

การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน
ระดับพิกัด 24-69 กิโลโวลต์ โดยใช้คอมพิวเตอร์

DESIGN AND ANALYSIS FOR UNDERGROUND CABLE SYSTEM
RATING 24-69 kV USING COMPUTER

พิชัย ธีรยาศิน
PISAN THIRAYASIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-642-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน
ระดับพิกัด 24-69 กิโลโวลต์ โดยใช้คอมพิวเตอร์

DESIGN AND ANALYSIS FOR UNDERGROUND CABLE SYSTEM
RATING 24-69 kV USING COMPUTER



พิสันท์ ธีรวาสิน

PISAN THIRAVASIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 34947
วัน, เดือน, ปี..... 8 ก.พ. 2543

ISBN 974-622-642-8

**DESIGN AND ANALYSIS FOR UNDERGROUND CABLE SYSTEM
RATING 24-69 kV USING COMPUTER**

PISAN THIRAVASIN

**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**

1999

ISBN 974-622-642-8

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน
	ระดับพิกัด 24-69 กิโลโวลต์ โดยใช้คอมพิวเตอร์
นักศึกษา	พิสิทธิ์ ธีรวิน
รหัสประจำตัว	40061051
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โพรวิเชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน ระดับพิกัด 24 – 69 kV โดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้ภาษาแคล์ไฟล์ในการเขียนโปรแกรม โดยจะทำการวิเคราะห์ลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆของสายเคเบิล ระดับแรงดันไฟฟ้า ภาวะโหลดทางไฟฟ้า ความยาวที่ใช้ในการติดตั้ง อุณหภูมิ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ความลึกของบ่อพักสายไฟฟ้า ลัมประสิทธิ์ความต้านทานดิน ชนิดของท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน และอื่น ๆ ที่มีผลกับขนาดของสายเคเบิลที่ใช้จนวนเป็นสาร XLPE และนำขนาดสายเคเบิลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่า แรงดึงที่ใช้ในการลากสายเคเบิล แรงกดจากผนังท่อ เพลอร์เซนต์คอนกรีตฟิล การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ และระยะปลอดภัย รวมทั้งยังศึกษาลักษณะแรงดันเสริมเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีที่เกิดจากฟ้าผ่าที่สายเดินอากาศโดยตรง และกรณีที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดิน แล้วนำมาวิเคราะห์หาลักษณะรูปคลื่นแรงดันเสริมและกระแสเสริมที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆทั้งในสายเดินในอากาศและสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและช่วยในการตัดสินใจเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันเสริม นอกจากนี้ยังศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของสาย, แรงดึงในการลากสายรวมทั้งขนาดแรงดันและกระแสเสริมของสายเคเบิลใต้ดิน โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบตารางและกราฟ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิศวกรผู้ออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน และยังช่วยลดข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความเสียหาย การสิ้นเปลืองวัสดุ อุปกรณ์ เวลา และค่าใช้จ่ายในการออกแบบเป็นอย่างมาก รวมทั้งเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลยาวนานขึ้น

Thesis Title	Design and Analysis for Under Ground Cable System Rating 24-69 kV Using Computer
Student	Mr. Pisan Thiravasin
Student ID.	40061051
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis proposes the design and analysis of the underground cable distribution system rating 24 – 69 kV by computer. Delphi program was used as a tool to analysis. The program can separate the characteristic which the diameter of XLPE insulating cable such as voltage level, electrical load, the length of installation, temperature, power factor, the height of man hole, co-efficiency of ground resistance, type of duct bank, and so on. After that, the selected sizes of cable have to be investigated for the appropriate tension to pull the cable, side wall pressure, percent conduit fill, jamming and clearance. Also, the characteristic of surge voltage and surge current wave form which take place both direct over head wire and neighbor over head wire influencing underground cable are studied. This is useful for providing lightning surge protection. In addition, the influence of current flow in cable, tension, surge voltage and surge current and so on are displayed in text and graph. These significantly are advantages for the electrical engineers who design the distribution system of underground wire. Furthermore, this can mainly reduce the errors which destroy system and cause higher losses of components, as well as decline the developed time of underground cable installation. Hence, the life of cable is considerably longer.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆและรุ่นน้องทุกคนที่ช่วยเหลือทางด้านข้อมูลและคำแนะนำต่างๆจนสำเร็จ สมบูรณ์

พิศมภ์ ธิรวสิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	3
บทที่ 2 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน	4
2.1 สายไฟฟ้าใต้ดิน	4
2.1.1 ประเภทของสายไฟฟ้าใต้ดิน	4
2.1.2 โครงสร้าง และส่วนประกอบหลักของสายเคเบิลใต้ดิน	7
2.2 ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน	9
2.2.1 ชนิดของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน	9
2.3 บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน	11
2.3.1 หน้าที่ของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน	12
2.4 หัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน	12
2.4.1 การต่อสายเคเบิล	12
2.4.2 ส่วนประกอบของหัวต่อ (แบบพันเทป)	13
2.5 หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน	14
2.5.1 ชนิดของหัวสายไฟฟ้าใต้ดิน	14
2.5.2 ส่วนประกอบของหัวสายไฟฟ้า	16
2.6 ไรเซอร์โพล	17
2.7 การติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดิน	18
2.7.1 การวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต	18
2.7.2 ความสามารถในการส่งและจ่ายพลังงานไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน	18
2.8 การลากสายไฟฟ้าใต้ดิน	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การคำนวณหาพิกัดขนาดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน	22
3.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำ	24
3.1.1 ความต้านทานไฟกระแสตรง	24
3.1.2 ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว	25
3.1.3 ผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด	25
3.2 ค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล	26
3.3 ตัวประกอบความสูญเสียกำลังในซีท และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน	26
3.3.1 สายแกนเดี่ยว 2 เส้น และ 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์และมีการสลับสาย.....	27
3.3.2 สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสอง ลงกราวด์และมีการสลับสาย	27
3.3.3 สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสอง ลงกราวด์และไม่มีการสลับสาย	27
3.3.4 สายแกนเดี่ยว 1 เส้น มีการต่อซีทลงกราวด์ และที่จุดปลายมีการ สลับสาย	29
3.4 ค่าตัวประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเครื่องห่อหุ้ม	30
3.4.1 สายเคเบิลตัวนำแบบกลม	30
3.4.2 สายเคเบิลตัวนำแบบเซกเตอร์	31
3.5 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน	31
3.5.1 ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีท	31
3.5.2 ความต้านทานความร้อนระหว่างซีทกับเครื่องห่อหุ้ม	32
3.5.3 ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล	32
3.5.4 ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวฉนวนเปลือกนอกของสายถึง ผิวพื้นดิน	32
3.6 การคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า	34
บทที่ 4 การคำนวณค่าในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน	35
4.1 แรงดึง	36
4.1.1 แรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของสายเคเบิล	36
4.1.2 แรงดึงตามลักษณะแนวการดึง	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 แรงกคกับผนังท่อ	40
4.3 เปอร์เซนต์คอนคุดพิล	42
4.4 การเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อ	43
4.5 ระยะปลอดภัย	44
บทที่ 5 การวิเคราะห์แรงดันเสีร้ง และกระแสเสีร้ง	45
5.1 ลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า	45
5.1.1 โหมคของการกระจาย	45
5.2 แรงดันเสีร้งที่เกิดจากฟ้าผ่าที่สายเคเบิลในอากาศโดยตรง	46
5.2.1 แรงดันเสีร้ง และกระแสเสีร้งในสายเคเบิลในอากาศ	48
5.2.2 แรงดันเสีร้ง และกระแสเสีร้งในสายเคเบิลใต้ดิน	51
5.3 แรงดันเสีร้งที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียง	51
5.3.1 แรงดันเสีร้ง และกระแสเสีร้งในสายเคเบิลในอากาศ	51
5.3.2 แรงดันเสีร้ง และกระแสเสีร้งในสายเคเบิลใต้ดิน	55
บทที่ 6 โฟล์วชาร์ต และผลการทำงานของโปรแกรม	57
6.1 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรม.....	57
6.1.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก	57
6.1.2 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล	59
6.1.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดึง และขนาดท่อ	62
6.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเสีร้ง และกระแสเสีร้ง	63
6.2 ผลการทำงานของโปรแกรม	65
6.3 ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดิน	76
6.3.1 การคำนวณหาขนาดของสาย และค่าพารามิเตอร์ของสาย	76
6.3.2 การคำนวณหาค่าแรงดึงของสาย และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้ง	81
6.4 การเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลของโปรแกรม.....	84
บทที่ 7 วิเคราะห์ และบทสรุป	86
7.1 วิเคราะห์ผล.....	86
7.1.1 ผลของการติดตั้งที่มีต่อการนำกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน	86
7.1.2 ผลของการติดตั้งที่มีต่อค่าแรงดึงของสายเคเบิลใต้ดิน	89
7.1.3 ผลของฟ้าผ่าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินในกรณีต่าง ๆ	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.2 สรุปผล	100
7.3 ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารอ้างอิง	102
ประวัติผู้เขียน	105

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่	
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของท่อชนิดต่าง ๆ 10
2.2	ความสามารถในการนำกระแส และกำลังไฟฟ้าของสายป้อนใต้ดินชนิดฉนวน ในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต.....19
2.3	ความสามารถในการส่งพลังงานไฟฟ้าของสายส่งใต้ดิน20
3.1	ค่าคงที่ของตัวแปร U , V และ Y33
4.1	ค่าความเค้นสูงสุดของตัวนำที่ยอมได้36
4.2	สัมประสิทธิ์ความเสียหาย 38
4.3	ค่าแรงกดกับผนังท่อสูงสุดที่แนะนำ40
4.4	ข้อมูลของท่อเหล็ก42
4.5	รัศมีท่อโค้ง43
5.1	ค่าคงที่สำหรับแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบต่าง ๆ47
7.1	บันทึกผลค่ากระแสจากการวางสายแบบ Trefoil86
7.2	บันทึกผลค่ากระแสจากการวางสายแบบ Flat86
7.3	บันทึกผลค่ากระแสโดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของดิน87
7.4	บันทึกผลค่ากระแสโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานความร้อนของดิน88
7.5	บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อระยะทาง89
7.6	บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อความโค้งของท่อ90
7.7	บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อขนาดของท่อ91
7.8	บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อขนาดของสาย92
7.9	บันทึกผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ93
7.10	บันทึกผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่พิกัดแรงดัน94
7.11	บันทึกผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ขนาดต่าง ๆ95
7.12	ผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่พิกัดแรงดันต่าง ๆ96
7.13	ตารางบันทึกผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ97

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1	โครงสร้างของสายเคเบิลฉนวนของแข็ง	7
2.2	ทางเดินต่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน	9
2.3	ลักษณะของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน	11
2.4	ลักษณะหัวต่อสายไฟฟ้าแบบเทปสำหรับสาย XLPE ตัวนำทองแดงขนาด 69 kV	13
2.5	ลักษณะหัวสายไฟฟ้าใต้ดินแบบพอลิเอทิลีนสำหรับสาย XLPE ตัวนำทองแดงขนาด 69 kV ...	15
2.6	ลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์โพท	17
	(ก) ภาพตัดด้านหน้า	
	(ข) ภาพตัดด้านข้าง	
2.7	ต่อร้อยสายเคเบิลใต้ดินหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก	19
2.8	การลากสายเคเบิลใต้ดิน	21
3.1	วงจรมุมลัดของสายเคเบิลชนิด 1 แกน	22
3.2	วงจรมุมลัดของสายเคเบิลชนิด 3 แกน	23
3.3	(ก) การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม	24
	(ข) การวางสายเคเบิลแบบราบ	
4.1	ลักษณะการจัดวางสายเคเบิล	39
4.2	โครงร่างลักษณะการจัดวางตัวนำ 3 เฟส สาย 3 เส้น ในท่อเดียวกัน	39
4.3	ลักษณะของแรงกดกับผนังท่อที่เกิดขึ้น	41
5.1	สภาวะของโหมดการกระจายของสายสามเฟส	46
5.2	การต่อสายดินในอากาศ และสายเคเบิลใต้ดินเข้าด้วยกัน	47
5.3	กระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแยกไหลไปสองทิศทาง	48
5.4	ตำแหน่งโคออดิเนตของสายตัวนำ และลำฟ้าผ่า	52
5.5	ลักษณะรูปคลื่นลำฟ้าผ่าย้อนกลับในแบบสมการเชิงเส้น	52
5.6	การเดินทางของคลื่นในสายดินในอากาศ และสายเคเบิลใต้ดิน	55
6.1	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก	57
6.2	ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล	60
6.3	ขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดึง	62
6.4	ขั้นตอนการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเสถียร และกระแสเสถียร	64
6.5	โปรแกรมย่อยคำนวณหาค่าแรงดันเสถียร และกระแสเสถียรที่ระยะ X และเวลา t	66

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

6.6	หน้าจอแรกของโปรแกรม	66
6.7	รูปแบบหน้าจอของการออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินระดับพิักัด 24-69 กิโลโวลต์ โดยใช้คอมพิวเตอร์	67
6.8	การเลือกบริษัทผู้ผลิตสาย ระดับแรงดันไฟฟ้า และลักษณะของสายเคเบิลใต้ดิน	67
6.9	รับค่าข้อมูลต่างๆ เพื่อนำไฟคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล	68
6.10	เลือกตำแหน่งและลักษณะการวางสายในท่อร้อยสายไฟฟ้า	69
6.11	รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้	69
6.12	แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในลักษณะของวงจรมูลย์ของระบบ	70
6.13	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการติดตั้ง	70
6.14	เลือกขนาดของท่อ	71
6.15	การจัดวางแนวการเดินทางสายเคเบิล และการป้อนค่าระยะทาง	71
6.16	แสดงค่าที่คำนวณได้	72
6.17	ป้อนค่าของสายเดินในอากาศ	72
6.18	เลือกลักษณะการวางสายเดินในอากาศ	73
6.19	ป้อนค่าระยะห่าง และความสูงของเสา	73
6.20	ส่วนรับค่าของฟ้าผ่ากรณีโดยตรง และกรณีใกล้เคียง	74
6.21	เลือกการจำลองรูปคลื่นฟ้าผ่า	74
6.22	ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบนสายเดินในอากาศโดยตรง	75
6.23	ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับสายเดินในอากาศ	75
6.24	ลักษณะแนวการเดินทางสายในท่อร้อยสายไฟฟ้า	81
6.25	การเริ่มต้นเข้าเมนูเพื่อเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูล	84
6.26	เข้าสู่ตารางในฐานข้อมูล	85
6.27	การเปลี่ยนแปลงข้อมูลในฐานข้อมูล	85
7.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับความถี่ในการติดตั้ง	87
7.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับอุณหภูมิของดินโดยรอบ	88
7.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับความต้านทานความร้อนของดิน	89
7.4	กราฟความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสาย	90
7.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและแรงอัดที่ผนังท่อกับมุมโค้งของท่อ	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลกับแรงดึง92
7.7	กราฟความสัมพันธ์ของขนาดท่อกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสาย93
7.8	กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลได้ดินที่ตำแหน่งต่าง ๆ94
7.9	กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับระยะห่างของสายจากจุดที่เกิดฟ้าผ่า95
7.10	กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลกับพื้นที่หน้าตัด96
7.11	กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลกับระดับแรงดันพิกัด97
7.12	กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลกับลักษณะการวางสาย98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันเมืองใหญ่ และเขตอุตสาหกรรมต่างๆ มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากสภาพภูมิทัศน์ และสภาพของพื้นที่มีข้อจำกัดค่อนข้างมาก การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเก่า คือแบบเดินในอากาศ (Overhead System) จึงเป็นอุปสรรคต่อการเพิ่มความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงได้มีการปรับเปลี่ยนระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใหม่ โดยใช้ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground System) แทนเสาหตุ และอุปสรรคในการเปลี่ยนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเดิมมาเป็นแบบใหม่นี้ สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

- 1) พื้นที่ในการปักเสาพาดสายมีไม่เพียงพอ
- 2) ระยะปลอดภัย (Clearance) ของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเดินในอากาศระหว่างสายกับสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ มีไม่เพียงพอ ดังนั้นหากทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเดินในอากาศจะเป็นอันตรายต่อผู้ที่อยู่ใกล้กับสายเดินในอากาศเป็นอย่างมาก
- 3) บางพื้นที่เป็นย่านชุมชน หรือแหล่งธุรกิจท่องเที่ยว ดังนั้นจะทำให้ทัศนียภาพไม่น่ามอง
- 4) ในย่านธุรกิจบางส่วนจะได้รับความเสียหายเป็นอย่างมากเมื่อระบบไฟฟ้าขัดข้องบ่อยๆ ดังนั้นจึงต้องการระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความน่าเชื่อถือมาก นั่นก็คือระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน
- 5) ในบางกรณีไม่มีระยะปลอดภัยเพียงพอที่จะเดินสายไฟฟ้าลอด หรือข้ามทางด่วน สะพาน หรือระบบขนส่งมวลชน
- 6) ในบางพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบเดินในอากาศกับเดินแบบใต้ดินแล้ว การเดินแบบสายใต้ดินจะมีราคาถูกกว่า เช่นการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปตามแม่น้ำลำคลองที่คดเคี้ยวนั้นต้องใช้เสาโครงสร้าง และทำฐานเสาที่แข็งแรงมาก จึงทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างสูงกว่าการเดินแบบสายไฟฟ้าใต้ดิน

จากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นทำให้การติดตั้งระบบไฟฟ้าใต้ดินได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อย ๆ ถึงแม้ว่าราคาค่าก่อสร้างระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินโดยทั่วไปนั้นจะมีราคาแพงกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบเดินในอากาศประมาณ 8-12 เท่า ก็ตาม และเนื่องจากในการออกแบบ และวิเคราะห์คุณสมบัติลักษณะการติดตั้งระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนเป็นอย่างมาก รวมทั้งข้อมูลที่

ใช้อ้างอิง และสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น การคำนวณค่าของระดับแรงดันไฟฟ้า ปริมาณการไหลของพลังงานไฟฟ้า คุณสมบัติของสายเคเบิล และลักษณะการติดตั้ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงสภาพของสถานที่จริงที่จะทำการติดตั้ง และในขณะเดียวกันก็ต้องคำนึงถึงผลของฟ้าผ่า (Lightning Surge) ในสายเคเบิลในอากาศ ซึ่งเกิดจากทั้งในกรณีฟ้าผ่าที่สายเคเบิลในอากาศโดยตรง และฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียงกับสายเคเบิลในอากาศที่มีผลกระทบต่อความเป็นฉนวนของสารฉนวน (Insulator) ของสายใต้ดิน ยิ่งไปกว่านั้นการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินจะต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ และคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน เช่นมาตรฐาน IEC 287, IEEE 525 เป็นต้น จากรายละเอียดทั้งหมดที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นจึงเป็นเหตุผลให้การออกแบบ และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยมือโดยใช้เครื่องคำนวณแบบที่ทำกันทั่ว ๆ ไปต้องใช้เวลาอย่างมาก และเสียเวลาในการตรวจสอบผลที่ได้ในลักษณะที่เป็นขั้นตอนเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง ดังนั้นอาจจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการออกแบบได้ง่าย เนื่องจากการทำการคำนวณหลาย ๆ ขั้นตอนพร้อมกันกับการค้นหาข้อมูลที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก และยังคงต้องทำการคำนวณรอบหลาย ๆ ครั้ง ดังนั้นวิธีการ และลักษณะการคำนวณแบบนี้จึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการเขียนโปรแกรมช่วยในการออกแบบ คำนวณ และวิเคราะห์ ซึ่งเป็นผลให้ประหยัดเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบ ลดข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากการคำนวณ และช่วยในการวิเคราะห์ผลของข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้ รวมทั้งสามารถช่วยในการหาข้อสรุปต่าง ๆ ก่อนทำการติดตั้งจริง นอกจากนี้ผลการออกแบบ และวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะคุณสมบัติของการติดตั้งระบบสายใต้ดินจริงของการไฟฟ้านครหลวง เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานหลัก และใช้ในการตรวจสอบผลการทำงานของโปรแกรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อ

- 1) ศึกษาระบบการทำงานทั้งหมดของสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบดินสายใต้ดิน
- 2) ศึกษาวิธีการติดตั้งระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน
- 3) คำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำในสายเคเบิลใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับผลกระทบของอุณหภูมิ ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) และผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity Effect)
- 4) คำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียในฉนวนของสายเคเบิล
- 5) คำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน และที่เกิดจากกระแสเอ็ดดี้ในฉนวนเนื่องมาจากการต่อขั้วลงกราวด์ในลักษณะต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อสายเคเบิลใต้ดิน

- 6) คำนวณหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Resistance) ที่ลำดับชั้นต่างๆของสายเคเบิล ที่ระหว่างสายเคเบิลได้ดินกับท่อ และที่ระหว่างท่อกับดินที่มีผลกระทบต่อสายเคเบิลได้ดิน
- 7) คำนวณหาค่ากระแสในสายเคเบิลได้ดินที่ค่าตัวประกอบภาระโหลด 100% (100% Load Factor)
- 8) คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในสายเคเบิล และประสิทธิภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ในกรณีที่ทราบปริมาณภาระโหลดที่ต้องการใช้ และกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าไว้เรียบร้อยแล้ว
- 9) ศึกษาผลของแรงดึง (Tension) ที่ใช้ในการลากสายเคเบิล แรงกดจากผนังท่อ (Side Wall Pressure) คอนดุกทิล (Conduit Fill) การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ (Jamming) และระยะปลอดภัย (Clearance) ที่มีผลกระทบต่อสายเคเบิลได้ดิน
- 10) ศึกษาลักษณะของชนิดสายเคเบิล ชนิดท่อ และขนาดของท่อที่มีผลต่อค่าแรงดึง
- 11) คำนวณหาค่าแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ในสายเคเบิลในอากาศที่มีผลกระทบต่อฉนวนของสายเคเบิลได้ดิน
- 12) หาลักษณะรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลได้ดินที่ตำแหน่ง และเวลาต่างๆ
- 13) นำไมโครคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ออกแบบ และวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ของการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบเดินสายได้ดิน รวมทั้งทำการแสดงผลการวิเคราะห์ และข้อมูลที่ได้จากการออกแบบทั้งหมดในรูปแบบข้อความ รูปภาพ และกราฟ

1.3 ขอบเขตโครงการงาน

- 1) เขียนโปรแกรมออกแบบระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเดินสายไฟฟ้าได้ดิน โดยยึดตามลักษณะการออกแบบ และการติดตั้งที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานของการไฟฟ้าานครหลวง คือ 12 kV, 24 kV และ 69 kV ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 287 และ IEEE 525
- 2) วิเคราะห์หาค่ากระแสสูงสุดที่สายเคเบิลได้ดินตามที่ได้ออกแบบไว้ในข้อ 1) สามารถทนได้ โดยวิเคราะห์เฉพาะในกรณีของสายเคเบิลได้ดินเป็นสายชนิดแกนเดี่ยว (Single Core Cable) และชนิดของสารฉนวนเป็นสารประเภทครอสลิงก์โพลีเอทิลีน (Cross Link Polyethylene : XLPE)

- 3) วิเคราะห์ผลของแรงดึงที่ใช้ในการลากสายเคเบิล แรงกดจากผนังท่อ เปอร์เซ็นต์คอนคันทิล การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ และระยะปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อสายเคเบิลใต้ดิน
- 4) วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่าที่มีต่อสายเคเบิลในอากาศ ซึ่งเชื่อมต่อกับสายเคเบิลใต้ดิน ทั้งในกรณีฟ้าผ่าโดยตรงที่สายเคเบิลในอากาศ และในกรณีที่ฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียงกับสายเคเบิลในอากาศ โดยพิจารณาในกรณีที่ไม่มีมาตรการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า เช่นกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) และสายกราวด์ดินในอากาศ (Over Ground Wire) เป็นต้น
- 5) วิเคราะห์หาค่าของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน ที่ตำแหน่ง และเวลาต่าง ๆ และลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ ในสายเคเบิลในอากาศที่ส่งผลกระทบต่อฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน
- 6) ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาเดลไฟ (Delphi) เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลการคำนวณต่าง ๆ รวมทั้งแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบข้อความ รูปภาพ และกราฟ

บทที่ 2

ส่วนประกอบสำคัญของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน

2.1 สายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable)

สายเคเบิลใต้ดินนั้นมีข้อแตกต่างไปจากสายเดินในอากาศในด้านการฉนวน กล่าวคือสายเคเบิลใต้ดินต้องได้รับการฉนวนทางไฟฟ้า (Electrical Insulation) ให้เพียงพอ เพื่อป้องกันตัวนำสัมผัสกับดิน หรือชิลด์ที่อยู่ภายนอก (External Shield) ของสายเคเบิลเอง นอกจากนี้ฉนวนยังต้องป้องกันตัวนำจากแรงทางกล ปฏิกิริยาเคมี และผลกระทบอื่นๆ ที่เป็นอันตรายต่อตัวนำ ดังนั้นเมื่อมีการฉนวนที่ดีก็ทำให้มีความมั่นใจถึงความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

2.1.1 ประเภทของสายไฟฟ้าใต้ดิน [6], [9]

สามารถแบ่งตามลักษณะต่าง ๆ ออกเป็น 3 ชนิด

2.1.1.1 แบ่งตามชนิดของสารฉนวนที่ใช้

สายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งชนิดได้ตามการฉนวนได้ 3 ชนิด คือ

- สายเคเบิลฉนวนกระดาษบรรจุน้ำมัน (Paper-Insulated with Oil-Fukked Cable) โดยทั่วไปมักจะนำมาใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันสูงขนาด 230 kV ในชั้นของฉนวนทำด้วยกระดาษชุบน้ำมัน (Oil Impregnated Paper) และจุดศูนย์กลางของสายเคเบิลในชั้นตัวนำจะเป็นช่องทางของน้ำมัน (Oil Duct)

- สายเคเบิลฉนวนของแข็ง (Solid Dielectric Cable) โดยทั่วไปจะนำมาใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่อยที่ระดับแรงดัน 115 kV และ 69 kV รวมทั้งในระบบแรงดันปานกลาง คือ 12 kV, 22 kV, 24 kV และ 33 kV รวมทั้งระบบจำหน่ายแรงดันต่ำด้วย ในชั้นของฉนวนทำมาจากสารโพลิเมอร์ (Polymer) ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ครอสลิงก์โพลิเอทิลีน (Crosslink Polyethylene : XLPE) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีความเป็นฉนวนสูง ค่าความเครียดฉนวนสูง ค่าคงที่ความเป็นฉนวนต่ำที่ทุกย่านความถี่ มีความทนทานต่อความชื้น ทนทานต่อการขูดขีดลากถู ทนทานต่อแสงแดด สารเคมี เปลวไฟ และสภาพลมฟ้าอากาศแบบต่าง ๆ รวมทั้งสามารถอ่อนตัวโค้งตัวได้แม้อุณหภูมิต่ำ ๆ ถึง 10 องศาเซลเซียส ปัจจุบันนี้สายเคเบิลฉนวนของแข็งได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้งานในระดับแรงดันสูงแล้ว

- สายเคเบิลฉนวนก๊าซ (Gas Filled Cable) ได้แก่ สายที่มีฉนวนเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งอื่น (Inert Gas) เช่นก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) ซึ่งสามารถแยกตามลักษณะของความดันเป็นความดันต่ำ ความดันปานกลาง และความดันสูง

2.1.1.2 แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

- Direct Burial Cable เป็นสายพวงที่ติดตั้งใต้ดินโดยตรง สายใต้ดินประเภทนี้จะมีเครื่องห่อหุ้ม (Armour) เพื่อใช้เป็นเครื่องป้องกันทางกล ในการติดตั้งใช้วางลงไปโดยไม่ต้องมีการดึงหรือลากสาย การติดตั้งสายแบบนี้มีข้อเสียคือหากเกิดความผิดปกติ (Fault) ได้ยาก การแก้ไขซ่อมแซมต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง

- Conduit หรือ Duct Cable เป็นสายที่ใช้ติดตั้งอยู่ภายในท่อสำหรับร้อยสาย ในการติดตั้งต้องมีการดึงหรือลาก ดังนั้นโครงสร้างของสายต้องทนต่อการดึงหรือลากได้ ข้อดีของการติดตั้งแบบนี้คือสามารถหากเกิดความผิดปกติได้ง่าย การแก้ไขซ่อมแซมระบบทำได้ง่ายกว่าแบบแรก และเมื่อต้องการขยายระบบสามารถทำได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือต้องใช้การลงทุนสูงมาก

- Submarine Cable เป็นสายที่ใช้ติดตั้งในการข้ามแม่น้ำ, ข้ามช่องแคบในทะเล เป็นสายที่มีเครื่องห่อหุ้มซึ่งต้องรับแรงดึง และต้องทนต่อการถูกร่อนได้ สายชนิดนี้มีขนาดช่วงสายยาวมาก ไม่นิยมม้วนในโรล (Roll) เพราะเวลาติดตั้งปลายสายด้านในโรลจะถอยออกมา จึงนิยมขดเป็นวงในโรลหรือเรือแทนแล้วนำไปติดตั้งเลย

- Pipe Type Cable เป็นสายประเภทที่ต้องทำซีทโลหะหุ้ม ดังนั้นจึงนำเอาโลหะที่จะทำเป็นซีทมาทำเป็นท่อ และวางแทนท่อ การวาง และการเชื่อมต่อกันต้องทำอย่างดี โดยต้องไม่ให้มีรอยรั่วของสายตลอดแนวสายเลย เพื่อให้สามารถทนแรงดัน และแรงกระทำอื่นๆ ได้ หลังจากนั้นนำสายที่มีฉนวนหุ้มและมีเครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Shield) ลากเข้าไป เมื่อร้อยร้อยก็ใส่ น้ำมันฉนวน (Insulation Oil) หรือก๊าซเข้าไป และทำการปรับค่าความดันให้ได้ค่าความดันตามมาตรฐานกำหนด

2.1.1.3 แบ่งตามจำนวนตัวนำที่มีอยู่ในเคเบิลแต่ละเส้น

- Single Core Cable (1/C) หมายถึงสายเคเบิลที่มีตัวนำ พร้อมกับสารฉนวนอยู่ 1 เส้น สามารถใช้เดินสายไฟฟ้าได้เพียง 1 เฟส เท่านั้น

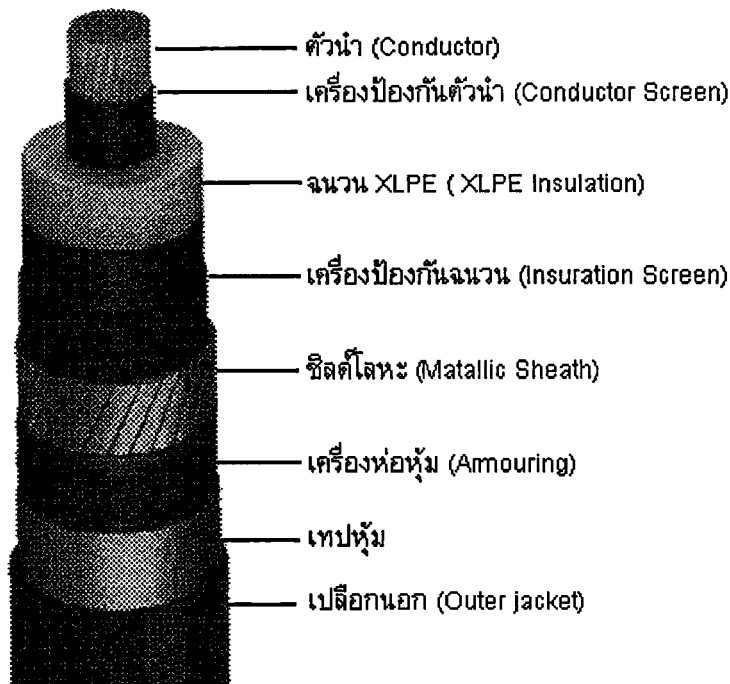
- Two Core Cable (2/C) หมายถึงสายเคเบิลที่มีตัวนำ พร้อมกับสารฉนวนอยู่ 2 เส้น และใช้เดินสายไฟฟ้าสำหรับระบบไฟ 1 เฟส

- Three Core Cable (3/C) หมายถึงสายเคเบิลที่มีตัวนำ พร้อมกับสารฉนวนอยู่ 3 เส้น และใช้เดินสายไฟฟ้าสำหรับระบบไฟ 3 เฟส ได้

- Four Core Cable (4/C) หรือมากกว่า สายประเภทนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวมาสำหรับสายที่มีแท่งตัวนำมากกว่า 4/C นั้น ส่วนมากมักไม่ถูกนำไปใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แต่มักจะนิยมนำไปใช้งานเป็นสายควบคุม หรือสายสัญญาณ

2.1.2 โครงสร้าง และส่วนประกอบหลักของสายเคเบิลใต้ดิน [2], [6]

สายเคเบิลใต้ดินที่นำมาใช้งานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ แรงดันไฟฟ้าปานกลาง และแรงดันไฟฟ้าสูง มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยจำนวนชั้น (Layer) ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละชั้นเมื่อเริ่มต้นจากศูนย์กลางของสายเคเบิลมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลฉนวนของแข็ง

2.1.2.1 ตัวนำ (Conductor)

ตัวนำผลิตจากทั้งทองแดง และอลูมิเนียม โดยมีหน้าที่ในการนำกระแสไฟฟ้า โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวนำจะมีทั้งสายตัวนำเส้นเดียว สายตัวนำตีเกลียว หรือตัวนำชกเมนต์ สำหรับสายเคเบิลหนึ่งเส้นอาจแบ่งเป็นสายเคเบิลตัวนำแกนเดียว (Single Core Cable) หรือสายเคเบิลตัวนำ 3 แกน (Three Core Cable) ก็ได้ ตัวนำอลูมิเนียมมีราคาค่อนข้างถูกกว่าทองแดง คุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าประมาณ 60% ของทองแดง และมีความสามารถในการจ่ายกระแส (Current Carrying Capacity) หรือเป็นทางเดินให้กระแสผ่านประมาณ 75% ของทองแดง ในทางปฏิบัติการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) จะใช้เฉพาะสายเคเบิลตัวนำผลิตจากทองแดงชนิดแกนเดียว

2.1.2.2 เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor Screen)

ส่วนประกอบชั้นนี้ถ้าเป็นสายเคเบิลฉนวนกระดาษ เครื่องป้องกันตัวนำจะทำมาจากกระดาษ แต่ถ้าเป็นสายเคเบิลฉนวน XLPE เครื่องป้องกันตัวนำจะทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์นำกระแส (Conductive Polymer Material) ซึ่งจัดว่าเป็นสารกึ่งตัวนำ เครื่องป้องกันตัวนำนี้จะเคลือบบนผิว

นอกสุดของลวดทองแดงที่เคลือบด้วยที่ใช้เป็นตัวนำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแตกตัวของอากาศในช่องว่างดังกล่าวเมื่อสายเคเบิลได้รับแรงดันสูง ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ตัวนำเสียหายได้ ดังนั้นสายเคเบิลใต้ดินประเภทสายแกนเดี่ยวที่นำมาใช้กับแรงดันมากกว่า 2 kV หรือสายหลายแกนที่นำมาใช้กับแรงดันมากกว่า 5 kV จึงต้องมีชั้นเครื่องป้องกันตัวนำ

2.1.2.3 ฉนวน (Insulation)

ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินสามารถผลิตจากยาง (Rubber) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride: PVC) ครอสลิงก์โพลีเอทิลีน (XLPE) หรือกระดาษชุบน้ำมัน ชั้นฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินต้องมีคุณสมบัติทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ผิวของฉนวนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่สุดคือวัสดุที่ทำฉนวนต้องเป็นสารเนื้อเดียวกัน และต้องปราศจากสารเจือปนเพื่อป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) และการเจาะทะลุ (Puncturing) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายเคเบิลใต้ดินได้รับความเสียหายจนไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้

2.1.2.4 เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Screen)

สำหรับหน้าที่ และวัสดุที่ใช้ทำเครื่องป้องกันฉนวนมีคุณสมบัติ และลักษณะเดียวกันกับเครื่องป้องกันตัวนำ โดยทั่วไปสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้งานกับแรงดันต่ำกว่า 5 kV ไม่จำเป็นต้องมีชั้นเครื่องป้องกันฉนวน

2.1.2.5 เครื่องป้องกันหรือชีลด์โลหะ (Screen or Metallic Sheath)

ทำมาจากทองแดง หรือตะกั่ว ที่นำมาประกอบขึ้นรูปเป็นลวด เทป หรือปลอกคลุม จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านสำหรับให้กระแสรั่วไหล (Leakage Current) ลงดิน และเป็นตัวนำสำหรับกระแสลัดวงจรไหลกลับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นสิ่งเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน โดยปกติสายเคเบิลฉนวนกระดาษจะใช้ชีลด์ในรูปปลอกตะกั่วคลุมตลอดความยาวของสายเคเบิลเพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปในฉนวน สำหรับชีลด์ของสายเคเบิลฉนวน XLPE ส่วนใหญ่จะเป็นลวดทองแดง และพันทับด้วยเทปทองแดง

2.1.2.6 เครื่องห่อหุ้ม (Armour)

บางครั้งจะใช้เครื่องห่อหุ้มเป็นชั้นต่อจากเครื่องป้องกัน หรือชีลด์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันแรงทางกล ความดัน หรือความเครียด (Stress) ต่างๆที่มากระทำต่อฉนวน หรือตัวนำของสายเคเบิลใต้ดิน เครื่องห่อหุ้มสามารถออกแบบได้หลายวิธี เช่น แบบแผ่นแถบ (Strips) หรือลวดกลม

2.1.2.7 เปลือกนอก หรือชีท (Outer Jacket or Sheath)

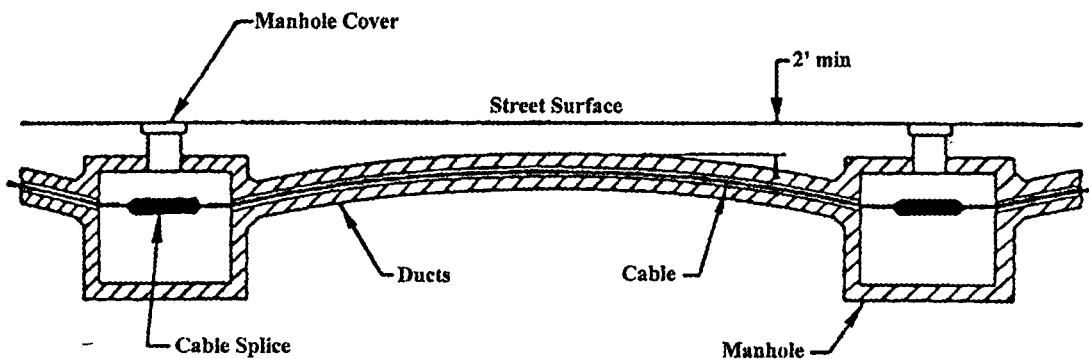
เป็นชั้นนอกสุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่ป้องกันแรงทางกล ความชื้น และการกัดกร่อน (Corrosion) ที่จะเกิดขึ้นกับสายเคเบิล เปลือกนอกผลิตจากพีวีซี หรือโพลีเอทิลีน (Polyethylene:

PE) สำหรับภายในของเปลือกบางครั้งอาจมีแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminium Foil) ติดอยู่เพื่อทำให้การป้องกันความชื้นมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2.2 ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (Duct or Duct Bank)

ในการก่อสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเดินสายใต้ดินเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟนั้น จะต้องก่อสร้างให้สายไฟฟ้าใต้ดินให้ปลอดภัยต่อคน สัตว์ และแก่สายเคเบิลเอง ดังนั้นจึงต้องวางหรือร้อยสายเคเบิลไว้ในท่อ (Duct Bank) ฝังไว้ใต้ดิน หรือไว้ที่ปลอดภัย

ทางเดินของท่อควรจะให้สั้นที่สุด และเป็นเส้นตรง ไปยังระหว่างบ่อพักเพื่อที่จะสะดวกในการร้อยสาย เมื่อเกิดกรณีที่ไม่สามารถทำได้อันเนื่องมาจากมีสิ่งกีดขวาง ทางเดินของท่อควรมีความโค้งใหญ่ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่ออำนวยความสะดวกในการร้อยสาย ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการโค้งหักมุม ในการเดินท่อระหว่างบ่อพักควรมีความลาดเอียงเพียงเล็กน้อยถึงแม้ว่าอาจจะทำให้น้ำไหลซึมจากบ่อหนึ่งไปยังอีกบ่อหนึ่ง รูปที่ 2.2 แสดงการเดินท่อที่วางอยู่ระดับพื้นโดยมีความชัน 2 ด้านคือ จากตรงกลางแล้วค่อยลาดลงสู่บ่อพักแต่ละด้าน ในทางปฏิบัติต้องทำให้ค่าความลาดเอียงน้อยกว่า 3 นิ้ว สำหรับทุก 100 ฟุต โดยทั่วไปท่อจะต้องฝังลึกไม่น้อยกว่า 3 ฟุตจากผิวถนน [7]



รูปที่ 2.2 ทางเดินท่อร้อยสายเคเบิลใต้ดิน

2.2.1 ชนิดของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

มีลักษณะเป็นท่อกลมภายในกลวง วัสดุที่ใช้ทำมาจากไฟเบอร์ คอนกรีต ซีเมนต์ใยหิน (Asbestos Cement : AC) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethelene : HDPE) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride : PVC) และเหล็ก เป็นต้น ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ในการไฟฟ้านครหลวงมีหลายประเภท แต่นิยมใช้ส่วนใหญ่มีอยู่ 2 ชนิด คือ ท่อซีเมนต์ใยหิน และท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ดีควรจะสามารถกันน้ำได้ และไม่เกิดปฏิกิริยาทั้งทางเคมีและทางไฟฟ้า คุณสมบัติของท่อชนิดต่าง ๆ เป็นดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของท่อชนิดต่าง ๆ

รายการ	ไฟเบอร์	ซีเมนต์ใยหิน	คอนกรีต	เหล็ก
Co-efficient of Friction to Cable	0.25-0.30	0.40-0.60	0.35-0.55	0.55
Resistance to Corrosion	Good	Excellent	Excellent	Good
Resistance to Electric Arc.	Fair	Excellent	Excellent	Good
Heat Dissipation	Fair	Good	Good	Excellent
Principal Advantage	Light Weight	Durable	Durable	Flexible & Strong
Principal Disadvantage	Envelope Expensive	Envelope Expensive	Heavy	Magnetic

2.2.1.1 ท่อซีเมนต์ใยหิน (Asbestos Cement : AC)

เป็นท่อไร้ตะเข็บที่ผลิตขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์และใยหิน มีความยาวท่อละ 4 เมตร โดยทั่วไปจะวางแล้วหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดของท่อซีเมนต์ใยหินที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน คือ 100 mm., 115 mm. และ 140 mm. สำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 140 mm. นั้นเป็นท่อที่ กพน. ใช้มากที่สุด

ข้อดีของท่อชนิดนี้ก็คือ มีราคาถูกกว่าท่อชนิดอื่น ๆ มีความทนทานต่อการผุกร่อน และสามารถระบายความร้อนได้ดี ส่วนข้อเสียของท่อชนิดนี้ก็คือ เป็นท่อที่มีโอกาสแตกหักง่ายกว่าท่อชนิดอื่น และมีน้ำหนักมากกว่า

2.2.1.2 ท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethelene : HDPE)

ท่อโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นท่อโพลีเอทิลีนที่ถูกพัฒนาให้ทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดีมากยิ่งขึ้น แบ่งลักษณะของท่อโพลีเอทิลีนออกเป็น 2 CLASS คือ CLASS I และ CLASS II ข้อดีของท่อชนิดนี้คือสามารถขีดยึดและตัดโค้งงอได้ง่ายกว่าท่อซีเมนต์ใยหิน เพราะฉะนั้นเวลาวางมักจะวางโดยไม่ต้องมีคอนกรีตมาหุ้ม แต่ท่อชนิดนี้มีราคาสูงกว่าท่อซีเมนต์ใยหิน ขนาดของท่อโพลีเอทิลีนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในนอกตั้งแต่ 90 mm., 125 mm., 140 mm. และ 160 mm. ซึ่งขนาด 140 mm. เป็นขนาดที่ กพน. ใช้กันมากที่สุด

2.2.1.3 ท่อเหล็กขีเปิล (Flexible Corrugated Pipe)

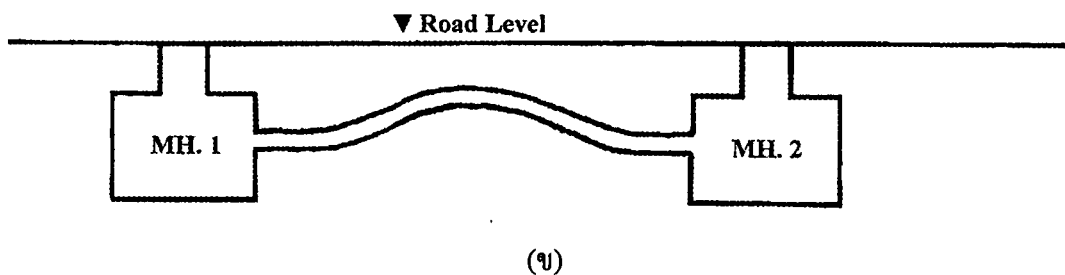
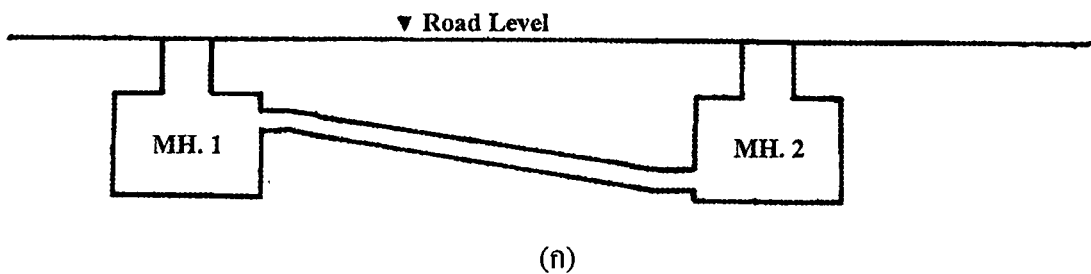
เป็นท่อที่ทำมาจากโพลีเอทิลีนแข็ง (Hard Polyethelene) มีลักษณะเป็นลูกฟูกจึงสามารถโค้งงอได้ง่าย ดังนั้นในการขนส่งจึงม้วนเป็นขด โดย 1 ขด จะมีความยาวประมาณ 50 หรือ 100 m. ขนาดของท่อเหล็กขีเปิลที่ใช้มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 80 mm., 125 mm. และ 150

mm. ซึ่งขนาด 125 mm. เป็นขนาดที่ กฟน.นิยมใช้มากที่สุด

ข้อดีของท่อชนิดนี้ก็คือ มีน้ำหนักเบากว่าท่อชนิดอื่น สามารถวางท่อให้มีความยาวมากกว่าท่อชนิดอื่นที่ใช้งานทั่วไป ซึ่งทำให้มีจำนวนตำแหน่งของการต่อท่อที่น้อยกว่า แรงเสียดทานในการร้อยสายเคเบิลน้อยกว่า และหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ง่ายกว่า แต่ก็มีข้อเสียคือ มีราคาแพง และการทำความสะอาดท่อลำบากกว่าท่อชนิดอื่นมาก

2.3 บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน (Manhole and Handhole) [7]

บ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดินเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนใหญ่จะก่อสร้างอยู่ใต้ผิวดินซึ่งมีการจราจรของยานพาหนะต่าง ๆ ดังนั้นจะต้องรับน้ำหนักสูงสุดได้ 18 ตัน ผนังด้านนอกของบ่อพักส่วนบนจะต้องอยู่ใต้ระดับผิวดินไม่น้อยกว่า 40 cm. บ่อพักจะต้องมีฝาปิด (Manhole Frame and Cover) ทำด้วยเหล็ก ที่ก้นของบ่อพักจะต้องทำป้มน้ำไว้สำหรับสูบน้ำออกเมื่อเวลาจะทำงานในบ่อพัก ลักษณะของการจัดหน้าต่างของบ่อพักขึ้นอยู่กับกรวางท่อที่จะออกจากบ่อพักนั้น ๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.3 (ก) และรูปที่ 2.3 (ข) โดยทั่วไปการไฟฟ้านครหลวงมักนิยมเดินท่อระหว่างบ่อพักสายไฟฟ้าแบบรูปที่ 2.3 (ข) ในการติดตั้งจริงนั้นบ่อพักขนาดเล็กสามารถหล่อสำเร็จรูป และยกลงมาวางในที่ที่จะติดตั้ง แต่ถ้าเป็นบ่อพักขนาดใหญ่จำเป็นต้องก่อสร้างในสถานที่ใช้งานเพราะมีน้ำหนักมาก



รูปที่ 2.3 ลักษณะของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

2.3.1 หน้าที่ของบ่อพักสายไฟฟ้าใต้ดิน

- 1) ใช้วาง และจัดทำหัวต่อสายเนื่องจากไม่สามารถลากสายออกจากทางเดินสาย (Cable Trench) ไปขึ้นไรเซอร์ได้ในกรณีที่ระยะทางตรงมีระยะมากกว่า 150,000 เมตร
- 2) ใช้ในการทำระบบกราวด์สำหรับระบบป้อนขนาด 12 kV และ 24 kV และใช้ในการทำการสลัดสาย (Cross Bonding) สำหรับระบบสายส่งขนาด 69 kV, 115 kV และ 230 kV
- 3) ใช้ในการเปลี่ยน หรือแยกทิศทางของท่อร้อยสาย เช่นกรณีแยกสายขึ้นไรเซอร์ หรือแยกไปเข้าซอยหรือถนน
- 4) เพื่อช่วยในการลากสายเคเบิลให้สะดวกมากยิ่งขึ้น

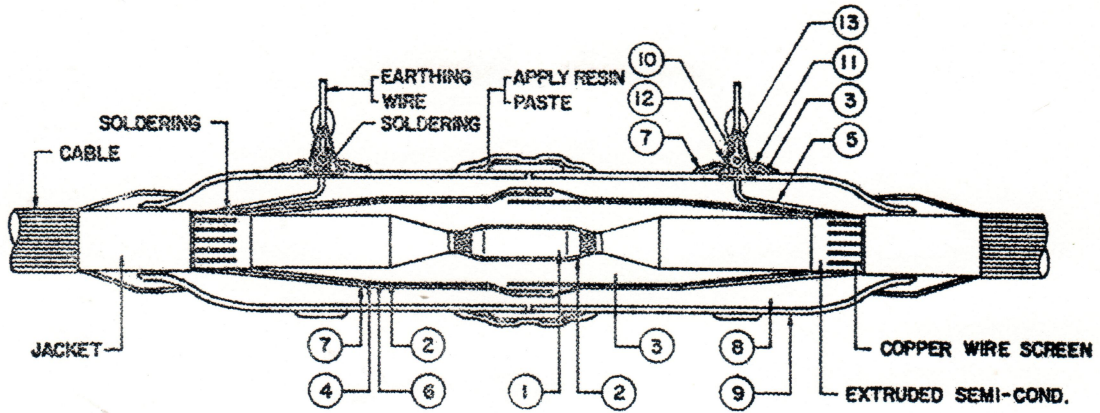
2.4 หัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดิน (Splice)

หัวต่อสายไฟฟ้าใต้ดินเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่ออุปกรณ์ที่จะนำมาต่อกับหัวต่อสาย หัวต่อสายไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติทางกล และการยึดหยุ่นใกล้เคียงกับสายเคเบิล หัวต่อสายไฟฟ้ามีไว้เพื่อต่อหัวตัวของสายเคเบิลเข้าด้วยกัน ทำหน้าที่แทนฉนวนของสาย และควบคุมค่าความเครียดของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Stress) ที่เกิดขึ้น สายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้การต่อสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายควรมีค่าความเค้นของความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของความเป็นฉนวนต่ำ และง่ายต่อการจัดหา การผลิต และการทำการต่อโดยใช้หัวต่อสาย หัวต่อสายนี้ไม่เพียงแต่จะต้องทนต่อการทดสอบในระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น แต่จะต้องสามารถทน และใช้งานได้ตลอดไปดังรูปที่ 2.4

2.4.1 การต่อสายเคเบิล

การต่อสายเคเบิลใต้ดินอาจทำได้หลายวิธี แต่หลักการง่าย ๆ คือ การทำทุกส่วนของหัวต่อให้เหมือนกับเป็นทุกส่วนของสาย เช่นใช้ตัวต่อ (Connector) มาต่อสายทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า ในการต่อสายเคเบิลใต้ดินสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- 1) โดยการใช้เทปพัน เรียกว่า Taping Splice
- 2) แทนการพันเทปทั้งหมด บางส่วนจะทำสำเร็จรูปมาจากโรงงานแล้วนำมาประกอบเป็นหัวต่อ บางส่วนนำมาพันเทปเพิ่ม เรียกว่า Prefabricated Splicing
- 3) บางลักษณะงานส่วนที่สำคัญๆของหัวต่อสายจะใช้เครื่องมือพิเศษมาทำในสนามหน้างานเหมือนกับที่ทำใน โรงงานผลิตสาย ซึ่งเรียกว่า Molded Splicing
- 4) Modular Splicing เป็นแบบที่ทำชิ้นส่วนต่างๆ มาจากโรงงานเลย สามารถจะนำมาประกอบเป็นหัวต่อสายได้หลายแบบใช้กับสายได้หลายขนาดโดยการเพิ่มจุดต่อ (Adaptor) สามารถจะต่อแยกได้เป็น 5 จุด, 6 จุด หรือมากกว่าได้ หรือจะทำเพื่อไว้ต่อแยกในอนาคตอีก 2 หรือ 3 แยกก็ได้ เป็นต้น



ลำดับที่	รายละเอียด
1	ปลอกตัวนำ (Conducting Sleeve)
2	เทปกิ่งตัวนำ (Semi-conductive Tape)
3	เทปฉนวน (Insulating Tape)
4	เทปตะกั่ว (Lead Tape)
5	สายต่อเชื่อม (Bonding Wire)
6	สายทองแดงที่ผ่านการอบ (Tinned Annealed Copper Wire)
7	เทปกาวพีวีซี (PVC Electrical Adhesive Tape)
8	สารผสมกันน้ำ (Water-proof Compound)
9	โครง (Casing)
10	แผ่นกราวด์ (Ground Plate)
11	เทปกันน้ำ (Water Proof Tape)
12	เครื่องห่อหุ้มกันการสึกกร่อน (Anti-corrosion Cover)
13	ขั้วต่อกราวด์ (Grounding Terminal)

หมายเหตุ อ้างอิงจาก FURUKAWA

รูปที่ 2.4 ลักษณะหัวต่อสายไฟฟ้าแบบเทปสำหรับสาย XLPE ตัวนำทองแดงขนาด 69 kV

5) แบบใช้ Shrinkable Tube โดยการทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ของหัวต่อทั้งหมดด้วยหลอดหดได้ เมื่อโดนความร้อนก็จะสามารถนำมาประกอบเข้าเป็นหัวต่อ

2.4.2 ส่วนประกอบของหัวต่อ (แบบพันเทป)

1) ตัวต่อ (Connector) เป็นหลอดต่อเชื่อมปลายสายทั้งสองปลายเข้าด้วยกัน แบ่งเป็นหลายแบบ เช่น แบบ Soldering แบบ Compression แบบ Bolted และแบบสำหรับ 3 ทาง เป็นต้น ตัวต่อทำหน้าที่เป็นตัวต่อสายให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และยึดปลายสายทั้งสองให้ติดกันเป็นสายแกนเดียว

การต่อเชื่อมกระทำโดยการบีบด้วยเครื่องมือ การต่อด้วยตะกั่ว การต่อเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมโลหะ การต่อเชื่อมด้วยผงโลหะผสมดินปืน

2) เทปกึ่งตัวนำ (Semi Conductive Tape) อาจจะเป็นเทปยาง เทปกระดาษ หรือเทปผ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสายใต้ดินที่จะต่อ ในเทปผสมสารกึ่งตัวนำเช่นคาร์บอนไว้ เทปนี้ใช้พันทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มสาย

3) เทปฉนวน (Insulation Tape) เป็นเทปที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า อาจจะเป็นยาง เทปผ้า หรือเทปกระดาษ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสายใต้ดินที่จะต่อ เทปนี้ใช้เป็นฉนวนของตัวต่อเช่นเดียวกันกับฉนวนของสายใต้ดิน

4) เทปโลหะ (Metallic Tape) เป็นเทปทำด้วยโลหะถักเป็นตาข่าย หรืออาจจะเป็นเทปโลหะบางๆ เช่น เทปตะกั่วก็ได้ ใช้พันเป็นเครื่องป้องกันชนิดโลหะ เช่นเดียวกับในสายใต้ดิน

5) วัสดุป้องกัน (Protective Material) ได้แก่ พวกที่นำมาพันด้านนอกหัวต่อ เพื่อป้องกันน้ำ ป้องกันการกระทบกระแทก ซึ่งอาจจะเป็นแบบเทป หรือเป็นน้ำยาเรซิน (Resin) ก็ได้

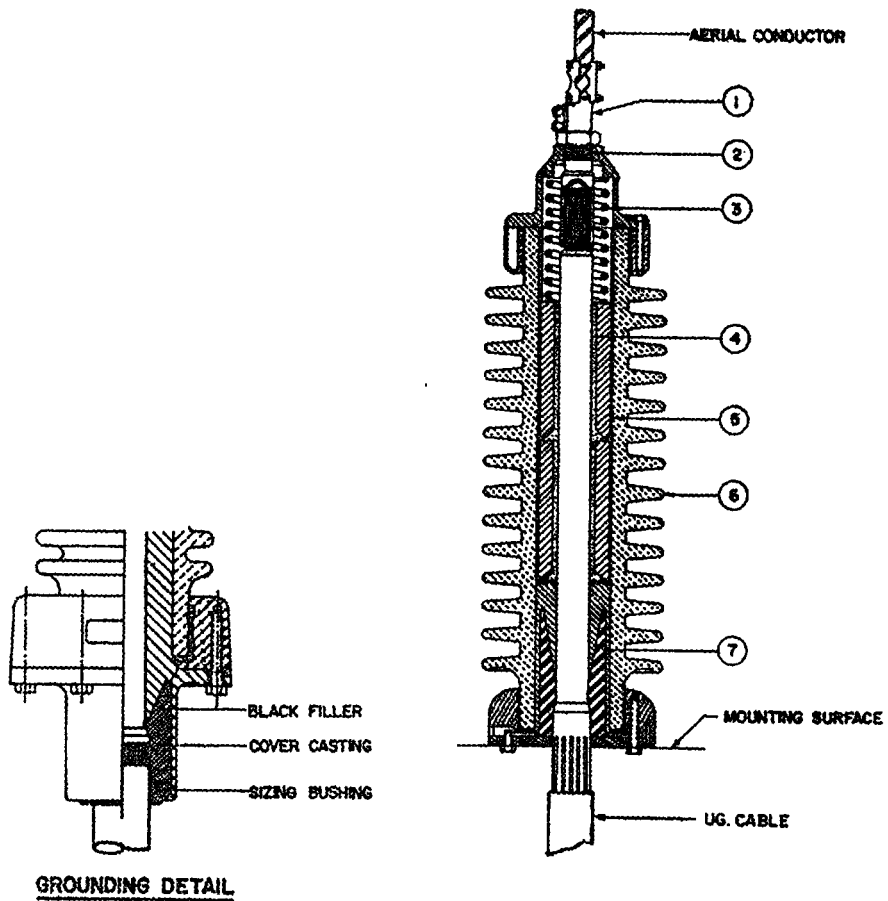
6) ส่วนประกอบเบ็ดเตล็ด ได้แก่ ตะกั่วสำหรับบัดกรี (ชนิด 50/50 หรือ 60/40) เทปผ้า เทปยาง น้ำยาบัดกรี เทปยางมะตอย และอื่นๆ

2.5 หัวสายไฟฟ้าใต้ดิน (Terminator)

ในระบบสายใต้ดินส่วนสำคัญอันหนึ่งของระบบก็คือหัวสายไฟฟ้า หรือพอทเฮด (Pot Head) ส่วนมากจะติดตั้งอยู่บนเสาที่เรียกว่าไรเซอร์โพล (Riser Pole) หรืออยู่ในแผงควบคุมในสถานีย่อย หรือบางครั้งอาจอยู่บนเสาที่ต่อหม้อแปลง หรือบริเวณที่ต้องการให้สายเคเบิลไปสิ้นสุดลงเพื่อจะต่อเป็นสายอากาศไปหรือจุดประสงค์อื่น แต่ที่แน่นอนคือ ปลายสายใต้ดินจะสิ้นสุดลง ณ จุดนี้ การที่สายใต้ดินสิ้นสุดลงนี้ ทำให้ส่วนป้องกัน (Shield) ของสายใต้ดินสิ้นสุดลงด้วย เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในแนวรัศมี (Radial Stress) และความเครียดในแนวยาว (Longitude Stress) ของสาย ถ้าการยึดของสายใต้ดินไม่ขาดค่าความเครียดทั้งสองชนิดนี้จะถูกควบคุมให้คงที่สม่ำเสมอ และมีค่าตามที่กำหนด เมื่อยึดของสายใต้ดินขาดลงผลจากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดทั้งสองจะทำให้ฉนวนของสายเคเบิลที่บริเวณจุดยึดขาดนี้ได้รับความเสียหาย ดังนั้นเพื่อป้องกันการเสียหายจึงจำเป็นต้องมีการทำการป้องกัน ซึ่งเรียกว่าการทำหัวสายไฟฟ้าใต้ดิน ลักษณะของหัวสายไฟฟ้าใต้ดินเป็นดังรูปที่ 2.5

2.5.1 ชนิดของหัวสายไฟฟ้าใต้ดิน (Type of Terminator)

1) Pot Head Type เป็นหัวสายไฟฟ้าใช้สำหรับทำหัวสายที่อยู่ในบริเวณจำกัด และต้องทำหน้าที่เป็นตัวจับยึดปลายสายใต้ดินให้คงอยู่ในสภาพ และรูปแบบที่ต้องการ รวมทั้งต้องทนทานต่อสภาวะต่างๆ ได้เองโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นมาช่วย



ลำดับที่	รายละเอียด
1	ตัวต่อ (Connector)
2	ปะเก็นโอริง ("O" Ring Gaskets)
3	สปริงอัด (Compression Spring)
4	ซิลิโคนเหลว (Silicone Fluid)
5	ท่อฉนวน (Insulator Tube)
6	โครงหุ้มพอร์ซเลน (Porcelain Housing)
7	กรวยลดความเครียด (Stress Cone Assembly)

หมายเหตุ อ้างอิงจาก JOSLYN Cat. No. J9286 - 4

รูปที่ 2.5 ลักษณะหัวสายไฟฟ้าใต้ดินแบบพอร์ซเลนสำหรับสาย XLPE ตัวนำทองแดงขนาด 69 kV

2) Compartment Type เป็นแบบที่มีกล่องหรือตู้ เป็นส่วนที่ห่อหุ้มป้องกันความเสียหายจากภายนอก ป้องกันฝน แดด ลม และมลภาวะอื่นๆ อาจจะมีองค์ประกอบอื่นรวมอยู่ หรือมีแต่เฉพาะอากาศ หรือน้ำมันอยู่ แต่กล่องหรือตู้จะต้องมีที่ว่างพอที่จะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าในทุกกรณี

3) Non Pot Head หัวสายไฟฟ้าประเภทนี้ส่วนที่สำคัญคือกรวยลดความเครียด (Stress Relief Cone) และการพันเทปป้องกันมลภาวะ ผิวฉนวนของสายอาจจะมีชุดป้องกันฝนด้วย

2.5.2 ส่วนประกอบของหัวสายไฟฟ้า

1) หูสาย หรือ แคล้ม (Aerial Lug) ใช้สำหรับต่อกับสายอากาศ ต่อกับบัสบาร์ หรือต่อกับชิ้นส่วนภายนอก

2) ตัวต่อ (Connector) เป็นตัวนำที่มาหุ้มปลายแท่งตัวนำของสายใต้ดิน เพื่อใช้เป็นตัวต่อเชื่อมกับหูสาย หรือ แคล้ม และยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในสายได้ บางกรณีจะเป็นทางเข้าออกของน้ำมัน หรือก๊าซ ส่วนชนิดของรูปตัวต่อเชื่อม พร้อมทั้งการต่อเชื่อมกับแท่งตัวนำมีหลายแบบหลายวิธี เช่น แบบใช้เครื่องบีบ ใช้ตะกั่ว ใช้ผงโลหะผสมคินปิ่น หรือใช้เครื่องเชื่อมโลหะ เป็นต้น

3) ฉนวนหุ้ม (Insulator) เป็นฉนวนที่หุ้มภายนอกสายเคเบิลเพื่อป้องกันมลภาวะภายนอกไม่ให้เป็นอันตรายต่อฉนวนของสายเคเบิล และป้องกันมิให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจากปลายสุดของสายเคเบิลมายังฐานรองรับที่ใช้ติดตั้งหัวสายไฟฟ้า ชนิดของฉนวนหุ้มได้แก่พวกพอลิเอทิลีน อีพ็อกซีเรซิน ยางซิลิโคน และท่อหุ้ม เป็นต้น ส่วนรูปแบบของฉนวนมีอยู่ 2 ประเภท คือแบบที่มีปีกเป็นชั้นๆ เรียกว่า Skirt สำหรับใช้งานภายนอกอาคาร กับแบบที่มีผิวเรียบสำหรับใช้งานภายในอาคาร หรือในห้อง

4) Metal body เป็นส่วนประกอบส่วนกลางของหัวสายไฟฟ้า เป็นส่วนที่ใช้สำหรับจับยึดกับส่วนประกอบที่จะไปติดตั้งกับ โครงสร้าง และเป็นส่วนที่ขั้วของสายจะมาต่อและสิ้นสุดลง ดังนั้นส่วนนี้จะมีกรวยลดความเครียดติดตั้งอยู่ภายใน

5) Supporting Bracket เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จับยึดหัวสายไฟฟ้าให้ติดกับโครงสร้าง

6) กรวยลดความเครียด (Stress Relief Cone) เป็นส่วนสำคัญของหัวสายไฟฟ้า มีหน้าที่กระจายความเครียดที่บริเวณปลายขอบซิลิโคนให้มีค่าเฉลี่ยอย่างสม่ำเสมอบนผิวฉนวน

7) Cable Gland เป็นส่วนล่างสุดของหัวสายไฟฟ้า มีเฉพาะแบบ Pot Head Type มีหน้าที่ป้องกันมลภาวะภายนอกไม่ให้มารบกวนสายเคเบิลในบริเวณที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์นี้ และยังเป็นส่วนยึดแขวนสายเคเบิลให้อยู่ได้ แบ่งออกเป็น Widening gland, Stuffing gland และ Armour Clamp

8) Compound เป็นสารผสมที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนใช้เติมในหัวสายไฟฟ้า เพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้าไปในสาย และเพิ่มคุณค่าความเป็นฉนวนบนผิวฉนวนของสายให้มากขึ้น

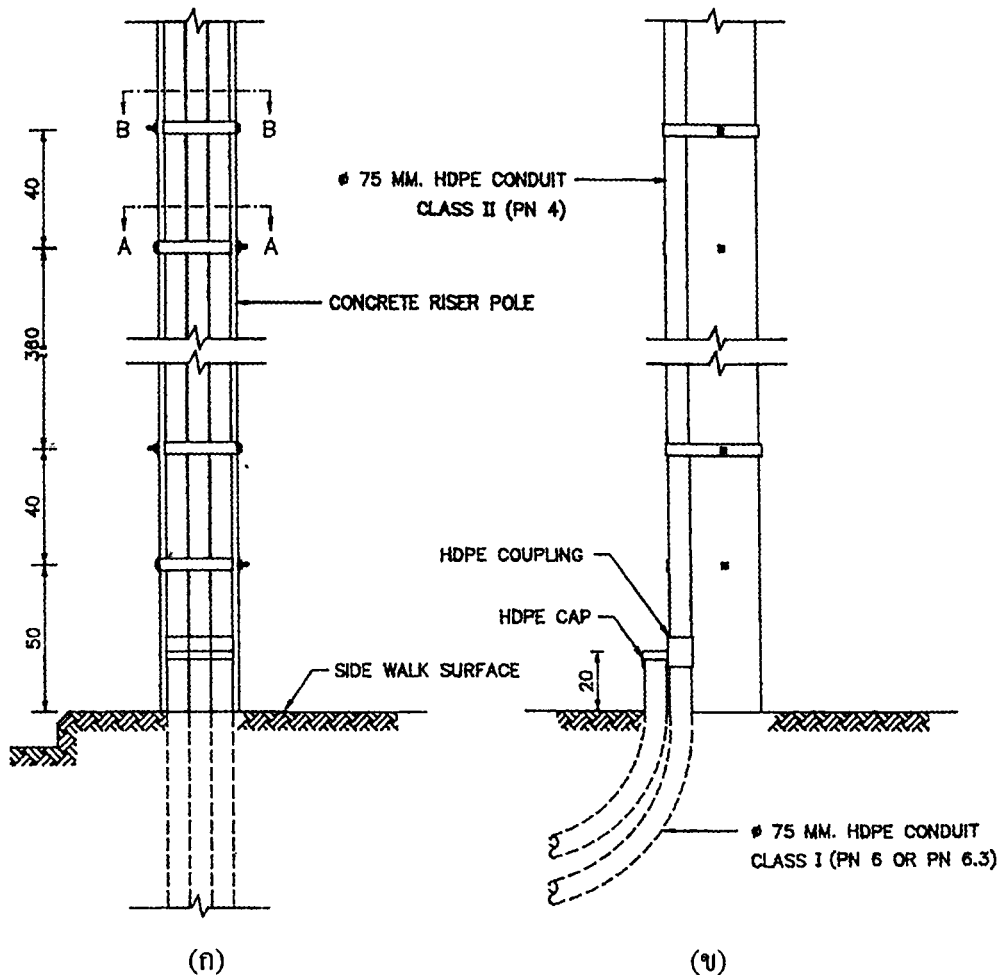
ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ Support Insulator, สาย Ground ตะกั่ว 40/60 และ 50/50 เป็นต้น การคำนวณเกี่ยวกับหัวสายไฟฟ้าไม่นิยมใช้กัน โดยมากมักจะทำการทดลองในห้องทดลอง และอาศัยประสบการณ์ในงานสนามผสมผสานกันไป โดยเฉพาะบริเวณกรวยลดความเครียดมักจะทำให้การเขียนแผนผังเส้นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แล้วพิจารณาค่าต่างๆ จากแผนผังเส้นแรงไฟฟ้านั้น ซึ่ง

จะทำให้ทราบว่าค่าความเครียดของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดเป็นอย่างไร ถ้ากรวยความเครียดอยู่ต่ำกว่าส่วนกราวด์ด้านนอกค่าความเครียดสูงสุดจะอยู่บริเวณฉนวน หรือบริเวณที่ใกล้กับขอบของส่วนกราวด์

2.6 ไรเซอร์โพล (Riser Pole)

ไรเซอร์โพลเป็นส่วนของท่อที่โผล่พื้นดินขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับให้สายเคเบิลได้เดินผ่านไปเชื่อมต่อกับระบบสายเคเบิลในอากาศ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 2.6 ไรเซอร์โพลนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ข้อง 90° มีลักษณะเป็นท่อโค้ง 90° วัสดุที่ใช้ทำมาจากโลหะกล้าไนซ์ พีวีซี และ สารประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง



หมายเหตุ ขนาดต่าง ๆ เป็นหน่วยเซนติเมตร

รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของไรเซอร์โพล

(ก) ภาพตัดด้านหน้า

(ข) ภาพตัดด้านข้าง

2) ท่อไรเซอร์ (Riser Conduit) เป็นท่อที่ต่อจากท่อโค้งขึ้นไป โดยจะแนบอยู่กับเสา ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องป้องกันทางกลให้กับสายเคเบิลใต้ดินโผล่พื้นดินขึ้นมา วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่ทำมาจากเหล็กหรือโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

ในการออกแบบท่อร้อยสายไฟฟ้าในส่วนที่จะไปต่อกับไรเซอร์โพล หรือในส่วนที่สำรองไว้สำหรับท่อในโครงการอนาคต (Stub) นั้น มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

ก) การขึ้นไรเซอร์สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้า 12 kV และ 24 kV นั้น จะใช้ท่อจำนวน 2 ท่อ ส่วนระบบแรงดันไฟฟ้า 69 kV, 115 kV จะใช้ท่อ 3 ท่อ (Single Circuit) หรือ 6 ท่อ (Bundle Circuit) เพื่อขึ้นไรเซอร์

ข) การขึ้นไรเซอร์ควรจะขึ้นด้านในของคอนกรีตเพื่อป้องกันการถูกรถชน แต่ทั้งนี้อาจจะป้องกันได้โดยใช้โลหะป้องกัน (Steel Guard)

ค) การสำรองท่อนั้นควรจะสำรองไว้ในแนวของท่อเดิม และควรมีความยาวไม่เกินจุดศูนย์กลางของเสาต้นสุดท้าย ทั้งนี้ก็เพราะว่าเวลาจะต่อท่อออกจากท่อสำรองจะได้สะดวกในการขุดหา

2.7 การติดตั้งสายไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable Installation)

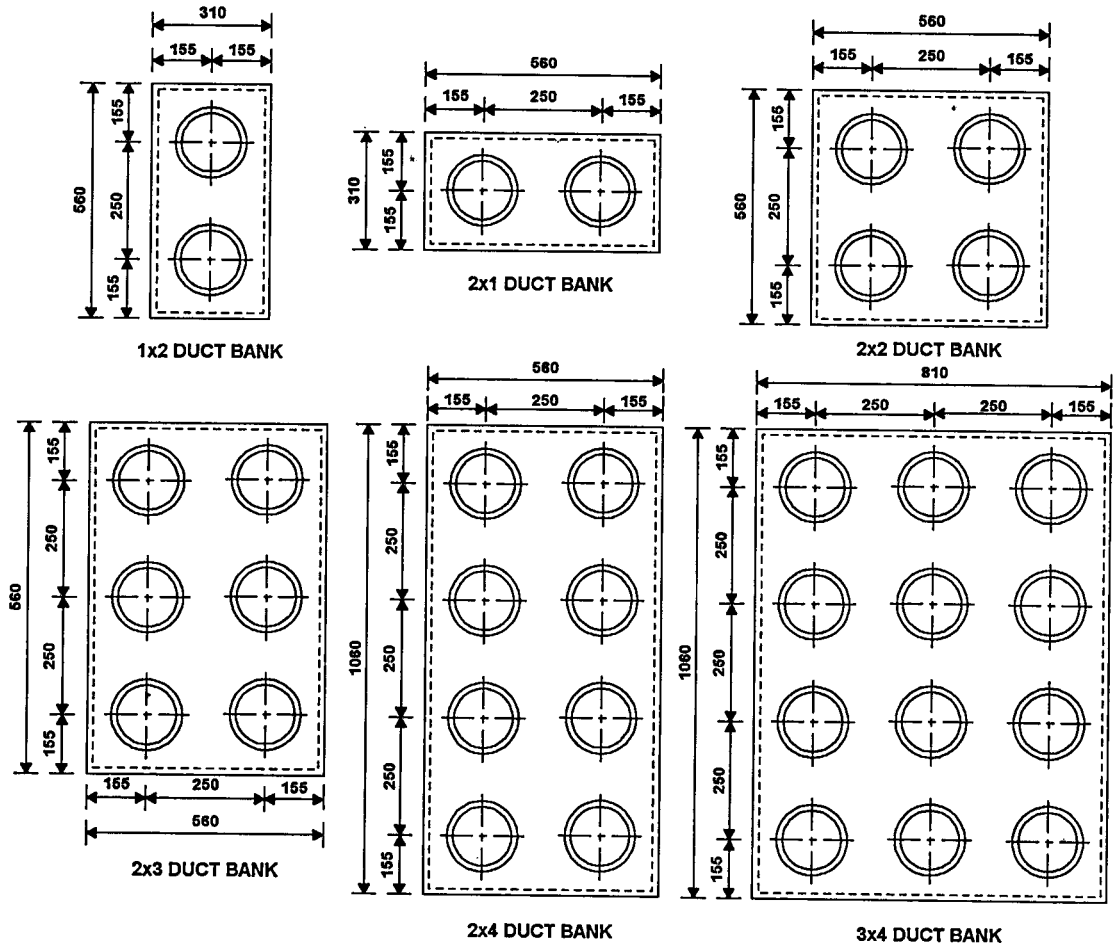
สายเคเบิลใต้ดินสามารถนำมาจัดวางเพื่อติดตั้งใช้งานได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบมีวิธีการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกวิธีการจัดวางสายเคเบิลจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมต่างๆ เช่น สภาพพื้นดิน จำนวนวงจรของสายเคเบิล เทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง และงบประมาณของการลงทุน การก่อสร้างเพื่อจัดวางสายเคเบิลใต้ดินมีรูปแบบการจัดวางเป็น 3 รูปแบบ คือการวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต การวางสายเคเบิลด้วยวิธีฝังใต้ดินโดยตรง และการวางสายเคเบิลใต้ดินในอุโมงค์สาธารณูปโภค ในการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะการวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะดังนี้ คือ

2.7.1 การวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต (Duct Bank with Concrete Sheath)

การวางสายเคเบิลแบบนี้จะต้องขุดดินตามแนวของสายเคเบิลเพื่อก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลที่หุ้มทับด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะการวางสายในท่อที่นิยมใช้โดยทั่วไปเป็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวคอนกรีตเสริมเหล็กจะเป็นเครื่องป้องกันแรงทางกล และผลกระทบอื่นๆ ที่มากระทำต่อสายเคเบิลได้เป็นอย่างดี

2.7.2 ความสามารถในการส่งและจ่ายพลังไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน

สำหรับการส่งและจ่ายพลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลใต้ดินนั้นมีใช้กันมากเฉพาะพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง ความสามารถในการนำกระแส และกำลังไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้เป็นสายป้อนในระบบจำหน่าย และระบบส่งจ่ายเป็นดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ตามลำดับ [5]



รูปที่ 2.7 ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการนำกระแส และกำลังไฟฟ้าของสายป้อนใต้ดิน ชนิดฉนวนในท่อ ร้อยสายหุ้มคอนกรีต

ขนาดของ สายเคเบิลใต้ดิน	ความสามารถในการนำกระแสและพลังงานไฟฟ้า				
	กระแส (A)	12 kV (MVA)	22 kV (MVA)	24 kV (MVA)	33 kV (MVA)
35 mm ² Cu XLPE	161	3.3	6.1	6.6	9.2
70 mm ² Cu XLPE	235	4.8	9.0	9.7	13.4
240 mm ² Cu XLPE	478	9.9	18.2	19.8	27.3
400 mm ² Cu XLPE	614	12.7	23.4	25.5	5.1

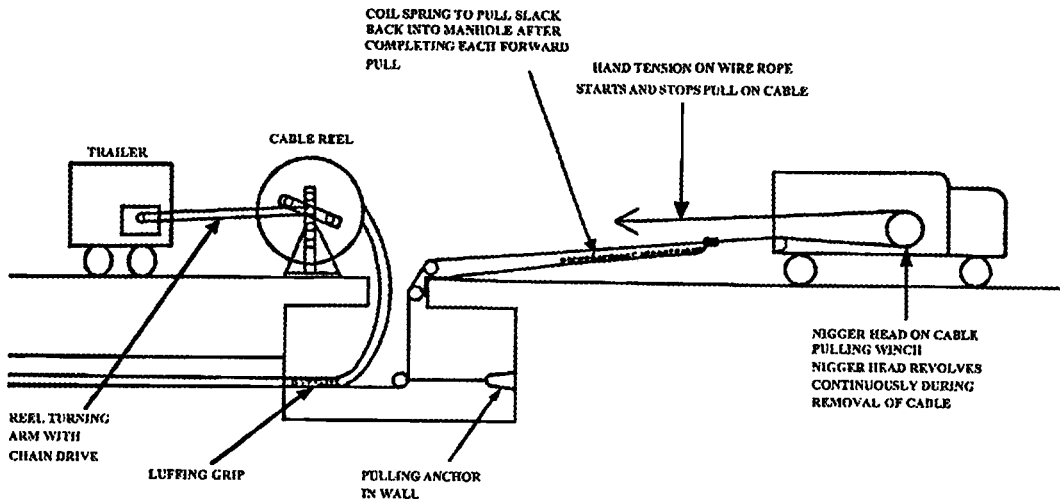
ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการส่งพลังไฟฟ้าของสายส่งใต้ดิน

ชนิดของสายเคเบิล (kV)	การก่อสร้างเพื่อจัดวางสายส่ง	จำนวนวงจรของสายส่งในแนวเดียวกัน	ความสามารถในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของสายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 1 x 800 mm ²	
			กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (MVA)
69 XLPE	Duct Bank	1	898	107
		2	770	92
		3	709	85
-	Direct Burial	1	917	110
		2	860	103
115 XLPE	Duct Bank	1	870	173
		2	741	148
		3	681	136

2.8 การลากสายไฟฟ้าใต้ดิน

ในการลากสายเคเบิลเข้าไปในท่อนั้นส่วนมากจะใช้รถที่มีเครื่องมือดึงที่เรียกว่าวินช์ (Winch) ช่วยในการดึงสายเคเบิล รถที่มีวินช์จะจอดอยู่ใกล้กับปากของบ่อพักสาย สลิงที่ใช้ในการดึงสายเคเบิลจะถูกต่อกับบ่ออยู่กับวินช์ของรถ ส่วนที่บ่อพักสายอีกด้านหนึ่งจะจอดรถบรรทุกม้วนสายเคเบิลที่ยกตั้งอยู่บนขาหยั่งโดยยกให้สูงพ่นพื้นเพื่อให้หมุนได้ขณะลากสายเคเบิลออกจากม้วนสายที่ปลายของสายเคเบิลก่อนจะทำการลากสายจะต้องทำที่สำหรับยึดกับสลิง จุดที่ยึดติดกับสลิงนี้เรียกว่า พูลลิ่งอาย (Pulling Eye) หรือใช้ Pulling Gripe สวมยึดปลายสายเคเบิลกับสลิงก็ได้ ลักษณะการลากสายเป็นดังรูปที่ 2.8

ขณะลากสายเคเบิลเข้าไปในท่อ สายเคเบิลจะต้องทาด้วยสิ่งหล่อลื่นซึ่งอาจจะเป็นจารบี น้ำมันหล่อลื่น หรือหินสบู่ก็ได้ ถ้าใช้หินสบู่ก็จะเป็นการดีมากแต่มีข้อเสียที่ว่าหินสบู่มีราคาแพง และไม่มีที่จำหน่ายในประเทศไทยต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ที่ปากท่อจะต้องใส่เครื่องป้องกันเพื่อไม่ให้ปากท่อทำคามเสียหาย หรือทำให้เกิดรอยชำรุดกับสายเคเบิลได้ ในการลากสายเคเบิลในทางปฏิบัติจะใช้ความเร็วประมาณ 3-5 เมตรต่อนาที ระหว่างการลากสายจะต้องคอยให้สัญญาณติดต่อกันระหว่างรถลากสายกับรถบรรทุกสาย โดยอาจจะใช้สัญญาณมือหรือวิทยุติดต่อก็ได้ ขณะลากจะต้องคอยจับที่กแรงดึงทุกๆหนึ่งนาที แรงดึงต้องค่อยๆ เพิ่มขึ้นจึงจะดี ถ้าค่าของแรงดึงมีการเปลี่ยนแปลงมากบ้าง น้อยบ้าง ขณะทำการลากสาย แสดงว่าอาจมีปัญหาที่ท่อ หรือการป้อนสายไม่ดี ซึ่งจะมีผลทำให้สายเกิดการเสียหายชำรุดได้



รูปที่ 2.8 การลากสายเคเบิลใต้ดิน

เมื่อสายเคเบิลโผล่ที่บ่อพักสายแล้วต้องทำการดึงเพื่อไว้สำหรับทำการต่ออีกเล็กน้อย หลังจากทำการตัดสายเคเบิลออกจากม้วนสายแล้ว จะต้องตรวจสอบเปลือกของสายเคเบิลว่าชำรุดหรือไม่ โดยใช้เครื่องตรวจสอบความต้านทานขนาด 1000 V ตรวจสอบระหว่างเปลือกตะกั่วหรือซัลค์ของสายเคเบิลกับกราวด์ โดยจะต้องได้ค่าความต้านทานไม่ต่ำกว่า 10 MΩ ค่าความต้านทานยิ่งสูงมากก็ยิ่งดี หลังจากนั้นทำการปิดปลายสายด้วยฝาครอบ ถ้าสายเป็นแบบมีเปลือกตะกั่วหุ้มก็ใช้ฝาครอบเป็นตะกั่วครอบปลายสายแล้วใช้ตะกั่วชนิด 40/60 เชื่อมปิดอย่างค้ำยำให้รั่วแล้วพันทับด้วยเทปอีกชั้นหนึ่ง ถ้าสายเป็นแบบไม่มีเปลือกตะกั่วให้ใช้ฝาครอบแบบที่ทำด้วยยาง หรือพีวีซีครอบพันทับด้วยเทป และพันทับด้านนอกด้วยเทปพีวีซีอีกครั้ง การปิดปลายสายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะถ้าทำไม่เรียบร้อยน้ำอาจรั่วซึมเข้าไปในสายเคเบิล ได้ ทำให้สายเคเบิลเสียหายใช้งานไม่ได้

การลากสายเคเบิลไม่ใช่มีแต่การลากเข้าเท่านั้น บางครั้งยังมีการลากสายเคเบิลที่ลากเข้าไปในท่อแล้วนั้นออกอีกด้วย เหตุที่ต้องลากออกส่วนมากมักจะมาจากการชำรุด เสียหายของสายหลังจากใช้งานไประยะหนึ่ง หรือเมื่อเลิกใช้สายเคเบิลชุดนั้นแล้ว หรือเมื่อต้องการเปลี่ยนขนาดของสาย การลากสายเคเบิลออกมีความยุ่งยากมากกว่าการลากสายเคเบิลเข้า บางครั้งไม่สามารถลากสายออกมาได้จนขนาดถึงกับตะขอเหล็กที่แขวนรอกขาดหรือบางครั้งสายเคเบิลก็ขาด ถ้าสายเคเบิลที่ลากออกมาขาดวิธีแก้ไขเพื่อเอาสายออกมาให้ได้ก็คือ ต้องขุดเจาะข้างท่อเพื่อตัดเอาเคเบิลขึ้นมา แต่ถ้าท่อที่ใส่สายเป็นท่อที่อยู่ตรงกลาง โดยมีท่ออื่นที่มีสายเคเบิลอยู่แล้วล้อมอยู่ก็ไม่สามารถใช้วิธีเจาะขุดท่อได้ ในกรณีนี้บางครั้งอาจต้องปล่อยสายเคเบิลทิ้งไว้

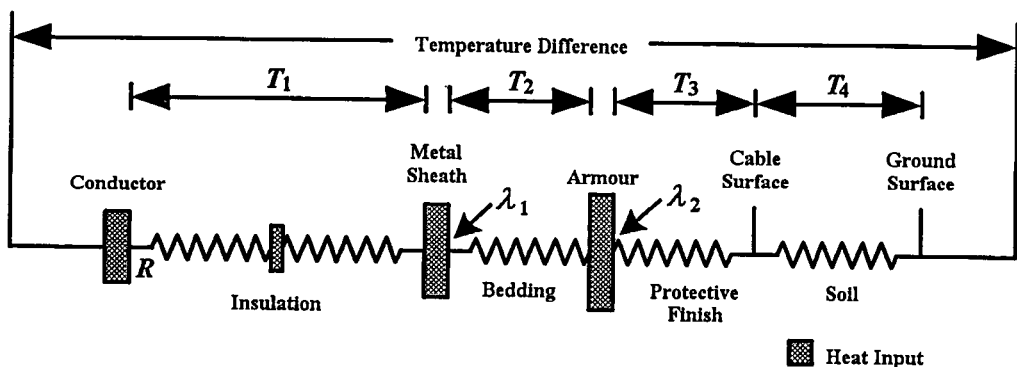
บทที่ 3

การคำนวณหาพิกัดขนาดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน

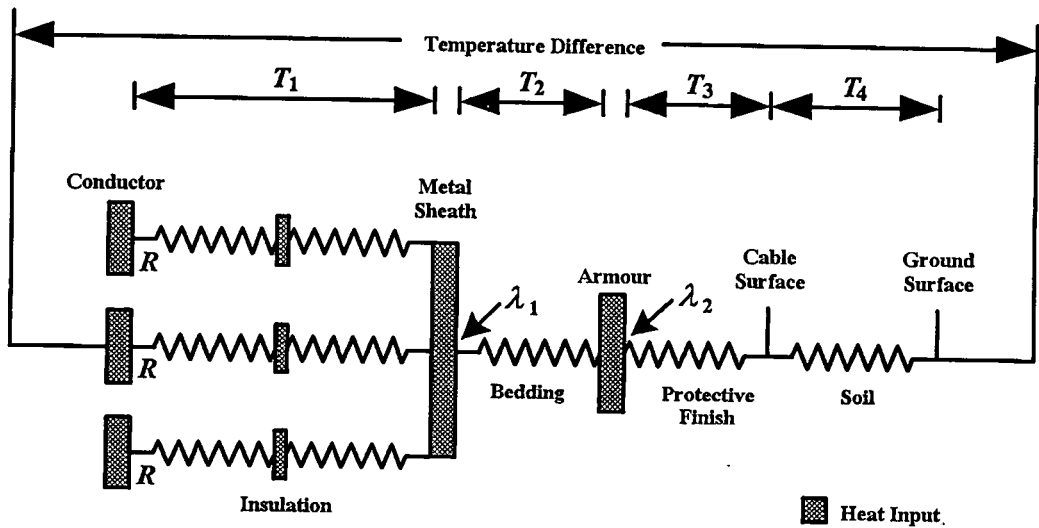
การคำนวณหาพิกัดขนาดของกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินในสภาวะการจ่ายโหลดภายใต้เงื่อนไขการใช้งานหนึ่งๆ สามารถคำนวณได้หลายวิธี และหลายมาตรฐาน แต่วิธีการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรมสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีการคำนวณอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 287 [1], [21] ซึ่งเป็นมาตรฐานในการใช้งานที่มีการยอมรับกันทั่วโลก และการไฟฟ้านครหลวงก็เป็นอีกหน่วยงานหนึ่งที่เลือกใช้มาตรฐานนี้อ้างอิงการติดตั้งระบบไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทยเพื่อให้สามารถเลือกขนาดสายเคเบิลได้เหมาะสม การออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดินจะต้องคำนึงถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายบนพื้นฐานจุดวิกฤตที่เกี่ยวกับความร้อน และไม่พิจารณาเกี่ยวกับภาระโหลดทางเศรษฐกิจในการคำนวณจะกำหนดให้สายอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) นั่นคือกระแสจะมีค่าคงที่ต่อเนื่องกันตลอดที่ตัวประกอบภาระโหลด 100% (100% Load Factor) การคำนวณหาค่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ไหลในสายเคเบิลต้องคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างของสายเคเบิล ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) คุณสมบัติของสายเคเบิล [31], [32] เช่น ความต้านทานความร้อน
- 2) สภาวะแวดล้อมในบริเวณที่ติดตั้งสายเคเบิล
- 3) ข้อมูลที่ได้จากการประชุมระหว่างผู้ผลิต และผู้ใช้เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

จากวงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลชนิด 1 แกน และชนิด 3 แกน ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ทนได้ในสายเคเบิล ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ยอมให้ไหลผ่านได้สูงสุดในหนึ่งตัวนำในสภาวะการใช้งานขณะนั้น ๆ โดยไม่ทำให้สายเคเบิลเสียหาย (Calculation of Continuous Current Rating of Cable : I_{AC}) สามารถคำนวณหาตามมาตรฐาน IEC 287 [21] ได้จากสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลชนิด 1 แกน



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของสายเคเบิลชนิด 3 แกน

$$I_{AC} = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right\}^{1/2} \quad (3.1)$$

เมื่อ $\Delta\theta$ = อุณหภูมิของตัวนำที่ยอมให้สูงกว่าสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

R = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุด (Ω/m)

W_d = พลังงานสูญเสียในฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล (W/m)

T_1 = ความต้านทานความร้อนต่อระหว่างตัวนำกับฉนวน (km/W)

T_2 = ความต้านทานความร้อนระหว่างฉนวนกับเครื่องห่อหุ้ม (Armour) (km/W)

T_3 = ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล (External Serving) (km/W)

T_4 = ความต้านทานความร้อนภายนอก (ระหว่างผิวฉนวนเปลือกนอกของสายถึงผิวดิน) (km/W)

n = จำนวนตัวนำ (แกน) ในสายเคเบิล

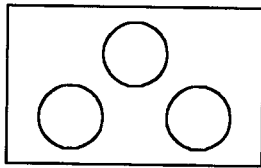
λ_1 = องค์กรประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในฉนวนโลหะ และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน

λ_2 = องค์กรประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในเครื่องห่อหุ้มของสายเคเบิลใต้ดิน

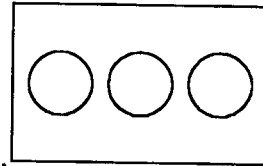
ตัวแปรแต่ละตัวในสมการที่ (3.1) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) ถึงสมการที่ (3.5) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าลักษณะการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลในสายจะแตกต่างกันออกไปเมื่อ

- 1) ชนิดของตัวนำแตกต่างกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด 1 แกน และชนิด 3 แกน
- 2) รูปแบบการวางสายเคเบิลในท่อร้อยสาย โดยสามารถวางได้ 2 แบบ คือ วางแบบสามเหลี่ยม (Trefoil) และวางแบบราบ (Flat) ดังรูปที่ 3.3 ก) และรูปที่ 3.3 ข) ตามลำดับ

- 3) ลักษณะ และขนาดของตัวนำ ถ้าเป็นตัวนำที่มีขนาดใหญ่ต้องนำค่าตัวประกอบ F (F Factor) เข้ามาพิจารณาร่วมด้วย
- 4) ลักษณะของสารที่ใช้ทำฉนวน
- 5) ตำแหน่งการร้อยสายเคเบิลในท่อร้อยสาย
- 6) ชนิดของท่อ
- 7) ชนิดของสายเคเบิล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือแบบสกรีน (Screen) กับแบบเข็มขัด (Belted)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม (Trefoil)
(ข) การวางสายเคเบิลแบบราบ (Flat)

3.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำ (AC Resistance of Conductor : R)

ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการที่ (3.2) นี้ สามารถหาได้จากตั้งแต่สมการที่ (3.3) จนถึงสมการที่ (3.7)

$$R = R'(1 + Y_s + Y_p) \quad (3.2)$$

เมื่อ R = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด (Ω/m)

R' = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด (Ω/m)

Y_s = ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

Y_p = ผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity Effect)

3.1.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (DC Resistance of Conductor : R')

$$R' = R_o [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (3.3)$$

เมื่อ R_o = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิ $20^\circ C$ (Ω/m)

α_{20} = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่ $20^\circ C$

θ = ค่าอุณหภูมิสูงสุดขณะทำงาน ($^\circ C$)

3.1.2 ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect : Y_s)

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลในตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำมีความหนาแน่นมากแต่แกนกลางของตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลน้อยซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ ขนาดของตัวนำ และขนาดของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ ดังนั้นสามารถหาค่าผลจากปรากฏการณ์ทางผิวได้จากสมการที่ (3.4) นั่นคือ

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (3.4)$$

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} K_s \quad (3.5)$$

เมื่อ X_s = Argument of A Bessel Function ที่ใช้ในการคำนวณผลจากปรากฏการณ์ทางผิว (ควรมีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับ 2.8 เพื่อให้ได้ค่า Y_s ที่ถูกต้องแม่นยำ)

K_s = ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณค่า X_s [21]

f = ความถี่ไฟฟ้าที่ป้อน (Hz.)

3.1.3 ผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity Effect : Y_p)

ลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลหลาย ๆ เส้นจะมีระยะห่างระหว่างสายเคเบิลน้อยมาก ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิลที่อยู่ข้างเคียงจึงมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำสายเคเบิลเส้นที่อยู่ใกล้เดียวกัน ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จึงถูกเรียกว่าผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + \left[\frac{d_c}{s} \right]^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \quad (3.6)$$

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} K_p \quad (3.7)$$

เมื่อ d_c = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวนำ (mm)

s = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

X_p = Argument of A Bessel Function ที่ใช้ในการคำนวณผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (ค่า X_p ควรมีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับ 2.8 เพื่อให้ได้ค่า Y_p ที่ถูกต้องแม่นยำ)

K_p = ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณ X_p [21]

3.2 ค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล (Dielectric loss: W_d)

พลังงานสูญเสียของฉนวนมีผลทำให้ฉนวนเกิดความร้อนขึ้นซึ่งอาจร้อนพอ ๆ กันกับความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวนำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับแรงดันไฟฟ้าค่าสูง ๆ สามารถหาค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวในเฟสเดียวกันคำนวณได้จากสมการที่ (3.8) และสามารถหาค่าความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว (Capacitance : C) ได้ดังสมการที่ (3.9) ค่าความสูญเสียของฉนวนจะมีความสำคัญก็ต่อเมื่อค่าความต่างศักย์ของพื้นดินมีค่ามากกว่า 30 kV สำหรับฉนวนกระดาษ และ 6 kV สำหรับฉนวนพีวีซีทั้งเคเบิลชนิด 1 แกน และ 3 แกน

$$W_d = \omega C U_o^2 \tan \delta \quad (3.8)$$

เมื่อ W_d = พลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล (W/m)

$\tan \delta$ = แฟกเตอร์การสูญเสียของฉนวน (Dielectric Loss Factor)

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{rad/sec})$$

U_o = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายมีไฟกับดิน (Voltage to Earth) (volt)

C = ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว (F/m)

3.2.1 ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{D_c} \right)} \times 10^{-9} \quad (3.9)$$

เมื่อ ϵ = ความซึมซาบสัมพัทธ์ของฉนวน (Relative Permittivity of Insulation)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฉนวน (mm.)

D_c = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำรวมถึง Conductor Screen (mm.)

3.3 ตัวประกอบความสูญเสียกำลังในชีท และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน (Loss Factor of Sheath and Screen : λ_1)

ค่าตัวประกอบความสูญเสียในชีท และสกรีนมีสาเหตุมาจากกระแสไหลวน (Circulating Current : λ_1') และกระแสเอ็ดดี้ (Eddy Current : λ_1'') ที่ไหลอยู่ในชีท และสกรีนสามารถหาค่าตัวประกอบความสูญเสีย λ_1 ได้จาก

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (3.10)$$

ในการคำนวณหาค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และลักษณะการวางสาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

3.3.1 สายแกนเดี่ยว 2 เส้น และ 3 เส้นวางแบบสามเหลี่ยม มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และมีการสลัหาย

เนื่องจากกระแสเอ็ดดี้สำหรับลักษณะสาย และการวางสายแบบนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ [9] ดังนั้นค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนมีค่าเฉพาะ λ_1 ซึ่งเป็นค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนมีสาเหตุมาจากกระแสไหลวน ดังนี้

$$\lambda_1 = \lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2} \right] \quad (3.11)$$

โดยที่

$$X = 2\omega \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad (3.12)$$

$$d = \sqrt{d_M \times d_m} \quad (3.13)$$

เมื่อ R_s = ความต้านทานของซีท หรือสกรีนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายที่อุณหภูมิทำงานสูงสุด (Ω/m)

R = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำที่อุณหภูมิทำงานสูงสุด (Ω/m)

X = ค่ารีแอกแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของซีท หรือสกรีน (Ω/m)

S = ระยะห่างระหว่างแกนกลางของตัวนำ (mm.)

ω = ความเร็วเชิงมุม มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ (rad)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีท (mm.)

d_M = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของซีท (mm.)

d_m = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของซีท (mm.)

3.3.2 สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และมีการสลัหาย

$$\lambda_1 = \lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2} \right] \quad (3.14)$$

โดยที่

$$X_1 = 2\omega \times 10^{-7} \ln \left[2 \times \sqrt[3]{2} \left(\frac{S}{d} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$d = \sqrt{d_M \times d_m} \quad (3.16)$$

เมื่อ X_1 = รีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของซีท (Ω/m)

3.3.3 สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และไม่มี การสลับสาย

ระยะจากสายเคเบิลเส้นกลางไปสู่เคเบิลอีก 2 เส้น มีระยะเท่ากัน ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนจึงมีค่าค่อนข้างสูงเพราะว่าสายเคเบิลด้านนอกจะเป็นเฟสล้าหถึง ดังนั้นจะได้

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (3.17)$$

$$\lambda_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (3.18)$$

$$\lambda_{1m} = \frac{R_s}{R} \left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right) \quad (3.19)$$

โดยที่

$$P = X + X_m \quad (3.20)$$

$$Q = X - \left(\frac{X_m}{3} \right) \quad (3.21)$$

$$X = 2\omega \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad (3.22)$$

$$X_m = 2\omega \times 10^{-7} \ln 2 \quad (3.23)$$

เมื่อ λ_{11} = ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนของสายเคเบิลด้านนอกเส้นที่ 1

λ_{12} = ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนของสายเคเบิลด้านนอกอีกเส้นหนึ่ง

λ_{1m} = ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนของสายเคเบิลเส้นกลาง

X_m = ค่า Mutual Reactor ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลระหว่างซีทของสายเคเบิลด้านนอก กับตัวนำของสายที่เหลืออีกสองเส้น (Ω/m)

3.3.4 สายแกนเดี่ยว 1 เส้น มีการต่อขีทลงกรวด์ และที่จุดปลายมีการสลัปลายกรวด์ทำในลักษณะนี้จะทำให้ค่ากระแสไหลวนมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\lambda_1 = \lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_o (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (3.24)$$

โดยที่

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6) \quad (3.25)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}} \quad (3.26)$$

เมื่อ ρ_s = ความต้านทานฉนวนไฟฟ้าจำเพาะของขีท (Electrical Resistivity of Sheath) (Ω/m)

D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขีท (mm)

t_s = ความหนาของขีท (mm)

$\omega = 2\pi f$ (rad/sec)

β_1 = สัมประสิทธิ์การสูญเสียกระแสไหลวน (Coefficient of Eddy Current Losses)

$\lambda_o, \Delta_1, \Delta_2$ = สัมประสิทธิ์การใช้งาน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการวางสาย และลักษณะของสายซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ [11]

1) สายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม

$$\lambda_o = 3 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (3.27)$$

$$\Delta_1 = (1.14m^{2.45} + 0.33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.66)} \quad (3.28)$$

$$\Delta_2 = 0$$

2) สายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ

ก) สายเคเบิลเส้นกลาง

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (3.29)$$

$$\Delta_1 = 0.86m^{3.08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.4m+0.7)} \quad (3.30)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (3.31)$$

ข) สายเคเบิลเส้นนอกที่เป็นเฟสหน้า

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (3.32)$$

$$\Delta_1 = 4.7m^{0.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.6m+2)} \quad (3.33)$$

$$\Delta_2 = 21m^{3.3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.47m+5.06)} \quad (3.34)$$

ค) สายเคเบิลเส้นนอกที่เป็นเฟสหลัง

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (3.35)$$

$$\Delta_1 = -\frac{0.74(m+2)m^{0.5}}{2+(m-0.3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)} \quad (3.36)$$

$$\Delta_2 = 0.97m^{3.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)} \quad (3.37)$$

3.4 ค่าตัวประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเครื่องห่อหุ้ม (Power Loss Factor in Armour : λ_2)

สายเคเบิลแบบ 3 แกน มีเครื่องห่อหุ้มเป็นลวดโลหะ แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 กรณี คือ

3.4.1 สายเคเบิลเป็นตัวนำแบบกลม (Round)

จะไม่มี การแก้ไขด้วยค่าปรับแต่ง (F Factor) เมื่อตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า หรือเท่ากับ 400 ตารางเมตร สามารถหาค่ากำลังสูญเสียของเครื่องห่อหุ้มฉนวน λ_2 ได้จากสมการที่ (3.38)

$$\lambda_2 = 1.23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2C}{d_A} \right)^2 \left[\frac{1}{\left(\frac{2.77R_A \times 10^6}{\omega} \right)^2 + 1} \right] \quad (3.38)$$

เมื่อ R_A = ความต้านทานของเครื่องห่อหุ้มที่อุณหภูมิการทำงานสูงสุด (Ω/m)

d_A = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเครื่องห่อหุ้ม (mm)

C = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำ และศูนย์กลางของเคเบิล (mm)

3.4.2 สายเคเบิลเป็นตัวนำแบบเซกเตอร์ (Sector)

$$\lambda_2 = 0.358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2.77R_A \times 10^6}{\omega} \right)^2 + 1} \quad (3.39)$$

เมื่อ r_1 = รัศมีโคจรรอบตัวนำทั้ง 3 แกน (mm)

3.5 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

จากวงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าค่าความต้านทานความร้อนของส่วนต่าง ๆ ของสายเคเบิลได้คิด แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีท (T_1) ความต้านทานความร้อนระหว่างซีทกับเครื่องห่อหุ้ม (T_2) ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล (T_3) และความต้านทานความร้อนระหว่างผิวฉนวนเปลือกนอกของสายถึงพื้นผิวดิน (T_4) สำหรับชั้นของสกรีนนั้นถ้าเป็นเทปโลหะให้พิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของตัวนำซีท ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำให้พิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของฉนวน

3.5.1 ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีท (T_1)

ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีทขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนเป็นสำคัญโดย

1) สายเคเบิลแกนเดี่ยว

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (3.40)$$

เมื่อ ρ_T = ความต้านทานความร้อนของฉนวน (km/W) [10]

d_c = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

t_1 = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำกับซีท สำหรับซีทที่เป็นรอนนั้น t_1 จะมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเฉลี่ยของซีท (mm)

12) สายเคเบิล 3 แกนแบบเข็มขัด

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (3.41)$$

เมื่อ G = แฟกเตอร์เรขาคณิตขึ้นอยู่กับขนาด และรูปแบบของตัวนำ

3) สายเคเบิล 3 แกนแบบมีสกรีนเทปโลหะ

เคเบิลแบบนี้ พิจารณาเช่นเดียวกับในกรณีสายเคเบิลแบบเข็มขัด แต่ค่า $\frac{t_1}{t} = 0.5$ โดยที่ t คือค่าความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำ ดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่า T_1 ต้องคูณกับค่าแฟกเตอร์ K ซึ่งเรียกว่า Screening Factor ดังนั้นจะได้ว่า

$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (3.42)$$

3.5.2 ความต้านทานความร้อนระหว่างชีทกับเครื่องห่อหุ้ม (T_2)

สำหรับสายเคเบิลชนิด 1 แกน ชนิด 2 แกน และชนิด 3 แกน ที่มีชีทโลหะจะได้

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_s} \right) \quad (3.43)$$

เมื่อ t_2 = ความหนาของ Bedding (mm)

D_s = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของชีท (mm)

ρ_T = ความต้านทานความร้อนของชีท (km/W)

3.5.3 ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล (T_3)

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right) \quad (3.44)$$

เมื่อ t_3 = ความหนาของเปลือกนอกของสายเคเบิล (mm)

D'_a = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเครื่องห่อหุ้ม (mm)

ρ_T = ความต้านทานความร้อนของเครื่องห่อหุ้ม (km/W)

3.5.4 ความต้านทานความร้อนระหว่างฉนวนเปลือกนอกของสายถึงผิวพื้นดิน (T_4)

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4 \quad (3.45)$$

เมื่อ T'_4 = ความต้านทานความร้อนระหว่างสายเคเบิลกับท่อ

T_4'' = ความต้านทานความร้อนระหว่างผนังคู่ผนังของท่อ

T_4''' = ความต้านทานความร้อนภายนอกของท่อถึงผิวพื้นดิน

1) ความต้านทานความร้อนระหว่างสายเคเบิลกับท่อ (T_4')

ค่า T_4' สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.46) ซึ่งใช้สำหรับสายเคเบิลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25-100 มม. ร้อยในท่อร้อยสาย และใช้คำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของอากาศที่อยู่ระหว่างสายเคเบิลกับผิวของท่อเหล็ก รวมทั้งใช้ในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลย์ของสายเคเบิล 3 เส้นในท่อเหล็กมีค่าระหว่าง 75-125 มม. ในส่วนของค่าคงที่ของตัวแปร U , V และ Y มีค่าเป็นดังตารางที่ 3.1

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (3.46)$$

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของตัวแปร U , V และ Y

INSTALLATION CONDITION	U	V	Y
IN METALLIC CONDUIT	5.20	1.40	0.011
IN FIBRE DUCT IN CONCRETE	5.20	0.91	0.01
IN ASBESTOS CEMENT DUCT IN CONCRETE	5.20	1.10	0.011
GAS PRESSURE CABLE IN PIPE	0.95	0.46	0.0021
OIL PRESSURE PIPE-TYPE CABLE	0.26	0.00	0.0026
EARTHENWARE DUCTS	1.87	0.28	0.0036

เมื่อ U , V , Y = ค่าคงที่ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการติดตั้ง

D_e = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (mm)

θ_m = อุณหภูมิระหว่างสายเคเบิลกับท่อ (mm)

2) ความต้านทานความร้อนระหว่างผนังคู่ผนังของท่อ (T_4'')

ในกรณีที่เป็ท่อเดี่ยวไม่มีคอนกรีตหุ้ม รัศมีภายนอกของท่อจะรวมถึงวัสดุคลุม ปกป้องหรือหุ้มท่อด้วย ถ้าเป็นท่อเดี่ยวมีคอนกรีตหุ้มต้องสมมติให้ตัวกลางที่อยู่ด้านนอกท่อมียค่าความต้านทานความร้อนเท่ากับของคอนกรีตหุ้มท่อนั้น

$$T_4'' = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(\frac{D_o}{D_d}\right) \quad (3.47)$$

เมื่อ D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ (mm)

D_d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายในของท่อ (mm)

ρ_T = ความต้านความร้อนตามชนิดของท่อ (km/W)

3) ความต้านทานความร้อนภายนอกของท่อถึงผิวพื้นดิน

$$T_4^m = \frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln(\mu + \sqrt{\mu^2 - 1}) \quad (3.48)$$

เมื่อ N = จำนวนสายเคเบิลในท่อร้อยสาย (เส้น)

ρ_e = ความต้านความร้อนของดิน (km/W) [9], [10]

ρ_c = ความต้านความร้อนของคอนกรีต (km/W) [9], [10]

โดยที่
$$\mu = \frac{L_G}{r_b} \quad (3.49)$$

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \left(\frac{x}{2} \right) \quad (3.50)$$

เมื่อ L_G = ความลึกของท่อร้อยสายจากผิวพื้นดิน (mm)

r_b = รัศมีของท่อคอนกรีต (mm)

x = ความกว้างของท่อร้อยสาย (mm)

y = ความยาวของท่อร้อยสาย (mm)

3.6 การคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

กำหนดให้ V_S = แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (V)

V_R = แรงดันไฟฟ้าของโหลด (V)

I_S = กระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (A)

I_L = กระแสไฟฟ้าโหลด (A)

$\cos \theta_S$ = ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (องศา)

$\cos \theta_R$ = ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลด (องศา)

$$\text{Voltage Drop} = I_L \times Z \quad (3.51)$$

$$\% \text{Voltage Regulation} = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 \quad (3.52)$$

$$\% \text{Efficiency} = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} = \frac{\sqrt{3} V_R \times I_R \times \cos \theta_R}{\sqrt{3} V_S \times I_S \times \cos \theta_S} \quad (3.53)$$

บทที่ 4

การคำนวณหาค่าในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

ในการติดตั้งสายเคเบิลนั้นไม่ว่าจะเดินสายในท่อ หรือในภาคสายเคเบิลจะต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ. ในการติดตั้งได้แก่ ค่าแรงดึงสูงสุด (Tension), ค่าแรงกดบนสายเคเบิลเนื่องจากผนังท่อ (Sidewall Pressure), เปอร์เซ็นต์คอนดุกทิล (Percent Conduit Fill), การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ (Jamming) และระยะปลอดภัย (Clearance) เป็นหลัก [10], [7]

ขนาดของท่อเป็นหลักการขั้นพื้นฐานในคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์คอนดุกทิล การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ และระยะปลอดภัย ส่วนค่าแรงดึงที่ยอมรับได้นั้นจะถูกกำหนดจากค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของแรงดึงจากอุปกรณ์ที่ใช้ โดยแรงดึงในการดึงสายเคเบิลในท่อนั้นจะถูกคำนวณแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ ถ้าค่าแรงดึงที่ใช้ในการดึงสายเคเบิลมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของสาย ก็จะต้องทำการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดึงใหม่ให้น้อยกว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ มิฉะนั้นสายเคเบิลอาจจะได้รับความเสียหายเพราะตัวนำก็เป็นชิ้นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของสายเคเบิลซึ่งจะต้องสามารถทนรับแรงดึงโดยปราศจากความเสียหาย โดยไม่ต้องใช้ เปลือกหุ้มฉนวนโลหะ เทป หรือเครื่องห่อหุ้มมาช่วย และหลังจากที่ทำการคำนวณหาค่าแรงดึงที่ต้องการได้แล้วจะต้องทำการคำนวณหาค่าแรงกดบนเคเบิลเนื่องจากผนังท่อ

ขั้นตอน และหลักการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินภายในท่อมีย่ลาคับดังนี้

- 1) หลังจากที่ได้ขนาดของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาดของท่อ และชนิดของท่อ จากการออกแบบตามมาตรฐาน IEC 287 แล้ว จึงนำค่าต่าง ๆ ที่ได้มาคำนวณหาค่าของเปอร์เซ็นต์คอนดุกทิล ค่าการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินภายในท่อ และค่าระยะปลอดภัย
- 2) เลือกค่าองศาการโค้งของท่อ ขนาดของท่อ รัศมีท่อโค้ง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจาก Data Sheets ของท่อในแต่ละชนิด
- 3) หาน้ำหนักของสายเคเบิล (W) จาก data sheets ของสายที่ต้องการ
- 4) คำนวณหาค่า Weight Correction Factor (w)
- 5) คำนวณหาค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้
- 6) คำนวณหาค่าแรงดึงที่ใช้ในการลากสาย (T) และค่าแรงกดจากผนังท่อ (Sidewall Pressure : SP) ทุก ๆ เซ็กเมนต์ (Segment)
- 7) เปรียบเทียบค่าแรงดึงที่ใช้ในการลากสาย กับค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้
- 8) เปรียบเทียบค่าของแรงกดจากผนังท่อที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐาน

4.1 แรงดึง (TENSION)

การคำนวณหาค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของสายเคเบิลสามารถคำนวณโดยพิจารณาจากจำนวนตัวนำในสาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สายชนิดตัวนำเดี่ยว (Single Conductor) และสายชนิดหลายตัวนำ (Multiple Conductor) สายทั้งสองชนิดนี้มีสมการในการคำนวณดังนี้

กำหนดให้

$$S = \text{ค่าความเค้นของตัวนำ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$A = \text{ค่าพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (mm}^2\text{)}$$

$$N = \text{จำนวนตัวนำ}$$

$$T_{cable} = \text{ค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของสายเคเบิล (kg)}$$

$$T_c = \text{ค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของตัวนำ (kg)}$$

$$T_m = \text{ค่าแรงดึงสูงสุดที่ใช้ (น้อยกว่าค่า } T_{cable} \text{)}$$

4.1.1 แรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ของสายเคเบิล (T_{cable})

แบ่งตามจำนวนตัวนำในสายได้ดังนี้

- 1) สายชนิดตัวนำเดี่ยว คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1)

$$T_{cable} = T_c$$

เมื่อ

$$T_c = S \times A \quad (4.1)$$

- 2) สายชนิดหลายตัวนำ แบ่งออกเป็น

- ก) สายชนิดตัวนำน้อยกว่า หรือเท่า 3 ตัวนำ คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.2)

$$T_{cable} = N \times T_c \quad (4.2)$$

- ข) สายชนิดตัวนำมากกว่า 3 ตัวนำ คำนวณโดยใช้สมการที่ (4.3)

$$T_{cable} = 0.8 \times N \times T_c \quad (4.3)$$

ในกรณีที่ตั้งสายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้นพร้อมกัน ทั้งแบบสามเหลี่ยม (Trefoil หรือ Triangular) และแบบราบ (Flat หรือ Cradle) ค่าจำนวนตัวนำ N มีค่าเท่ากับ 2 เพราะอาจจะมีสายตัวนำเพียง 2 เส้นเท่านั้นที่รับแรงดึงรวมทั้งหมด และควรจำกัดค่า T_m ไว้ที่ 60 % ของค่าที่คำนวณได้ ส่วนค่าความเค้น (Stress : S) นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำซึ่งมีรายละเอียดเป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความเค้นสูงสุดของตัวนำที่ยอมรับได้ (Maximum Allowable Conductor Stress)

ชนิดของตัวนำ	kg/mm ²
ทองแดง	7.1583
อลูมิเนียม	5.3687

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

- 1) กรณีลากสายเคเบิล 1 เส้น ค่า T_{cable} มีค่าเท่ากับ 7.164 เท่าของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ
- 2) กรณีลากสายเคเบิล 3 เส้นค่า T_{cable} มีค่าเท่ากับ 8.60 เท่าของพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ 1 เส้น

4.1.2 แรงดึงตามลักษณะแนวการดึง

การคำนวณหาค่าแรงดึงของสายเคเบิลที่ผ่านท่อออกมานั้น ในการคำนวณขึ้นอยู่กับลักษณะการดึง ลักษณะของท่อ แนวการวางท่อ และโครงสร้างของการวางสาย [7], [11]

กำหนดให้ T_{in} = ค่าแรงดึงในท่อ (kg)

$$\text{ในกรณีที่เป็นลักษณะของแรงดึงขึ้น } T_{in} = WL(w\mu\cos\theta + \sin\theta)$$

$$\text{ในกรณีที่เป็นลักษณะของแรงดึงลง } T_{in} = WL(w\mu\cos\theta - \sin\theta)$$

T_{out} = ค่าแรงดึงที่ผ่านท่อออกมา (kg)

w = ค่าองค์ประกอบกรปรับแก้น้ำหนัก

μ = ค่า ส.ป.ส.ความเสียดทาน

W = น้ำหนักรวมของสายเคเบิล (kg/km)

L = ความยาวของท่อตรง

θ = มุมของท่อตรงจากแนวราบ (radians)

ϕ = มุมของท่อ โค้ง (radians)

R = ระยะของรัศมีทางโค้งของท่อ

$e = 2.718$

- 1) แรงดึงในท่อตรงในแนวราบ (Horizontal Straight Section)

$$T_{out} = w\mu WL + T_{in} \quad (4.4)$$

- 2) แรงดึงในท่อตรงในแนวเอียงแนวตั้ง (Inclined and Vertical Straight Section) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- ก) แรงดึงขึ้นทางตรง (Pulling Up A Straight Section)

$$T_{out} = WL(\sin\theta + w\mu\cos\theta) + T_{in} \quad (4.5)$$

- ข) แรงดึงลงทางตรง (Pulling Down A Straight Section)

$$T_{out} = -WL(\sin\theta - w\mu\cos\theta) + T_{in} \quad (4.6)$$

- 3) แรงดึงในท่อ โค้งในแนวราบ (Horizontal Bend Section)

$$T_{out} = T_{in}(\cosh w\mu\phi) + (\sinh w\mu\phi) \times \sqrt{T_{in}^2 + (WR)^2} \quad (4.7)$$

4) แรงดึงในท่อน้อยขึ้นในแนวตั้ง (Vertical Concave Up Bend) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) แรงดึงขึ้นในท่อน้อย (Pulling Up Through A Bend)

$$T_{out} = k' \times [2w\mu \sin \phi - (1 - (w\mu)^2) \times (e^{w\mu\phi} - \cos \phi)] \quad (4.8)$$

$$\text{เมื่อ } k' = T_{in} e^{w\mu\phi} - \frac{WR}{1 + (w\mu)^2}$$

ข) แรงดึงลงในท่อน้อย (Pulling Down Through A Bend)

$$T_{out} = k' \times [2w\mu e^{w\mu\phi} \sin \phi + (1 - (w\mu)^2) \times (1 - e^{w\mu\phi} \cos \phi)] \quad (4.9)$$

5) แรงดึงในท่อน้อยลงในแนวตั้ง (Vertical Concave Down Bend)

ก) แรงดึงขึ้นในท่อน้อย (Pulling Up Through A Bend)

$$T_{out} = k'' \times [2w\mu e^{w\mu\phi} \sin \phi + (1 - (w\mu)^2) \times (1 - e^{w\mu\phi} \cos \phi)] \quad (4.10)$$

$$\text{เมื่อ } k'' = T_{in} e^{w\mu\phi} + \frac{WR}{1 + (w\mu)^2}$$

ข) แรงดึงลงในท่อน้อย (Pulling Down Through A Bend)

$$T_{out} = k'' \times [2w\mu \sin \phi - (1 - (w\mu)^2) \times (e^{w\mu\phi} - \cos \phi)] \quad (4.11)$$

6) ค่าแรงดึงประมาณในท่อน้อย (Commonly Used Approximation for Bend)

ในการคำนวณหาค่าแรงดึงในท่อน้อยนั้น อาจจะใช้สมการที่ (4.12) ซึ่งเป็นสมการคำนวณหาค่าแรงดึงประมาณในท่อน้อยนี้แทนการคำนวณหาค่าแรงดึงในท่อน้อยในสมการที่กล่าวมาในข้างต้นได้

$$T_{out} = T_{in} \times e^{w\mu\phi} \quad (4.12)$$

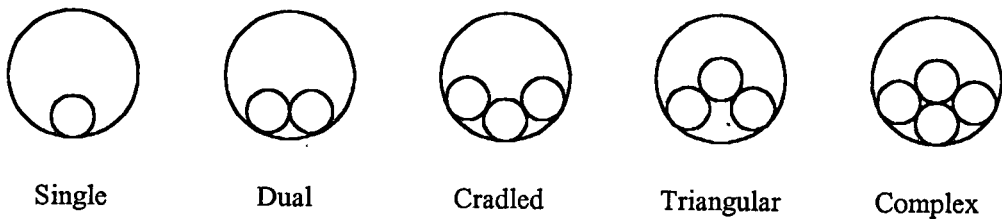
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) เป็นค่าที่ได้จากการลากสายเคเบิลผ่านท่อซึ่งจะเกิดความฝืดระหว่างสายกับท่อน้อย ความฝืดนี้ก็คือค่า μ นั้นเอง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้มีผลกระทบต่อค่าแรงดึง โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของสาย ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficients of Dynamic Friction : μ)

ชนิดเปลือกนอก ของสายเคเบิล	ชนิดของท่อ			
	โลหะ หรืออลูมิเนียม	พีวีซี	ไฟเบอร์	ซีเมนต์คอนกรีต
PVC	0.40	0.35	0.5	0.5
PE	0.35	0.35	0.5	0.5
CHPE	0.50	0.50	0.7	0.6
XLPE	0.35	0.35	0.5	0.5
Nylon	0.40	0.35	0.5	0.5
CPE	0.50	0.50	0.7	0.6

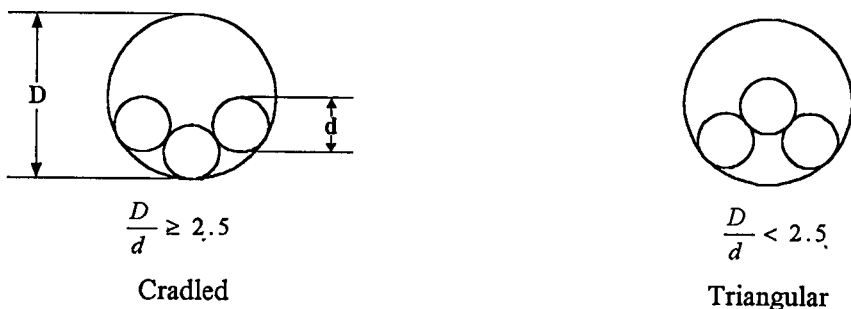
4.1.2.1 โครงร่างลักษณะการจัดวางสาย

โครงร่างการวางสายเคเบิลมีผลกระทบต่อค่าแรงดึงของสาย เนื่องจากค่าองค์ประกอบการปรับแก้หน้าหนักของสาย (w) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดึงตามลักษณะแนวการดึงนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางสายซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะการจัดวางสายเคเบิล

โครงร่างลักษณะการจัดวางสายเคเบิลชนิดตัวนำเดี่ยววาง 3 เส้นในท่อเดียวกันสามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางตัวใดตัวหนึ่งของสายเคเบิล หรือเรียกว่า $\frac{D}{d}$ Ratio



รูปที่ 4.2 โครงร่างลักษณะการจัดวางตัวนำ 3 เฟส สาย 3 เส้นในท่อเดียวกัน

การวางสายในท่อแบบระนาบจะใช้เมื่อสายเคเบิลแบบตัวนำเดี่ยววาง 3 เส้นในท่อเดียวกัน (Three Single Conductor) มีค่า $\frac{D}{d}$ Ratio มากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 และการวางแบบสามเหลี่ยมจะใช้เมื่อสายเคเบิลแบบ 3 ตัวนำมีค่า $\frac{D}{d}$ Ratio น้อยกว่า 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.2

4.1.2.2 ค่าองค์ประกอบการปรับแก้น้ำหนัก (Weight Correction Factor : w)

ค่าองค์ประกอบการปรับแก้น้ำหนักที่ถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางสายเคเบิลภายในท่อ สามารถแบ่งวิธีการคำนวณหาค่าองค์ประกอบการปรับแก้น้ำหนักได้ดังนี้

1) สายเคเบิลจัดวางแบบเดี่ยว (Single)

$$w = 1 \quad (4.13)$$

2) สายเคเบิลจัดวางแบบสามเหลี่ยม (Triangular)

$$w = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{d}{D-d}\right]^2}} \quad (4.14)$$

3) สายเคเบิลจัดวางแบบระนาบ (Cradled)

$$w = 1 + \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{d}{D-d}\right]^2 \quad (4.15)$$

4) สายเคเบิลที่มีมากกว่า 3 เส้นจัดวางแบบซ้อนกัน (Complex)

$$w = 1 + 2 \left[\frac{d}{D-d}\right]^2 \quad (4.16)$$

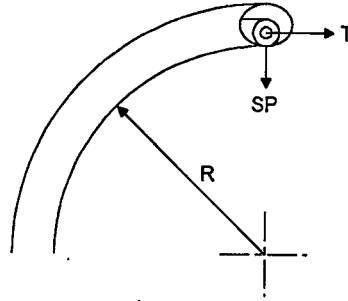
เมื่อ w = องค์ประกอบการปรับแก้น้ำหนัก

D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

d = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสาย

4.2 แรงกดกับผนังท่อ (Sidewall Pressure : SP)

เป็นค่าแรงกดบนสายเคเบิลอันเนื่องจากผนังท่อ ซึ่งเกิดจากการดึงสายผ่านท่อโค้งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.3 ค่าแรงกดกับผนังท่อนี้สามารถทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหายได้ สามารถคำนวณค่าได้จากความสัมพันธ์ของแรงดึงที่ดึงออกมาจากท่อโค้ง ระยะของรัศมีท่อโค้ง และน้ำหนักรวมของสายเคเบิล สำหรับสายหลายตัวนำ สายควบคุม และสายแกนเดี่ยวขนาด # 6 AWG ยอมให้มีค่าแรงกดสูงสุดของผนังท่อ 500 lb/ft หรือ 743.95 kg/m และสำหรับสายแกนเดี่ยวขนาด #8 AWG โดยทั่วไปมีค่า 300 lb/ft หรือ 446.37 kg/m ซึ่งมีรายละเอียดเป็นดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะของแรงกดกับผนังท่อที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงกดกับผนังท่อสูงสุดที่แนะนำ [33]

Cable Type	SP (kg/m)
600 V. Non Shielded	446.37
600 V.& 1kV. Non Shielded	743.95
5 – 15 kV.	743.95
25 – 35 kV.	446.37
Interlocked Armored Cable (All Voltage Class)	446.37

จากมาตรฐานของ ANSI/IEEE 525 – 1987 ให้คำแนะนำว่าค่าแรงกดกับผนังท่อที่เหมาะสมควรใช้ค่าประมาณ 450 kg/m

ค่าแรงกดกับผนังท่อสามารถคำนวณได้จากลักษณะ และ โครงสร้างการวางสายตามสมการข้างล่างดังนี้

1) สายตัวนำเดี่ยว หรือตัวนำหลายตัวนำมีปลอก (Jacket) หุ้มร่วมกัน

$$SP = \frac{T}{R} \quad (4.17)$$

2. สายตัวนำเดี่ยววาง 3 เส้น แบบราบ

$$SP = (3w - 2) \frac{T}{3R} \quad (4.18)$$

3. สายตัวนำเดี่ยววาง 3 เส้น แบบสามเหลี่ยม

$$SP = w \frac{T}{2R} \quad (4.19)$$

4. สายตัวนำเดี่ยววาง 4 เส้น แบบซ้อนกัน

$$SP = \left(\frac{w-1}{2R} \right) T \quad (4.20)$$

เมื่อ T = แรงดึงที่ดึงออกมาจากท่อโค้ง (kg)

R = รัศมีของท่อโค้ง (m)

w = องค์กรประกอบการปรับแก้หน้าหนัก

SP = แรงกดกับผนังท่อ (kg/m)

4.3 เปอร์เซ็นต์คอนดุกทิล (Percent Conduit Fill)

เปอร์เซ็นต์คอนดุกทิลเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ภายในท่อที่บรรจุสาย เมื่ออ้างอิงตามคำแนะนำของ ANSI/IEEE Std. 525-1987 ค่าเปอร์เซ็นต์คอนดุกทิลควรมีค่า $\%Fill \leq 40\%$ เพื่อจะพิจารณาว่าสายเคเบิลทั้งหมดใช้พื้นที่ไปมากกว่า 40% ของพื้นที่ในท่อหรือไม่ซึ่งจะไปสอดคล้องกันกับการเบียดเสียดของสายในท่อ หรือ jamming สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ (4.21) ข้อมูลต่างๆ ของท่อเหล็กและรัศมีท่อโค้งเป็นดังแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของท่อเหล็ก (Rigid Conduit Information)

Trade size (cm)	Area (cm ²)	40% Area (cm ²)	53% Area (cm ²)	ID (cm)	OD (cm)
1.2715	1.94	0.77	1.03	1.683	2.136
1.9073	3.42	1.35	1.81	2.095	2.670
2.5430	5.55	2.19	2.97	2.668	3.331
3.1788	9.68	3.87	5.16	3.509	4.221
3.8145	13.16	5.29	6.97	4.094	4.032
5.0860	21.68	8.65	11.48	5.256	6.027
6.3575	30.90	12.39	16.39	6.279	7.298
7.6290	47.61	19.03	25.23	7.802	8.901
8.9000	68.87	25.55	33.87	9.023	10.172
10.172	82.06	32.84	43.48	10.238	11.444
12.715	129.03	51.61	68.39	12.835	14.139
15.258	186.39	74.84	98.74	15.423	16.835

ตารางที่ 4.5 รัศมีท่อโค้ง (Sweep Elbow Radius)

Elbow Centerline Radius (cm)	30.52	38.15	45.77	61.03	76.29	91.55	106.8	122.1
Conduit Size (cm)	Elbow inside Radius (m)							
2.543	0.293	0.369	0.445	0.598	0.750	0.903	1.055	1.208
3.178	0.287	0.363	0.439	0.592	0.744	0.897	1.049	1.202
3.814	0.284	0.360	0.436	0.589	0.741	0.894	1.046	1.199
5.086	0.278	0.354	0.430	0.583	0.735	0.888	1.040	1.193
6.357		0.351	0.427	0.580	0.732	0.885	1.037	1.190
7.629			0.418	0.570	0.723	0.875	1.028	1.180
8.900			0.412	0.564	0.717	0.869	1.022	1.174
10.172				0.558	0.711 ¹	0.863	1.016	1.168
12.715					0.698	0.851	1.003	1.156
15.258						0.839	0.991	1.144

$$\%Fill = \frac{\sum Cable.Area}{Cross.Section.of.Duct.Area} \times 100\%$$

$$\%Fill = \frac{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \times N \times 100\%$$

$$\%Fill = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \times N \times 100\% \quad (4.21)$$

เมื่อ d = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (cm)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ (cm)

N = จำนวนของสายเคเบิล

4.4 การเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อ (Jamming)

การเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อ (Jamming) เป็นแรงอัดของสายเคเบิลที่มี 3 สาย หรือมากกว่าเมื่อถูกดึงภายในท่อ อัตราส่วนการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อ (Jam Ratio) เป็นอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (D) กับเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล

(d) ค่าอัตราส่วนการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อเป็นสิ่งที่จะต้องสนใจเพราะว่าการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินที่เกิดขึ้นในท่อ สามารถที่จะทำให้สายเคเบิลหนึ่งเส้น หรือมากกว่าได้รับความเสียหาย ค่าอัตราส่วนการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อมักคำนวณได้ดังสมการที่ (4.22)

$$Jam.Ratio = \frac{D}{d} \quad (4.22)$$

ในกรณีที่มีสายเคเบิล 3 เส้น ในท่อมักมีค่าเปอร์เซ็นต์คอนดักทิลเท่ากับ 40% จะทำให้มีค่าการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อเท่ากับ 2.74 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นควรที่จะเพิ่มรัศมีภายในของท่อโค้งอีกประมาณ 5% เนื่องจากในช่วงโค้งท่อจะมีลักษณะเป็นวงรี การเพิ่มขนาดของท่ออีก 5% นี้จะทำให้ค่าอัตราส่วนการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อมักมีค่าเท่ากับ 2.87 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสม จากคำแนะนำของ ANSI/IEEE Std. 525-1987 ค่าที่เหมาะสมของการเบียดเสียดของสายเคเบิลใต้ดินในท่อมักมีค่าตั้งแต่ 2.8 ถึง 3.0 ($2.8 \leq JamRatio \leq 3.0$)

4.5 ระยะปลอดภัย (Clearance : CL)

ระยะปลอดภัยเป็นระยะห่างระหว่างส่วนบนสุดของสายเคเบิลในท่อกับส่วนบนสุดของพื้นผิวภายในท่อ ค่าระยะห่างนี้จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ การคำนวณหาค่าระยะปลอดภัยขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางสายเคเบิล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) สายเคเบิลเส้นเดี่ยว (Single)

$$CL = D - d \quad (4.23)$$

2) สายเคเบิล 3 เส้น วางแบบซ้อนกันสามเส้น หรือวางแบบสามเหลี่ยม (Triplexes or Triangular)

$$CL = \frac{D}{2} - 1.366d + \left(\frac{D-d}{2} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{d}{D-d} \right]^2} \right) \quad (4.24)$$

3) สายเคเบิล 3 เส้น วางแบบระนาบ (Cradled)

$$CL = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} + \left(\frac{D-d}{2} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{d}{2(D-d)} \right]^2} \right) \quad (4.25)$$

เมื่อ d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (cm)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (cm)

บทที่ 5

การวิเคราะห์แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จ

5.1 ลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

เนื่องจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินนั้นสายเคเบิลอยู่ใต้ดิน ถ้าฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถผ่าลงมาที่สายได้ ดังนั้นสาเหตุของการเกิดแรงดันเสิร์จในสายเคเบิลใต้ดินจะเกิดได้จาก 2 สาเหตุดังรายละเอียดข้างล่าง การเกิดแรงดันเสิร์จจากสองกรณีนี้แตกต่างกันตรงลักษณะของรูปคลื่นที่เกิดขึ้น

- 1) เกิดจากฟ้าผ่าที่สายเดินในอากาศโดยตรงแล้วเกิดคลื่นเดินทางผ่านเข้ามาในสายเคเบิลใต้ดิน
- 2) เกิดจากการเหนี่ยวนำจากฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงกับสายเดินในอากาศแล้วเกิดคลื่นเดินทางผ่านเข้ามาในสายเคเบิลใต้ดิน

ในการคำนวณคลื่นเดินทางในสายสามเฟสมีลักษณะที่ซับซ้อนมากกว่าในสายเฟสเดียว เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าร่วมเพิ่มเข้ามาทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าอนุพันธ์อันดับสองของแรงดันในแต่ละเฟสมีผลมาจากแรงดันในเฟสอื่นด้วย ดังนั้นวิธีการคำนวณที่ช่วยให้คำนวณค่าคลื่นเดินทางในแต่ละเฟสโดยใช้เมตริกซ์การแปลงด้วยการแทนค่าพารามิเตอร์ในสายด้วยโหมดของการกระจาย (Mode of Propagation) มีผลทำให้ค่าแรงดันในแต่ละโหมดไม่มีผลร่วมกัน คือมีความอิสระต่อกัน ดังนั้นค่าความสูญเสียจะสามารถหาได้ในแต่ละโหมดเช่นเดียวกับการคำนวณแบบเฟสเดียว วิธีการคำนวณคลื่นเดินทางในระบบหลายตัวนำโดยใช้โหมดของการกระจายได้ถูกเสนอโดย Fortescue เพื่อช่วยในการคำนวณหาค่าความเร็วของการกระจายคลื่น (Velocity of Propagation) การลดค่า (Attenuation) และค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) โดยทำการหาค่าเมตริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) $[T]$ และ $[T]^{-1}$ เพื่อแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทาน เสิร์จอิมพีแดนซ์ และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งใช้ในการหาลักษณะของการกระจายของคลื่น โดยจะแปลงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix)

5.1.1 โหมดของการกระจาย

แบ่งโหมดของการกระจายออกเป็น 3 โหมด ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ผลจากการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน (Mutual Interaction) ของสายจะกระจายไปในโหมดการกระจายทั้งหมดโดยไม่ขึ้นต่อกัน พฤติกรรมของปริมาณทั้งหมดในแต่ละโหมดสามารถวิเคราะห์ได้ และปริมาณในแต่ละเฟสจะสามารถหาได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ [17]

ก) โหมดที่ 1 (Mode 1) เป็นองค์ประกอบของค่าไอเกิน $[1 \ 1 \ 1]$ ในโหมดแรกนี้พบว่าตัวนำทั้งสามมีพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ประจุไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเท่ากันหมด

และทั้งหมดยังมีเครื่องหมายหรือขั้วตรงกันด้วย ดังนั้นในโหมดการกระจายนี้กระแสไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับในพื้นดิน รวมทั้งค่าพลังงานลัพท์จะลดลงมากเพราะความต้านทานในดิน ดังนั้นจึงเรียกการกระจายในโหมดนี้ว่าไลน์ทูกราวนด์โหมด (Line-to-ground Mode) หรือ โฮโมโพลาร์โหมด (Homopolar Mode)

ข) โหมดที่ 2 (Mode 2) เป็นองค์ประกอบของค่าไอเกิน $[1 \ 0 \ -1]$ ในกรณีการกระจายนี้จะพบเฉพาะในเฟสที่อยู่ด้านนอกเท่านั้น โดยในเฟสตรงกลางจะไม่มีการกระจายของคลื่นเกิดขึ้น และเนื่องจากระบบเป็นระบบปิดซึ่งเกี่ยวข้องกับเฟสด้านนอกเท่านั้น จึงทำให้กราวด์ไม่มีส่วนร่วมในการกระจาย นั่นคือ การลดลงของค่าต่าง ๆ มีค่าน้อยกว่าในโหมดที่ 1 เรียกโหมดที่สองนี้ว่า ไลน์ทูลินโหมดชนิดที่หนึ่ง (Line-to-Line Mode of the 1st Kind) หรือ เฟส-เฟสโหมด (Phase-phase Mode)

ค) โหมดที่ 3 (Mode 3) โหมดนี้เป็นเวกเตอร์ไอเกินสุดท้ายคือ $[1 \ -2 \ 1]$ พบว่าเวกเตอร์ไอเกินนี้มาจากความสัมพันธ์เดียวกับค่าไอเกินในลำดับ 2 ของขั้นตอนการทำเมตริกซ์ทะแยงมุม ซึ่งสามารถหาค่าเวกเตอร์ไอเกินที่เป็นองค์ประกอบได้มากมาย โดยเวกเตอร์ไอเกิน $[1 \ -2 \ 1]$ มีความหมายคือ จะเป็นเฟสด้านนอกเท่านั้นที่ส่งกระแสไปโดยมีเฟสตรงกลางเป็นส่วนย้อนกลับและจะไม่มีกราวด์ร่วมในโหมดนี้ ดังนั้นจึงเรียกโหมดนี้ว่า ไลน์ทูลินโหมดชนิดที่สอง (Line-to-line Mode of the 2nd Kind) หรือ อินเตอร์เฟสโหมด (Interphase Mode)

Mode 1	Mode 2	Mode 3
● ● ●	● ● ●	● ● ●
+1 +1 +1	+1 0 -1	+1 -2 +1

รูปที่ 5.1 สภาวะของโหมดการกระจายของสายสามเฟส

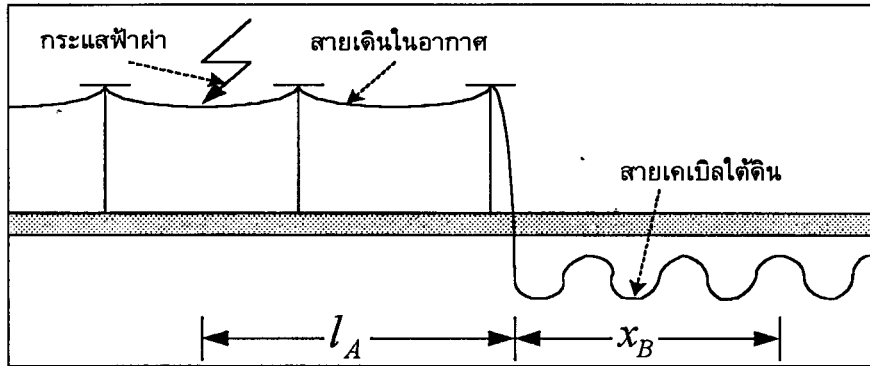
แนวคิดในเรื่องโหมดการกระจายจะมีประโยชน์มากในเรื่องของ

- 1) การออกแบบอุปกรณ์ตัวนำในกรณีที่เกิดการลดค่า (Attenuation) ของสัญญาณ และการเพี้ยน (Distortion) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการกำหนดการรับและการส่งกำลังไฟฟ้า
- 2) การกระจายของเสิร์จเนื่องจากสวิตชิงและฟ้าผ่าในสายซึ่งทำให้เกิดสภาวะแรงดันเกิน และควบคุมการออกแบบระยะห่างของฉนวน
- 3) ระดับการกวนคลื่นวิทยุซึ่งเกิดจากโคโรนาในตัวนำซึ่งกระจายบนตัวนำเหนือระนาบพื้นดิน

5.2 แรงดันเสิร์จที่เกิดจากฟ้าผ่าที่สายเดินในอากาศโดยตรง

การเกิดแรงดันเสิร์จในสายเคเบิลใต้ดินในกรณีที่เกิดจากการที่มีฟ้าผ่ามาที่สายเดินในอากาศโดยตรงจะมีผลทำให้กระแสฟ้าผ่าที่เข้ามาในสาย วิ่งไปยังสายเคเบิลใต้ดินซึ่งต่ออยู่กับสายเดินใน

อากาศ โดยสมมติว่าสายเคเบิลในอากาศและสายเคเบิลต่อกันดังรูปที่ 5.2 เมื่อ I_A เป็นระยะทางจากจุดเกิดฟ้าผ่าจนถึงจุดต่อของสายเคเบิลในอากาศกับสายเคเบิลใต้ดิน และ X_B เป็นระยะทางของสายเคเบิลใต้ดินจากจุดต่อระหว่างสายเคเบิลในอากาศกับสายเคเบิลใต้ดินจนถึงจุดที่ต้องการพิจารณา ทั้งนี้จะไม่คิดผลของอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester) นั่นคือพิจารณาในเงื่อนไขที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าทุกชนิดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน



รูปที่ 5.2 การต่อสายเคเบิลในอากาศและสายเคเบิลใต้ดินเข้าด้วยกัน

กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ความต้านทาน, ความเหนี่ยวนำ และ ความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลในอากาศมีค่าเป็น $[R_{ov,abc}]$, $[L_{ov,abc}]$ และ $[C_{ov,abc}]$ ส่วนในสายเคเบิลใต้ดินมีค่า $[R_{ug,abc}]$, $[L_{ug,abc}]$ และ $[C_{ug,abc}]$ ตามลำดับ กระแสเสิร์จที่เกิดขึ้น $i(t)$ จะมีค่าเป็นดังสมการที่ (5.1) [17]

$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (5.1)$$

เมื่อ $i(t)$ = กระแสเสิร์จ (A)

I_0 = กระแสสูงสุด (A)

t = เวลาใดๆ ที่พิจารณา (sec)

t_0 = เวลาที่จะเกิดผลจากฟ้าผ่ามายังสายส่ง

α = ค่าคงตัวเวลาก่อนน้ำคลื่น (sec^{-1})

β = ค่าคงตัวเวลาหลังคลื่น (sec^{-1})

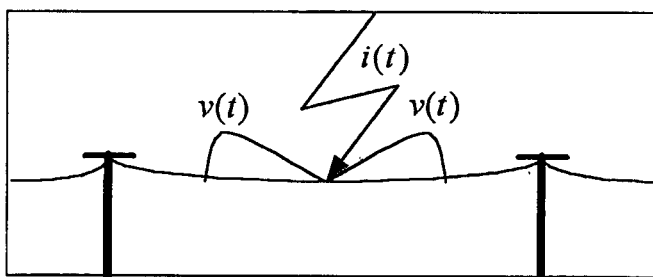
สำหรับแรงดันอิมพัลส์แบบต่าง ๆ ค่า α และ β เป็นดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่สำหรับแรงดันรูปคลื่นอิมพัลส์แบบต่าง ๆ

T_1/T_2	α	β
1.2/5	1250000	287356
1.2/50	2469135	14598
1.2/200	2624672	3521
250/2500	16000	317

5.2.1 แรงแดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในสายเดินในอากาศ

เมื่อฟ้าผ่าลงมาที่สายเดินในอากาศในเฟสใดเฟสหนึ่ง ในที่นี้กำหนดให้เป็นเฟส a ซึ่งจะมีผลเหมือนกันกับการเกิดฟ้าผ่าในเฟสอื่นอันเป็นผลจากการวางสลับสาย กระแสฟ้าผ่า หรือกระแสเสิร์จจะถูกฉีดเข้าไปในเฟส a และแยกไหลไปสองทิศทางดังรูปที่ 5.3 จากรูปจะเห็นว่ากระแสเสิร์จที่แยกไหลในสายเดินในอากาศทำให้เกิดแรงแดันเสิร์จในสายทั้งสองทิศทางด้วย สมการของกระแสที่เข้าไปในสายเดินในอากาศในเฟส a ที่เวลา t มีค่าเป็นดังสมการที่ (5.2)



รูปที่ 5.3 กระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแยกไหลไปสองทิศทาง

$$i(t) = \left[\frac{I_o}{2} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \right] U(t) \quad (5.2)$$

เมื่อ $U(t)$ เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (Unit Step Function)

$$U(t) = 0 \text{ เมื่อ } t < 0 \text{ และ } U(t) = 1 \text{ เมื่อ } t > 0$$

หาเมตริกซ์กระแสเริ่มต้นของกระแสฟ้าผ่าในสายเดินในอากาศทั้งสามเฟส (i_{abc}) คือ

$$[i_{abc}] = \begin{bmatrix} \frac{I_o}{2} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

เมื่อ $[T]$ เป็นเมตริกซ์ยูนิทารี (Unitary) มีค่าเป็นดังสมการที่ (5.4) ดังนั้นการหาอินเวอร์สเมตริกซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (5.5) ซึ่งจะได้ค่าของอินเวอร์สเมตริกซ์ยูนิทารีเป็นดังสมการที่ (5.6)

$$[T] = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{3} & 0 & -2/\sqrt{6} \\ 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{6} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$[T]^{-1} = [T]^t \quad (5.5)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{2} & 0 & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{6} & -2/\sqrt{6} & 1/\sqrt{6} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

แปลงให้อยู่ในรูปของโหมดการกระจาย จะได้ว่ากระแสเริ่มต้นที่ฉีดเข้าไปในแต่ละโหมด ($i_{0\alpha\beta}$) เป็นดังสมการที่ (5.7) [17]

$$\begin{aligned}
 [i_{0\alpha\beta}] &= [T]^{-1} [i_{abc}] \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{I_0}{2}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})U(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 i_{0\alpha\beta} &= \begin{bmatrix} \frac{I_0}{2\sqrt{3}}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})U(t) \\ \frac{I_0}{2\sqrt{2}}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})U(t) \\ \frac{I_0}{2\sqrt{6}}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})U(t) \end{bmatrix} \quad (5.7)
 \end{aligned}$$

ค่าลิมิตอิมพีแดนซ์ ($Z_{ov,0\alpha\beta}$) เป็นดังสมการที่ (5.8)

$$[Z_{ov,0\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{L_s + 2L_m}{C_s + 2C_m}} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

ค่าความเร็วของคลื่น ($V_{ov,0\alpha\beta}$) เป็นดังสมการที่ (5.9)

$$[V_{ov,0\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{(L_s + 2L_m)(C_s + 2C_m)}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{(L_s - L_m)(C_s - C_m)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{(L_s - L_m)(C_s - C_m)}} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันลิมิตที่เกิดจากฟ้าผ่าที่จุดเริ่มต้นได้จาก

$$[v_{0\alpha\beta}] = [z_{0\alpha\beta}][i_{0\alpha\beta}]$$

$$[v_{0\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{L_s + 2L_m}{C_s + 2C_m}} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{3}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} \\ \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{2}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} \\ \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{6}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

รูปคลื่นที่ระยะ x จากจุดเกิดฟ้าผ่าจะเกิดรูปคลื่นฟ้าผ่าช้ากว่าจุด x_A/V_0 กำหนดคลื่นเป็นเวลาในโหมด 0, x_A/V_α กำหนดคลื่นเป็นเวลาในโหมด α และ x_A/V_β กำหนดคลื่นเป็นเวลาในโหมด β และการลดค่าของกระแสฟ้าผ่า ดังนั้นตัวแปร t ในแต่ละโหมดในสมการที่ (5.10) จะต้องแทนด้วย $t - (x_A/V_0)$, $t - (x_A/V_\alpha)$ และ $t - (x_A/V_\beta)$ ในโหมด 0, α และ β ตามลำดับ และต้องคูณด้วยตัวประกอบของการลดค่าดังนั้นแรงดันและกระแสที่ตำแหน่ง x และเวลา t ต่าง ๆ ในสายเคเบิลในอากาศสามารถหาได้จากสมการที่ (5.11) และสมการที่ (5.12) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเป็นดังนี้คือ

$$[v_{ov,\alpha\beta}(x_a, t)] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{L_s + 2L_m}{C_s + 2C_m}} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{3}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} U\left(t - \frac{x_A}{V_{ov,o}}\right) e\left(-\frac{R_{ov,o} + G_{ov,o} Z_{ov,o}}{2Z_{ov,o}}\right) \\ \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{2}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} U\left(t - \frac{x_A}{V_{ov,\alpha}}\right) e\left(-\frac{R_{ov,\alpha} + G_{ov,\alpha} Z_{ov,\alpha}}{2Z_{ov,\alpha}}\right) \\ \sqrt{\frac{L_s - L_m}{C_s - C_m}} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{6}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} U\left(t - \frac{x_A}{V_{ov,\beta}}\right) e\left(-\frac{R_{ov,\beta} + G_{ov,\beta} Z_{ov,\beta}}{2Z_{ov,\beta}}\right) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$[i_{ov,\alpha\beta}(x_a, t)] = \begin{bmatrix} \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{3}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} U\left(t - \frac{x_A}{V_{ov,o}}\right) e\left(-\frac{R_{ov,o} + G_{ov,o} Z_{ov,o}}{2Z_{ov,o}}\right) \\ \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{2}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} U\left(t - \frac{x_A}{V_{ov,\alpha}}\right) e\left(-\frac{R_{ov,\alpha} + G_{ov,\alpha} Z_{ov,\alpha}}{2Z_{ov,\alpha}}\right) \\ \left\{ \frac{I_o}{2\sqrt{6}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) U(t) \right\} U\left(t - \frac{x_A}{V_{ov,\beta}}\right) e\left(-\frac{R_{ov,\beta} + G_{ov,\beta} Z_{ov,\beta}}{2Z_{ov,\beta}}\right) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

หลังจากได้เมตริกซ์แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในรูปของโหมดการกระจายในสายเคเบิลในอากาศก็จะสามารถหาแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในแต่ละเฟสได้โดยการคูณเมตริกซ์การแปลง $[T]$ เพื่อให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในแต่ละเฟส ค่าของแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในแต่ละเฟส เป็นดังสมการที่ (5.13) และสมการที่ (5.14) ตามลำดับ [19]

$$[v_{abc}] = [T][v_{\alpha\beta}] \quad (5.13)$$

$$[i_{abc}] = [T][i_{\alpha\beta}] \quad (5.14)$$

5.2.2 แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในสายเคเบิลใต้ดิน

สมการของแรงดันเมื่อวิ่งเข้าสู่สายเคเบิลใต้ดินสามารถหาได้จากการคูณสมการที่ (5.1) ด้วยสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน และเปลี่ยนเทอมเวลา $t - (x_A / V_{ov})$ ในทุกโหมดไปเป็น $t - (l_A / V_{ov}) - (x_B / V_{ug})$ และเปลี่ยนเทอมการลดค่าในสายเคเบิลในอากาศทุกโหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ $e^{-\left(\frac{R_{ov} + G_{ov}Z_{ov}}{2Z_{ov}}\right)}$ โดยเพิ่มเทอมการลดค่าในสายเคเบิลใต้ดินเข้าไปด้วยเป็น $e^{-\left(\frac{R_{ov} + G_{ov}Z_{ov}}{2Z_{ov}}\right)} e^{-\left(\frac{R_{ug} + G_{ug}Z_{ug}}{2Z_{ug}}\right)}$ โดยค่า $R_{ov}, L_{ov}, C_{ov}, G_{ov}$ เป็นค่าตัวแปรในสายเคเบิลในอากาศในแต่ละโหมด และ $R_{ug}, L_{ug}, C_{ug}, G_{ug}$ เป็นค่าตัวแปรในสายเคเบิลใต้ดินในแต่ละโหมด, l_A เป็นระยะทางจากจุดที่เกิดฟ้าผ่าไปจนถึงจุดต่อของสายเคเบิลในอากาศและสายเคเบิลใต้ดิน

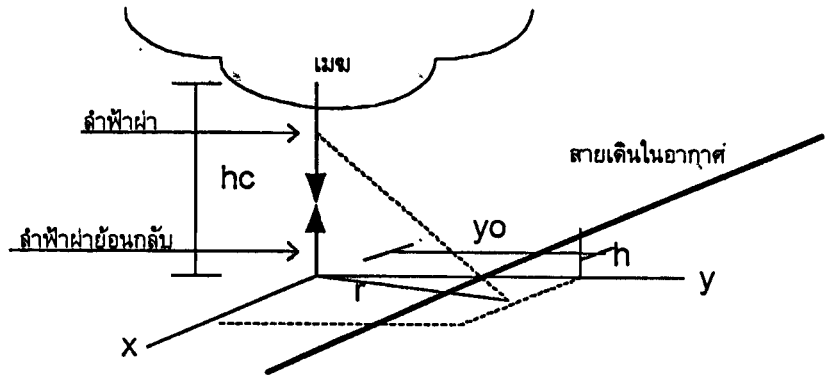
หลังจากได้เมตริกซ์แรงดันและกระแสในรูปของโหมดการกระจายในสายเคเบิลใต้ดินแล้ว จะสามารถแปลงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์แรงดันและกระแสในแต่ละเฟส โดยการคูณเมตริกซ์การแปลง $[T]$ เช่นเดียวกับการหาค่าแรงดันและกระแสในสายเคเบิลในอากาศก็จะสามารถหาค่าตอบของแรงดันและกระแสในแต่ละเฟสได้

5.3 แรงดันเสิร์จที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียง

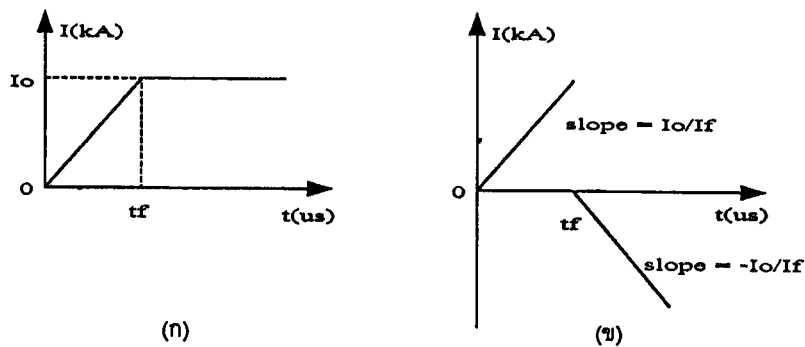
การเกิดแรงดันเสิร์จในสายเคเบิลใต้ดินในลักษณะนี้ เกิดจากการที่มีฟ้าผ่าลงดินในบริเวณใกล้เคียงกับสายเคเบิลในอากาศทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำที่สายเคเบิลในอากาศ และเกิดแรงดันเสิร์จขึ้น จากนั้นแรงดันเสิร์จที่เกิดขึ้นจะเดินทางเข้ามาในสายเคเบิลใต้ดิน โดยสมมติว่าสายเคเบิลในอากาศและสายเคเบิลต่อกันดังรูปที่ 5.1 เช่นเดียวกับกรณีแรก และยังพิจารณาในเงื่อนไขที่ไม่คิดผลของอุปกรณ์กับดักฟ้าผ่า

5.3.1 แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในสายเคเบิลในอากาศ

การคำนวณค่าแรงดันเสิร์จในสายเคเบิลในอากาศที่เกิดขึ้นนี้ นำมาจากวิเคราะห์ของ P. Chowdhuri [12], [19] ซึ่งทำการวิเคราะห์หาสมการแรงดันที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าสมการแรงดันที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าโดยตรง โดยมีลักษณะของการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.4 และเพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ ได้มีการสมมติรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าย้อนกลับเป็นลักษณะสมการเชิงเส้นแทนที่จะเป็นสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยรูปที่ 5.5 (ก) เป็นองค์ประกอบของกระแสฟ้าผ่าแบบเชิงเส้น และรูปที่ 5.5 (ข) เป็นองค์ประกอบของกระแสฟ้าผ่าย้อนกลับแบบเชิงเส้น



รูปที่ 5.4 ตำแหน่งโคออดิเนตของสายตัวนำ และ แท่งฟ้าผ่า



รูปที่ 5.5 ลักษณะรูปคลื่นแท่งฟ้าผ่าย้อนกลับในแบบสมการเชิงเส้น

ในการคำนวณผลของแรงดันไฟฟ้าจะคำนวณแยกจากกระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วน แล้วนำผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากกระแสทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นค่าแรงดันเล็วจีที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (5.15)

$$v(x, t) = v_1(x, t)U(t - t_0) + v_2(x, t)U(t - t_{of}) \quad (5.15)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าในเทอมแรกส่วนของแรงดันไฟฟ้า $v_1(x, t)U(t - t_0)$ เป็นผลจากกระแส $\alpha U(t)$ และในเทอมหลังส่วนของแรงดันไฟฟ้า $v_2(x, t)U(t - t_{of})$ เป็นผลมาจากกระแส $-\alpha(t - t_f)U(t - t_f)$ สามารถหาค่า $v_1(t)$ และ $v_2(t)$ ได้ดังนี้

$$v_2(x, t) = -f0[\ln(f12a) - \ln(f11a) + 0.5\ln(f13a) + 2\beta \ln(f15a)] \quad (5.16)$$

$$v_1(x, t) = f0[\ln(f12) - \ln(f11) + 0.5\ln(f13) + 2\beta \ln(f15)] \quad (5.17)$$

- เมื่อ
- c = ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ
 - h = ความสูงของสายเดินในอากาศเหนือพื้นดิน
 - h_c = ความสูงของเมฆเหนือพื้นดิน

I_0 = กระแสสูงสุด

x = ระยะทางบนสายส่งที่ห่างจากจุดที่ใกล้จุดเกิดฟ้าผ่าที่สุด ไปยังจุดที่พิจารณา

t = เวลาที่พิจารณา

t_0 = เวลาที่จะเกิดผลจากฟ้าผ่ามายังสายส่ง

t_f = เวลาค้นคืนของกระแสฟ้าผ่า

y_0 = ระยะทางที่น้อยสุดจากสายไปยังถ้าฟ้าผ่า

α = อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสฟ้าผ่า

β = อัตราส่วนของความเร็วของถ้าฟ้าผ่าต่อความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ

จะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$b_0 = 1 - \beta^2; t_{of} = t_0 + t_f; t_{of} = t - t_f$$

$$f_0 = \frac{Z_0 I_0}{4\pi t_f \beta c}$$

$$f_1 = m_1 + (ct - x)^2$$

$$f_2 = m_1 - (ct - x)^2 - y_0^2$$

$$f_3 = m_0 + y_0^2 - (ct)^2$$

$$f_4 = n_1 + (ct + x)^2$$

$$f_5 = n_1 + (ct + x)^2 - y_0^2$$

$$f_6 = n_1 - (ct + x)^2 + y_0^2$$

$$f_8 = n_0 + y_0^2 - (ct_0 + x)^2$$

$$f_9 = b_0(\beta^2 x^2 + y_0^2) + \beta^2 c^2 t^2 (1 + \beta^2)$$

$$f_{10} = 2\beta^2 ct [\beta^2 c^2 t^2 + b_0(x^2 + y_0^2)]^{1/2}$$

$$f_{11} = \frac{c^2 t^2 - x^2}{y_0^2}$$

$$f_{12} = \frac{f_9 - f_{10}}{b_0^2 y_0^2}$$

$$f_{13} = \frac{f_1 f_3 f_5 f_7}{f_2 f_4 f_6 f_8}$$

$$f_{14} = \frac{b_0(x^2 + y_0^2)}{\beta^2 c^2}$$

$$f_{15} = \frac{t + \sqrt{t^2 + f_{14}}}{t_0 + \sqrt{t_0^2 + f_{14}}}$$

$$f1a = m1a + (ct_f - x)^2 - y_0^2$$

$$f2a = m1a - (ct_f - x)^2 + y_0^2$$

$$f3a = f3; f4a = f4; f7a = f7; f8a = f8$$

$$f5a = n1a + (ct_f + x)^2 - y_0^2$$

$$f6a = n1a + (ct_f + x)^2 + y_0^2$$

$$f9a = b_0(\beta^2 x^2 + y_0^2) + \beta^2 ct_f + b_0(1 + \beta^2)$$

$$f10a = 2\beta^2 ct_f [\beta^2 c^2 t_f^2 + b_0(x^2 + y_0^2)]^{1/2}$$

$$f11a = \frac{c^2 t_f^2 - x^2}{y_0^2}$$

$$f12a = \frac{f9a - f10a}{b_0^2 y_0^2}$$

$$f13a = \frac{f1a f3a f5a f7a}{f2a f4a f6a f8a}$$

$$f15a = \frac{t_f + \sqrt{t_f^2 + f14}}{t_0 + \sqrt{t_0^2 + f14}}$$

$$m0 = \left[\left\{ (ct_0 - x)^2 + y_0^2 \right\}^2 + 4h_c^2 (ct_0 - x)^2 \right]^{1/2}$$

$$m1 = \left[\left\{ (ct - x)^2 + y_0^2 \right\}^2 + 4h_c^2 (ct - x)^2 \right]^{1/2}$$

$$n0 = \left[\left\{ (ct_0 + x)^2 + y_0^2 \right\}^2 + 4h_c^2 (ct_0 + x)^2 \right]^{1/2}$$

$$n1 = \left[\left\{ (ct + x)^2 + y_0^2 \right\}^2 + 4h_c^2 (ct + x)^2 \right]^{1/2}$$

$$m1a = \left[\left\{ (ct_f - x)^2 + y_0^2 \right\}^2 + 4h_c^2 (ct_f - x)^2 \right]^{1/2}$$

$$n1a = \left[\left\{ (ct_f + x)^2 + y_0^2 \right\}^2 + 4h_c^2 (ct_f + x)^2 \right]^{1/2}$$

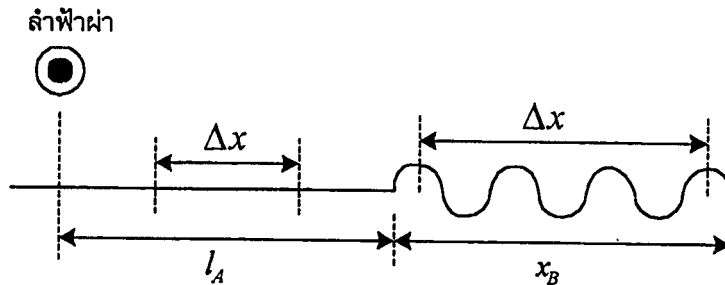
ส่วนค่ากระแสเสียงสามารถหาได้จากสมการ

$$i(x, t) = \frac{v(x, t)}{Z_0}$$

(5.18)

จากการวิเคราะห์ของ A.C. Liew และ S.C. Mar ได้มีการพิสูจน์ว่าค่าของแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงนี้ไม่มีผลต่อเฟสข้างเคียง ดังนั้นในการวิเคราะห์ที่แรงดันเสิร์จที่เกิดขึ้นจะแยกคิดแต่ละเฟสโดยไม่จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์แบบโหมคของการกระจาย

5.3.2 แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จในสายเคเบิลใต้ดิน



รูปที่ 5.6 การเดินทางของคลื่นในสายเคเบิลในอากาศและสายเคเบิลใต้ดิน

เมื่อคลื่นแรงดันและกระแสเดินทางเข้าไปในสายเคเบิลใต้ดิน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในส่วนของความเร็ว และขนาดของคลื่น เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของแรงดันเสิร์จในสายเคเบิล (v_B) ช้ากว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ในสายเคเบิลในอากาศ ($v_A = c$) ดังนั้นในการเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง Δx ในสายเคเบิลในอากาศและสายเคเบิลใต้ดินดังแสดงในรูปที่ 5.6 เวลาที่คลื่นเดินทางในสายเคเบิลในอากาศมีค่าเท่ากับ $\Delta x/c$ ส่วนเวลาที่คลื่นเดินทางในสายเคเบิลใต้ดินมีค่าเป็น $\Delta x/v_B$ ซึ่งสามารถอธิบายการเลื่อนรูปคลื่นได้ดังนี้

- 1) ฟังก์ชัน $(ct - x)$ ในตัวแปรย่อย f_1, f_2, f_{11}, m_1 จะต้องเลื่อนเวลาไปด้วยค่ากลายเป็น $\left\{ c \left[t - \frac{x_B}{v_B} \right] - l_A \right\}$
- 2) ฟังก์ชัน $(ct + x)$ ในตัวแปรย่อย f_5, f_6, f_{11}, n_1 จะเป็นการเลื่อนเวลาย้อนกลับอีกด้านหนึ่ง และต้องเลื่อนย้อนกลับในสายเคเบิลด้วยเวลา $-x_B/v_B$ กลายเป็น $\left\{ c \left[t - \frac{x_B}{v_B} \right] + l_A \right\}$
- 3) ตัวแปร t_0 เป็นเวลาเริ่มต้นที่เสิร์จจะเดินทางเข้ามาในสายเคเบิลในอากาศ แต่ในสายเคเบิลใต้ดิน t_0 จะมีค่าคงที่คือ $t_0 = \frac{\sqrt{l_A^2 + y_0^2}}{c}$
- 4) เนื่องจาก t_0 มีค่าคงที่ ดังนั้นฟังก์ชัน $(ct_0 - x)$ และ $(ct_0 + x)$ ในตัวแปรย่อย $f_3, f_4, f_7, f_8, m_0, n_0$ จะมีค่าคงที่หลังจากคลื่นเดินทางเข้าไปในสายเคเบิลใต้ดิน โดยจะเปลี่ยนเป็นฟังก์ชัน $(ct_0 - l_0)$ และ $(ct_0 + l_0)$ ตามลำดับ
- 5) ตัวแปร t ในตัวแปรย่อย f_9, f_{10}, f_{15} ต้องมีการเลื่อนเวลาออกไปเป็น $t - x_B/v_B$

- 6) หลังจากที่เกิดคลื่นเดินทางเข้าสู่สายเคเบิล ตัวแปร x ในตัวแปรย่อย $f9, f10, f14, f9a, f10a$ จะมีค่าคงที่ โดยเปลี่ยนเป็น l_A
- 7) ฟังก์ชัน $(ct_f - x)$ ในตัวแปรย่อย $f1a, f2a, f11a, m1a$ จะต้องเลื่อนเวลาไปด้วยค่า $-x_B/v_B$ กลายเป็น $\left\{c\left(t - \frac{x_B}{v_B}\right) - l_A\right\}$
- 8) ฟังก์ชัน $(ct_f + x)$ ในตัวแปรย่อย $f5a, f16a, f11a, n1a$ จะเป็นการเลื่อนเวลาซ้อนกลับอีกด้านหนึ่ง และต้องเลื่อนย้อนกลับด้วยเวลา $-x_B/v_B$ กลายเป็น $\left\{c\left(t - \frac{x_B}{v_B}\right) + l_A\right\}$
- 9) ตัวแปร t_f ในตัวแปรย่อย $f9a, f10a, f15a$ จะต้องมีการเลื่อนเวลาออกไปเป็น $t_f - x_B/v_B$

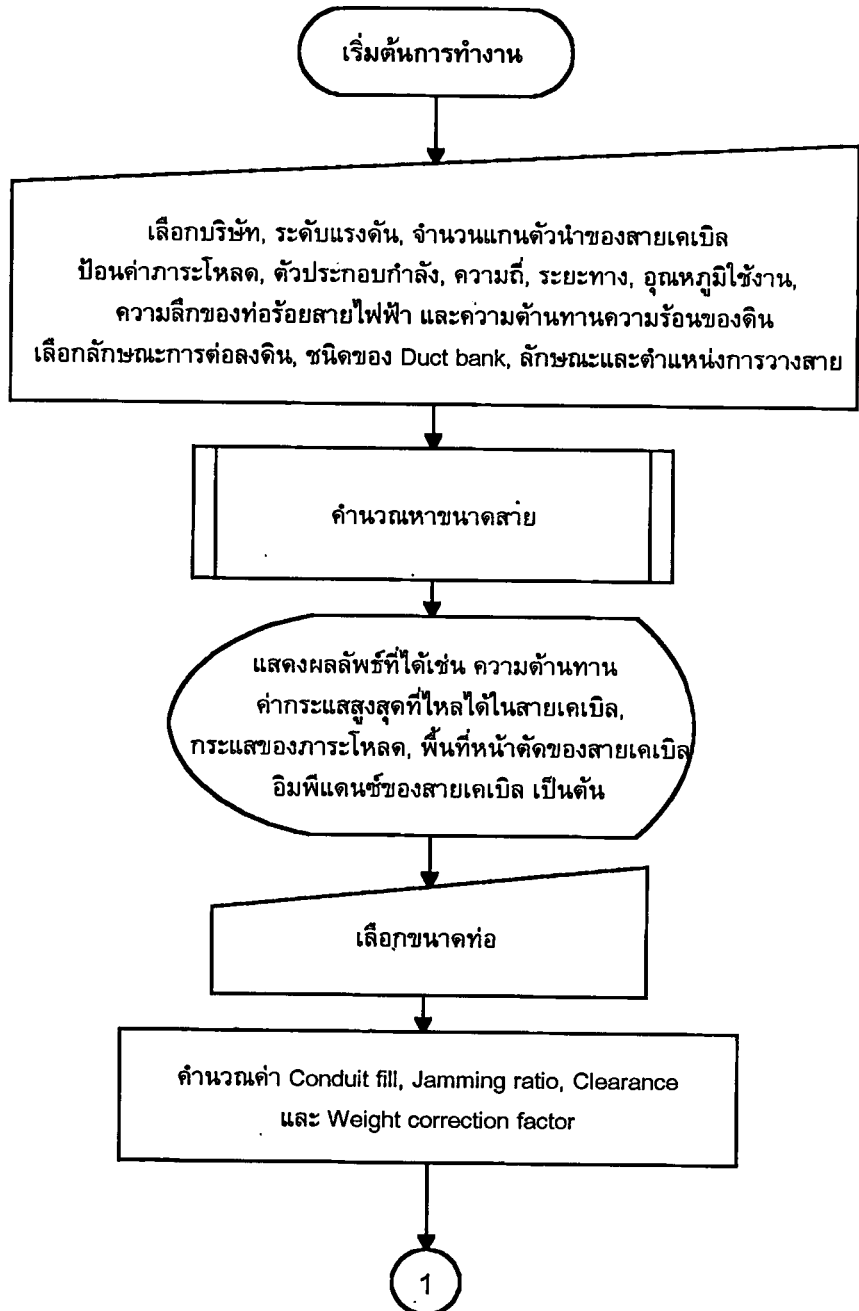
ส่วนขนาดของคลื่นที่เดินทางเข้ามาในสายเคเบิลได้คิดก็จะเกิดการเปลี่ยนขนาดเนื่องจากค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป และมีการคำนวณค่าตัวประกอบการลดค่า รูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้น ณ. เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากการเลื่อนเวลา และระยะทางดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองรูปคลื่นต่อไป

บทที่ 6

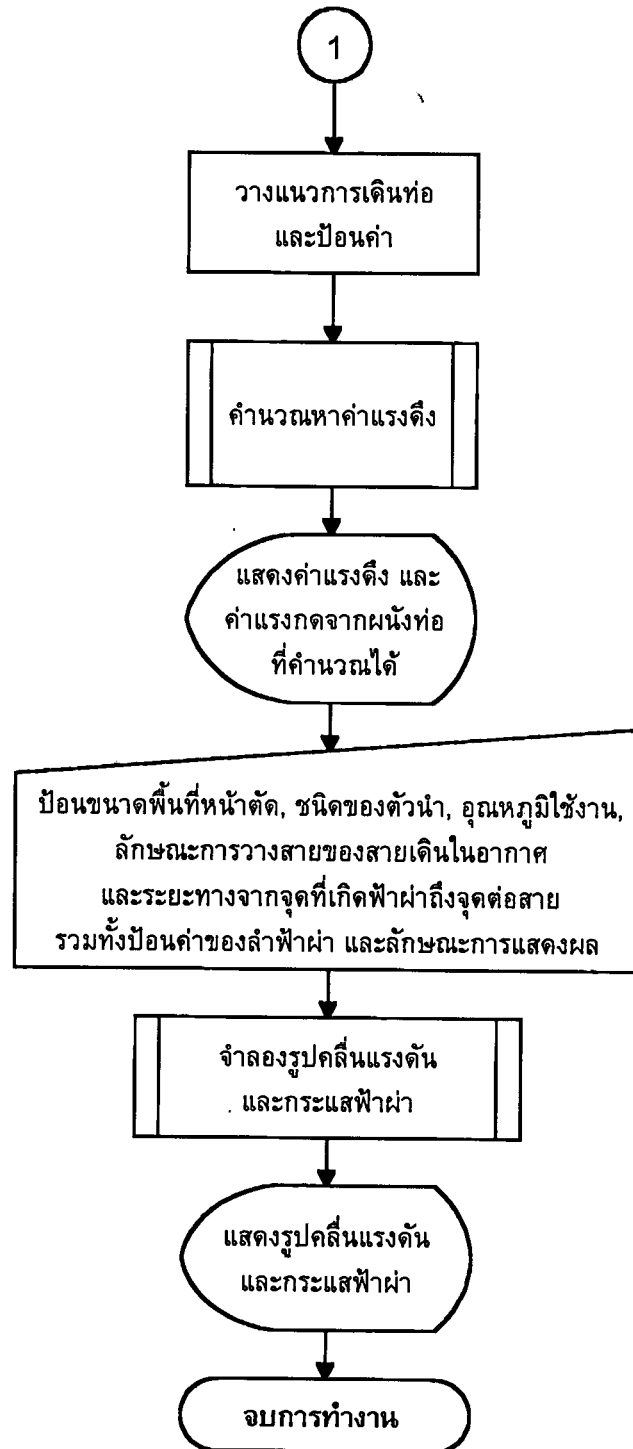
โพลีวาร์ต และผลการทำงานของโปรแกรม

6.1 โพลีวาร์ตการทำงานของโปรแกรม

6.1.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก (ต่อ)

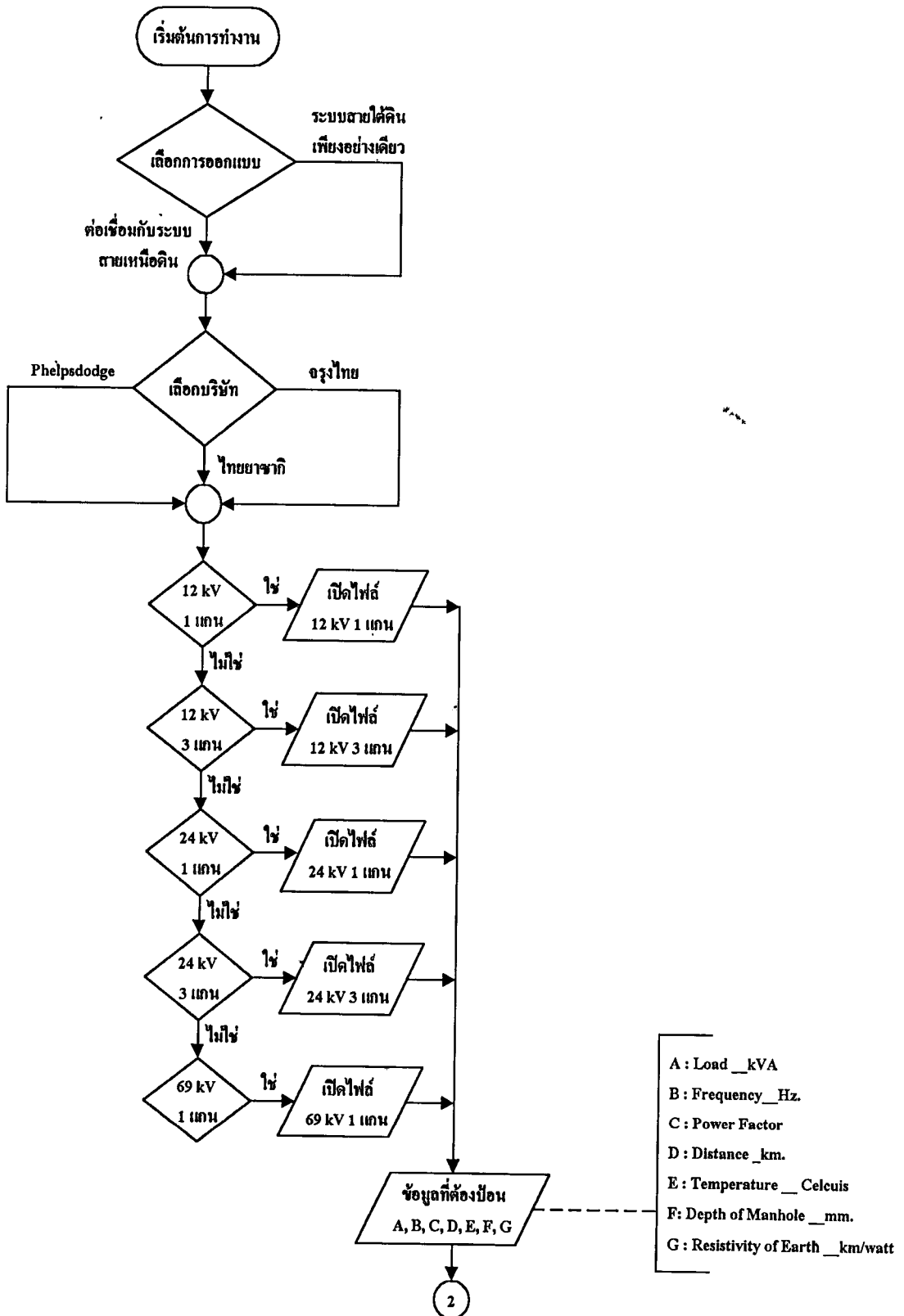
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดินนั้นมีขั้นตอนหลักเป็นดังรูปที่ 6.1 โดยเริ่มจากการที่ผู้ออกแบบทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่บริษัท ระดับแรงดันไฟฟ้า จำนวนแกนของตัวนำของสายเคเบิล พิกัดต่างๆ ทางไฟฟ้าของภาระโหลด ลักษณะการต่อลงดิน คุณสมบัติและลักษณะของท่อร้อยสายเคเบิล ความต้านทานของดิน รวมทั้งลักษณะ และตำแหน่งการวางสาย หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มคำนวณหาขนาดของสายเคเบิลที่เหมาะสม และ

แสดงผลที่ได้มาบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นผู้ใช้ต้องเลือกขนาดเริ่มต้นของท่อร้อยสายเคเบิล โดยป้อนค่าที่ต้องการให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์คอนคูทฟิล การเบียดเสียดของสายเคเบิลในท่อ ระยะปลอดภัย เมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องกำหนดแนวทางการเดินท่อ และป้อนค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ท่อจะต้องถูกจัดวางเพื่อทำการคำนวณหาค่าแรงดึง และค่าแรงกดกับผนังท่อ ถ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก็ผ่าน ถ้าไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก็ต้องกลับไปเลือกขนาดของท่อใหม่ และเนื่องจากต้องการศึกษาคุณลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และรูปคลื่นกระแสเสิร์จ ดังนั้นผู้ใช้ต้องกำหนดระยะทางจากจุดที่เกิดฟ้าผ่าถึงจุดต่อสายที่ต้องการศึกษา และป้อนค่าลำฟ้าผ่าให้กับโปรแกรมเมื่อโปรแกรมทำการคำนวณ และวิเคราะห์เสิร์จเรียบร้อยแล้วจะแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาทั้งในลักษณะของกราฟ และค่าตัวเลข

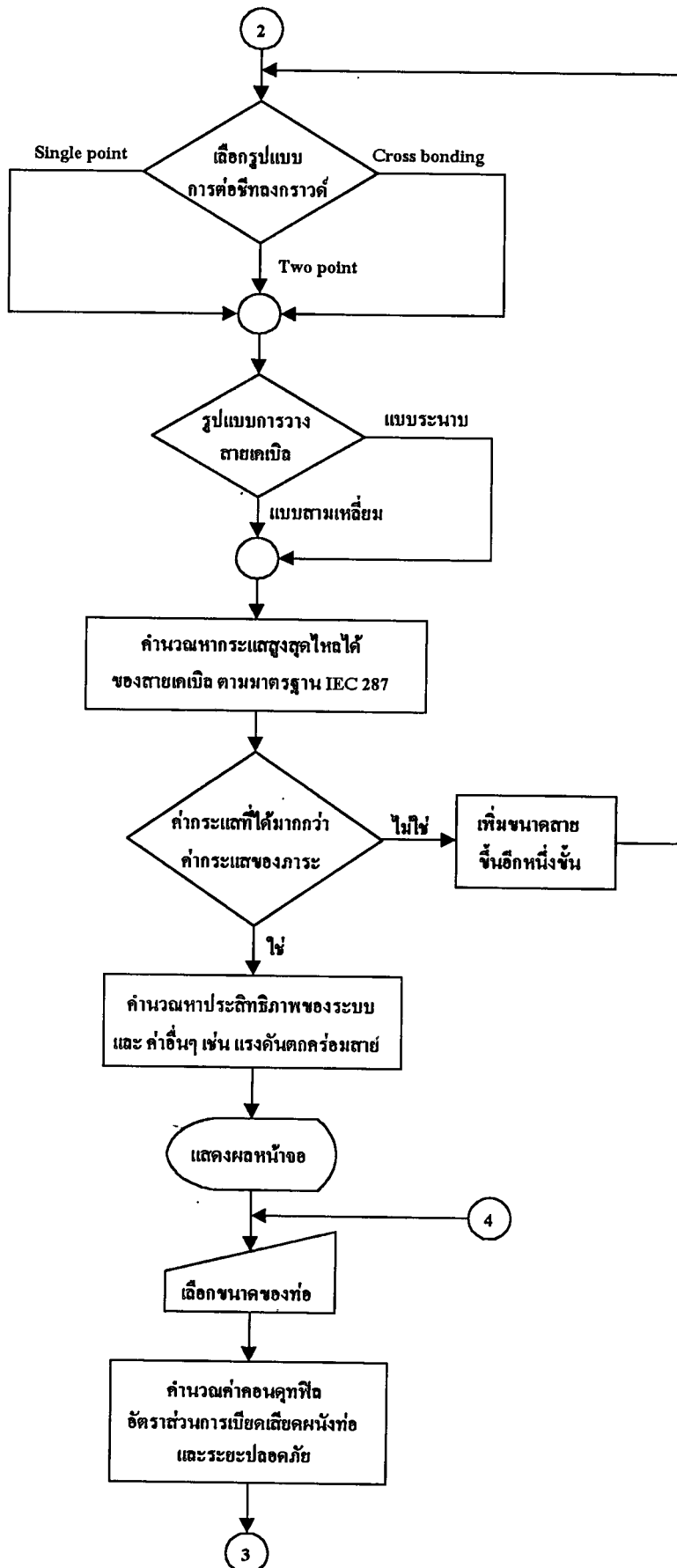
6.1.2 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล

ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิลได้ดำเนินการที่เหมาะสมนั้นเป็นดังรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นการเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม โดยการทำงานของโปรแกรมเริ่มจากการที่ผู้ใช้เลือกชนิดการออกแบบของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ดำเนินการออกแบบว่าเป็นระบบสายใต้ดินเพียงประเภทเดียวหรือเป็นระบบสายใต้ดินที่ต่อเชื่อมกับระบบสายเหนือดิน หลังจากนั้นผู้ใช้จะต้องเลือกบริษัทผู้ผลิตสาย ซึ่งในโปรแกรมนี้มีข้อมูลของสายใต้ดินของบริษัทผู้ผลิตอยู่ 3 บริษัท คือ บริษัทจุงไทย ไทย ยานาจิ และ เฟลคอคจ์ ต่อจากนั้นผู้ใช้โปรแกรมต้องทำการเลือกระดับพิคกแรงดันไฟฟ้า และชนิดของสาย ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติของสายที่ออกแบบแตกต่างกัน ขอบเขตของการออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยสายขนาดพิคกแรงดันไฟฟ้าที่ 12 kV และ 24 kV ทั้งชนิด 1 แกน และ 3 แกน รวมทั้งสายขนาด 69 kV ชนิด 1 แกน ต่อจากนั้นก็ทำการเลือกชนิดของการต่อซีทลงกราวด์ และลักษณะการวางสายตามลำดับ การเลือกค่าพิคกแรงดันไฟฟ้า ชนิด และคุณลักษณะต่างๆ ของสายเคเบิลใต้ดินมีผลต่อข้อมูลที่จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณ และออกแบบ เนื่องจากในโปรแกรมมีฐานข้อมูลที่บอกถึงพิคก และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสาย รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดที่สามารถยอมให้ไหลได้ในสายเคเบิลใต้ดิน โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 287 หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณกระแสสูงสุดที่คำนวณได้กับปริมาณกระแสของภาระโหลด ถ้าปริมาณกระแสสูงสุดที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับภาระโหลดก็จะทำการคำนวณหาประสิทธิภาพและค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อไป แต่ถ้าปริมาณกระแสสูงสุดที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าปริมาณกระแสที่สามารถจ่ายให้กับภาระโหลด โปรแกรมจะทำการเพิ่มขนาดสายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกขั้นหนึ่ง แล้วจะทำการนำข้อมูลพื้นฐานของสายที่เพิ่มขนาดขึ้นซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมมาเริ่มทำการ

คำนวณใหม่และทำการคำนวณวนลูปจนกระทั่งปริมาณกระแสสูงสุดที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณกระแสที่สามารถจ่ายให้กับภาระโหลด



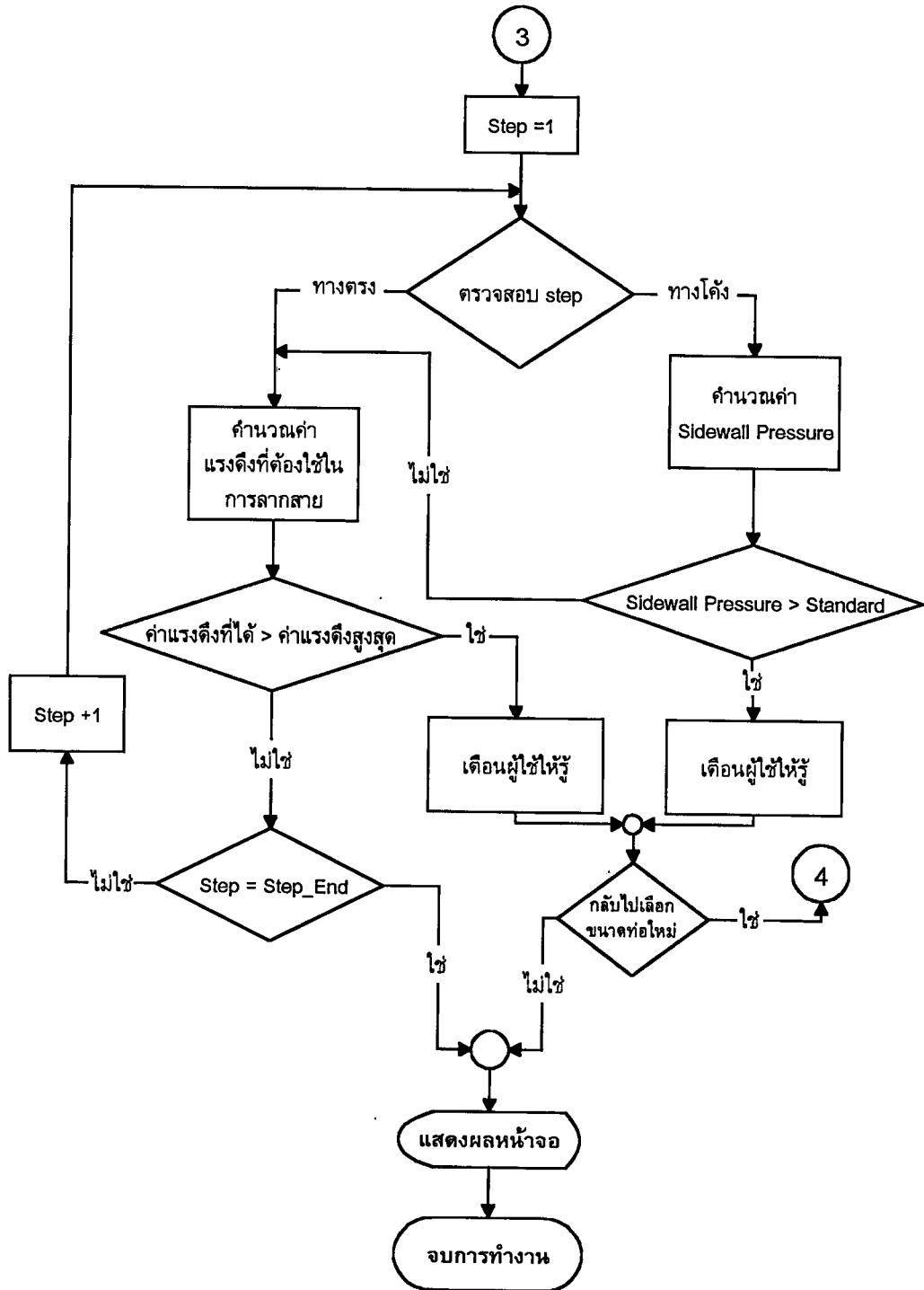
รูปที่ 6.2 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล



รูปที่ 6.2 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล (ต่อ)

6.1.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดึง และขนาดท่อ

ในการคำนวณหาค่าแรงดึงมีขั้นตอนเป็นดังรูปที่ 6.3 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้น โปรแกรมจะนำข้อมูลของสาย และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ และจากฐานข้อมูลตามลำดับ กำหนดให้เป็นสเตปแรก แล้วนำค่าต่างๆ มาพิจารณาว่าลักษณะของสายเคเบิลที่เดินในท่อนั้นเป็นการเดินทางตรง หรือทางโค้ง ในกรณีถ้าเป็นทางตรงโปรแกรมจะคำนวณหาค่าแรงดึงที่



รูปที่ 6.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดึง

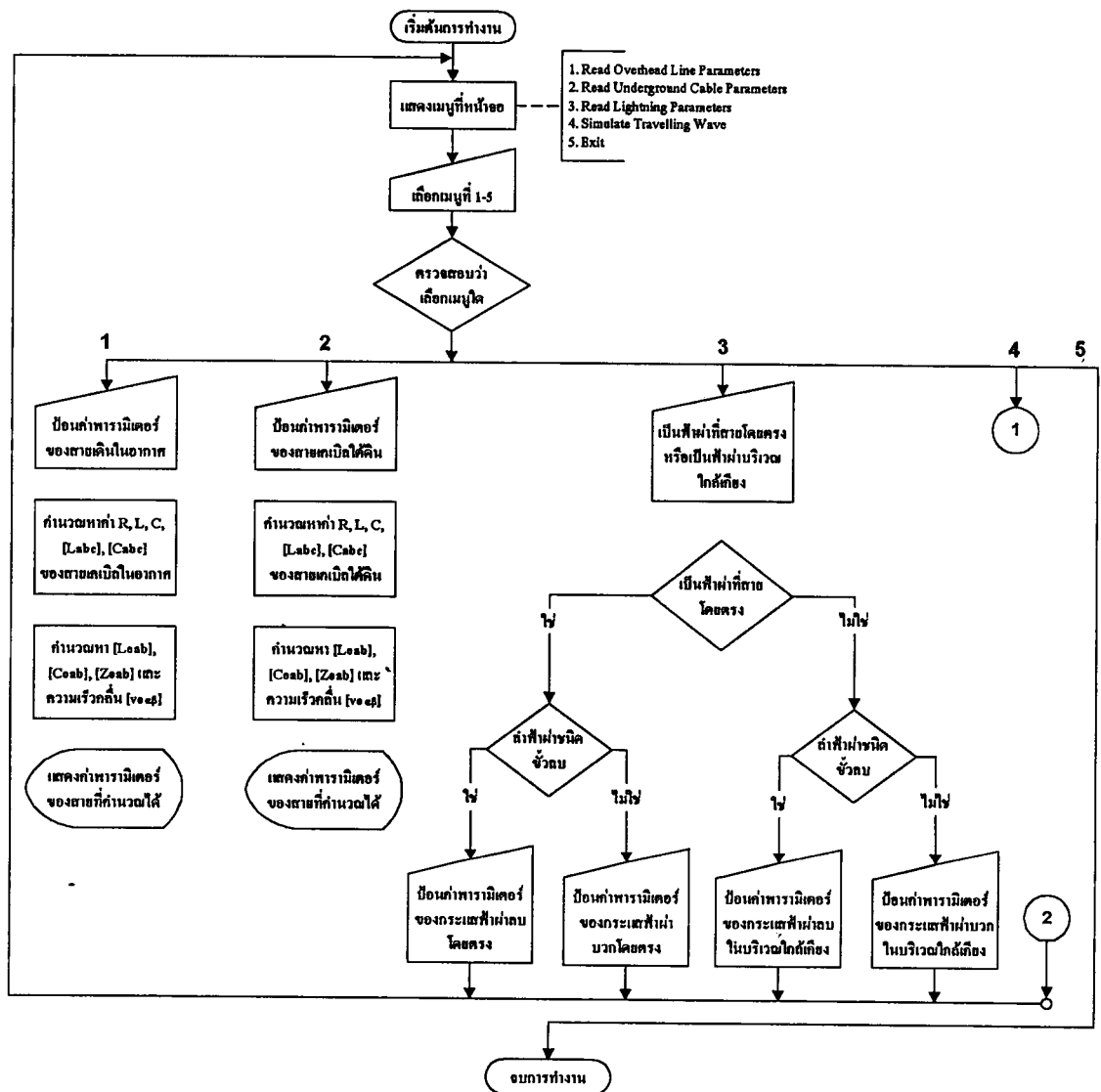
ต้องใช้ในการลากสาย หลังจากนั้นนำค่าแรงดึงที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงสูงสุดที่สายสามารถทนได้ ถ้าค่าแรงดึงที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าแรงดึงสูงสุด โปรแกรมจะเตือนให้ผู้ใช้ทราบ และแจ้งให้ผู้ใช้กลับไปเลือกค่าขนาดของท่อใหม่ ถ้าผู้ใช้ไม่ต้องการโปรแกรมจะสิ้นสุดการทำงาน ถ้าผู้ใช้ต้องการก็จะกลับไปเริ่มต้นที่โฟลว์ชาร์ตหลักตั้งแต่การเลือกขนาดของท่อใหม่ แต่ถ้าค่าแรงดึงที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดึงสูงสุด โปรแกรมจะสอบถามผู้ใช้ว่าต้องการค่าที่ออกแบบไว้หรือไม่ ถ้าผู้ใช้ต้องการก็จะกลับไปยังโฟลว์ชาร์ตหลักเพื่อคำนวณหาค่าอื่น ๆ ต่อไป ถ้ายังไม่ต้องการโปรแกรมจะกำหนดสเปคการทำงานของเพิ่มขึ้น 1 สเปค และกลับไปรอค่าพารามิเตอร์ของท่อใหม่ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการคำนวณหาค่าแรงดึงใหม่ตั้งแต่ต้น ในกรณีถ้าเป็นทางโค้ง โปรแกรมจะคำนวณหาค่าแรงกดผนังท่อ (Sidewall Pressure) และนำค่าที่ได้มาตรวจสอบเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ถ้าค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานก็จะทำการคำนวณหาค่าแรงดึงต่อไป แต่ถ้าค่าที่ได้มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน โปรแกรมจะเตือนให้ผู้ใช้ทราบ และแจ้งให้ผู้ใช้กลับไปเลือกขนาดของท่อใหม่ถ้าผู้ใช้ไม่ต้องการเลือกขนาดของท่อใหม่ก็จะถือว่าสิ้นสุดขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงดึง แต่ถ้าต้องการกลับไปเลือกขนาดของท่อใหม่โปรแกรมจะแสดงหน้าจอในส่วนของการเลือกขนาดท่อ ซึ่งอยู่ในโฟลว์ชาร์ตหลักของโปรแกรม

6.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จ

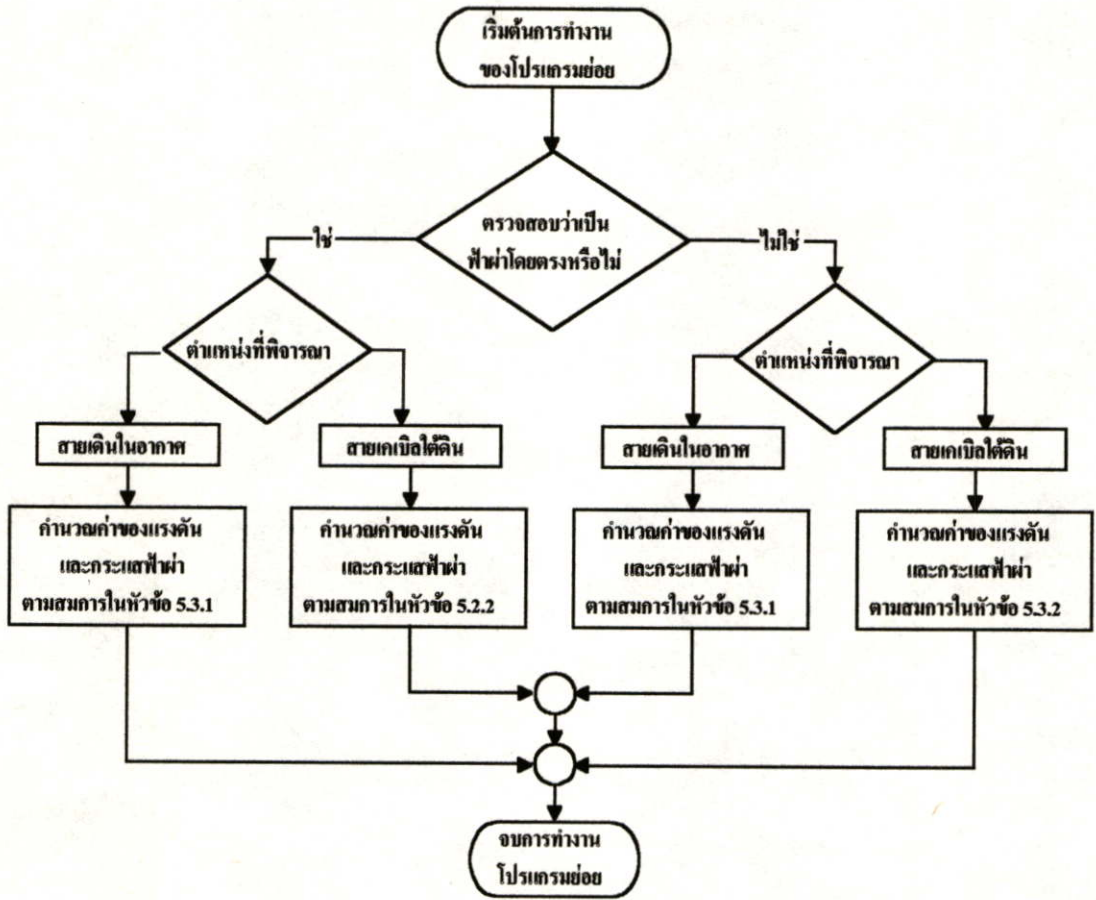
ขั้นตอนการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.4 นั่นคือเมื่อเริ่มต้น โปรแกรมจะแสดงหน้าจอเมนูให้เลือก ซึ่งมีทั้งหมด 5 เมนู โดยเมนูแรกคือ การอ่านค่าข้อมูลต่างๆ ของสายเคเบิลในอากาศ ส่วนเมนูที่สองคือคือ การอ่านค่าข้อมูลต่างๆ ของสายเคเบิลใต้ดิน เมนูถัดไปเป็นการอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการเกิดฟ้าผ่า เมนูนี้เป็นการกำหนดคุณสมบัติและลักษณะของการเกิดฟ้าผ่า เมนูที่สี่เป็นเมนูแสดงการเกิดฟ้าผ่าในลักษณะของรูปคลื่นเดินทาง ถ้าเลือกเมนูนี้ที่หน้าจอจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเดินทางของแรงดันเสิร์จและกระแสเสิร์จที่ระยะทาง และเวลาต่าง ๆ ส่วนเมนูสุดท้ายเป็นเมนูออกจากการทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์เสิร์จ

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูที่ 1 หรือ 2 โปรแกรมจะให้ผู้ใช้ป้อนค่าพารามิเตอร์ของสาย โดยถ้าเป็นเมนูที่ 1 ผู้ใช้ต้องป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายเคเบิลในอากาศ ถ้าเป็นเมนูที่ 2 ผู้ใช้ต้องป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายเคเบิลใต้ดิน หลังจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าความต้านทาน ความเหนียวน่า และความเก็บประจุ ของสายแต่ละเฟส และของสายรวมทั้งสามเฟส ต่อจากนั้นคำนวณหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ เสิร์จอินดักแตนซ์ และเสิร์จคาปาซิแตนซ์ รวมทั้งความเร็วคลื่น หลังจากนั้นจึงแสดงค่าต่าง ๆ ทางมอนิเตอร์ แต่ถ้าผู้ใช้เลือกเมนูที่ 3 จะต้องกำหนดชนิดของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นว่าเป็นฟ้าผ่าที่สายโดยตรง หรือเป็นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับสายเคเบิลในอากาศ หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการแยกวิเคราะห์ชนิดของฟ้าผ่าว่าเป็นฟ้าผ่าชนิดบวม หรือลบ แล้วจึงค่อยแสดงผลการทำงานที่ได้จากโปรแกรม แต่ถ้าผู้ใช้เลือกเมนูที่ 4 ซึ่งเป็นเมนูที่ใช้ในการวิเคราะห์การ

เปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่ระยะทาง และเวลาใด ๆ โดยการแสดงผลจะเป็นกราฟที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง และ/หรือ เวลา ขึ้นอยู่กับการกำหนดของผู้ใช้โปรแกรม เมื่อโปรแกรมคำนวณค่าได้จะนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงผลการทำงาน ดังนั้นกราฟที่แสดงที่หน้าจอจึงเป็นกราฟที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยจำลองให้เห็นถึงคุณสมบัติ และลักษณะการเดินทางของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จ ส่วนของโปรแกรมย่อยรูปที่ 6.5 เป็นการวิเคราะห์รูปคลื่นเสิร์จเริ่มจากการพิจารณาชนิดของการเกิดฟ้าผ่าว่าเป็นการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเดินในอากาศที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดิน หรือเป็นการเกิดฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียงกับสายเดินในอากาศ หลังจากนั้นโปรแกรมจะให้ผู้ใช้กำหนดตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาผลของการเกิดฟ้าผ่าที่กระทบต่อสายเคเบิลใต้ดินทั้งในส่วนของสายเดินในอากาศ และสายใต้ดิน เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าของแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จ แล้วออกจากโปรแกรมย่อยเพื่อคำนวณค่าอื่น ๆ ต่อไป



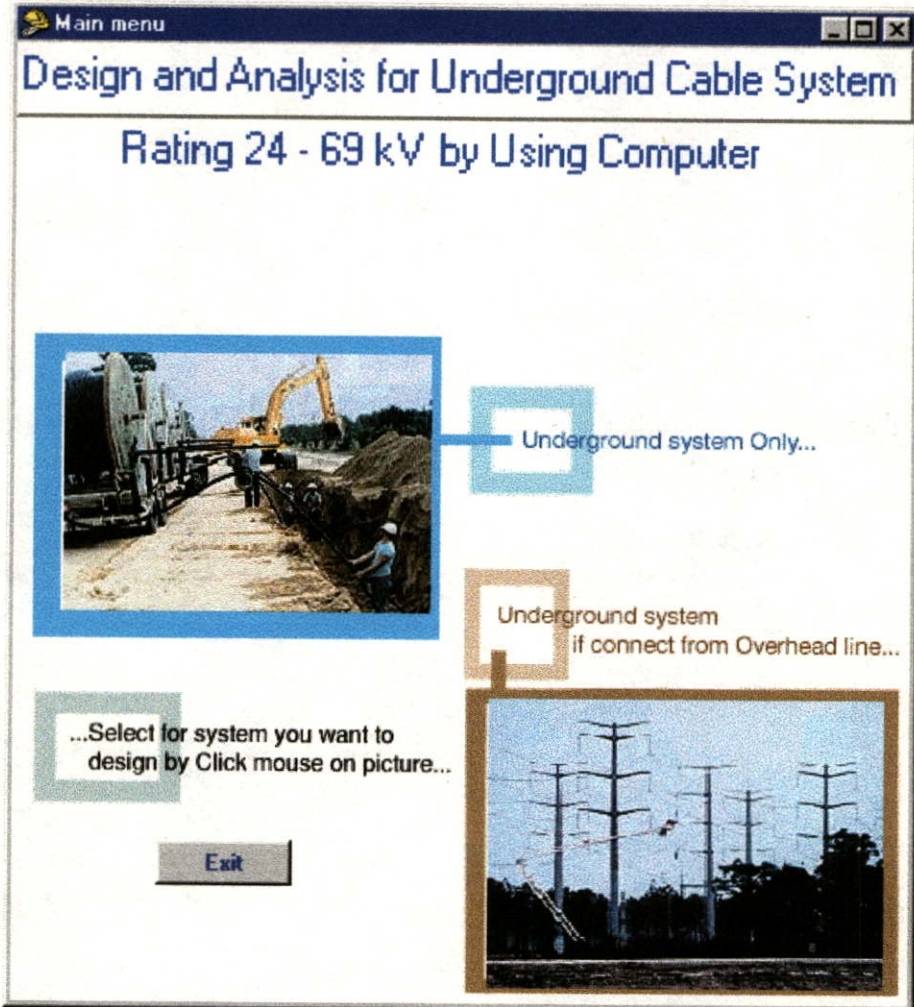
รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จ



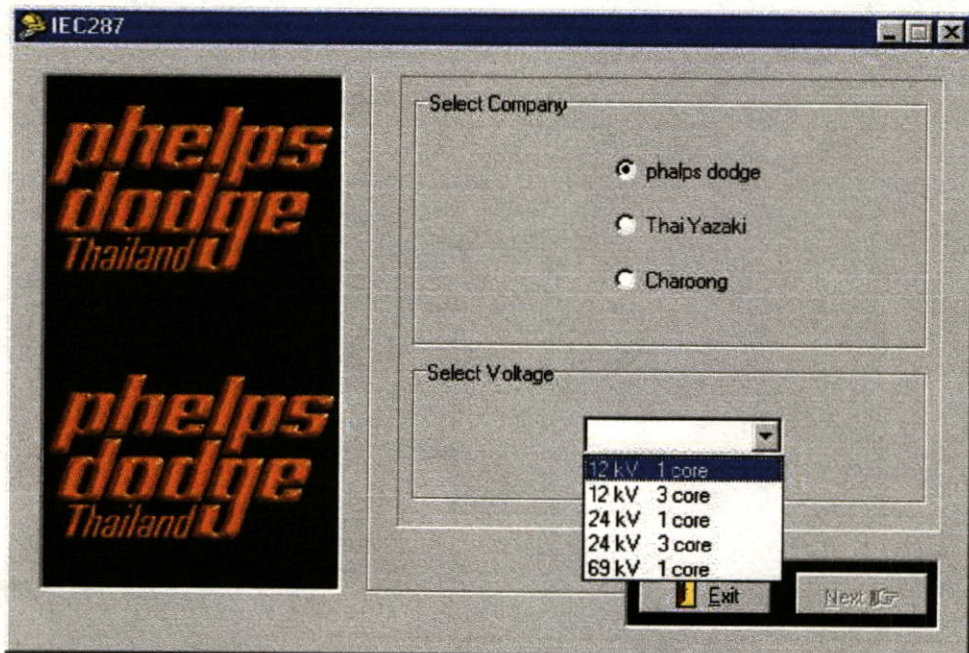
รูปที่ 6.5 โปรแกรมย่อยคำนวณหาค่าแรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จ ที่ระยะ X และเวลา t



รูปที่ 6.6 หน้าจอแรกของโปรแกรม



รูปที่ 6.7 รูปแบบหน้าจอของการออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินระดับพิกัด 24-69 กิโลโวลต์ โดยใช้คอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.8 การเลือกบริษัทผู้ผลิตสาย ระดับแรงดันไฟฟ้า และลักษณะของสายเคเบิลใต้ดิน

The screenshot shows the IEC287 software interface. On the left, there are input fields for the following parameters:

- Load: 8600 kVA
- Frequency: 50 Hz
- Power factor: 0.9 lagging
- Distance: 20 km
- Temperature: 30 Celcius
- Depth manhole: 750 mm
- Resistivity of earth: 0.7 K.m/W

On the right, there is a summary box with the following text:

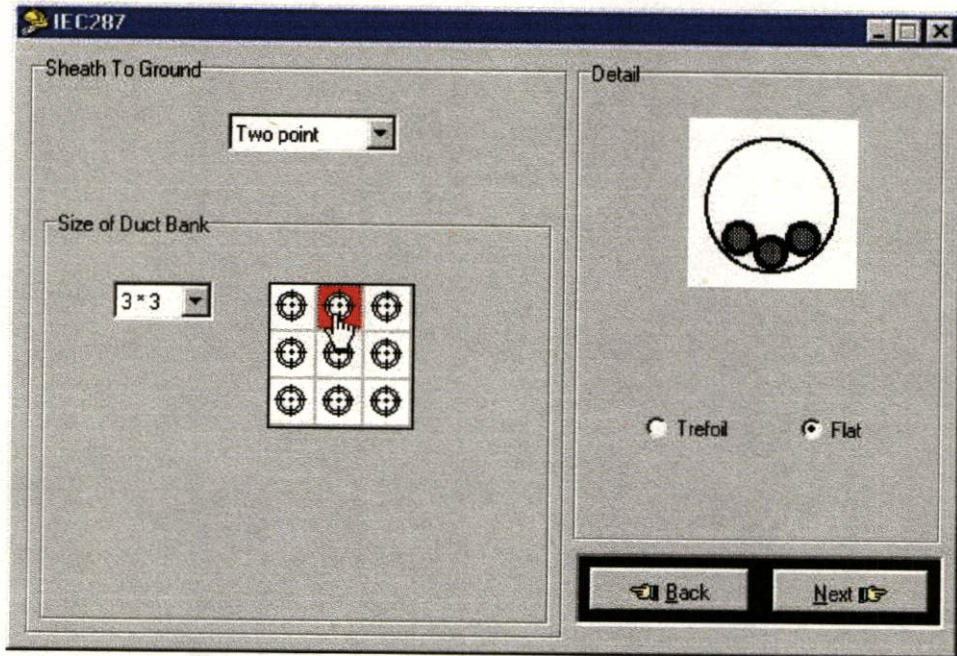
<< รายละเอียดการออกแบบ >>
ตามมาตรฐาน IEC287
-Load-
ค่าควรอยู่ในช่วง 250.000 ถึง 15000.000 kVA

At the bottom right, there are two buttons: "Back" and "Next".

รูปที่ 6.9 รับค่าข้อมูลต่างๆเพื่อนำไปคำนวณหาขนาดของสายเคเบิล

ข้อมูลของสายซึ่งเป็นฐานข้อมูลของโปรแกรมออกแบบนี้มีอยู่ 3 บริษัท คือบริษัท Phelps dodge Thailand, Charoong Thai และ Thaiyazaki ส่วนประเภทของสายคือสายที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 kV, 1 core สายที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 kV, 3 core สายที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 24 kV, 1 core สายที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 24 kV, 3 core และสายที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 69 kV, 1 core เมื่อทราบค่าระดับแรงดันไฟฟ้าและประเภทของสายที่ใช้ในการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้า โปรแกรมจะแสดงหน้าจอรับค่าข้อมูลดังรูปที่ 6.9 เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดสาย ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องป้อนประกอบด้วยภาระโหลดทางไฟฟ้า ความถี่ ตัวประกอบกำลัง ระยะทาง อุณหภูมิ ความลึกของท่อพักสาย และความต้านทานความร้อนของดิน รายละเอียดต่าง ๆ ที่อยู่ในกรอบทางด้านขวาเป็นคำแนะนำที่แจ้งให้ผู้ออกแบบทราบซึ่งช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่าได้อย่างเหมาะสม คำแนะนำเหล่านี้เป็นข้อมูลที่บอกค่าที่ควรจะใช้สำหรับการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าได้ดินในประเทศไทยหลังจากนั้นจะเข้าสู่หน้าจอที่เป็นส่วนที่เลือกตำแหน่ง, ลักษณะการวางสายในท่อร้อยสายเคเบิล และลักษณะการต่อชิตลงกราวด์สำหรับสายเคเบิลได้ดินดังรูปที่ 6.10 โดยที่ขนาดพิกัดระดับแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 kV และ 24 kV จะต้องเลือกตำแหน่งวางสายในท่อเดียว และลักษณะการวางสายในท่อ ส่วนสำหรับสายเคเบิลได้ดินขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้า 69 kV จะวางสายเคเบิลหนึ่งเส้นต่อหนึ่งท่อ โดยลักษณะการวางสายจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เลือกวางทั้งสามท่อ หน้าจอถัดไปเป็นการแสดงผลค่าที่คำนวณได้ดังรูปที่ 6.11 ซึ่งประกอบด้วยค่าที่ผู้ใช้ต้องป้อนให้กับโปรแกรมโดยอยู่ทางด้านซ้ายของหน้าจอ และค่าที่คำนวณได้โดยอยู่ทางด้านขวาของหน้าจอ ซึ่งแสดงค่าขนาดของสายเคเบิล, ค่ากระแสที่ไหลได้สูงสุดในสายเคเบิล, ค่ากระแสของภาระ,

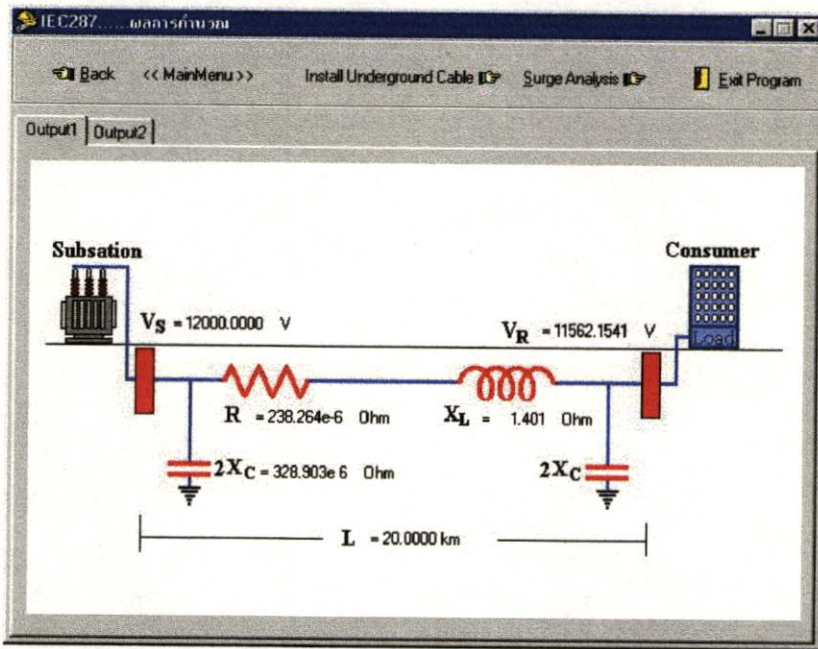
Resistance, Reactance, แรงดันตก, ประสิทธิภาพของระบบ และลักษณะการวางสาย ส่วนการแสดงผลเป็นลักษณะของวงจรสมมูลของระบบวงจ่ายไฟฟ้าเมื่อระบบต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระโหลดเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.12 ต่อจากนั้นโปรแกรมจะแสดงค่าขนาดของตัวนำ, น้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ และเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลที่คำนวณได้จากการอ้างอิงวิธีการออกแบบตามมาตรฐาน IEC287 ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าของแรงดึงที่ใช้ในการติดตั้งสายเคเบิล



รูปที่ 6.10 เลือกตำแหน่งและลักษณะการวางสายในท่อร้อยสายไฟฟ้า

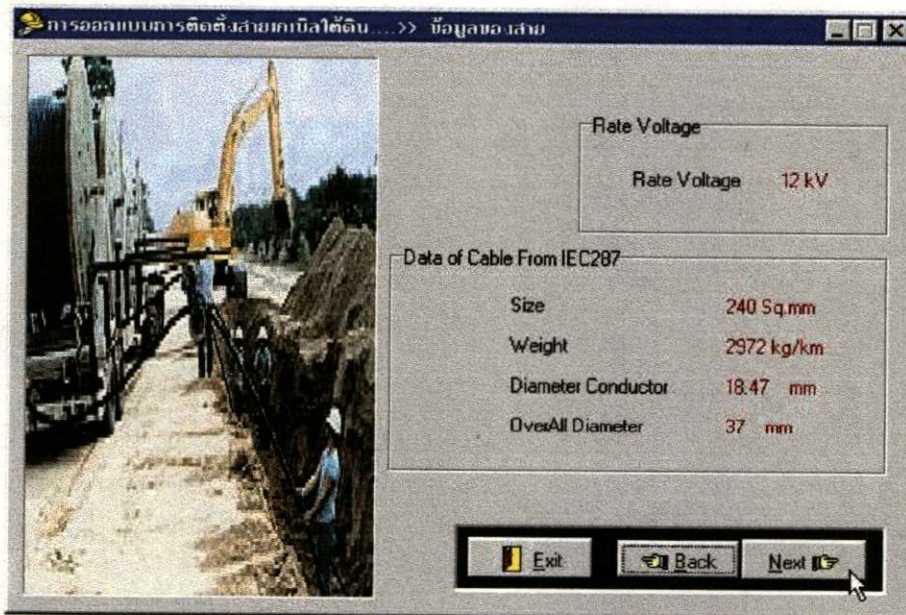
INPUT	Details	OUTPUT	Details
Company	phelps dodge	Type	1 core
Type Line	12 kV 1 core	Design using conductor size	240 Sq.mm.
Load	8600.0000 kVA	Maximum Current	443.8183 A.
Frequency	50.0000 Hz	Load Current	413.7677 A.
Distance	20.0000 km	Resistance	11.913e-6 ohm/phase/m.
Temperature	30.0000 Celcius	Reactance(XL)	70.056e-3 ohm/phase/m.
Power factor	0.9000 lagging	Reactance(XC)	8.223e 6 ohm/phase/m.
Depth manhole	750 mm	Voltage drop	252.7904 V.
Earth Resistance	0.7000 K.m/W	Voltage regulation	3.7869 %
Type DuctBank	3 * 3	Efficiency	86.7162 %
Circuit Flow	1	Point to Ground	Two point
		Layout	Flat

รูปที่ 6.11 รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้

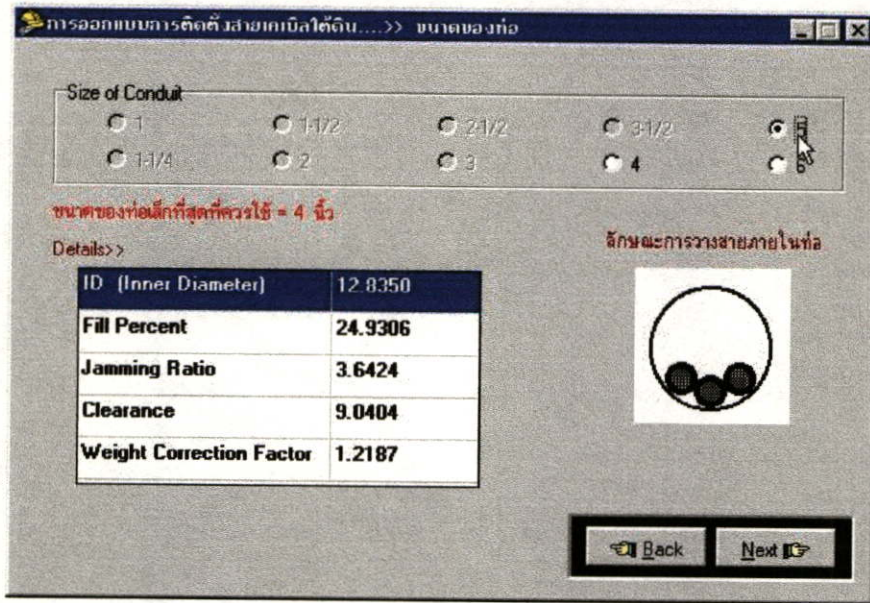


รูปที่ 6.12 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในลักษณะของวงจรสมมูลย์ของระบบ

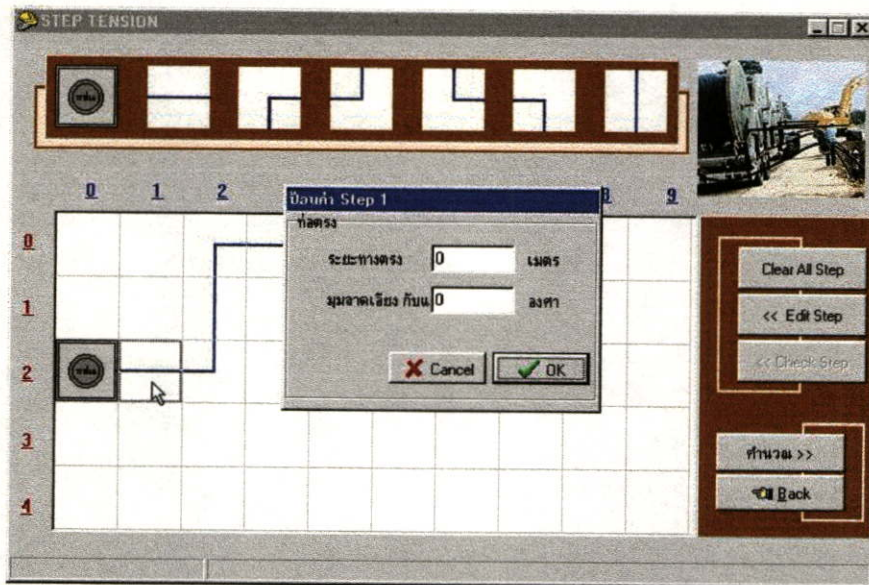
หน้าจอถัดไปดังรูปที่ 6.14 เป็นการเลือกขนาดของท่อที่จะใช้ในการติดตั้ง โดยโปรแกรมจะแสดงขนาดของท่อตั้งแต่ท่อที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถจะนำมาติดตั้งได้ไปจนถึงท่อที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เพื่อให้ผู้ออกแบบเป็นผู้เลือกขนาดตามความต้องการ โดยไม่ใช่ท่อที่มีขนาดเล็กเกินมาตรฐานกำหนด ในขณะที่เดียวกันก็ให้อิสระผู้ออกแบบสามารถเพิ่มขนาดที่ตามความเหมาะสมของการทำงานในสถานที่ติดตั้งจริง ในส่วนนี้จะแสดงค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, เปอร์เซนต์คอนดักทิล, การเบียดเสียดของสายในท่อ, ระยะปลอดภัย และค่าองค์ประกอบการปรับแก้น้ำหนักด้วย



รูปที่ 6.13 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการติดตั้ง



รูปที่ 6.14 เลือกขนาดของท่อ



รูปที่ 6.15 การจัดวางแนวการเดินสายเคเบิล และการป้อนค่าระยะทาง

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการติดตั้งระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินก็จะเข้าสู่หน้าจอดังรูปที่ 6.15 ซึ่งใช้สำหรับวางแนวการเดินสายเคเบิลโดยใช้เมาท์ลากรูปด้านบนมาวางในช่องด้านล่าง โดยทำการป้อนค่าระยะทางในช่วงทางตรง รวมทั้งป้อนค่าระยะทางและองศาการโค้งของท่อในช่วงทางโค้งที่หน้าจอเล็กทางด้านขวา หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลของค่าแรงดึงในช่วงต่างๆอย่างละเอียดและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงทางโค้งจะเพิ่มการแสดงผลค่าแรงอัดที่ผนังท่อโค้งที่คำนวณได้ไว้ทางขวามือของหน้าจอมอนิเตอร์ดังรูปที่ 6.16 ส่วนของการรับค่าของสายเคเบิลในอากาศนั้นจะป้อนขนาดของสาย, อุณหภูมิ และเลือกชนิดของตัวนำลงในโปรแกรมดังหน้าจอแสดงในรูปที่ 6.17

เลขที่ชุด	ค่าแรงดึง (kg)	หมายเหตุ
แรงดึงสูงสุด	2064	
ค่าแรงดึงของแต่ละ Step		
Step 1 : ที่ลทางตรง		
ความยาว : 30.000 m ; มุม : 0.0 องศา	162.994077004035	0
Step 2 : ที่ลโค้ง		
ความยาว : 20.000 m ; มุม : 45.0 องศา ; รัศมีที่ลโค้ง = 25.4648 m	263.041370794283	5.70268622180624
Step 3 : ที่ลทางตรง		
ความยาว : 80.000 m ; มุม : 0.0 องศา	697.692242805042	0
Step 4 : ที่ลโค้ง		
ความยาว : 20.000 m ; มุม : 45.0 องศา ; รัศมีที่ลโค้ง = 25.4648 m	1125.94228767855	24.4102117895175
Step 5 : ที่ลทางตรง		
ความยาว : 30.000 m ; มุม : 0.0 องศา	1288.93636468258	0

รูปที่ 6.16 แสดงค่าที่คำนวณได้

Program View

Overhead Line Parameter Lightning Simulate Wave

Conductor per phase

single

Bundle

Conductor Type

ทองแดง

อลูมิเนียม

Conductor size: 800 (Sq.mm)

Temperature: 40 (Celsius)

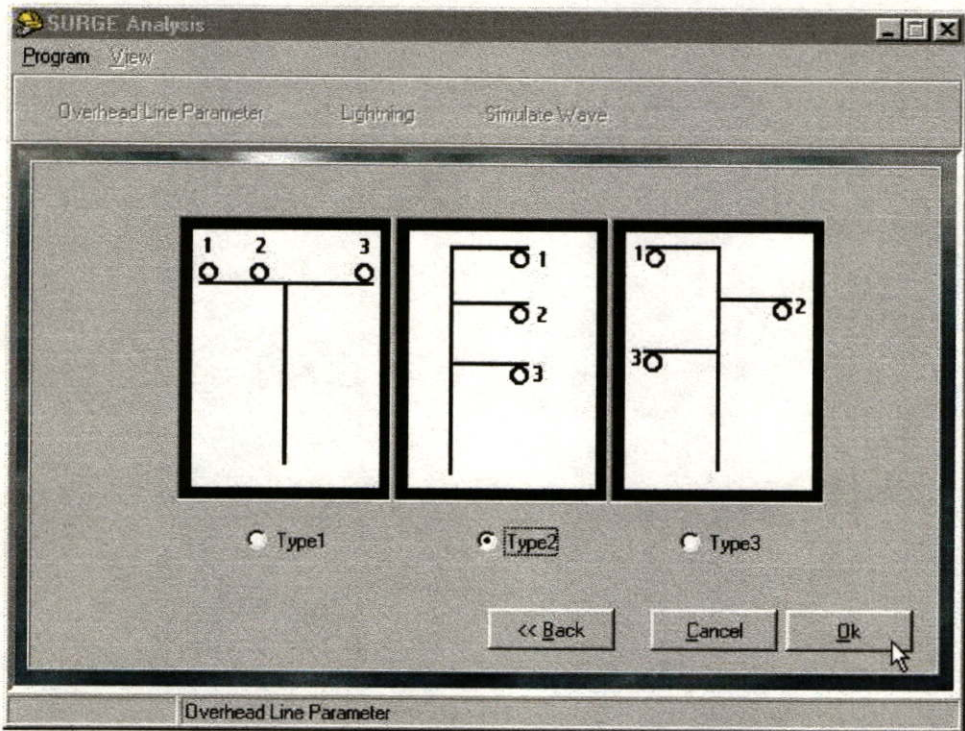
Bundle spacing: 0.2 (m)

Cancel Ok

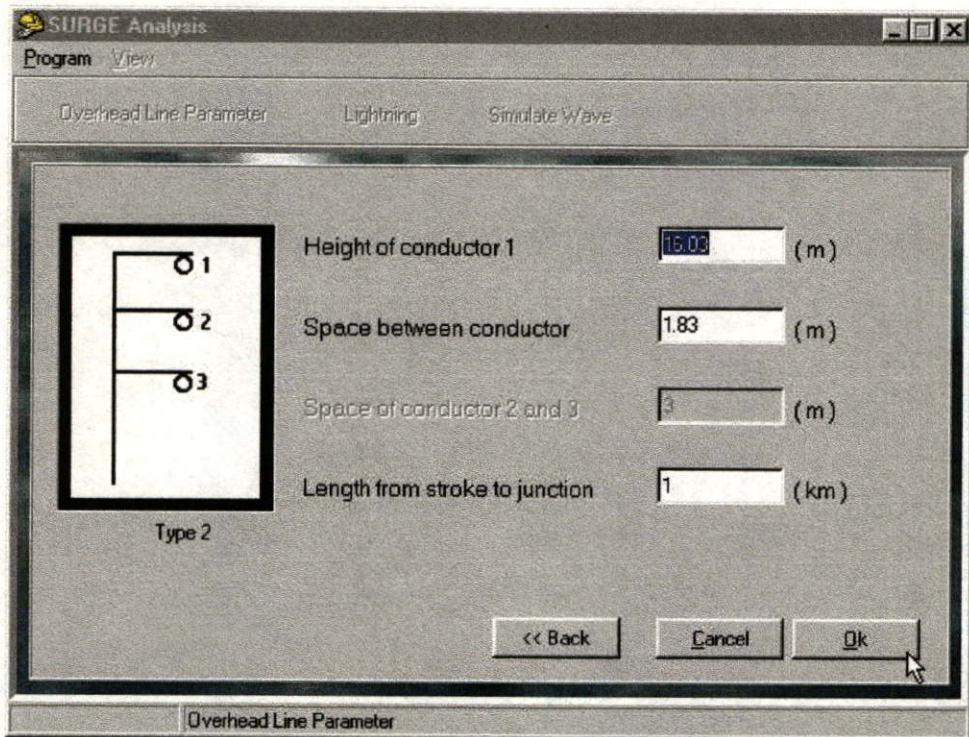
Overhead Line Parameter

รูปที่ 6.17 ป้อนค่าของสายเดินในอากาศ

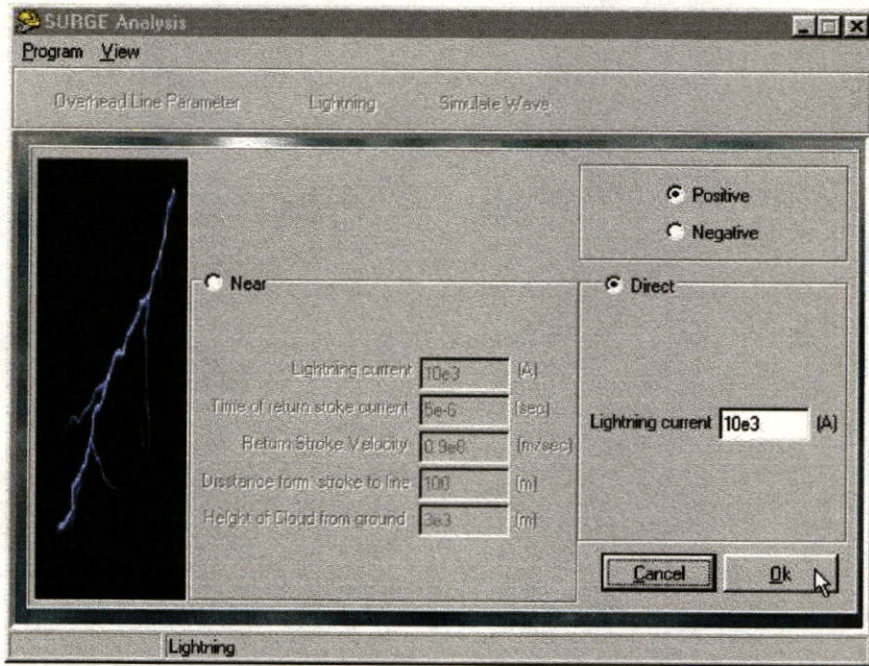
หลังจากนั้นจะเข้าสู่หน้าจอเลือกลักษณะการวางสายของสายไฟฟ้าเดินในอากาศซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ดังรูปที่ 6.18 และทำการป้อนค่าระยะห่างระหว่างสาย, ความสูงของเสา และความยาวของสายเดินในอากาศที่ถูกฟ้าผ่าจนถึงจุดต่อกับสายเคเบิลใต้ดิน หลังจากเลือกลักษณะการวางแล้วดังรูปที่ 6.19 จากนั้นป้อนค่าของลักษณะฟ้าผ่าซึ่งแยกออกเป็นสองแบบคือ ฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียงสายเดินในอากาศและฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเดินในอากาศ ในแบบแรกจะป้อนค่าของกระแสฟ้าผ่า, เวลาที่เกิด



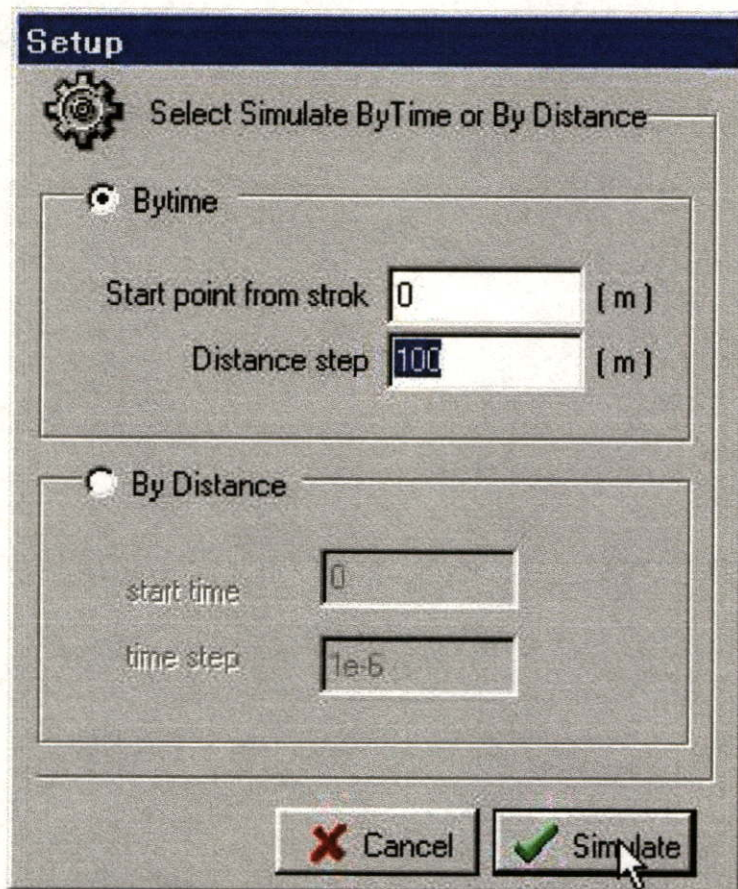
รูปที่ 6.18 เลือกลักษณะการวางสายเคเบิลในอากาศ



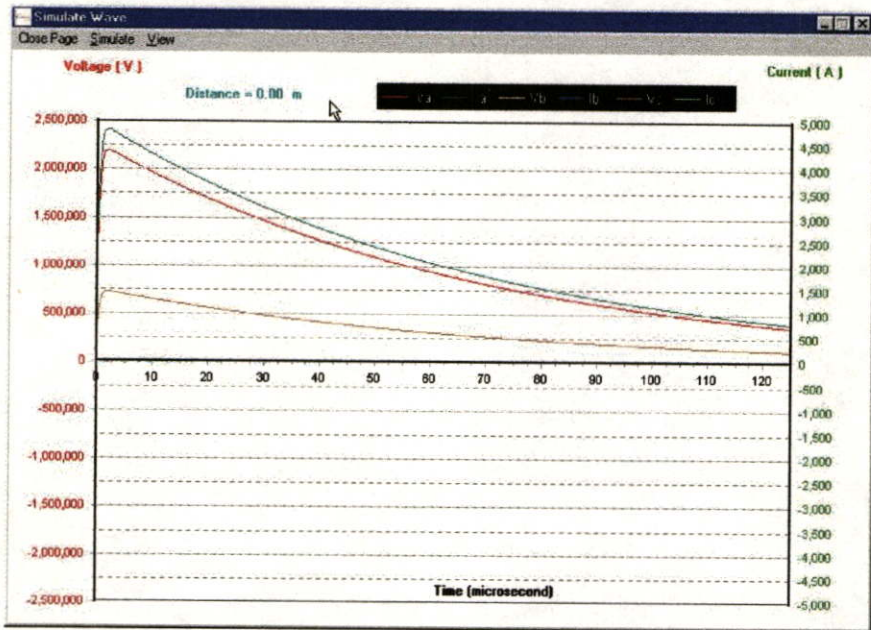
รูปที่ 6.19 ป้อนค่าระยะห่างและความสูงของเสา



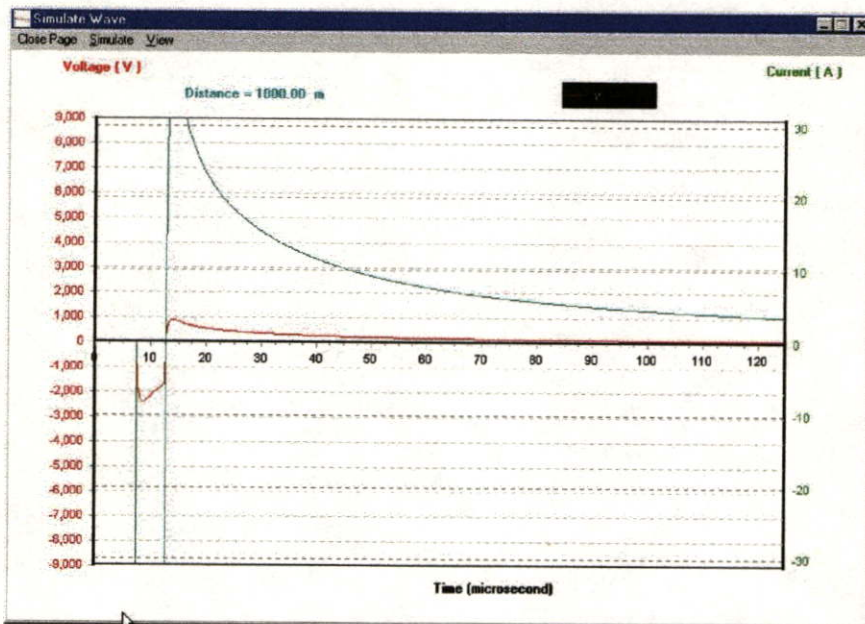
รูปที่ 6.20 ส่วนรับค่าของฟ้าผ่ากรณีโดยตรง และกรณีใกล้เคียง



รูปที่ 6.21 เลือกการจำลองรูปคลื่นฟ้าผ่า



รูปที่ 6.22 ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิลในอากาศโดยตรง



รูปที่ 6.23 ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับสายเคเบิลในอากาศ

ถ้าฟ้าผ่าย้อนกลับ, ความเร็วของคลื่นฟ้าผ่าย้อนกลับ, ระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากจุดที่เกิดฟ้าผ่าถึงสายเคเบิลในอากาศ และความสูงของก้อนเมฆ ส่วนฟ้าผ่าโดยตรงจะป้อนเฉพาะค่ากระแสฟ้าผ่าเท่านั้นดังรูปที่ 6.20 ต่อจากนั้นจะเข้าสู่หน้าจอเลือกการแสดงผลในการจำลองรูปคลื่นแรงดันเสถียรและกระแสเสถียร และเป็นการกำหนดค่าแกนนอนของกราฟซึ่งมีสองตัวเลือกคือ เวลา และระยะทาง รวมทั้งทำการป้อนสเกลการคำนวณ โดยช่องบนจะเป็นการกำหนดให้แกนนอนเป็นแกนของเวลา ส่วนช่องข้างล่างจะเป็นการกำหนดให้แกนนอนเป็นความยาวของสายเคเบิลในอากาศ และสายเคเบิลใต้ดิน ดัง

แสดงในรูปที่ 6.21 หน้าจอสุดท้ายเป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ และ กระแสเสิร์จที่ได้จากการจำลองการเกิดฟ้าผ่า โดยรูปที่ 6.22 เป็นรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบนสายดิน ในอากาศโดยตรงเทียบกับแกนเวลา ส่วนรูปที่ 6.23 เป็นรูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับ สายดินในอากาศ

6.3 ตัวอย่างการคำนวณและการออกแบบระบบไฟฟ้าใต้ดิน

ระบบการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันไฟฟ้า 12 kV 3 เฟส ต้องการจ่ายภาระโหลด 13.5 MVA ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.9 ล้าหลัง ใช้สายเคเบิลชนิดแกนเดี่ยวฉนวน XLPE ของ บริษัท Phelps dodge อุณหภูมิของตัวนำสูงสุด 90°C อุณหภูมิของดิน 30°C เดินสายแบบราบ (Flat) ลักษณะการวางสายในท่อร้อยสายเป็นแบบ 3×3 และใช้ท่อซีเมนต์ใยหิน ความต้านทาน ความร้อนของดินมีค่าเท่ากับ 0.7 km/W ระยะทางการเดินสาย 20 km

6.3.1 การคำนวณหาขนาดของสาย และค่าพารามิเตอร์ของสาย

$$I_l = \frac{13.5 \times 10^6}{12 \times 10^3 \times \sqrt{3}} = 649.519 \text{ A}$$

จากตารางการเลือกใช้สายจะต้องใช้สายขนาด 240 mm^2 เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ 18.5 mm ความหนาของ copper wire shield 1.03 mm ความหนาของฉนวน XLPE 3.4 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิล 38 mm

1) คำนวณความสูญเสีย

1.1) ความต้านทานไฟกระแสตรงของตัวนำ

$$\begin{aligned} R' &= R_o [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \\ &= 0.0754 \times 10^{-3} [1 + 0.00393(90 - 20)] \\ &= 96.142 \times 10^{-6} \text{ } \Omega / \text{m} \end{aligned}$$

1.2) ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว

$$\begin{aligned} X_s^2 &= \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} K_s \\ &= \frac{8\pi \times 50 \times 10^{-7} \times 1}{(96.142 \times 10^{-6})} = 1.307063 \end{aligned}$$

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4}$$

$$= \frac{(1.307063)^2}{192 + 0.8(1.307063)^2} = 8.835 \times 10^{-3}$$

1.3) ผลจากปรากฏการณ์ความถี่

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} K_p$$

$$= \frac{8\pi \times 50 \times 10^{-7} \times 1}{(96.142 \times 10^{-6})} = 1.307063$$

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left[\frac{d_c}{s} \right]^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right]$$

$$Y_p = \frac{(1.307063)^2}{192 + 0.8(1.307063)^2} \left[\frac{18.5}{38} \right]^2 \left[0.312 \left(\frac{18.5}{38} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{(1.307063)^2}{192 + 0.8(1.307063)^2} + 0.27} \right]$$

$$= 9.016 \times 10^{-3}$$

1.4) ความต้านทานไฟกระแสสลับของตัวนำ

$$R = R'(1 + Y_s + Y_p)$$

$$= 96.142 \times 10^{-6} (1 + 8.835 \times 10^{-3} + 9.016 \times 10^{-3})$$

$$= 97.858 \times 10^{-6} \quad \Omega / \text{m}$$

2) ค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{D_c} \right)} \times 10^{-9}$$

$$= \frac{2.5}{18 \ln \left(\frac{31.4}{19.0} \right)} \times 10^{-9} = 276.468 \times 10^{-12} \quad \text{F/m}$$

$$W_d = \omega C U_o^2 \tan \delta$$

$$= 2\pi \times 50 \times 276.468 \times 10^{-12} \times \left(\frac{12 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 \times 0.008$$

$$= 33.351 \times 10^{-3} \quad \text{W/m}$$

3) ตัวประกอบความสูญเสียกำลังในซีท และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน

$$3.1) \lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

$$R_s = \frac{\rho}{A} [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$$

$$= \frac{21.4 \times 10^{-8}}{(25)} [1 + 0.00393 \times (90 - 20)]$$

$$= 10.915 \times 10^{-9} \quad \Omega/\text{m}$$

$$X = 2\omega \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2S}{d}\right)$$

$$= 2(2\pi \times 50) \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2 \times 38}{32.5}\right) = 53.3752 \times 10^{-6} \quad \Omega/\text{m}$$

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \right]$$

$$= \frac{10.915 \times 10^{-9}}{97.858 \times 10^{-6}} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{10.915 \times 10^{-9}}{53.3752 \times 10^{-6}}\right)^2} \right]$$

$$= 111.539 \times 10^{-6}$$

เนื่องจากการต่อซีทแบบที่ปลายสายทั้งสองด้านลงดินดังนั้น $\lambda_1'' = 0$

$$\therefore \lambda_1 = 111.539 \times 10^{-6}$$

เนื่องจากสายแกนเดี่ยวไม่มีเครื่องห่อหุ้มดังนั้น $\lambda_2 = 0$

4) การคำนวณความต้านทานความร้อน

4.1) ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำและซีท

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_1}{d_c}\right]$$

$$= \frac{3.5}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2 \times 4.35}{18.5} \right]$$

$$= 214.71 \times 10^{-3}$$

4.2) ความต้านทานความร้อนระหว่างเครื่องท่อหุ้มและซีท

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_s} \right)$$

$$= \frac{3.5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \times 5.4}{31.4} \right)$$

$$= 164.6686 \times 10^{-3}$$

4.3) ความต้านทานความร้อนของเครื่องท่อหุ้ม

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right)$$

$$= \frac{3.5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \times 0}{0} \right) = 0$$

4.4) ความต้านทานความร้อนระหว่างพิวฉนวนเปลือกนอกของสายถึงผิวพื้นดิน

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

- ความต้านทานความร้อนระหว่างสายเคเบิลกับท่อ

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e}$$

$$= \frac{5.2}{1 + 0.1(1.1 + 0.011 \times 30)38}$$

$$= 808.2064 \times 10^{-3}$$

- ความต้านทานความร้อนระหว่างผนังคู่อันหนึ่งของท่อ

$$T''_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

$$= \frac{3.5}{2\pi} \ln \left(\frac{127}{115} \right)$$

$$= 55.2892 \times 10^{-3}$$

- ความต้านทานความร้อนภายนอกของท่อ

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \left(\frac{x}{2} \right)$$

$$\mu = \frac{L_G}{r_b}$$

$$T_4^m = \frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln \left(\mu + \sqrt{\mu^2 - 1} \right)$$

ใช้ลักษณะการวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายเป็นแบบ 3×3 ขนาด 660 mm × 660 mm และวางลึก 750 mm

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{660}{660} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{660}{660} \right) \ln \left(1 + \frac{660^2}{660^2} \right) + \ln \left(\frac{660}{2} \right)$$

$$\ln r_b = 5.89379$$

$$r_b = e^{5.89379} = 362.777$$

$$\mu = \frac{750}{362.777} = 2.067$$

$$T_4^m = \frac{1}{2\pi} (0.7 - 1) \ln \left(2.067 + \sqrt{2.067^2 - 1} \right)$$

$$= (-64.6871 \times 10^{-3})$$

$$\begin{aligned} \therefore T_4 &= 808.2064 \times 10^{-3} + 55.2892 \times 10^{-3} - 64.6871 \times 10^{-3} \\ &= 798.8 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

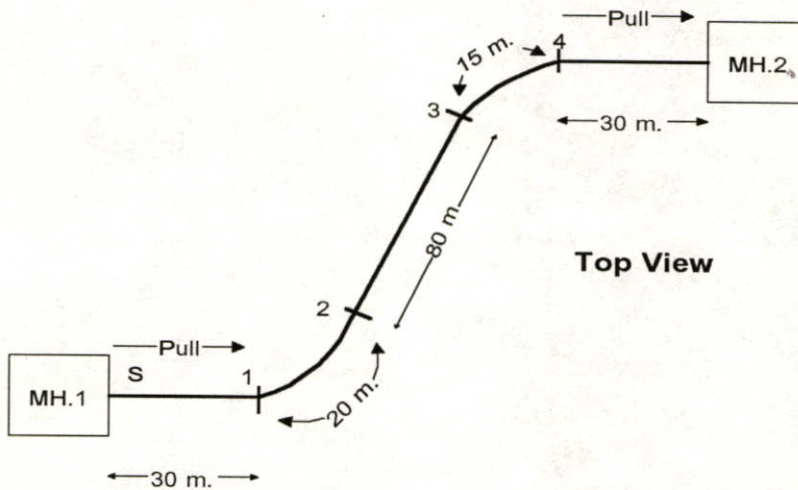
คำนวณหาค่ากระแสที่ไหลสูงสุดในสาย

$$I_{AC} = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right\}^{1/2}$$

$$\therefore I_{AC} = 460 \text{ A}$$

เนื่องจากค่าของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกระโหลก ดังนั้นในการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินนี้จึงสามารถใช้สายแกนเดี่ยวฉนวน XLPE ขนาด 240 mm² ได้

6.3.2 การคำนวณหาค่าแรงดึงของสายและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการติดตั้ง



รูปที่ 6.24 ลักษณะแนวการเดินทางสายในท่อร้อยสายไฟฟ้า

เมื่อทำการคำนวณหาขนาดสายที่ต้องการได้แล้ว จากนั้นก็นำสายเคเบิลที่ได้ไปติดตั้งตามแบบที่ได้วางเอาไว้ดังรูปที่ 6.24 จากรูปจะเห็นว่าทำการลากสาย 3 เส้นต่อ 1 ท่อ วางในแนวระนาบ สายที่ใช้มีขนาด 240 mm^2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย (d) 37 mm . น้ำหนักของสาย (W) $2,972 \text{ kg/km}$ ค่าแรงดึงของอุปกรณ์ (T_{device}) มีค่า $4,535 \text{ kg}$

1) เลือกขนาดของท่อ แล้วทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์คอนคัทพิด ระยะปลอดภัย และการเบียดเสียดของสายเคเบิลได้ดินในท่อ

ในการออกแบบเลือกท่อ Rigid ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) $= 12.835 \text{ cm}$.

1.1) ค่า เปอร์เซ็นต์คอนคัทพิด

$$\text{Conduit Fill Percent} = \left[\frac{d}{D} \right]^2 \times N \times 100\%$$

$$\text{Conduit Fill Percent} = \left[\frac{3.7}{12.835} \right]^2 \times 3 \times 100\%$$

$$\text{Conduit Fill Percent} = 24.9306\%$$

1.2) ค่าการเบียดเสียดของสายเคเบิลได้ดินในท่อ

$$\text{Jamming Ratio} = \frac{D}{d} = \frac{12.835}{3.7} + 5\% = 3.6423$$

1.3) ค่าระยะปลอดภัย (CL)

$$CL = \frac{D}{2} - \frac{d}{2} + \frac{D-d}{2} \sqrt{1 - \left[\frac{d}{2(D-d)} \right]^2} = 9.0404 \text{ cm}$$

ค่าระยะปลอดภัยที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้ เพราะมีขนาดมากกว่า 10% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน

2) เลือกชนิดของท่อ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อที่จะใช้

เลือกท่อ Rigid ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.835 cm ท่อโค้งจากจุดที่ 1-2 ทำมุมโค้ง 16 องศา (0.2793 Radians), จุดที่ 3-4 ทำมุมโค้ง 15 องศา (0.2618 Radians) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) = 0.5

3) คำนวณหาค่าองค์ประกอบการปรับแก้น้ำหนัก (w)

$$w = 1 + \frac{4}{3} \left[\frac{d}{D-d} \right]^2$$

$$w = 1.2187$$

4) ค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้ (T_m)

$$T_c = 8.6 \times A = 8.6 \times 240 = 2,064 \text{ kg}$$

จะเห็นว่าค่า T_{device} มากกว่า T_{cable} เพราะฉะนั้น T_m จะมีค่าเท่ากับ T_{cable} คือ 2,064 kg

5) คำนวณหาค่าแรงดึงที่ใช้ทุกๆ Segment ของแรงดึงในท่อ

ก) แรงดึงที่จุด S

$$T_c = T_{in} \approx 0 \text{ kg.}$$

ข) จุด S ถึง 1 ลักษณะการวางท่อเป็นท่อตรงที่วางในแนวราบ

$$T_{out} = w\mu WL + T_{in}$$

$$T_{out} = (1.2187 \times 0.5 \times 8916 \times 0.03) + 0$$

$$T_{out} = 162.9889 \text{ kg}$$

แรงดึงนี้ใช้ได้ เพราะต่ำกว่า 2,064 kg (T_m) ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้

ค) จุด 1 ถึง 2 ลักษณะการวางท่อเป็นท่อโค้งที่วางในแนวราบ

$$T_{out} = T_{in} e^{(w\mu\phi)}$$

$$T_{out} = 162.9889 e^{(1.2187 \times 0.5 \times 0.2793)}$$

$$T_{out} = 193.2285 \text{ kg}$$

แรงดึงนี้ใช้ได้ เพราะต่ำกว่า 2,064 kg (T_m) ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้

ง) จุด 2 ถึง 3 ลักษณะการวางท่อเป็นท่อตรงที่วางในแนวราบ

$$T_{out} = w\mu WL + T_{in}$$

$$T_{out} = (1.2187 \times 0.5 \times 8916 \times 0.08) + 193.2285$$

$$T_{out} = 627.8656 \text{ kg}$$

แรงดึงนี้ใช้ได้ เพราะต่ำกว่า 2,064 kg (T_m) ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้

จ) จุด 3 ถึง 4 ลักษณะการวางท่อเป็นท่อโค้งที่วางในแนวราบ

$$T_{out} = T_{in} e^{(w\mu\phi)}$$

$$T_{out} = 627.8656 e^{(1.2187 \times 0.5 \times 0.2618)}$$

$$T_{out} = 736.4593 \text{ kg}$$

แรงดึงนี้ใช้ได้ เพราะต่ำกว่า 2064 kg (T_m) ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้

ฉ) จุด 4 ถึง 5 ลักษณะการวางท่อเป็นท่อตรงที่วางในแนวราบ

$$T_{out} = w\mu WL + T_{in}$$

$$T_{out} = (1.2187 \times 0.5 \times 8916 \times 0.03) + 736.4593$$

$$T_{out} = 899.4482 \text{ kg}$$

แรงดึงนี้ใช้ได้ เพราะต่ำกว่า 2,064 kg (T_m) ซึ่งเป็นค่าแรงดึงสูงสุดที่ยอมรับได้

6) คำนวณหาค่าแรงกดกับผนังท่อ (Sidewall Pressure: SP) ค่าแรงกดกับผนังท่อสูงสุดที่ยอมรับได้จากมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากตารางที่ 4.3 มีค่า 743.95 kg/m

ก) จุด 1 ถึง 2 ค่ารัศมีความโค้งงอ (R_1)

$$2\pi R_1 \times \frac{16^\circ}{360^\circ} = 20 \text{ m}$$

$$R_1 = 71.6197 \text{ m}$$

$$SP = [(3 \times 1.2187) - 2] \times \frac{193.2285}{3 \times 71.6197} = 1.4893 \text{ kg/m}$$

ค่าแรงกดกับผนังท่อนี้ใช้ได้ เพราะมีค่าต่ำกว่า 743.95 kg/m

ข) จุด 3 ถึง 4 ค่ารัศมีความโค้งงอ (R_2)

$$2\pi R_2 \times \frac{15^\circ}{360^\circ} = 15 \text{ m}$$

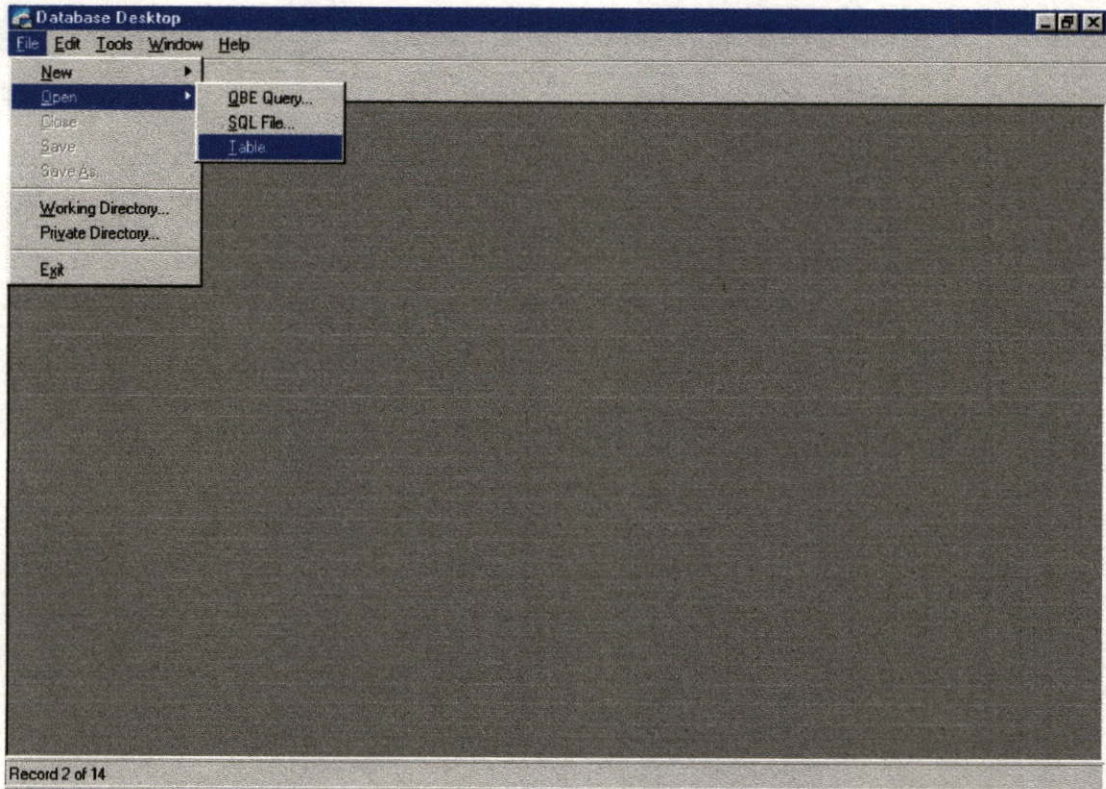
$$R_2 = 57.2958 \text{ m}$$

$$SP = [(3 \times 1.2187) - 2] \times \frac{736.4593}{3 \times 57.2958} = 7.0956 \text{ kg/m}$$

ค่าแรงกดกับผนังท่อนี้ใช้ได้ เพราะมีค่าต่ำกว่า 743.95 kg/m

6.4 การเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลของโปรแกรม

ในการเปลี่ยนแปลงแก้ไขฐานข้อมูลของโปรแกรมนั้นผู้ใช้โปรแกรมสามารถทำการเปลี่ยนแปลงได้อย่างสะดวก เนื่องจากผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้เชื่อมต่อระบบฐานข้อมูลไว้ในโปรแกรมอยู่แล้ว ดังนั้นถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่างๆ หรือต้องการเพิ่มเติมฐานข้อมูลก็สามารถทำได้ดังแสดงในรูปที่ 6.25 โดยเข้าไปที่เมนู File แล้วเลือกคำสั่ง Open หลังจากนั้นจะมีหน้าต่างใหม่ แสดงเมนู QBE Query, SQL File และ Table ให้เลือก Table หลังจากนั้นโปรแกรมจะให้ผู้ใช้เลือกว่าต้องการแก้ไขปรับปรุงเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลในตารางใด เมื่อเลือกฐานข้อมูลที่ต้องการเปลี่ยนแปลงแล้วหน้าจอคอมพิวเตอร์จะแสดงรายละเอียดทั้งหมดที่มีอยู่ในฐานข้อมูลให้ผู้ใช้ทราบเพื่อให้ผู้ทำรายการต่อไปดังรูปที่ 6.26 ถ้าผู้ใช้ต้องการเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลให้เลือกเมนู Table หลังจากนั้นเลือกคำสั่ง Edit Data ดังแสดงในรูปที่ 6.27 ผู้ใช้ก็จะเข้าสู่ระบบการเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูล



รูปที่ 6.25 การเริ่มต้นเข้าเมนูเพื่อเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูล

Database Desktop

File Edit View Table Record Tools Window Help

Table: C:\project40\... AC1_12kv.db

C1_12kv	1	2	3	4	5	6	7	8
1	7.00	0.00	0.52	20.48	10.00	6.91	0.17	0.08
2	8.00	0.00	0.39	21.28	10.00	6.91	0.17	0.08
3	9.70	0.00	0.27	22.98	10.00	6.91	0.17	0.08
4	11.40	0.00	0.19	24.68	10.00	6.91	0.17	0.08
5	12.80	0.00	0.15	26.08	10.00	6.91	0.17	0.08
6	14.30	0.00	0.12	27.58	10.00	6.91	0.17	0.08
7	15.80	0.00	0.10	29.08	10.00	6.91	0.17	0.08
8	18.30	0.00	0.08	31.58	25.00	7.11	0.17	1.00
9	20.50	0.00	0.06	33.78	25.00	7.11	0.17	1.00
10	23.30	0.00	0.05	36.78	25.00	7.11	0.17	1.00
11	26.40	0.00	0.06	38.28	25.00	7.34	6.20	1.20
12	30.00	0.00	0.03	43.48	25.00	7.34	6.20	1.20
13	33.80	0.00	0.02	47.28	25.00	7.39	6.20	1.25
14	39.00	0.00	0.02	52.48	25.00	7.54	0.30	1.30

Record 1 of 14

รูปที่ 6.26 เข้าสู่ตารางในฐานข้อมูล

Database Desktop

File Edit View Table Record Tools Window Help

Table: C:\p...

C1_12kv	3	4	5	6	7	8
1	0.52	20.48	10.00	6.91	0.17	0.08
2	0.39	21.28	10.00	6.91	0.17	0.08
3	0.27	22.98	10.00	6.91	0.17	0.08
4	0.19	24.68	10.00	6.91	0.17	0.08
5	0.15	26.08	10.00	6.91	0.17	0.08
6	0.12	27.58	10.00	6.91	0.17	0.08
7	0.10	29.08	10.00	6.91	0.17	0.08
8	0.08	31.58	25.00	7.11	0.17	1.00
9	0.06	33.78	25.00	7.11	0.17	1.00
10	0.05	36.78	25.00	7.11	0.17	1.00
11	0.06	38.28	25.00	7.34	6.20	1.20
12	0.03	43.48	25.00	7.34	6.20	1.20
13	0.02	47.28	25.00	7.39	6.20	1.25
14	0.02	52.48	25.00	7.54	0.30	1.30

Record 1 of 14

Edit

รูปที่ 6.27 การเปลี่ยนแปลงข้อมูลในฐานข้อมูล

บทที่ 7

วิเคราะห์ และบทสรุป

7.1 วิเคราะห์ผล

7.1.1 ผลของการติดตั้งที่มีต่อการนำกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน

7.1.1 ผลของลักษณะการติดตั้ง โดยป้อนค่าการระ 12,000 kVA, 12 kV, 50 Hz, Power factor 0.8 lagging, อุณหภูมิของดินโดยรอบเท่ากับ 30 °C , ความต้านทานความร้อนของดิน เป็น 0.9 K.m/w โดยจะเปลี่ยนแปลง ค่าระดับความลึกในการติดตั้ง, ลักษณะการวางสาย และการต่อ ชีทลงดิน จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7.1 และ 7.2

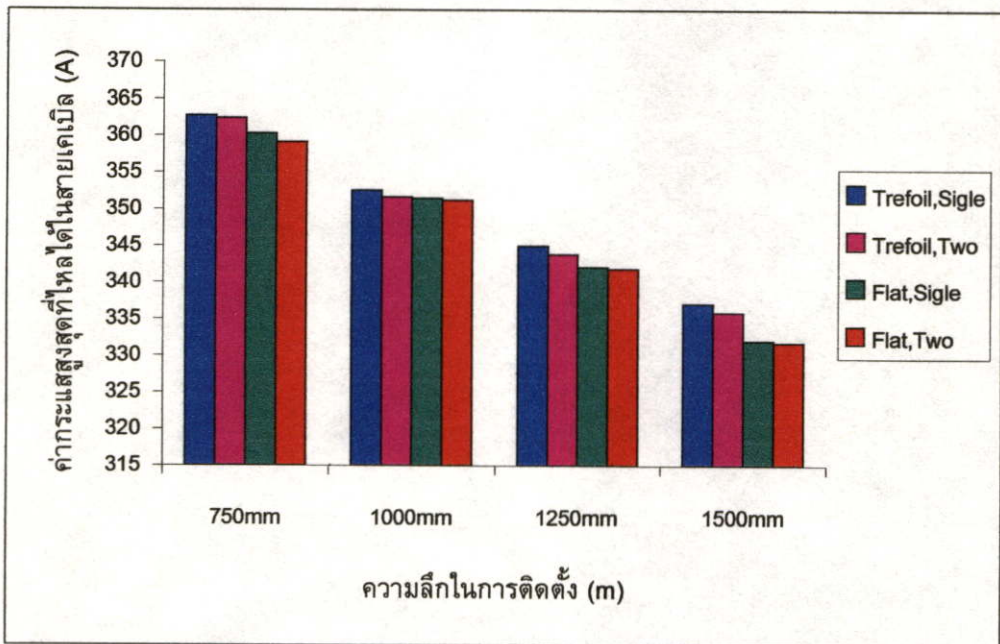
ตารางที่ 7.1 บันทึกลงผลค่ากระแสจากการวางสายแบบ Trefoil

ระดับความลึก (mm)	กระแสไหลได้สูงสุดในสายเคเบิล ขนาด 400 mm ² (A)	
	Single point และ Cross bonding	Two point
750	362.7967	362.3711
1000	352.5607	351.6433
1250	345.0142	343.9044
1500	337.0640	335.9045

ตารางที่ 7.2 บันทึกลงผลค่ากระแสจากการวางสายแบบ Flat

ระดับความลึก (mm)	กระแสไหลได้สูงสุดในสายเคเบิล ขนาด 400 mm ² (A)	
	Single point และ Cross bonding	Two point
750	360.2220	359.1317
1000	351.4729	351.2923
1250	342.1274	341.8354
1500	331.9614	331.7280

จากตารางที่ 7.1 และ 7.2 สามารถเปรียบเทียบผลออกมาเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 7.1



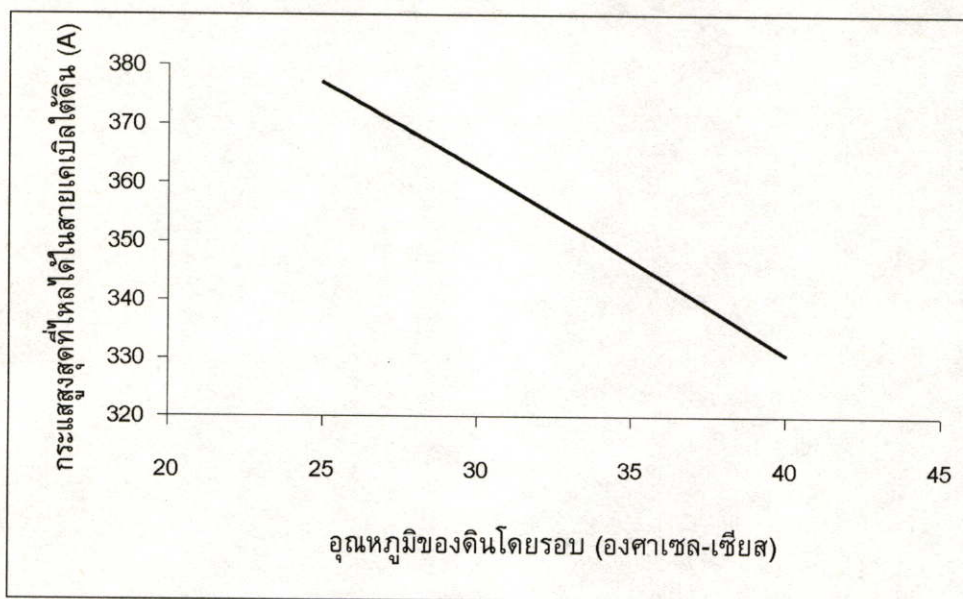
รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับความถี่ในการติดตั้ง

7.1.1.2 ผลของสภาพแวดล้อมการติดตั้ง โดยป้อนค่ากระแส 12,000 kVA, 12 kV, 50 Hz, Power factor 0.8 lagging, ระดับความถี่ในการติดตั้งที่ 750 mm, ความต้านทานความร้อนของดินเป็น 0.9 km/W โดยทำการเปลี่ยนแปลง ค่าอุณหภูมิของดิน โดยรอบ ได้ผลดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 บันทึกผลค่ากระแสโดยการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของดิน

อุณหภูมิของดิน โดยรอบ ($^{\circ}C$)	กระแสไหลได้สูงสุดในสายเคเบิล ขนาด 400 mm^2 (A)
25	377.1678
28	368.3611
30	362.3711
32	356.2804
34	350.0837
36	343.7754
38	337.3491
40	330.7980

จากตารางที่ 7.3 สามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับอุณหภูมิของดิน โดยรอบได้ดังรูปที่ 7.2



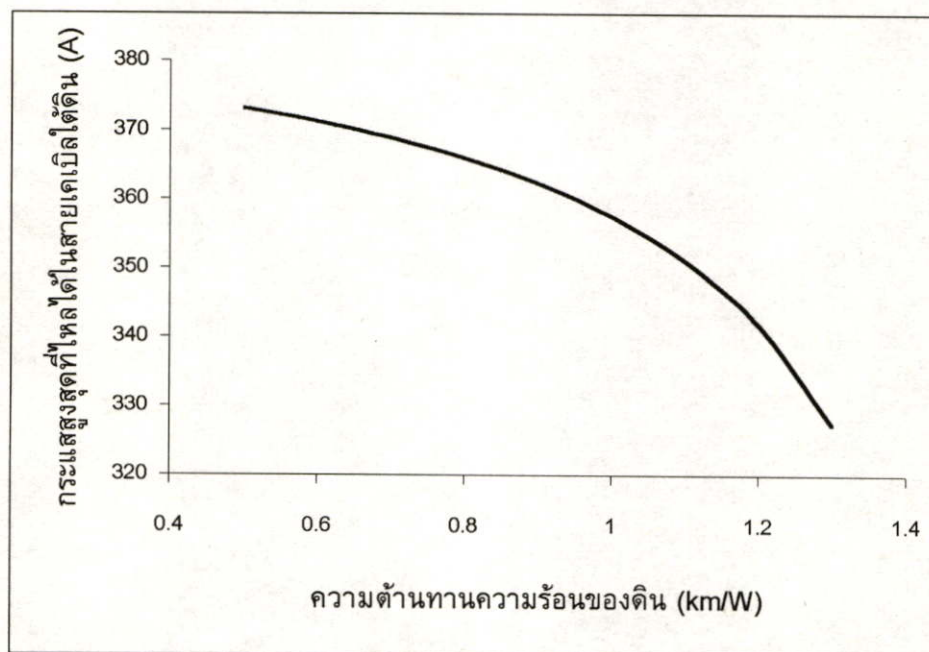
รูปที่ 7.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับอุณหภูมิของดินโดยรอบ

7.1.1.3 ผลของสภาพแวดล้อมการติดตั้ง โดยป้อนค่าภาระ 12,000 kVA, 12 kV, 50 Hz, Power factor 0.8 lagging, ระดับความลึกในการติดตั้งที่ 750 mm, ค่าอุณหภูมิของดินโดยรอบเท่ากับ 30°C โดยทำการเปลี่ยนแปลง ความต้านทานความร้อนของดิน ได้ผลดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 บันทึกผลค่ากระแสโดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานความร้อนของดิน

ความต้านทานความร้อนของดิน (km/W)	กระแสไหลได้สูงสุดในสายเคเบิลขนาด 400 mm^2 (A)
0.5	373.2494
0.6	371.2984
0.7	368.9414
0.8	366.0376
0.9	362.3711
1.0	357.5952
1.1	351.1148
1.2	341.8126
1.3	327.3110

จากตารางที่ 7.4 สามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับความต้านทานความร้อนของดิน ได้ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสูงสุดกับความต้านทานความร้อนของดิน

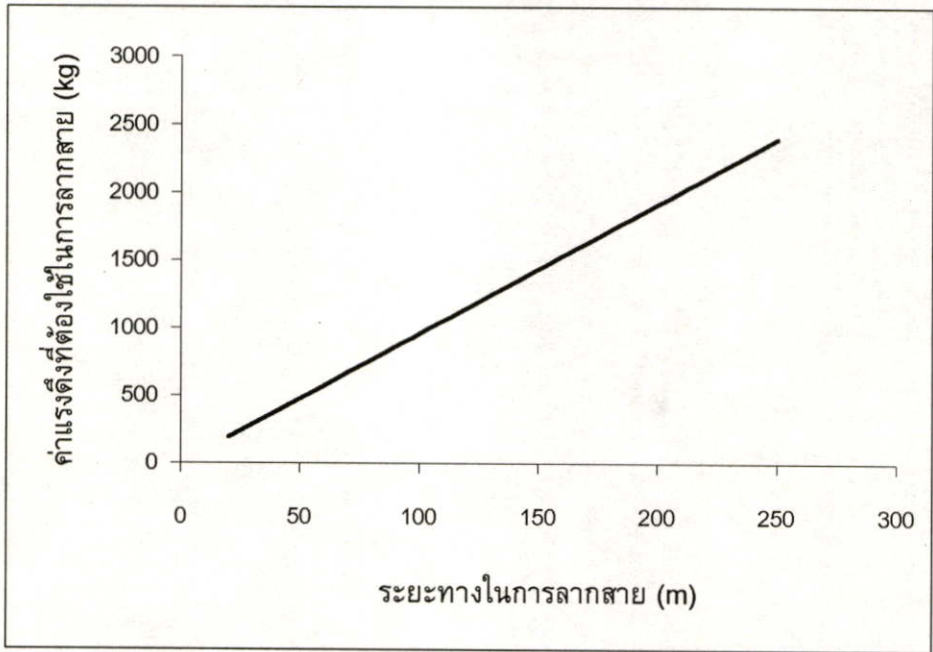
7.1.2 ผลของการติดตั้งที่มีต่อค่าแรงดึงของสายเคเบิลใต้ดิน

7.2.1 ผลของระยะทาง และความโค้งงอของท่อในการติดตั้ง โดยใช้สายเคเบิล 24 kV พื้นที่หน้าตัด 400 mm² น้ำหนักของสายเท่ากับ 4961 kg/km ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 6 นิ้ว (15.4233 mm) ค่าแรงดึงสูงสุดของสาย 3440 kg โดยจะเปลี่ยนแปลง ระยะทางได้ผลดัง ตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อระยะทาง

ระยะทางในการติดตั้ง (m)	แรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิล (kg)
20	192.0153
60	576.0458
100	960.0763
160	1536.1222
200	1920.1528
250	2400.1901

จากตารางที่ 7.5 สามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในการติดตั้งกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิลได้ดังรูปที่ 7.4



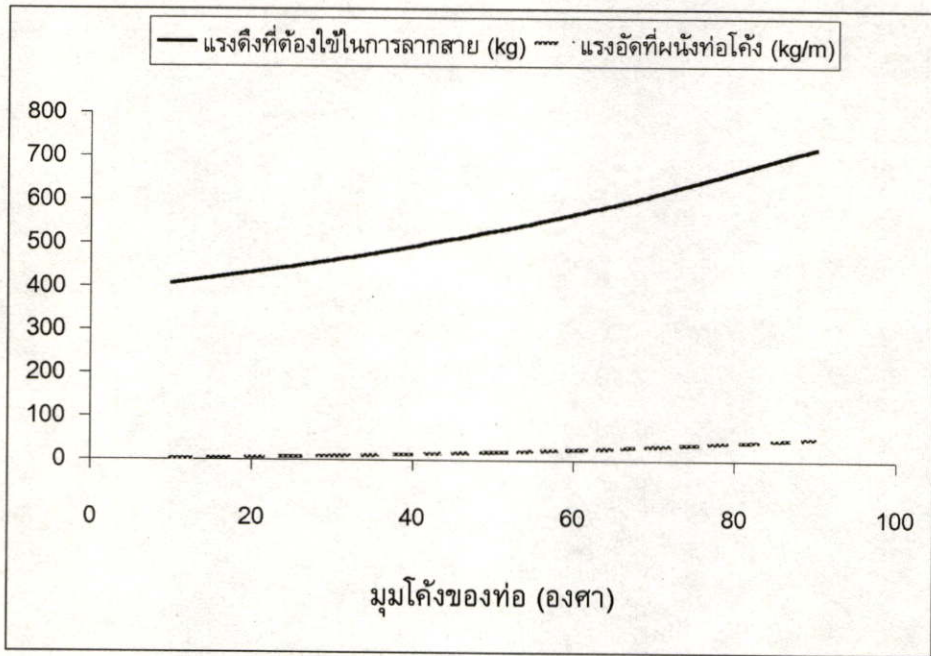
รูปที่ 7.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสาย

7.1.2.2 ผลของความโค้งงอของท่อในการติดตั้ง โดยใช้สายเคเบิล 24 kV พื้นที่หน้าตัด 400 mm^2 น้ำหนักของสายเท่ากับ 4961 kg/km ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 6 นิ้ว (15.4233 mm) ค่าแรงดึงสูงสุดของสาย 3440 kg โดยจะเปลี่ยนแปลงมุมโค้งงอของท่อ ได้ผลดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6 บันทึกรายการของค่าแรงดึงต่อความโค้งงอของท่อ

ความโค้งงอของท่อ (องศา)	แรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิล (kg)	ค่าแรงอัดที่ผนังท่อ (kg/m)
10	406.9132	2.3385
30	461.1842	8.7873
50	529.1611	18.3443
60	569.3391	24.6364
70	614.3051	32.1678
90	720.95172	51.8134

จากตารางที่ 7.6 สามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งงอของท่อกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิลและค่าแรงอัดที่ผนังท่อดังรูปที่ 7.5



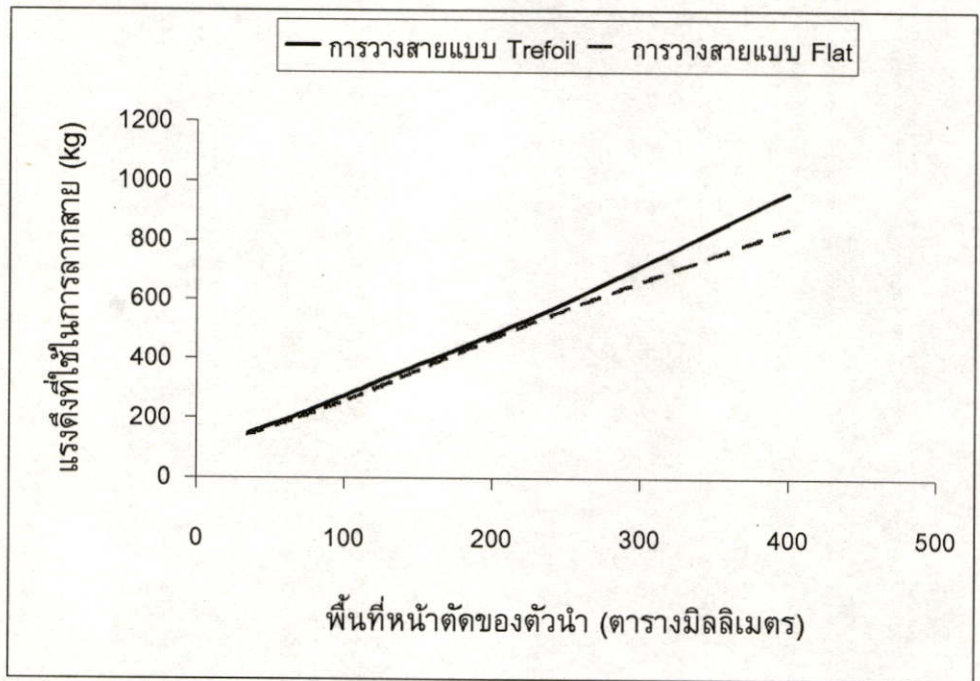
รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและแรงอัดที่ผนังท่อกับมุมโค้งของท่อ

7.1.2.3 ผลของขนาดของท่อ, และลักษณะการวางสายในการติดตั้ง โดย กำหนดให้ สาย 24 kV ขนาด 35 mm² เปลี่ยนแปลงขนาดท่อในการติดตั้ง ได้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อขนาดของท่อ

ขนาดของท่อ (นิ้ว)	แรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิล (kg)	
	วางสายแบบ Flat	วางสายแบบ Trefoil
3.5	180.0203	157.2880
4	167.3849	150.7680
5	154.2320	144.7769
6	148.3800	142.3310

จากตารางที่ 7.7 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ขนาดของท่อกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิล ดังแสดงในรูป ที่ 7.6



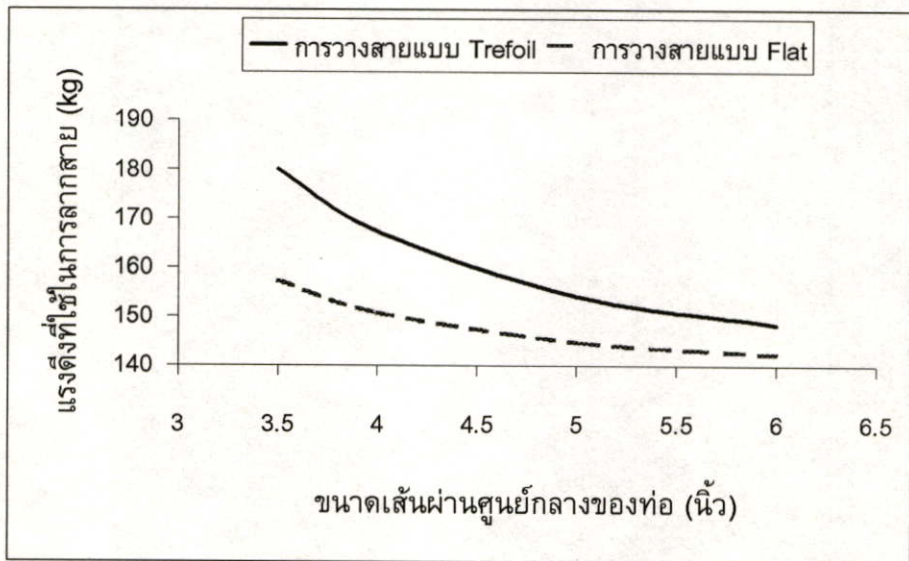
รูปที่ 7.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลกับแรงดึง

7.1.2.4 ผลของขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิล และลักษณะการวางสายในการติดตั้ง โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และเปลี่ยนแปลงขนาดสายที่ใช้ลาก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 บันทึกผลของค่าแรงดึงต่อขนาดของสาย

ขนาดของสาย (mm ²)	แรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิล (kg)	
	วางสายแบบ Flat	วางสายแบบ Trefoil
35	148.3800	142.3310
70	211.0172	201.0356
120	317.0150	297.3956
240	568.4302	547.9781
400	960.0764	841.3034

จากตารางที่ 7.8 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ขนาดของสายเคเบิลกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดท่อกับแรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสาย

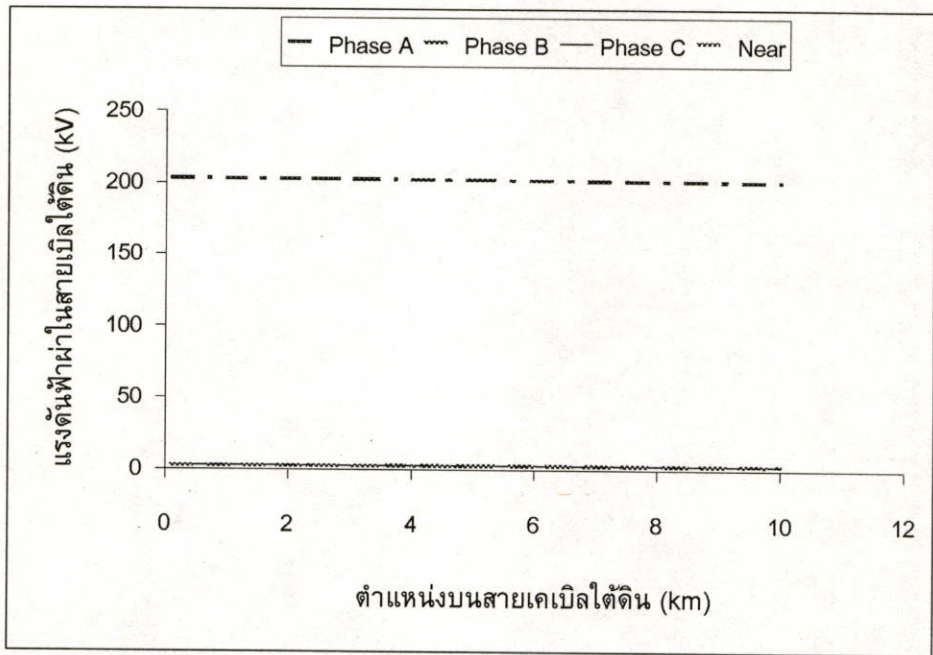
7.1.3 ผลของฟ้าผ่าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินในกรณีต่างๆ

7.1.3.1 ผลของฟ้าผ่าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆบนสายเคเบิลใต้ดิน โดยใช้สายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 mm^2 ที่พิกัดแรงดัน 24 kV ได้ผลดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 บันทึกผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งบนสายเคเบิลใต้ดิน (km)	แรงดันฟ้าผ่าในสายเคเบิลใต้ดิน (kV)			
	กรณีฟ้าผ่าโดยตรง			กรณีฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียง
	Phase A	Phase B	Phase C	
0.1	203.108	2.451	2.451	2.318
2.5	202.821	2.510	2.510	2.311
5	202.305	2.621	2.621	2.300
7.5	201.784	2.740	2.740	2.288
10	201.260	2.867	2.867	2.276

จากตารางที่ 7.9 สามารถสร้างกราฟแสดงค่าแรงดันฟ้าผ่าในสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆตลอดความยาวสาย ดังแสดงในรูปที่ 7.8



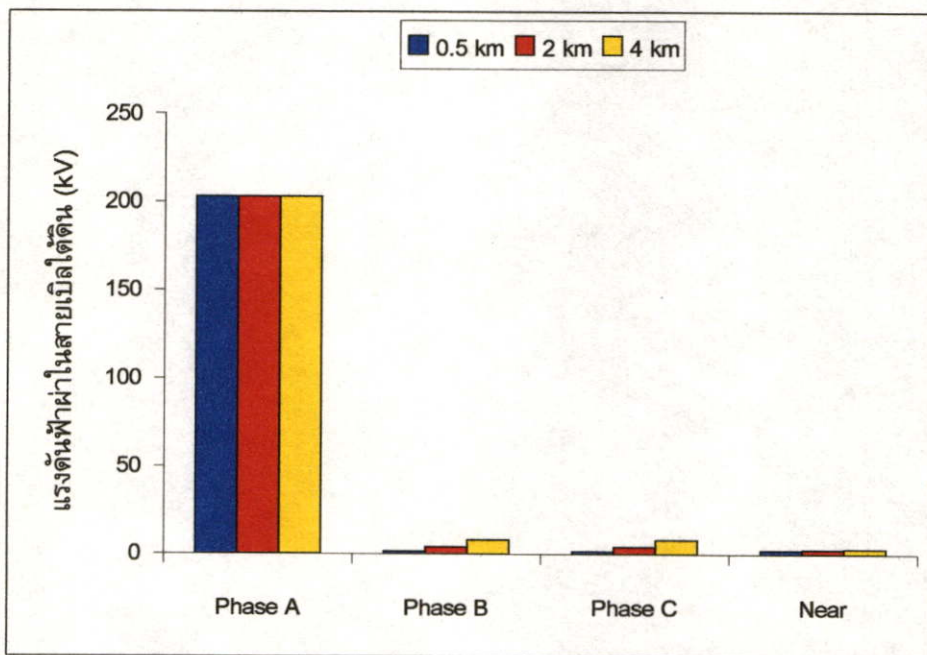
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆ

7.1.3.2 ผลของไฟฟ้าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ระยะทางจากจุดที่เกิดไฟฟ้าถึงจุดต่อสาย โดยใช้สายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 mm^2 ที่พิกัดแรงดัน 24 kV ได้ผลดังตารางที่ 7.10

ตารางที่ 7.10 บันทึกผลของไฟฟ้าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่พิกัดแรงดัน

ที่ระยะทางจาก จุดที่เกิดไฟฟ้าถึง จุดต่อสาย (km)	แรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน (kV) ที่ระยะ 100m จากจุดต่อสาย			
	กรณีไฟฟ้าโดยตรง			กรณีไฟฟ้าบริเวณ
	Phase A	Phase B	Phase C	ใกล้เคียง
0.5	203.112	1.396	1.396	2.010
2	203.027	3.775	3.775	2.566
4	203.028	7.710	7.710	2.707

จากตารางที่ 7.10 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินที่ความยาวของสายเดินในอากาศจากจุดที่เกิดไฟฟ้าถึงจุดต่อสาย ในระยะต่างๆ ดังในรูปที่ 7.9



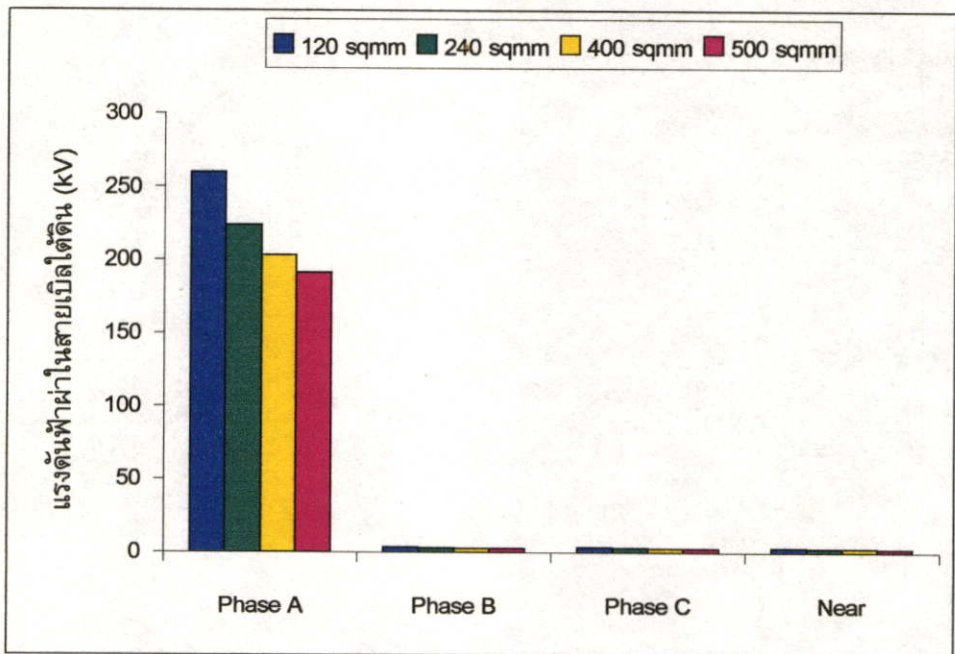
รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันฟ้าผ่ากับระยะห่างของสายจากจุดที่เกิดฟ้าผ่า

7.1.3.3 ผลของฟ้าผ่าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างๆ โดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน ที่พิกัดแรงดัน 24 kV และสายเดินในอากาศขนาดเท่ากัน ได้ผลดังตารางที่ 7.11

ตารางที่ 7.11 ตารางบันทึกผลของฟ้าผ่าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ขนาดต่างๆ

ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิลใต้ดิน (mm ²)	แรงดันฟ้าผ่าในสายเคเบิลใต้ดิน (kV) ที่ระยะ 100m จากจุดต่อสาย			
	กรณีฟ้าผ่าโดยตรง			กรณีฟ้าผ่าบริเวณใกล้เคียง
	Phase A	Phase B	Phase C	
120	259.871	3.196	3.196	2.96
240	223.739	2.790	2.790	2.549
400	203.108	2.451	2.451	2.318
500	191.186	2.347	2.347	2.184

จากตารางที่ 7.11 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันฟ้าผ่าในสายเคเบิลใต้ดินที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต่างกันของสายเคเบิลใต้ดิน ดังในรูปที่ 7.10



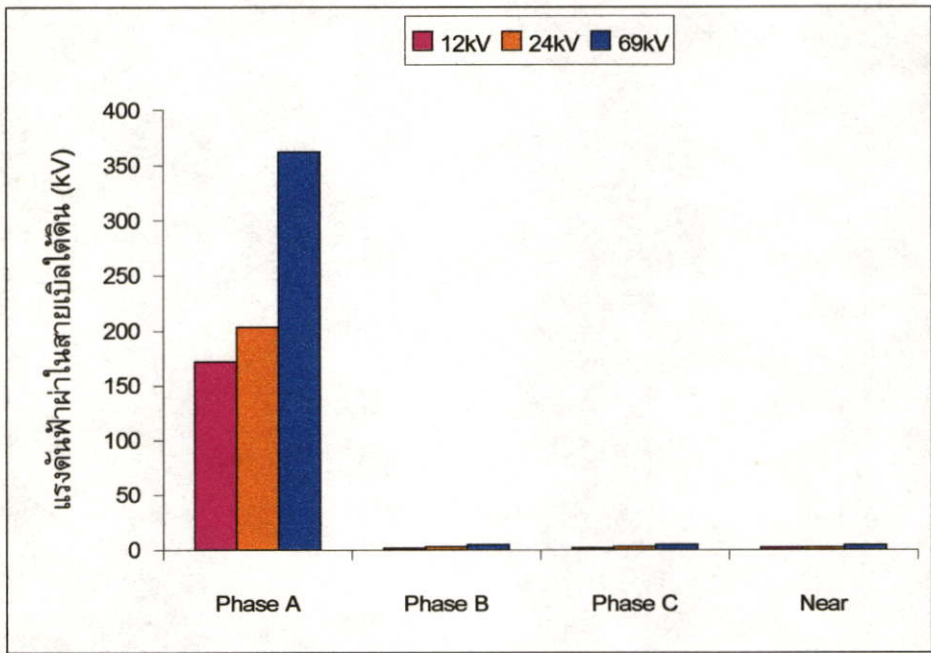
รูปที่ 7.10 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลกับพื้นที่หน้าตัด

7.1.3.4 ผลของไฟฟ้าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินที่พิกัดแรงดันต่างกัน โดยใช้สายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 400 mm² ที่พิกัดแรงดัน 12 kV, 24 kV และ 69 kV ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 7.12

ตารางที่ 7.12 ผลของไฟฟ้าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่พิกัดแรงดันต่างๆ

พิกัดแรงดัน ของสาย เคเบิลใต้ดิน	แรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน (kV) ที่ระยะ 100 m จากจุดต่อสาย			
	กรณีไฟฟ้าโดยตรง			กรณีไฟฟ้าบริเวณ ใกล้เคียง
	Phase A	Phase B	Phase C	
12kV	171.588	1.702	1.702	1.964
24kV	203.108	2.451	2.451	2.318
69kV	362.238	4.287	4.287	4.049

จากตารางที่ 7.12 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ที่พิกัดแรงดันของสายเคเบิลใต้ดิน ดังในรูปที่ 7.11



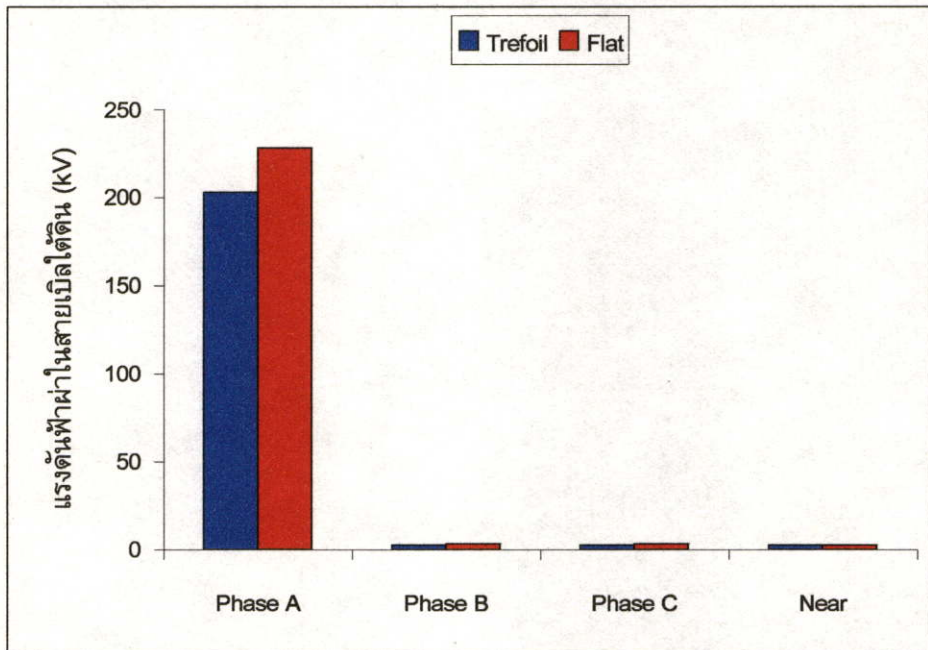
รูปที่ 7.11 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลกับระดับแรงดันพิกัด

7.1.3.5 ผลของไฟฟ้าที่มีต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ลักษณะการวางสายต่างกัน โดยใช้สายเคเบิลใต้ดินขนาด 400 mm^2 ที่พิกัดแรงดัน 24 kV จะได้ผลดังตารางที่ 7.13

ตารางที่ 7.13 ตารางบันทึกผลของไฟฟ้าที่มีผลต่อสายเคเบิลใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆ

ลักษณะการวางสาย	แรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน (kV) ที่ระยะ 100 m จากจุดต่อสาย			
	กรณีไฟฟ้าโดยตรง			กรณีไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียง
	Phase A	Phase B	Phase C	
Trefoil	203.108	2.451	2.451	2.318
Flat	228.215	3.264	3.264	2.596

จากตารางที่ 7.13 นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินกับการวางสายแบบ Trefoil กับ แบบ Flat ดังในรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลกับลักษณะการวางสาย

จากการทดลองเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่างๆ ที่มีผลต่อการนำกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน, การลากสายเคเบิลใต้ดิน และแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินในลักษณะต่างๆ จะเห็นได้ว่า

□ ในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินเพื่อใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระโหลดนั้นสายเคเบิลใต้ดินจะไม่สามารถนำกระแสได้เท่ากับกระแสที่บริษัทผู้ผลิตสายให้มา เนื่องจากผลของการติดตั้งทำให้สายเคเบิลใต้ดินมีความสามารถในการนำกระแสลดลง สิ่งที่มีผลกระทบต่อการนำกระแสประกอบด้วย

1. ความลึกในการติดตั้งสายเคเบิล เมื่อความลึกมากขึ้นสายเคเบิลจะมีความสามารถในการนำกระแสลดลง สามารถดูได้จากรูปที่ 7.1
2. ความต้านทานความร้อน และอุณหภูมิแวดล้อมของดินจะทำให้ความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิลลดลงเมื่อความต้านทานความร้อน และอุณหภูมิแวดล้อมของดินมีค่าสูงขึ้น สามารถดูได้จากรูปที่ 7.2 และ 7.3
3. การต่อขั้วลงดินจากการเปรียบเทียบพบว่า การต่อขั้วลงดินแบบ single point และ Cross bonding จะทำให้สายเคเบิลมีความสามารถนำกระแสได้สูงกว่า แบบ Two point หรือ muti-point สามารถดูได้จากรูปที่ 7.1
4. การวางสายแบบ Trefoil จะสามารถนำกระแสได้สูงกว่าแบบ Flat ดังแสดงในรูปที่ 7.1

□ ค่าแรงดึงที่ใช้ในการลากสายเคเบิลได้คืบขึ้นอยู่กับการติดตั้งดังนี้

1. แรงดึงที่ต้องใช้ในการลากสายเคเบิลจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางและมุมโค้งของท่อ สามารถดูจากรูปที่ 7.4 และ 7.5
2. สายเคเบิลขนาดใหญ่จะต้องใช้แรงดึงในการลากสายมาก สามารถดูจากรูปที่ 7.6
3. แรงดึงในการลากสายเคเบิลจะลดลงถ้าใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถดูจากรูปที่ 7.7
4. การวางสายแบบ Trefoil จะใช้แรงดึงในการลากสายเคเบิลมากกว่าการวางสายแบบ Flat สามารถดูได้จากรูปที่ 7.6 และ 7.7

□ แรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลได้คืบในลักษณะต่างๆ

กรณีไฟฟ้าโดยตรง

1. แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสายที่ถูกผ่าจะมีค่าสูงสุด ส่วนอีกสองสายจะมีค่าน้อย เพราะเกิดจากการเหนี่ยวนำเข้ามาในสาย
2. เมื่อแรงดันและกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สายเคเบิลได้คืบแล้ว จะมีค่าลดลงตามระยะทางที่เคลื่อนไป เนื่องจากความสูญเสียในสาย และมีพลังงานถ่ายเทไปยังสายข้างเคียง จึงทำให้ในสายข้างเคียงมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดูได้จากรูปที่ 7.8
3. ที่ขนาดกระแสไฟฟ้าค่าเดียวกัน สายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเล็ก จะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์มากกว่า ทำให้มีค่าแรงดันในสายเคเบิลสูงกว่า ตัวนำขนาดใหญ่ ดูได้จาก รูปที่ 7.10
4. ที่ขนาดกระแสไฟฟ้าค่าเดียวกัน สายเคเบิลขนาดพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน สายที่มีพิกัดแรงดันสูง (ฉนวนหนากว่า) จะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์มากกว่า ทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิลสูงกว่า ดูได้จากรูปที่ 7.11

กรณีไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียง

1. แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงจะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่เกิดจากไฟฟ้าโดยตรง
2. แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทุกสายจะมีค่าเท่ากัน เพราะมีการวางสลับสาย จึงทำให้ระยะห่างจากไฟฟ้าเฉลี่ย และความสูงจากพื้นเฉลี่ยเท่ากัน
3. แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายดินในอากาศจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆ เนื่องจากมีการเหนี่ยวนำจากไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในทุกๆจุดตลอดความยาวสาย และมีการเดินทางมาเสริมกัน เมื่อห่างจากจุดที่เกิดไฟฟ้าออกไป ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละจุดที่เกิดขึ้น จะมีค่าลดลงทำให้คลื่นแรงดันที่มาเสริมมีค่าลดลง

4. ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าที่เกิดในสายเคเบิลใต้ดิน จะไม่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีผลจากการเหนี่ยวนำของฟ้าผ่ามาเสริมอีก นอกจากนี้ยังมีค่าลดลงเนื่องจากความสูญเสียในสายเคเบิลด้วย
5. ในการวางสายแบบ Flat จะทำให้ขนาดแรงดันฟ้าผ่าที่เกิดมีค่าสูงกว่าการวางสายแบบ Trefoil

7.2 สรุปผล

การออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่จัดทำขึ้น โดยใช้ภาษาแคล์ไฟต์นี้ สามารถออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินที่มีระดับพิคกแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 24 – 69 kV

ในการออกแบบการใช้งานของโปรแกรมนี้ สามารถแบ่งระดับความเหมาะสมของผู้ใช้โปรแกรมออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับเบื้องต้น และระดับขั้นสูง ในส่วนของระดับเบื้องต้นผู้ใช้เพียงแต่ทราบค่าของพิคกกำลังไฟฟ้าของภาระโหลด และระยะทางในการเดินสายไฟฟ้าใต้ดิน ผู้ใช้สามารถที่จะออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินได้ เนื่องจากข้อมูลพื้นฐานอื่นๆ ที่ต้องใช้ในการออกแบบโปรแกรม เช่น ค่าอุณหภูมิใช้งาน ความลึกของบ่อพักสาย และความต้านทานดินเป็นต้น ได้ถูกกำหนดเป็นค่าเริ่มต้นไว้เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดทั้งหมดของการออกแบบ อย่างไรก็ตามผู้ใช้สามารถมั่นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมนี้สามารถนำไปใช้ได้จริง เนื่องจากค่าพื้นฐานทั้งหมดที่ถูกกำหนดในโปรแกรมเป็นค่ามาตรฐาน และเป็นค่าเฉลี่ยที่การไฟฟ้านครหลวงใช้ในการออกแบบ และติดตั้งระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน ในส่วนของระดับขั้นสูงนั้นผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโปรแกรมให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการ และใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบการออกแบบ และการติดตั้งในแบบต่างๆ เมื่อค่าพารามิเตอร์บางส่วนเปลี่ยนแปลงไป ยิ่งไปกว่านั้นในกรณีที่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินที่ต้องการออกแบบเป็นลักษณะการต่อสายใต้ดินเข้ากับสายเดินในอากาศ ผู้ใช้สามารถที่จะศึกษาลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่าทั้งในกรณีเกิดฟ้าผ่าโดยตรงบนสายเดินในอากาศและข้างเคียงสายเดินในอากาศที่มีผลกระทบต่อสายใต้ดิน ในแต่ละช่วงของระยะทาง และในแต่ละเวลาโดยรูปคลื่นที่แสดงนั้นจะแสดงเป็นรูปคลื่นเดินทางในแต่ละช่วงความยาวของสายเหนือดิน และสายใต้ดินในรูปแบบกราฟฟิกเคลื่อนไหวบนจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งช่วยในการตัดสินใจเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันได้จริง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อความสามารถในการนำกระแสของสาย, แรงดึงในการลากสายและขนาดแรงดันกระแสลัดวงจรของสายเคเบิลใต้ดิน โดยแสดงผลในรูปแบบตารางและกราฟ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิศวกรผู้ออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดิน และยังช่วยลดข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความเสียหาย การสิ้นเปลือง

วัสดุ อุปกรณ์ เวลา และค่าใช้จ่ายในการออกแบบเป็นอย่างมาก รวมทั้งเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลยาวนานขึ้น

7.3 ข้อเสนอแนะ

จากคุณสมบัติ และลักษณะการทำงานต่าง ๆ ของโปรแกรมที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเห็นได้ว่าขอบเขตของเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ยังไม่ได้พิจารณาถึงการวิเคราะห์ภาระโหลดที่มีลักษณะเป็นโครงข่าย การวิเคราะห์แรงดันเสิร์จ และกระแสเสิร์จที่เกิดขึ้นในซีท การวิเคราะห์ผลของเสิร์จในขณะที่มีการต่อกับคัทฟิวส์ รวมทั้งยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน ดังนั้นถ้าต้องการนำโปรแกรมนี้ไปใช้งานให้สมบูรณ์มากขึ้นควรจะพิจารณาให้ครอบคลุมถึงรายละเอียดของการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] International Electrotechnical Commission IEC Standard. **Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% Load Factor)**. 1982.
- [2] E. W. G. Bungay, D. McAllister. **Electrical Cable Handbook**. Second Edition.
- [3] Allan Greenwood. **Electrical Transients in Power Systems**. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [4] Toran Gunen. **Modern Power System Analysis**. John Wiley & Sons, Inc. 1991
- [5] Thomas P. Arroll, C. David Mercior. **Southern Company Power Cable Manual**. Georgia. Southern Company. 1991.
- [6] J. A. Williams. **Underground Transmission System Reference Book**. New York. 1992.
- [7] Elastimold. **Installation Instructions**. New Jersey. 1992.
- [8] ANSI/IEEE Standard 525. 1987.
- [9] Eric Boulevard Schenectady. **Underground Transmission System Reference Book**. Editor Prepared by Power Technologies, Inc. New York 12301. 1992.
- [10] Edison Electric Institute. **Underground Transmission System Reference Book**. Prepared for An Editorial Staff of the Edison Electric Institute Transmission and Distribution Committee. 1957.
- [11] Chubu Electric Power Co. Ltd. Construction Division **Underground Transmission Section Conduit Line Design**. 1988.
- [12] P. Chowdhuri. "Analysis of Lightning Induced Voltage on Overhead Line." IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, 1989. pp. 479–492.
- [13] R. C. Difenburg. **Pipe Line Design for Pipe Line Feeders**. Phelps Dodge Thailand Ltd. 1953.
- [14] Charles A. Gross. **Power System Analysis**. John Wiley & Sons, Inc. 1979.
- [15] Rakosh Das Begamudre. **Extra High Voltage AC Transmission Engineering**. John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [16] A. E. Guile, W. Peterson. **Electrical Power Systems**. Pergamon Press. 1986.
- [17] Martin A. Uman. **Lightning : Advanced Physics Monograph Series**. McGraw-Hill. 1969.

- [18] S. Y. King, N. A. Halfter. **Underground Power Cables.** Longman. 1982.
- [19] A. C. Liew and S. C. Mar. “Extension of the Chowdhuri-Gross Model for Lightning Induced Voltage on Overhead Line.” IEEE Trans. on Power System, vol. PWRD-1, 1986. pp. 240-247
- [20] Earle C. Bascoom. “Underground Cable System Design Course.” Power Technologies, Inc. May 16, 1997.
- [21] International Standard CEI, IEC 287-1-2. **Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculation of Losses – Sheath Eddy Current Loss Factors for Two Circuits in Flat Formation.** 1st Edition. 1993.
- [22] International Electrotechnical Commission, IEC Recommendation, Publication 343. **Recommended Test Methods for Determining the Relative Resistance of Insulating materials to Breakdown by Surface Discharges.** 1970.
- [23] Hokkaido Electric Power Co., Inc. “Underground Distribution System.”
- [24] Metropolitan Electricity Authority. “XLPE Cable User’s Guide.”
- [25] พิสิทธิ์ ธีรวสิน, ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. “การออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้คอมพิวเตอร์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. พฤศจิกายน 2538. หน้า 55 - 60
- [26] พิสิทธิ์ ธีรวสิน, จารุรัตน์ สินธุสนธิชาติ, ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. “การวิเคราะห์แรงดันเคาะในระบบใต้ดิน.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 7-8 พฤศจิกายน 2539. หน้า PW 142 - PW 147
- [27] พิสิทธิ์ ธีรวสิน, ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, ศักดิ์ชัย ตรีรัตน์พิจารณ์. “การออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดินโดยคอมพิวเตอร์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 7-8 พฤศจิกายน 2539. หน้า PW 155 - PW 160
- [28] พิสิทธิ์ ธีรวสิน, จารุรัตน์ สินธุสนธิชาติ, ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. “การออกแบบการติดตั้งระบบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้คอมพิวเตอร์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 13-14 พฤศจิกายน 2540. หน้า 50-54

- [29] พิสิทธิ์ ธีรวสิน, จารุรัตน์ สินธุสนธิชาติ, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. “การวิเคราะห์การต่อซีทลงกราวด์ที่มีผลต่อสายเคเบิ้ลใต้ดินโดยใช้คอมพิวเตอร์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 12-13 พฤศจิกายน 2541. หน้า 166-169
- [30] การไฟฟ้านครหลวง. “โครงการฝึกอบรมช่างเทคนิคเพื่อช่วยงานวิศวกร.” ปี 1992.
- [31] Phelps Dodge Thailand Ltd. **High Voltage Power Cable and Their Application.**
- [32] Phelps Dodge Thailand Ltd. ขั้นตอนการผลิตสายเคเบิ้ลไฟฟ้าแรงสูง.
- [33] An American National Standard, ANSI/IEEE Std. 525 – 1987. **IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations.** Approved February 19, 1988.
- [34] P. Thiravasin, J. Sinthusonthichat, S. Potivejkul “Computer Aided Design for Underground Cable System” IEEE Region 10 Conference’99 (TENCON’99), Chejudo Island, Korea. Vol. II, 1999. pp 1462-1465.

ประวัติผู้เขียน

นายพิพัฒน์ ธีรวสิน เกิดเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน 2513 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (อศบ.) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2536 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ปีการศึกษา 2534

ปี พ.ศ. 2535 ทำงานที่บริษัทเฟ็ดดีรอล คอนซัลต์ติ้งเอ็นจิเนียริง จำกัด ตำแหน่งผู้ตรวจสอบงานระบบไฟฟ้า

ปี พ.ศ. 2537 จนถึงปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร