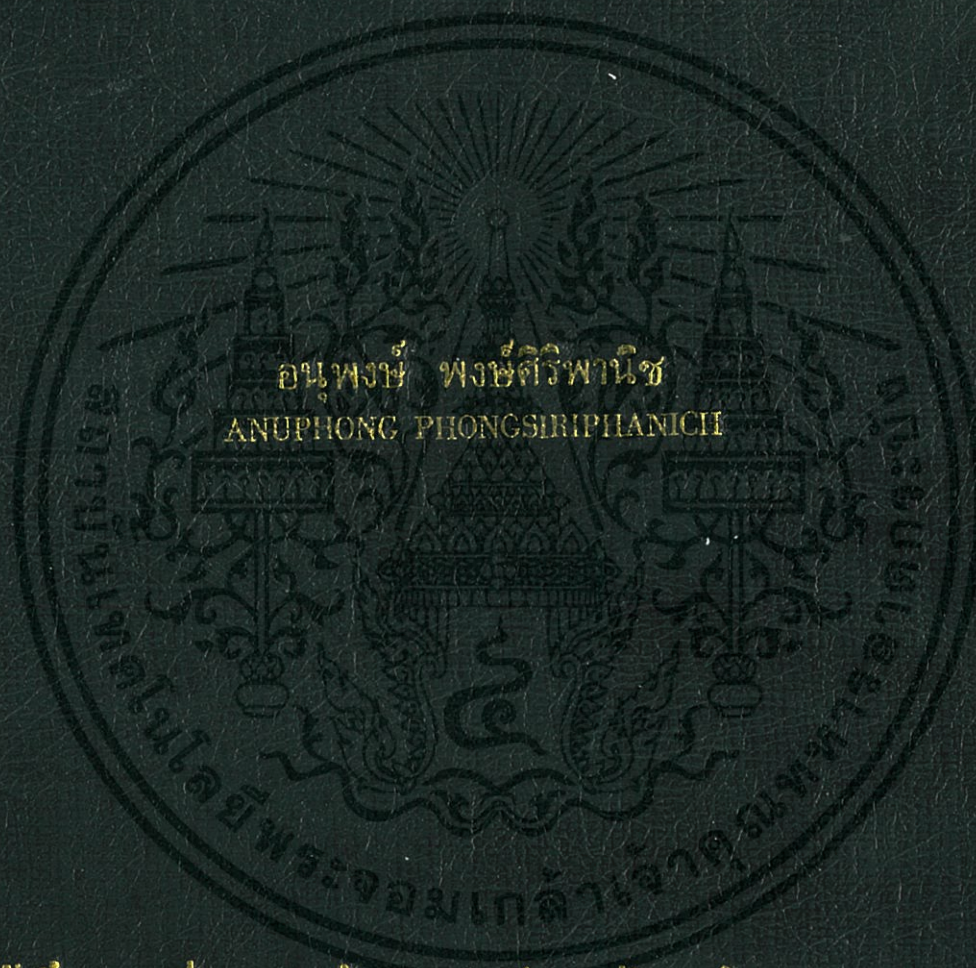


การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่เชื่อมโยงถึงกัน

SUBSTATION INTERCONNECTED GROUND SYSTEM DESIGN



อนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช
ANUPHONG PHONGSIRIPHANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-274-2

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่เชื่อมโยงถึงกัน

SUBSTATION INTERCONNECTED GROUND SYSTEM DESIGN



อนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช
ANUPHONG PHONGSIRIPHANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... ISBN 974-648-274-2 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **40123**
วัน, เดือน, ปี **1.6.ส.อ. 2544**

b.....
i.....

SUBSTATION INTERCONNECTED GROUND SYSTEM DESIGN



The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) with a sunburst above it. The emblem is surrounded by Thai script: 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) and 'ค.บ. ๒๕๒๕' (1982). The author's name 'ANUPHONG PHONGSIRIPHANICH' is printed across the center of the seal.

ANUPHONG PHONGSIRIPHANICH

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ไปเผยแพร่หรือใช้งานถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2001
ISBN 974-648-274-2








COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบต่อลงดิน ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่เชื่อมโยงถึงกัน
SUBSTATION INTERCONNECTED GROUND SYSTEM DESIGN
ชื่อนักศึกษา นายอนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช
รหัสประจำตัว 37061134
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศุที บรรจงจิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
ผศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	
รศ.ศุที	บรรจงจิตร	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 19 เมษายน 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 15 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2544

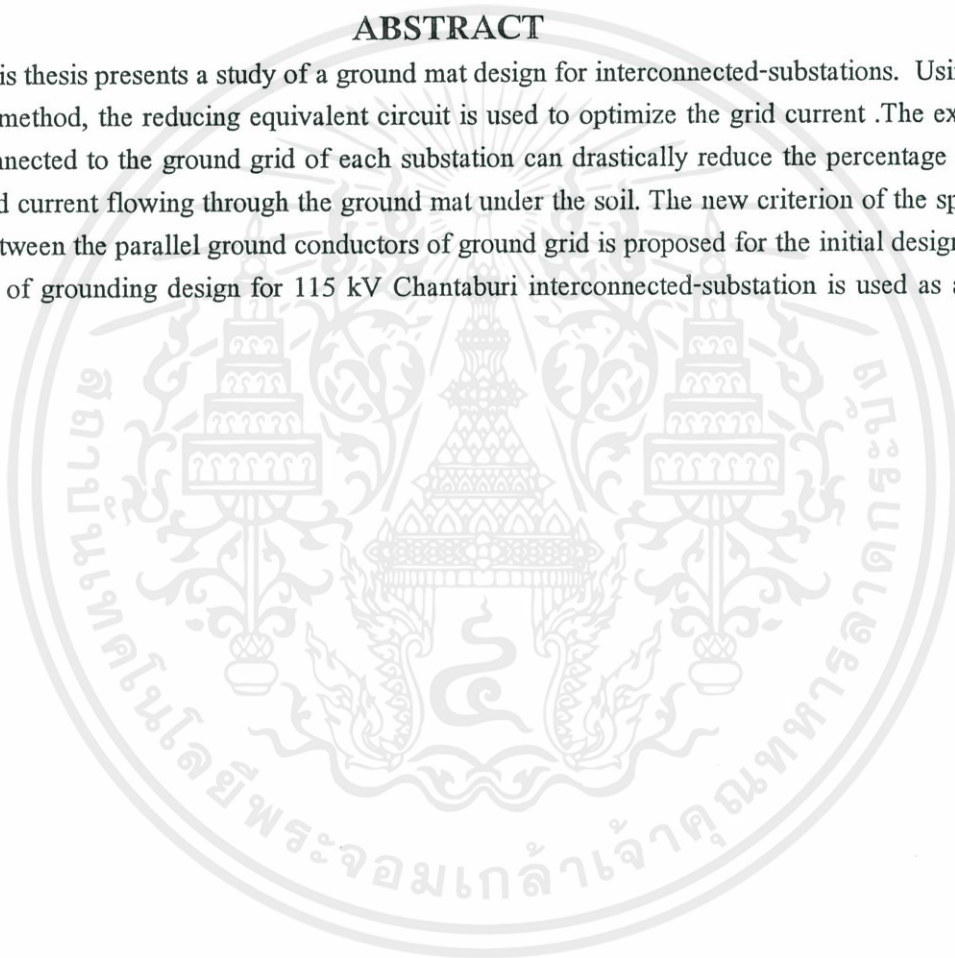
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Substation Interconnected Ground System Design
Student	Mr. Anuphong Phongsiriphanich
Student ID.	37061134
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Sulee Banjongjit

ABSTRACT

This thesis presents a study of a ground mat design for interconnected-substations. Using the decoupled method, the reducing equivalent circuit is used to optimize the grid current. The external circuits connected to the ground grid of each substation can drastically reduce the percentage of the total ground current flowing through the ground mat under the soil. The new criterion of the specific distance between the parallel ground conductors of ground grid is proposed for the initial design. The application of grounding design for 115 kV Chantaburi interconnected-substation is used as a case study.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษา จาก รศ. ศุติ บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ผศ. นิตส์น กฤษณจินดา ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณสมชาย ล้นทกุล และคุณอนุโลม อุดมะพันธ์ กงออกแบบระบบสายส่งและสถานีไฟฟ้าย่อยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผู้ซึ่งกรุณาให้ข้อมูลเบื้องต้น ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พนักงานบริษัท ศรีอุทอง จำกัด ซึ่งมีส่วนช่วยในการเขียนภาพประกอบในวิทยานิพนธ์และช่วยจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณธิตี เอื้อมงคล เพื่อนนักศึกษาที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันถึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.7 ข้อจำกัดการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและตัวแปรที่สำคัญของการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	5
2.1 ขอบเขตความปลอดภัย.....	5
2.2 ตัวแปรที่สำคัญของการออกแบบระบบต่อลงดิน.....	7
-	
บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณ Decoupled Method.....	15
3.1 ขั้นตอนของ Decoupled Method.....	15
3.2 ประโยชน์และผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ.....	22
บทที่ 4 หลักการเบื้องต้นและข้อกำหนดของ Decoupled Method.....	23
4.1 จำนวนจุดที่ต้องการทราบค่า.....	23
4.2 จุดที่ต้องการพิจารณาและที่ต้องการทราบค่า.....	23
4.3 จุดวิกฤตการเกิดฟลลท์.....	24
4.4 เหตุผลในการพิจารณาจุดวิกฤตการเกิดฟลลท์.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอวยพรถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5 การหลีกเลี่ยงตำแหน่งฟอลท์ที่ไม่จำเป็นในสายส่ง.....	26
4.6 การใช้ประโยชน์จากโปรแกรมการคำนวณ Short Circuit	27
4.7 ส่วนประกอบของกระแสฟอลท์	27
4.8 การแทนวงจรขั้วบับันไดด้วยวงจรสมมูลพาย.....	28
4.9 การคำนวณค่า V_A และ V_B ของวงจรขั้วบับันไดในรูปแบบที่เป็น Non-Uniform Pis...29	
4.10 การคำนวณค่า V_A และ V_B ของวงจรขั้วบับันไดในรูปแบบของ Uniform Pis.....	30
4.11 ตัวอย่างของการคำนวณวงจรขั้วบับันได	31
4.12 Characteristic Length	32
บทที่ 5 การคำนวณของตัวแปรในวงจรขั้วบับันได	34
5.1 ตัวอย่างของระบบและวิธีการใช้ Decoupled Method	34
5.2 กำหนดเป้าหมายที่ต้องการคำนวณ	35
5.3 องค์ประกอบในการช่วยออกแบบ	35
5.4 ขั้นตอนการคำนวณ	35
5.5 หลักการพิจารณาสถานีไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน	41
บทที่ 6 การออกแบบระบบต่อลงดินโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน..	43
6.1 การออกแบบระบบต่อลงดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	43
6.2 การประยุกต์ใช้งาน	50
6.3 การปรับปรุงการออกแบบโดยการปรับปรุงระยะห่างระหว่างตัวนำ.....	56
6.4 ผลของความต้านทานจำเพาะของดินต่อค่ากระแสกริด	59
6.5 ผลของกระแสลัดวงจรต่อค่ากระแสกริด	65
6.6 การหาค่ากระแสกริดโดยใช้กราฟ	74
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง (References)	79
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	
ภาคผนวก ก : หลักการของ Self-Neutralized Current	80
ไม่ว่ากรณีใดๆทางสน อักทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	
ภาคผนวก ข : ผลลัพธ์ของวงจรขั้วบับันได	82

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข : ผลลัพธ์ของวงจรชั้นบันได	82
ภาคผนวก ค : Decoupled Method	95
ภาคผนวก ง : ข้อมูลการออกแบบ	101
ภาคผนวก จ : ผลงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ที่เชื่อม โยงถึงกัน”	104
ประวัติผู้เขียน	111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากการปรับปรุงค่า D_x, D_y	59
6.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	64
6.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสลัดวงจร.....	68
6.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณกรณีลดค่า Z_1 และเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน.....	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Touch Potential.....	4
2.2 Step Potential.....	6
3.1 Ground wire uniform section.....	16
3.2 การจำแนกของ Mutual coupling ของเฟส.....	17
3.3 การแทนค่ากระแสลัดวงจรและกระแสนิวทรอลของหม้อแปลงด้วยแหล่งจ่ายกระแส.....	18
3.4 สายตัวนำต่อลงดินของวงจรขนาน.....	19
3.5 วงจรสมมูลของวงจรขนาน.....	19
3.6 เงื่อนไขของวงจรขนาน.....	20
3.7 การแทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรพาย.....	21
3.8 วงจรสมมูลสุดท้ายที่ลดลงแล้ว.....	21
4.1 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน.....	23
4.2 กรณีฟอลต์เกิดในสถานีไฟฟ้า.....	25
4.3 กรณีฟอลต์เกิดระหว่างสายส่ง.....	25
4.4 กระแสฟอลท์ที่ไหลใน Steel ground wire.....	27
4.5 กระแสฟอลท์ที่ไหลใน ACSR ground wire.....	28
4.6 วงจรพายหลายวงจรถูกแทนด้วยวงจรสมมูลพาย 1 วงจร.....	29
4.7 วงจรสมมูลพายที่ใช้ทดแทนวงจรชั้นบันไดที่เป็น Non-Uniform.....	30
4.8 ตัวอย่างการคำนวณวงจรชั้นบันได.....	32
4.9 “Characteristic Length” (CL) หรือ Space constant (SC).....	33
5.1 ตัวอย่างของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน.....	34
5.2 กระแส Zero Sequence ที่กระจายไปตามสายเฟสและนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	37
5.3 แสดงวงจรสมมูลที่ลดลงแล้ว หลังจากขั้นตอนที่ 5.....	38
5.4 แสดงวงจรสมมูลที่ลดลงแล้วหลังจากขั้นตอนที่ 6.....	38
5.5 แทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาย (A_1 - B_1) และ (A_2 - B_2).....	39
5.6 ลักษณะของวงจรระหว่างจุด (1-2) และ (11-12).....	39
5.7 ทดแทนแหล่งจ่ายกระแสลงในวงจร.....	40
5.8 แสดงวงจรสมมูลที่ลดลงแล้วโดยมีคุณสมบัติเหมือนรูปที่ 5.1.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 Flow Chart การคำนวณระบบต่อลงดิน.....	44
6.2 การคำนวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า.....	45
6.3 จำนวนขนาดของตัวนำต่อลงดิน.....	46
6.4 จำนวนหาขอบเขตความปลอดภัย.....	46
6.5 กำหนดขนาด D_x, D_y และคำนวณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน.....	47
6.6 อ่านข้อมูลของระบบต่อลงดินที่มาเชื่อมต่อ.....	48
6.7 อ่านข้อมูล $Z_1, Z_2, I_0, & I_N$	48
6.8 Mutual Impedance ของสาย Ground.....	49
6.9 ผลการคำนวณ I_G, GPR, E_m, E_s	49
6.10 ตัวอย่างของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน.....	50
6.11 แสดงวงจรสมมูลพาย ของระบบต่อลงดินจากรูปที่ 6.10.....	50
6.12 การคำนวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า.....	52
6.13 จำนวนขนาดของตัวนำต่อลงดิน.....	52
6.14 จำนวนหาขอบเขตความปลอดภัย.....	53
6.15 กำหนดขนาด D_x, D_y และคำนวณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน.....	53
6.16 อ่านข้อมูลของระบบต่อลงดินที่มาเชื่อมต่อ.....	54
6.17 อ่านข้อมูล $Z_1, Z_2, I_0, & I_N$	54
6.18 Mutual Impedance ของสาย Ground.....	55
6.19 ผลลัพธ์จากการคำนวณ.....	56
6.20 ปรับปรุงการออกแบบ $N_x=4, N_y=4$	56
6.21 ผลลัพธ์กรณี $N_x=4, N_y=4$	57
6.22 ปรับปรุงการออกแบบ $N_x=3, N_y=3$	57
6.23 ผลลัพธ์กรณี $N_x=3, N_y=3$	58
6.24 ความต้านทานจำเพาะของดิน กรณี $\rho=50$ โอห์ม-เมตร.....	60
6.25 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน กรณี $\rho=50$ โอห์ม-เมตร.....	60
6.26 ผลลัพธ์จากการคำนวณ กรณี $\rho=50$ โอห์ม-เมตร.....	61
6.27 ความต้านทานจำเพาะของดิน กรณี $\rho=100$ โอห์ม-เมตร.....	61
6.28 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน กรณี $\rho=100$ โอห์ม-เมตร.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.29 ผลลัพธ์จากการคำนวณ กรณี $\rho=100$ โอห์ม-เมตร.....	62
6.30 ความต้านทานจำเพาะของดิน กรณี $\rho=150$ โอห์ม-เมตร.....	63
6.31 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน กรณี $\rho=150$ โอห์ม-เมตร.....	63
6.32 ผลลัพธ์จากการคำนวณ กรณี $\rho=150$ โอห์ม-เมตร.....	64
6.33 ค่าของ I_0, I_N , กรณีกระแสลัดวงจร=4000 แอมป์.....	65
6.34 ผลลัพธ์จากการคำนวณ, กรณีกระแสลัดวงจร=4000 แอมป์.....	66
6.35 ค่าของ I_0, I_N , กรณีกระแสลัดวงจร=8000 แอมป์.....	66
6.36 ผลลัพธ์จากการคำนวณ, กรณีกระแสลัดวงจร=8000 แอมป์.....	67
6.37 ค่าของ I_0, I_N , กรณีกระแสลัดวงจร=16000 แอมป์.....	67
6.38 ผลลัพธ์จากการคำนวณ, กรณีกระแสลัดวงจร=16000 แอมป์.....	68
6.39 $Z_L(CT-CTA)=5.6 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	69
6.40 ผลลัพธ์จากการคำนวณ $Z_L(CT-CTA)=5.6 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	70
6.41 $Z_L(CT-CTA)=2.8 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	70
6.42 ผลลัพธ์จากการคำนวณ $Z_L(CT-CTA)=2.8 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	71
6.43 $Z_L(CT-CTA)=0.246 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	71
6.44 ผลลัพธ์จากการคำนวณ $Z_L(CT-CTA)=0.246 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	72
6.45 $Z_L(ทุกวงจร)=0.246 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	72
6.46 ผลลัพธ์จากการคำนวณ $Z_L(ทุกวงจร)=0.246 \Omega/Km, I_C=16000$ Amp.....	73
6.47 การเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน $N_x=15, N_y=15$	73
6.48 $Z_L(CT-CTA)=0.226 \Omega/km, I_C=16000A$	74
6.49 ผลการคำนวณกรณี $N_x=15, N_y=15, Z_L(CT-CTA)=0.226 \Omega/km, I_C=16000A$	74
6.50 แสดงการหาค่ากระแสกริดโดยการใช้กราฟ.....	76
ก.1 คุณสมบัติของ Uniform Section.....	80
ก.2 การจำแนก Mutual Coupling ของสายเฟส.....	81
ข.1 Infinite Ladder Circuit (ILC).....	83
ข.2 อิมพีแดนซ์ Z_e ที่มองทางด้านขวาของ (1) และ (2) ของ ILC.....	84
ข.3 การกระจายกระแสของวงจร ILC.....	85
ข.4 Current Distribution Factor (K) ของ ILC.....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.5 กระแสที่ลดลงไปตามวงจร ILC.....	87
ข.6.1 วงจร FLC คำนวณด้วยวิธีแมทริกซ์.....	88
ข.6.2 กระแสไหลลงสู่ดินของวงจร FLC ในรูปของ Power Series.....	89
ข.7.1 ผลลัพธ์ของ FLC ที่มีจุดร่วม = 2.....	91
ข.7.2 ผลลัพธ์ของ FLC ที่มีจุดร่วม = 5.....	92
ข.8 การแทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาย.....	93
ค.1 Decoupled ของวงจรเดี่ยว.....	95
ค.2 Decoupled ของวงจรชั้นบันได.....	96
ค.3 ผลลัพธ์ของวงจรชั้นบันได.....	98
ค.4 วงจรที่พิจารณาตามข้อ ค-5.....	99
ค.5 Decoupled ของสาย Ground Wire ,3 Uniform Sections.....	100
ค.6 Decoupled Method ที่รวม Terminal Substation.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะมีการเชื่อมโยงกันด้วยระบบต่อลงดินภายนอก เช่น Overhead Ground Wire, Sheath of Power Cable เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงผลกระทบของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับสถานีนั้นๆ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาผลกระทบของระบบต่อลงดินภายนอกที่เชื่อมโยงกับระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าต่อค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้านั้น เพราะค่าของกระแสกริดนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวคือมีความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าสูงสุดและให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินควบคู่กันไป

1.3 สมมติฐานทางการศึกษา

ระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อนี้ จะมีผลทำให้เกิดมีการกระจายของกระแสลัดวงจรไปตามระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้านั้นๆ ทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้ามีค่าลดลง ปริมาณของกระแสกริดที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับลักษณะและจำนวนของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อ การพิจารณาค่ากระแสกริดนี้อาศัยหลักการของ Current Divider และทฤษฎีของนอร์ตันมาประกอบการพิจารณา

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้จะศึกษาผลกระทบของระบบต่อลงดินภายนอกต่อการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก โดยเฉพาะระบบต่อลงดินภายนอกที่เป็นสาย Overhead Ground Wire เนื่องจากระบบสายส่งของประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเช่นนี้ และสามารถหาข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาได้อย่างละเอียด

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

เนื่องจากระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อนั้นจะอยู่ในรูปของวงจรขั้วบันได ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรจำนวนมาก ดังนั้นการพิจารณาจำเป็นต้องลดจำนวนของตัวแปรในวงจรให้น้อยลง ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธี Decoupled Method [2,3] มาพิจารณา ประกอบกับมาตรฐานการออกแบบระบบต่อลงดิน IEEE Std-80/1986 [1] พร้อมกันนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินขั้นใหม่ โดยการกำหนดขนาดของระยะห่างระหว่างตัวนำที่ขนานกันของระบบต่อลงดิน เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการออกแบบแล้วจึงนำไปหาค่าของกระแสกริดที่แท้จริงของระบบ จากนั้นจึงคำนวณหาค่า Touch Voltage และ Step Voltage เทียบกับขอบเขตความปลอดภัย จากวิธีการและแนวคิดข้างต้นได้นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจันทบุรีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นสถานีไฟฟ้าขนาดแรงดัน 115 กิโลโวลต์และมีการเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าข้างเคียงอีก 4 สถานี และได้เปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการใช้กราฟในการหาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงตัวแปรอื่นๆ ที่กระทบกับค่าของกระแสกริด เช่น ความต้านทานจำเพาะของดินที่เปลี่ยนไป, ค่าของกระแสลัดวงจรที่เพิ่มมากขึ้นและการลดค่าของอิมพีแดนซ์ของสาย Overhead Ground Wire เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาประกอบการวิเคราะห์การออกแบบในกรณีต่างๆ

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

ระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อนี้อยู่บนสมมติฐานที่ทุกๆ วงจรพามี SPAN เท่าๆ กัน ซึ่งในความเป็นจริง SPAN ดังกล่าวจะมีขนาดไม่เท่ากันทั้งหมด แต่หลักการ Decoupled Method สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน และถ้าหากระบบต่อลงดินภายนอกมีความยาวมากๆ ระยะ SPAN ที่ไม่เท่ากันนี้จะมีผลกระทบต่อค่าการออกแบบระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าด้วย

นอกจาก SPAN แล้ว ตัวแปรที่ต้องกำหนดอยู่ในขอบเขตอีกตัวหนึ่งคือความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า ซึ่งในการก่อสร้างจริงๆ ค่าของความต้านทานของระบบต่อลงดินดังกล่าวจะถูกกำหนดให้อยู่ในขอบเขตค่าๆหนึ่ง เช่นของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะกำหนดให้ค่าของความต้านทานระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้าต้องไม่เกิน 5 โอห์ม ในการศึกษานี้จะใช้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า 5 โอห์มเท่าๆกันทุกจุดเพื่อสะดวกในการคำนวณ

1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำหลักการข้างต้นไปคำนวณออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้ภาษา Visual Basic ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวมีข้อจำกัดที่จำนวนวงจรภายนอกที่มาเชื่อมต่อนั้นต้องไม่เกิน 4 วงจร แต่หลักการ Decoupled Method สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบต่อลงดิน

ภายนอกที่มากกว่า 4 วงจรได้เช่นกัน และจุดที่ต้องการทราบค่าที่ต้องเหลือในวงจรสมมูลต้องไม่เกิน 40 จุด เพราะจะทำให้ผลการคำนวณอาจคลาดเคลื่อนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

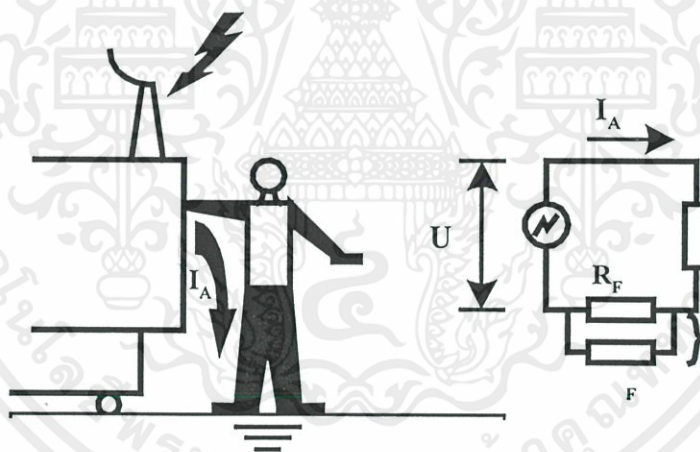
บทที่ 2

ทฤษฎีและตัวแปรที่สำคัญของการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยประการที่สำคัญที่สุดคือความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้น ๆ เป็นหลัก ดังนั้น ก่อนที่จะออกแบบระบบต่อลงดินจำเป็นต้องทราบขอบเขตความปลอดภัยเพื่อใช้เป็นมาตรฐานเชิงเปรียบเทียบในการออกแบบ

2.1 ขอบเขตความปลอดภัย

องค์ประกอบสำคัญที่นำมาใช้ในการคำนวณหาขอบเขตความปลอดภัยนั้น จะพิจารณาจากเส้นทางที่มีการไหลของกระแสบางส่วน ผ่านตัวบุคคลลงสู่ดิน ในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจร (Fault Current) ขึ้นพิจารณาได้จากรูปที่ 2.1 และ 2.2 [1]



รูปที่ 2.1 Touch Potential

รูปที่ 2.1 แสดงถึงบุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อยสัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินไว้ ขณะมีกระแสลัดวงจร (Fault Current) ไหลลงดินจะทำให้เกิดค่าศักดาไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอขึ้นที่ผิวดินและจะทำให้บุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าได้รับค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดที่สัมผัสกับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีการต่อลงดินไว้กับจุดที่เท้าทั้งสองข้างยืนอยู่ เมื่อได้รับค่าความต่างศักย์จะทำให้มีกระแสส่วนหนึ่งไหลผ่านร่างกาย I_A (Current through the Accidental Circuit) โดยจะไหลจากมือผ่านร่างกายและลงดินที่เท้าทั้งสองข้าง

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นแรงดันที่ขนานกับร่างกายของบุคคลนั้น (U) ซึ่งเป็นค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดที่สัมผัสอุปกรณ์ไฟฟ้าและเท้าที่สัมผัสดิน

- โดยที่ I_A = กระแสที่ไหลผ่านตัวบุคคลขณะเกิดกระแสลัดวงจร (แอมป์)
- R_B = ความต้านทานของร่างกายมนุษย์ (โอห์ม)
- R_F = ความต้านทานของเท้ามนุษย์ที่สัมผัสกับดิน (เท้า 1 ข้าง) (โอห์ม)
- R_{MF} = Mutual Resistance ของเท้าทั้งสองข้าง (โอห์ม), โดยปกติมักจะไม่นำมา

พิจารณาเนื่องจากมีค่าน้อยมาก

- I_B = กระแสไฟฟ้ามากที่สุดที่มนุษย์สามารถทนได้ สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัมกำหนดให้ค่ากระแสมีค่าดังในสมการที่ 2.1

$$I_B = 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (\text{แอมป์}) \quad (2.1)$$

t_s = ช่วงระยะเวลาที่กระแส I_B ไหลผ่านร่างกาย (วินาที)

ดังนั้นขณะเกิดกระแสลัดวงจร ถ้าจะให้บุคคลปลอดภัยค่าของ I_A จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า I_B กรณีที่มนุษย์น้ำหนักเฉลี่ย 70 กิโลกรัม จะได้ค่ากระแสที่มนุษย์สามารถทนได้ดังสมการ (2.2)

$$I_B = 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (\text{แอมป์}) \quad (2.2)$$

ตามมาตรฐาน IEEE Std 80-1986 [1]

- กำหนดให้ $R_B = 1000$ โอห์ม
- $R_F = 3\rho_s$
- ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยที่ผิวดินของสถานีไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)

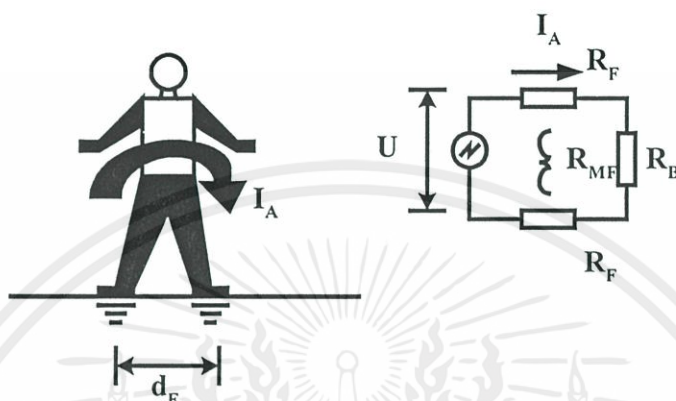
จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 จะได้ค่าความต่างศักย์สูงสุดระหว่างจุดที่ร่างกายสัมผัสอุปกรณ์ไฟฟ้าและเท้าที่สัมผัสดินเรียกว่า Touch Voltage (E_{touch}) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\text{touch}} = (R_B + \frac{R_F}{2}) I_B \quad (\text{โวลท์}) \quad (2.3)$$

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1.5\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{โวลต์}) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 Step Potential

รูปที่ 2.2 แสดงถึงบุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าย่อยก้าวเดินขณะเกิดกระแสลัดวงจร โดยเมื่อมีกระแสลัดปกติไหลลงสู่ดินจะทำให้เกิดค่าศักดาไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอขึ้นที่ผิวดิน และจะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ระหว่างเท้าทั้งสองข้างที่สัมผัสพื้นดิน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างเท้าทั้งสองข้างจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย (I_A) เพื่อลงสู่ดินโดยผ่านจากเท้าข้างหนึ่ง ไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง เรียกค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Step Voltage (E_{step}) ดังนี้

$$E_{\text{step}} = (R_B + 2R_F) I_B \quad (\text{โวลต์}) \quad (2.5)$$

$$= (1000 + 6\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{โวลต์}) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.4) และ(2.6) ข้างต้นจะเป็นขอบเขตที่สำคัญในการออกแบบระบบต่อลงดิน เพื่อให้สามารถรับการเกิดกระแสลัดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ โดยไม่ทำให้ผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับอันตราย ซึ่งระบบต่อลงดินที่ปลอดภัยจะต้องมีค่า Mesh Voltage น้อยกว่าค่าของ E_{touch} และค่าของ Step Voltage ของระบบต่อลงดินจะต้องน้อยกว่าค่า E_{step} (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ จะคืนลิขสิทธิ์ให้เจ้าของผลงานและข้อมูลข้างต้นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ตัวแปรที่สำคัญของการออกแบบระบบต่อลงดิน

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย จำเป็นต้องรู้ข้อมูลเบื้องต้น เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการออกแบบ คือลักษณะทางกายภาพของพื้นที่และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยอันประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญดังนี้

2.2.1 กระแสลัดวงจร (แอมแปร์)

ในการออกแบบระบบต่อลงดินขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นและมีผลต่อการออกแบบระบบต่อลงดินขึ้นอยู่กับลักษณะของกระแสผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยที่กระแสผิดปกติที่มีผลต่อการออกแบบระบบต่อลงดินคือ Single Line to Ground Fault และ Line to Line to Ground Fault เท่านั้น เพราะการเกิดกระแสผิดปกติทั้งสองกรณีนี้จะทำให้เกิดกระแสกริด (Grid Current) ไหลผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าผ่านไปยัง Remote Ground เช่น นิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า, ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าข้างเคียง, ระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า ฯลฯ แล้วไหลมายังจุดที่เกิดกระแสผิดปกติ

การที่จะเลือกใช้ค่ากระแสผิดปกติกรณีใดมาใช้ในการออกแบบนั้นจะต้องพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของระบบไฟฟ้าขณะเกิดกระแสผิดปกติดังนี้

ถ้า $Z_0 Z_1 > Z_2^2$ ให้ใช้ค่า Single Line to Ground Fault

ถ้า $Z_0 Z_1 < Z_2^2$ ให้ใช้ค่า Line to Line to Ground Fault

โดยที่ $Z_0 =$ Zero Sequence Impedance

$Z_1 =$ Positive Sequence Impedance

$Z_2 =$ Negative Sequence Impedance

นอกจากลักษณะของการเกิดการไหลของกระแสผิดปกติ ที่มีผลต่อกระแสกริดแล้ว ยังมีปัจจัยหลักที่ทำให้ค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงคือระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งจะทำให้กระแสกริดที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่กระแสกริดบางส่วนจะไหลย้อนไปในระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อ เช่น สาย Overhead Ground Wire หรือตัวนำต่อลงดินที่ห่อหุ้ม Power Cable (Sheath of Power Cable) เป็นต้น

การคำนวณหาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นนั้นมีการคำนวณหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีเมทริกซ์, การใช้กราฟ เป็นต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการหาค่ากระแสกริดโดย Decoupled Method ซึ่งอาศัยหลักการรวมวงจรสมมูลให้มีจำนวนตัวแปรลดลง เพื่อป้องกัน

ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ อันเนื่องมาจากตัวแปรที่มีปริมาณมาก รายละเอียดจะได้อธิบายในบทที่ 3-5

2.2.2 การ Interrupt ของอุปกรณ์ป้องกันในการปลดอุปกรณ์ออกจากระบบขณะเกิดกระแสผิดปกติ (The clearing time of primary protective device, t_s)

โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.25-1.0 วินาที ขึ้นอยู่กับการ Setting ของอุปกรณ์ป้องกัน, เช่นในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะใช้ค่า $t_s = 0.3$ วินาที, หรือของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะใช้ค่า $t_s = 0.6$ วินาที เป็นต้น

2.2.3 พื้นที่ของสถานีไฟฟ้า (ตารางเมตร)

พื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าที่ครอบคลุมด้วยระบบตัวนำต่อลงดิน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

2.2.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินของสถานีไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร) และค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยพื้นผิวของสถานีไฟฟ้า

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) (โอห์ม-เมตร) จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของดินที่ใช้ก่อสร้างสถานีไฟฟ้า เช่น สภาพดินบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑลซึ่งมีลักษณะเป็นที่ลุ่มจะมีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ 1-50 โอห์ม-เมตร แต่ถ้าสภาพของดินที่อยู่ในบริเวณเชิงเขาจะมีค่าประมาณ 600-2000 โอห์ม-เมตร ดังนั้นก่อนการออกแบบระบบต่อลงดินจึงจำเป็นที่จะต้องวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินจากสภาพจริง โดยวิธีที่นิยมใช้ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินคือ The Wenner Four Pin Method (IEEE STd 81-1983)

2.2.5 ขนาดของตัวนำที่นำมาใช้ในระบบต่อลงดิน

ขนาดของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินต้องสามารถรับปริมาณกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงสุดของระบบได้ ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของตัวนำได้ดังนี้ [1]

$$A_{\text{mm}^2} = I_n \sqrt{\frac{T_c \alpha_r \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ด้วยลิขสิทธิ์ของสถาบันไมออนู (ตารางมิลลิเมตร) โดย (2.7) การคำนวณหาขนาดของตัวนำที่นำมาใช้

โดยที่ I = ขนาดของกระแสลัดวงจร (rms) สูงสุด ; KA (กิโลแอมป์)

- A = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำต่อลงดิน; mm^2
- T_m = อุณหภูมิที่ใช้งาน; $^{\circ}\text{C}$
- T_c = เวลาที่กระแสไหลผิดปกติ; วินาที
- α_r = Thermal coefficient of resistivity at reference temperature
- T_r = Reference temperature for material; $^{\circ}\text{C}$
- ρ_r = The resistivity of ground conductor; $\mu\Omega/\text{cm}^3$
- K_0 = $1/\alpha_0$ or $(1/\alpha_r) \cdot T_r$
- TCAP = Thermal capacity factor; $\text{J}/\text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C}$

2.2.6 ความยาวของตัวนำต่อลงดินที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน

ตามมาตรฐาน IEEE Std 80-1986 [1] กำหนดวิธีการคำนวณหาความยาวของตัวนำที่น้อยที่สุดของระบบต่อลงดินไว้ดังนี้

$$L_{\min} \geq \frac{K_m K_i \cdot \rho_{IG} \sqrt{t_s}}{116 + 0.174 C_s \cdot \rho_s} \quad (\text{เมตร}) \quad (2.8)$$

โดยที่ L_{\min} = ความยาวตัวนำต่อลงดิน (เมตร)

K_m, K_i = ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวนำของระบบต่อลงดิน (D) ที่ประกอบเป็น Mesh, ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำต่อลงดิน, จำนวนของตัวนำต่อลงดินที่ขนานกันและความลึกของการฝังตัวนำต่อลงดิน

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ; (โอห์ม-เมตร)

ρ_s = ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้โรยผิวหน้าดิน; (โอห์ม-เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้ช่วงระยะเวลาการเกิดกระแสผิดปกติ ; (วินาที) การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_s = Surface layer resistivity derating factor

จากสมการที่ (2.8) จะเห็นว่า ในการจะหาความยาวของตัวนำต่อลงดินที่น้อยที่สุดในการออกแบบนั้นจำเป็นต้องทราบค่ากระแสแกลกริด (I_G), ความต้านทานจำเพาะของดินและวัสดุที่โรยอยู่ที่ผิวหน้าดิน ระยะเวลาที่เกิดกระแสผิดปกติ ตลอดจนระยะห่างระหว่างตัวนำของระบบต่อลงดิน นั่นคือเราจะต้องกำหนดค่ากระแสแกลกริดขึ้นมาก่อนต่างๆ ที่ยังไม่ทราบว่าค่ากระแสแกลกริดจะเป็นสัดส่วนเท่าใดกับค่ากระแสผิดปกติที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่ากระแสแกลกริดนี้จะแปรผันตามค่า Fault current division factor (S_f) [1] ดังนี้

$$I_G = S_f * 3I_0 \quad (\text{แอมป์}) \quad (2.9)$$

โดยที่ S_f = Fault current division factor

$3I_0$ = ค่ากระแสแกลกริดวงจรดิน ; (แอมป์)

ซึ่งค่า S_f นี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดกระแสผิดปกติ ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า, ระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

จากเหตุผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยการกำหนดค่ากระแสแกลกริดก่อนนั้นจะทำให้ผลการออกแบบระบบต่อลงดินไม่ได้ผลที่ถูกต้อง เพราะเรายังไม่ทราบค่าที่แท้จริงของกระแสแกลกริด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอวิธีการออกแบบแนวคิดใหม่ โดยเน้นประเด็นที่การหาค่ากระแสแกลกริดที่แท้จริงขึ้นมาก่อน ซึ่งอาศัยหลักการดังนี้

2.2.6.1 กำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำ (D) ของระบบต่อลงดิน

ทำการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำ (D) ของระบบต่อลงดินขึ้นมาก่อน ในการกำหนดค่า D นั้นเราจะต้องเริ่มจากระยะที่เหมาะสมก่อน เช่น ในลาน ไกลเลือกค่า $D = 20$ เมตร เนื่องจากเป็นระยะห่างที่สะดวกในการเชื่อมต่อของระบบต่อลงดินกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในลาน ไกลของสถานีไฟฟ้า

2.2.6.2 หาค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน

จากการกำหนดระยะ D จะทำให้ได้ค่าความยาวของตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดินแล้วจึง
 เอกสารนี้ นำไปคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า (R_p) ดังในสมการที่ (2.10) การนำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6.3 หาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้น

หลังจากทราบค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (R_g) และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินภายนอกแล้วจะนำไปคำนวณหาค่ากระแสกริดที่แท้จริงของระบบต่อลงดิน

2.2.6.4 พิจารณาความปลอดภัยจากการออกแบบ

เมื่อหาค่ากระแสกริดได้แล้วก็จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า Mesh Voltage และค่า Step Voltage ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้า ถ้าค่าที่คำนวณออกมาได้ไม่อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยให้ทำการปรับปรุงการออกแบบโดยลดค่าระยะห่างระหว่างตัวนำลง (D) แล้วทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าของ Mesh และ Step Voltage ที่เกิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าใหม่เนื่องจากเมื่อทำการเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างตัวนำค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินก็จะเปลี่ยนไปและค่ากระแสกริดก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยมีข้อกำหนดคือค่า D จะต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร ที่มีข้อบังคับไม่ให้ค่า D น้อยกว่า 2.5 เมตร ก็เพราะว่าเมื่อค่า D น้อยกว่า 2.5 เมตรแล้วจะทำให้ค่า Mesh voltage และค่า Step voltage ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนมาก [1] แต่ทั้งนี้ถ้าหากค่าความปลอดภัยอยู่ในช่วงที่มากกว่า 10% ควรเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำให้มากขึ้นเพื่อเป็นการประหยัดตัวนำต่อลงดิน แต่ก็ไม่ควรจะให้ระยะห่างระหว่างตัวนำมากกว่า 35 เมตร เพราะจะทำให้การเชื่อมต่อของระบบต่อลงดินกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในลานไถกระทำได้ยาก ดังนั้นการกำหนดค่า D นี้จึงเป็นจุดสำคัญในการเริ่มต้นการออกแบบระบบต่อลงดิน

2.2.7 ความต้านทานของตัวนำต่อลงดิน

ความต้านทานของตัวนำต่อลงดิน (Grid Resistance = R_g) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R_g = \rho \left[\frac{I}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\text{โอห์ม}) \quad (2.10)$$

โดยที่ R_g = Grid resistance; โอห์ม

L = ความยาวทั้งหมดของตัวนำต่อลงดิน; เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าที่ถูกครอบคลุมด้วยตัวนำต่อลงดิน; ตารางเมตร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h = ความลึกของตัวนำต่อลงดินจากผิวดิน; เมตร

- โดยที่
- R_g = Grid resistance; โอห์ม
 - L = ความยาวทั้งหมดของตัวนำต่อลงดิน; เมตร
 - A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าที่ถูกครอบคลุมด้วยตัวนำต่อลงดิน; ตารางเมตร
 - h = ความลึกของตัวนำต่อลงดินจากผิวดิน; เมตร

2.2.8 Grid Potential Rise (GPR)

ค่าของ Grid Potential Rise ($I_{grid} \times R_g$) (โวลต์) คือผลคูณของกระแสกริดกับความต้านทานของตัวนำต่อลงดิน ในการหาขอบเขตความปลอดภัยของระบบต่อลงดินนี้ ถ้าเปรียบเทียบค่า Grid Potential Rise มีค่าน้อยกว่า E_{touch} แสดงว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบไว้อยู่ในขอบเขตความปลอดภัย แต่ถ้าค่าของ GPR มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ E_{touch} จะต้องทำการตรวจสอบค่าของ Mesh Voltage และ Step voltage เทียบกับ E_{touch} และ E_{step} ตามลำดับต่อไป

2.2.9 Mesh Voltage และ Step Voltage

การคำนวณค่า Mesh voltage และ Step voltage สามารถคำนวณด้วยวิธีอย่างง่าย [1] ดัง

$$\text{MeshVoltage}(E_m) = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_C + 1.15L_r} \quad (\text{โวลต์}) \quad (2.11)$$

$$\text{StepVoltage}(E_s) = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_C + 1.15L_r} \quad (\text{โวลต์}) \quad (2.12)$$

$$\text{โดยที่} \quad K_m = \frac{1}{2\pi} \left[I_n \left(\frac{D^2}{16hd} + \left(\frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right) \right] \quad (2.13)$$

$K_{ii} = 1$, กรณีที่ตัวนำต่อลงดินมีแท่งตัวนำต่อลงดิน (Ground rod) อยู่รอบๆเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รอบวงของระบบต่อลงดิน หรือที่มุมของระบบต่อลงดิน
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad \text{กรณีที่ไม่มีแท่งตัวนำต่อลงดินหรือมีน้อยแต่ไม่มีที่เส้นรอบวงและที่}$$

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำ

n = จำนวนของตัวนำต่อลงดินที่ขนานกัน

$$= \sqrt{n_x n_y} \text{ กรณีใช้ค่านวณค่า } E_m$$

$$= \max(n_x, n_y) \text{ กรณีที่ใช้ค่านวณค่า } E_s$$

L_c = ความยาวทั้งหมดของตัวนำต่อลงดิน (เมตร)

L_r = ความยาวทั้งหมดของแท่งตัวนำต่อลงดิน (เมตร)

กรณีที่ $0.25 \text{ เมตร} \leq h \leq 2.5 \text{ เมตร}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (2.16)$$

กรณีที่ $h < 2.5 \text{ เมตร}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right] \quad (2.17)$$

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n-1} \quad (2.18)$$

หรือถ้า $n > 6$

$$W \approx \frac{1}{2(n+1)} + \ln(n-1) - 0.423 \quad (2.19)$$

การคำนวณค่า E_m และ E_s ที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีขอบเขตจำกัดของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$n \leq 25$$

$$0.25 \text{ m.} \leq h \leq 2.5 \text{ m.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D > 2.5 \text{ m.}$$

2.2.10 เปรียบเทียบค่า Mesh Voltage และ Step Voltage กับ E_{touch} และ E_{step}

การออกแบบระบบต่อลงดินจะมีความปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า เมื่อค่าของ E_m และ E_s อยู่ในขอบเขตความปลอดภัยตามข้อ 2.1 ดังนี้

$$\text{Mesh Voltage } (E_m) \leq E_{\text{touch}} \quad (2.20)$$

$$\text{Step Voltage } (E_s) \leq E_{\text{step}} \quad (2.21)$$

ถ้าหากค่าของ E_m และ E_s ยังไม่อยู่ในขอบเขตของความปลอดภัยจะต้องปรับปรุงการออกแบบระบบต่อลงดินโดยการเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน (L_c), เพิ่มแท่งตัวนำต่อลงดิน (L_r) หรือปรับปรุงขนาดของสาย Overhead ground wire เพื่อช่วยการกระจายของกระแสกริด

2.2.11 การปรับปรุงการออกแบบ โดยเพิ่มพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าและลดความต้านทานจำเพาะของดิน

ในบางกรณีจำเป็นต้องปรับปรุงการออกแบบโดยเพิ่มพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ถ้าสามารถหาพื้นที่ข้างเคียงได้โดยสร้างระบบต่อลงดินช่วย (Auxiliary Ground Grid) เพื่อช่วยกระจายกระแสกริดไปยังระบบต่อลงดินช่วย

ถ้าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงมาก เราอาจจะต้องปรับปรุงค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยใช้สารเคมีเช่น ใช้เกลือแกงผสมถ่านไม้ป่น ฝักรอบ ๆ ตัวนำต่อลงดิน เพื่อช่วยให้การกระจายของกระแสกริดที่ไหลลงดินได้รวดเร็วขึ้น (เหมือนกับการเพิ่มขนาดของตัวนำต่อลงดิน)

ที่กล่าวมาในบทนี้จะเห็นว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดที่จำเป็นต้องพิจารณาอย่างละเอียด และมีผลกับการออกแบบในเกือบทุกขั้นตอน นั่นคือค่ากระแสกริด (Grid Current) ดังนั้นในบทต่อ ๆ ไป ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่ากระแสกริดที่มีผลกระทบจากระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า เช่น ในกรณีที่สถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกันหลาย ๆ สถานี หรือในระบบจำหน่ายที่มีสาย Power Cable และ Power Cable Sheath หลาย ๆ วงจรต่อออกจากระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้น ๆ

บทที่ 3

ทฤษฎีการคำนวณ Decoupled Method

ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกันด้วยสาย Overhead Ground Wire หรือ Sheath ของ Power Cable จะอยู่ในรูปของวงจรพาย อันประกอบไปด้วย Longitudinal Impedance และ Transverse Impedance ประกอบกันเป็นวงจรชั้นบันไดต่อเนื่องกันไปตลอดความยาวของระบบต่อลงดินนั้นๆ ดังนั้นในการหาค่า Impedance รวมของระบบต่อลงดิน,ค่าแรงดัน ณ จุดต่างๆ ตลอดจนค่าของกระแสลัดวงจรที่ไหลไปในแต่ละส่วนของระบบต่อลงดินจึงค่อนข้างยากและมีขั้นตอนที่สลับซับซ้อน อีกทั้งในการคำนวณหลายๆขั้นตอนจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยในแต่ละขั้นตอน เมื่อถูกนำไปคำนวณในขั้นต่อไปจะมีผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้นตามขั้นตอนที่มากขึ้น

ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณให้ลดน้อยลง สามารถทำได้โดยลดจำนวนตัวแปรให้น้อยลง เพื่อลดขั้นตอนในการคำนวณลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอวิธีการลดตัวแปรในวงจรให้น้อยลง โดยมีวงจรสมมูลที่มีขนาดเล็กลงแต่ยังคงคุณสมบัติทางไฟฟ้าไว้ทุกประการ วิธีการนี้เรียกว่า Decoupled Method [2,3] ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.1 ขั้นตอนของ Decoupled Method

การพิจารณาจะแบ่งออกเป็นขั้น ๆ เพื่อให้สะดวกในการทำความเข้าใจและการคำนวณ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะอิสระต่อกัน โดยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนดังนี้

3.1.1 เลือกจุดที่ต้องการทราบค่า(Monitored Point)

เลือกจุดที่ต้องการทราบค่าของแรงดันและกระแส ณ จุดนั้นๆของวงจระบบต่อลงดิน ซึ่งจุดเหล่านี้จะต้องคงไว้ขณะที่ทำการลดขนาดวงจรลง รวมไปถึงจุดที่เกิดกระแสลัดวงจรขึ้น (การพิจารณาจุดที่ต้องการทราบค่านี้ ดูรายละเอียดได้ในบทที่ 4, ข้อ 4.2-4.5)

3.1.2 ขั้นที่ 2 พิจารณาค่า Zero Sequence Current ที่กระจายไปตามสายเฟส และนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า

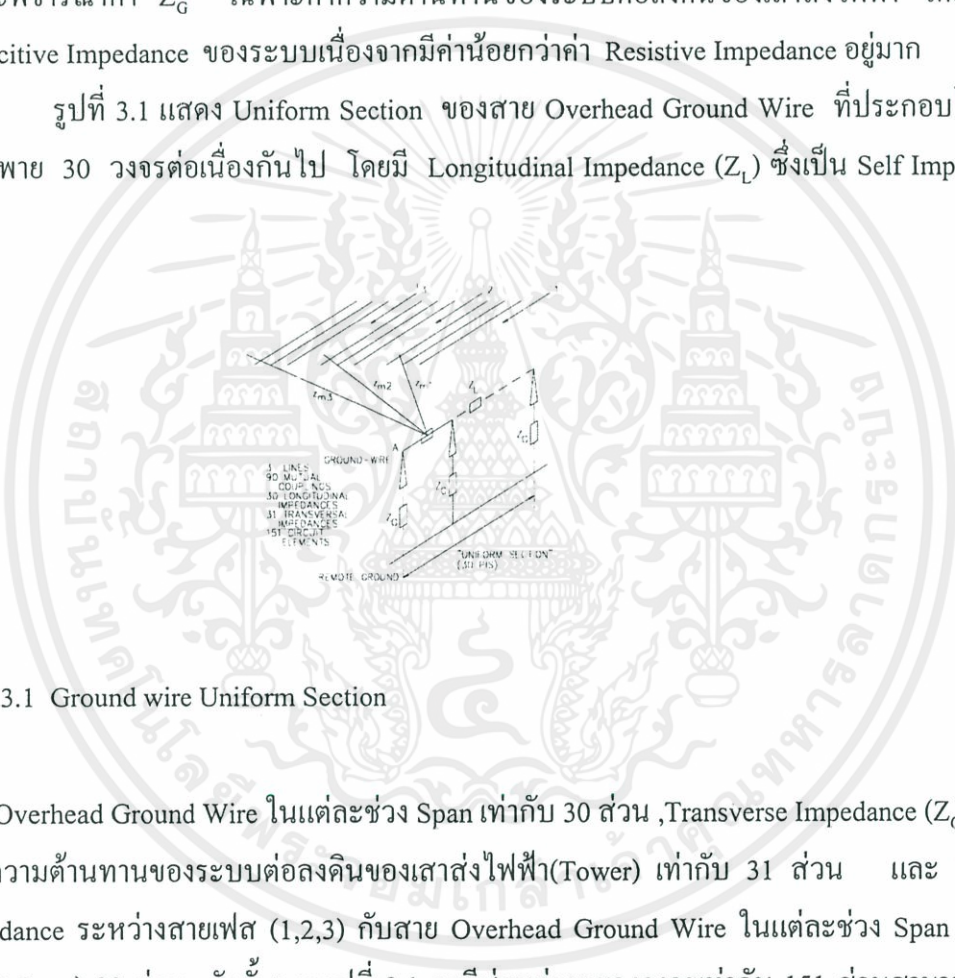
ค่าของ Zero Sequence Current ที่ไหลไปตามเฟส (Line หรือ Cable) หรือกระแสที่ไหลผ่าน Neutral ของหม้อแปลงสามารถคำนวณจากโปรแกรม Short circuit current (ในกรณีที่ Transversal resistant ไม่ถูกนำมาคิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ชั้นที่ 3 คุณสมบัติของ “Uniform Section” ของ Ground circuit

วงจรของระบบต่อลงดินของ Overhead Ground Wire หรือ Sheath of Power Cable ถูกนำเสนอในรูปแบบของ “Uniform section” อันประกอบไปด้วย Longitudinal Impedance (Z_L) ซึ่งเป็น Impedance ของ Overhead Ground wire หรือ Sheath of Power Cable รวมไปถึง Mutual Impedance ที่เหนี่ยวนำระหว่าง Overhead Ground Wire กับสายเฟส และ Transverse Impedance (Z_G) ซึ่งเป็น Impedance ของ Footing of Tower (เสาส่งไฟฟ้า) หรือ Capacitive Impedance แต่ ณ ที่นี้จะพิจารณาค่า Z_G เฉพาะค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า โดยไม่คิด Capacitive Impedance ของระบบเนื่องจากมีค่าน้อยกว่าค่า Resistive Impedance อยู่มาก

รูปที่ 3.1 แสดง Uniform Section ของสาย Overhead Ground Wire ที่ประกอบไปด้วย วงจรพาย 30 วงจรต่อเนื่องกันไป โดยมี Longitudinal Impedance (Z_L) ซึ่งเป็น Self Impedance ของ



รูปที่ 3.1 Ground wire Uniform Section

สาย Overhead Ground Wire ในแต่ละช่วง Span เท่ากับ 30 ส่วน , Transverse Impedance (Z_G) เป็นความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า(Tower) เท่ากับ 31 ส่วน และ Mutual Impedance ระหว่างสายเฟส (1,2,3) กับสาย Overhead Ground Wire ในแต่ละช่วง Span เท่ากับ (3*30 Span) 90 ส่วน ดังนั้นจากรูปที่ 3.1 จะมีส่วนต่างๆของวงจรเท่ากับ 151 ส่วนสามารถแทนด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้

$$Z_L = \text{Self impedance ของสาย ground, } \Omega / \text{km.}$$

$$Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3} = \text{Mutual impedance, } \Omega / \text{km}$$

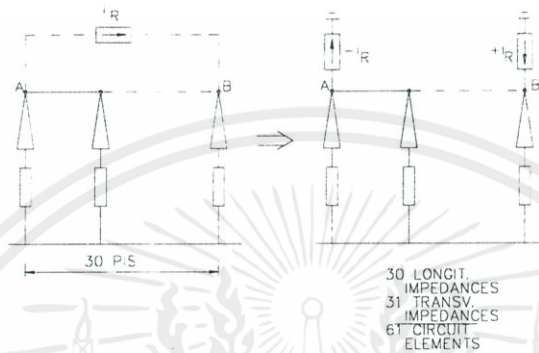
ระหว่างสาย ground และเฟส 1,2,3

$$I_1, I_2, I_3 = \text{Zero sequence current, Ampere, ที่ไหลผ่านในแต่ละ Phase 1,2,3 (Wire or cables)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และที่ยังอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ขั้นที่ 4 การจำแนก Mutual coupling ระหว่างเฟส และตัวนำต่อลงดิน

กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างสายตัวนำต่อลงดินและสายเฟส สามารถแทนด้วย แหล่งจ่ายกระแส I_R ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเชื่อมต่อกับจุด A,B ของ Uniform Section



รูปที่ 3.2 การจำแนกของ Mutual coupling ของเฟส

แหล่งจ่ายกระแสที่จ่ายระหว่าง A และ B เทียบได้กับแหล่งจ่ายกระแสที่ A และ ที่ B เทียบกับ Remote ground แหล่งจ่ายกระแส $-I_R$ แทนกระแสจากจุด A และแหล่งจ่ายกระแส $+I_R$ แทนกระแสจ่ายให้จุด B

การคำนวณค่า I_R ในแต่ละส่วนของ Uniform section สามารถทำได้ดังนี้

$$V_1 = I_1(Z_{m1}) + I_2(Z_{m2}) + I_3(Z_{m3}) + \dots \quad (\text{โวลท์}) \quad (3.1)$$

$$I_R = \frac{V_1}{Z_1} \quad (\text{แอมป์}) \quad (3.2)$$

โดยที่ V_1 คือค่าของแรงดัน ณ จุดที่ต้องการหาค่าจุดที่ 1 และ Z_1 คือค่า Self Impedance ของสาย Overhead Ground Wire ในแต่ละช่วง (Ω/km) ในที่นี้ $Z_1 = Z_L$

ถ้าสมมติให้มีสายเฟสเพียงเส้นเดียวเพื่อง่ายต่อความเข้าใจ จะได้

$$V_1 = I_1(Z_{m1}) \quad (\text{โวลท์}) \quad (3.3)$$

$$I_R = \frac{V_1}{Z_1} \quad (\text{แอมป์}) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_R = -\left(\frac{Z_{m1}}{Z_1}\right) * I_1 \quad (\text{แอมป์}) \quad (3.5)$$

$$I_R = \mu I_1 \quad (\text{แอมป์}) \quad (3.6)$$

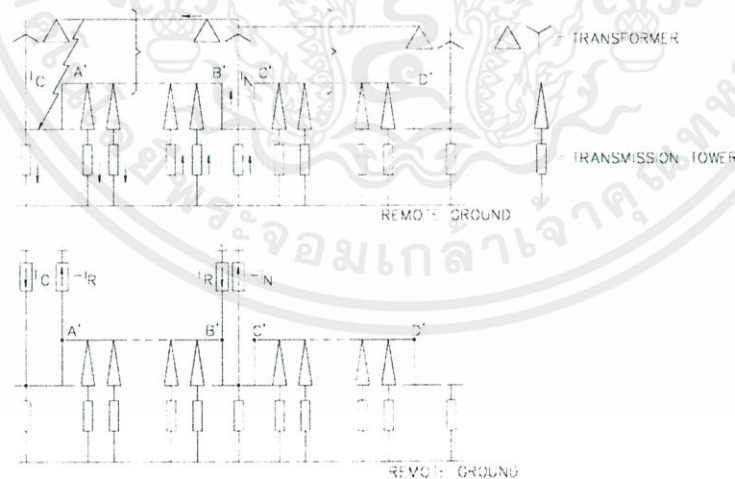
ตัวแปร μ นี้ เราจะพบเห็นบ่อยในสมการของสายตัวนำต่อลงดิน จากตัวอย่างในรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นว่าสามารถลดขนาดของวงจรในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีตัวแปรต่างๆ จาก 151 ส่วน เหลือ 61 ส่วนในรูปที่ 3.2 วิธีการนี้เราจะเรียกว่า “Decoupling Method”

จุดที่มีแหล่งจ่ายกระแสต่อเข้า หลังจากทีรวมวงจรแล้ว จำเป็นต้องคงไว้เพื่อใช้เป็นจุดที่ต้องการทราบค่าในการคำนวณในวงจรสมมูลขั้นสุดท้าย ทั้งนี้ในการลดจำนวนวงจรลงอาศัยหลักการในการรวมวงจรข้างต้นตามทฤษฎีของนอร์ตัน (Norton Theorem)

กระบวนการในการนำเสนอสามารถแบ่ง Zero Sequence current ออกเป็น 2 ส่วน คือ “Self Neutralized Current” และ Non-Neutralized Current” (จะได้อธิบายในบท 4 ข้อ 4.7)

3.1.5 ขั้นที่ 5 การรวบรวมแหล่งจ่ายกระแส

ณ. จุดที่เกิดการลัดวงจร เช่นที่สถานีไฟฟ้าจะเกิดกระแสลัดวงจรไหลผ่านนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า จุดดังกล่าวต้องนำมาเป็นจุดที่ต้องพิจารณาในวงจรสมมูล โดยที่กระแสลัดวงจรและกระแสนิวทรอลของหม้อแปลงทดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส ณ. จุดนั้น ๆ เช่นกัน (ดูรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 การแทนค่ากระแสลัดวงจรและกระแสนิวทรอลของหม้อแปลงด้วยแหล่งจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

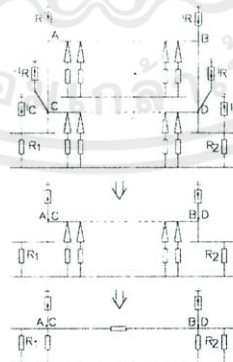
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ชั้นที่ 6 การจำลองของวงจรขนาน (Parallel Sections)

จากรูปที่ 3.4 แสดงวงจรเหนี่ยวนำของสายส่งไฟฟ้าที่ขนานกัน 2 วงจร หลังจากที่เกิด
 แทนวงจรเหนี่ยวนำของกระแสเฟส ด้วยแหล่งจ่ายกระแส จะยังคงเหลือสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำ
 ระหว่างสายตัวนำต่อลงดินของทั้งสอง (ดูรูปที่ 3.5)

กรณีเกิดกระแสลัดวงจรที่จุดต้นทางและปลายทางของวงจรที่ขนานกัน ทำให้กระแสลัด
 วงจรที่เกิดขึ้นไม่กระทบต่อการไหลของกระแสในวงจรขนาน จึงสามารถแทนได้ด้วยวงจรขนาน
 (รูปที่ 3.6a.) แต่ถ้าเกิดกระแสลัดปิดกั้นระหว่างวงจรขนาน จะทำให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไหล
 กลับไปยัง ระบบต่อลงดินของแต่ละสถานีไม่เท่ากันทำให้วงจรขาดสภาพขนานกันทางไฟฟ้า จึง
 ไม่ใช่เงื่อนไขของวงจรขนาน(รูปที่ 3.6 b) ส่วนในรูปที่ 3.6 c แสดงสายส่ง 2 วงจรที่ขนานกันใน
 บางช่วงแต่ไม่ทั้งหมดถือว่าไม่เป็นวงจรขนาน

รูปที่ 3.4 สายตัวนำต่อลงดินของวงจรขนาน

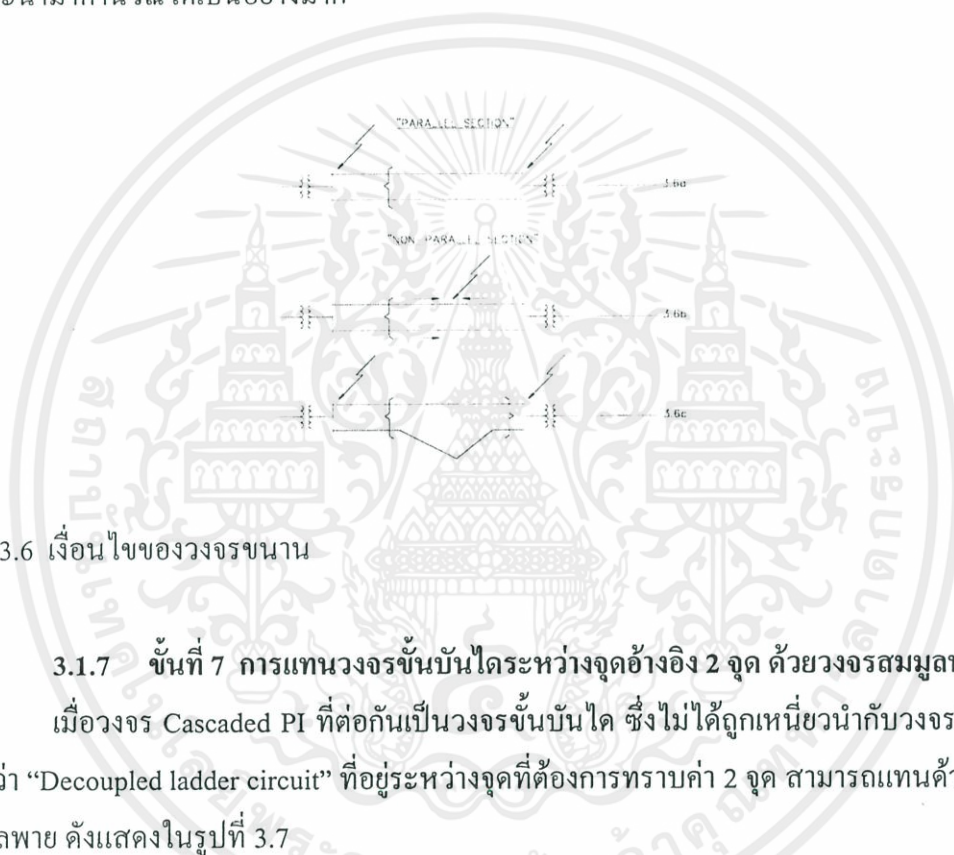


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้ให้ออกแบบเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของวงจรขนาน

ในวงจรขนาน ทุก ๆ จุดของวงจรต่อลงดินทั้งสอง หรือมากกว่า สามารถประมาณได้ว่ามีแรงดันเท่า ๆ กัน เนื่องจากทุกจุดขนานกันทางไฟฟ้า ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำต่อลงดิน (Longitudinal impedances) ทั้งสองจะถูกแทนด้วยวงจรสมมูลเพียงวงจรเดียว (Kron Transformation) [5] จากรูปที่ 3.5, ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน (Transversal Impedances) สามารถทดแทนวงจรสมมูลเช่นเดียวกัน

การทดแทนวงจรขนานด้วยวงจรสมมูลเพียงวงจรเดียวนั้น สามารถช่วยลดขนาดของ วงจรที่จะนำมาคำนวณได้เป็นอย่างมาก

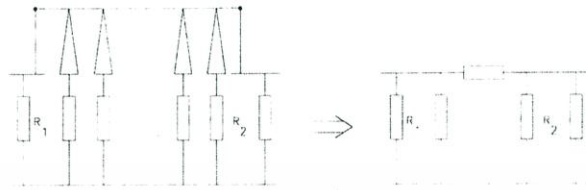


รูปที่ 3.6 เงื่อนไขของวงจรขนาน

3.1.7 ขั้นที่ 7 การแทนวงจรชั้นบันไดระหว่างจุดอ้างอิง 2 จุด ด้วยวงจรสมมูลหลาย

เมื่อวงจร Cascaded PI ที่ต่อกันเป็นวงจรชั้นบันได ซึ่งไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำกับวงจรอื่น เราเรียกว่า “Decoupled ladder circuit” ที่อยู่ระหว่างจุดที่ต้องการทราบค่า 2 จุด สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลหลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.7

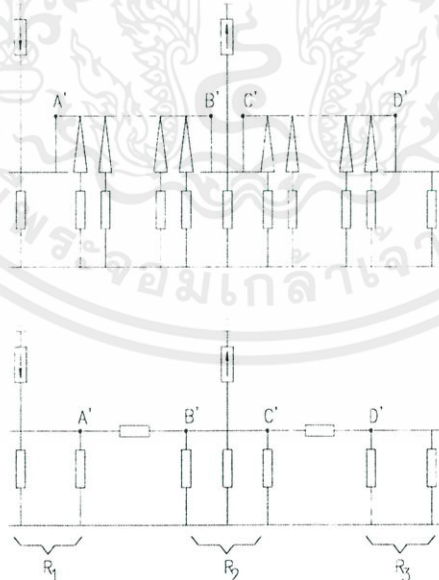
ถ้า Decoupled ladder circuit อยู่ในรูปของ Uniform section สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลหลายด้วยการคำนวณง่าย ๆ (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 4.8) แต่ถ้า Decoupled ladder circuit ไม่อยู่ในรูปของ Uniform Section เราสามารถใช้การคำนวณด้วยวิธีเมทริกตามจำนวน ของวงจรที่สามารถจัดเป็น Uniform section บวกกับส่วนที่ไม่เป็น Uniform section ค่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่าวิธีการคำนวณที่ไม่ได้มีการลดขนาดของวงจรเลย ดังนั้นวิธีการ Decoupled Method สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้ง Uniform Section และ Non-Uniform Section เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การแทนวงจรชั้นบนใดด้วยวงจรพวย

3.1.8 ชั้นที่ 8 ผลลัพธ์ของการลดจำนวนวงจรและวงจรสมมูล

ด้วยหลักการที่กล่าวมาข้างต้น สามารถลดขนาดของวงจรลง 10-60 เท่าของวงจรก่อนลด ถ้ารูปทรงของระบบไม่มีการเหนี่ยวนำระหว่างวงจรต่อลงดิน ยังคงต้องเก็บไว้เฉพาะจุดที่ต้องการทราบค่าในการคำนวณเท่านั้น ดูรูปที่ 3.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลสุดท้ายที่ลดลงแล้ว

3.2 ประโยชน์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

ค่ากระแสและแรงดันที่คำนวณได้ ณ.จุดที่ต้องการทราบค่าต่าง ๆ นั้น สามารถนำไปคำนวณค่า ต่าง ๆ ได้ เช่น ค่ากระแสกริดที่ไหลสู่ระบบต่อลงดิน ณ.จุดนั้น ,คำนวณค่า Touch Voltage, Step Voltage และ Mesh Voltage เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยเทียบกับมาตรฐาน

ค่ากระแสกริดที่คำนวณได้ของแต่ละสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน สามารถนำไปคำนวณค่า Grid Potential Rise (GPR) (Volt) ของสถานีไฟฟ้านั้นๆ และถ้าเราเปรียบเทียบส่วนต่างของค่า GPR ของสองสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน จะได้ค่า Transferred Potential ซึ่งสามารถนำไปกำหนดขนาดของสาย Control Cable หรือสายสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่าง 2 สถานี ให้สามารถรองรับ Transferred Potential ที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

หลักการเบื้องต้นและข้อกำหนดของ Decoupled Method

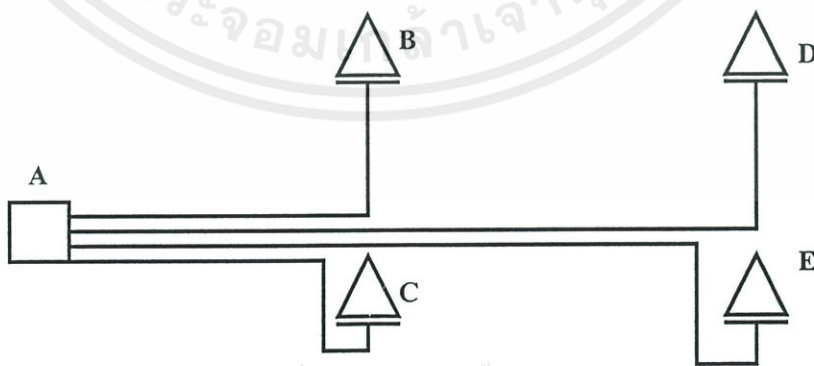
ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึง ทฤษฎี Decoupled Method ซึ่งแบ่งเป็นขั้น ๆ แล้วนั้น เพื่อความเข้าใจและการประยุกต์ไปใช้งานในบทนี้จะได้กล่าวถึงหลักการเบื้องต้นและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Decoupled Method ดังนี้

4.1 จำนวนจุดที่ต้องการทราบค่า

โดยทั่วไป จุดที่จะนำมาประกอบการพิจารณา ที่ยังคงเหลือในวงจรสมมูลขั้นสุดท้าย ควรจะไม่เกิน 40 จุด เพราะว่าถ้าเลือกจุดที่ต้องการทราบค่ามากกว่า 40 จุด อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณได้ เนื่องจากในการหาค่าแรงดันและกระแส ณ จุดที่ต้องการทราบค่าใดๆ ต้องใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ เช่นวิธีเมทริกซ์ ดังนั้นถ้าจุดที่ต้องการทราบค่ามีการคำนวณด้วยวิธีเมทริกซ์จะต้องใช้เมทริกซ์ขนาดใหญ่ ขั้นตอนการคำนวณจะซับซ้อนซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

4.2 จุดที่ต้องการพิจารณาและจุดที่ต้องการทราบค่า

เมื่อระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าหลาย ๆ สถานีที่เชื่อมโยงถึงกัน เช่น สถานี A, B, C, D และ E ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จุดที่ควรกำหนดให้เป็นที่ต้องการทราบค่าต้องครอบคลุมคุณสมบัติ ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 ระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน

- จุด A ต้องเป็นจุดที่ต้องการทราบค่า เนื่องจากเราต้องการหาค่ากระแสกริดและขนาดของระบบต่อลงดิน
- จุด C ต้องเป็นจุดที่ต้องการทราบค่า ถ้ามีสายสื่อสาร หรือสาย Control เชื่อมโยงระหว่างสถานี A และ C เพราะจะต้องคำนวณค่า Transferred potential เพื่อเลือกขนาดของสายสื่อสารและสาย Control
- ถ้าสถานี B มี Power Transformer จำเป็นต้องกำหนดเป็นที่ต้องการทราบค่า เนื่องจากจะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านนิวทรอลของ Power Transformer
- ถ้าสถานี D และ E อยู่ห่างจากสถานี A มากกว่า จุดวิกฤติของการเกิดฟอลท์ (Critical Fault Positions) ไม่ต้องนำมาเป็นจุดที่ต้องการทราบค่า

4.3 จุดวิกฤติของการเกิดฟอลท์ (Critical Fault Positions)

ทุก ๆ จุดที่ต้องพิจารณาขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเกิดฟอลท์ ที่ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรลงดินสูงสุด ณ.สถานีนั้น ๆ (หรือตำแหน่งที่เกิด Grid Potential Rise ,GPR, สูงสุด) หรือตำแหน่งที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองสถานีสูงสุด

4.3.1 กระแสลัดวงจรสูงสุดผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า

ถ้าเราต้องการพิจารณาค่าสูงสุดของ “Step”, “Touch” หรือ “Potential” Voltage ในสถานีไฟฟ้า A และค่าการกระจายของแรงดันใกล้ ๆ สถานี A สูงสุด (Maximum Potential Gradient) ทุก ๆ กรณีจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดผ่านระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า A เช่นเดียวกันกับกรณีที่เกิด “GPR” สูงสุดที่สถานีไฟฟ้า A

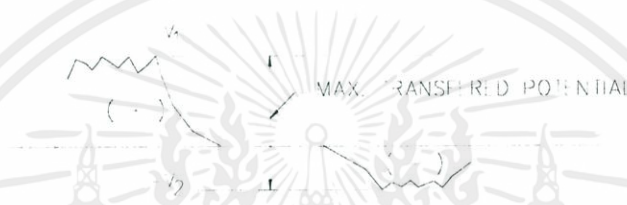
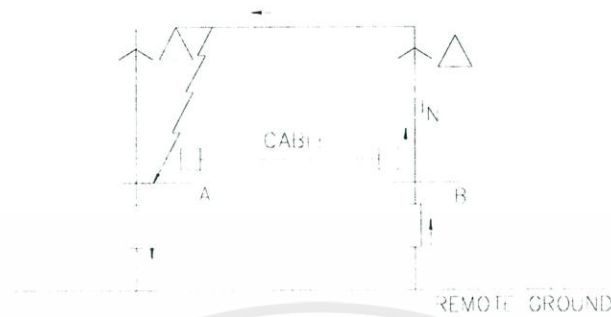
4.3.2 กรณีที่เกิด Maximum transferred potential ระหว่างสถานี A และ B

กรณีที่เกิด Maximum transferred potential ระหว่างสถานี A และ B ไม่สำคัญเท่ากับกรณีที่เกิด Maximum GPR ที่สถานี A หรือ B

4.4 เหตุผลในการพิจารณาจุดวิกฤติของการเกิดฟอลท์

4.4.1 กรณีที่เกิด Maximum Transferred Potential ระหว่างสองสถานี

ตำแหน่งของการเกิดกระแสลัดวงจรที่ทำให้เกิด Maximum Ground Potential ที่แตกต่างกันระหว่างสถานีไฟฟ้า A และ B กระทำได้โดยการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้า A และสถานีไฟฟ้า B แล้วเปรียบเทียบค่าแรงดันที่แตกต่างระหว่างทั้งสองกรณี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (กรณีเกิดกระแสลัดวงจรที่สถานี A)



รูปที่ 4.2 กรณีฟอลต์เกิดในสถานีไฟฟ้า

เมื่อเกิดฟอลต์ ที่สถานีไฟฟ้า A กระแสฟอลต์จะไหลออกจากสถานีไฟฟ้า A ไปยัง Remote ground ทำให้เกิดค่าบวกของ GPR(Grid Potential Rise : (V_1) ในทางตรงกันข้ามที่สถานีไม่มีฟอลต์ กระแสฟอลต์จาก Remote ground จะไหลเข้าสู่ตัวนำต่อลงดิน ทำให้เกิดค่าลบของ GPR : $(-V_2)$

ค่า GPR ของทั้งสองที่ต่างขั้วกัน จะเสริมกันดังนี้

$$\Delta V = (V_1) - (-V_2) = V_1 + V_2$$

ถ้าเกิดฟอลต์ในสายส่งที่ห่างออกจากสถานีไฟฟ้า A หรือ B จะทำให้เกิดค่า Transferred Potential ที่น้อยกว่ากรณีแรก รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดฟอลต์ในสายส่ง กระแสฟอลต์จะไหลจาก Remote ground ไปยังตัวนำต่อลงดินแต่ละสถานี ทำให้เกิดค่าลบของ GPR $(-V_1)$ $(-V_2), \dots$, สำหรับสถานีอื่น ๆ ที่ไม่มีความต่อเนื่องของวงจร Zero Sequence จะไม่มีกระแสไหลเข้าสู่

ตัวนำต่อลงดินของสถานีนั่น ๆ จึงทำให้ความต่างศักย์เป็นศูนย์ ณ. สถานีนั่น ดังนั้นสถานีไฟฟ้า A

และ B จะเกิด GPR ค่าลบ = $(-V_1), (-V_2)$ ซึ่งจะเกิดผลต่างดังนี้

$$\Delta V = (-V_1) - (V_2) = -V_1 + V_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประ โยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 สถานี A ห่างจากสถานี B มากกว่า 3 เท่าของ Characteristic Length (CL) , (ดูละเอียดในข้อ 4.12) ทำให้กระแสลัดวงจรที่ไหลย้อนไปที่สถานี A เป็นศูนย์ ($V_2=0$) ดังนั้นเราจะได้

$$\begin{aligned}\Delta V &= -V_1 - 0 \\ &= V_1\end{aligned}$$

ดังนั้นฟลทท์ในสายส่งจะไม่ทำให้เกิด Maximum Transferred Potentials



รูปที่ 4.3 กรณีฟลทท์เกิดระหว่างสายส่ง

4.4.2 ค่า GPR สูงสุดที่สถานีไฟฟ้า

ในกรณีพิเศษ ฟลทท์ที่เกิดในสถานีไฟฟ้า สามารถทำให้เกิด Maximum GPR ในสถานีนั้น ๆ อย่างไรก็ตาม Maximum GPR ณ สถานีไฟฟ้า จะเกิดเมื่อฟลทท์เกิด ณ จุดที่มีเงื่อนไขดังนี้

- เกิดฟลทท์ ณ จุดระหว่างสายส่งที่ความยาว $d > 3 (CL)$ จากสถานีไฟฟ้า (ดูรูปที่ 4.3)
- ณ จุดเกิดฟลทท์ เกิดกระแสลัดวงจรสูงสุดตามกรณีแรก

CL หมายถึง “Charactharistic Length” หรือ Space Constant” ของวงจรขั้วบนโคที่เสนอแทนสายตัวนำต่อลงดิน

ข้อควรสังเกต กรณีที่เกิดฟลทท์ ณ จุดที่สั้นกว่า (d) จากสถานีไฟฟ้า จะทำให้เกิดกระแสย้อนกลับที่สูงกว่าไหลผ่านสาย Overhead ground wire เพราะฉะนั้นเท่ากับลดกระแสย้อนกลับที่ไหลผ่านดิน

4.5 ควรหลีกเลี่ยงตำแหน่งฟลทท์ ที่ไม่จำเป็นในสายส่ง

ควรที่จะพิจารณาฟลทท์ที่เกิดในสายส่งเฉพาะส่วนที่มีผลต่อจุดที่เป็นเป้าหมายในการคำนวณเท่านั้น ฟลทท์ที่เกิดในสายส่งจะลดจำนวนของวงจรขนาน ซึ่งสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลดังแสดงในข้อ 3.1.6

4.6 การใช้ประโยชน์จากโปรแกรมการคำนวณ Short Circuit

ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.2 ค่า Zero Sequence current ที่ไหลไปในสายเฟส และนิวทรอลของ Power Transformer สามารถหาค่าได้จากโปรแกรมการคำนวณ Short Circuit Current ซึ่งความต้านทานของ Transversal เทียบกับ Remote ground ไม่ได้ถูกนำมาคำนวณ (ความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า และความต้านทานของเสาส่งไฟฟ้า)

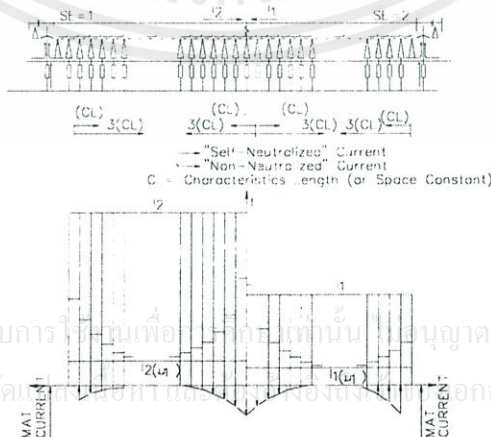
ในระบบตั้งแต่ 66kV ขึ้นไป จะไม่คิดผลของกระแสที่ไหลผ่านสายเฟสและนิวทรอลของ Power Transformer

ส่วนในการคำนวณตาม Decoupled Method ค่าอิมพีแดนซ์ของ Line และ Cable ถูกนำมาคิดตามปกติ รวมไปถึง อิมพีแดนซ์สาย Overhead ground (Longitudinal Impedance) และความต้านทานเหนี่ยวนำของสายเฟสและสายตัวนำต่อลงดิน

4.7 ส่วนประกอบของกระแสฟอลท์

กระแสฟอลท์ (Zero Sequence Current) ที่ใช้ใน Decoupled Method แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ “Self Neutralized Current” และ Non Neutralized Current ดังนี้

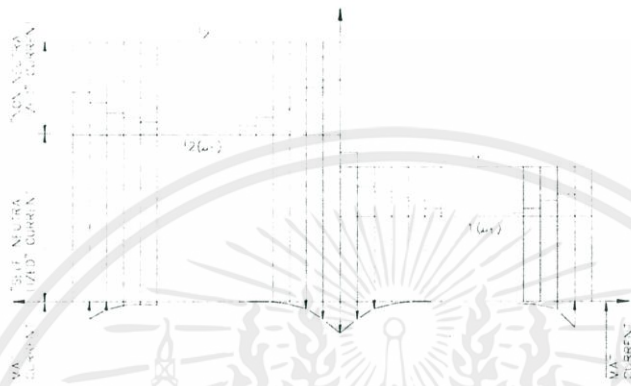
Self Neutralized Current (I_R) จะไหลไปตามส่วนต่าง ๆ ของ Uniform Section โดยที่ความต่างศักย์ ณ จุดใดๆ ใน Uniform Section มีค่าคงที่ ดังนั้นถ้าหากค่า I_R มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากระแสกริดที่สถานีไฟฟ้ามียค่าลดลง ซึ่งจะทำให้ Grid Potential Rise ลดลง การที่จะเพิ่มค่า I_R สามารถทำได้โดยลดค่าอิมพีแดนซ์ของ Overhead ground wire ลง ในทางปฏิบัติจะใช้สาย ACSR แทนสาย Galvanize steel wire ในช่วงเสาใกล้ ๆ กับสถานีไฟฟ้านั้นๆ ทั้งนี้ต้องทำการตรวจสอบค่าของ Step Voltage และ Touch Voltage ทุกๆ เสาไฟ เพื่อความปลอดภัยของบุคคลที่อาจจะไปสัมผัสเสาไฟหรือเดินเข้าไปใกล้เสาไฟนั้นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 กระแสฟอลท์ที่ไหลใน Steel ground wire

การไหลของ Self Neutralized Current ใกล้เคียงตำแหน่งฟลลท์ และสถานีไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งใช้สาย Galvanize steel เป็นสาย Ground ส่วนรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นกรณีที่ใช้สาย ACSR เป็นสาย Ground



รูปที่ 4.5 กระแสฟลลท์ที่ไหลใน ACSR ground wire

จากรูปที่ 4.4 ค่า Self Neutralize Current (I_R) ซึ่งแสดงในเทอมของ $I_2\mu_1$ โดยที่ $\mu_1 = Z_{m1}/Z_1$ ของสาย Overhead Ground Wire ถ้าเปลี่ยนสาย Ground จาก Galvanize Steel เป็น ACSR จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_1) ของสาย Ground มีค่าลดลง นั่นคือจะทำให้ค่า μ_1 มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เทอมของ $I_2(\mu_1)$ มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.8 การแทนวงจรขั้นบันได (Decoupled Ladder) ด้วยวงจรสมมูลพาย (Equivalent Pi)

ในวงจรพายหลาย ๆ วงจร (ที่ไม่ได้มีการเหนี่ยวนำ) ระหว่างจุด A และ B ของรูปที่ 4.6 สามารถทดแทนด้วย วงจรสมมูลพาย 1 วงจร โดยที่ยังคงค่าของกระแสและแรงดันในวงจรเท่าเดิม ดังนั้นการทดแทนวงจรดังกล่าวแรงดัน ณ. จุด A, B ยังมีค่าเท่าเดิม เช่นเดียวกับค่าของกระแสที่ไหลจากจุด A ไป B หรือ B ไป A ขั้นตอนการลดและทดแทนวงจรที่จะนำเสนอนี้สามารถใช้ได้กับวงจรที่เป็น Uniform และ Non-Uniform

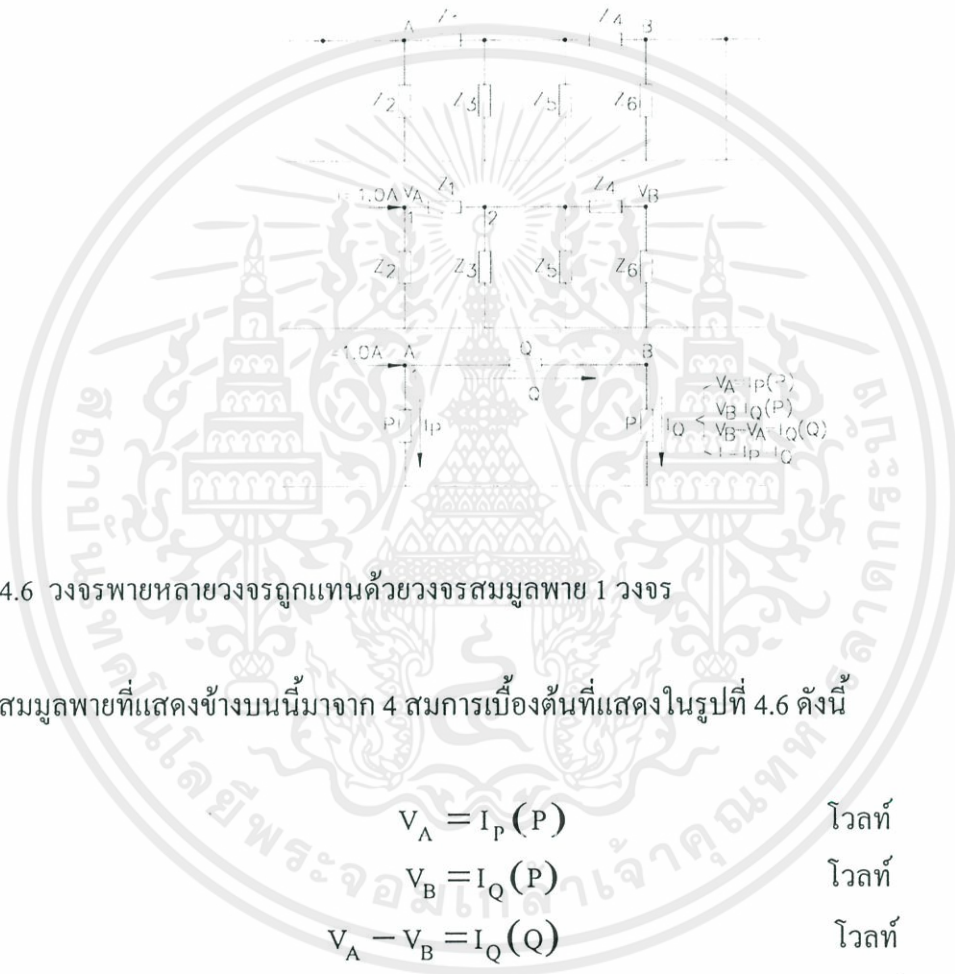
4.8.1 สมมติว่าทุก ๆ วงจรพายระหว่างจุด A และ B (รวมทั้งทุก ๆ ส่วนของ วงจรที่เชื่อมต่อกับจุด A และ B กับ Ground) ปลดออกจากวงจรเดิม

4.8.2 ให้กระแส $I = 1.0 \angle 0$ แอมแปร์ ไหลสู่จุด A แล้วคำนวณค่าแรงดัน V_A และ V_B โวลท์ ที่จุด A และ B ตามลำดับ

4.8.3 วงจรสมมูลพาย ถูกทดแทนด้วย Span Impedance (Q) และ Impedance ต่อดลง Ground (P) 2 จุด ค่าอิมพีแดนซ์ที่ ทั้งคู่สามารถคำนวณได้ดังนี้ [2]

$$P = ((V_A) + (V_B)) / 1.0 \quad \Omega \quad (4.1)$$

$$Q = P(V_A - V_B) / V_B \quad \Omega \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.6 วงจรพายหลายวงจรถูกแทนด้วยวงจรสมมูลพาย 1 วงจร

วงจรสมมูลพายที่แสดงข้างบนนี้มาจาก 4 สมการเบื้องต้นที่แสดงในรูปที่ 4.6 ดังนี้

$$V_A = I_p(P) \quad \text{โวลต์} \quad (4.3)$$

$$V_B = I_Q(P) \quad \text{โวลต์} \quad (4.4)$$

$$V_A - V_B = I_Q(Q) \quad \text{โวลต์} \quad (4.5)$$

$$I = I_p + I_Q \quad \text{แอมป์} \quad (4.6)$$

4.9 การคำนวณค่า (V_A) และ (V_B) ของวงจรชั้นบันได ในรูปแบบที่เป็น Non-Uniform Pis

เมื่อวงจรพายระหว่างจุด A และ B มีบางช่วงที่แตกต่างจากช่วงอื่น ค่าของ (V_A) และ (V_B) (แสดงในรูปที่ 4.7) สามารถคำนวณด้วยวิธี Matrix โดยที่จำนวน Columns เท่ากับจำนวนของวงจรพายที่ทดแทนขึ้นมาใหม่



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลพายที่ใช้ทดแทนวงจรชั้นบันไดที่เป็น Non-Uniform

4.10 การคำนวณค่า (V_A) และ (V_B) ของวงจรชั้นบันไดในรูปแบบที่เป็น Uniform Pis

ในกรณีนี้ การคำนวณสามารถทำได้โดยสมการง่าย ๆ โดยที่จุดที่แยกของวงจร (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) จาก (1) ถึง (N), Uniform Pis ถูกนำเสนอโดยค่า Impedances (Z_S), (Z_G) โอห์ม โดยสมการดังนี้ [2]

$$Z_E = \frac{Z_S}{2} + \sqrt{\left(\frac{Z_S^2}{4} + Z_S Z_G\right)} \quad \Omega \quad (4.7)$$

$$K = \frac{Z_G}{Z_G + Z_E} \quad (4.8)$$

$$A = \frac{K^{2N}}{1 - K^{2N}} \quad (4.9)$$

$$V = I * Z_G (1 - K) \left[K^{n-1} (1 + A) + \frac{A}{K^n} \right] \quad \text{โวลต์} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำข้อมูลไปใช้อื่นๆ จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Z_G = Transverse Impedance (Ω)

เช่นค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

$Z_s =$ Longitudinal Impedance (Ω)

เช่นค่า Self Impedance ของ Overhead Ground Wire

สมการที่ 37 เป็นวิธีการคำนวณค่าแรงดันเทียบกับจุดต่อลงดิน ณ จุด n ใด ๆ ระหว่างจุด(1) กับจุด (N) ดังนั้นถ้า $n = 1$ จะได้ค่าแรงดัน ณ จุด A (V_A), $n = N$ จะได้ค่าแรงดัน ณ จุด B (V_B)

4.11 ตัวอย่างการคำนวณวงจรชั้นบันได

4.11.1 วงจรชั้นบันไดที่ประกอบด้วย 2 จุด (รูปที่ 4.8A)

ถ้ากำหนดให้ $Z_s = 3\Omega$; $Z_G = 2\Omega$; $I = 10.0 \angle 0$; $N = 2$

จะได้

$$Z_E = \frac{3}{2} + \sqrt{\left(\frac{9}{4} + 3(2)\right)} = 4.37228 \quad \Omega$$

$$K = \frac{Z_G}{Z_G + Z_E} = 0.31386$$

$$A = \frac{K^4}{1 - K^4} = 0.0097989$$

$$n = 1 ; V_1 = 14.28572 \text{ Volt}$$

$$n = 2 ; V_2 = 5.714278 \text{ Volt}$$

4.11.2 วงจรชั้นบันได ที่ประกอบด้วย 5 จุด (รูปที่ 4.8B)

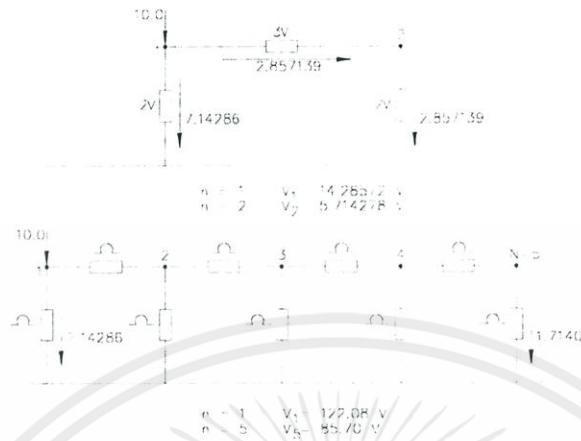
ถ้ากำหนดให้ $Z_s = 2\Omega$; $Z_G = 50\Omega$; $I = 10.0 \angle 0$; $N = 5$ จะได้

$$Z_E = 3, K = 0.3333, A = \frac{K^{10}}{1 - K^{10}} = 0.0000169353$$

$$n = 1, V_1 = 122.08 \text{ Volt}$$

$$n = 5, V_5 = 85.07 \text{ Volt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการคำนวณวงจรบันได

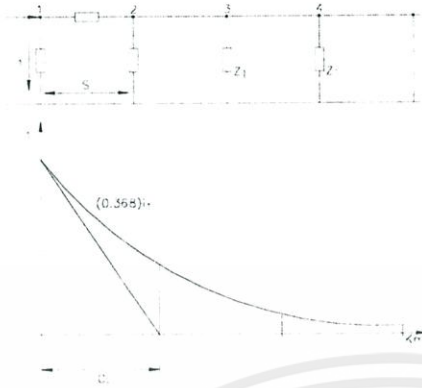
4.12 “Characteristic Length” (“Space Constant”) ของวงจร Uniform Ladder Circuit

Characteristic Length (CL) ของวงจรขั้นบันไดคือระยะทางจากที่เกิดกระแสไหลสู่วงจรแล้วแรงดันลดลงเหลือ 36.8% ของแรงดัน ณ.จุดที่กระแสไหลสู่ระบบ (แสดงในรูปที่ 4.9) สมการของ CL สามารถคำนวณได้ดังนี้ [2]

$$CL = \frac{-S}{\ln(K_1)} \tag{4.11}$$

- โดยที่ CL = Characteristic Length; km
- S = Span ของเสาส่ง; km
- K₁ = Module of the complex (K)
- = |k| (4.12)

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ณ จุดที่ห่างจากจุดที่เกิดกระแสไหลเข้าเท่ากับระยะ CL จะมีแรงดันเอกสารลดลงเท่ากับ 0.368 V₁, V₁ คือแรงดัน ณ จุดที่กระแสไหลเข้า (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข.1.3) ในการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 “Characteristic Length” (CL) หรือ “Space Constant” (SC)



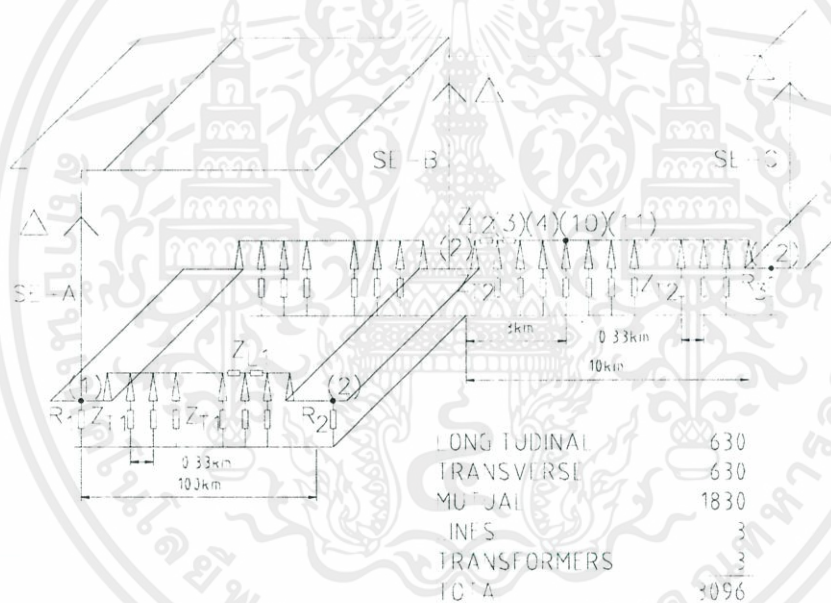
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การคำนวณของตัวแปรในวงจรชั้นบันได

จากทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 นั้น ในบทนี้จะได้แสดงวิธีการคำนวณตัวแปรต่างๆในวงจรชั้นบันไดซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสกริด(Grid Current) ของวงจรระบบต่อลงดิน

5.1 ตัวอย่างของระบบและวิธีการใช้ Decoupled method



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน

รูปที่ 5.1 แสดงระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน ประกอบด้วย 3 สถานีไฟฟ้า (SE-A), (SE-B) และ (SE-C) โดยที่สถานี SE-A และ SE-B อยู่ห่างกัน 100 km. และเชื่อมโยงด้วยระบบสายส่ง 2 วงจร, สถานีไฟฟ้า SE-B และ SE-C อยู่ห่างกัน 10 km. ความต้านทานของระบบต่อลงดินการคำนวณของแต่ละสถานี (Ground Mat resistance) มีค่าเท่ากับ R_1 , R_2 และ R_3 (โอห์ม) ตามลำดับการนำไปใช้

ระบบต่อลงดินของแต่ละสถานีถูกต่อด้วย วงจรขั้วบนโคที่ใช้แทนสาย steel ground wire ของสายส่ง ระหว่าง SE-A และ SE-B ซึ่งมี SPAN = 0.33 km ทำให้ได้วงจรพาย (100 km / 0.33 km) 300 วงจรพาย, มี Longitudinal Impedances Z_{L1} (โอห์ม) และ Transverse Impedances Z_{T1} (โอห์ม) ในแต่ละ impedance Z_{L1} ถูกนำเสนอแทน mutual couplings ของสายเฟสของทั้ง 2 lines และ Impedance Z_{L1} ของ ground wire ของอีก line หนึ่ง

วงจรขั้วบนโคของ ground wire ของ line ระหว่าง SE-B และ SE-C ซึ่งมี SPAN = 0.33 km ทำให้ได้วงจรพาย (10 km / 0.33 km) 30 วงจรพาย, มี longitudinal impedance Z_{L2} (โอห์ม) และ Transverse Impedance Z_{T2} (โอห์ม) ในแต่ละ Z_{L2} ถูกนำเสนอแทน Mutual coupling ของสายเฟส ของสายส่งทั้งหมด ดังนั้น จำนวนวงจรย่อยของรูปที่ 5.1 ทั้งหมดจะเท่ากับ 3096 วงจร

5.2 กำหนดเป้าหมายที่ต้องการคำนวณ (Calculation Objectives)

ถ้าเราต้องการจะออกแบบระบบต่อลงดินของ SE-B ดังที่กล่าวแล้วในข้างต้นว่า กระแสกริด (Grid Current) จะมีสัดส่วนเทียบกับกระแสลัดวงจรน้อยมาก เนื่องจากมีการกระจายกระแสไปตามระบบต่อลงดินภายนอกที่มาต่อเชื่อมและระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าเอง ดังนั้น จึงต้องพิจารณาค่ากระแสกริดนี้อย่างรอบคอบ เพื่อที่จะได้นำค่าดังกล่าวไปคำนวณ ขนาดของระบบต่อลงดิน ระยะห่างระหว่างสายตัวนำต่อลงดิน (Ground Conductor) และคำนวณหาค่าความปลอดภัยเทียบกับ Touch Voltage , step Voltage, mesh Voltage และ Transferred Voltage เทียบกับสถานีใกล้เคียง

5.3 องค์ประกอบในการช่วยออกแบบ

ในบางกรณี มีการใช้สาย ACSR ground wire ทดแทนสาย steel wire ในช่วงเสาต้นที่ใกล้ๆ กับสถานีไฟฟ้า เพื่อช่วยในการกระจายกระแสลัดวงจรให้ดีขึ้น ซึ่งมีการพิสูจน์แล้วว่าการเพิ่มสาย ACSR ground wire นี้ สามารถลดกระแสกริด ณ. สถานี นั้นๆ ได้เป็นอย่างมาก ดังนั้น ในการคำนวณ ควรเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการเพิ่มสาย ACSR ground wire เทียบกับค่าใช้จ่ายที่ลดลง เนื่องจากลดสาย Ground Conductor ในสถานีแล้วหาที่ต่ำสุดที่ยังอยู่ในขอบเขตของความปลอดภัย

5.4 ขั้นตอนการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ขั้นตอนการคำนวณแบ่งออกเป็น 8 ลำดับ ดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 ชั้นที่ 1 เลือกจุดที่ต้องการทราบค่า

จุดที่ต้องการทราบค่าที่กำหนดขึ้นนี้ จะต้องเป็นจุดที่จำเป็นต้องเหลืออยู่ในวงจรสมมูลที่ลดลงแล้ว จากรูปที่ 5.1 คือ จุดที่ 1 - 12

5.4.1.1 พิจารณาจำนวนของ ACSR Ground wire span

จุด (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), และ (11) ถูกเลือกให้เป็นจุดเปลี่ยนสาย steel ground wire เป็น ACSR เพื่อช่วยปรับปรุงการกระจายของกระแสลัดวงจรที่ใกล้สถานี SE-B

5.4.1.2 จุดวิกฤตที่เกิดการลัดวงจรที่ทำให้แรงดันถ่ายโอน (Potential Transfer) มีค่าสูงสุด

Potential Transfer จะมีค่าสูงสุดระหว่างสถานีไฟฟ้า SE-A และ SE-B เมื่อเกิดการลัดวงจรที่สถานีใด สถานีหนึ่ง เช่นเดียวกับ ระหว่างสถานี SE-B และ SE-C ดังนั้นต้องพิจารณาจุดที่เกิดการลัดวงจรทั้ง 3 สถานี (จุด 1, 2 และ 12)

5.4.1.3 จุดวิกฤตที่ทำให้เกิดค่ากระแสลัดสูงสุด

ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรที่ทำให้เกิดกระแสลัดสูงสุดระหว่าง SE-B และจุดอ้างอิง (Remote ground) มีดังนี้

- Fault to ground ที่ SE-B
- Fault to ground ที่จุดระยะทาง 3 (CE_1) จาก SE-B ไปยัง SE-A (CE : Characteristic Length or Space Constant) โดยที่ ระยะทาง CE_1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_{E1} = \frac{Z_{L1}}{2} + \sqrt{\frac{Z_{L1}^2}{4} + Z_{L1} \cdot Z_{T1}} \quad (5.1)$$

$$K = \frac{Z_{T1}}{Z_{T1} + Z_{E1}} \quad (5.2)$$

$$K_1 = \text{Module of Complex (K)} \quad (5.3)$$

$$K_1 = |K| \quad (5.4)$$

$$S = \text{Span ของวงจรขั้วบนใด (=0.33 km)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ต่อบนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเอกสารไปใช้

$$CE = \frac{-S}{\ln(K_1)} \quad (5.5)$$

- Fault to ground ที่จุดระยะทาง 3 (CE_2) จาก SE-B ไปยัง SE-C

การคำนวณ CE_2 ใช้สูตรเช่นเดียวกับการคำนวณ CE_1 โดยมีตัวแปร Z_{T2} , Z_{L2}

5.4.2 ขั้นที่ 2 กระแส Zero Sequence ที่กระจายไปตาม สายเฟส และนิวทรอลของ หม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่า กรณีเกิดการลัดวงจรที่ SE-C (Monitored Point จุดที่ 12) Zero Sequence Current I_{N1} และ I_{N2} จะไหลไปตามสายนิวทรอล ของหม้อแปลงและกระแสลัดวงจร I_C จะไหลลงที่จุด SE-C



รูปที่ 5.2 กระแส Zero Sequence ที่กระจายไปตามสายเฟส และนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการทำงานเดียวกัน ต้องคิดจุดอ้างอิงที่ SE-A และ SE-B เป็นจุดวิกฤต เพื่อคำนวณค่า กระแสลัดวงจร

5.4.3 ขั้นที่ 3 จัดกลุ่มของวงจรที่มีลักษณะเหมือนกัน (Uniform Section, รายละเอียด แสดงในภาคผนวก ก.)

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็น 4 กลุ่ม วงจรที่มีลักษณะเป็น Uniform Section คือ ระหว่างจุด (1-2), (-2), (2-11) และ (11-12)

5.4.4 ขั้นที่ 4 Decoupled Method

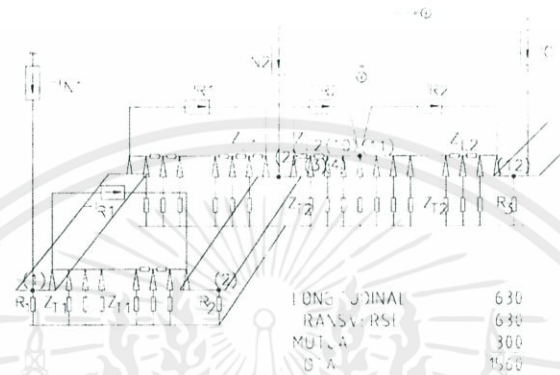
จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า วงจรเหนี่ยวนำระหว่างวงจรต่อลงดินและวงจรจำหน่าย สายเฟส สามารถทดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส 4 จุด ที่เชื่อมต่อระหว่างจุดที่เป็น Uniform Section วิธีการนี้คือ Decoupled Method ซึ่งสามารถลดจำนวนวงจรจาก 3096 วงจรย่อย เหลือเพียง 1560 วงจรย่อย

5.4.5 ขั้นที่ 5 แทนกระแสนิวทรอล และ Zero Sequence Current ด้วย แหล่งจ่าย กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็น (I_{N1}) และ (I_{N2}) แทนกระแสนิวทรอล (จากนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า) และ I_C แทนกระแสลัดวงจรที่จุด SE-C (จากจุด 12 เทียบกับจุดอ้างอิง)

5.4.6 ขั้นที่ 6 ลดจำนวนวงจรขนาน

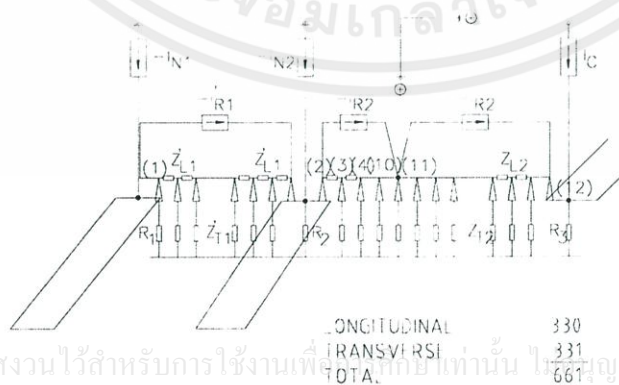
ระหว่างสถานี SE-A และ SE-B มี 2 วงจรขนานกันตลอดระยะทาง 100 km. และไม่มีจุด
 วิกฤตระหว่างทั้ง 2 จุด ดังนั้นวงจรชั้นบันไดที่ใช้แทน ground wire อยู่ในรูปของ Parallel Section
 ทำให้สามารถลดลงเหลือ 1 วงจรสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ขั้นตอนนี้สามารถลดขนาดวงจรย่อย
 จาก 1560 วงจรย่อย เหลือ 661 วงจรย่อย



รูปที่ 5.3 แสดงวงจรสมมูลที่ลดลงแล้วหลังจากขั้นตอนที่ 5

5.4.7 ขั้นที่ 7 แทนวงจรชั้นบันได ด้วยวงจรสมมูลพาย (Equivalent pis)

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าระหว่างจุด (1-2) และ (11-12) ประกอบด้วยวงจรชั้นบันได
 2 วงจร ซึ่งมีวงจรพายหลายๆ วงจรประกอบกันอยู่ ในแต่ละวงจรชั้นบันได เราสามารถลดขนาด
 ลงเหลือวงจรสมมูลพาย (Equivalent pis) หนึ่งวงจรได้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงใน ภาค
 ผผนวก ข)

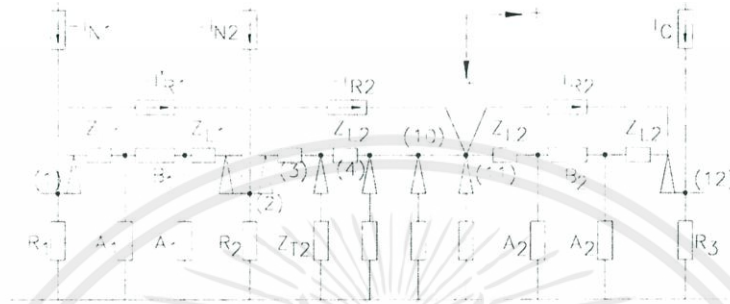


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่... ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

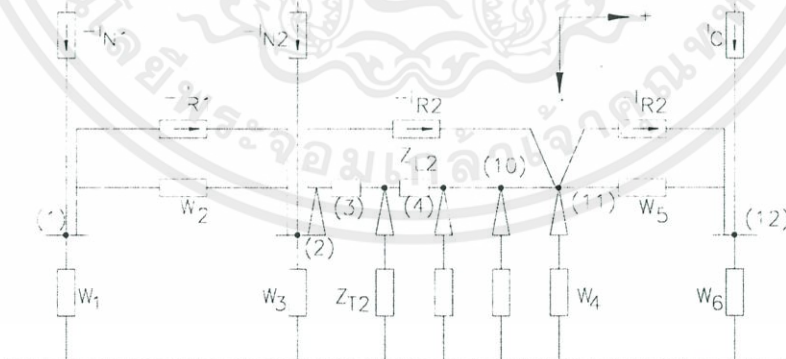
รูปที่ 5.4 แสดงวงจรสมมูลที่ลดลงแล้วหลังจากขั้นตอนที่ 6

เพื่อสะดวกในการคำนวณ ระหว่างจุด 1 และ 2 เราจะได้ Equivalent pi 1 วงจรมีค่า Impedance A_1 และ B_1 (แสดงในรูปที่ 5.5) และได้ Equivalent Pi ระหว่างจุด 11 และ 12 มีค่า Impedance A_2 และ B_2



รูปที่ 5.5 แทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาย (A_1 - B_1) และ A_2 - B_2)

จาก Star - mesh Transformation ในแต่ละ Equivalent pi เทียบกับ R_1, R_2 สามารถลดขนาดของวงจร และได้ Impedance (W_1, W_2, W_3) และ (W_4, W_5, W_6) ดังแสดงในรูปที่ 5.6

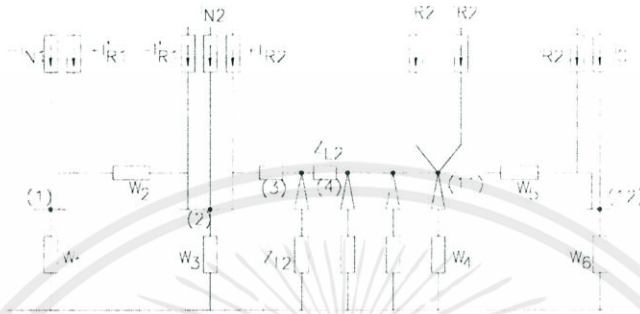


รูปที่ 5.6 ลดขนาดของวงจรระหว่างจุด (1-2) และ (11-12) นี้ ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

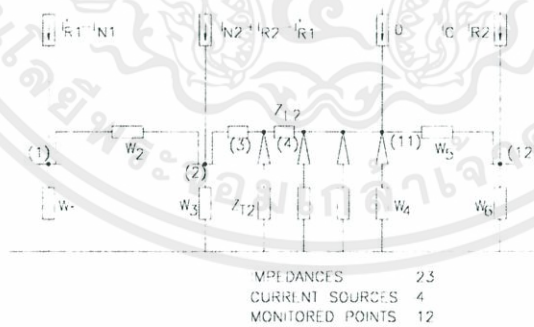
จากวงจรในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นแหล่งจ่ายกระแส 3 จุด ที่ต่อเชื่อมกับ Remote ground และอีก 3 จุด ต่อเชื่อมระหว่าง 2 จุด ของวงจร ซึ่งสามารถลดลงเหลือ 2 จุด ได้โดยแทน $(-I'_{R1})$ ที่

ต่อเชื่อมระหว่างจุด 1 และ 2 ด้วย $(+I'_{R1})$ ต่อที่จุด 1 กับ Remote ground และ $(-I'_{R1})$ ระหว่างจุด 2 กับ Remote ground ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ทดแทนแหล่งจ่ายกระแสลงในวงจร

จากรูปที่ 5.7 สามารถลดจำนวนวงจรย่อยลงอีกเหลือเพียง 12 จุด อ้างอิง Impedance 23 หน่วย, แหล่งจ่ายกระแส 4 จุด, ซึ่งจะมีค่าเหมือนกับวงจรที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีถึง 3096 วงจรย่อย เราจะได้ Equivalent Circuit ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงวงจรสมมูลที่ลดลงแล้วโดยมีคุณสมบัติเหมือนรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.8 ชั้นที่ 8 คำนวณค่าที่ต้องการจากวงจรสมมูลขั้นสุดท้าย

จากขั้นตอนทั้ง 7 ที่กล่าวมานั้น เราใช้วิธีการลดขนาดของวงจรด้วยทฤษฎีวงจรพื้นฐาน ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก จากนั้นเราใช้วิธี Matrix เพื่อคำนวณค่า Voltage ที่จุด Monitored ทั้ง 12 จุดได้ เช่น V_2 คือ ground potential rise ที่จุด 2 ที่เทียบกับ Remote ground ขณะที่เกิด Fault to ground ที่จุด 12 กระแส I_{R2} ไหลผ่านตัวนำต่อลงดินที่จุด SE-B จะเท่ากับ

$$I_{R2} = \frac{V_2}{R_2} \quad \text{แอมป์} \quad (5.6)$$

นั่นคือ เราจะได้กระแสกริดที่เกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้า SE-B จากนั้นจึงนำไปคำนวณ ระบบต่อลงดินของสถานีเพื่อคำนวณหาค่าความปลอดภัยต่างๆ ตามขั้นตอนของ IEEE 80-1986 [1] (ขั้นตอนการคำนวณแสดงใน Flow Chart, บทที่ 6)

วงจรสมมูลดังรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นกรณีเกิด Fault ที่จุด SE-B เราต้องพิจารณากรณีที่เกิด Fault ณ จุดอื่นๆ อีกทั้ง 12 จุดด้วยกัน ซึ่งในแต่ละจุดอ้างอิงที่เปลี่ยนไปนั้นจะมีเฉพาะค่าของแหล่งจ่ายกระแสเท่านั้นที่เปลี่ยน และถ้าหากเราจะปรับปรุงระบบต่อลงดิน สามารถทำได้โดยเปลี่ยนค่า Longitudinal Impedance (Z_L) ของ Overhead ground wire เช่นระหว่างจุด 3 - 4 ก็จะทำให้ค่าแหล่งจ่ายกระแสเปลี่ยนไปด้วย

5.5 หลักการพิจารณาสถานีไฟฟ้าใกล้เคียงกัน (Neighbour substation)

รูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าจุด (1) และ (2) ถูกเชื่อมต่อด้วยอิมพีแดนซ์ (W_2) ของวงจรสมมูลพาย (W_1, W_2, W_3) และจุด (11), (12) ถูกต่อด้วยอิมพีแดนซ์ (W_5) ของวงจรสมมูลพาย (W_4, W_5, W_6)

จากข้อ ข.3.3 ของภาคผนวก ข อธิบายถึงค่าโอห์มของ W_5 มีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เพราะระยะทางจากจุด (11) ถึง (12) น้อยกว่า 3 เท่าของค่า Space constant ของวงจรขึ้นบันไดระหว่างจุด (11) และ (12) ด้วยเหตุนี้กระแสจะถูกไหลเข้าสู่วงจร ณ จุดด้านหนึ่ง จะเปลี่ยนแปลงแรงดันของอีกด้านหนึ่ง ดังนั้นวงจรต่อลงดินระหว่างจุด (11) และ (12) ถูกเรียกว่า “Electrically neighbours” (สถานีไฟฟ้าสัมพันธ์)

ในทางตรงกันข้ามค่าโอห์มของ (W_2) มีค่ามากกว่ามาก เพราะวาระยะทางระหว่างจุด (1) และ (2) มีค่ามากกว่า 3 เท่าของ Space Constant (3 SC) ของวงจรขึ้นบันไดระหว่างจุด (1) และ (2) ด้วยเหตุนี้กระแสที่ถูกไหลเข้า ณ จุดด้านหนึ่งจะไม่มีผลกับแรงดันของอีกด้านหนึ่ง ดังนั้น วงจรต่อลงดินระหว่างจุด (1) และ (2) จะถูกเรียกว่า “Electrically remote” (สถานีไฟฟ้าไม่สัมพันธ์)

หลักการนี้นำมาใช้กับวงจรที่ต้องการคำนวณระบบต่อลงดิน เช่น ที่สถานี (SE-B) ณ จุด (2) จุดที่จำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณาภายนอก (SE-B) คือจุดที่อยู่ห่างจาก SE-B ไม่เกิน 3 เท่า ของ SC เมื่อระยะห่างระหว่าง SE-B และ SE-C น้อยกว่า (3SC) ดังนั้นทุก ๆ จุดระหว่างจุด (2) ถึง (12)

จะต้องถูกนำมาพิจารณาในวงจรต่อลงดิน ในทางตรงกันข้ามระยะห่างระหว่าง SE-B และ SE-A มากกว่า (3SC) ดังนั้นจากจุดของระบบต่อลงดินของ SE-B ทุก ๆ อิมพีแดนซ์ที่เชื่อมกับ SE-A ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา เนื่องจากวงจรอยู่ในลักษณะเปิด (Open circuit) ด้วยอิมพีแดนซ์ (W_5)

ค่าอิมพีแดนซ์ (Z_E) ขึ้นอยู่กับวงจรชั้นบันไดระหว่างจุด (1) และ (2) หนึ่งวงจรที่ถูกต่อระหว่างจุด (2) และจุดต่อลงดินอ้างอิง (Remote ground) ด้วยเหตุนี้ค่าอิมพีแดนซ์ ($Z_E / 2$) ที่เชื่อมระหว่างจุด (2) และจุดต่อลงดินอ้างอิง สามารถแทนวงจรส่วนที่เหลือทางด้านซ้ายของจุด (2)



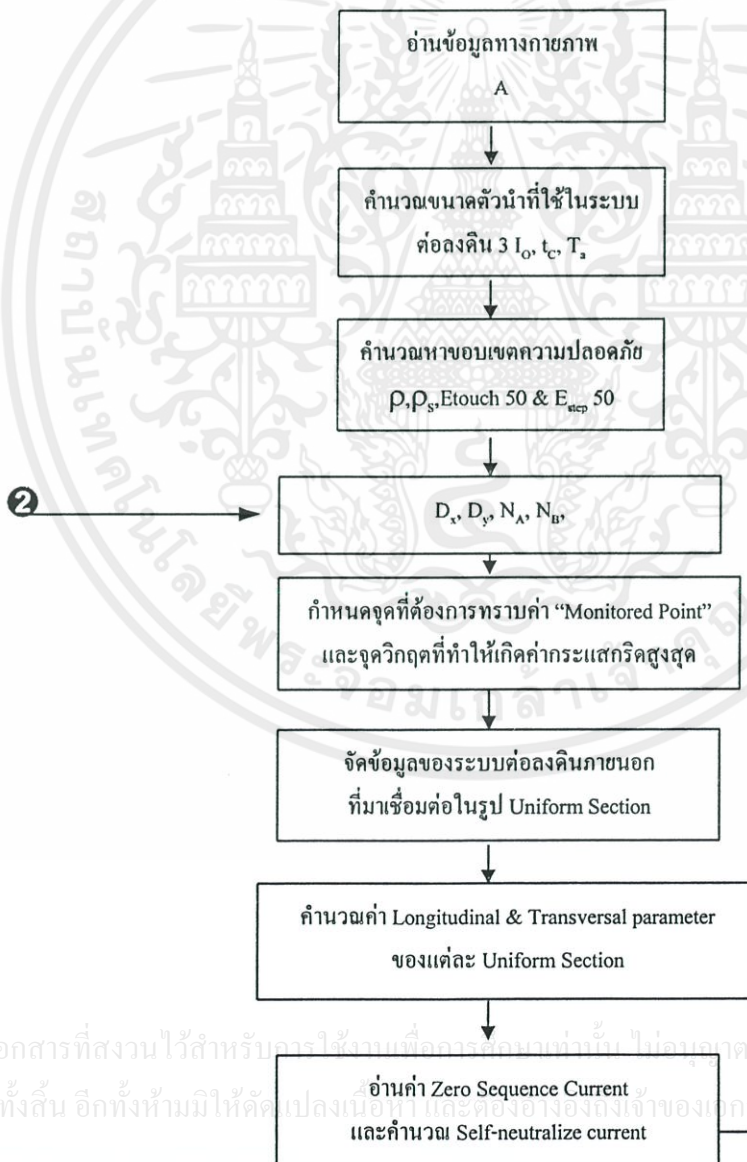
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การออกแบบระบบต่อลงดินโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และ การประยุกต์ใช้งาน

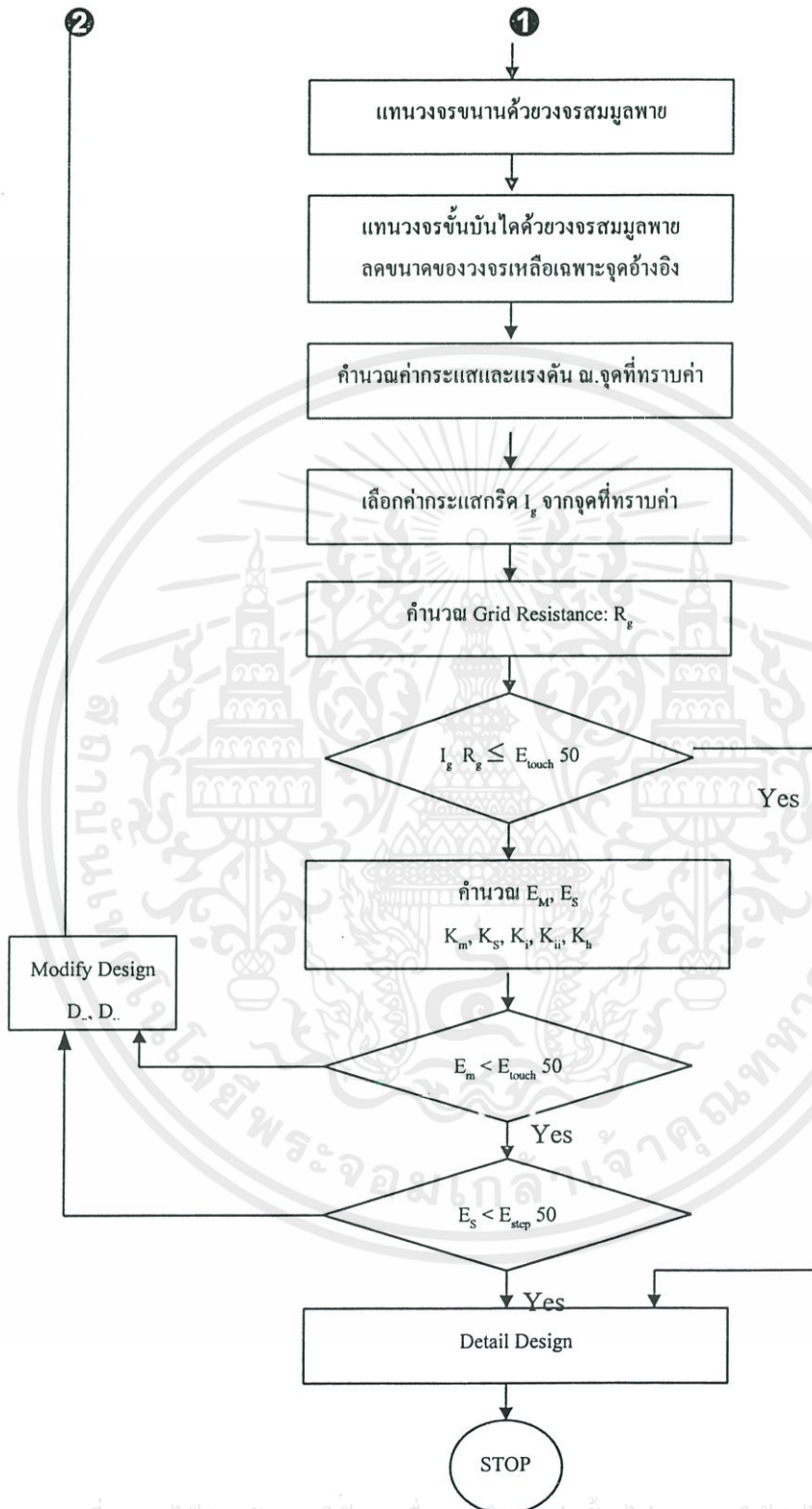
6.1 การออกแบบระบบต่อลงดินด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากหลักการและทฤษฎี ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2-5 นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการคำนวณดังแสดงใน Flow chart (รูปที่ 6.1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.1 Flow chart การคำนวณระบบต่อลงดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรรูปที่ 6.1 (ต่อ) ก็ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Flow chart ในรูปที่ 6.1 แสดงขั้นตอนการคำนวณการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยอาศัย Decoupled Method มาคำนวณผลของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าที่มีต่อค่ากระแสกริดของระบบขณะเกิดกระแสลัดวงจร การคำนวณในแต่ละขั้นอธิบายได้ดังนี้

6.1.1 ขั้นที่ 1 คำนวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า โดยป้อนข้อมูลทางกายภาพของสถานีไฟฟ้าคือความกว้างและความยาวของสถานีไฟฟ้า (เมตร) (รูปที่ 6.2)

The screenshot shows a software window titled "โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน". The interface includes a grid of pages labeled "หน้าที่ 1" through "หน้าที่ 8". The main area contains a form with the following fields and labels:

- ชื่อสถานีไฟฟ้าข้อย
- ความกว้างของสถานีไฟฟ้าข้อย (เมตร)
- ความยาวของสถานีไฟฟ้าข้อย (เมตร)
- ขนาดของสถานีไฟฟ้าข้อย (ตารางเมตร)

At the bottom of the form, there are four buttons: "Back", "Cancel", "Accept", and "Next".

รูปที่ 6.2 การคำนวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

6.1.2 ขั้นที่ 2 คำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน โดยป้อนข้อมูลดังนี้ เลือกชนิดของตัวนำต่อลงดิน, ขนาดของกระแสลัดวงจร (กิโลแอมป์), ช่วงเวลาขณะเกิดกระแสลัดวงจร (วินาที), อุณหภูมิภายนอกของบริเวณนั้นๆ (องศาเซลเซียส), จะได้ขนาดของตัวนำที่เล็กที่สุดที่ต้องใช้ในการก่อสร้างระบบต่อลงดิน(ตารางมิลลิเมตร), โดยที่ค่าของ T_m , Thermal coefficient of resistivity at reference temperature, TCAP, และ K_0 เป็นค่าคงที่ที่จะแปรตามชนิดของตัวนำ(รูปที่ 6.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.3 กำหนดขนาดของตัวนำต่อลงดิน

6.1.3 ขั้นที่ 3 กำหนดหาขอบเขตความปลอดภัย E_{touch} และ E_{step} โดยป้อนข้อมูลค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) และค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุรอยผิวหน้าดิน (ρ_s), เลื่อนน้ำหนักเฉลี่ยของบุคคลที่จะปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าที่ขนาด 50 กิโลกรัมหรือ 70 กิโลกรัม, และเวลาขณะเกิดกระแสลัดวงจร จะได้ขอบเขตความปลอดภัย E_{touch} และ E_{step} (รูปที่ 6.4)

รูปที่ 6.4 กำหนดหาขอบเขตความปลอดภัย

6.1.4 ขั้นที่ 4 เริ่มต้นการออกแบบ โดยการกำหนดขนาด D_x, D_y จากการกำหนดจำนวนของตัวนำที่ขนานกันในแนวแกน X (N_x) และแกน Y (N_y) , เลือกจำนวนและขนาดของ Ground Rod , ความลึกของตัวนำต่อลงดิน จากนั้นคำนวณความยาวทั้งหมดของตัวนำต่อลงดิน และค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน (รูปที่ 6.5)

รูปที่ 6.5 กำหนดขนาด D_x, D_y และคำนวณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

6.1.5 ขั้นที่ 5 ป้อนข้อมูลของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อ เช่นจำนวนของระบบต่อลงดินที่มาเชื่อมต่อ, ความต้านทานของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อ(โอห์ม), ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน(กิโลเมตร), ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า(SPAN) (กิโลเมตร), และจำนวนของวงจรสายส่งไฟฟ้าของแต่ละสถานีที่เชื่อมโยงถึงกัน(รูปที่ 6.6)

6.1.6 ขั้นที่ 6 อ่านข้อมูลของ Longitudinal Impedance; Z_1 (Ω/km), Transverse Impedance; Z_2 (Ω/km), และค่ากระแส Zero Sequence & Neutral Current ของ Power Transformer จากโปรแกรม Short Circuit จากนั้นจัดข้อมูลให้อยู่ในรูปของ Uniform Section, แทนวงจรขนานด้วยวงจรสมมูลพาย, ลดขนาดของวงจรสมมูลลงให้เหลือเฉพาะจุดที่ต้องการทราบค่า (รูปที่ 6.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4
หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8

จำนวนสถานีไฟฟ้าข้างเคียงที่ทำการเชื่อมต่อจำนวน สถานี

ชื่อสถานีไฟฟ้าข้างเคียง	Grid resistance (ohm)	ระยะทางระหว่างสถานี (km)	ระยะห่างระหว่างเสาสูง(km.)	จำนวนวงจรสายส่ง
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.6 อ่านข้อมูลของระบบต่อลงดินที่มาเชื่อมต่อ

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

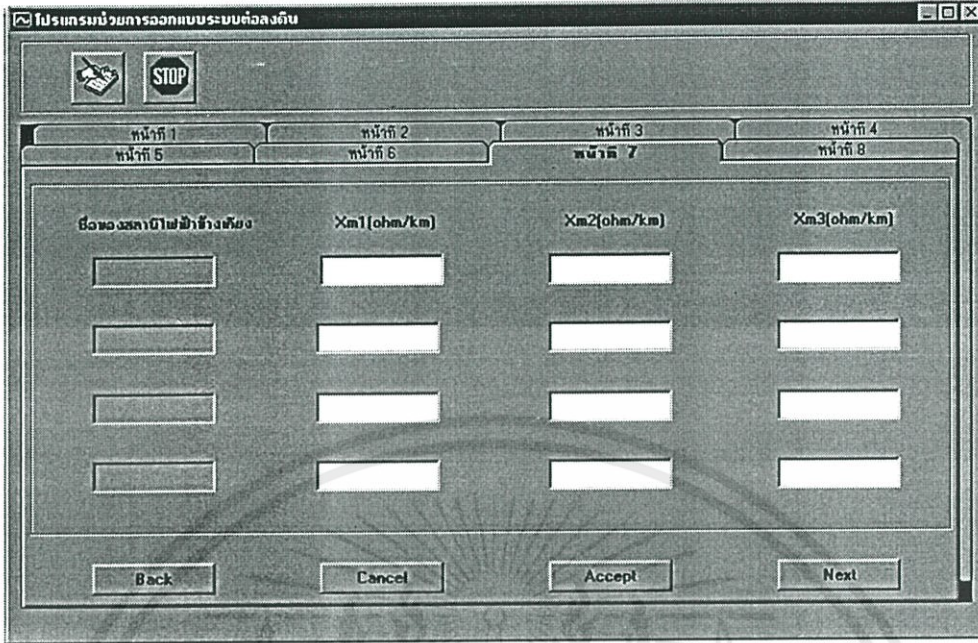
หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4
หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8

ชื่อของสถานีไฟฟ้าข้างเคียง	Z _l (ohm/km)	Z _t (ohm)	I _o (Amp)	I _n (Amp)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

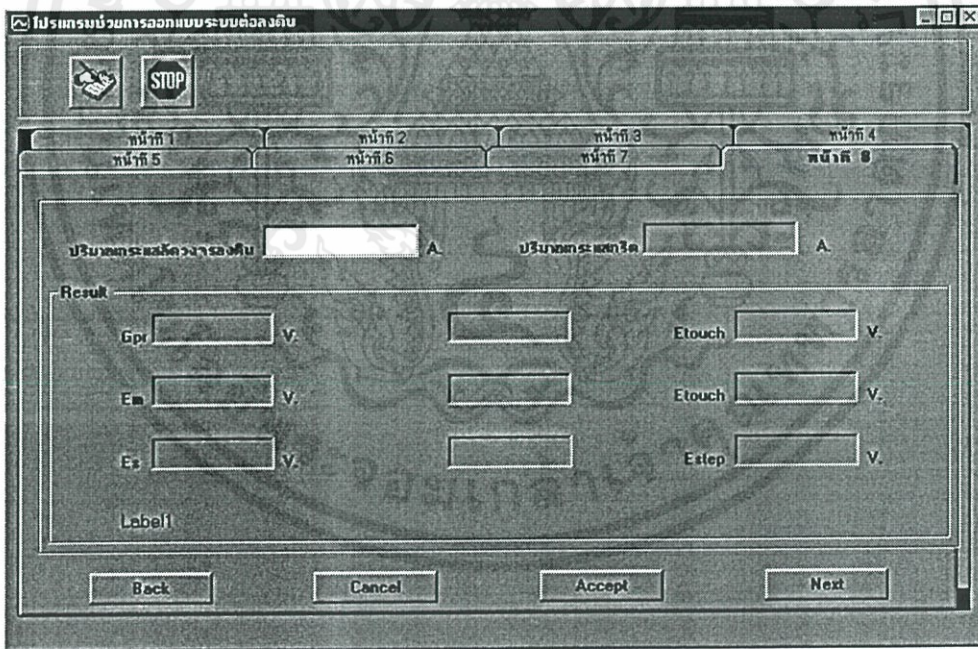
Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.7 อ่านข้อมูล Z_l & Z_t และ I_o & I_n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 6.1.7 ขั้นที่ 7 กำหนดค่า Mutual Impedance ของระบบต่อลงดินภายนอก, กำหนดค่าการคำนวณ Self Neutralized Current (รูปที่ 6.8) เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 Mutual Impedance ของสาย Ground



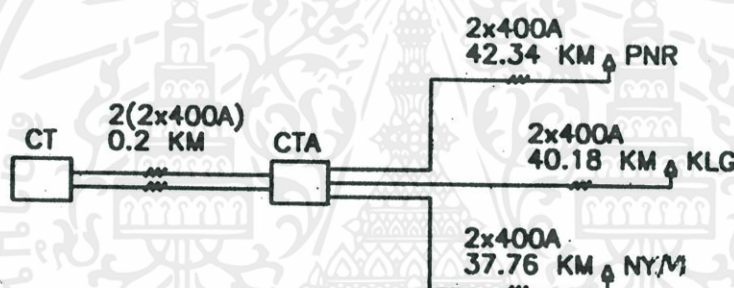
รูปที่ 6.9 ผลการคำนวณค่า I_G , GPR , E_m , E_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
6.1.8 ขั้นที่ 8 ป้อนค่ากระแสลัดวงจร (Single line to ground fault หรือ Line to line to ground fault) คำนวณค่าของกระแสกริด ณ จุดที่ต้องการออกแบบระบบต่อลงดิน, คำนวณค่าของ E_m & E_s เปรียบเทียบกับขอบเขตความปลอดภัย E_{touch} และ E_{step} ตรวจสอบว่าอยู่ในขอบเขตความปลอดภัยหรือไม่ ถ้ายังไม่ปลอดภัยให้ปรับปรุงการออกแบบโดยการเพิ่มความยาวของตัวนำ

ต่อลงดิน, ลดค่าระยะห่างระหว่างตัวนำต่อลงดิน หรือลดค่าอิมพีแดนซ์ของสาย Overhead Ground Wire(รูปที่ 6.9)

6.2 การประยุกต์ใช้งาน

จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่กล่าวมาในข้อ 6.1 ได้นำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจันทบุรี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นสถานีไฟฟ้าขนาดแรงดัน 115kV ซึ่งเชื่อมโยงกับสถานีไฟฟ้าข้างเคียงอีก 4 สถานี รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.10 ตัวอย่างของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน

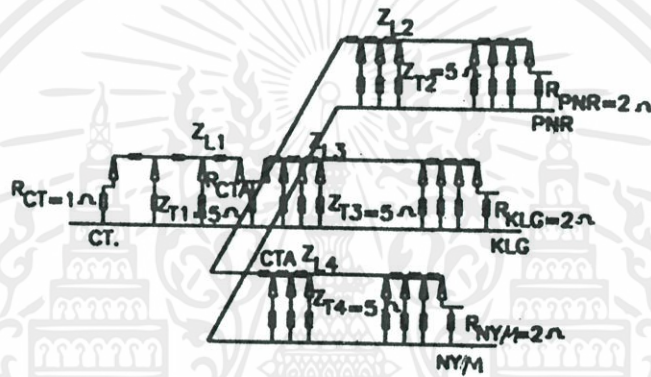
รูปที่ 6.10 แสดงสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ โดยมีสถานีไฟฟ้าย่อยจันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเชื่อมโยงกับสถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CTA) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ด้วยสายส่ง 2 วงจร ระยะทาง 0.2 กิโลเมตร, สถานี CTA เชื่อมโยงกับสถานีไฟฟ้าโป่งน้ำร้อน (PNR), สถานีไฟฟ้าขลุ้ง (KLG) และสถานีไฟฟ้านายายอาม (NYM) ด้วยระบบสายส่ง 1 วงจร ระยะห่างจาก CTA เท่ากับ 42.34 กิโลเมตร, 40.18 กิโลเมตร และ 37.76 กิโลเมตร ตามลำดับ

จากข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ภาคผนวก ง) จะได้ข้อมูลเบื้องต้น ดังนี้

SLG ที่ส่งมา	: Single line to ground fault	= 2,204.44	Amp.
I_0	: Zero Sequence Current	= 367.50	Amp.
I_N	: Neutral Current of Power Transformer	= 734.80	Amp.
Z_T	: Impedance of footing tower	= 5.0	Ω
Z_1	: Impedance of overhead ground wire	= 9.4 + 6.1j	Ω/km

R_{CT}	:	Ground Grid resistance ของสถานีไฟฟ้า CT	=	1.0	Ω
R_{PNR}	:	Ground Grid resistance ของสถานีไฟฟ้า PNR	=	2.0	Ω
R_{KLG}	:	Ground Grid resistance ของสถานีไฟฟ้า KLG	=	2.0	Ω
R_{NYM}	:	Ground Grid resistance ของสถานีไฟฟ้า NYM	=	2.0	Ω

SPAN ของสายส่งไฟฟ้าระบบ 115kV = 80 เมตร



รูปที่ 6.11 แสดงวงจรสมมูลพาย ของระบบต่อลงดินจากรูปที่ 6.10

จากวงจรในรูปที่ 6.11 นำไปคำนวณตามขั้นตอนที่ 1-8 ข้างต้นจะได้ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 6.12-6.19 ดังนี้

รูปที่ 6.12 ผลการคำนวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า = 10000 ตารางเมตร

รูปที่ 6.13 ผลการคำนวณขนาดของตัวนำต่อลงดิน = 87.24 ตารางมิลลิเมตร ดังนั้นต้องเลือกขนาดสายตัวนำต่อลงดินที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดมากกว่า 87.24 ตารางมิลลิเมตร ดังนั้นเราเลือกสายทองแดงเปลือยชนิด Hard Draw Copper Wire 97% ขนาดพื้นที่หน้าตัด 95 ตารางมิลลิเมตร

รูปที่ 6.14 จำนวนขอบเขตความปลอดภัย เลือกขนาดน้ำหนักของบุคคลที่ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้า 50 กิโลกรัม (น้ำหนักเฉลี่ยของคนไทย) ป้อนข้อมูลของความต้านทานจำเพาะของระบบต่อลงดิน $\rho = 195.4$ โอห์ม-เมตร, ความต้านทานของวัสดุโรยผิวหน้าดิน (หินเบอร์ 2) $\rho_s = 3000$ โอห์ม-เมตร, ความหนาของวัสดุโรยผิวหน้าสถานี = 0.15 เมตร, ช่วงเวลาของการเกิดกระแสลัดวงจร = 0.6 วินาที จะได้ค่าของขอบเขตความปลอดภัย $E_{touch} = 659.17$ โวลต์, $E_{step} = 2187.41$ โวลต์

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

ชื่อสถานีไฟฟ้าย่อย CTA

ความกว้างของสถานีไฟฟ้าย่อย 100 เมตร

ความยาวของสถานีไฟฟ้าย่อย 100 เมตร

ขนาดของสถานีไฟฟ้าย่อย 10000.00 ตารางเมตร

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.12 จำนวนพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

ชนิดของตัวนำ Commercial Hard Drawn Copper Wire 37% ขนาดตัวนำ 87.240 ตารางมิลลิเมตร

fault current 31.5 kA Thermal coefficient 0.00381

duration of fault current 0.5 วินาที Resistivity of conductor 1.7274 micro ohm/cm²

Ta 40 องศาเซลเซียส Tcap 3.422 J/cm²/°C

Tm 1084 องศาเซลเซียส K0 242

Back Cancel Accept Next

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 6.13 จำนวนขนาดของตัวนำต่อลงดิน

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ยี่สิบห้าปีนับแต่การเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

น้ำหนักเฉลี่ย
 50 kg
 70 kg

Surface resistivity 3000 ohm-m Surface layer thick 0.15 m
 Soil resistivity 195.4 ohm-m Duration of shock current 0.6 วินาที

Permissible touch voltage 659.17 volt
 Permissible step voltage 2187.41 volt

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.14 การคำนวณขอบเขตความปลอดภัย

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

ไม่มี ground rod
 มี ground rod

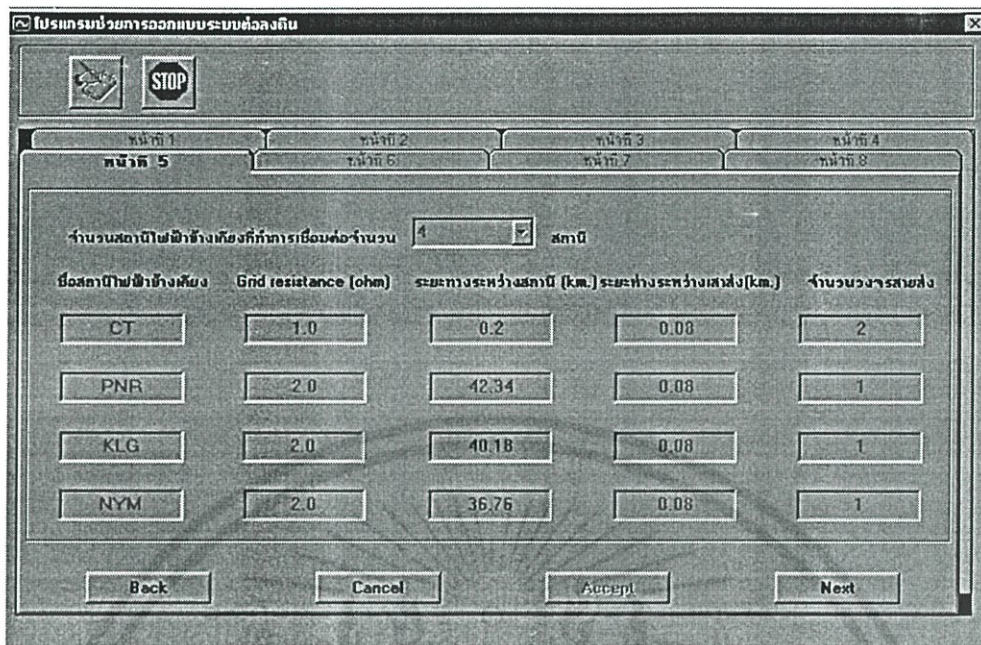
Dx 25.00 เมตร Nx 5
 Dy 25.00 เมตร Ny 5
 Rod length 3.28 เมตร จำนวน Rod 20

ความลึกที่ใช้ฝัง groundgrid 0.5 เมตร
 ความยาวของตัวนำทั้งหมด 1065.60 เมตร
 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน 1.05 ohm

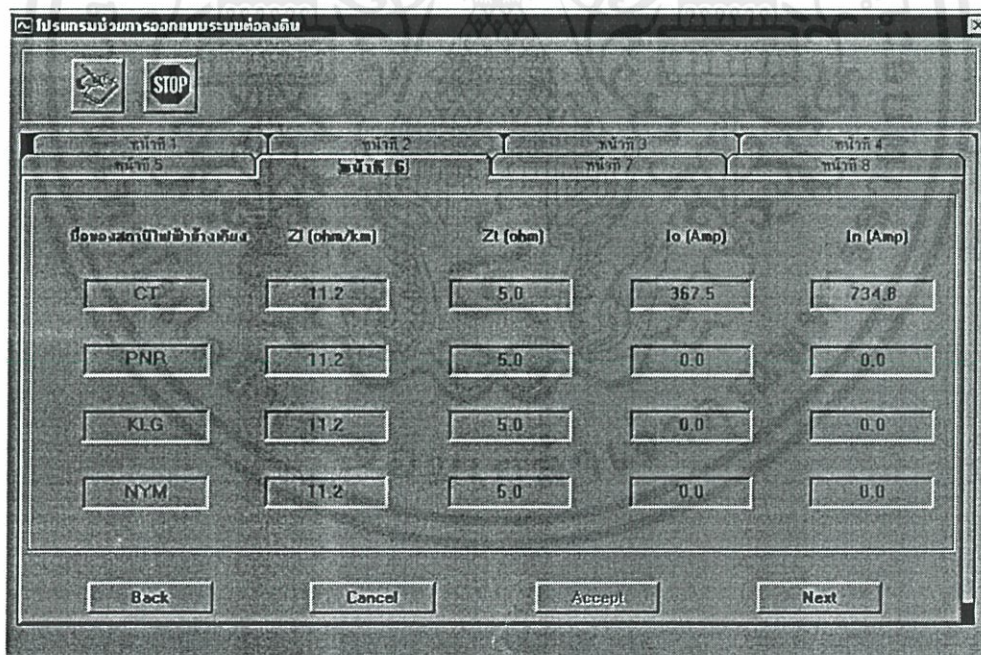
Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.15 กำหนดขนาด D_x , D_y และคำนวณค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 อ่านข้อมูลของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อ



รูปที่ 6.17 อ่านข้อมูล Z_1 , Z_l , I_0 และ I_N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 6.15 กำหนดขนาด D_x , D_y โดยเลือกจำนวนตัวนำที่ขนานกันทางแกน $X = 5$, ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกห่างตามที่ได้คิดแบบลงมือทำ และต้องอิงอิงถึงชื่อของเอกสารที่ครั้งใหม่ให้นำไปใช้ แกน $Y = 5$ ใช้ Ground Rod = 20 แท่ง , ระบบต่อลงดินฝังลึก 0.5 เมตร จะได้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน $R_g = 1.05$ โอห์ม

รูปที่ 6.16 ป้อนข้อมูลของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับสถานีไฟฟ้าจันทบุรี ในที่นี้มีสถานีไฟฟ้าที่มาเชื่อมต่อ 4 สถานี , ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของแต่ละสถานี , ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกัน , ระยะห่างระหว่างเสาส่ง SPAN = 80 เมตร, และจำนวนของวงจรระบบต่อลงดินในแต่ละส่วนที่เชื่อมโยงถึงกัน

รูปที่ 6.17 ป้อนข้อมูล Self Impedance ของสาย Overhead Ground Wire: $Z_1 = 11.2$ โอห์ม/กิโลเมตร , ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า: $Z_2 = 5.0$ โอห์ม , $I_0 = 367.5$ แอมป์ , $I_N = 734.8$ แอมป์ (จากโปรแกรม Short Circuit)

รูปที่ 6.18 คำนวณ Mutual Impedance ในที่นี้พิจารณาจากมาตรฐานของเสาส่งไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะได้ค่า $X_{m1} = 0.38$ โอห์ม/กิโลเมตร, $X_{m2} = 0.40$ โอห์ม/กิโลเมตร , $X_{m3} = 0.42$ โอห์ม/กิโลเมตร

รูปที่ 6.19 ป้อนค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น จะได้ผลการคำนวณคือ ค่าของกระแสกริด = 713.25 แอมป์, Grid Potential Rise (GPR) = 748.91 โวลต์, $E_m = 267.20$ โวลต์, $E_s = 67.21$ โวลต์ เปรียบเทียบค่า $E_m < E_{touch}$, $E_s < E_{step}$ ดังนั้นการออกแบบดังกล่าวอยู่ในขอบเขตความปลอดภัย

ค่าของสถานีไฟฟ้าข้างเคียง	Xm1(ohm/km)	Xm2(ohm/km)	Xm3(ohm/km)
CT	0.38	0.40	0.42
PNR	0.38	0.40	0.42
KLG	0.38	0.40	0.42
NYM	0.38	0.40	0.42

รูปที่ 6.18 คำนวณ Mutual Impedance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

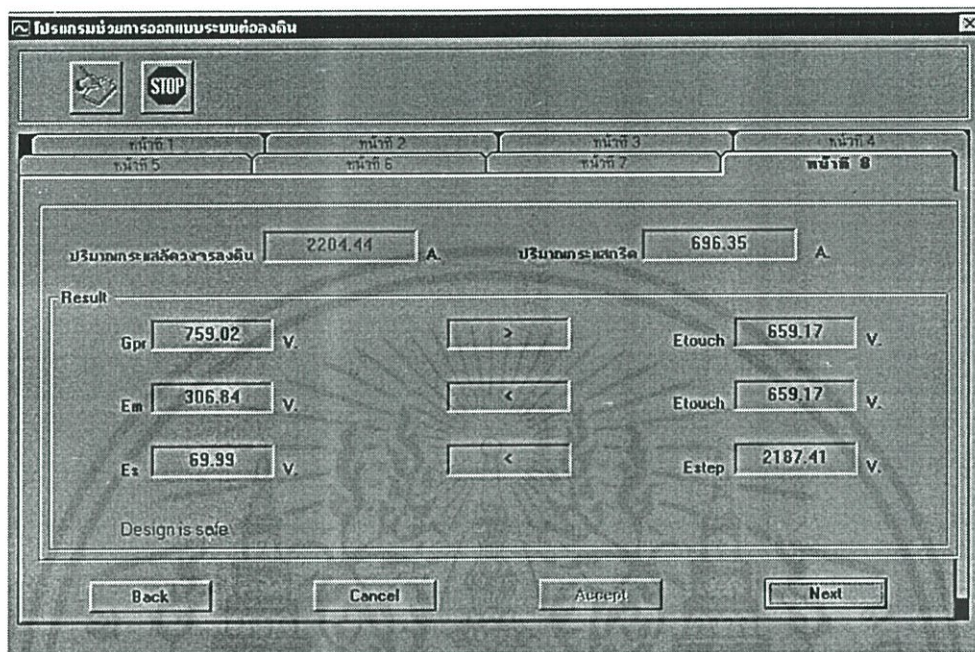
รูปที่ 6.19 ผลลัพธ์ จากการคำนวณ

6.3 การปรับปรุงการออกแบบโดยการปรับปรุงระยะห่างระหว่างตัวนำ

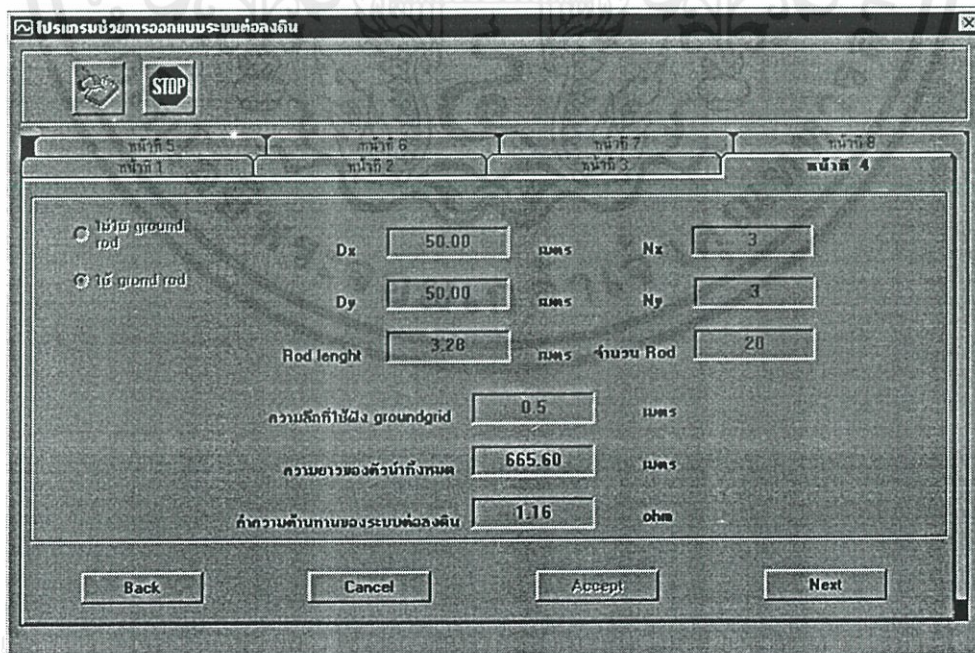
จากการออกแบบทั้ง 8 ขั้นตอน จะได้ผลการออกแบบตามที่ต้องการคือค่ากระแสเสกกริด, Mesh Voltage & Step Voltage สิ่งที่ต้องพิจารณาจากผลลัพธ์ของการคำนวณ ก็คือต้องเปรียบเทียบ

รูปที่ 6.20 ปรับปรุงการออกแบบ $N_x = 4$, $N_y = 4$

ค่า E_m กับค่า E_{touch} กรณีที่ E_m น้อยกว่าค่าของ E_{touch} อยู่มากเราสามารถปรับปรุงการออกแบบโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำต่อลงดิน D_x และ D_y โดยการเพิ่มจำนวนของตัวนำที่ขนานกัน



รูปที่ 6.21 ผลลัพธ์ กรณีที่ $N_x = 4, N_y = 4$

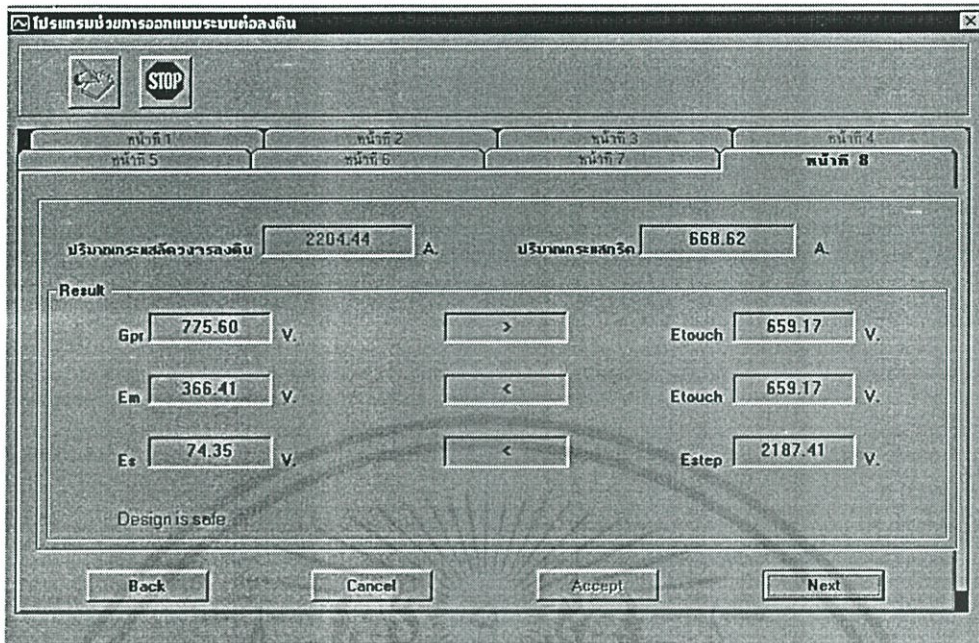


เอกสารนี้เป็น

นี้ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.22 ปรับปรุงการออกแบบ $N_x = 3, N_y = 3$



รูปที่ 6.23 ผลลัพธ์ กรณีที่ $N_x = 3, N_y = 3$

รูปที่ 6.20 และ 6.21 แสดงการปรับปรุงการออกแบบ โดยการลดจำนวนของตัวนำที่ขนานกัน $N_x = 4, N_y = 4$

รูปที่ 6.22 และ 6.23 แสดงการปรับปรุงการออกแบบ โดยการลดจำนวนของตัวนำที่ขนานกัน $N_x = 3, N_y = 3$

จากการเลือกขนาดของระยะห่างระหว่างตัวนำที่แตกต่างกันทั้ง 3 กรณี นำผลลัพธ์ที่ได้มาพิจารณาเปรียบเทียบ ผลดังแสดงในตารางที่ 6.1

จากตารางที่ 6.1 แสดงผลลัพธ์การคำนวณ จากการปรับปรุงระยะห่างระหว่างตัวนำของระบบต่อลงดิน พบว่าถ้าเราเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำต่อลงดิน จะมีผลทำให้ความยาวทั้งหมดของตัวนำต่อลงดินลดลง ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินจะเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสลัดกริดที่ไหลในสถานีไฟฟ้ามีค่าลดลง แต่ระยะห่างของตัวนำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ E_m และ E_s มีค่าเพิ่มขึ้น

จากทั้ง 3 กรณีพบว่าผลการออกแบบยังอยู่ในขอบเขตความปลอดภัย แต่ระยะห่างระหว่างตัวนำนี้ไม่ควรมีระยะห่างมากเกินไป เพราะในการก่อสร้างจริงจะต้องมีการเชื่อมโยงระหว่างสายตัวนำต่อลงดินกับสายดินของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในลานไก ดังนั้นเราควรเลือกระยะห่างที่เหมาะสมกับการจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากการปรับปรุงค่า D_x , D_y

ลำดับที่	ผลลัพธ์จากการคำนวณ	$N_x = 5$	$N_x = 4$	$N_x = 3$
		$N_y = 5$	$N_y = 4$	$N_y = 3$
1	ระยะห่างระหว่างตัวนำแนวแกน x (D_x , เมตร)	25	33.33	50
2	ระยะห่างระหว่างตัวนำแนวแกน y (D_y , เมตร)	25	33.33	50
3	ความยาวทั้งหมดของตัวนำต่อลงดินที่ใช้ (เมตร)	1065.6	865.6	665.6
4	ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (โอห์ม)	1.05	1.09	1.16
5	ปริมาณกระแสกริด (แอมป์)	713.25	696.35	668.62
6	Grid Potential Rise (GPR, โวลต์)	748.91	759.02	775.6
7	E_m (โวลต์)	267.2	306.84	366.41
8	E_g (โวลต์)	67.21	69.99	74.35

6.4 ผลของความต้านทานจำเพาะของดินต่อค่ากระแสกริด

เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่อค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้น ทดลองเปลี่ยนค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(ρ) ที่ค่าต่างๆ โดยที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ จากตัวอย่างการคำนวณตามข้อ 6.2 ดังนี้

รูปที่ 6.24-6.26 แสดงผลการคำนวณ กรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน : $\rho = 50$ โอห์ม-เมตร

รูปที่ 6.27-6.29 แสดงผลการคำนวณ กรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน : $\rho = 100$ โอห์ม-เมตร

รูปที่ 6.30-6.32 แสดงผลการคำนวณ กรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน : $\rho = 150$ โอห์ม-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8
หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4

น้ำหนักเฉลี่ย
 50 kg
 70 kg

Surface resistivity 3000 ohm-m Surface layer thick 0.15 เมตร
 Soil resistivity 50.0 ohm-m Duration of shock current 0.6 วินาที
 Permissible touch voltage 650.64 volt
 Permissible step voltage 2153.30 volt

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.24 ความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho = 50$ โอห์ม-เมตร

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8
หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4

1875 ground rod
 15 ground rod

Dx 25.00 เมตร Nx 5
 Dy 25.00 เมตร Ny 5
 Rod length 3.28 เมตร จำนวน Rod 20
 ความลึกที่ใช้ฝัง groundgrid 0.5 เมตร
 ความยาวของคาน้ำทั้งหมด 1065.60 เมตร
 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน 0.27 ohm

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.25 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน กรณี $\rho = 50$ โอห์ม-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4
หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8

ปริมาณกระแสลัดวงจรวงดิน 2204.44 A ปริมาณกระแสลัดจร 1354.18 A

Result

Epr 365.63 V < Etouch 650.64 V
Em 129.81 V < Etouch 650.64 V
Es 32.65 V < Estep 2153.30 V

Design is safe

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.26 ผลลัพธ์การคำนวณกรณี $\rho = 50$ โอห์ม-เมตร

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

น้ำหนักเฉลี่ย

Surface resistivity 3000 ohm-m Surface layer thick 0.15 m
Soil resistivity 100.0 ohm-m Duration of shock current 0.6 วินาที

Permissible touch voltage 653.58 volt
Permissible step voltage 2165.03 volt

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.27 ความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho = 100$ โอห์ม-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

ไม้ตี ground rod

1Ø ground rod

Dx 25.00 เมตร Nx 5

Dy 25.00 เมตร Ny 5

Rod length 3.28 เมตร จำนวน Rod 20

ความลึกที่ใช้ฝัง groundgrid 0.5 เมตร

ความยาวของตัวนำทั้งหมด 1065.60 เมตร

ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน 0.54 ohm

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.28 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน กรณี $\rho = 100$ โอห์ม-เมตร

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

ปริมาณกระแสลัดวงจรลงดิน 2204.44 A ปริมาณกระแสลัด 1032.09 A

Result

Gpr	557.76	V	<	Etouch	653.58	V
Em	198.03	V	<	Etouch	653.58	V
Es	49.81	V	<	Estep	2165.03	V

Design is safe

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.29 ผลลัพธ์การคำนวณกรณี $\rho = 100$ โอห์ม-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

น้ำหนักเฉลี่ย
 50 kg
 70 kg

Surface resistivity 3000 ohm-m Surface layer thick 0.15 เมตร
 Soil resistivity 150.0 ohm-m Duration of shock current 0.6 วินาที
 Permissible touch voltage 656.51 volt
 Permissible step voltage 2176.76 volt

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.30 ความต้านทานจำเพาะของดิน $\rho = 150$ โอห์ม-เมตร

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8
หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4

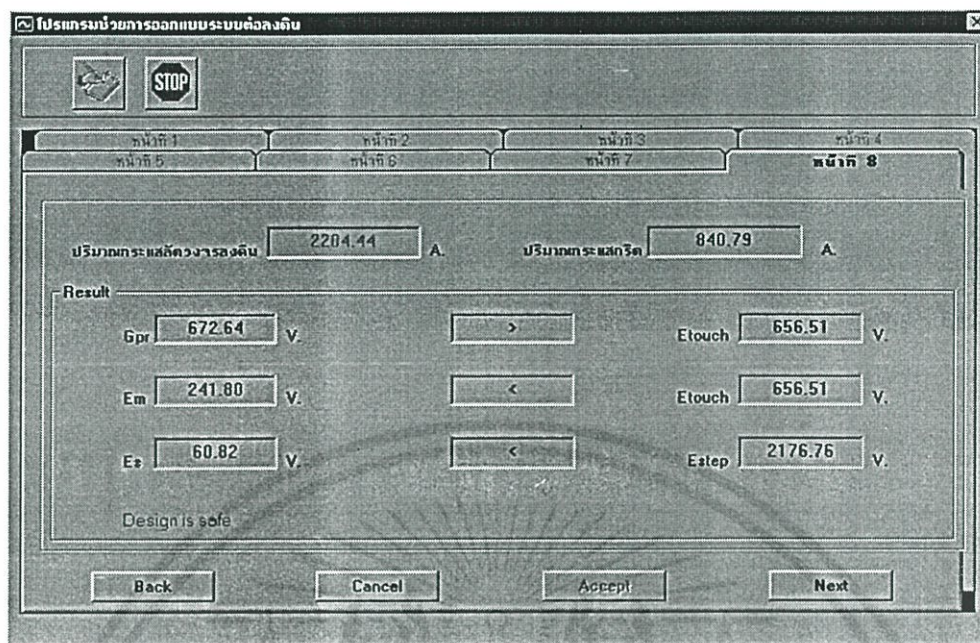
ไม่มี ground rod
 ใช้ ground rod

Dx 25.00 เมตร Nx 5
 Dy 25.00 เมตร Ny 5
 Rod length 3.28 เมตร จำนวน Rod 20
 ความลึกที่ใช้ฝัง groundgrid 0.5 เมตร
 ความยาวของตัวนำทั้งหมด 1065.60 เมตร
 ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน 0.80 ohm

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.31 ความต้านทานของระบบต่อลงดิน กรณี $\rho = 150$ โอห์ม-เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 ผลลัพธ์การคำนวณกรณี $\rho = 150$ โอห์ม-เมตร

จากผลลัพธ์ของการคำนวณ กรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน เปลี่ยนแปลงที่ค่า 195.4, 150, 100 และ 50 โอห์ม-เมตรมีผลต่อค่าของกระแสกริดดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ลำดับที่	ผลลัพธ์จากการคำนวณ	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม-เมตร)			
		195.40	150.00	100.00	50.00
1	ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (โอห์ม)	1.05	0.80	0.54	0.27
2	E_{touch} (โวลต์)	659.17	656.51	653.58	650.64
3	E_{step} (โวลต์)	2187.41	2176.76	2165.03	2153.30
4	ปริมาณกระแสกริด (แอมป์)	713.25	840.79	1032.89	1354.18
5	Grid Potential Rise (GPR, โวลต์)	748.91	672.64	557.76	365.63
6	E_m (โวลต์)	267.20	241.80	198.03	129.81
7	E_s (โวลต์)	67.21	60.82	49.81	32.65

เอกสารนี้เป็นเอกสาร จากตารางที่ 6.2 จะเห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานการคำนวณการคำนวณของระบบต่อลงดิน คือเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลงจะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินลดลง แต่ค่าความความต้านทานจำเพาะของดินจะแปรผกผันกับค่ากระแสกริด คือเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลงจะทำให้ค่ากระแสกริดสูงขึ้น ส่วนค่าของ E_m

จากตารางที่ 6.2 จะเห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดิน คือเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลงจะทำให้ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินลดลง แต่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะแปรผกผันกับค่ากระแสแกลริด คือเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลงจะทำให้ค่ากระแสแกลริดสูงขึ้น ส่วนค่าของ E_m และ E_s จะลดลงเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลง ดังนั้นในกรณีที่ต้องออกแบบสถานีไฟฟ้าในพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงๆ จะมีผลต่อค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและค่าของ E_m และ E_s มาก แนวทางในการออกแบบกรณีนี้ถ้าค่าของ E_m และ E_s ไม่อยู่ในขอบเขตความปลอดภัย ต้องทำการลดค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยใช้สารเคมีเช่นเกลือแอมมอนิอัมโปแตสเซียม ครอบๆ ตัวนำต่อลงดิน เป็นต้น

6.5 ผลของกระแสลัดวงจรต่อค่ากระแสแกลริด

โดยทั่วไประบบไฟฟ้าจะมีการเชื่อมโยงกันเป็น Network ที่ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรเพิ่มมากขึ้น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นต่อค่ากระแสแกลริดของระบบต่อลงดิน ทดลองเพิ่มค่ากระแสลัดวงจรของระบบให้เพิ่มมากขึ้น โดยที่ตัวแปรอื่นๆมีค่าคงที่ จากข้อมูลตามข้อ 6.2 ดังนี้

รูปที่ 6.33-6.34 แสดงผลการคำนวณกรณีที่ค่าของกระแสลัดวงจรของระบบเท่ากับ 4000 แอมป์

ชื่อของสายไฟฟ้าข้างห้อง	Z1 (ohm/km)	Zt (ohm)	Io (Amp)	In (Amp)
CT	11.2	5.0	666.6	1333.3
PNR	11.2	5.0	0.0	0.0
KLK	11.2	5.0	0.0	0.0
NYM	11.2	5.0	0.0	0.0

รูปที่ 6.33 ค่าของ I_0, I_N กรณีกระแสลัดวงจร = 4000 แอมป์

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4
หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8

ปริมาณกระแสลัดวงจรจริง 4000.0 A. ปริมาณกระแสลัด 1294.19 A.

Result

Gpr	1358.90 V.	>	Etouch	659.17 V.
Em	484.84 V.	<	Etouch	659.17 V.
Es	121.95 V.	<	Estep	2187.41 V.

Design is safe

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.34 ผลลัพธ์การคำนวณ กรณีกระแสลัดวงจร = 4000 แอมป์

รูปที่ 6.35-6.36 แสดงผลการคำนวณกรณีค่าของกระแสลัดวงจรของระบบเท่ากับ 8000 แอมป์

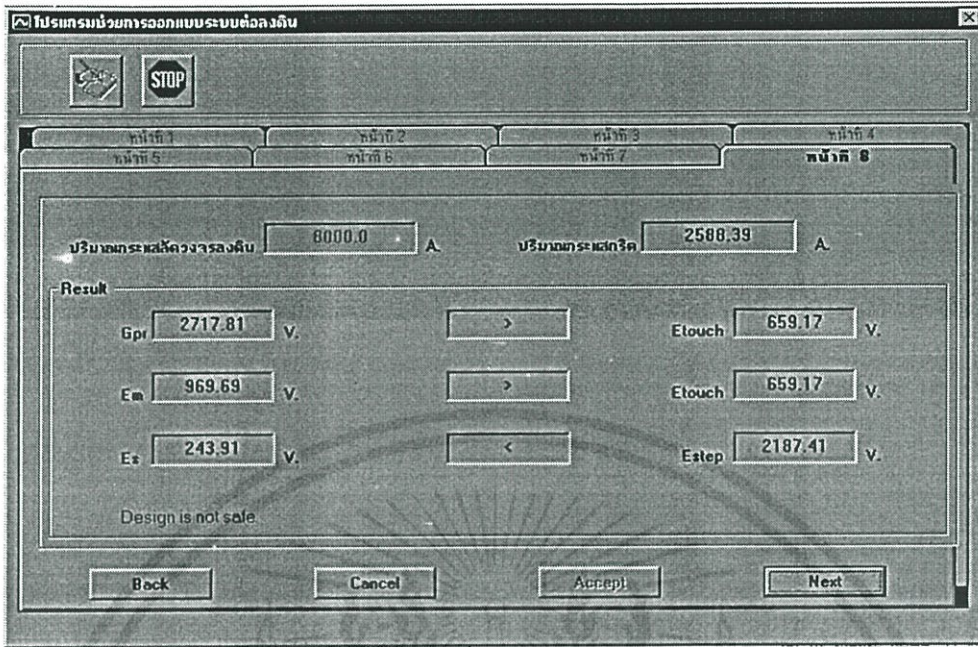
โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4
หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8

ชื่อของสถานีไฟฟ้าข้างฝั่ง	Zl (ohm/km)	Zl (ohm)	I _o (Amp)	I _n (Amp)
CT	11.2	5.0	1333.3	2666.6
PNR	11.2	5.0	0.0	0.0
KLG	11.2	5.0	0.0	0.0
NYM	11.2	5.0	0.0	0.0

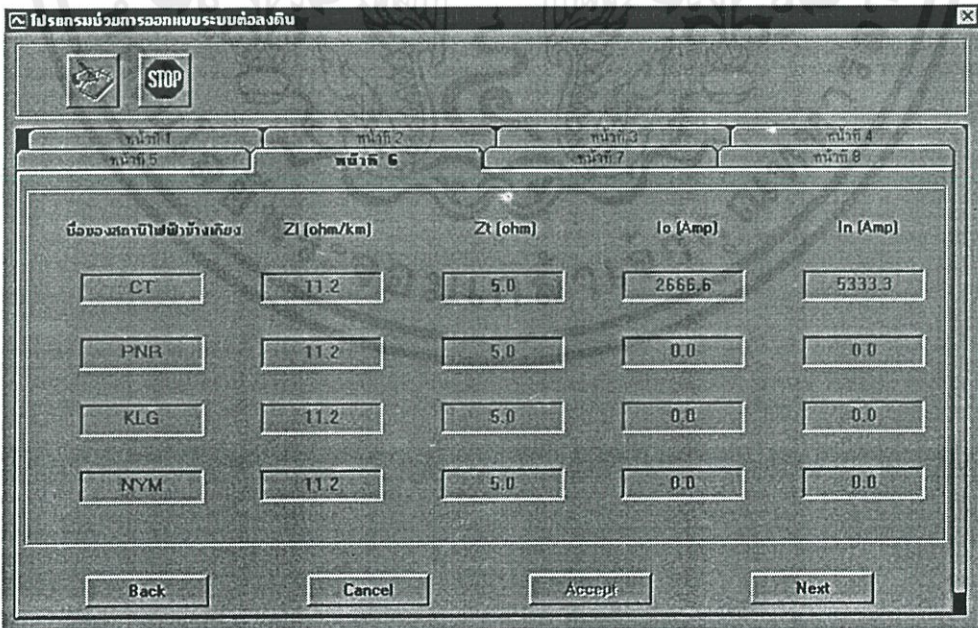
Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.35 ค่าของ I_o, I_n กรณีกระแสลัดวงจร = 8000 แอมป์



รูปที่ 6.36 ผลลัพธ์การคำนวณ กรณีกระแสลัดวงจร = 8000 แอมป์

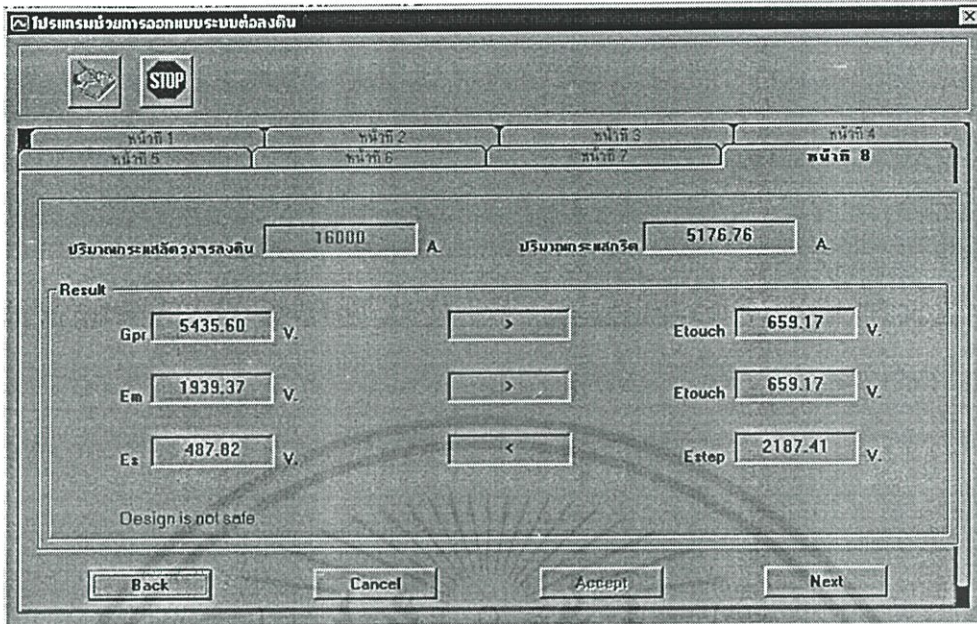
รูปที่ 6.37-6.38 แสดงผลการคำนวณกรณีที่ค่าของกระแสลัดวงจรของระบบเท่ากับ 16000 แอมป์



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.37 ค่าของ I_o, I_n กรณีกระแสลัดวงจร = 16000 แอมป์



รูปที่ 6.38 ผลลัพธ์การคำนวณ กรณีกระแสลัดวงจร = 16000 แอมป์

จากผลลัพธ์การคำนวณที่ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบ เท่ากับ 2204.44 แอมป์ , 4000 แอมป์ , 8000 แอมป์ และ 16000 แอมป์ ผลลัพธ์การคำนวณดัง แสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณ จากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสลัดวงจร

ลำดับที่	ผลลัพธ์จากการคำนวณ	กระแสลัดวงจร (แอมป์)			
		2204	4000	8000	16000
1	E_{touch} (โวลต์)	659.17	659.17	659.17	659.17
2	E_{step} (โวลต์)	2187.41	2187.41	2187.41	2187.41
3	ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (โอห์ม)	1.05	1.05	1.05	1.05
4	ปริมาณกระแสสกริด (แอมป์)	713.25	1294.19	2588.39	5176.76
5	Grid Potential Rise (GPR, โวลต์)	748.91	1358.9	2717.81	5435.6
6	E_m (โวลต์)	267.2	484.84	969.69	1939.34
7	E_s (โวลต์)	67.21	121.95	243.91	487.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 6.3 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสสกริดเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสลัดวงจรเพิ่มเป็น 8000 แอมป์ ทำให้ค่า $E_m > E_{touch}$ นั่นคือการออกแบบไม่อยู่ในขอบเขต

จากตารางที่ 6.3 พบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสแตรกริดเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสลัดวงจรเพิ่มเป็น 8000 แอมป์ ทำให้ค่า $E_m > E_{touch}$ นั่นคือการออกแบบไม่อยู่ในขอบเขตความปลอดภัย จึงจำเป็นต้องปรับปรุงการออกแบบ แนวทางที่สามารถทำได้คือการลดค่าอิมพีแดนซ์ของ Overhead Ground Wire ที่เชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้า

รูปที่ 6.39 และ 6.40 แสดงผลการคำนวณ กรณีลดค่าอิมพีแดนซ์ของ $Z_1(CT-CTA)=5.6$ โอห์ม/กิโลเมตร

รูปที่ 6.41 และ 6.42 แสดงผลการคำนวณ กรณีลดค่าอิมพีแดนซ์ของ $Z_1(CT-CTA)=2.8$ โอห์ม/กิโลเมตร

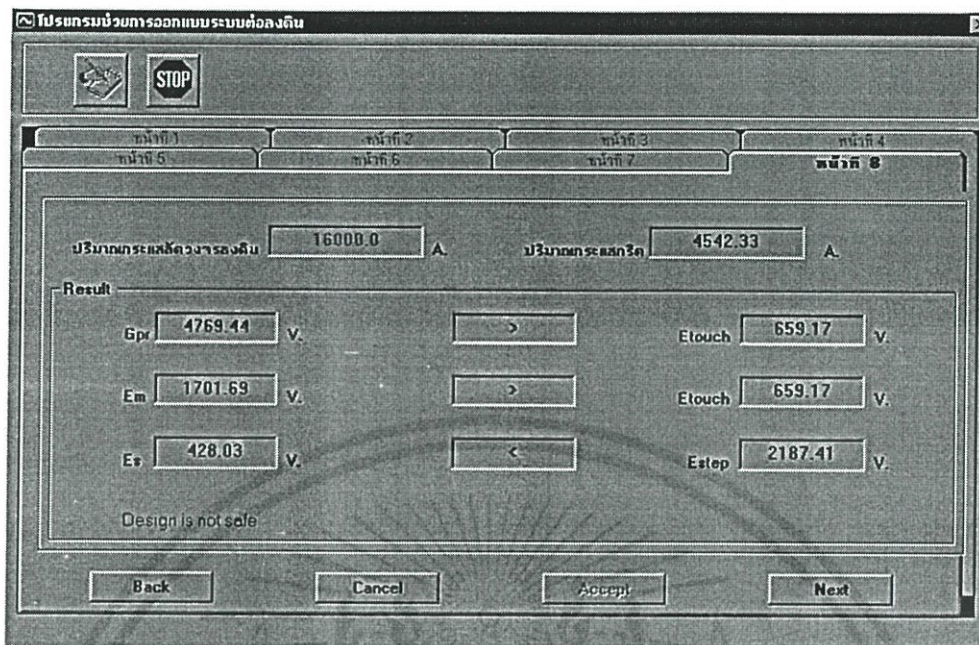
รูปที่ 6.43 และ 6.44 แสดงผลการคำนวณ กรณีลดค่าอิมพีแดนซ์ของ $Z_1(CT-CTA)=0.246$ โอห์ม/กิโลเมตร

รูปที่ 6.45 และ 6.46 แสดงผลการคำนวณ กรณีลดค่าอิมพีแดนซ์ของ $Z_1(\text{ทุกวงจร})=0.246$ โอห์ม/กิโลเมตร

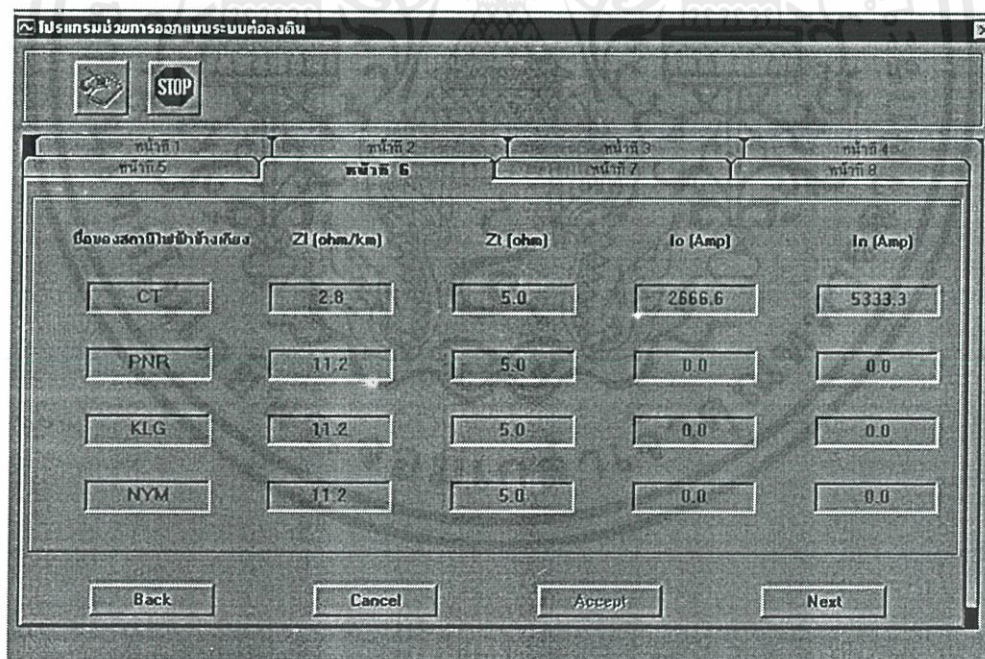
ชื่อของสถานีไฟฟ้าข้างเคียง	Zl (ohm/km)	Zt (ohm)	Io (Amp)	In (Amp)
CT	5.6	5.0	2686.6	5333.3
PNR	11.2	5.0	0.0	0.0
KLG	11.2	5.0	0.0	0.0
NYM	11.2	5.0	0.0	0.0

รูปที่ 6.39 $Z_1(CT-CTA)=5.6 \Omega/\text{km}$, $I_c=16000 \text{ Amp}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

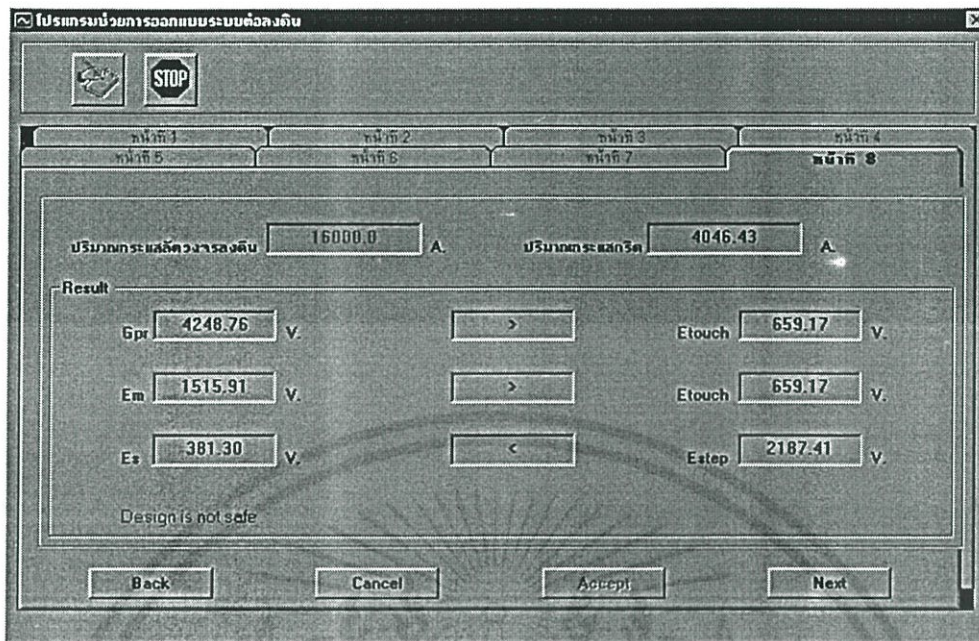


รูปที่ 6.40 ผลลัพธ์การคำนวณ $Z_1(CT-CTA)=5.6 \Omega/km$, $I_c=16000$ Amp

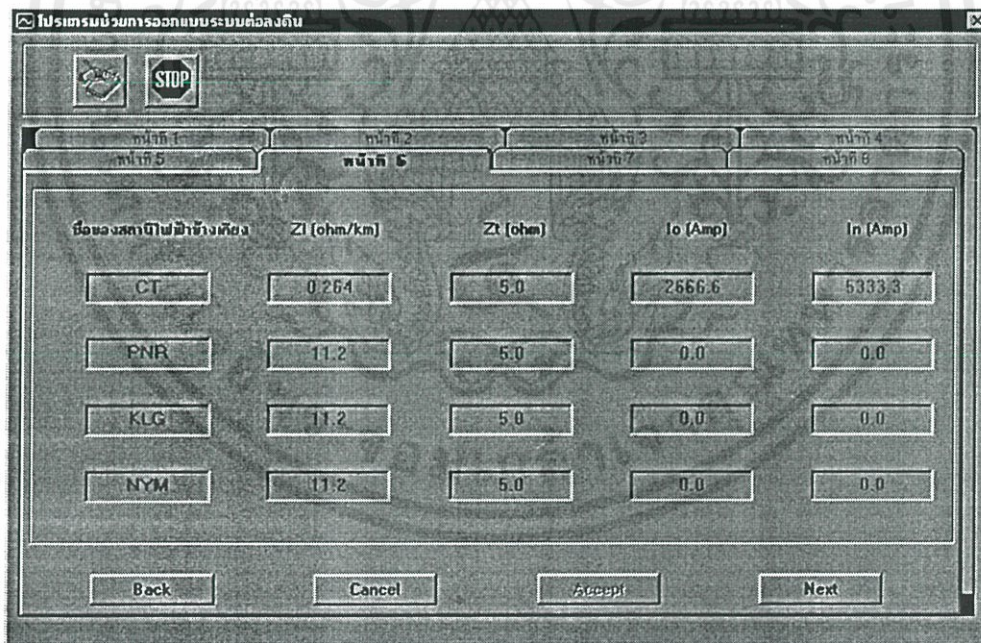


รูปที่ 6.41 $Z_1(CT-CTA)=2.8 \Omega/km$, $I_c=16000$ Amp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.42 ผลลัพธ์การคำนวณ $Z_1(CT-CTA)=2.8 \Omega/km$, $I_c=16000$ Amp



รูปที่ 6.43 $Z_1(CT-CTA)=0.246 \Omega/km$, $I_c=16000$ Amp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4
หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8

ปริมาณกระแสลัดวงจรรังสี: 16000.0 A ปริมาณกระแสลัด: 3403.48 A

Result

Gpr	3573.66	V.	>	Etouch	659.17	V.
Em	1275.04	V.	>	Etouch	659.17	V.
Es	320.72	V.	<	Estep	2187.41	V.

Design is not safe

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.44 ผลลัพธ์การคำนวณ $Z_1(\text{CT-CTA})=0.246 \Omega/\text{km}$, $I_c=16000 \text{ Amp}$

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบต่อลงดิน

หน้าที่ 1 หน้าที่ 2 หน้าที่ 3 หน้าที่ 4
หน้าที่ 5 หน้าที่ 6 หน้าที่ 7 หน้าที่ 8

ชื่อของสถานีไฟฟ้าข้างเคียง	Z1 (ohm/km)	Z1 (ohm)	Io (Amp)	In (Amp)
CT	0.264	5.0	2666.6	5333.3
PNR	0.264	5.0	0.0	0.0
KLK	0.264	5.0	0.0	0.0
NYM	0.264	5.0	0.0	0.0

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.45 $Z_1(\text{ทุกวงจร})=0.246 \Omega/\text{km}$, $I_c=16000 \text{ Amp}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.46 ผลลัพธ์การคำนวณ Z_1 (ทุกวงจร)= $0.246 \Omega/\text{km}$, $I_c=16000 \text{ Amp}$

นอกจากการลดค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 แล้วเราอาจจะปรับปรุงการออกแบบโดยการเพิ่มสายตัวนำต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้า รูปที่ 6.47-6.49 แสดงผลการคำนวณกรณีนี้ เพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน $N_x=15, N_y=15, Z_1(\text{CT-CTA}) = 0.226 \Omega/\text{km}$ ผลของการเปลี่ยนแปลง Z_1, N_x, N_y ดังแสดงในตารางที่ 6.4

รูปที่ 6.47 การเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน $N_x = 15, N_y = 15$

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบคํอลงดิน

หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4
หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8

ชื่อของสถานีไฟฟ้าข้างเคียง	Zl (ohm/km)	Zt (ohm)	Io (Amp)	In (Amp)
CT	0.226	5	2666.6	5333.3
PNR	11.2	5	0	0
KLG	11.2	5	0	0
NYN	11.2	5	0	0

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.48 Z_1 (CT-CTA) = 0.226 Ω /km, $I_C = 16000$ A

โปรแกรมช่วยการออกแบบระบบคํอลงดิน

หน้า 1 หน้า 2 หน้า 3 หน้า 4
หน้า 5 หน้า 6 หน้า 7 หน้า 8

ปริมาณกระแสคํอลงดิน 16000 A ปริมาณกระแสกริด 3690.75 A

Result

Gpr	3432.40 V	>	Etouch	659.17 V
Em	639.57 V	<	Etouch	659.17 V
Ee	307.14 V	<	Estep	2187.41 V

Design is safe.

Back Cancel Accept Next

รูปที่ 6.49 ผลการคำนวณกรณี $N_x = N_y = 15$, Z_1 (CT-CTA) = 0.226 Ω /km, $I_C = 16000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณกรณีลดค่า Z_1 และเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน

ลำดับที่	ผลลัพธ์จากการคำนวณ	Z_1 (CT- CTA) โอห์ม/กิโลเมตร			$Z_1 = 0.264$ ทุกวงจ	Z_1 (CT-CTA) = 0.226 $N_x=N_y=15$
		5.6	2.8	0.264		
1	E_{touch} (โวลต์)	659.17	659.17	659.17	659.17	659.17
2	E_{step} (โวลต์)	2187.41	2187.41	2187.41	2187.41	2187.41
3	กระแสกริด (แอมป์)	4542.33	4046.43	3403.48	1005.13	3690.75
4	Grid Potential Rise (GPR, โวลต์)	4769.49	4248.76	3573.66	1055.38	3432.4
5	E_m (โวลต์)	1701.69	1515.91	1275.04	376.55	636.57
6	E_s (โวลต์)	428.03	381.30	320.72	94.72	307.14
	ผลลัพธ์จากการออกแบบ	Not Safe	Not Safe	Not Safe	Safe	Safe

จากตารางที่ 6.4 แสดงผลการปรับปรุงการออกแบบโดยการลดค่าอิมพีแดนซ์ของ Overhead Ground Wire (OHG) และการเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน โดยที่ทดลองเปลี่ยนสาย OHG ให้มี Self Impedance ลดลงจาก $11.2 \Omega/\text{km}$ เป็น $5.6 \Omega/\text{km}$ ระหว่างสถานี CT และ CTA ผลการคำนวณค่า E_m ยังสูงกว่า E_{touch} นั่นคือยังไม่ปลอดภัย ทดลองปรับค่า Z_1 เป็น $2.8 \Omega/\text{km}$ และ $0.264 \Omega/\text{km}$ ค่าของ E_m ยังสูงกว่า E_{touch} แสดงว่ายังไม่ปลอดภัย ทดลองเปลี่ยน Z_1 ที่เชื่อมต่อทั้ง 4 สถานีโดยใช้สาย 477 cmil ACSR ซึ่งมี $Z_1 = 0.264 \Omega/\text{km}$ ผลการคำนวณได้ค่ากระแส

กริด = 1005.13 แอมป์, $E_m < E_{touch}$, $E_s < E_{step}$ แสดงว่าผลการออกแบบปลอดภัย

ถ้าทดลองใช้สาย 1272 cmil ACSR ซึ่งมี $Z_1 = 0.226 \Omega/\text{km}$ แทนสาย OHG ระหว่างสถานี CT และ CTA และเพิ่มจำนวนตัวนำต่อลงดิน โดยให้ $N_x=N_y=15$ จะได้ผลการคำนวณกระแสกริด = 3690.75 แอมป์, $E_m < E_{touch}$, $E_s < E_{step}$ ได้ผลการออกแบบปลอดภัยเช่นกัน

ดังนั้นการที่จะเลือกวิธีใดในการปรับปรุงการออกแบบต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทุกๆ ด้าน แล้วเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของแต่ละวิธี รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง จึงจะทำให้การออกแบบได้ประสิทธิภาพสูงสุด

6.6 การหาค่ากระแสกริดโดยใช้กราฟ

ในการหาค่าของกระแสกริดนอกจากวิธีการ Decoupled Method, วิธี เมททริกซ์ แล้วยังมีวิธีการคำนวณหาค่ากระแสกริดโดยใช้กราฟ [6] ซึ่งจะเป็นวิธีการหาแบบประมาณการ รูปที่ 6.50 แสดงกราฟที่ใช้หาค่า Fault Current Division Factor (S), แกน X แทนค่าของความต้านทานของระบบต่อลงดิน, เส้นกราฟ 1/0, 2/0, 3/0.... 18/0 แทนจำนวนสายของระบบต่อลงดินของ Transmission Line โดยที่มีค่าอิมพีแดนซ์ ในแต่ละวงจรไม่เกิน 15 โอห์ม ต่อจำนวน Feeder

ถ้าใช้ข้อมูลที่คำนวณดังตัวอย่างในข้อ 6.2 ซึ่งมีสถานีไฟฟ้าที่ทำการเชื่อมต่อเท่ากับ 4 สถานี ค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจันทบุรีเท่ากับ 1.05 โอห์ม จากกราฟ จะได้ค่า $S_f = 37\%$ ดังนั้นค่ากระแสสกริดสามารถหาได้จากสมการที่ 9 ดังนี้

$$\begin{aligned} I_G &= 0.37 \times 2204.44 \text{ แอมป์} \\ &= 815.64 \text{ แอมป์} \end{aligned}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับกรหาค่าโดยใช้วิธี Decoupled Method จากผลการคำนวณในรูปที่ 6.19 จะได้ค่า $I_G = 713.25$ แอมป์ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันสาเหตุเนื่องมาจากวิธีการใช้กราฟเป็นการประมาณการ โดยที่ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น อิมพีแดนซ์ของสายตัวนำต่อลงดินที่เชื่อมต่อใช้วิธีการกำหนดเป็นช่วง ส่วนวิธี Decoupled เป็นวิธีที่พิจารณาถึงตัวแปรทุกตัวที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดและใช้วิธีการลดขนาดของวงจรลงโดยที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่าที่ได้จากวิธีการ Decoupled Method จึงให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่า

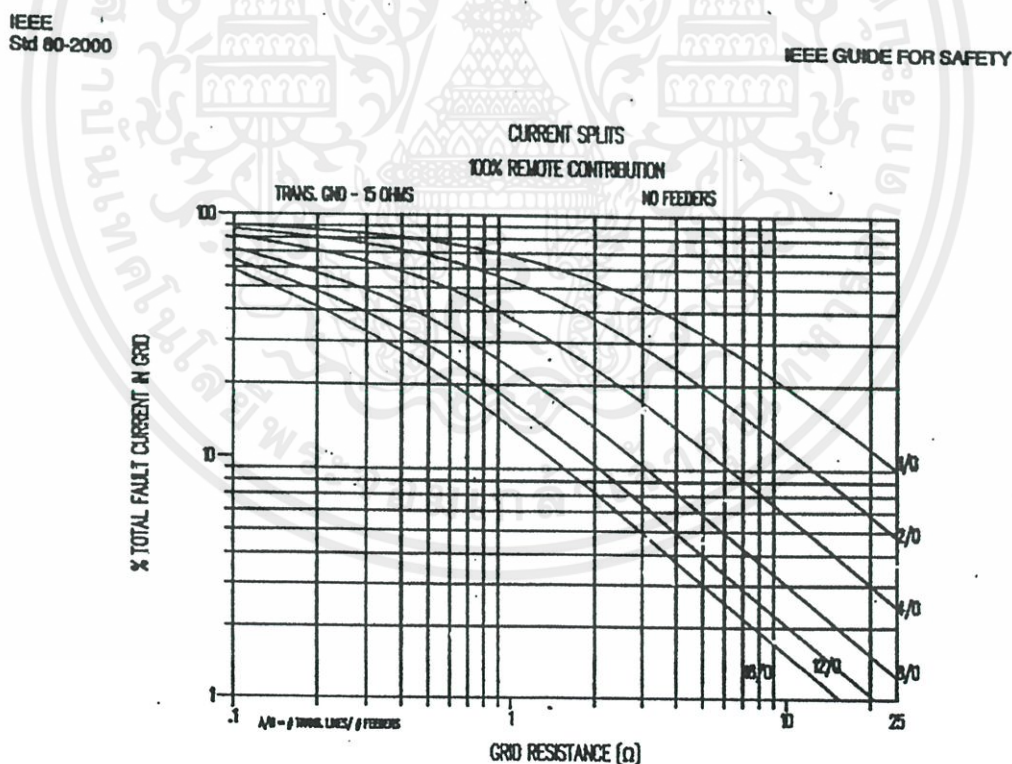


Figure C.13—Curves to approximate split factor S_f

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.50 แสดงกราฟที่ใช้หาค่ากระแสสกริด

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน ที่ได้นำเสนอในผลงานวิจัยฉบับนี้ จะเห็นว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากระบบต่อลงดินของระบบดังกล่าวจะมีการเชื่อมโยงถึงกัน ซึ่งการต่อถึงกันของระบบต่อลงดินนี้มีผลทำให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะเกิดการกระจายไหลไปในระบบต่อลงดินแต่ละส่วน ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบนั้นๆ

วิธีการ Decoupled ที่นำมาใช้ในการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรเป็นวิธีการที่ใช้หลักพื้นฐานทางไฟฟ้า คือทฤษฎีของนอร์ตันในการลดขนาดของวงจรขนาดใหญ่ให้ได้วงจรสมมูลที่มีขนาดเล็กลง โดยคงไว้เฉพาะตัวแปรที่ต้องการทราบค่าเท่านั้น ความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากการคำนวณค่าของวงจรที่มีจำนวนมากและขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนจะมีความคลาดเคลื่อนสูง เพราะทุกๆครั้งที่มีการคำนวณในแต่ละขั้นจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้เสมอ ถึงแม้จะเป็นสัดส่วนที่น้อยในแต่ละขั้นตอน แต่ถ้าจำนวนขั้นตอนมีมาก ตัวแปรที่คลาดเคลื่อน ณ ขั้นหนึ่งๆ จะถูกนำไปคำนวณต่อทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ตามลำดับ

จากวิธีการ Decoupled นี้เราจะได้อำนาจกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่ต้องการทราบค่าทุกจุด ดังนั้นเราจึงสามารถนำไปคำนวณหาค่า Touch Voltage และ Step Voltage เพื่อตรวจสอบขอบเขตความปลอดภัยได้ทุกจุด ตลอดจนสามารถหา Transfer Voltage ระหว่าง 2 สถานี เพื่อนำไปใช้ในการเลือกขนาดสายสัญญาณต่างๆที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อระหว่าง 2 สถานีให้สามารถทนต่อแรงดันที่เกิดขึ้นได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวคิดในการออกแบบระบบต่อลงดินแบบใหม่ โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำต่อลงดินขึ้นมาก่อน (D_x , D_y) การกำหนดค่า D_x และ D_y นี้จะเลือกจากความเหมาะสมของการก่อสร้างระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าเป็นหลักให้สอดคล้องกับการจัดวางของอุปกรณ์ในลานไก ระยะที่แนะนำอยู่ระหว่าง 15 ถึง 40 เมตร เพราะถ้ามากหรือน้อยกว่านี้จะไม่สะดวกในการก่อสร้าง จากการกำหนดค่า D_x หรือ D_y โดยเลือกจำนวนตัวนำที่ขนานกันในแนวแกน x (N_x) และแกน y (N_y) ทำให้ได้ขนาดความยาวของตัวนำต่อลงดิน เสร็จแล้วเลือกจำนวนแท่งตัวนำต่อลงดิน โดยพิจารณาจากความยาวเส้นรอบรูปของสถานีไฟฟ้า เพราะที่รั้วของสถานีไฟฟ้าควรปักแท่งตัวนำต่อลงดินทุกๆ 15-20 เมตร และตำแหน่งที่ติดตั้ง Power Transformer, Lightning Arrester ก็ควรติดตั้งแท่งตัวนำต่อลงดิน เมื่อได้ค่าความยาวของตัวนำต่อลงดินที่ใช้ทั้งหมดแล้ว จะนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานของระบบต่อลงดินและค่ากระแสลัดวงจรต่อไป วิธีการนี้จะแตกต่างจากวิธีการที่นำเสนอใน IEEE Std 80-

1986 [1] ซึ่งกำหนดค่ากระแสกริดก่อนแล้วคำนวณความยาวของตัวนำที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการออกแบบ (L_{min})

การหาค่ากระแสกริดนี้ได้มีการนำเสนอในรูปแบบของกราฟ [6] อีกวิธีหนึ่ง แต่จะมีข้อแตกต่างกันที่วิธีการใช้กราฟตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบคือค่าของอิมพีแดนซ์ของ Transmission line และ Footing of tower ถูกกำหนดเป็นขอบเขตที่จำกัดในแต่ละช่วง ไม่ได้นำค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริงไปคำนวณออกแบบ ดังนั้นค่าที่ได้จากวิธีการใช้กราฟจะเป็นค่าประมาณการกว้างๆ ซึ่งแตกต่างจากวิธี Decoupled ที่ใช้ค่าตัวแปรที่แท้จริงในการคำนวณออกแบบจึงได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่า

จากค่ากระแสกริดที่ได้สามารถนำไปคำนวณค่า Mesh Voltage (E_m) และ Step Voltage (E_s) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับขอบเขตความปลอดภัย กรณีที่การออกแบบอยู่ในขอบเขตความปลอดภัยอยู่ มาก เช่น ค่า E_m น้อยกว่าค่า E_{touch} มากกว่า 10% ควรปรับปรุงการออกแบบ โดยทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำต่อลงดินให้มากขึ้น หรือถ้าผลการออกแบบไม่อยู่ในขอบเขตความปลอดภัย เราสามารถที่จะปรับปรุงการออกแบบ โดยทำการลดค่าอิมพีแดนซ์ของ Overhead Ground Wire เช่น ใช้สาย ACSR แทนสาย Steel Ground Wire หรือเพิ่มความยาวของตัวนำต่อลงดินทั้งนี้ควรเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับปรุงควบคู่ไปกับวิธีการก่อสร้างด้วย

การออกแบบโดยพิจารณาค่ากระแสกริดนี้ สามารถนำไปแก้ปัญหการออกแบบระบบต่อลงดินที่ต้องก่อสร้างบนพื้นที่ที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูงๆ ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากพื้นที่ที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูง ตั้งแต่ 400-2000 โอห์ม-เมตร จะทำให้ความต้านทานของระบบต่อลงดินมีค่าสูงด้วย (I_g จะแปรผกผันกับ R_g ในขณะที่ R_g จะแปรตามความต้านทานจำเพาะของดิน) ซึ่งจะทำให้ค่า I_g ลดลงเมื่อความต้านทานจำเพาะของดินสูงขึ้น และจะทำให้ค่าของ Touch Voltage & Step Voltage มีค่าลดลง

หรือกรณีที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าน้อยๆ ทำให้กระแสกริดมีค่ามาก เราสามารถช่วยให้กระแสกริดกระจายไปในระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายใน โดยการลดค่าอิมพีแดนซ์ของ Overhead Ground Wire ด้วยการเพิ่มขนาดของสายหรือเปลี่ยนชนิดของสายเป็นสาย ACSR ใน SPAN ของเสาส่งต้นใกล้ๆกับสถานีไฟฟ้า

จะเห็นว่าการออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินภายใน เพราะจะทำให้สามารถออกแบบระบบต่อลงดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก และวิธีการ Decoupled ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นวิธีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบต่อลงดินทุกประเภทได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ANSI/IEEE Std 80-1986 **“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.”** 1986.
- [2] ST.Sobral, V.Flenry, J.R.Villalba, D.Mukhedkar, **“Decoupled Method for Studying Large Interconnected Ground System Using Microcomputer –Part I-Fundamental.”** IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988. pp. 1536-1544.
- [3] ST.Sobral, V. Flenry, J.R. Villalba, D.Mukhedkar, **“Decoupled Method for Studying Large Interconnected Ground System Using Microcomputer-Part II-Utilization on the Itaipu Ground System.”** IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988,pp1545-1551
- [4] ST.Sobral, V.S. Costa, M.S. Campos, D.Mukhedkar, **“Dimensioning of Nearby Substations Interconnected Ground System.”** IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988, pp1605-1613.
- [5] Rommer I.Brown. **Solution of Large Network by Matrix Methods.** John Wiley.
- [6] IEEE Std 80-2000(Revision of IEEE Std 80-1986) **“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.”** 2000.
- [7] William D.Stevenson, Jr, **Elements of Power System Analysis”**, Fourth Edition, Mc Graw-Hill international book company.1982.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

หลักการของ “Self-Neutralized Current”

Self-Neutralized Current คือหลักการที่ถูกนำมาใช้ใน Decoupled Method ขั้นที่ 4 เพื่อให้
ง่ายต่อการเข้าใจ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก-1 คุณลักษณะของ “Uniform Section”

จากรูปที่ ก-1 แสดงสายต่อลงดินระหว่างจุด A และ B ประกอบด้วย 30 Span จาก [4] แสดง
ว่าสายต่อลงดินระหว่าง A-B สามารถเรียกว่า “Uniform Section” ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่มี
ลักษณะเหมือน ๆ กันดังนี้

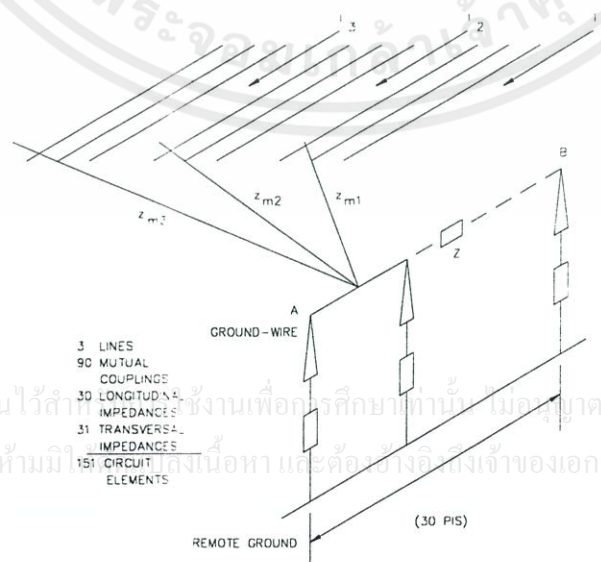
Z_1 = Impedance ของตัวสายต่อลงดิน (Ω / km)

Z_{M1}, Z_{M2}, Z_{M3} = Impedance เหนี่ยวนำระหว่างสายต่อลงดินและสายเฟส 1, 2, 3 (Ω / km)

I_1, I_2, I_3 = กระแสศูนย์ (Zero Sequence Currents) ที่ไหลในสายเฟส 1, 2, 3
(Ampere)

สำหรับในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Non uniform span) หรือความ
ต้านทานของฐานรากของเสาส่งไฟฟ้าไม่เท่ากัน สามารถนำหลักการของ Uniform Section มา
ประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน

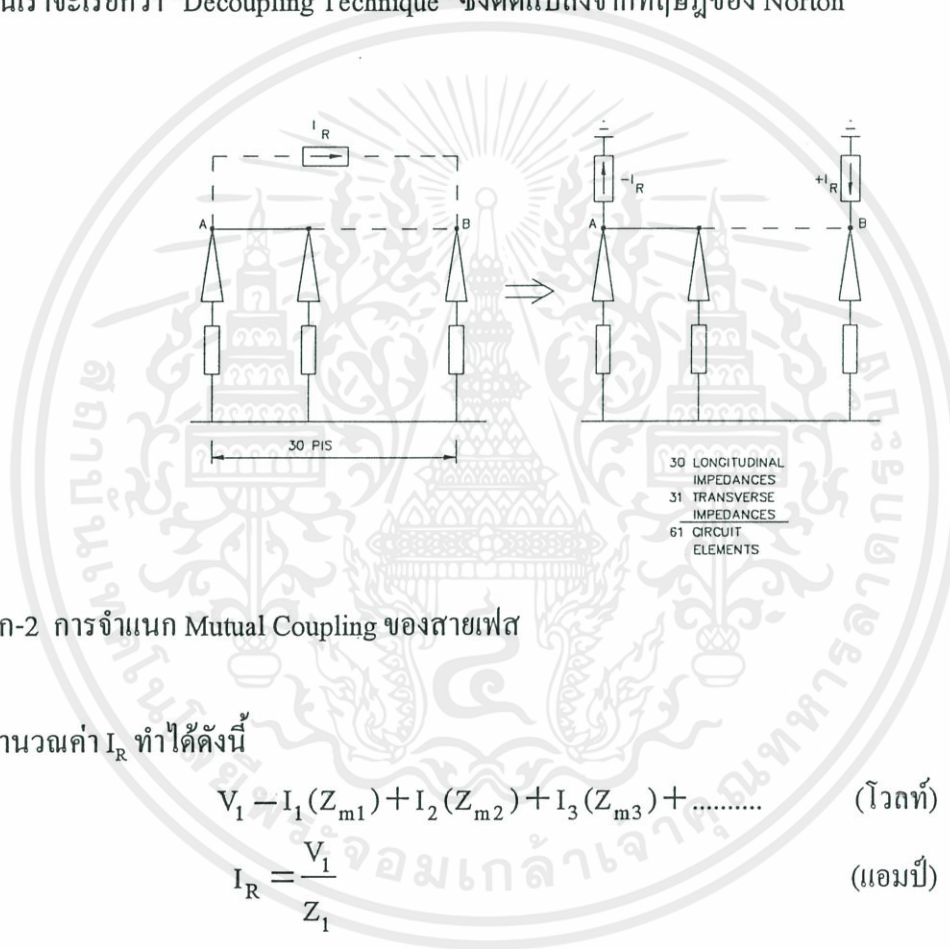
Uniform Section นี้สามารถนำไปใช้กับสายตัวนำที่ฝังดินที่มีสายต่อลงดินห่อหุ้ม
(Sheaths), สายต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกันด้วยวิธีฝังดินโดยตรง, ท่อโลหะฝังดิน ฯลฯ ตัวนำเหล่านี้จะ
อยู่ในรูปของวงจรชั้นบนได้



รูปที่ ก-1 คุณสมบัติของ “Uniform Section”

ก-2 การจำแนก Mutual Coupling ระหว่าง เฟส และ Uniform Section ของวงจรต่อลงดิน

จากหนังสือที่อ้างถึง [4] แสดงให้เห็นว่า Mutual Coupling ระหว่าง Uniform Section A-B ของวงจรต่อลงดิน และเฟส 1,2,3 สามารถทดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (I_R) ต่อระหว่างจุด A และ B วิธีนี้เราจะเรียกว่า “Decoupling Technique” ซึ่งคิดแปลงจากทฤษฎีของ Norton



รูปที่ ก-2 การจำแนก Mutual Coupling ของสายเฟส

การคำนวณค่า I_R ทำได้ดังนี้

$$V_1 - I_1(Z_{m1}) + I_2(Z_{m2}) + I_3(Z_{m3}) + \dots \quad (\text{โวลท์}) \quad (ก.1)$$

$$I_R = \frac{V_1}{Z_1} \quad (\text{แอมป์}) \quad (ก.2)$$

โดยที่ V_1 คือค่าของแรงดัน ณ จุดที่ต้องการหาค่าจุดที่ 1 และ Z_1 คือค่า Self Impedance ของสาย Overhead Ground Wire ในแต่ละช่วง (Ω/km) ในที่นี้ $Z_1 = Z_L$

ถ้าสมมติให้มีสายเฟสเพียงเส้นเดียวเพื่ออำนวยความสะดวกเข้าใจ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก $V_1 = I_1(Z_{m1})$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งทั้งนี้สำหรับนำเอามาใช้
 จาก (ก.2) (โวลท์) (ก.3)

$$I_R = \frac{-V_1}{Z_1} \quad (\text{แอมป์}) \quad (ก.4)$$

$$I_R = -\left(\frac{Z_{m1}}{Z_1}\right) * I_1 \quad (\text{แอมป์}) \quad (ก.5)$$

$$I_R = -\mu I_1 \quad (\text{แอมป์}) \quad (ก.6)$$

ก-3 หลักการของ “Self-Neutralized” Current

กระแส I_R ที่ไหลไปในวงจรที่มีคุณสมบัติ Uniform Section ที่มีค่า Impedance Z_1 จะทำให้เกิด Voltage drop ($I_R \cdot Z_1$) โวลต์/กิโลเมตร ซึ่งจะทำให้มีค่าแรงดัน V โวลต์/กิโลเมตร เราเรียกค่า I_R นี้ว่า “Self Neutralized Current”

$$I_R = -V_1 / Z_1$$

$$\therefore I_R Z_1 = -V_1$$

ดังนั้น ค่ากระแส I_R ที่ไหลไปตลอด Uniform Section (A,B) จะไม่ทำให้แรงดันของวงจรต่อลงดินเปลี่ยนแปลง

ก-4 ลักษณะทางกายภาพของ Self Neutralized Current

จากรูป ก-1 และ ก-2 แสดงให้เห็นว่าวงจรต่อลงดินที่แทนด้วย Uniform Section ทำให้ Uniform Voltage (V_1) สามารถทดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส I_R (Self-Neutralized Current) จ่ายเข้าที่จุด A และไหลออกที่จุด B

หมายความว่า Uniform Voltage ของวงจรต่อลงดินระหว่างจุด A และ B มีกระแส I_R ไหลออกจากจุด A และไหลเข้า ณ.จุด B, ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลจาก A ไป B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลลัพธ์ของวงจรขั้นบันได

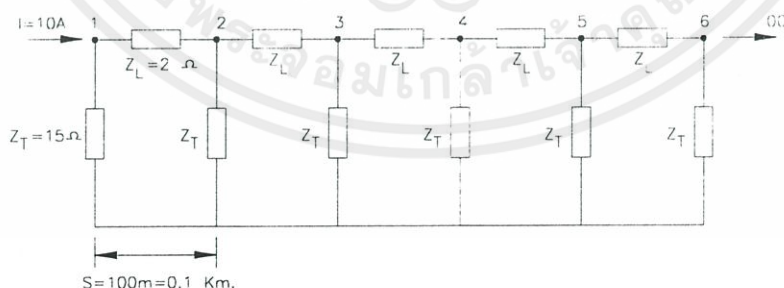
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณวงจรขั้นบันได โดยเริ่มจากวงจรลักษณะขั้นบันไดแบบอนันต์ (Infinite Ladder Circuit, ILC) เพื่อประโยชน์ในการง่ายต่อการคำนวณและความเข้าใจ ทุก ๆ วงจรในที่นี่จะนำเสนอเฉพาะค่าความต้านทานเท่านั้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ สามารถใช้ได้กับอิมพีแดนซ์ที่ลักษณะคอมเพล็กซ์ (Complex) ได้เช่นกัน

ข.1 ผลลัพธ์ของวงจรขั้นบันไดแบบอนันต์ (Infinite Ladder Circuit, ILC)

แม้ว่าวงจร ILC จะเป็นวงจรที่สมมติขึ้น แต่การศึกษานี้จะทำให้สามารถหาค่าของวงจรที่มีขอบเขตจำกัดได้ (Finite Ladder Circuit, FLC) ซึ่งจะพบบ่อยในวงจรต่อลงดิน (สถานีไฟฟ้าหรือสายส่ง) ในทำนองเดียวกับการศึกษาวงจรของ Pipeline หรือวงจรสายโทรศัพท์

ข.1.1 อิมพีแดนซ์ ณ จุดต่างๆ ของ ILC

รูป ข.1 แสดงวงจรขั้นบันได ซึ่งสมมติว่าประกอบด้วยวงจรพาย แบบอนันต์ แต่ละวงจรพายประกอบด้วย Longitudinal Impedance (Z_L) และ Transverse Impedance (Z_T) มีค่าเป็น โอห์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบที่ ข.1 Infinite Ladder Circuit (ILC) หรือหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดใดจุดหนึ่งที่ยังมองไปทางด้านขวาของจุด n ถูกกำหนดให้ทดแทนด้วยอิมพีแดนซ์ (Z_E) ซึ่งแทนค่าอิมพีแดนซ์ทุก ๆ จุด ที่เชื่อมกับจุด n ไปทางขวา ถ้าเรามองทางด้านขวา

ของจุด (1) หรือจุด (2) จะพบว่าทั้ง 2 กรณีเราจะพบวงจรพาย แบบอนันต์เหมือนกัน ดังนั้นถ้า มองไปทางขวาของจุด (1) หรือ (2) เราจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ Z_E เหมือนกันถ้าเราแทนค่าอิมพีแดนซ์ ทางขวาของจุด (2) ด้วย Z_{E2} แล้วเขียนความสัมพันธ์กับ Z_{E1} ที่มองทางขวาของจุด (1) จะพบว่า

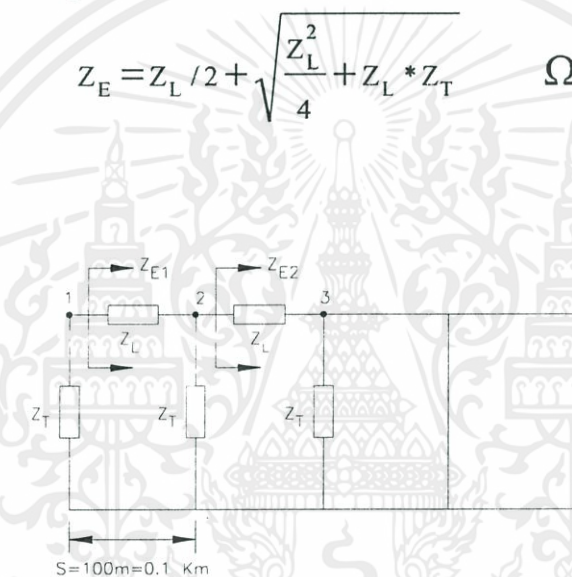
$$Z_{E1} = Z_L + (Z_T // Z_{E2}) , Z_{E1} = Z_{E2} = Z_{E3}$$

$$Z_E = Z_L + (Z_T // Z_E)$$

$$Z_E = Z_L + (Z_T * Z_E) / (Z_T + Z_E) \quad \Omega \tag{ข.1}$$

แก้สมการในเทอมของ Z_E

$$Z_E = Z_L / 2 + \sqrt{\frac{Z_L^2}{4} + Z_L * Z_T} \quad \Omega \tag{ข.2}$$



รูปที่ ข.2 อิมพีแดนซ์ Z_E ที่มองทางด้านขวาของ (1) และ (2) ของ ILC

ยกตัวอย่างเช่นวงจร ILC ,โดยที่ $Z_L=2 \Omega$, $Z_T=1.5 \Omega$ จะได้ $Z_E=3 \Omega$

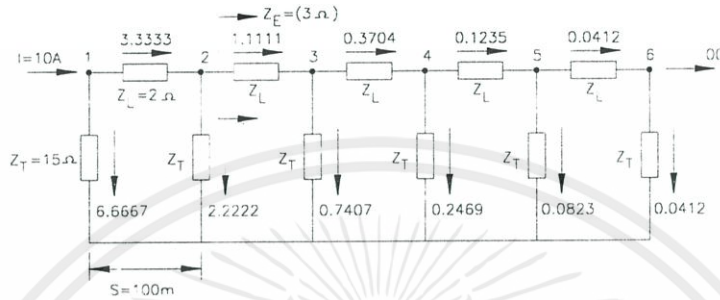
ข.1.2 แรงดันและกระแส ณ.จุดใด ๆ ในวงจร ILC

สมการที่นำเสนอต่อไปนี้จะใช้หลักการเดียวกับอิมพีแดนซ์ (Z_E)

- a. สมมติว่าแหล่งจ่ายกระแส ณ.จุดซ้ายสุดของวงจร ILC (ดูรูปข.3) กระแสที่ไหลมาถึงแต่ละจุด จะเห็นอิมพีแดนซ์ Z_T ขนานกับอิมพีแดนซ์ Z_E , ตัวอย่างเช่นกระแส $I = 3.3333$ แอมแปร์ ไหลในวงจรระหว่างจุด (1) และ (2) มาถึงที่จุด 2 จะเห็น $Z_T = 1.5 \Omega$ ขนานกับ $Z_E = 3 \Omega$ (ซึ่งแทนค่าของทุก ๆ วงจรที่มองทางด้านขวาของจุด 2) ดังนั้นกระแส I_1 มาถึงจุด (2) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (I_2) และ (i_2) ไหลผ่าน Z_E และ Z_T ตามลำดับ I_2 (แอมแปร์) ไหลไปทางขวา ผ่านจุด 2 ไป 3 i_2 (แอมแปร์) ไหลลงดินผ่าน Z_T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของกระแสในวงจรดังแสดงในรูป ข.3, ซึ่งคำนวณโดยใช้วิธีเมทริก เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับวิธีที่เสนอในบทความนี้



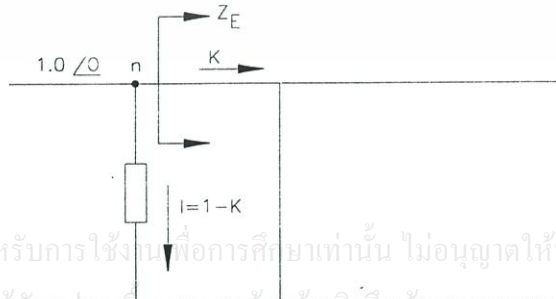
รูปที่ ข.3 การกระจายกระแสของวงจร ILC

b. เมื่อ Z_T และ Z_E ที่ถูกมอง ณ จุดใด ๆ ของ ILC มีค่าเท่ากัน, Current distribution factor ; (K) ถูกคำนวณในรูป Z_T และ Z_E สำหรับทุกจุดของ ILC ดังนี้

$$K = Z_T / (Z_T + Z_E) \tag{ข.3}$$

ยกตัวอย่างเช่น รูปที่ ข.3

$$K = 0.3333$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.4 Current distribution factor (K) ของ ILC

$$I_2 = (K)I_1 = (0.3333)3.3333 = 1.1111 \quad \text{แอมแปร์}$$

$$i_2 = (K)I_1 = (1 - 0.3333)3.3333 = 2.2222 \quad \text{แอมแปร์}$$

- c. วิธีการต่อไปนี้จะเป็นหลักในการคำนวณหาค่าแรงดันเทียบกับแรงดันที่จุดต่อลงดิน (V_n) กระแสที่ไหลสู่ดิน (i_n), กระแสที่ไหลไปทางด้านขวา (I_n) ณ.จุด n ใด ๆ ของวงจร ILC ที่กระแสจ่ายเข้าสู่วงจรทางจุดด้านซ้าย

$$I_n = IK^n \quad \text{แอมแปร์} \quad (\text{ข.4})$$

$$i_n = I(1 - K)K^{n-1} \quad \text{แอมแปร์} \quad (\text{ข.5})$$

$$V_n = i_n Z_T \quad \text{โวลท์} \quad (\text{ข.6})$$

ตัวอย่างเช่น (ดูรูปที่ ข.3)

$$I_3 = 10 (0.3333)^3 = 3.704 \quad \text{แอมแปร์}$$

$$i_3 = 10 (1 - 0.3333) (0.3333)^2 = 0.7404 \quad \text{แอมแปร์}$$

$$V_3 = 0.7404 (1.5) = 1.11 \quad \text{โวลท์}$$

ข.1.3 แรงดันที่ลดลงไปตาม ILC

- a. ถ้าเราพิจารณาวงจร ILC ที่ประกอบไปด้วยจุด 1, 2 ... ดังแสดงในรูป ข.3 กระแส (I) จ่ายให้วงจร ณ.จุด (I) ทั้งให้เกิดแรงดัน (V_1) ณ.จุด (1) โดยที่

$$V_1 = I(Z_E)$$

- b. เป็นไปได้ที่เราจะพิจารณา ณ.จุด n_1 โดยที่แรงดันเทียบกับดิน (V_{n1}) ลดลงเป็นสัดส่วน ($a V_1$) ของแรงดันเริ่มต้น (V_1)

$$V_{n1} = (I_{n1})Z_E = I(K^{n1})Z_E$$

$$aV_1 = a(I_1)(Z_E) = a(IK^1)Z_E$$

$$V_{n1} = aV_1, I(K^{n1})Z_E = a(IK)Z_E$$

$$K^{n1} = aK$$

$$K^{n1-1} = a$$

$$(n1 - 1)\ln(K) = \ln(a)$$

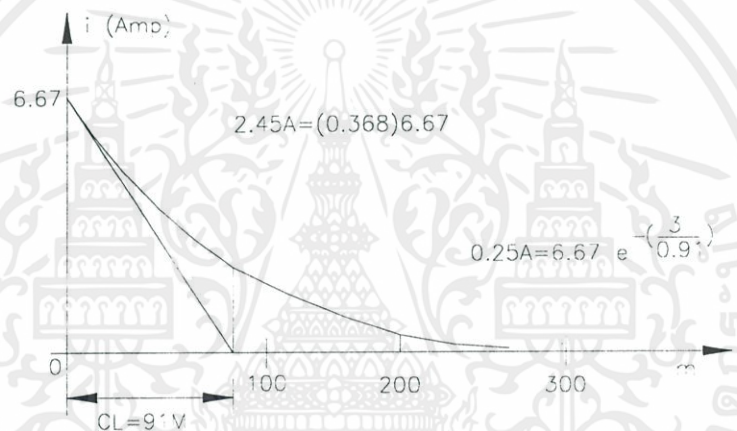
$$n1 = 1 + \ln(a)/\ln(K) \quad (\text{ข.7})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับสูง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- c. ตัวคูณลด (a) สามารถเลือกจาก ($a = e^{-1} = 0.368$) เหมือนกับตัวคูณลดที่พิจารณาในวงจรในรูปของ Time constant ถ้าเราแทนค่าของ (a) สมการ (ข.7) จะได้

$$n1 = 1 + \ln \frac{\ln e^{-1}}{\ln K} = 1 + \frac{-1}{\ln(k)}$$

ในกรณีนี้ ($n1$) คือจุดในวงจร ILC ที่มีค่าแรงดันลดลงที่ 36.8% ของแรงดัน ณ.จุด (1) ซึ่งมีแหล่งจ่ายกระแสจ่ายให้วงจร (ดูรูป ข.5)



รูปที่ ข.5 กระแสที่ลดลงไปตามวงจร ILC

- d. พิจารณาค่า (S) ในหน่วยของกิโลเมตร (Km) ในแต่ละส่วนของวงจรพาย ที่ประกอบเป็นวงจรขั้นบันได เป็นไปได้ที่จะพิจารณาจุดที่ห่างจากจุด (1) ที่ทำให้แรงดันลดลงเหลือ 36.8% ของแรงดัน V_1 ณ.จุด (1) ระยะทางนี้เราเรียกว่า “Space Constant” (SC) หรือ “Characteristic Length” (CL)

$$SC = S(n_1 - 1) = S \left(\frac{-1}{\ln(K)} \right) = \left(\frac{-S}{\ln(K)} \right) \quad \text{กิโลเมตร}$$

$$SC = \frac{-S}{\ln(K_1)} \quad \text{กิโลเมตร} \quad (\text{ข.8})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 $K_1 = \text{Module of Complex } K$

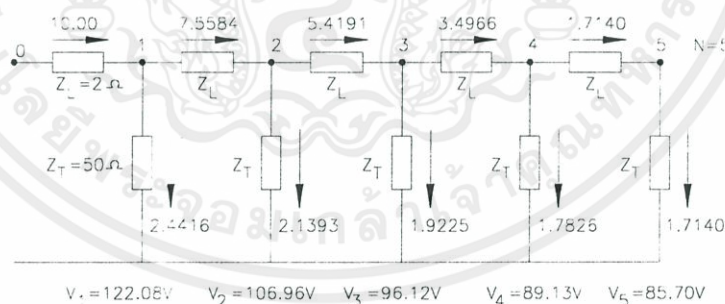
ข.2 ผลลัพธ์ของวงจรชั้นบันไดที่มีขอบเขตจำกัด ซึ่งปราศจากจุดสิ้นสุดพิเศษ

ตามที่ได้แสดงไปแล้วว่า ค่าของแรงดันและกระแสลงสู่ดิน ณ.จุดใด ๆ ของ ILC ที่ประกอบไปด้วย N จุดรวมจาก 2 ถึง ∞ โดยจ่ายกระแส ณ ด้านซ้ายสุด สามารถคำนวณด้วยวงจรง่าย ๆ

เรื่องที่กำลังจะต่อไปนี้ในหัวข้อ ข.2.1 จะแสดงให้เห็นว่ากระแสลงสู่ดินในวงจร FLC (Finite Ladder Circuit) จะอยู่ในรูปของ Infinite Power Series, หัวข้อ ข.2.2 จะกล่าวถึงสมการทั่วไปของอนุกรมนี้, หัวข้อ ข.2.3 แสดงให้เห็นดังสมการที่ใช้คำนวณตัวแปรในวงจร ILC, ตัวอย่างการคำนวณจะกล่าวในข้อ ข.2.4

ข.2.1 ค่าแรงดันและกระแสลงสู่ดิน ณ.จุดรวม (N) ของวงจร FLC ในรูปของ Power Series

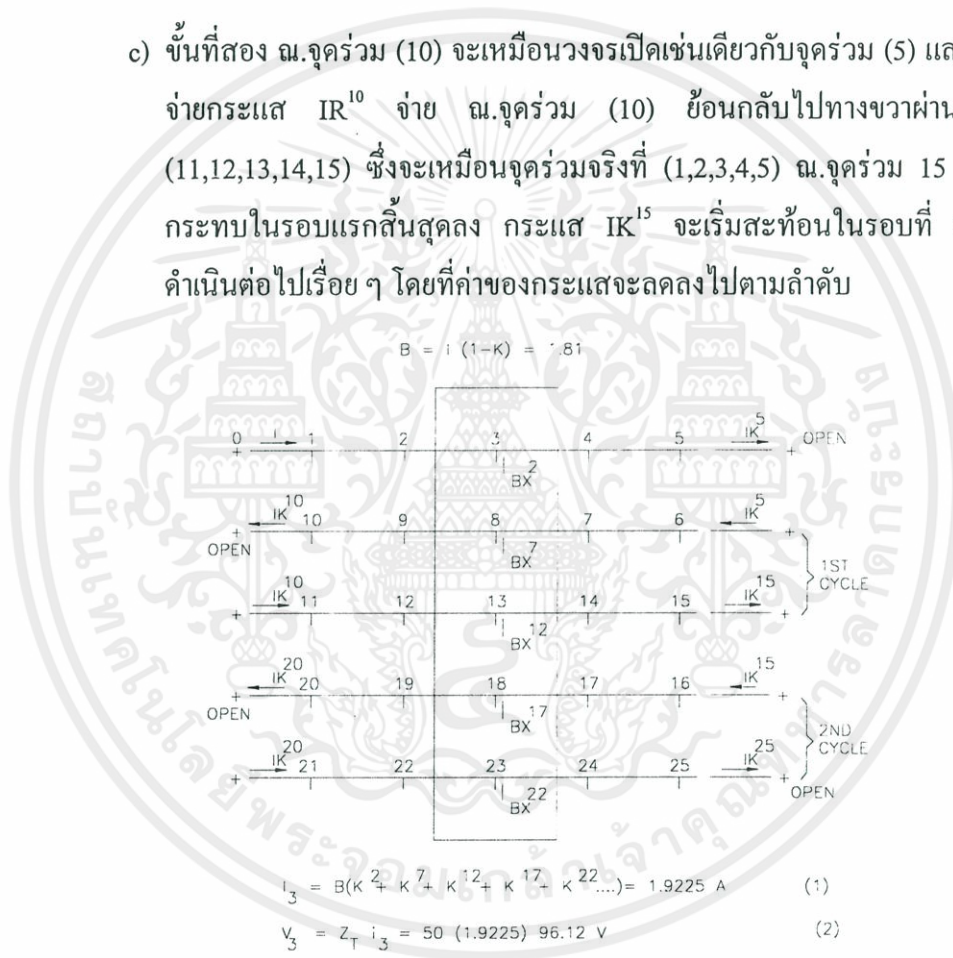
- a) รูป ข.6.1 แสดงวงจรชั้นบันไดที่จำกัดอันประกอบด้วยวงจรชั้นบันได 5 จุดรวม ($N=5$) มีแหล่งจ่ายกระแส I ไหลสู่วงจร ณ.จุดรวม (0) วงจรนี้คำนวณด้วยวิธีเมทริกซ์ เพื่อช่วยต่อการทำความเข้าใจ ผลลัพธ์ของวงจร FLC นี้ ยังสามารถคำนวณจากตัวแปร (Z_E) และ Current distribution factor (K) สมมติว่าวงจรชั้นบันไดประกอบด้วยวงจรพายแบบอนันต์



รูป ข.6.1 วงจร FLC คำนวณด้วยวิธีเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ ในรูป ข.6.2 กำหนดให้วงจรชั้นบันไดแบบอนันต์ กระแสที่ไหลมา ณ.จุดรวม (5) ซึ่งไหลมาตามอิมพีแดนซ์ 4-5 จะมีค่าเท่ากับ (IK^4) กระแสที่ไหลจากจุดรวม 5 ไปตาม 5-6 จะมีค่าเท่ากับ IK^5 อย่างไรก็ตาม วงจรที่ต่อเชื่อมหลังจากจุดที่ 5 นั้นเป็นเรื่องที่สมมติขึ้น ถ้าเราหยุด ณ.จุดรวมที่ 5 แล้วให้ IK^5 ไหลย้อนกลับมาทางด้านซ้าย จะทำให้เราได้สมมติฐาน 2 ข้อ คือ

- วงจรถูกตัดที่จุดร่วม (5)
 - กระแสจะเท่ากับ 0 ณ.จุดร่วม (5)
- b) หลังจากนั้น เราจะคำนวณค่าของกระแสที่กระจายไปทางด้านซ้าย ด้วยกระแส IK^7 จ่าย ณ.จุดร่วม (5) ซึ่งจะเหมือนกับว่าเรามีแหล่งจ่ายกระแส IK^7 จ่าย ณ.จุดขวาสุด เหมือนกับวงจรเปิด ณ.จุดร่วม (5) แล้วไหลย้อนกลับที่จุดร่วม (6,7,8,9,10) ซึ่งก็คือจุดร่วม (5,4,3,2,1)
- c) ขั้นที่สอง ณ.จุดร่วม (10) จะเหมือนวงจรเปิดเช่นเดียวกับจุดร่วม (5) และแหล่งจ่ายกระแส IR^{10} จ่าย ณ.จุดร่วม (10) ย้อนกลับไปทางขวามือผ่านจุดร่วม (11,12,13,14,15) ซึ่งจะเหมือนจุดร่วมจริงที่ (1,2,3,4,5) ณ.จุดร่วม 15 ผลการกระทบในรอบแรกสิ้นสุดลง กระแส IK^{15} จะเริ่มสะท้อนในรอบที่ 2 และดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยที่ค่าของกระแสจะลดลงไปตามลำดับ



รูป ข.6.2 กระแสไหลลงสู่ดินของวงจร FLC ในรูปของ Power Series

ข.2.2 Power Series นำเสนอกระแสลงสู่ดิน

เราจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของ (K) ได้ใน Power Series สามารถจัดอยู่ในรูป จุดร่วม (n) และจำนวนจุดร่วมทั้งหมด (N) ของวงจรชั้นบันไดที่จำกัดได้ สมการของ Power Series ที่คำนวณค่า

i_n ดังแสดงใน ข. 6.1

ข.2.3 ตัวแปรใน Power Series

a. สมการทั่วไปของ Power Series

$$i_n = I[1 - K] \left\{ K^{n-1} + \left[K^{(2N)1+(n-1)} + K^{(2N)2+(n-1)} + \dots + K^{(2N)1-n} + K^{(2N)2-n} + \dots \right] \right\} \quad \text{.....(ข.9)}$$

b. สมการอย่างง่ายของ Power Series

ให้ $K^{2N} = C$ จะได้

$$i_n = I(1 - K) \left\{ K^{n-1} [C^1 + C^2 + C^3 \dots] + \frac{1}{K^n} [C^1 + C^2 + C^3 \dots] \right\} \quad \text{(ข.10)}$$

c. เพิ่มเติมทุกเทอมของ Power Series

ถ้า $C < 1$ จะได้ $C^1 + C^2 + C^3 \dots = \frac{C}{1 - C} = \frac{K^{2N}}{1 - K^{2N}}$ (ข.11)

$$i_n = I(1 - K) K^{n-1} \left[K^{n-1} + K^{n-1} \left(\frac{K^{2N}}{1 - K^{2N}} + \frac{1}{K^n} \right) \left(\frac{K^{2N}}{1 - K^{2N}} \right) \right] \quad \text{(ข.12)}$$

d. สมการสุดท้าย

$$A = \frac{K^{2N}}{1 - K^{2N}}$$

$$i_n = I(1 - K) \left[K^{N-1} (1 + A) + \frac{A}{K^n} \right] \quad \text{แอมแปร์} \quad \text{(ข.13)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร $V_n = i_n Z_T$ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โวลต์ อนุภาคให้นำไปใช้ประโยชน์ (ข.14) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2.4 ตัวอย่างการคำนวณ

a) จากรูป ข.7.1 แสดงวงจร FLC ที่มีจุดร่วม (N=2), ($Z_L = 3\Omega$), ($Z_T = 2\Omega$) กระแส $I = 10\angle 0$ แอมแปร์ จ่ายลง ณ.จุดร่วม (1) ใช้สมการที่ (37) และ (38) จะได้

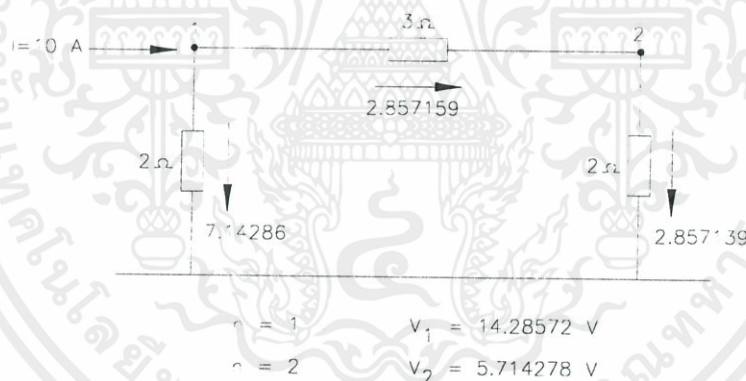
$$Z_E = \frac{Z_L}{2} + \sqrt{Z_L^2 + (Z_L \cdot Z_T)} = 4.3722813$$

$$K = \frac{Z_T}{Z_T + Z_E} = 0.3138593$$

ณ. จุดร่วม 1 ; $V_1 = 14.28572$ โวลต์, $i_1 = 7.1428$ แอมแปร์

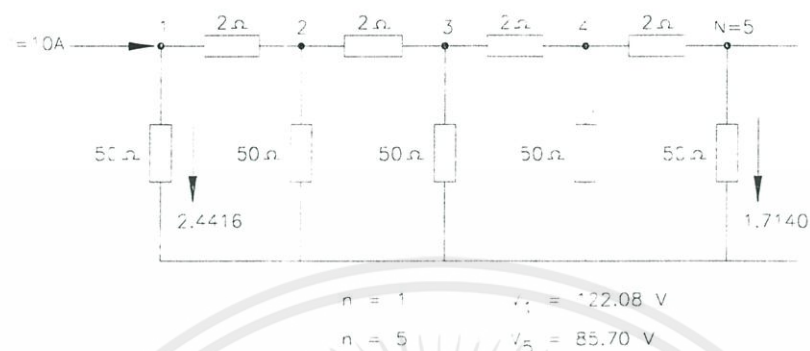
จุดร่วม 2 ; $V_2 = 5.714278$ โวลต์, $i_2 = 2.857139$ แอมแปร์

ค่าผลลัพธ์ที่ได้นี้สามารถคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายทั่วไป



รูป ข.7.1 ผลลัพธ์ของ FLC ที่มีจุดร่วม = 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.7.2 ผลลัพธ์ของ FLC ที่มีจุดร่วม = 5

b) รูปที่ ข.7.2 แสดง FLC มีจุดร่วม ($N = 5$), ($Z_L = 2\Omega$), ($Z_T = 50\Omega$) กระแส $I = 10\angle 0$ แอมแปร์ จ่าย ณ.จุดร่วม (1) ใช้สมการที่ (37), (38) จะได้ แรงดัน กระแส ณ.จุดร่วมต่าง ๆ ดังนี้

$$Z_E = 11.049876 \quad K = 0.8190024$$

$$n = 1, V_1 = 122.08 \text{ V}, \quad i_1 = 2.4466 \text{ A.}$$

$$n = 5, V_5 = 85.70 \text{ V}, \quad i_5 = 1.7140 \text{ A.}$$

ข.3 การแทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาย

วิธีการต่อไปนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรชั้นบันไดที่ประกอบไปด้วยวงจรพายหลาย ๆ วงจร (จาก 1 ถึง จุดอนันต์)

ข.3.1 วิธีการทั่วไป

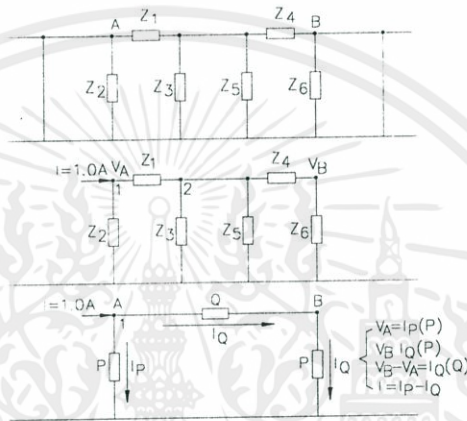
a) สมมติว่าทุก ๆ วงจรพายที่เชื่อมระหว่างจุด (A), (B) กับ ดิน ถูกปลดออกจากวงจรเดิม ดูรูปที่ ข.8

b) ให้กระแส $I = 1.0\angle 0$ แอมแปร์ ไหลสู่จุด (A) แล้วคำนวณค่าแรงดันที่จุด A, B ได้ (V_A) และ (V_B) ดังแสดงในข้อ ข.3

c) วงจรสมมูลพาย ประกอบด้วย Span Impedance (Q) และ 2 อิมพีแดนซ์ (P) ที่เชื่อมลงดิน ตัวแปรเหล่านี้สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$P = (V_A + V_B) / I \quad \text{โอห์ม}$$

- Q = P (V_A-V_B) / V_B โอห์ม
- d) สมการทั้งสองนี้ ประยุกต์มาจากสมการพื้นฐาน 4 สมการดังนี้
- $$V_A = I_P (P), \quad V_B = I_Q (P)$$
- $$V_A - V_B = I_Q (Q), \quad I = I_P + I_Q$$
- (I_P) และ (I_Q) แสดงในวงจรสมมูลพาดังรูป ข. 8



รูป ข.8 การแทนวงจรขั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาด

ข.3.2 การคำนวณค่า (V_A) และ V_B)

จุดต่าง ๆ ที่แยกวงจรดังในรูป ข.8 จาก (1) ถึง (N) วงจรสมมูลพาดอันประกอบไปด้วย (Z_G) และ (Z_S) สามารถคำนวณด้วยสมการต่อไปนี้

$$Z_E = \frac{Z_S}{2} + \sqrt{\left(\frac{Z_S^2}{4} + Z_S Z_G\right)} \quad \Omega \quad (ข.15)$$

$$K = \frac{Z_G}{Z_G + Z_E} \quad (ข.16)$$

$$A = \frac{K^{2N}}{1 - K} \quad (ข.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 2 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_n = I * Z_G (1 - K) \left[K^{n-1} (1 + A) + \frac{A}{K^n} \right] \quad \text{โวลต์} \quad (ข.18)$$

Z_S = Uniform longitudinal impedance... โอห์ม

$Z_G = \text{Uniform transverse impedance...}$ โอห์ม

สมการที่ ข.18 สามารถคำนวณค่าแรงดัน (V) ณ.จุดร่วม (n) ระหว่างจุด 1-N, ดังนั้นถ้าให้ $n = 1$ เราจะได้ V_A , $N = N$ จะได้ V_B

ข.3.3 ข้อควรสังเกตของวงจรสมมูลพาย

พิจารณาค่า (S) เป็นความยาวในหน่วยกิโลเมตรของวงจรพายที่ประกอบเป็นวงจรชั้นบันได เป็นไปได้ที่ระยะทางจากจุดร่วม (1) ไปยังจุดที่แรงดันลดลงเหลือ 36.8% ของแรงดัน (V_1) ระยะทางนี้เราเรียกว่า “Space constant” (SC) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Characteristic Length” (CL)

$K_1 = \text{Module of Complex } K$

$$SC = \frac{-S}{\ln(K_1)} \quad (\text{ข.19})$$

วิธีการคำนวณสมการที่ ข.19 ดังแสดงในข้อ ข.1.3

ถ้าระยะทางระหว่าง 2 จุดอ้างอิง (Monitored Points) ของวงจรชั้นบันได มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 3 (SC) กิโลเมตร สมการที่ 14,15,16,17 แสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ (Q) ของวงจรสมมูลพายจะมีค่านับตั้งแต่ค่าอิมพีแดนซ์ (P) จะมีค่าเท่ากับ Z_E

หมายความว่า ถ้าจุดอ้างอิง 2 จุด ที่ถูกเชื่อมด้วยวงจรชั้นบันได ห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับ 3 (SC) จะทำให้วงจรต่อลงดินถูกเปิดระหว่าง 2 จุดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Decoupled Method

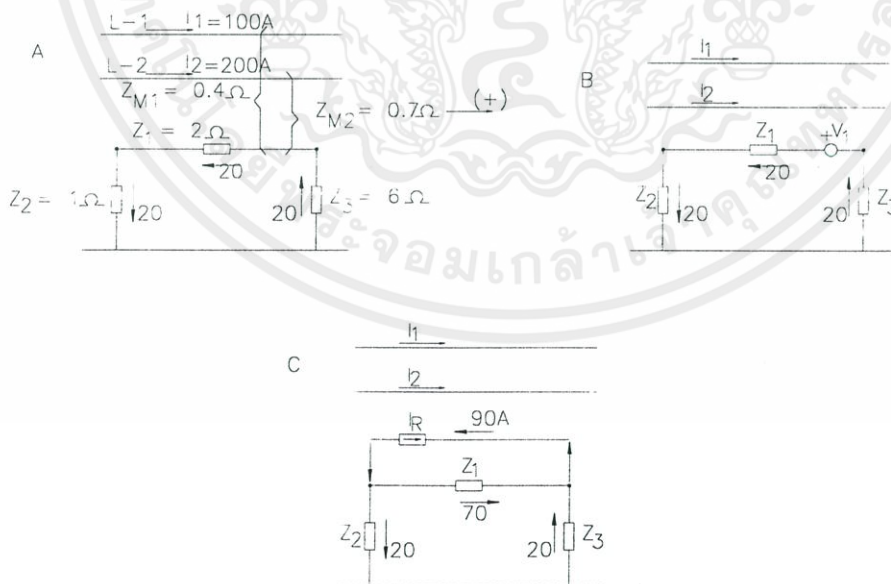
ก.1 Decoupled ของวงจรพายเดี่ยว

ก.1.1 จากรูปที่ ก.1.A แสดงวงจรพายวงจรเดี่ยวอันประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์ (Z_1) (Z_2) และ (Z_3) หน่วยเป็นโอห์ม, อิมพีแดนซ์ของ SPAN = Z_1 เหนี่ยวนำกับสายเฟส L-1 และ L-2 ทำให้เกิด Mutual impedances (Z_{m1} , Z_{m2}) โอห์ม, กระแส Zero Sequence (I_1) และ (I_2) ไหลไปในสาย เฟส L-1 และ L-2 โดยมีกระแส (-20A) ไหลผ่านวงจรพาย (ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา)

ก.1.2 รูปที่ ก.1.B แสดงการทดแทน Z_{m1} , Z_{m2} ด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน V_1 โดยต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ของ Span Z_1 จะได้

$$V_1 = I_1 Z_{m1} + I_2 Z_{m2} + \dots$$

ก.1.3 จากทฤษฎีของนอร์ตัน สามารถแทนแหล่งจ่ายแรงดัน (V_1) ด้วยแหล่งจ่ายกระแส $I_R = -V_1/Z_1$ ขนานกับอิมพีแดนซ์ (Z_1) ดังแสดงในรูป ก.1.C ค่าของกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่เชื่อมกับระบบต่อลงดิน (Z_2 , และ (Z_3) ยังคงเท่าเดิม กระแส (-20A) ที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Z_1 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ (-90) และ (70) โดยที่ $-90+70 = 20$ (พึงสังเกตว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.1 Decoupled ของวงจรพายเดี่ยว

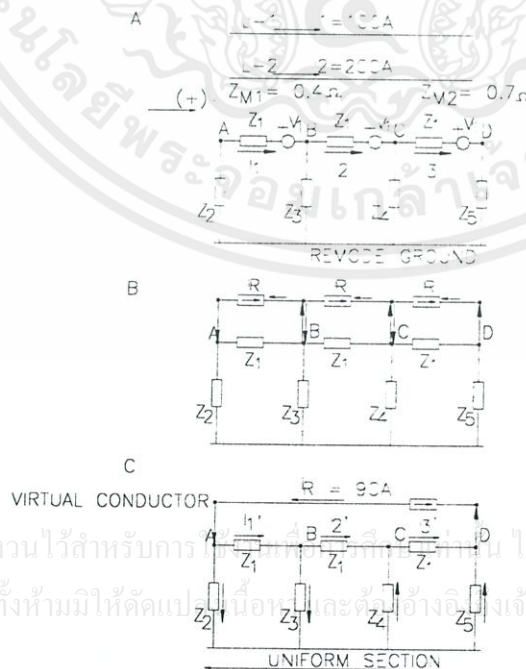
$I_R = \frac{-V_1}{Z_1}$ หรือ $I_R Z_1 + V_1 = 0$) เนื่องจากกระแส I_R ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Z_1 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม ($I_R Z_1$) ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำ V_1 เพื่อสะดวกในการเข้าใจ เราจะทดแทน I_R ด้วย “Neutralized Current และ เรียกกระแสส่วนอื่นว่า “Non Neutralized Currents”

ก.2 Decoupled ของวงจรชั้นบันได

ก.2.1 จากรูปที่ ก-2 A แสดงวงจรพาย 3 วงจรต่อเนื่องกันเป็นวงจรชั้นบันได ถ้าสมมติให้ อิมพีแดนซ์ของ Span ทั้ง 3 ช่วงมีค่าเท่ากัน คือ (Z_1), ค่าของ Mutual impedance ($Z_{m1} = 0.4 \Omega$) ($Z_{m2} = 0.7 \Omega$) เท่ากันทั้ง 3 ช่วง มีกระแส I_1, I_2 ไหลผ่าน เราสามารถทดแทนผลของ Coupling ที่เกิดขึ้นในรูปของแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับ Z_1 ทั้ง 3 ช่วง Span ($V_1 = I_1 Z_{m1} + I_2 Z_{m2}$)

ก.2.2 จากทฤษฎีของนอร์ตัน แทนแหล่งจ่ายแรงดัน ด้วยแหล่งจ่ายกระแส ($I_R = -V_1/Z_1$) ขนานกับ Z_1 ในแต่ละช่วงของ Span ดูรูป ก.2B)

ก.2.3 กระแสที่ถูกรองรับโดยแหล่งจ่ายกระแสกับกระแสที่ไหลสู่แต่ละช่วงของวงจร มีค่าใกล้เคียงกัน เราจะได้ผลของ Mutual coupling ของแต่ละช่วงสามารถแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสเดี่ยว คือ $I_R = -V_1/Z_1$ ระหว่างจุด (A), (B) ดูรูปที่ ก-2C เพราะฉะนั้นวงจรสมมูลของกระแส (I_1), (I_2) และ (I_3) ที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ (Z_1) ของวงจรเดิมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ($I_1 = I_1' + I_R$), ($I_2 = I_2' + I_R$), ($I_3 = I_3' + I_R$) ขั้นตอนทั้งหลายนี้ไม่มีผลกระทบต่อค่าของอิมพีแดนซ์ที่เชื่อมกับระบบต่อลงดิน (Z_2), (Z_3), (Z_4), และ (Z_5)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.2 Decoupled ของวงจรชั้นบันได

ค.3 การแสดงผล Decoupled ของวงจรชั้นบันได

จากวงจรสมมูลชั้นสุดท้าย ตามรูป 2C ใช้หลักพื้นฐานของนอร์ตัน อย่างไรก็ตาม รายละเอียดที่กล่าวต่อไปนี้จะช่วยให้คำนวณคุณสมบัติของ Ground wire ได้ดียิ่งขึ้น

ค.3.1 ผลรวมของกระแสทั้งหมดที่ไหลไปตาม Span ของ Ground wire อยู่ในรูปของ Uniform ที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

กระแส (I_R) ที่ยอมให้ไหลไปในแต่ละช่วงของ Ground wire จะไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าตลอด Uniform Section

Self Neutralized Current (I_R) เหมือนไหลผ่านตัวนำที่ไม่มีอิมพีแดนซ์ ที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรของ Uniform section ณ จุดหนึ่ง I_R จะไหลออกจากวงจร และอีกจุด I_R จะไหลเข้าสู่วงจร ค่าของกระแส (I_1'), (I_2') และ (I_3') แปรเปลี่ยนไปในแต่ละช่วง กระแสเหล่านี้บวกกับกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่เชื่อมกับ Remote ground เรียกว่า Non-Neutralized Current ซึ่งกระแสนี้จะเป็นตัวแปรในการปรับแรงดันตลอดวงจรต่อลงดิน ณ.จุดที่ Self Neutralized Current ไหลสู่วงจร Uniform (หรือไหลออก) ในวงจรจริงจะมี Non-Neutralized Current ไหลอยู่ด้วยเสมอ

ค.3.2 ดังนั้น ในแต่ละวงจร Uniform ของ Ground wire ที่มีผลมาจากแรงเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จากสายเฟส สามารถแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส 2 ส่วน คือ (I_R) และ ($-I_R$) ณ.จุดที่เชื่อมต่อของ Ground wire ขนาดของ I_R สามารถหาได้จาก

$$I_R = -V_1 / Z_1 ; \text{ และ } V_1 = I_1 Z_{m1} + I_2 Z_{m2} + \dots$$

กรณีที่มีเพียงสายเฟสเดียว จะทำให้

$$I_R = -V_1 / Z_1 ; \text{ และ } I_R = I_1 (Z_{m1} / Z_1)$$

$$I_R = I_1 (\mu)$$

ตัวแปร (μ) นี้เราจะพบบ่อยในการคำนวณเรื่อง Ground wire (μ) จะแสดงปริมาณของ Zero sequence current ที่ไหลไปในสายเฟส ที่มีผลมาจาก Self Neutralized Current

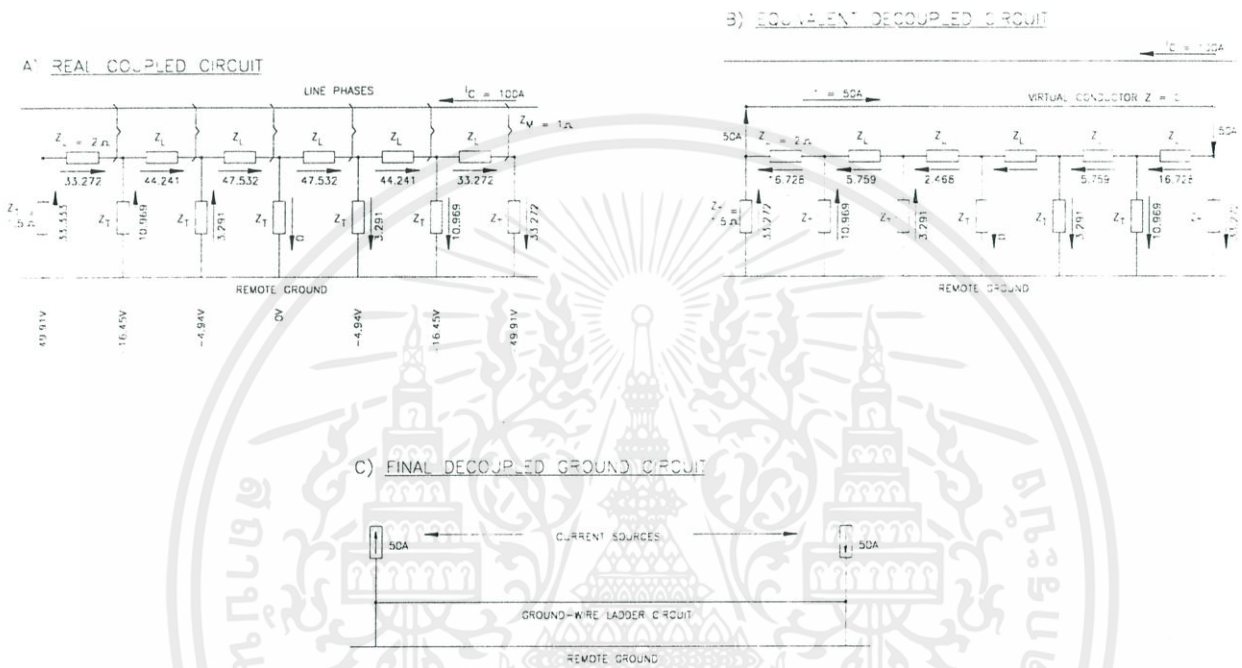
ค.4 ตัวอย่างการคำนวณแบบ Numerical

ค.4.1 รูปที่ ค-3A แสดงวงจรชั้นบันไดที่เชื่อมต่อกันด้วย 4 วงจรพาย ถ้าคำนวณโดยวิธีทั่วไป ได้ค่าแรงดันและกระแสที่แสดงในรูป ค-3A

ค.4.2 รูปที่ ค.3B แสดงการคำนวณด้วยวิธี Decoupled แทนแหล่งจ่ายกระแส (50A) ที่ไหลสู่วงจรด้านขวา และไหลออกวงจรทางด้านซ้าย

จะสังเกตเห็นว่าทุก ๆ กระแสที่ไหลลงสู่ดิน จะมีค่าเท่ากันทั้งในรูป ค-3A และ ค-3B ถ้าเราเพิ่มกระแสในแนวราบไปตามอิมพีแดนซ์แนวราบ (Longitudinal Impedance) ของวงจรพาย (ดังรูป ค.3B) จะมีผลเช่นเดียวกับที่แสดงในรูป ค.3A

ก.4.3 รูป ก.3C แสดงวงจรสมมูลที่ประกอบด้วยแห่งจ่ายกระแส 2 ชุด ซึ่งมีค่าเหมือนรูป ก.3A



รูปที่ ก.3 ผลลัพธ์ของวงจรชั้นบันได

ก.5 การใช้ประโยชน์ของวงจรเสมือน (Virtual Circuits)

ตามที่กล่าวในข้อ ก.3 ข้างต้น ตัวนำเสมือน (Virtual conductor) คือตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ เชื่อมโยงระหว่าง Uniform Section ของวงจรต่อลงดิน และถูกเชื่อมกับวงจร ณ จุดต่อของ Uniform Section ที่ซึ่งวงจร Coupling ถูกตัดออก ตลอด Virtual Conductor การไหลของ Self Neutralized Current จะไม่มีแรงดันตกคร่อมตลอดวงจร หลักการของ Virtual Conductor ไม่ได้ใช้ในการคำนวณ เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แสดงในหัวข้อ 3.4 (บทที่ 3) อย่างไรก็ตามหลักการนี้จะช่วยให้วิศวกร หรือผู้อ่านเข้าใจคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำของระบบต่อลงดินได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถที่จะวาดวงจรที่จำเป็นในการอธิบายคุณสมบัติของวงจรหลังจากเกิดการ Mutual coupling

ก.5.1 รูปที่ ก-4 แสดง Transmission Line ซึ่งมี 2 วงจรบนเสาเดียวกัน เราสมมติว่ามี 3 สาย ตัวนำต่อลงดิน 3 ชนิดตลอดความยาวของสายส่ง แบ่งเป็นส่วนที่ 1,2 และ 3 วิธีการคำนวณ Self-Neutralized Current ในแต่ละส่วนทำได้ดังนี้

ส่วนที่ 1

$$Z_{m1} = 0.6\Omega/km, \quad Z_{m2} = 0.4\Omega/km, \quad Z_1 = 0.5/\Omega km$$

$$I_1 = 200A, \quad I_2 = 500A$$

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1(Z_{m1}) + I_2(Z_{m2}) \\ &= 320 \text{ Volt} / km \end{aligned}$$

$$I_{R1} = -\frac{V_1}{Z_1} = -(320/0.5) = -640 A$$

ส่วนที่ 2

$$Z_{m1} = 0.6\Omega/km, \quad Z_{m2} = 0.4\Omega/km, \quad Z_1 = 0.8/\Omega km$$

$$V_2 = 320 V / km$$

$$I_{R2} = -V_2 / Z_2 = -(320/0.8) = -400A$$

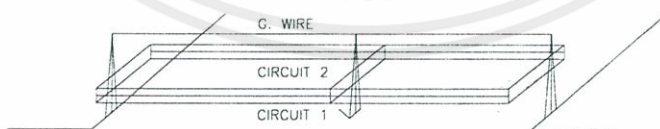
ส่วนที่ 3

$$Z_{m1} = 0.6\Omega/km, \quad Z_{m2} = 0.4\Omega/km, \quad Z_2 = 1.0\Omega/km$$

$$I_1 = 200A, \quad I_3 = -400A$$

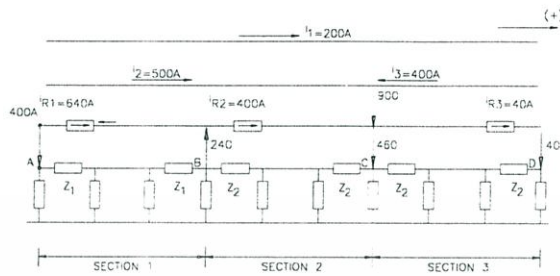
$$\begin{aligned} V_3 &= I_1(Z_{m1}) + I_3(Z_{m2}) \\ &= 200(0.6) + (-400)0.4 \\ &= -40 \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$I_{R3} = -V_3 / Z_2 = -(-40)/1.0 = 40A$$

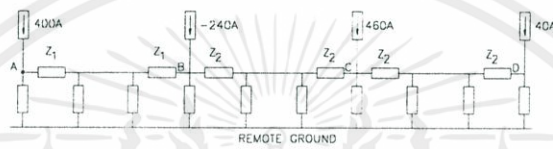


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาติดต่อขอสงวนลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.5.2 จากรูปที่ ค-5 แสดงว่า Self-Neutralized Current ที่ไหลในวงจรเสมือนของสายต่อ
ลงดินซึ่งแสดงโดยวงจรสมมูล

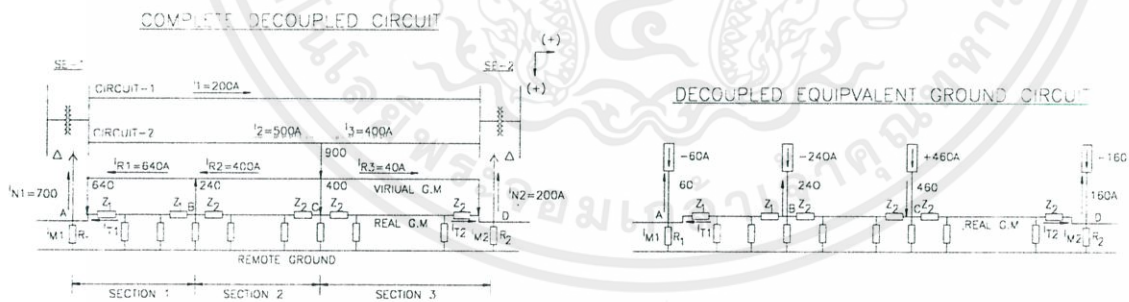


C) FINAL DECOUPLED GROUND CIRCUIT

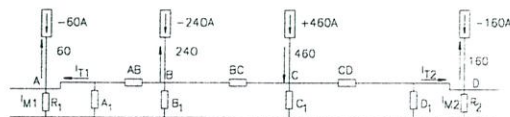
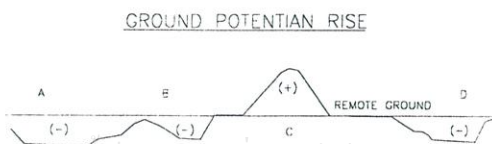


รูปที่ ค.5 Decoupled ของ สาย Ground-wire, 3 Uniform sections

ค.5.3 รูปที่ ค-6 แสดงบางส่วนของวงจรในรูปที่ ค-4 และได้เชื่อมกับสถานีไฟฟ้า SE-1 และ SE-2 แสดงเป็นวงจรสมมูล



FINAL DECOUPLED AND REDUCED GROUND CIRCUIT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.6 Decoupled Method ที่รวม Terminal Substation

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการออกแบบ

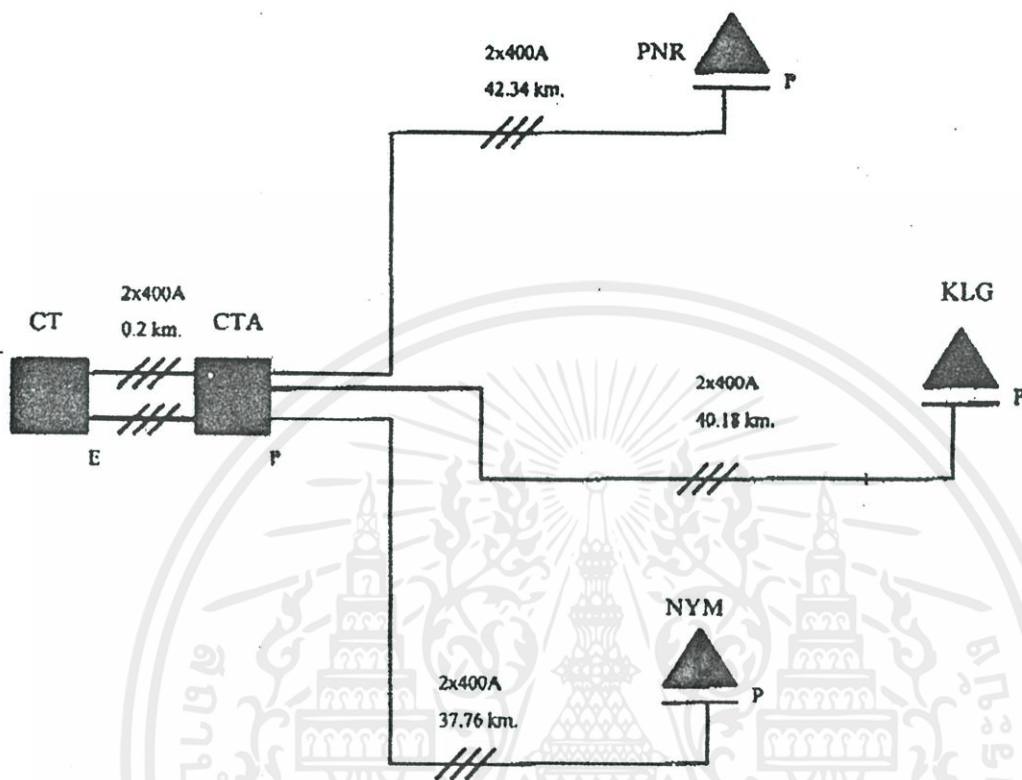
ตัวแปรเบื้องต้น ที่จำเป็นในการออกแบบระบบต่อลงดิน เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง, อิมพีแดนซ์ของระบบ และค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด (จากโปรแกรม Short Circuit)

ที่มา : กองออกแบบระบบสายส่งและสถานีไฟฟ้าย่อย
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARAMETER AT CHANTHA BUKI, PONG-NAM-RON, KHLUNG and NA-YAI-AM S/S



LINE IMPEDANCE

SUBSTATION	LINE LENGTH(km)	IMP-R1(pu)	IMP-X1(pu)	IMP-R0(pu)	IMP-X0(pu)
LINE CT S/S TO CTA S/S	0.200	0.0000649	0.0004048	0.0003228	0.0020104
LINE CTA S/S TO PNR S/S	42.340	0.0137460	0.0857045	0.0683427	0.4256090
LINE CTA S/S TO KLG S/S	40.180	0.0130448	0.0813322	0.0648561	0.4038963
LINE CTA S/S TO NYM S/S	36.760	0.0119344	0.0744095	0.0593358	0.3695179

IMPEDANCE SOURCE

SUBSTATION	IMP-R1	IMP-X1	IMP-R0	IMP-X0
AT CT	0.0313787	0.1468932	0.0706631	0.3733947

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAX. FAULT CURRENT AT 115 kV

SUBSTATION	3 PHASE FAULT (A)	SLG FAULT (A)
AT CTA	3,333.35	2,204.44
AT PNR	2,116.32	1,169.69
AT KLG	2,155.51	1,198.39
AT NYM	2,222.37	1,246.83

NOTE

CT = CHANTHA BURI SUBSTATION (EGAT)

CTA = CHANTHA BURI SWITCHING STATION (PEA)

PNR = PONG-NUM-RON SUBSTATION (PEA)

KLK = KHLUNG SUBSTATION (PEA)

NYM = NA-YAI-AM SUBSTATION (PEA)

PU. BASE ON : 100 MVA, 115 kV

MAX. FAULT LEVEL SUPPLY BY ONE SOURCE ONLY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน” ตีพิมพ์ใน “วิศวกรรมลาดกระบัง” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีที่ 17 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน

Substation Interconnected Ground System Design

รวี พงษ์ศิริพานิช ธิติ เอี่ยมมงคล ศุภี บรรจงจิตร นิตศน์กฤษณจินดา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน ตั้งแต่ 2 สถานีขึ้นไป จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลลงสู่ตัวนำต่อลงดิน (กระแสกริด) ที่แท้จริงของระบบต่อลงดินนั้น ๆ เนื่องจากระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า สามารถที่จะลดปริมาณของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น โดยที่กระแสลัดวงจรบางส่วนจะไหลผ่านไปตามตัวนำต่อลงดินภายนอกที่มาต่อเชื่อมนั้นๆ [3] บทความนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณ หาค่ากระแสกริดของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน โดยใช้ Decoupled Method [1] เพื่อนำค่ากระแสกริดที่ได้นี้ไปคำนวณหาระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่ปลอดภัยต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานและประหยัดค่าใช้จ่ายสูงสุด

Abstract

The grounding system design of ground mat dimensioning of two or more neighbor interconnected substations; it is necessary to know the actual grid current of each ground mat. The external ground circuits connected to the ground grid of each substation can reduce the percentage of total ground current injected into the soil through the mat of the total fault current

This paper shows the Decoupled Method to calculate the ground grid current, that is the important for safety and economic substation grounding system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป สถานีไฟฟ้าแต่ละสถานีจะต่อเชื่อมถึงกันด้วย overhead line หรือ Underground Power cable เช่น ระบบสายส่งที่จ่ายให้ชุมชน, สถานีผลิตไฟฟ้า, สถานีลดแรงดัน และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า, ระบบต่อลงดินของสถานีเหล่านี้จะถูกต่อเชื่อมถึงกันด้วย overhead ground wire, Power cable sheaths หรือสายตัวนำต่อลงดินที่เพิ่มเข้าไป

ระบบต่อลงดินภายนอกที่ต่อเชื่อมกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้านั้น ๆ สามารถช่วยลดปริมาณกระแสกริดที่ไหลลงสู่ระบบต่อลงดินได้บางส่วน

การหาค่ากระแสกริดนี้ เดิมได้มีการใช้วิธี Complex Matrix ในการคำนวณแต่ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมากเนื่องจากความซับซ้อนของวงจรและขั้นตอนที่มาก

บทความนี้จะนำเสนอ Decoupled Method มาใช้ในการพิจารณาค่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจร โดยอาศัยหลักการลดวงจรสมมูลย์ลงเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการคำนวณมีค่าน้อยที่สุด และหลักการที่สามแม่เหล็กเหนี่ยวนำระหว่างวงจรชั้นบน ไคและวงจรจำหน่าย สามารถทดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในวงจรสมมูลย์กับจุดอ้างอิง

2. ทฤษฎีและหลักการที่ใช้

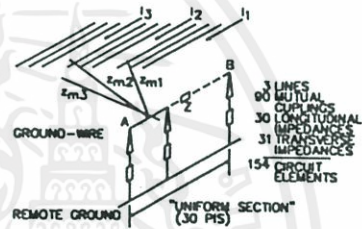
วงจรของระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อกับระบบต่อลงดิน สามารถแทนด้วยวงจรชั้นบน ไค (Ladder circuit) ที่ประกอบด้วยวงจรพาย (Equivalent Pi) หลาย ๆ วงจรเชื่อมต่อกันในลักษณะ Uniform Section

2.1 Uniform Section

วงจรต่อลงดินภายนอกที่เชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของวงจรชั้นบน ไคซึ่งสามารถทดแทนด้วย "Uniform Section" จากรูปที่ 1 แสดงสายตัวนำต่อลงดินระหว่างจุด A และ B ประกอบด้วย 30 Span ที่เหมือน ๆ กัน สายตัวนำต่อลงดินระหว่าง A-B สามารถเรียก

ได้ว่าเป็น "Uniform Section" ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่มีลักษณะดังนี้

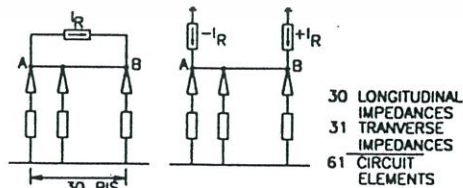
- Z Impedance ของตัวสายตัวนำต่อลงดิน Ω / km
- Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3} Impedance เหนี่ยวนำระหว่างสายตัวนำต่อลงดิน กับสายเฟส 1,2,3 Ω / km
- I_1, I_2, I_3 Zero Sequence Current ที่ไหลในสายเฟส 1,2,3 (Ampere)



รูปที่ 1 คุณสมบัติของ Uniform Section

สำหรับกรณีทีระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้าไม่เท่ากัน (Non Uniform Span) หรือความต้านทานของฐานรากของเสาส่งไฟฟ้าไม่เท่ากันสามารถนำหลักการของ Uniform Section ไปประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน

Uniform Section นี้สามารถใช้กับสายตัวนำที่ฝังดินที่มีสายตัวนำต่อลงดินห่อหุ้ม (Sheaths), สายตัวนำต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน โดยวิธีฝังดินโดยตรง, ท่อโลหะฝังดิน ตัวนำของวงจรเหล่านี้จะอยู่ในรูปของวงจรชั้นบน ไค



รูปที่ 2 การจำแนก Mutual Couplings ของสายเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารนี้ด้วย

2.2 Mutual coupling

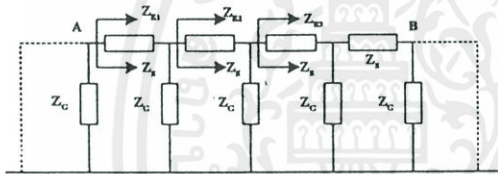
รูปที่2 แสดงให้เห็นว่า Mutual coupling ระหว่าง Uniform Section A-B ของวงจรตัวนำต่อลงดิน และเฟส 1,2,3 สามารถทดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส I_R ต่อระหว่างจุด A และ B วิธีกันนี้เราเรียกว่า Decoupling Technique ซึ่งคิดแปลงมาจากทฤษฎีของ Norton

การคำนวณค่า I_R ทำได้ดังนี้

$$V_1 = I_1 Z_{m1} + I_2 Z_{m2} + I_3 Z_{m3} \quad \text{V/km}$$

$$I_R = V_1 / Z_1 \quad \text{Ampere} \quad \dots\dots\dots 1$$

2.3 การแทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาย



รูปที่3 การแทนวงจรชั้นบันไดด้วยวงจรสมมูลพาย

- a) สมมติให้วงจรพายระหว่างจุด A และ B รวมทั้งทุก ๆ ส่วนของวงจรที่ต่อลงดินระหว่างจุด A และ B ถูกปลดออกจากวงจรหลัก
- b) กำหนดให้ $I = 1.0 \angle 0^\circ$ Amp ไหลเข้าที่จุด A, ค่าแรงดันค่าแรงดัน ณ.จุด A และ B จะได้ V_A, V_B
- c) วงจรสมมูลพายจะถูกแทนด้วย Span Impedance (Q) และถูกต่อลงดินด้วย Impedance (P) ทั้งสองด้าน ค่าของอิมพีแดนซ์ P และ Q คำนวณได้ดังนี้

$$P = (V_A - V_B) / I \quad \Omega \quad \dots\dots\dots 2$$

$$Q = P(V_A - V_B) / V_B \quad \dots\dots\dots 3$$

2.4 การคำนวณค่าแรงดัน V_A และ V_B

วงจรรูปที่ 3 แบ่งเป็นส่วน ๆ จากจุด 1 ถึง N แต่ละ Uniform P_i ประกอบด้วย impedance Z_G, Z_S สามารถคำนวณค่า V_A, V_B ดังนี้ กำหนดให้

$$Z_{E1} = Z_{E2} = Z_{E3}$$

$$Z_E = Z_S + (Z_G // (Z_G // Z_{E2}))$$

$$\therefore Z_E = Z_S + (Z_G // Z_E)$$

$$Z_E = \frac{Z_S}{2} + \sqrt{\frac{Z_S^2}{4} + Z_S \cdot Z_G} \quad \Omega \quad \dots\dots\dots 4$$

$$K = \frac{Z_G}{Z_G + Z_E} \quad \dots\dots\dots 5$$

$$A = \frac{K^{2N}}{1 + K^{2N}} \quad \dots\dots\dots 6$$

$$V_N = I \cdot Z_G (1 + K) \left[K^{N-1} (1 + A) + \frac{A}{K^N} \right] \text{ Volt} \quad \dots\dots\dots 7$$

$Z_G = \text{Uniform transverse impedances } (\Omega)$
 $Z_S = \text{Uniform longitudinal impedances } (\Omega)$

2.5 Characteristic Length

ในแต่ละส่วนของวงจรพายที่ประกอบเป็นวงจรชั้นบันได จะมีจุดหนึ่งที่ห่างจากจุดอ้างอิง ที่ระยะห่างค่าหนึ่งซึ่งทำให้แรงดันลดลงเหลือ 36.8% ของจุดอ้างอิง เราเรียกระยะทางนี้ว่า "Characteristic Length" หรือ "Space Constant" (SC) ถ้าจุดอ้างอิงของวงจรต่อลงดินที่มีวงจรชั้นบันไดเชื่อมต่อกันมีความยาวมากกว่า 3(SC) [1] จะทำให้วงจรต่อลงดินนั้นอยู่ในลักษณะ "วงจรเปิด" ค่าของ Characteristic length นี้ขึ้นกับค่าของอิมพีแดนซ์ของระบบต่อลงดินและ Span ของระบบดังนี้

$$SC = \frac{-S}{I_n \angle (K_1)} \quad \text{Km.} \quad \dots\dots\dots 8$$

$S = \text{Span ของเสาต่ง , km}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น $K_1 = \text{Module of Complex } K$ ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

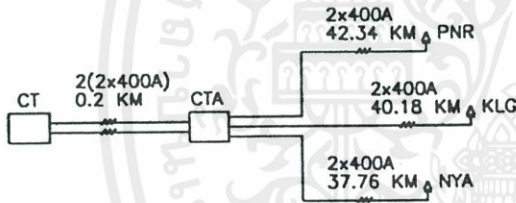
3. การประยุกต์ใช้

กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบต่อลงดิน และมีผลต่อการคำนวณต่อกระแสกริด คือค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบลักษณะ Single Line to ground fault และ Double line to ground fault ซึ่งจะทำให้เกิด Zero sequent current สูงสุด โดยแยกการพิจารณาดังนี้

กรณี Single line to ground fault เมื่อ $Z_0 Z_1 > Z_2^2$

Double line to ground Fault เมื่อ $Z_1 Z_0 < Z_2^2$

เพื่อความเข้าใจถึงการใช้ Decoupled Method ในการคำนวณค่ากระแสกริดของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน จะพิจารณาระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งรับพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างของระบบต่อลงดินที่เชื่อมโยงถึงกัน

รูปที่ 4 แสดงสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน 5 สถานี ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์ โดยมีสถานีไฟฟ้าย่อย จันทบุรี (CT) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเชื่อมโยงกับสถานีสวิทช์จันทบุรี (CTA) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ด้วยสายส่ง 2 วงจร ระยะทาง 0.2 กิโลเมตร สถานี CTA เชื่อมโยงกับสถานีไฟฟ้าป้อนน้ำร้อน (PNR), ขลุง (KLG) และนายายอาม (NYA) ด้วยระบบสายส่ง 1 วงจร ห่างจาก CTA เท่ากับ 42.34 กิโลเมตร, 40.18 กิโลเมตร และ 37.76 กิโลเมตร ตามลำดับ

จากข้อมูลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [2] จะได้ข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

SLG : Single line to ground fault = 2,204.44 A

I_0 = Zero Sequence Current = 367.5 A

I_N = Neutral Current of power transformer = 734.8 A

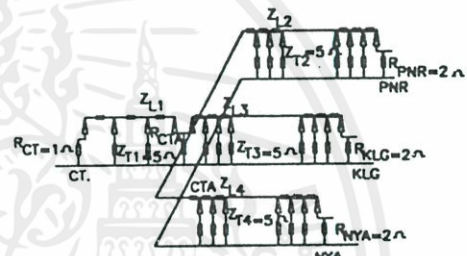
Z_T = Impedance of footing tower = 5 Ω

Z_1 = Impedance of overhead ground wire = 9.4+6.1j Ω /km

R_{ct} = Ground Grid resistance ของสถานี CT = 1.0 Ω

$R_{PNR} = R_{KLG} = R_{NYA}$ = Ground Grid resistance ของสถานี PNR, KLG, NYA = 2.0 Ω

SPAN ของสายส่งระบบไฟฟ้า 115kV = 80 m.



รูปที่ 5 แสดงวงจรพายของระบบต่อลงดินจากรูปที่ 4

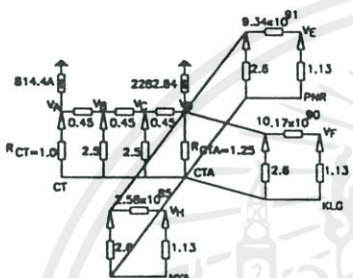
รูปที่ 5 แสดงวงจรมูลย์พาย ของระบบจากรูปที่ 4 โดยที่ SPAN ในระบบสายส่ง 115kV เท่ากับ 80 เมตร ทำให้อิมพีแดนซ์ที่แทนค่าอิมพีแดนซ์ของสาย Overhead ground wire (Z_L) และ อิมพีแดนซ์ของเสาตั้งไฟฟ้า (Z_T) ระหว่างสถานี CT กับ CTA เท่ากับ 3 วงจรพาย, ระหว่าง CTA กับ PNR เท่ากับ 530 วงจรพาย, ระหว่าง CTA กับ KLG เท่ากับ 503 วงจรพาย, ระหว่าง CTA กับ NYA เท่ากับ 472 วงจรพาย กำหนดจุดที่ต้องพิจารณา (Monitored Point) ที่ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรสูงสุดในระบบดังนี้

- พิจารณาค่า Fault ที่สถานี CTA ซึ่งทำให้เกิดกระแสกริดสูงสุด
- ที่สถานี PNR, KLG และ NYA ระยะห่างจาก CTA มีค่ามากกว่า 3 SC (3 เท่าของ Space Constant) ทำให้วงจรมูลย์พายของระบบต่อลงดิน Open Circuit ดังนั้นไม่ต้องคิด Fault ที่สถานีทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยพลังงานจันทบุรี และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- CT ห่างจาก CTA น้อยกว่า 3 CL ดังนั้นต้องพิจารณา จา
ทุกจุดระหว่าง CT ถึง CTA

จากหลักการของ Decoupled Method เราสามารถ
รวมวงจรของระบบต่อลงดินที่แสดงในรูปที่ 5 เหลือวงจร
สมมูลที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ดังแสดงใน
รูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของระบบที่รวมวงจรแล้ว
จากรูปที่ 6 สามารถเขียนสมการ Node Equation ดัง

Node A $\frac{V_A}{1.0} + \frac{V_A - V_B}{0.45} = 814.4 \text{ A}$
 Node B $\frac{V_A - V_B}{0.45} - \frac{V_B}{2.5} + \left(\frac{V_C - V_B}{0.45}\right) = 0 \text{ A}$
 Node C $\frac{V_B - V_C}{0.45} + \left(\frac{V_D - V_C}{0.45}\right) - \frac{V_C}{2.5} = 0 \text{ A}$
 Node D $\frac{V_D - V_C}{0.45} + \frac{V_D}{2.6} + \frac{V_D}{2.6} + \frac{V_D}{2.6} + \frac{V_D}{1.25} = 2282.84 \text{ A}$
 Node E, F, H, $V_E = V_F = V_H = 0 \text{ A}$

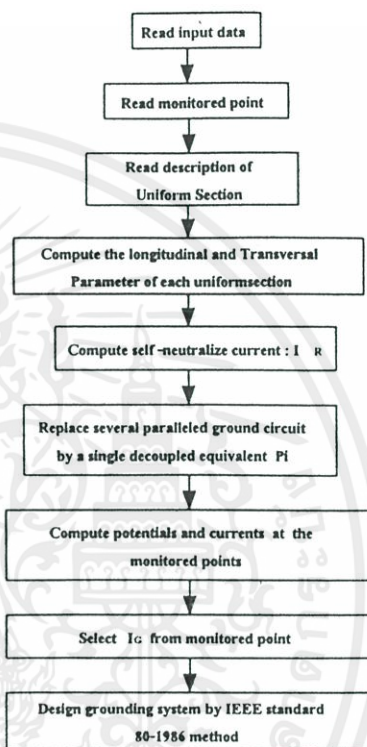
จากสมการทั้ง 4 เราจะได้ว่า

V_A	= -191.06	Volt
V_B	= 89.73	Volt
V_C	= 386.68	Volt
V_D	= 753.30	Volt

ดังนั้น ค่ากระแสกริดที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CTA)
สามารถคำนวณได้โดยคิดแรงดันที่เกิดขึ้นที่ CTAหารด้วย
ความต้านทานของระบบต่อลงดินของ CTA (R_x)

$$I_{GRID} = \frac{V_D}{R_x} = \frac{753.30}{1.25} = 602.64 \text{ Amp.}$$

จากค่า I_{GRID} ที่ได้สามารถนำไปคำนวณระบบต่อลง
ดิน โดยวิธี Simplify ตาม Standard 80/1986 [3] ขั้นตอนการ
คำนวณดังแสดงใน Flow chart รูปที่ 7



รูปที่ 7 Flow chart for Decoupling Method

ค่ากระแสกริดที่คำนวณได้นี้ เมื่อเทียบกับกระแสลัด
วงจรสูงสุดคิดเป็นสัดส่วนที่ลดลงดังนี้
 $I_{grid} / I_{Fault} = 602.64 / 2,204.44 = 27.33\%$
แสดงให้เห็นว่ากระแสกริดที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อ
ระบบต่อลงดินภายนอกที่มาเชื่อมต่อโดยตรง

4. เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้

จากวงจรระบบจำหน่ายในรูปที่ 4 นำไปหาค่า
กระแสกริดที่เกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าจันทบุรี (CTA) โดยวิธี
การใช้กราฟ [4] ซึ่งมีเงื่อนไขภายใต้ขอบเขตที่จำกัด จาก
กราฟรูปที่ 8 กำหนดให้อิมพีแดนซ์ของเสาส่งไฟฟ้า 15
โอห์ม, อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าในแต่ละ feeder ไม่เกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารูปที่ 8 กำหนดให้อิมพีแดนซ์ของเสาส่งไฟฟ้า 15 โอห์ม, อิมพีแดนซ์ของสายส่งไฟฟ้าในแต่ละ feeder ไม่เกิน

25 โอห์ม, และมีวงจรจำหน่ายด้านแรงดัน 22 kV เท่ากับ 4 Line อ่อนค่าที่ $R_g = 1.25$ โอห์ม จะได้ค่า $I_{grid} / I_{fault} = 22\%$ ซึ่งแตกต่างจากวิธี Decouple อยู่ 19.50%

กระแสลัดวงจรสูงสุดในการออกแบบซึ่งในกรณีของสถานีไฟฟ้าจันทบุรีนี้จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า 70% และยังคงอยู่ในขอบเขตความปลอดภัยสูงสุด

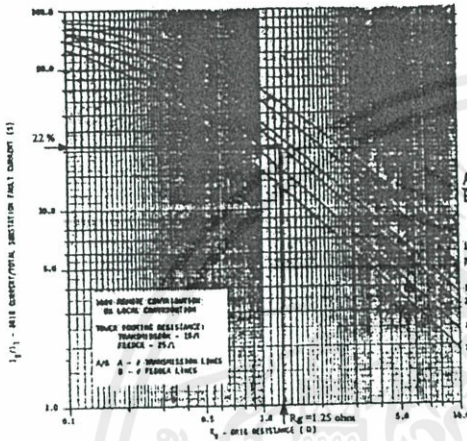


Figure 2. Percent grid current versus substation grid resistance.

รูปที่ 8 การหาค่ากระแสกริดโดยวิธีใช้กราฟ [4]

5.สรุป

การคำนวณหาค่ากระแสกริดโดยวิธี Decoupled นี้เป็นวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน อาศัยการรวมวงจรให้ได้วงจรสมมูลที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนเดิม ทำให้ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนน้อย ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสกริดที่คำนวณได้จะได้อัตราที่ละเอียด และสามารถประยุกต์ใช้กับระบบต่อลงดินได้ทุกกรณี ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีการใช้กราฟ(4) ซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตที่จำกัด และต้องมีเงื่อนไขตรงตามคุณสมบัติของกราฟแต่ละชนิดที่ระบุไว้เท่านั้น

ค่ากระแสกริดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยจะเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณหาความปลอดภัยของระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า ให้ได้ระบบต่อลงดินที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อลงดินของ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.T. Sobal, V. Fleury, J.R. Villalva, D. Muhedkar "Decoupled method for studying large interconnected grounding systems using microcomputers Part I : Fundamentals," IEEE Trans. Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988.
- [2] ข้อมูลระบบสายส่งและรายการคำนวณกระแสลัดวงจร, กองออกแบบระบบสายส่งและสถานีไฟฟ้าย่อย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- [3] "IEEE guide for safety in AC Substation grounding" ANSI/IEEE STD 80-1986
- [4] D.L. Garrett, J.G. Myers, S.G. Petal, "Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current Using Graphical Analysis," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.2, July 1987.

เอกสารนี้เป็นของลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติมต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอนุพงษ์ พงษ์ศิริพานิช เกิดเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2505 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2528

ปี พ.ศ.2529-2531 ทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้าที่บริษัท ศรีอุทอง จำกัด รับผิดชอบออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดแรงดัน 230 kV และระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ปี พ.ศ. 2532-2539 ทำงานออกแบบระบบไฟฟ้าและควบคุมงานก่อสร้าง ที่บริษัท A49 Engineering Consultant จำกัด และบริษัท เดคโค เอ็นจิเนียริง แอนท์ คอนซัลแทนท์ จำกัด

ปี พ.ศ.2540 จนถึงปัจจุบัน ทำงานที่บริษัท ศรีอุทอง จำกัด ตำแหน่งผู้จัดการโครงการ มีหน้าที่บริหารและควบคุมการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารต่าง ๆ มีดังนี้

- “การออกแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยใช้หลักการกระจายกระแสที่ไม่สมมาตร”
วารสารลาดกระบัง, ปีที่ 8 ฉบับที่ 1, มิถุนายน 2529
- “การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าที่เชื่อมโยงถึงกัน”
วารสารลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้