออกแบบโปรแกรมนี้จะทำการออกแบบสถานีไฟฟ้าที่มีชั้นเดียวคือมีแต่ชั้นดินโดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าก โดยปกติแล้วในการออกแบบเราจะต้องทราบขนาดของสถานีไฟฟ้าที่จะทำการออกไปใช้

STEP-1

แบบ ส่วนค่าความต้านทานจำเพาะของดินนั้นผู้ออกแบบควรที่จะทราบด้วย เพราะฉะนั้น ข้อมูลที่เป็น INPUT ส่วนแรกคือ พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าและค่าความต้านทานจำเพาะของ สถานีไฟฟ้า

STEP-2

การหาขนาดของตัวนำที่เล็กที่สุดสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L_{\min} (A, \text{mm}^2) = I_G \sqrt{\frac{10,000 * T_c * (\text{Alpha} - r) * (\text{Rho} \ r)}{TCAP \ln\left[1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right]}} \quad (5.1)$$

เมื่อ

- I คือ Current Fault in KA
 A คือ Conductor cross section in mm²
 T_m คือ Maximum allowable temperature in °c
 T_c คือ Time of Current flow in sec
 α_r คือ Thermal Coefficient of resistivity at reference temperature
 T_r คือ Reference temperature for material constants in °c
 ρ_r คือ The Resistivity of Ground Conductor at Reference Temperature
 K₀ คือ α₀⁻¹
 TCAP คือ Thermal Capacitor Facto From Table in J/cm³/°c

STEP-3

หาค่า TOUCH & STEP VOLTAGE

$$E_{\text{touch}} = \frac{(1,000 + 1.5 * (\text{Soil} - \text{Resistivity})) * 0.116}{\sqrt{T_s}} \quad (5.2)$$

$$E_{\text{step}} = \frac{(1,000 + 6 * (\text{soil} - \text{Resistivity})) * 0.116}{\sqrt{T_s}} \quad (5.3)$$

STEP-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะการออกแบบเบื้องต้นให้ได้ค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุดจะเริ่มออกแบบจากการไปใช้

หาค่าความยาวของตัวนำที่น้อยที่สุดแล้วนำมาจัดรูปร่างของระบบต่อลงดินตามสมการ

$$L_{\min} = \frac{KI (\text{Soil - Resistivity}) \sqrt{T_s}}{165 + 0.25(\text{Gravel - Resistivity})} \quad (5.4)$$

เมื่อ

T_s คือ เวลาการ Interupt ของอุปกรณ์ป้องกัน

K คือ Correction factor มีค่าประมาณ 1.2-1.3

เมื่อได้ L_{\min} ทำการกำหนดขนาดตามสมการ

$$A = XY \quad (5.5)$$

$$L_{\min} = (N_A X) + (N_B Y) \quad (5.6)$$

$$\text{และ} \quad D = \frac{X}{(N_B - 1)} = \frac{Y}{(N_A - 1)} \quad (5.7)$$

เมื่อ

A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

X = ความกว้างของสถานีไฟฟ้า

Y = ความยาวของสถานีไฟฟ้า

N_A = จำนวน Conductor แนวแกน X

N_B = จำนวน Conductor แนวแกน Y

D = ระยะห่างระหว่าง Conductor

STEP-5

หาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน Grid Resistance(R_g) จากสมการ

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \quad (5.8)$$

เมื่อ

L = ความยาวของตัวนำต่อลงดิน(เมตร)

h = ความลึกของตัวนำต่อลงดิน(เมตร)

STEP-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จากหลักการที่กล่าวมาแล้วเนื่องมาจาก Neutral Conductor ตลอดจน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยี่สิบห้า มิถุนายน ๒๕๖๓

Auxiliary Grid ที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นจะได้ว่า

$$I_G = C_p I_g D_f \quad (5.9)$$

$$C_p = 1$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{Ta(1 - e^{-tf/Ta})}{tf}} \quad (5.10)$$

$$I_g = S_f I_f \quad (5.11)$$

เมื่อ

$$t_f = \text{fault duration in s}$$

$$T_a = 0.0636$$

$$S_f = \text{Current division factor}$$

STEP-7

ตรวจสอบค่า Grid Potention ถ้ามีค่าน้อยกว่า Etouch 50 แสดงว่าความยาวของตัวนำและรูปร่าง Mat อยู่ในขอบเขตความปลอดภัย แต่ถ้ามากกว่าหรือเท่ากับต้องตรวจสอบค่า Mesh & Step Voltage ต่อ

STEP-8

คำนวณค่า Mesh Voltage จาก

$$E_m = \rho I_G K_m K_i / L \quad (5.12)$$

คำนวณหาค่า Step Voltage จาก

$$E_s = \rho I_G K_s K_i / L \quad (5.13)$$

$$K_s = \frac{7}{22} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1(1-0.5^{2n})}{D} \right] \quad (5.14)$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n \quad (5.15)$$

$$K_m = \ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{Kh} \ln \left[\frac{8}{3.14 * (2n-1)} \right] \quad (5.16)$$

$$K_{ii} = 1 / (2n)^{2n} \quad (5.17)$$

$$K_h = \sqrt{1+h} \quad (5.18)$$

$$\eta = \frac{1}{(n \cdot n_B)^{1/2}} \quad (5.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STEP-9

เปรียบเทียบค่า Mesh Voltage ถ้าน้อยกว่า E_{touch} 50 แสดงว่าการออกแบบอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยแต่ถ้ามากกว่าต้องมีการปรับค่า D, n, L, L_r ใหม่

STEP-10

ตรวจสอบค่า Step Voltage ถ้าน้อยกว่า E_{step} แสดงว่าการออกแบบอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยแต่ถ้ามากกว่าต้องมีการปรับค่า D, n, L, L_r ใหม่

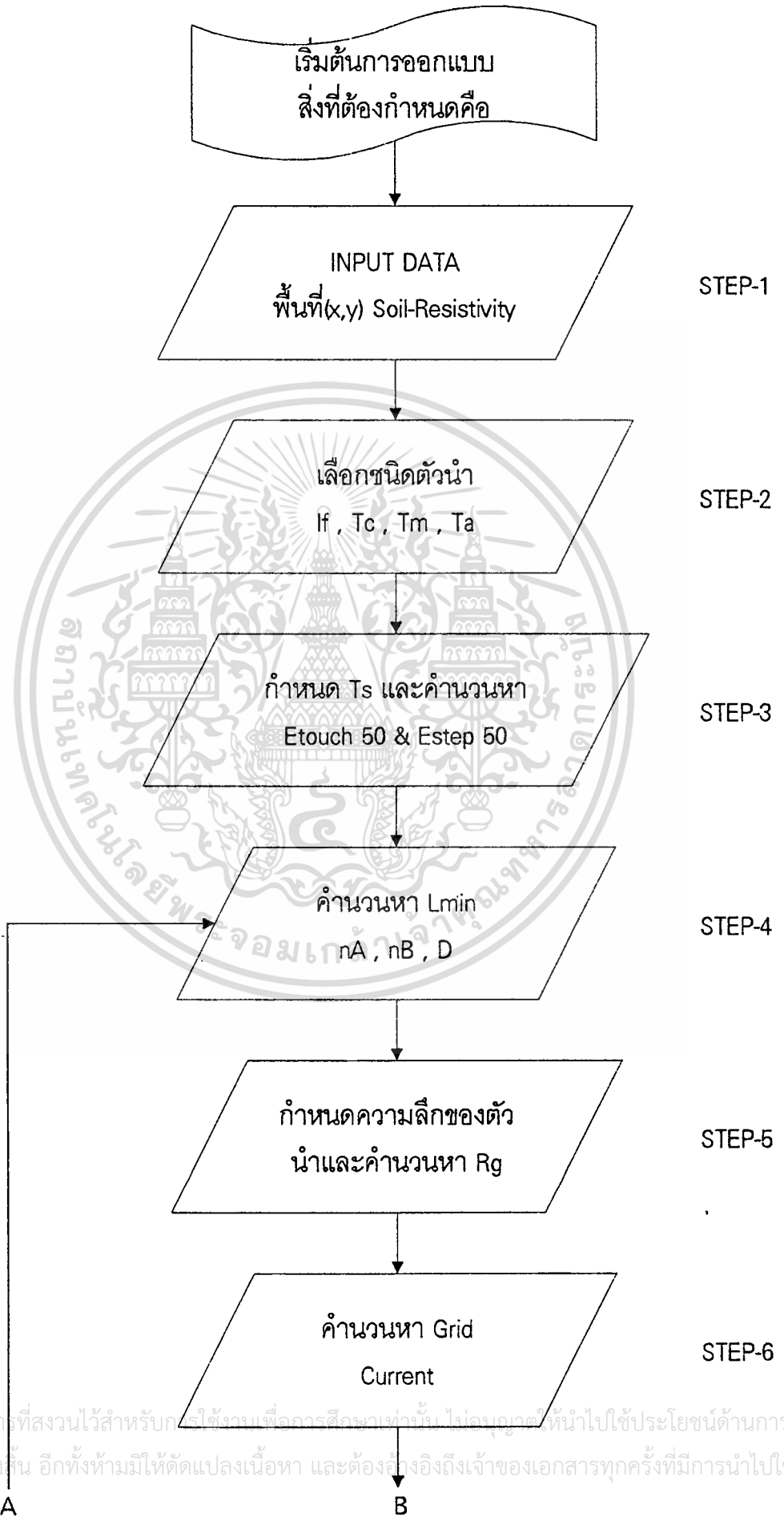
STEP-11

ทำการปรับค่า D, n, L, L_r โดยการเพิ่มจำนวน Conductor หรือ ลด Space ของ Parallel grid , เพิ่ม Ground rod

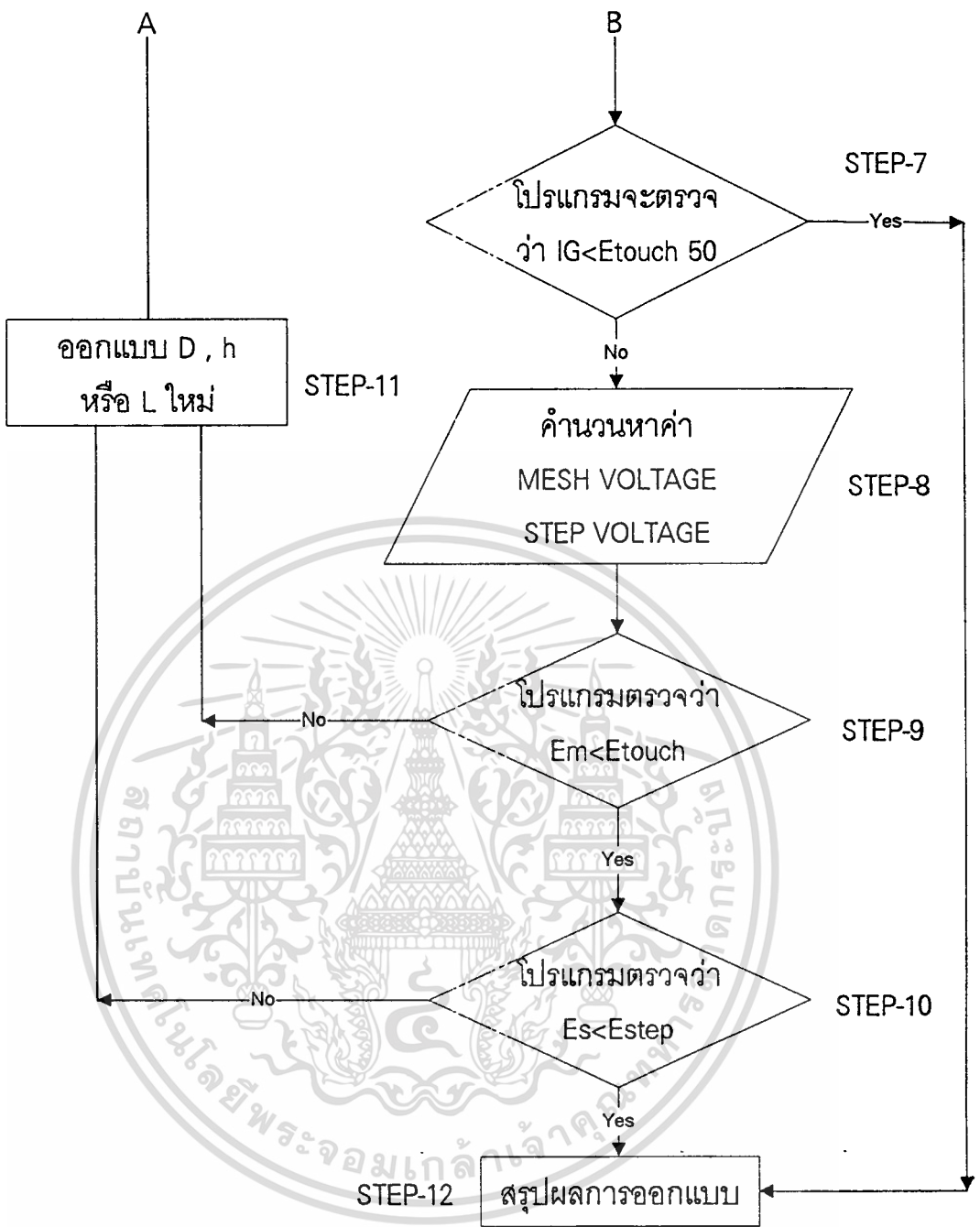
STEP-12

เมื่อได้รูปร่างของ Ground rod แล้วนำไปจัดทำแบบรายละเอียดของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยที่อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกส่วนต้องมีการต่อเชื่อมกันหมด ค่าที่แสดงออกมาในส่วนประมวลผลของโปรแกรมคือ ชนิดของตัวนำ ความยาวของตัวนำ ระยะห่างของตัวนำและรูปทรงของ Ground Mat

ขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญานให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
PROGRAM SUBSTATION_DESIGN;
```

```
USES Crt;
```

```
VAR COUNT,A,A1,A2,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S:Real;
```

```
T,U,V,W,X,Y,Z,AA,BB,CC,DD,EE,FF,GG,HH,II,JJ:Real;
```

```
KK,LL,MM,NN,OO,PP,QQ,RR,SS,TT,UU,VV,WW,XX,YY,ZZ:Real;
```

```
DIA,AAA,BBB,CCC,DDD,EEE,WWW,XXX,YYY,ZZZ,Rm:Real;
```

```
Alpha,Beta,Rf,R2fpe,BOX1,BOX2,BOX3,BOX4,BOX5,BOX6:Real;
```

```
BOX7,BOX8,BOX9,BOX10,BOX11,BOX12,BOX13,BOX14:Real;
```

```
BEGIN
```

```
Clrscr;
```

```
Write('*****')
```

```
Writeln('*****');
```

```
Write(' * ') ;
```

```
Writeln(' * ');
```

```
Write(' * COMPUTER AIDED DESIGN FOR GROUNDING')
```

```
Writeln(' SYSTEM *');
```

```
Write(' * ') ;
```

```
Writeln(' * ');
```

```
Write(' * BY ') ;
```

```
Writeln(' * ');
```

```
Write(' * ') ;
```

```
Writeln(' * ');
```

```
Write(' * MR.CHALEMPORN CHALEYKIT ') ;
```

```
Writeln(' * ');
```

```
Write(' * ') ;
```

```
Writeln(' * ');
```

```
Write('*****')
```

```
Writeln('*****');
```

```
Write('Please enter width of substation(m).....');Readln(A1);
```

```
Write('Please enter length of substation(m).....');
```

```
Readln(A2);A := A1*A2;
```

```
Write('Please enter resistivity of soil(ohm-m).....');
```

```
Readln(B);
```

```
REPEAT
```

```
REPEAT
```

```
Writeln('Please selection type of material.....');
```

```
Writeln('1 : Standard Annealed Soft Copper Wire');
```

```
Writeln('2 : Commercial Hard Drawn Copper Wire');
```

```
Writeln('3 : Copper-Clad Steel Core Wire');
```

```
Writeln('4 : Copper-Clad Steel Core Wire');
```

```
Writeln('5 : Commercial EC Aluminum Wire');
```

```
Writeln('6 : Aluminum Alloy Wire 5005');
```

```
Writeln('7 : Aluminum Alloy Wire 6201');
```

```
Writeln('8 : Aluminum-Clad Steel Core Wire');
```

```
Writeln('9 : Zinc-Coated Steel Core Wire');
```

```
Writeln('10 : Stainless Steel No. 304');
```

```
Write('Please select.....');Readln(C);
```

```
UNTIL (C>0) AND (C<11);
```

```
IF C=1 THEN BEGIN D:=100;E:=0.00393;F:=234;G:=1083;
```

```
H:=1.7241;I:=3.422;
```

```
END ELSE IF C=2 THEN BEGIN
```

```
D:=97;E:=0.00381;F:=242;G:=1084;H:=1.7774;I:=3.422;
```

```
END ELSE IF C=3 THEN BEGIN
```

```
D:=40;E:=0.00381;F:=245;G:=1084;H:=4.397;I:=3.846;
```

```
END ELSE IF C=4 THEN BEGIN
```

```
D:=30;E:=0.00378;F:=245;G:=1084;H:=5.862;I:=3.846;
```

```
END ELSE IF C=5 THEN BEGIN
```

```
D:=61;
```

```
E:=0.00403;
```

```
F:=228;
```

```
G:=657;
```

```
H:=2.862;I:=2.556;
```

```
I:=2.556;
```

```
END ELSE IF C=6 THEN BEGIN
```

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ทั้งนี้ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

D:=53.5;
E:=0.00353;
F:=263;
G:=660;
H:=3.2226;
I:=2.598;
END ELSE IF C=7 THEN BEGIN
D:=52.5;
E:=0.00347;
F:=268;
G:=660;
H:=3.284;
I:=2.598;
END ELSE IF C=8 THEN BEGIN
D:=20.3;
E:=0.00360;
F:=258;
G:=660;
H:=8.4805;
I:=2.67
END ELSE IF C=9 THEN BEGIN
D:=8.5;
E:=0.0032;
F:=293;
G:=419;
H:=20.1;
I:=3.931;
END ELSE BEGIN
D:=2.4;
E:=0.0013;
F:=749;
G:=1400;
H:=72;
I:=4.032;END;
Write('Please enter rms fault current in substation(KA).....');
Readln(J);Clrscr;
Write('Please enter time of current flow(Tc).....');
Readln(K);
Write('Please enter maximum allowable temperature(Tm).....');
Readln(L);Write('Please enter ambient temperature(Ta).....');
Readln(M);Repeat
Write('Please enter depth of ground grid morethan 0.25 and ');
Write('lessthan 2.5(m).....');
Readln(II);
Until (II>0.25) and (II<2.5);
O:=(K*E*H*10000)/I;
P:=1+((L-M)/(F+M));
Q:=LN(P);
R:=SQRT(O/Q);
S:=R*J;
Writeln('Conductor cross section is ',S:1:2,' mm^2');
DIA := SQRT(S)/886;
UNTIL DIA < 0.25*II;
Writeln('Diameter is ',DIA:1:5, '(m) < ',0.25*II:1:2,' (m)');
Write('Please enter time interupt of protection equipment in ');
Write('sec.....');
Readln(T);U:=SQRT(T);
V:=(116+(0.174*B))/(SQRT(T));
W:=(116+(0.696*B))/(SQRT(T));
Writeln('E-touch is ',V:1:2,' V');เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Writeln('E-step is ',W:1:2,' V');
X:=J;ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Y:=(1.25*B*J*U*1000)/165;
REPEAT Z:=2.5;

```

```

REPEAT AA:=(A1/Z)+1;
BB:=(A2/Z)+1;
Z:=Z+0.01 UNTIL AA*BB <= 625;
CC:=(AA*A2)+(BB*A1);
Writeln('Spacing between parallel conductors is ',Z:1:2,' (m)');
Writeln('Length minimum of conductor is ',Y:1:2,' m');
Writeln('Length of conductor in substation is ',CC:1:2,' m');
UNTIL CC>Y;
DD:=1/CC;
EE:=1/SQRT(20*A);
FF:=1/(1+II*SQRT(20/A));
GG:=1+FF;
HH:=B*(DD+EE*GG);
Write('Please enter current division factor.....');
Readln(YYY);
Write('Please enter fault Duration in sec.....');Readln(WWW);
XXX:=Sqrt(1+(0.0636/WWW)*(1-EXP(-WWW/0.0636)));
ZZZ:=1000*J*YYY*XXX;
KK:=SQRT(1+II);
LL:=(CC*CC)/16*II*DIA;
MM:=( (CC+2*II) * (CC+2*II) ) /8*CC*DIA;
NN:=II/4*DIA;
OO:=LN(LL+MM-NN);
PP:=1/KK;
QQ:=2.54/(2*SQRT(AA*BB)-1);
RR:=LN(QQ);
SS:=PP*RR;
TT:=0.159*(OO+SS);
UU:=0.656+0.172*(SQRT(AA*BB));
VV:=(B*ZZZ*TT*UU)/CC;
WW:=1/2*II;
XX:=1/(CC+II);
YY:=0.5;
COUNT:=SQRT(AA*BB);REPEAT YY:=YY*0.5;COUNT:=COUNT-1;
UNTIL COUNT<4;
YY:=(1-YY)/CC;
ZZ:=0.31*(WW+XX+YY);
AAA:=(B*ZZZ*ZZ*UU)/CC;
IF V<VV THEN BEGIN II:=II+0.1;
REPEAT KK:=SQRT(1+II);
LL:=(CC*CC)/16*II*DIA;
MM:=( (CC+2*II) * (CC+2*II) ) /8*CC*DIA;
NN:=(II/(4*DIA));
OO:=LN(LL+MM-NN);
PP:=1/KK;
QQ:=2.54/(2*SQRT(AA*BB)-1);RR:=LN(QQ);SS:=PP*RR;
TT:=0.159*(OO+SS);UU:=0.656+0.172*(SQRT(AA*BB));
VV:=(B*ZZZ*TT*UU)/CC;
WW:=1/2*II;
XX:=1/(CC+II);
YY:=0.5;
COUNT:=SQRT(AA*BB);
REPEAT YY:=YY*0.5;
COUNT:=COUNT-1;UNTIL COUNT<4;
YY:=(1-YY)/CC;
ZZ:=0.31*(WW+XX+YY);
AAA:=(B*ZZZ*ZZ*UU)/CC;
II:=II+0.1;
UNTIL (V>VV) OR (II>2.5);END ELSE BEGIN END;
IF II <= 2.5 THEN BEGIN Clrscr;ศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Rm:=( (ZZZ*HH) -VV) /ZZZ;
Alpha:=1+(0.05/DIA);หัดดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
Beta:=1-(0.035/II);
Rf:=3.125*B;

```

```

R2fpe := (Alpha*Beta*Rf) / 2) + HH - 2 * Rm;
BOX1 := 1;
REPEAT
TextColor(14);
Write(char(176));
BOX1 := BOX1 + 1;
UNTIL BOX1 = 81;
TextColor(15);
Write;
BOX2 := 1;
REPEAT
Write(' ');
BOX2 := BOX2 + 1;
UNTIL BOX2 = 41;
Write(char(179));
Writeln;
BOX7 := 1;
REPEAT
BOX6 := 1;
REPEAT
Write(' ');
BOX6 := BOX6 + 1;
UNTIL BOX6 = 41;
Write(char(179));
Writeln;
BOX7 := BOX7 + 1;
UNTIL BOX7 = 3;
Writeln('
H = ', II : 1 : 2);
BOX8 := 1;
REPEAT
BOX9 := 1;
REPEAT
Write(' ');
BOX9 := BOX9 + 1;
UNTIL BOX9 = 41;
Write(char(179));
Writeln;
BOX8 := BOX8 + 1;
UNTIL BOX8 = 3;
BOX11 := 1;
REPEAT
Write(' ');
BOX11 := BOX11 + 1;
UNTIL BOX11 = 41;
Writeln(char(179));
Write('
');
Write(char(198));
BOX10 := 1;
REPEAT
Write(char(205));
BOX10 := BOX10 + 1;
UNTIL BOX10 = 18;
Write(char(181));
Writeln;
Writeln;
Write('
Et(50) = ', V : 1 : 2, ' Volts > ');
Writeln('E(Mesh) = ', VV : 1 : 2, ' Volts');
Write('
Es(50) = ', W : 1 : 2, ' Volts > ');
Writeln('E(Step) = ', AAA : 1 : 2, ' Volts');
Writeln;
Write('
');
Write('
');
Write(char(201));
BOX3 := 1;
REPEAT

```



```

Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(203));
BOX3 := BOX3+1;
UNTIL BOX3=6;
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(187));
BOX5 := 1;
REPEAT
Writeln;
Write('
Write(char(204));
BOX4 := 1;
REPEAT
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(206));
BOX4 := BOX4+1;
UNTIL BOX4=6;
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(185));
BOX5 := BOX5+1;
UNTIL BOX5=3;Write(' Na = ',round(AA));
Writeln;Write('
Write(char(204));
REPEAT
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(206));
BOX4 := BOX4+1;
UNTIL BOX4=11;
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(185));
Writeln;Write('
Write(char(200));
BOX6 := 1;
REPEAT
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(202));
BOX6 := BOX6+1;
UNTIL BOX6=6;
Write(char(205));Write(char(205));Write(char(205));
Write(char(205));Write(char(205));Writeln(char(188));
Writeln('
Nb = ';Round(BB));
Writeln;
Textcolor(14);
Write('
SPACING BETWEEN ');
Writeln(' CONDUCTOR IS ',Z:1:2);
Writeln('
GRUD RESISTANCE IS ',HH:1:2,'
Write('
MUTUAL GROUND RESISTANC IS ',Rm:1:2);
Writeln('Ohm');
Write('
GROUND RESISTANCE BETWEEN CONDUCTOR ');
Writeln('is ',R2fpe:1:2,' Ohm');
END
ELSE BEGIN
Write('I can not design ground grid because H more ');
Writeln('than 2.5 (m)');
END;
Readln;
END .

```

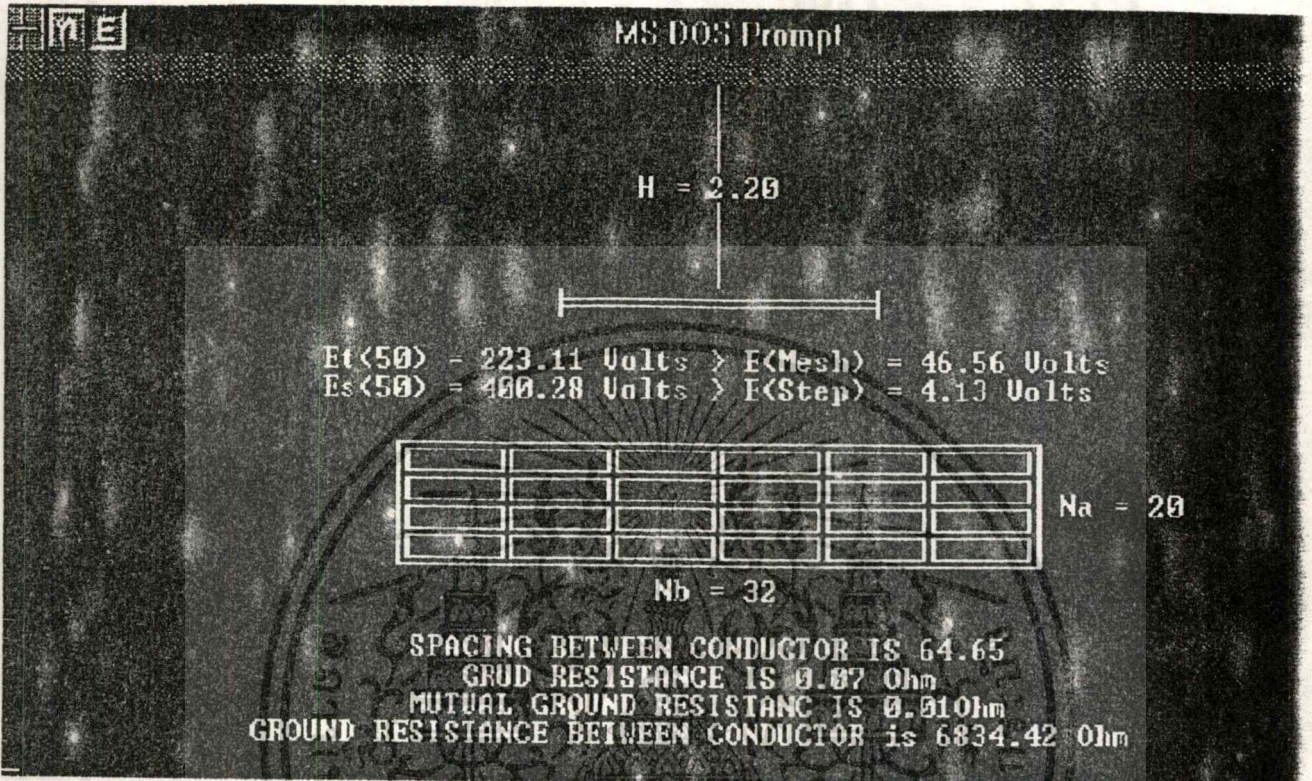
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 *
 * COMPUTER AIDED DESIGN FOR GROUNDING SYSTEM *
 *
 * BY *
 *
 * MR. CHALEMPORN CHALEYKIT *
 *

Please enter width of substation(m)1200
 Please enter length of substation(m)2000
 Please enter resistivity of soil(ohm-m)240.
 Please selection type of material.....
 1 : Standard Annealed Soft Copper Wire
 2 : Commercial Hard Drawn Copper Wire
 3 : Copper-Clad Steel Core Wire
 4 : Copper-Clad Steel Core Wire
 5 : Commercial EC Aluminum Wire
 6 : Aluminum Alloy Wire 5005
 7 : Aluminum Alloy Wire 6201
 8 : Aluminum-Clad Steel Core Wire
 9 : Zinc-Coated Steel Core Wire
 10 : Stainless Stell No. 304
 Please select.....3
 Please enter rms fault current in substation(KA)1.5

 Please enter time of current flow(Tc)0.5
 Please enter maximum allowable temperature(Tm)700
 Please enter ambient temperature(Ta)40
 Please enter depth of grid morethan 0.25 and lessthan 2.5 (m)2.
 Conductor cross section is 6.39 mm²
 Diameter is 0.00285(m) < 0.55(m)
 Please enter time interupt of protection equipment in sec.....0.5
 E-touch is 223.11 V
 E-step is 400.28 V
 Spacing between parallel conductors is 64.65(m)
 Length minimum of conductor is 1928.47 m
 Length of conductor in substation is 77457.43 m
 Please enter current division factor.....0.5
 Please enter fault Duration in sec.....0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลและวิจารณ์

ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้น จุดประสงค์หลักของการออกแบบคือ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่บุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งอันตรายที่เกิดขึ้นจะมาจากศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะที่มีความผิดปกติ และทำการออกแบบเพื่อให้เกิดความเรียบของศักดาไฟฟ้าอย่างก้าว และศักดาไฟฟ้าสัมผัสให้มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ขอบเขตความปลอดภัย สำหรับการออกแบบนี้จะเป็นการนำเอาแท่งตัวนำมาประกอบกันเป็นตะแกรง โดยในการวางตะแกรงนี้จะมีค่าของการวางมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ค่ากระแสที่ผิดปกติ ถ้ามีค่ามากก็จำเป็นที่จะต้องใช้ความถี่ในการวางมาก หรือถ้ามีการออกแบบให้มีความถี่มาก ก็เพื่อจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าอย่างก้าวอยู่ในค่าที่ไม่เกินขอบเขตความปลอดภัย

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบด้วยส่วนที่ทำการออกแบบรูปทรงตลอดจนขนาดความถี่ของการวางตะแกรงต่อลงดิน ในการที่จะทำการออกแบบรูปทรงของตะแกรงต่อลงดินนั้นจะต้องทราบข้อมูลชนิดใดบ้าง และเมื่อทำการออกแบบแล้วตะแกรงนี้ควรใช้งานที่ค่าความปลอดภัยสูงได้ และศักดาไฟฟ้าสัมผัสและศักดาไฟฟ้าอย่างก้าวควรอยู่ในขอบเขตความปลอดภัย ถ้าข้อมูลที่ทำการออกแบบแล้วไม่อยู่ในขอบเขตของความปลอดภัยแล้วควรมีแนวทางในการแก้ไขหรือปรับปรุงอย่างไร โดยในการออกแบบนี้จะใช้การคำนวณจากคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ซึ่งมีการประมวลผลที่เร็วมาก ข้อมูลเบื้องต้นที่ควรทราบในการออกแบบพอจะสรุปได้ดังนี้

1. พื้นที่และขนาดของกระแสที่ผิดปกติ

ในการออกแบบนี้ไม่เป็นว่าจะต้องมีจำนวนตัวนำมากแล้วจะมีความปลอดภัยเสมอ เพราะพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าควรมีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของการเกิดกระแสผิดปกติ ดังนั้นในการออกแบบที่ใช้จำนวนตัวนำที่มีค่ามาก ซึ่งในบางกรณีก็ไม่อาจออกแบบให้ปลอดภัยเช่นกัน

2. ความต้านทานจำเพาะของดินและวัสดุของสถานีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความต้านทานของดินจำเพาะมีค่าสูงแล้วจะมีการกระจายกระแสที่ไม่ดี และในทางกลับกันถ้าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าต่ำแล้วจะมีการกระจายกระแสที่ดี

3. น้ำหนักของร่างกาย

ถ้าในการออกแบบโดยเลือกน้ำหนักที่ 50 กิโลกรัมแล้วขอบเขตความปลอดภัยจะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ตัวนำมากกว่าเมื่อเลือกที่น้ำหนัก 70 กิโลกรัม

4. การออกแบบระบบต่อลงดินนั้น บางครั้งอาจต้องมีการต่อแท่งตัวนำลงไปในบางบริเวณ เช่นที่มุมหรือที่จุดสำคัญ และพบว่าเมื่อมีการต่อแท่งตัวนำลงไปแล้วทำให้มีการประหยัดตัวนำมากขึ้น

5. ในการออกแบบระบบต่อลงดินในบางกรณี อาจมีการใช้ตะแกรง 2 ชุด และการใช้แบบนี้มักใช้ในสถานีไฟฟ้าอยู่ภายในอาคาร เพราะในการออกแบบนี้ตะแกรงจะฝังอยู่ในคอนกรีตที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงจึงต้องออกแบบตะแกรงมาอีกชุดหนึ่งซึ่งฝังในดิน ดังนั้นกระแสส่วนใหญ่จะไหลลงตะแกรงชุดที่สองนั่นเอง

ในอีกส่วนของบริษัทยาวิพนธ์นี้คือ ส่วนที่สร้างระบบจำลองออกมาเพื่อทดสอบหาค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้าที่ได้จากสมการ เพื่อพิสูจน์ว่าสามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้หรือไม่ ตามที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีในการคำนวณและการทดสอบตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และ บทที่ 4 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์จะนำมาหาค่าประสิทธิผลความต้านทานของเท้าซึ่งมีการคำนวณหาสองวิธีคือ การหาโดยการวัดและการหาโดยการคำนวณ และค่าที่ได้ทั้งสองจะนำมาหาค่าความแตกต่างซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าค่าที่ได้มาค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยตามที่แสดงผลไว้ในบทที่ 4

สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ที่ออกแบบมานั้น สรุปผลที่ได้จากการออกแบบดังนี้คือ

- ค่าประสิทธิผลค่าความต้านทานของเท้าที่คำนวณได้จากแผ่นเท้าที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและที่ได้จากการแทนด้วยวงกลม ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันโดยพิจารณาที่ความลึกเดียวกัน

- พิจารณาที่แผ่นกราวด์กริชที่ใช้ในการทดสอบ พบว่าในกรณีของแผ่น Plate ที่จะสามารถรับภาระกระแสที่เกิดขึ้นได้ดีกว่า 16-MESH และดีกว่า 4-MESH และดีกว่า 1-MESH

เอกสารนี้เป็นการทดสอบที่ระยะห่างระหว่างแผ่นกราวด์กริชและเท้าที่ห่างมากขึ้นจะให้ค่าไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของเท้าที่มีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นการดีที่จะมีการออกแบบโดยวางแผนกราวด์กริชที่ลึกๆ เพื่อที่ว่าเท้าของบุคคลจะได้มีค่าความต้านทานมากขึ้น

- ในกรณีที่จำนวนเมฆของกราวด์กริชมีค่ามากพบว่าค่าความต้านทานของเท้าจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

- ในกรณีที่จำนวนเมฆของกราวด์กริชมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าอันตรายที่เกิดจากค่าศักดาไฟฟ้าสัมผัสจะมีอันตรายน้อยลง ($V_{สัมผัส}$ มีค่าลดลง)

สำหรับการหาค่า effective ground resistance of feet เมื่อมีกระแสผ่านร่างกาย เมื่อมีการเกิดการสัมผัสขึ้น สามารถหาได้จากศักดาไฟฟ้าสัมผัสที่ถูกแบ่งโดยผลรวมของความต้านทานของร่างกายและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.40 ซึ่งใช้ได้ในทุกกรณีในทางปฏิบัติ

อนึ่งในการทดสอบอุปกรณ์ควรทดสอบด้วยความระมัดระวังในการปฏิบัติและข้อสำคัญที่สุดคือ ต้องควบคุมแหล่งจ่ายไฟให้จ่ายความต่างศักย์ให้คงที่ เพื่อความถูกต้องของความแตกต่างของค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณ

หนังสืออ้างอิง

ธนบูรณ์ ศศิภาณุเดช ; การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง ; บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด
(มหาชน)

ศุภี บรรจงจิตร ; หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง ; บริษัท ซีเอ็ด
ยูเคชั่นจำกัด(มหาชน)

“ GROUND RESISTANCE OF THE FOOT IN SUBSTATION YARDS “ IEEE Transaction
on Power Delivery , Vol. 8 No. 1, January 1993

“ EFFECTIVE GROUND RESISTANCE OF THE HUMAN FEET IN HIGH VOLTAGE
SWITCHYARDS “ IEEE Transaction on Power Delivery , Vol. 8 No. 1, January
1993

