

โปรแกรมช่วยออกแบบและประเมินราคาสำหรับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบฉนวนแข็งเอ็กเซลพีอี



นาย นพพร บุญเพียร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

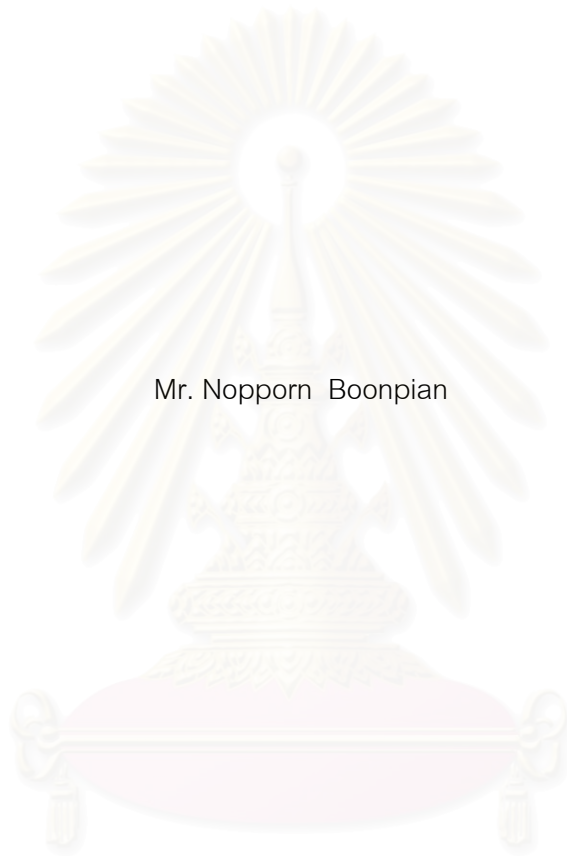
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2952-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTER AIDED DESIGN AND COST ESTIMATION FOR UNDERGROUND XLPE HIGH VOLTAGE  
CABLE SYSTEM



Mr. Nopporn Boonpian

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

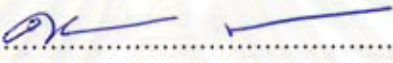
Academic Year 2005

ISBN 974-53-2952-5

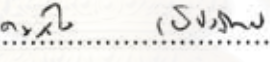
หัวข้อวิทยานิพนธ์                   โปรแกรมช่วยออกแบบและประเมินราคาสำหรับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน  
แบบฉนวนแข็งเอ็กแอลพีอี  
โดย   นายนพพร บุญเพียร  
สาขาวิชา                               วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา                       อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

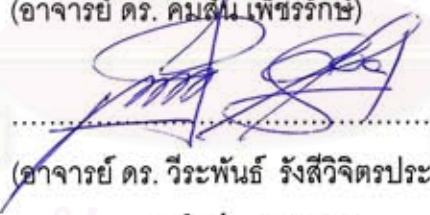
---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นพพร บุญเพ็ญ : โปรแกรมช่วยออกแบบและประเมินราคาสำหรับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แบบ ๓ มิติ เอ็กแอลพีซี (COMPUTER AIDED DESIGN AND COST ESTIMATION FOR UNDERGROUND XLPE HIGH VOLTAGE CABLE SYSTEM ) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 187 หน้า. ISBN 974-53-2952-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณปริมาณกระแสและประเมินราคาค่าใช้จ่ายตลอดอายุใช้งานของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เพื่อช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการจ่ายกระแส และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน เนื่องจากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีราคาแพงมากในการติดตั้งและการบำรุงรักษาเมื่อเทียบกับระบบสายอากาศ

โปรแกรมนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษาเบสิก (Visual Basic 6) ผู้ใช้สามารถคำนวณหาค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลกรณีที่มีการติดตั้งหลายวงจรที่มีความแตกต่างกันในโครงสร้างสายเคเบิลและหลากหลายรูปแบบการติดตั้งได้เมื่อเทียบกับโปรแกรมของ Electric Power Research Institute (EPRI) ที่สามารถคำนวณได้เฉพาะรูปแบบที่มีให้เลือกเท่านั้น โดยไม่สามารถคำนวณกรณีหลายวงจรที่สายเคเบิลมีโครงสร้างแตกต่างกันได้ นอกจากนี้ตัวโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นสามารถคำนวณหาขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการติดตั้งเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายตลอดอายุใช้งาน และรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลที่เหมาะสมเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสไหล ผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลการเปรียบเทียบการคำนวณจากทั้งสองโปรแกรมเทียบกับค่า มาตรฐานที่กำหนดใน IEEE 835

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... นพพร บุญเพ็ญ  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..... 2548.....

## 4570369721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: AMPACITY CABLE / UNDERGROUND CABLE / XLPE/CAD

NOPPORN BOONPIAN: COMPUTER AIDED DESIGN AND COST ESTIMATION FOR UNDERGROUND XLPE HIGH VOLTAGE CABLE SYSTEM. THESIS ADVISOR: WEERAPAN RANGSRIVIGITPRAPA , DR. 187 pp. ISBN 974-53-2952-5.

This thesis has been studied and developed a program for calculation the current ampacity and estimation overall investment cost throughout the underground cable life in order to safe load current and increase the usage efficiency, since the installation and maintenance price of underground cables are more expensive than overhead line.

The program was developed with visual basic 6. User can calculate the current ampacity of underground cable installed with the other circuits ,i.e. different cable structures and installation types better than the program introduced by Electric Power Research Institute's (EPRI) . The latter can not calculate in case of many circuits which have different cable structures. In addition, the developed program can determine the optimum cable size for installation to minimize the overall cost throughout its life and optimize the arrangement of underground cable to increase the current ampacity. The results of study present a comparison study between the developed program and EPRI 's program with the standard value as recommended in IEEE 835.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Electrical Engineering .....Student's signature.....  
Field of study..... Electrical Engineering .....Advisor' signature.....  
Academic year...2005.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. วีระพันธ์ ริงส์ วิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆมาโดยตลอด ขอขอบคุณกรไฟฟ้านครหลวงและเพื่อนร่วมงานทุกคนในการไฟฟ้าที่ให้ความรู้และทุนการศึกษา ขอขอบคุณ คุณมณฑล ถาวรพันธ์ ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับแบบการติดตั้งของการไฟฟ้านครหลวงและข้อมูลอื่นๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา และสนับสนุน เป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฒ
รายการสัญลักษณ์.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 สายเคเบิลและการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน.....	3
2.1 สายเคเบิลฉนวนแข็ง.....	3
2.2 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน.....	7
3 ทฤษฎีการคำนวณพิกัดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน.....	12
3.1 ความต้านทานไฟฟ้าในสายเคเบิล.....	12
3.2 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าเก็บประจุในสายเคเบิล.....	17
3.3 กำลังสูญเสียในซิลด์โลหะ.....	19
3.4 ความต้านทานทางความร้อนของการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน.....	31
4 ทฤษฎีการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน.....	44
4.1 การประเมินราคากำลังสูญเสียในความต้านทานสายเคเบิล.....	
ตลอดช่วงอายุการใช้งาน.....	44
4.2 การประเมินราคาของกำลังสูญเสียกระแสอัดประจุและไดอิเล็กตริก.....	49
4.3 การเลือกขนาดของตัวนำที่เหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์.....	49

บทที่	หน้า
5 การเขียนโปรแกรมคำนวณและการใช้งานโปรแกรม .....	51
5.1 การเขียนโปรแกรมคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน.....	51
5.2 การเขียนโปรแกรมการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน.....	64
5.3 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม.....	66
6 การศึกษาออกแบบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น .....	75
6.1 การจัดวางตำแหน่งของสายเคเบิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ ติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน.....	75
6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายกระแสโดยวิธีการปรับระยะห่าง ระหว่างสายเคเบิล.....	92
6.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายกระแสโดยให้แต่ละวงจรจ่ายกระแส ที่อุณหภูมิสูงสุดที่กำหนด.....	97
6.4 การเพิ่มประสิทธิภาพจ่ายกระแสโดยวิธีการต่อซิลด์โลหะลงดิน.....	101
6.5 การคำนวณหาอุณหภูมิในสายเคเบิล .....	107
6.6 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณกับแบบ UG-4-410 แผ่นหมายเลขที่ 2 ของการไฟฟ้านครหลวง .....	110
6.7 การใช้โปรแกรมคำนวณในการขยายวงจรเพิ่ม.....	116
6.8 การใช้โปรแกรมคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลที่แต่ละวงจรมี โครงสร้างชนิดสายที่แตกต่างกัน.....	120
6.9 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำในซิลด์โลหะกรณีสายเคเบิล ต่อลงดินแบบจุดเดียว .....	126
6.10 การประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน.....	129
6.11 การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับโปรแกรมของ EPRI และมาตรฐาน IEEE 835 (1994).....	139
6.12 การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับมาตรฐานการติดตั้งของ การไฟฟ้านครหลวง .....	156
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	170
7.1 บทสรุปผลงานวิจัย .....	170
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	171



รายการอ้างอิง .....	173
ภาคผนวก .....	176
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	187



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่.....	หน้า
3.1-1 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุของตัวนำและ. ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้าน.....	13
3.4-1 แสดงค่าของสภาพต้านทานของสกรีนโลหะ.....	34
3.4-2 สภาพต้านทานของเปลือกเคเบิลชนิดต่างๆ.....	35
3.4-3 .ค่าคงที่ U, V, Y.....	37
6.1-1 แสดงผลการคำนวณกรณี ทั้งสองวงจรต่อ ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสไหลด.....	76
6.1-2 แสดงผลการคำนวณกรณี ทั้งสองวงจรไม่ได้ต่อขนานกัน.....	76
6.1-3 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-2.....	77
6.1-4 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสมมาตร ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-2.....	77
6.1-5 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสูงสุดและ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-2.....	78
6.1-6 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-3.....	79
6.1-7 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสูงสุดของ การติดตั้งรูปที่ 6.1-3.....	80
6.1-8 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-4.....	81
6.1-9 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสมมาตร ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-4.....	82
6.1-10 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสูงสุดและ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-4.....	83
6.1-11 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแส ต่ำสุด และ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-5.....	84
6.1-12 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสูงสุดและ สมมาตรการติดตั้งรูปที่ 6.1-5.....	85
6.1-13 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแสต่ำสุด และสมมาตร ระหว่างวงจรที่ 1 และ 3 ของการติดตั้งรูปที่6.1-6.....	86

ตารางที่	หน้า
6.1-14 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ยพิกัดกระแส สมมาตร ระหว่างวงจรที่ 1 และ 3 ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-6.....	87
6.1-15 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแสสูงสุด และอสมมาตร ระหว่างวงจรที่ 1 และ 3 ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-6.....	88
6.1-16 ตารางแสดงแบบการติดตั้ง ที่ให้พิกัดกระแสสูงสุดแบบต่างๆ.....	89
6.1-17 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 1 วิธีต่อลงดินจุดเดียว.....	89
6.1-18 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 2 วิธีต่อลงดินจุดเดียว .....	90
6.1-19 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 3 วิธีต่อลงดินจุดเดียว .....	90
6.1-20 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 4 วิธีต่อลงดินจุดเดียว .....	91
6.1-21 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 5 วิธีต่อลงดินจุดเดียว .....	91
6.2-1 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในรูปที่ 6.2-1ขนาดสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตรโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟส.....	92
6.2-2 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในรูปที่ 6.2-1ขนาดสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตรโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟส.....	93
6.2-3 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในรูปที่ 6.2-2 ขนาดสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟส.....	94
6.3-1 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยในรูปที่ 6.3-1 แบบวิธีต่อลงดินหลายจุด .....	98
6.3-2 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรใน รูปที่ 6.3-1แบบวิธีต่อลงดินหลายจุด.....	98
6.3-3 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยในรูปที่ 6.3-2แบบวิธีต่อลงดินหลายจุด .....	99
6.3-4 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดแต่ละวงจรในรูปที่ 6.3-2 วิธีต่อลงดินหลายจุด .....	99
6.3-5 ตารางเปรียบเทียบผลรวมของกระแสทุกวงจรที่ติดตั้งรูป แบบ6.3-1 และ 6.3-2 .....	100
6.4-1 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูป ที่ 6.4-1แบบวิธีต่อลงดินจุดเดียวและแบบครอสบอนด์.....	101
6.4-2 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูป ที่ 6.4-1แบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด.....	101
6.4-3 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูป ที่ 6.4-2 แบบวิธีต่อลงดินจุดเดียวและแบบครอสบอนด์ .....	102

ตารางที่	หน้า
6.4-4 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดนรูป	
ที่ 6.4-2แบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด.....	102
6.4-5 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรใน	
รูปที่ 6.4-3แบบวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวและแบบครอสบอนด์.....	103
6.4-6 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรใน	
รูปที่ 6.4-3แบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด.....	104
6.4-7 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรใน	
รูปที่ 6.3-1แบบวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวและแบบครอสบอนด์.....	104
6.4-8 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรใน	
รูปที่ 6.3-2แบบวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวและแบบครอสบอนด์.....	105
6.4-9 ตารางเปรียบเทียบวิธีการต่อลงดินที่ติดตั้งรูปแบบ 1 เส้นในท่อร้อยสาย.....	105
6.4-10 ตารางเปรียบเทียบวิธีการต่อลงดินที่ติดตั้งรูปแบบ 3 เส้นในท่อร้อยสาย.....	106
6.5-1 กระแสของสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร.....	107
6.5-2 กระแสของสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร.....	107
6.5-3 กระแสของสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร.....	108
6.5-4 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร.....	108
6.5-5 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร.....	108
6.5-6 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร.....	109
6.6-1 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร.....	111
6.6-2 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร.....	111
6.6-3 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร.....	112
6.6-4 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร.....	113
6.6-5 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร.....	113
6.6-6 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร.....	113
6.6-7 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร.....	114
6.6-8 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร.....	114
6.6-9 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร.....	114
6.6-10 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณในแต่ละเงื่อนไข.....	115

ตารางที่	หน้า
6.7-1 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในสายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร ที่ติดตั้งในรูปแบบที่ 6.7-1.....	117
6.7-2 ผลการคำนวณอุณหภูมิในสายเคเบิลที่รับกระแสจริงก่อน ปรับปรุงตามที่ตั้งในรูปแบบที่ 6.7-1.....	117
6.7-3 ผลการคำนวณพิกัดกระแสสูงสุดในสายเคเบิลขนาดสาย 70 ตารางมิลลิเมตร วงจรที่ 5 ตามที่ตั้งในรูปแบบที่ 6.7-1.....	118
6.7-4 ผลการคำนวณอุณหภูมิในสายเคเบิลขนาดสาย 70 ตาราง มิลลิเมตรวงจรที่ 5 ที่กระแส 145 A ตามที่ตั้งในรูปแบบที่ 6.7-1.....	118
6.7-5 ผลการคำนวณอุณหภูมิในสายเคเบิลต่างๆ กรณีฉุกเฉินวงจรที่ 1 รับกระแสไหลทดแทนวงจรที่ 4 ตามที่ตั้งในรูปแบบที่ 6.7-1.....	119
6.8-1 ตำแหน่งติดตั้งของแต่ละวงจร ของรูป 6.8-1.....	121
6.8-2 ข้อมูลของแต่ละวงจรของรูป 6.8-1.....	121
6.8-3 แสดงผลการคำนวณ กระแสในสายเคเบิลและซิลต์.....	123
6.8-4 แสดงผลการคำนวณ กำลังสูญเสีย.....	124
6.8-5 แสดงผลการคำนวณ อุณหภูมิในสายเคเบิลของแต่ละวงจร.....	125
6.9-1 ผลการคำนวณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะตามรูปที่ 6.9-1.....	126
6.9-2 ผลการคำนวณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะตามรูปที่ 6.9-2.....	127
6.10-1 แสดงค่าพิกัดกระแสที่ขนาดสายต่างๆ.....	133
6.10- 2 ราคาสายและค่าใช้จ่ายกำลังสูญเสียตลอดอายุการใช้งาน 30 ปี เมื่อใช้สายขนาดเดียว 400 ตารางมิลลิเมตร.....	136
6.10- 3 ราคาสายและค่าใช้จ่ายกำลังสูญเสียตลอดอายุการใช้งาน 30 ปี ที่ใช้โปรแกรมเลือกขนาดสายเคเบิล.....	137
6.10- 4 ตารางเปรียบเทียบราคาก่อสร้างระหว่างแบบติดตั้งของ กฟน.และ แบบโปรแกรมเลือกขนาดสายเคเบิล.....	137
6.11-1 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 1 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	143
6.11-2 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 2 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	144
6.11-3 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 3 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	145
6.11-4 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 4 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	146
6.11-5 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 5 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	147

ตารางที่	หน้า
6.11-6 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 6 สายเคเบิลชนิดที่ 3 .....	148
6.11-7 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 7 สายเคเบิลชนิดที่ 3 .....	149
6.11-8 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 8 สายเคเบิลชนิดที่ 3 .....	150
6.11-9 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 9 สายเคเบิลชนิดที่ 3 .....	151
6.11-10 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 10 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	152
6.11-11 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 11 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	153
6.11-12 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 12 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	154
6.11-13 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 13 สายเคเบิลชนิดที่ 3.....	155
6.12-1 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 70 ตารางมิลลิเมตร .....	166
6.12-2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 120 ตารางมิลลิเมตร .....	166
6.12-3 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร.....	167
6.12-4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร.....	167
6.12-5 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร.....	168
6.12-6 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร.....	168
6.12-7 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 1200 ตารางมิลลิเมตร.....	169

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2-1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินฉนวนแข็ง .....	3
2-2 แบบของตัวนำชนิดต่างๆที่ใช้ทำสายเคเบิล .....	5
2-3 แสดงการก่อสร้างโดยวิธีขุดเปิดหน้าดิน .....	8
2-4 แสดงรูปแบบการก่อสร้าง ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แบบ pipe jacking .....	9
2-5 แสดงหน้าตัดของ ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ ก่อสร้างโดยวิธี pipe jacking .....	9
2-6 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างท่อโดยวิธี directional drilling .....	10
3.2-1 แสดงวงจรสมมูลของฉนวนไฟฟ้าในสายเคเบิล .....	17
3.3-1 วิธีต่อลงดินแบบหนึ่งจุด แบบมีตัวจำกัดแรงดัน .....	19
3.3-2 การต่อลงดินแบบสองจุด .....	20
3.3-3 การต่อลงดินแบบครอสบอนด์ .....	20
3.3-4 การวางสายแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า .....	21
3.3-5 การวางสายแบบระนาบแนวนอนเดียวกัน .....	23
3.3-6 แบบแสดงการวางสายเคเบิลที่มีหลายวงจร .....	26
3.3-7 วงจรสมมูลการวางสายเคเบิลที่มีหลายวงจร .....	26
3.3-8 วงจรสมมูลที่มีความต้านทานอิมพีแดนซ์ร่วมของ 2 วงจร .....	27
3.4-1 สายเคเบิลหนึ่งแกน .....	31
3.4-2 ภาพสายเคเบิลชนิดสามแกนเข็มขัดรัดทรงกลม .....	32
3.4-3 ภาพสายเคเบิลชนิด สายสามแกนชนิดสกรีน .....	33
3.4-4 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลย์ของ คอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย .....	39
3.4-5 แสดงกลุ่มของสายเคเบิลที่มีผลทางความร้อนต่อกัน .....	41
3.4-6 วงจรสมมูลของสายเคเบิล .....	42
5-1 ขั้นตอนการทำงานหลักของโปรแกรม .....	52
5-2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 1 .....	53
5-3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 2 .....	54
5-4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 3 .....	55
5-5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 4 .....	56

รูปที่	หน้า
5-6 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 5.....	57
5-7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 6.....	58
5-8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 3.....	59
5-9 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 4.....	60
5-10 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 5.....	61
5-11 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 6.....	62
5-12 โครงสร้างโปรแกรมการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน.....	65
6.1-1 แสดงแบบการติดตั้งในแนวนอน.....	75
6.1-2 แบบการติดตั้งที่ 1.....	77
6.1-3 แบบการติดตั้งที่ 2.....	78
6.1-4 แบบการติดตั้งที่ 3.....	81
6.1-5 แบบการติดตั้งที่ 4.....	84
6.1-6 แบบการติดตั้งที่ 5.....	86
6.2-1 รูปแสดงระยะห่างของการติดตั้งสายเคเบิล 1 เส้น ในท่อร้อยสายจำนวน 1 วงจร.....	92
6.2-2 รูปแสดงระยะห่างของการติดตั้งสายเคเบิล 1 เส้น ในท่อร้อยสาย จำนวน 4 วงจร.....	94
6.2-3 ภาพกราฟแสดงผลรวมกระแสของสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตรแบบติดตั้งรูป 6.2-1.....	95
6.2-4 ภาพกราฟแสดงผลรวมกระแสของสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตรแบบติดตั้งรูป 6.2-1 รูปที่.....	95
6.2-5 ภาพกราฟแสดงผลรวมกระแสของสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตรแบบติดตั้งรูป 6.2-2.....	96
6.3-1 ภาพการติดตั้งสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตรจำนวน 6 วงจร.....	97
6.3-2 ภาพการติดตั้งสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 10 วงจร.....	97
6.4-1 ภาพการติดตั้งแบบ 3 เส้นในหนึ่งท่อ สายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร 24 kV 1 วงจร.....	101



รูปที่	หน้า
6.4-2 ภาพการติดตั้งหนึ่งเส้นในหนึ่งท่อ สายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร 24 kV 1 วงจร.....	102
6.4-3 ภาพการติดตั้งหนึ่งเส้นในหนึ่งท่อ สายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร 24 kV 4 วงจร.....	103
6.5 ภาพการติดตั้งการคำนวณหาอุณหภูมิในสายเคเบิล.....	107
6.6-1 ภาพการติดตั้งแบบ UG4-410.....	110
6.7-1 ภาพการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินก่อนไฟฟ้าให้บริษัทพญาไทยธานี.....	116
6.8-1 การติดตั้งสายเคเบิลหลายขนาดและรูปแบบการติดตั้งต่างกัน.....	120
6.9-1 การติดตั้งในแนวตั้งของสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร.....	126
6.9-2 การติดตั้งแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	127
6.10-1 ระบบการจ่ายไฟแบบเรเดียล.....	129
6.10-2 ระบบการจ่ายไฟแบบเลือกสายป้อน.....	130
6.10-3 ระบบการจ่ายไฟแบบอนุกรมเปิดลูบ.....	131
6.10-4 ระบบการจ่ายไฟแบบสำรองสายป้อน.....	132
6.10-5 ระบบการจ่ายไฟสำรองสายป้อนที่ถนนพหลโยธิน.....	134
6.10- 6 การติดตั้งระบบสำรองสายป้อนสำหรับสายเคเบิลไม่เกิน 800 ตารางมิลลิเมตร.....	135
6.10- 7 การติดตั้งระบบสำรองสายป้อนสำหรับสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร.....	135
6.11-1 รูปแบบการติดตั้งสายเคเบิลชนิดที่3.....	140
6.11-2 รูปแบบการติดตั้งสายเคเบิลชนิดที่3.....	141
6.11-3 รูปแบบการติดตั้งสายเคเบิลชนิดที่4.....	142
6.12-1 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-310.....	157
6.12-2 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-310.....	158
6.12-3 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	159
6.12-4 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	160
6.12-5 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	161
6.12-6 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	162
6.12-7 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	163
6.12-8 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	164
6.12-9 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410.....	165

## รายการสัญลักษณ์

- $A$  = ราคาที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวนำ  
 $A_s$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ  
 $a$  = การเพิ่มขึ้นของไหลต่อปี  
 $b$  = การเพิ่มขึ้นราคาของพลังงานต่อปี  
 $C$  = ตัวเก็บประจุในสายเคเบิล  
 $CT$  = ราคาทั้งหมด  
 $CI$  = ราคาของการติดตั้งตลอดความยาวของสายเคเบิล  
 $CL$  = ราคาสมมูลของกำลังสูญเสียในตลอดช่วงอายุการใช้งาน  
 $c$  = ตัวประกอบการเพิ่มขึ้นของความต้องการกำลังไฟฟ้า  
 $D$  = ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ในแต่ละปี  
 $D_t$  = เส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนที่เทปพันรอบ  
 $D_w$  = เส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนที่เส้นลวดพันรอบ  
 $D_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสุดของซิลด์โลหะ  
 $D_e$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (มิลลิเมตร)  
 (สำหรับติดตั้งสายเคเบิลหนึ่งแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า  $D_e = 2.15 \times$  เส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลหนึ่งแกน)  
 $D_{outduct}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ (มิลลิเมตร)  
 $D_{innerduct}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (มิลลิเมตร)  
 $d_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำ  
 $d_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซิลด์โลหะ  
 $d_w$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด  
 $d_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซิลด์โลหะ  
 $d_{pk'}$  = ระยะห่างระหว่างจุด  $p$  ไ้ยังจุด  $k'$   
 $d_{pk}$  = ระยะห่างระหว่างจุด  $p$  ไ้ยังจุด  $k$   
 $[E]$  = เมตริกแรงดันของแต่ละวงจร  
 $f$  = ความถี่  
 $[G]$  = เมตริกค่าอิมพีแดนซ์ของเหนี่ยวนำร่วมวงจรใกล้เคียง  
 $G_s$  = ค่าคงที่ของราคาที่ไม่สัมพันธ์กับขนาดของตัวนำ

- $I$  = กระแสสูงสุดที่สามารถไหลในสายเคเบิลได้ (แอมแปร์)
- $I_0$  = กระแสไหลสูงสุดของสายเคเบิลในช่วงระหว่างปีแรก
- $I_z$  = ความสามารถในการรับกระแสที่ยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด
- $i$  = อัตราการลดลง ( discount rate ) ซึ่งไม่รวมอัตราเงินเฟ้อ
- $I_s$  = กระแสที่ไหลในซิลด์โลหะ
- $I_c$  = กระแสที่ไหลในตัวนำ
- $[I]$  = เมตริกของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำและซิลด์โลหะ ของแต่ละสายเคเบิล
- $k_s$  = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ
- $k_p$  = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ
- $L_t$  = ความยาวครบรอบในการพัน
- $L_a$  = ความยาวครบรอบในการตีเกลียว
- $LF_{loss}$  = ตัวประกอบกำลังการสูญเสียไหล
- $LF_u$  = ตัวประกอบไหลสุดท้าย
- $LF_p$  = ตัวประกอบไหลปัจจุบัน
- $LF$  = ตัวประกอบไหล
- $L_e$  = ความลึกของสายเคเบิล
- $L_G$  = ความลึกของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย
- $L$  = ความยาวสายเคเบิล
- $n_t$  = จำนวนชั้นของเทป
- $n_a$  = จำนวนเส้นลวด
- $N_{conductor}$  = จำนวนตัวนำภายในท่อ
- $N$  = จำนวนปีอายุการใช้งานของสายเคเบิล
- $N_p$  = จำนวนของตัวนำเฟสต่อวงจร
- $N_c$  = จำนวนวงจร
- $N_{conductor_j}$  = จำนวนตัวนำภายในเปลือกเคเบิล
- $P$  = ราคาพลังงานที่ 1 วัตต์-ชม.
- $p$  = 0.3 สำหรับระบบส่ง และ 0.2 สำหรับระบบจำหน่าย
- $Q_p(N)$  = ค่าสัมประสิทธิ์ ที่แสดงความสัมพันธ์, การเพิ่มขึ้นของไหล, การเพิ่มขึ้นราคาของพลังงานและอัตราการลดของอายุใช้งาน

$Q_D(N)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ ที่แสดงความสัมพันธ์, การเพิ่มขึ้นของโหลด, ความต้องการกำลังไฟฟ้า และอัตราการลดลงของอายุใช้งาน
$R_{dc20}$	= ความต้านทานไฟตรงที่อุณหภูมิ 20 °C
$R_s$	= ความต้านทานของซิลด์โลหะ
[Rd]	= เมตริก n x n เมตริก(R1,R2,...Rn) ของความต้านทานในตัวนำสายเคเบิลและซิลด์
R	= ความต้านทานไฟสลับของตัวนำต่อความยาว
rb	= รัศมีสมมูลของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย
S	= ระยะห่างระหว่างตัวนำ
$\bar{S}$	= ขนาดของพื้นที่หน้าตัดตัวนำ
Sec	= ขนาดของตัวนำของสายเคเบิลที่เหมาะสม
$t_a$	= อุณหภูมิของดิน(องศาเซลเซียส)
$t_c$	= อุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิล
$th_s$	= ความหนาของท่อซิลด์โลหะ
$t_s$	= อุณหภูมิของซิลด์โลหะ
$t_i$	= ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและซิลด์โลหะ (มิลลิเมตร)
$T_i$	= ความต้านทานทางความร้อนของฉนวน(องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
t	= ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำ
$t_l$	= ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและเปลือก
$t_{ls}$	= ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและสกรีน
$t_j$	= ความหนาของเปลือกเคเบิล (มิลลิเมตร)
$T_j$	= ความต้านทานทางความร้อนของเปลือก (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
$T_{sd}$	= ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
$t_m$	= อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวกลางที่อยู่ระหว่างสายเคเบิลและท่อ (องศาเซลเซียส)
$T_d$	= ความต้านทานทางความร้อนของท่อ (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
$T_{earth}$	= ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของตัวประกอบโหลด
$T_{dx}$	= ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของตัวประกอบโหลด
$t_{lx}$	= ระยะเวลาในรอบการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ชม.)
$t_{av}$	= อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ
$T_{correction}$	= ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากการปรับแก้ของ ความต้านทานดิน
T	= จำนวนชั่วโมงต่อปีที่กระแสโหลดสูงสุดของสายเคเบิล

- $U_0$  = แรงดันตกคร่อมสายเคเบิล
- $U$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง
- $V$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง
- $Y$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง
- $y_s$  = ปรากฏการณ์ทางผิว
- $y_p$  = ปรากฏการณ์ความใกล้เคียงของตัวนำ
- $w_t$  = ความกว้างของเทป
- $W_{ch}$  = กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสอัดประจุ
- $W_d$  = กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
- $W_k$  = พลังงานสูญเสียของสายเคเบิลที่  $k$
- $\alpha_{20}$  = สัมประสิทธิ์ของความต้านทาน ที่อุณหภูมิ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\rho_{20}$  = ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ
- $\epsilon$  = ค่าเพอร์มิททิวิตีของฉนวน
- $\lambda_{cir}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจร
- $\lambda'_{i1}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจรของเคเบิลเส้นที่ 1 ที่อยู่ด้านซ้าย
- $\lambda'_{im}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจรของเคเบิลเส้นที่ 2 ที่อยู่ตรงกลาง
- $\lambda'_{i2}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจรของเคเบิลเส้นที่ 3 ที่อยู่ด้านขวา
- $\lambda'_{eddy}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสไหลวน
- $\lambda_0$  = สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการคูณ
- $\Delta_1$  = สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการคูณ
- $\Delta_2$  = สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการคูณ
- $\rho_i$  = สภาพต้านทานของฉนวน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
- $\rho_T$  = สภาพต้านทานของฉนวน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
- $\delta_1$  = ความหนาของสกรีนโลหะ
- $\rho_m$  = สภาพต้านทานของสกรีนโลหะ(องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
- $\rho_j$  = สภาพต้านทานของเปลือกเคเบิล (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
- $\rho_d$  = สภาพความต้านทานทางความร้อนของวัสดุที่ทำท่อ (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
- $\rho_s$  = สภาพความต้านทานทางความร้อนของดิน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$\rho_c$  =สภาพต้านทานของดินที่เติมเพื่อปรับแก้ หรือ คอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$\Delta\theta_p$  =อุณหภูมิรวมเนื่องมาจากผลของความร้อนจากสายเคเบิลอื่นๆที่ใกล้เคียงทั้งหมดกระทำต่อสายเคเบิลที่ p

$\Delta\theta_{kp}$  =อุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนของสายเคเบิลที่ k กระทำต่อสายเคเบิลที่ p

$\lambda$  = อัตราส่วนระหว่างกำลังสูญเสียในชีทกับกำลังสูญเสียในตัวนำ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการไฟฟ้ามีการติดตั้งระบบสายเคเบิลใต้ดินในเขตพื้นที่จำหน่ายในกรุงเทพมหานคร และรอบๆปริมณฑลตัวเมืองที่มีประชาชนอยู่หนาแน่นเนื่องจากทำให้ภูมิทัศน์ของตัวเมืองสวยงามเป็นระเบียบเรียบร้อย มีความเชื่อถือได้ของระบบสูง ปลอดภัยสำหรับประชาชน และสามารถเดินระบบไฟฟ้าได้หลายวงจรแต่มีข้อเสียที่มีการลงทุนสูงมากเมื่อเทียบกับระบบจำหน่ายสายอากาศ และมีความยุ่งยากในการคำนวณกรณีที่มีการติดตั้งหลายวงจรซึ่งมีชนิดสายเคเบิลและรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกันจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ที่ต้องการหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตั้งเพื่อจ่ายกระแสให้ได้มากขึ้นและแนะนำวิธีการติดตั้งที่ถูกต้องปลอดภัย ลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบสายใต้ดินตลอดอายุใช้งานได้และสามารถออกแบบการติดตั้งสายใต้ดินในลักษณะที่หลากหลายรูปแบบได้ และมีความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สามารถใช้โปรแกรมคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ช่วยหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของการติดตั้งสายเคเบิลแนะนำวิธีการติดตั้งที่ถูกต้องปลอดภัย ออกแบบคำนวณพิกัดกระแสสายเคเบิลใต้ดินที่มีการติดตั้งหลายวงจรซึ่งมีชนิดสายเคเบิลและรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่าง สามารถคำนวณได้หลายรูปแบบติดตั้งและสามารถคำนวณหาขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการติดตั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินได้

1.3.2 โปรแกรมนี้ใช้สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงดันระบบ 0.6 , 12 , 24 , 69 , 115 KV

1.3.3 โปรแกรมสามารถคำนวณการติดตั้งได้ 2 แบบดังนี้

-แบบฝังดินโดยตรง

-แบบท่อร้อยสายใต้ดิน

1.3.4 ชนิดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้คำนวณในโปรแกรมเป็นแบบชนิดฉนวนแข็งเอ็กแอลพีอี

1.3.5 เปรียบเทียบการคำนวณกับโปรแกรมของ EPRI, IEEE, และค่าที่การไฟฟ้านครหลวง  
ใช้งาน

1.3.6 สามารถใช้คำนวณสำหรับรูปแบบการติดตั้งท่อยสายเคเบิลใต้ดินที่แตกต่างจาก  
การไฟฟ้านครหลวงได้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบสายเคเบิลใต้ดินได้อย่างรวดเร็ว

1.4.2 สามารถใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบสายเคเบิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพใน  
การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินได้

1.4.3 สามารถใช้โปรแกรมออกแบบคำนวณพิกัดกระแสสายเคเบิลใต้ดินที่มีลักษณะหลากหลาย  
หลายรูปแบบการติดตั้งได้

1.4.4 สามารถใช้โปรแกรมคำนวณออกแบบสายเคเบิลได้หลายวงจรโดยแต่ละวงจรมีโครง  
สร้างของสายเคเบิลที่แตกต่างกันออกไปได้

1.4.5 สามารถใช้โปรแกรมคำนวณออกแบบสายเคเบิลในกรณีที่มีการติดตั้งวงจรเพิ่มโดย  
ไม่ทำให้อุณหภูมิของสายเคเบิลใต้ดินเดิมที่มีอยู่เกินค่าพิกัดที่กำหนดได้

1.4.6 สามารถใช้โปรแกรมคำนวณออกแบบสายเคเบิลเพื่อตรวจสอบวิเคราะห์กับการออก  
แบบของการไฟฟ้าได้



## บทที่ 2

### สายเคเบิลและการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

#### 2.1 สายเคเบิลฉนวนแข็ง

สายเคเบิลฉนวนแข็งจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่สองส่วนคือส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและส่วนที่เป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งป้องกันการสัมผัสกับตัวนำโดยตรง และบางโครงสร้างของสายเคเบิลก็จะเพิ่มฉนวนที่เป็นโลหะหรือเส้นลวดตัวนำภายนอกของฉนวนเพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัยและนำกระแสในช่วงเกิดกระแสลัดวงจร ส่วนประกอบโครงสร้างที่สำคัญของสายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวนแข็งโดยทั่วไป มีดังนี้



รูป 2-1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินฉนวนแข็ง

ตัวนำสายเคเบิล(conductor)

วัสดุของตัวนำที่นิยมใช้ทำสายเคเบิลโดยทั่วไปก็คือ ทองแดงและอลูมิเนียม ซึ่งราคาของทองแดงจะแพงกว่าอลูมิเนียมในการผลิตสายเคเบิลกำลังจะผลิตเป็นเส้นลวดแล้วนำมาตีเกลียว โดยเลือกจำนวนเส้นลวดให้พอดีกับขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการ การออกแบบตัวนำในสายเคเบิลกำลังโดยทั่วไปจะมีหลายแบบดังนี้ [1]

แบบตัวนำกลม( round conductor)

การออกแบบสายตัวนำแบบกลมจะมี 2 แบบ คือ สายแบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียว ( concentric ) หรือ แบบอัดแน่นตีเกลียว ( compressed) สายแบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียวจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ปรากฏการณ์ทางผิวและมีอัตราความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับกับไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงกว่าตัวนำอัดแน่นตีเกลียว สายตัวนำอัดแน่นยังมีข้อดีอีกคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าทำให้ช่วยประหยัดเนื้อฉนวนไฟฟ้า

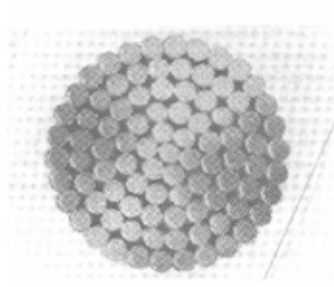
ตัวนำแบบแยกส่วนทรงกลม (sector conductor และ segmental)

ตัวนำแบบแยกส่วนทรงกลมจะออกแบบให้มีการแยกส่วนของตัวนำออกเป็น ส่วนๆที่เท่ากันเช่นมีแบบที่เป็นแยกส่วน 90 องศาแบ่งเป็น 4 ส่วน, แบบแยกส่วน 120 องศาแบ่งเป็น 3 ส่วน เป็นต้น ตัวนำแบบแยกส่วนทรงกลมมีข้อดีคือจะทำให้สามารถลดปัญหาของปรากฏการณ์ทางผิวและปรากฏการณ์ความใกล้เคียงได้ สำหรับสายเคเบิลแบบ120 องศาสามารถใช้แทนตัวนำแบบ 3 เฟสเพื่อลดขนาดสายเคเบิลได้

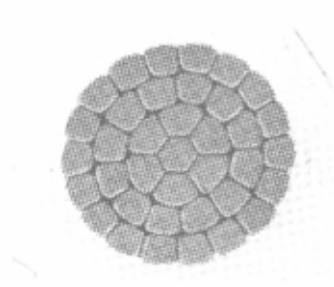
แบบ ฮอลโลว์ (Hollow Core)

ตัวนำแบบฮอลโลว์จะมีลักษณะเป็นแบบที่กลวงกลางตัวนำเพื่อไว้เติมของเหลวช่วยระบายความร้อนและคุณสมบัติทางฉนวนไฟฟ้า(สายประเภทฉนวนกระดาษในน้ำมัน)ข้อดีของสายเคเบิลประเภทนี้คือจะมีอัตราความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับกับไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ำเมื่อเทียบกับสายแบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียวที่ขนาดพื้นที่เท่ากัน

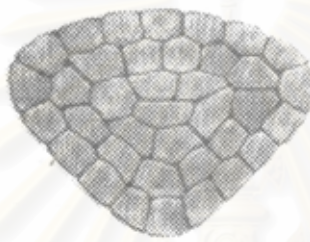
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แบบซ้อนกันที่มีจุดศูนย์กลางเดียว



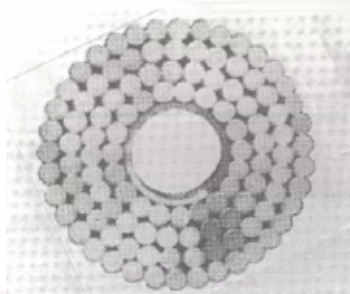
แบบอัดแน่น



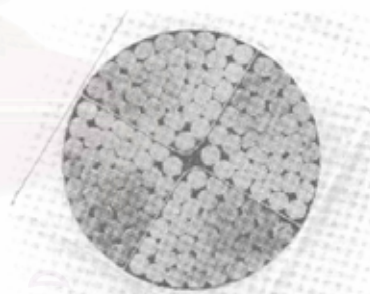
แบบแยกส่วนวงกลม 90 องศา



แบบแยกส่วนวงกลม 120 องศา



แบบ ฮอลโลว์



แบบแยกส่วนวงกลม

สถาบันนวัตยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 2-2 แบบของตัวนำชนิดต่างๆที่ใช้ทำสายเคเบิล

## ชีลด์ (Shield) ตัวนำ

ชีลด์ตัวนำทำมาจากพลาสติกที่นำไฟฟ้าแบบมีความต้านทานหุ้มรอบตัวนำ เพื่อให้ตัวนำกับฉนวนสัมผัสกันสนิทและควบคุมสนามไฟฟ้าในฉนวนให้สม่ำเสมอ

## ฉนวน (Insulation)

ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินจะต้องมีคุณสมบัติทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง และป้องกันการไหลของกระแสไฟฟ้าจากตัวนำไปสู่ขั้วลงดินของวงจร ฉนวนของไฟฟ้าที่ใช้ทำสายเคเบิลใต้ดินโดยทั่วไปจะมีคือแบบกระดาษขุมในน้ำมัน และแบบฉนวนแข็งเช่น ชนิดฉนวนโพลีเอเธน สำหรับสายเคเบิลแบบกระดาษขุมในน้ำมันจะมีแบบเติมน้ำมันอัดแรงดันต่ำและอัดแรงดันสูงซึ่งแบบน้ำมันแรงดันสูงตัวฉนวนจะติดตั้งในท่อโลหะภายใต้แรงดันสูงและจะต้องมีน้ำมันที่มี การควบคุมแรงอัดน้ำมันด้วย ส่วนแบบฉนวนแข็ง ปัจจุบันนิยมใช้มากขึ้นเช่นแบบฉนวนที่เป็นครอสลิงก์โพลีเอทิลีน(cross-linked polyethylene) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ฉนวนมีความแข็งแรง ทนทางกลได้ดี มีความต้านทานทางความร้อนต่ำ และกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ

## ชีลด์ ของฉนวน

ชีลด์ของฉนวนจะทำมาจากพลาสติกที่นำไฟฟ้าแบบมีความต้านทานหุ้มรอบ ฉนวนเพื่อให้ผิวเรียบสัมผัสกับ ชีลด์ ได้ดีและควบคุมสนามไฟฟ้าในฉนวนให้สม่ำเสมอ

เทปสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำป้องกันน้ำซึม(Semiconductive synthetic water blocking tape)

เทปสังเคราะห์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำใช้สำหรับป้องกันการซึมของน้ำกล่าวคือถ้ามีการซึมเข้าสายเคเบิลไปสัมผัสกับตัวเทปจะทำให้ตัวเทปดูดซับน้ำพร้อมกับขยายพองตัวปิดกั้นการไหลของน้ำในสายเคเบิล

## ชีลด์โลหะ(Metallic Shield)

ทำหน้าที่รับกระแสผิดพ่วง( fault )ลงดิน ความปลอดภัยและปรับระดับความต่างศักย์ของชีลด์ ของฉนวนให้เท่ากับดิน ชีลด์โลหะมีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างสายเคเบิลเช่น แบบเทปพัน หรือ แบบเส้นลวดตีเกลียวเป็นต้น

## เปลือก(Jacket)

เปลือกทำด้วยพลาสติกเช่นโพลีเอทิลีนทำหน้าที่ป้องกันสายเคเบิลจากการเสียดสีหรือแรงกระทำภายนอกเนื่องจากการลากสายติดตั้ง หรือขนส่ง เปลือกของสายมีทั้งชนิดผิวเรียบหรือชนิดเป็นสันมีร่อง

## 2.2 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

การก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การติดตั้งสายเคเบิลแบบฝังดินโดยตรง และ การติดตั้งสายเคเบิลในท่อร้อยสายแรงสูงใต้ดิน

### 2.2.1 ติดตั้งสายเคเบิลแบบฝังดินโดยตรง

วิธีนี้สายเคเบิลจะถูกติดตั้งโดยฝังกลบกับพื้นดินหรือใต้ผิวทางเท้าโดยตรง ไม่มีเครื่องห่อหุ้มหรือเครื่องป้องกันสายเคเบิลจากความเสียหายที่เกิดขึ้นวิธีนี้มีข้อดีคือ มีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อเสียคือหากสายเคเบิลชำรุดจะต้องขุดเปิดหน้าดินเพื่อซ่อมแซมและหากต้องการเปลี่ยนสาย เช่น มีการเพิ่มขนาดสายเคเบิลจะทำได้ยาก เพราะต้องขุดเปิดหน้าดินเป็นแนวยาวเสมือนกับการก่อสร้างใหม่

### 2.2.2 ติดตั้งสายเคเบิลในท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

วิธีนี้สายเคเบิลจะถูกติดตั้งอยู่ในท่อร้อยสายแรงสูงใต้ดิน ซึ่งก่อสร้างไว้ก่อน โดยจะต้องมีการก่อสร้างบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินควบคู่ไปด้วยเพื่อใช้เป็นจุดสำหรับร้อยสายเคเบิลหรือดึงสายเคเบิลในระหว่างการติดตั้งท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนี้จะเป็นตัวป้องกันความเสียหายทางกายภาพไม่ให้เกิดขึ้นกับสายเคเบิลใต้ดินในประเทศไทยจะใช้วิธีติดตั้งสายเคเบิลในท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเป็นหลัก ซึ่งการติดตั้งสายเคเบิลในท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้นจะมีการก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลในแต่ละเส้นทางเป็นจำนวนหลายท่อขึ้นอยู่กับการพิจารณาการจ่ายไฟฟ้าที่ได้วางแผนไว้ท่อร้อยสายเคเบิลจำนวนหลาย ๆ ท่อในแต่ละแนวประกอบกันนั้นเรียกว่า duct bank ซึ่งคำว่า duct bank นี้จะใช้แทนท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีจำนวนตั้งแต่ 2 ท่อขึ้นไป การก่อสร้างท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินสามารถทำได้หลายวิธี โดยแบ่งตามวิธีการก่อสร้างเป็น 2 วิธี คือ

#### 2.2.2.1) การก่อสร้างโดยวิธีขุดเปิดหน้าดิน

การก่อสร้างโดยวิธีนี้จะต้องทำการขุดเปิดผิวดินซึ่งมักเป็นถนนหรือทางเท้าเป็นแนวยาวตามความยาวของ ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จากนั้นจึงติดตั้งหรือวางท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน การก่อสร้างแบบนี้จะใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมาก แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ ติดตั้งท่อร้อยสายแบบฝังดินโดยตรง และ ติดตั้งท่อร้อยสายแบบเทคอนกรีตหุ้ม



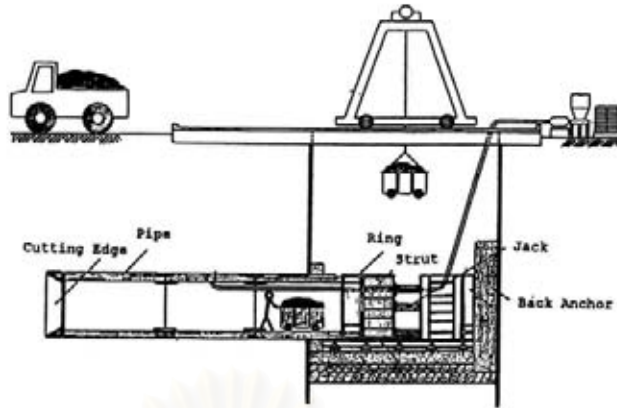
รูปที่ 2-3 แสดงการก่อสร้างโดยวิธีขุดเปิดหน้าดิน

#### 2.2.2.2 การก่อสร้างโดยไม่ต้องขุดเปิดหน้าดิน

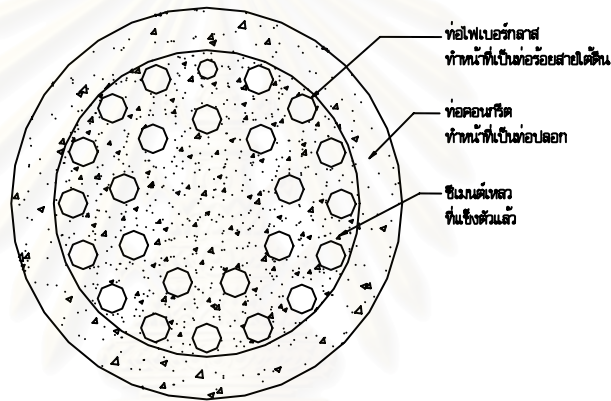
การก่อสร้างโดยวิธีนี้ไม่ต้องทำการขุดเปิดผิวถนนหรือทางเท้าเป็นแนวยาว แต่จะขุดเปิดเฉพาะตำแหน่งที่จะก่อสร้างบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเท่านั้น ปัจจุบันมีวิธีการก่อสร้างอยู่ 2 วิธี คือ ก่อสร้างแบบ ไบป์แจกคิง (pipe jacking) และ ก่อสร้างแบบ ไดเรกชันแนล ดริลลิง (directional drilling)

ก) การก่อสร้าง ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยวิธี ไบป์แจกคิง

การก่อสร้างโดยวิธี ไบป์แจกคิง เป็นวิธีการก่อสร้างที่พัฒนามาจากการก่อสร้างอุโมงค์วิธีนี้จะมีการขุดเปิดผิวดินเฉพาะบริเวณที่เป็นบ่อพักสายเท่านั้น ส่วนในช่วงที่เป็นท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จะก่อสร้างโดยการดันท่อคอนกรีต ซึ่งจะดันที่ละช่วงจากบ่อหนึ่งไปยังอีกบ่อหนึ่ง เมื่อดันท่อคอนกรีตเสร็จแล้ว จะขุดดินในท่อออกทิ้งไปซึ่งจะเหลือเฉพาะท่อคอนกรีตซึ่งมีลักษณะเหมือนอุโมงค์ มีขนาดใหญ่ เล็กตามขนาดของงาน จากนั้นจึงทำการติดตั้งท่อร้อยสายเคเบิลในท่อคอนกรีตแล้วจึงทำการฉีดซีเมนต์เหลว (grouting) เข้าไปในช่องว่างระหว่างท่อร้อยสายเคเบิลแต่ละท่อภายในท่อปลอก เมื่อคอนกรีตเหลวแข็งตัวจะได้ ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ที่หุ้มคอนกรีตคล้ายกับวิธีขุดเปิดหน้าดิน แต่จะมีรูปแบบของหน้าตัดเป็นวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2-4 และรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-4 แสดงรูปแบบการก่อสร้าง ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แบบ pipe jacking



รูปที่ 2-5 แสดงหน้าตัดของ ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ที่ก่อสร้างโดยวิธี pipe jacking

การก่อสร้าง ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยวิธี ไปป์แจคกิงนี้ มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบขุดเปิดหน้าดินและเทคนิคที่ยุ่งยาก แต่ข้อดี คือ มีผลกระทบต่อการจราจรค่อนข้างน้อย

ข) การก่อสร้าง ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยวิธี ไดร็กรันแนล ดริลลิง

การก่อสร้างโดยวิธี ไดร็กรันแนล ดริลลิงนี้ เป็นวิธีการใหม่ที่นำมาใช้ไม่นานนัก วิธีนี้ในขั้นตอนการก่อสร้าง สามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

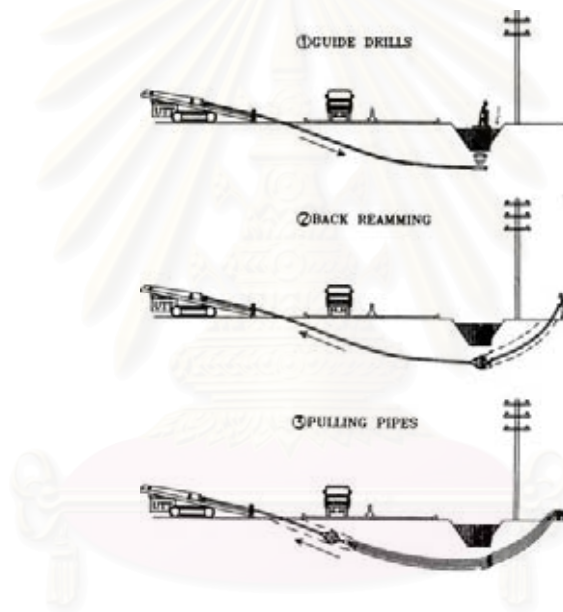
-ขั้นตอนการเจาะนำ                      ในขั้นตอนนี้จะใช้หัวเจาะซึ่งสามารถควบคุมทิศทาง ความลึกของการเจาะได้ด้วยคอมพิวเตอร์ หัวเจาะที่ถูกควบคุมนี้จะเจาะดินเป็นแนวไปจนถึงจุดหมายโดยมีความถูกต้องสูงมาก

-ขั้นตอนการขยายแนวเจาะ

เมื่อเจาะดินเป็นแนวแล้วจะทำการคว้านแนวที่เจาะให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับท่อที่จะติดตั้ง ในขั้นตอนนี้จะใช้หัวคว้านทำการคว้านแนวที่เจาะไว้ โดยในขณะที่คว้านจะฉีดสารละลายเบนโทไนท์ (bentonite) เข้าไปที่ดินบริเวณรอบๆ ที่คว้านเพื่อให้ดินคงสภาพไว้ได้ ไม่ทลายลงมา

-ขั้นตอนการดึงท่อ

เมื่อขยายแนวดินที่เจาะไว้แล้วจะมีการดึงท่อไปตามแนวที่เจาะ โดยท่อที่ใช้จะเป็นท่อชนิดเอชดีพีอี ซึ่งมีความแข็งแรงแต่สามารถโค้งไปตามแนวที่เจาะได้ ซึ่งท่อนี้จะต้องเป็นท่อเดี่ยวยาวตลอดไม่มีการต่อ จึงต้องสั่งผลิตจากโรงงานโดยเฉพาะ หลังจากดึงท่อเอชดีพีอีแล้วท่อดังกล่าวจะสามารถใช้เป็นท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินได้ทันที ในการดึงท่อนี้อาจดึงท่อเป็นจำนวนมากกว่า 1 ท่อได้ รายละเอียดเพิ่มเติมแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างท่อโดยวิธี directional drilling

วิธีการก่อสร้างแบบนี้สามารถทำได้รวดเร็วและไม่ต้องเปิดผิวการจราจร ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าแบบ pipe jacking แต่ข้อเสีย คือ จำนวนท่อที่สามารถติดตั้งต่อการเจาะหนึ่งแนวจะไม่มากเท่ากับแบบ pipe jacking วิธีนี้นิยมใช้กับการก่อสร้าง ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ในช่วงที่ไม่ยาวมากนัก ท่อร้อยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ที่ก่อสร้างโดยวิธีนี้มักจะมีขนาดไม่ใหญ่มาก และนิยมใช้มากในการก่อสร้างท่อลอดใต้ผิวนนหรือคลอง

### 2.2.3 บ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน



บ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเป็นจุดที่ใช้สำหรับดึงสาย ต่อแยกสาย (tap) หรือเป็นจุดต่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ใช้กับการเดินสายร้อยท่อ บ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะต้องเปิดออกเพื่อทำการตรวจสอบและบำรุงรักษาได้ บ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบ่งตามขนาดได้เป็น 2 ชนิด คือ

-Handhole เป็นบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีขนาดเล็ก คนไม่สามารถลงไปทำงานได้ การทำงานสามารถใช้มือลงไปทำงานได้ นิยมใช้ในระบบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแรงต่ำ ซึ่งเป็นสายขนาดเล็ก มีจำนวนน้อย และตัวต่อสายมีขนาดไม่ใหญ่

-Manhole เป็นบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีขนาดใหญ่ คนสามารถลงไปทำงานได้ เป็นบ่อพักที่นิยมใช้ในระบบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแรงสูง manhole มีหลายชนิดหลายขนาด และมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามความต้องการใช้งาน เช่นลักษณะการติดตั้งจำนวนของสายเคเบิลที่อยู่ภายใน รวมทั้งชุดอุปกรณ์การต่อสายด้วย

อุปกรณ์ในบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ภายในบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะติดตั้งอุปกรณ์บางอย่างที่มีความจำเป็นต้องใช้ในการติดตั้งหรือลากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่

-แกนเหล็กสำหรับติดตั้งที่รองสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน (cable rack)

-ที่รองสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน (cable support หรือ cable hanger) มีลักษณะเป็นก้านเหล็กสำหรับรองรับขนานรองสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

-ลูกถ้วยรองสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน (pillow insulator)

-เหล็กยึดผนังบ่อพัก (pulling iron) ใช้สำหรับดึงสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

-บันได (entrance step) ใช้สำหรับปีนขึ้นลงบ่อพัก

นอกจากนี้สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการก่อสร้างบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินคือน้ำหนักกดทับจากรถบรรทุกบนผิวจราจร เนื่องจากบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินส่วนใหญ่จะอยู่ใต้ผิวจราจร ดังนั้นบ่อพักสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน รวมทั้งฝาปิดจะต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับน้ำหนักจากรถบรรทุกต่าง ๆ ซึ่งไม่น้อยกว่า 18 ตัน

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการคำนวณพิกัดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน

### 3.1 ความต้านทานไฟฟ้าในสายเคเบิล

ความต้านทานในสายเคเบิลมีความสำคัญมากเพราะสายเคเบิลจะสามารถนำกระแสได้มากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความต้านทาน ความต้านทานของสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำขนาดพื้นที่หน้าตัด และลักษณะการผลิต ในการเลือกใช้สายเคเบิลจึงควรพิจารณาเรื่องความต้านทานด้วย

#### 3.1.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงในตัวนำ

ความต้านทานไฟฟ้าในสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำซึ่งโดยทั่วไปคือทองแดงหรือ อลูมิเนียม ซึ่งเราสามารถคำนวณหาความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้ [2]

$$R_{dc} = R_{dc20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (t_c - 20)) \quad (3.1-1)$$

เมื่อ

$\alpha_{20}$  = สัมประสิทธิ์ของความต้านทาน ที่อุณหภูมิ 20 °C

$t_c$  = อุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิล

$R_{dc20}$  = ความต้านทานไฟตรงที่อุณหภูมิ 20 °C

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงสามารถคำนวณในรูปของความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำได้ดังนี้

$$R_{dc} = \frac{(1.02) \cdot (10^6) \cdot \rho_{20}}{A_s} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (t_c - 20)) \quad (3.1-2)$$

เมื่อ

$\rho_{20}$  = ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุของตัวนำและค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 °C แสดงดังตารางที่ 3.1-1

ตารางที่ 3.1-1 ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุของตัวนำและค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทาน

วัสดุ	ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ตัวนำ( $\rho_{20}$ ) ที่อุณหภูมิ 20 °C $\Omega \cdot m \times 10^{-8}$	สัมประสิทธิ์ของความต้านทาน $\alpha_{20}$ ต่อ °K ที่อุณหภูมิ 20 °C $\times 10^{-3}$
ทองแดง	1.7241	3.93
อลูมิเนียม	2.8264	4.03
ตะกั่ว	21.4	4
เหล็กกล้าไร้สนิม	13.8	4.5
ทองเหลือง	3.5	3

### 3.1.2 ปราบกฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

คือค่าที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลในตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำมีความหนาแน่นมากแต่แกนกลางของตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลน้อยโดยขนาดของปราบกฏการณ์ทางผิวจะขึ้นอยู่กับความถี่, ขนาดตัวนำ ค่าตัวประกอบ  $k_s$  ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$x_s^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{dc}} \cdot (10^{-7}) \cdot (k_s) \quad (3.1-3)$$

สำหรับ  $0 < x_s \leq 2.8$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 \cdot (x_s^4)} \quad (3.1-4)$$

สำหรับ  $2.8 < x_s \leq 3.8$

$$y_s = -0.136 - 0.0177x_s + 0.0563x_s^2 \quad (3.1-5)$$

สำหรับ  $x_s > 3.8$

$$y_s = \frac{x_s}{2\sqrt{2}} + \frac{11}{15} \quad (3.1-6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} y_s &= \text{ปรากฏการณ์ทางผิว} \\ f &= \text{ความถี่} \\ k_s &= \text{ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ} \end{aligned}$$

### 3.1.3 ปรากฏการณ์ความใกล้เคียง ( Proximity Effect)

ปรากฏการณ์ความใกล้เคียงคือค่าที่มีผลกับความต้านทานของสายไฟฟ้าของตัวนำ 2 ตัวที่อยู่ใกล้กันถ้าตัวนำสายทั้งสองมีทิศเดียวกันครึ่งหนึ่งของตัวนำที่เข้ามาใกล้กันจะถูกสนามไฟฟ้าของอีกเส้นตัดผ่านทำให้การกระจายไม่สม่ำเสมอ ค่าของปรากฏการณ์ความใกล้เคียงนี้จะขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบ  $k_p$  ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้ [3]

$$x_p^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{dc}} \cdot (10^{-7}) \cdot (k_p) \quad (3.1-7)$$

มาตรฐานของ IEC60287 กำหนดให้ค่าที่  $x_p \leq 2.8$  สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ สำหรับสายสองแกนหรือสายหนึ่งแกนสองเส้น

$$y_p = 2.9(a) \cdot (y) \quad (3.1-8)$$

สำหรับสายสามแกน หรือสายหนึ่งแกนสามเส้น

$$y_p = (a) \cdot (y^2) \left( 0.312(y^2) + \frac{1.18}{a+0.27} \right) \quad (3.1-9)$$

$$\text{เมื่อ } a = \frac{x_p^4}{192 + 0.8(x_p^4)}$$

$$y = \frac{d_c}{S}$$

$$y_p = \text{ปรากฏการณ์ความใกล้เคียงของตัวนำ}$$

$$\begin{aligned}
 d_c &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางในตัวนำ} \\
 S &= \text{ระยะห่างระหว่างตัวนำ} \\
 k_p &= \text{ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำ}
 \end{aligned}$$

### 3.1.4 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับในตัวนำสายเคเบิล

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับในสายเคเบิลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (3.1-10)$$

### 3.1.5 ความต้านทานในซิลต์โลหะ

ความต้านทานในซิลต์โลหะจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างของสายเคเบิลซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ [2]

#### ซิลต์โลหะแบบท่อ

ความต้านทานจะขึ้นอยู่กับความหนาของท่อ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\rho_{20} (10^6)}{\pi \cdot d_s \cdot th_s} \left[ 1 + \alpha_{20} (t_s - 20) \right] \quad (3.1-11)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 R_s &= \text{ความต้านทานของซิลต์โลหะ} \\
 th_s &= \text{ความหนาของท่อซิลต์โลหะ} \\
 d_s &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซิลต์โลหะ} \\
 t_s &= \text{อุณหภูมิของซิลต์โลหะ}
 \end{aligned}$$

#### ซิลต์โลหะแบบแทป

ความต้านทานจะขึ้นอยู่กับความกว้าง ความหนาและจำนวนชั้นของแทปที่พันรอบสายเคเบิล และยังขึ้นอยู่กับตัวประกอบความยาวในการพันครบรอบสายเคเบิลด้วยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\rho_{20} (10^6)}{w_t \cdot n_t \cdot th_s} \left[ 1 + \left( \frac{\pi D_t}{L_t} \right)^2 \right]^{0.5} \left[ 1 + \alpha_{20} (t_s - 20) \right] \quad (3.1-12)$$

เมื่อ

$th_s$  = ความหนาของท่อซีดโลหะ

$n_t$  = จำนวนชั้นของเทป

$w_t$  = ความกว้างของเทป

$L_t$  = ความยาวครบรอบในการพัน

$D_t$  = เส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนที่เทปพันรอบ

#### ซีดโลหะแบบเส้นลวดตีเกลียว

ความต้านทานจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด จำนวนเส้นลวด และยังขึ้นอยู่กับตัวประกอบความยาวในการพันครบรอบสายเคเบิลด้วยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_s = \frac{4\rho_{20} 10^6}{\pi \cdot n_a d_w^2} \left[ 1 + \left( \frac{\pi D_w}{L_a} \right)^2 \right]^{0.5} \left[ 1 + \alpha_{20} (t_s - 20) \right] \quad (3.1-13)$$

เมื่อ

$n_a$  = จำนวนเส้นลวด

$d_w$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

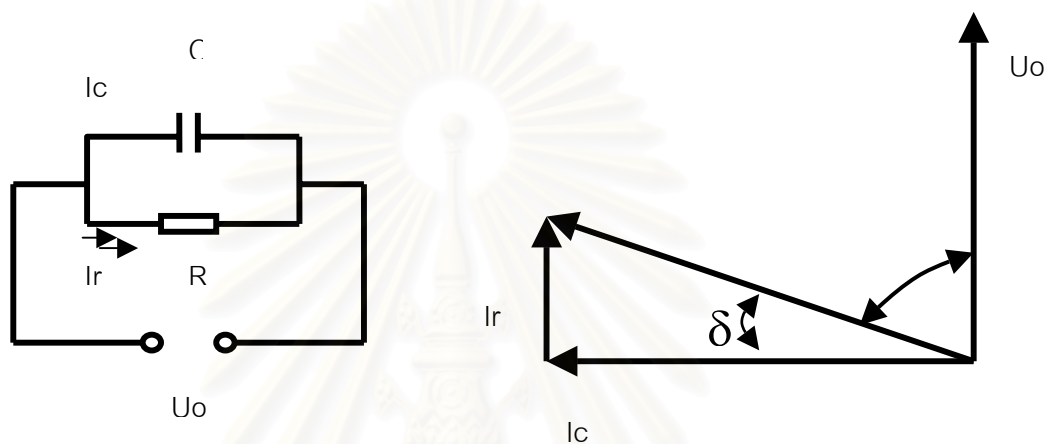
$L_a$  = ความยาวครบรอบในการตีเกลียว

$D_w$  = เส้นผ่านศูนย์กลางในส่วนที่เส้นลวดพันรอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกและค่าเก็บประจุในสายเคเบิล

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวนสายเคเบิลจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันใช้งานที่ตกคร่อมสายเคเบิลโดยเกิดจากฉนวนของสายเคเบิลไม่ได้มีคุณสมบัติเสมือนเป็นฉนวนหรือตัวเก็บประจุ ( capacitor ) ในอุดมคติทั้งหมดแต่จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ในรูปของความต้านทานเพิ่มขึ้นทำให้เกิดกระแสในฉนวนไม่นำหน้าแรงดัน 90 องศา ตามรูปที่ 3.2-1



รูปที่ 3.2-1 แสดงวงจรสมมูลของฉนวนไฟฟ้าในสายเคเบิล

จากวงจรสมมูลในรูป 3.2-1 สามารถคำนวณหากระแสในตัวเก็บประจุและความต้านทานได้ดังนี้

$$I_c = j\omega C \cdot U_o \quad \text{และ} \quad I_r = \frac{U_o}{R}$$

ตัวเก็บประจุในสายเคเบิลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{dc}\right)} \cdot 10^{-9} \tag{3.2-1}$$

ตัวประกอบการสูญเสียในฉนวน ( dissipation factor ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{|I_r|}{|I_c|} = \frac{U_o}{R \cdot C \cdot \omega \cdot U_o} = \frac{1}{R \cdot C \cdot \omega} \tag{3.2-2}$$

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในสายเคเบิลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W_d = \frac{U_o^2}{R} = \omega.C.U_o^2 . \tan \delta \quad (3.2-3)$$

เมื่อ

$\epsilon$  = ค่าเพอร์มิทิวิตีของฉนวน

$U_o$  = แรงดันตกคร่อมสายเคเบิล



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.3 กำลังสูญเสียในซิลต์โลหะ

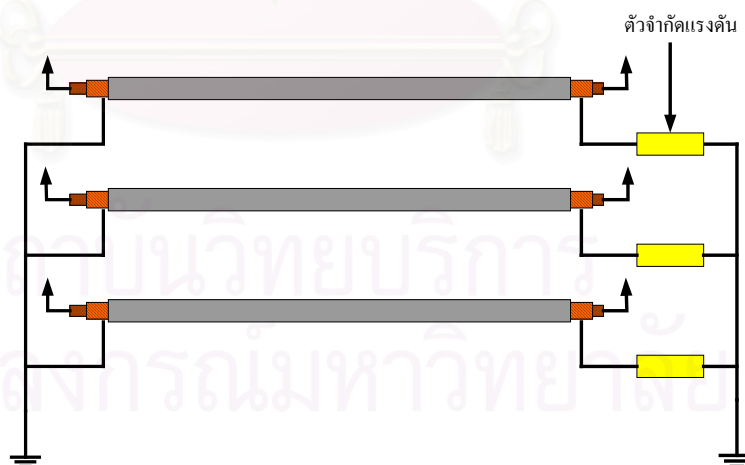
สายเคเบิลที่มีซิลต์โลหะจะมีกำลังสูญเสียในซิลต์โลหะเกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากกระแสสองส่วนคือ กระแสครบวงจร (circulating current) และกระแสไหลวน (eddy current) ที่ไหลในตัวนำของซิลต์โลหะทำให้เกิดความร้อน กระแสที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการต่อลงดินของซิลต์โลหะในแต่ละรูปแบบเช่นกระแสครบวงจรจะเกิดขึ้นเมื่อต่อลงดินแบบ 2 จุดหรือหลายจุด แต่หากต่อลงแบบหนึ่งจุดแล้วจะไม่เกิดกระแสครบวงจรเป็นต้น [2]

#### 3.3.1 วิธีการต่อลงดินของซิลต์โลหะ

รูปแบบการต่อลงดินของซิลต์โลหะจะมีผลต่อความสามารถในการรับกระแสและความปลอดภัยในการใช้งานรูปแบบการต่อซิลต์ลงดินมีดังนี้

##### 3.3.1.1 วิธีต่อลงดินแบบหนึ่งจุด (Single Point Bonding)

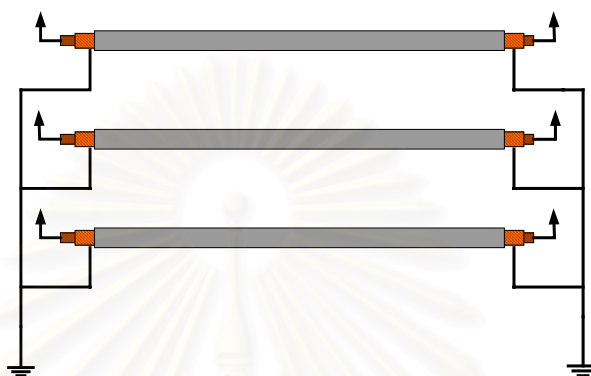
การต่อลงดินแบบหนึ่งจุดแสดงดังรูปที่ 3.3-1 มีตัวจำกัดแรงดันไว้ป้องกันแรงดันเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะเกินค่าที่กำหนด แรงดันเหนี่ยวนำนี้จะแปรตามความยาวของสายเคเบิล กระแสในสายเคเบิล และระยะห่างของการวางสายเคเบิลซึ่งการต่อแบบนี้จะไม่มีกระแสไหลวนครบวงจรเกิดขึ้นในซิลต์ทำให้ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลเพิ่มขึ้น แต่มีข้อเสียที่มีแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นซึ่งอาจเป็นอันตราย จึงมีการต่ออุปกรณ์จำกัดแรงดัน



รูปที่ 3.3-1 วิธีต่อลงดินแบบหนึ่งจุด แบบมีตัวจำกัดแรงดัน

### 3.3.1.2 วิธีต่อลงดินแบบสองจุด (Both End Bonding)

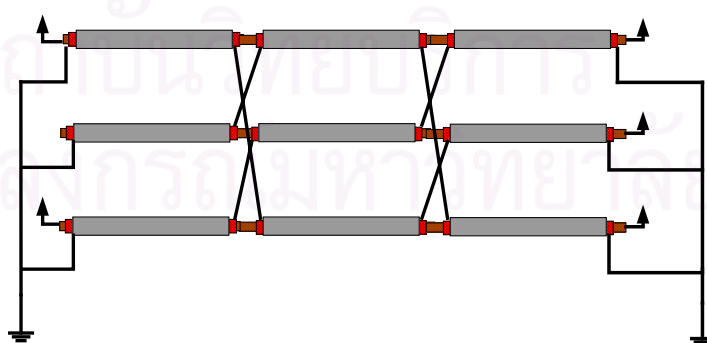
การต่อลงดินแบบสองจุด แสดงดังรูปที่ 3.3-2 จะทำให้ไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในชิลด์แต่จะมีกระแสไหลครบวงจรในชิลด์โลหะทำให้ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลน้อยลงเมื่อเทียบกับแบบการต่อลงดินแบบหนึ่งจุด แต่จะมีความปลอดภัยกว่า



รูปที่ 3.3-2 การต่อลงดินแบบสองจุด

### 3.3.1.3 วิธีต่อลงดินแบบครอสบอนด์ (Cross Bonding)

การต่อลงดินแบบครอสบอนด์ตามรูปที่ 3.3-3 จะแบ่งความยาวของสายเคเบิลออกเป็นสามส่วนที่เท่ากันและต่อชิลด์โลหะสลับกันตามลำดับ การต่อแบบนี้จะทำให้ไม่มีกระแสครบวงจรและไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำในชิลด์โลหะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการต่อชิลด์โลหะสลับเฟสทำให้ผลรวมของแรงดันเป็นศูนย์ แต่มีข้อเสียที่ราคาการก่อสร้างจะสูงมากและในทางปฏิบัติทำยากที่จะแบ่งความยาวในการต่อลงดินให้เท่ากัน



รูปที่ 3.3-3 การต่อลงดินแบบครอสบอนด์

### 3.3.2 กระแสครบวงจรในซิลด์ (Circulating Current )

การคำนวณหากระแสครบวงจรในซิลด์โลหะมีความสำคัญมากในการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียในซิลด์โลหะและในตัวนำสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\lambda_{\text{cir}} = \frac{I_s^2 R_s}{I_c R_{ac}} \quad (3.3-1)$$

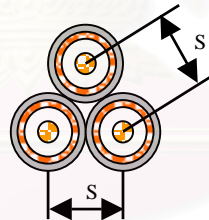
เมื่อ

$\lambda_{\text{cir}}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลด์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจร

$I_s$  = กระแสที่ไหลในซิลด์โลหะ

$I_c$  = กระแสที่ไหลในตัวนำ

3.3.2.1 การคำนวณหากระแสครบวงจรที่ไหลในซิลด์โลหะที่มีการติดตั้งแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า



รูปที่ 3.3-4 การวางสายแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า

ในการต่อลงดินแบบหลายจุดหรือ 2 จุดเราสามารถคำนวณหากระแสครบวงจรในซิลด์ได้ดังนี้ แรงดันที่เกิดขึ้นที่ซิลด์โลหะมีสมการดังนี้

$$E_{s1} = k_{CS11} \cdot I_1 + k_{CS12} \cdot I_2 + k_{CS13} \cdot I_3 + K_{S11} \cdot I_{s1} + K_{S12} \cdot I_{s2} + K_{S13} \cdot I_{s3} \quad (3.3-2)$$

$$E_{s2} = k_{CS21} \cdot I_1 + k_{CS22} \cdot I_2 + k_{CS23} \cdot I_3 + K_{S21} \cdot I_{s1} + K_{S22} \cdot I_{s2} + K_{S23} \cdot I_{s3} \quad (3.3-3)$$

$$E_{S3} = K_{CS31} \cdot I_1 + K_{CS32} \cdot I_2 + K_{CS33} \cdot I_3 + K_{S31} \cdot I_{S1} + K_{S32} \cdot I_{S2} + K_{S33} \cdot I_{S3} \quad (3.3-4)$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (3.3-5)$$

$$I_1 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I_2 \quad (3.3-6)$$

$$I_3 = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I_2 \quad (3.3-7)$$

$$I_{S1} + I_{S2} + I_{S3} = 0 \quad (3.3-8)$$

$$E_{S1} + E_{S2} + E_{S3} = E_0 \quad (3.3-9)$$

พิจารณาสมการ ที่(3.3-3) ค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำที่ 1 กับซิลต์โลหะของตัวนำที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K_{CS21} = K_{CS23} = \frac{j\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{S}\right) \quad (3.3-10)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำที่ 2 กับซิลต์โลหะของตัวนำที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K_{CS22} = \frac{j\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{d_s/2}\right) \quad (3.3-11)$$

เมื่อ

$d_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซิลต์โลหะ

$S$  = ระยะห่างระหว่างตัวนำ

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (3.3-3) จะได้ดังนี้

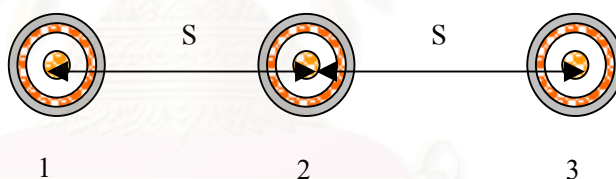
$$E_{S2} = 0 = \frac{j\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d_s}\right) I_2 + \left( R_s + j\frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d_s}\right) \right) I_{S2} \quad (3.3-12)$$

$$\frac{I_s}{I_c} = \frac{\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d_s}\right)}{\left(R_s + j\frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d_s}\right)\right)} \quad (3.3-13)$$

$$X = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d_s}\right) \quad (3.3-14)$$

$$\lambda_{cir} = \frac{I_s^2 R_s}{I_c R_{ac}} = \frac{R_s}{R_{ac}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (3.3-15)$$

3.3.2.2 การคำนวณหากระแสรวมวงจรที่ไหลในซิลด์โลหะแบบการติดตั้ง  
ระนาบเดียวกัน



รูปที่ 3.3-5 การวางสายแบบระนาบแนวนอน

พิจารณาสมการ ที่(3.3-2) ค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำที่ 1 กับซิลด์  
โลหะที่ของตัวนำที่ 2 และ 3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K_{CS12} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{S}\right) \quad (3.3-16)$$

$$K_{CS13} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{2S}\right) \quad (3.3-17)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำที่ 1 กับซิลด์โลหะของตัวนำที่ 1  
สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K_{CS11} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{d_s/2}\right) \quad (3.3-18)$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 3.3-2 จะได้ดังนี้

$$Es_1 = E0 = \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (X + X_m) - j\frac{1}{2} \cdot (X - X_m) \right] \cdot I_2 + [R_s + jX] \cdot I_{s1} - jX_m \cdot I_{s3} \quad (3.3-19)$$

$$X_m = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2S}{d_s}\right) \quad (3.3-20)$$

สมการ ที่ (3.3-3) และ (3.3-4) แทนค่าในลักษณะเดียวกันจะได้

$$Es_2 = E0 = jX \cdot I_2 + [R_s + jX] \cdot I_{s2} \quad (3.3-21)$$

$$Es_3 = E0 = \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (X + X_m) - j\frac{1}{2} \cdot (X - X_m) \right] \cdot I_2 - jX_m \cdot I_{s1} + [R_s + jX] \cdot I_{s3} \quad (3.3-22)$$

แก้สมการในรูปของ  $\frac{I_s}{I_2}$  จะได้ดังนี้

$$\frac{I_{s1}}{I_2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\sqrt{3}R_s \cdot P}{R_s^2 + P^2} + j \left( \frac{R_s Q}{R_s^2 + Q^2} - \frac{\sqrt{3}P^2}{R_s^2 + P^2} \right) \right] \quad 3.3-23$$

$$\frac{I_{s2}}{I_2} = - \left[ \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} + j \frac{R_s Q}{R_s^2 + Q^2} \right] \quad (3.3-24)$$

$$\frac{I_{s3}}{I_2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{\sqrt{3}R_s \cdot P}{R_s^2 + P^2} + j \left( \frac{R_s Q}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\sqrt{3}P^2}{R_s^2 + P^2} \right) \right] \quad (3.3-25)$$

เมื่อ

$$P=X+X_m$$

$$Q=X-X_m/3$$

นำสมการที่ (3.3-23), (3.3-24) และ (3.3-25) แทนในสมการที่ (3.3-1) จะได้สมการของอัตราส่วนการสูญเสียของกระแสในซิลต์โลหะต่อกระแสในตัวนำดังนี้

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R_{ac}} \left[ \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{2R_s \cdot P \cdot Q \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot (R_s^2 + Q^2) \cdot (R_s^2 + P^2)} \right] \quad (3.3-26)$$

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R_{ac}} \left( \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right) \quad (3.3-27)$$

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R_{ac}} \left[ \frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} - \frac{2R_s \cdot P \cdot Q \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot (R_s^2 + Q^2) \cdot (R_s^2 + P^2)} \right] \quad (3.3-28)$$

เมื่อ

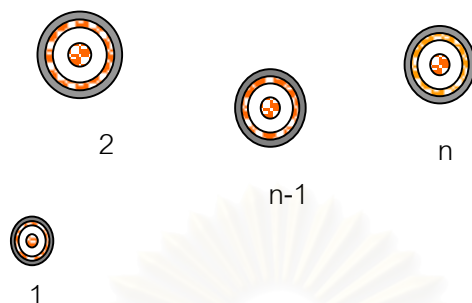
$\lambda'_{11}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจรของเคเบิลเส้นที่ 1 ที่อยู่ด้านซ้าย

$\lambda'_{1m}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจรของเคเบิลเส้นที่ 2 ที่อยู่ตรงกลาง

$\lambda'_{12}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียซิลต์โลหะและในตัวนำเนื่องจากกระแสครบวงจรของเคเบิลเส้นที่ 3 ที่อยู่ด้านขวา

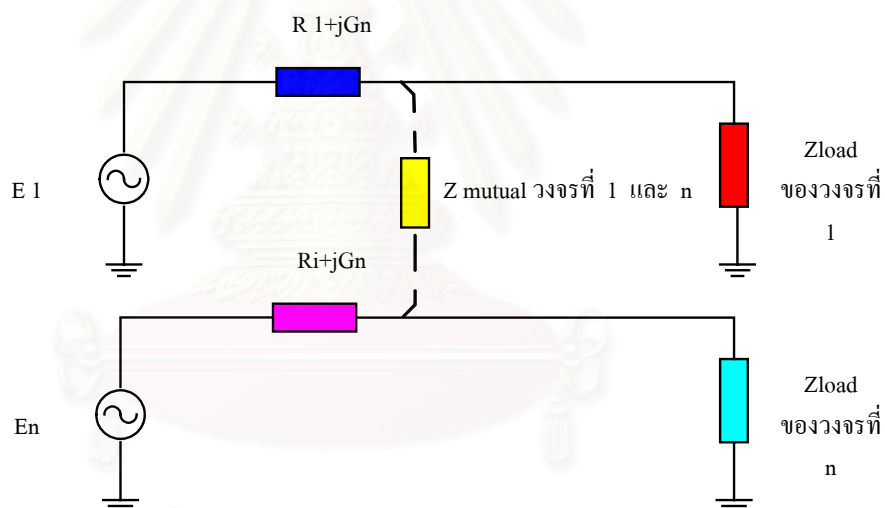
### 3.3.2.3 การคำนวณหากระแสครบวงจรที่ไหลในซิปต์โลหะแบบการติดตั้ง

หลายวงจร



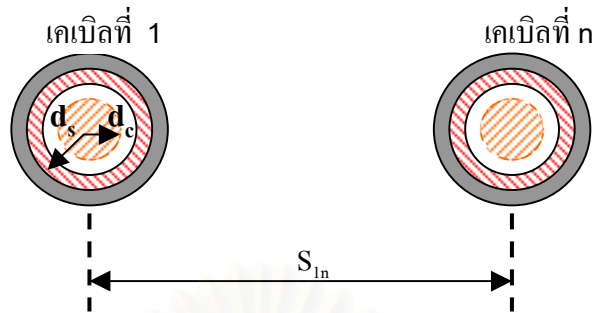
รูปที่ 3.3-6 แบบแสดงการวางสายเคเบิลที่มีหลายวงจร

การคำนวณหาอัตราส่วนของกระแสในซิปต์ต่อกระแสในตัวนำกรณีที่มีการติดตั้งหลายวงจรสามารถทำได้ดังนี้ [4]



รูปที่ 3.3-7 วงจรสมมูลการวางสายเคเบิลที่มีหลายวงจร





รูปที่ 3.3-8 วงจรสมมูลที่มีความต้านทานอิมพีแดนซ์ร่วมของ 2 วงจร

ความต้านทานความเหนี่ยวนำภายในสายเคเบิล

$$X_c = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{1}{d_c/2}\right) \quad (3.3-29)$$

ความต้านทานความเหนี่ยวนำที่ซิลด์โลหะ

$$X_s = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2}{d_s}\right) \quad (3.3-30)$$

ความต้านทานความเหนี่ยวนำระหว่างสายเคเบิลเส้นที่ 1 กับเส้นที่ n

$$X_{in} = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{1}{S_{in}}\right) \quad (3.3-31)$$

$$[E] = \left( [R_d] + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \cdot [G] + [Z_{load}] \right) \cdot I \quad (3.3-32)$$

$$[G] = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{1}{S_{11}}\right) & \ln\left(\frac{1}{S_{12}}\right) \dots & \ln\left(\frac{1}{S_{1n}}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln\left(\frac{1}{S_{n1}}\right) & \ln\left(\frac{1}{S_{n2}}\right) \dots & \ln\left(\frac{1}{S_{nn}}\right) \end{bmatrix} \quad (3.3-33)$$

$$[Z] = \left( [R_d] + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \cdot [G] + [Z_{load}] \right) \quad (3.3-34)$$

$$[I] = [Z^{-1}] \cdot [E] \quad (3.3-35)$$

เมื่อ

[R<sub>d</sub>] = เมตริก n x n เมตริก(R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub>,...R<sub>n</sub>) ของความต้านทานในตัวนำสายเคเบิลและชิลด์โลหะของแต่ละสายเคเบิล

[E] = เมตริกแรงดันของแต่ละวงจร

[I] = เมตริกของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำและชิลด์โลหะ ของแต่ละสายเคเบิล

[G] = เมตริกค่าอิมพีแดนซ์ของเหนี่ยวนำรวมวงจรใกล้เคียง

แก้สมการ(3.3-35) จะได้ค่าของกระแสที่ไหลในตัวนำและในชิลด์โลหะและนำไปคำนวณหาอัตราสูญเสียของแต่ละสายเคเบิลได้

### 3.3.3 กระแสไหลวน( Eddy Current )

กระแสไหลวนเกิดจากสนามแม่เหล็กของสายเคเบิลข้างเคียงมาคล้องตัดกับชิลด์โลหะของสายเคเบิลที่พิจารณาทำให้เกิดกระแสไหลวนในชิลด์โลหะขึ้นโดยลักษณะของชิลด์โลหะที่พิจารณาจะมีโครงสร้างเป็นท่อผิวเรียบหรือท่อแบบลูกฟูก (corrugate) เพื่อที่กระแสสามารถวิ่งได้รอบหากสายเคเบิลที่มีชิลด์เป็นเส้นลวดตีเกลียวและต่อลงดินแบบหนึ่งจุดจะไม่มีกระแสไหลวน

ตามมาตรฐาน IEC 287 กำหนดสมการในการคำนวณของการต่อลงดินแบบหนึ่งจุดสำหรับการคำนวณหากระแสไหลวนของสายเคเบิลแบบหนึ่งแกน ดังนี้

$$\lambda'_{eddy} = \frac{R_s}{R_{ac}} \left[ g_s \cdot (\lambda_0) \cdot (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 \cdot th_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (3.3-36)$$

$$g_s = 1 + \left( \frac{th_s}{D_s} \right)^{1.74} [(\beta_1) \cdot (D_s) \times 10^{-3} - 1.6] \quad (3.3-37)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \omega}{10^7 \rho_s}} \quad (3.3-38)$$

$$m = \frac{\omega}{R_s} \cdot 10^{-7} \quad (3.3-39)$$

### 3.3.3.1 การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า

$$\lambda_0 = 3 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^2 \quad (3.3-40)$$

$$\Delta_1 = (1.14(m^{2.45}) + 0.33) \cdot \left( \frac{d_s}{2S} \right)^{(0.92+1.66)} \quad (3.3-41)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (3.3-42)$$

### 3.3.3.2 การวางสายเคเบิลแบบในแนวระนาบ

#### สายเคเบิลเส้นกลาง

$$\lambda_0 = 6 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^2 \quad (3.3-43)$$

$$\Delta_1 = 0.86(m^{3.08}) \cdot \left( \frac{d_s}{2S} \right)^{(1.4m+0.7)} \quad (3.3-44)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (3.3-45)$$

#### เคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสนำหน้า (leading phase)

$$\lambda_0 = 1.5 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^2 \quad (3.3-46)$$

$$\Delta_1 = 4.7(m^{0.7}) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^{(0.16m+2)} \quad (3.3-47)$$

$$\Delta_2 = 21(m^{3.3}) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^{(1.47m+5.06)} \quad (3.3-48)$$

เคเบิลเส้นนอกที่มีเฟสตามหลัง (lagging phase)

$$\lambda_0 = 1.5 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^2 \quad (3.3-49)$$

$$\Delta_1 = \left( \frac{-0.74(m+2)(m^{0.5})}{2+(m-0.3)^2} \right) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^{(m+1)} \quad (3.3-50)$$

$$\Delta_2 = 0.92(m^{3.7}) \left( \frac{d_s}{2S} \right)^{(m+2)} \quad (3.3-51)$$

เมื่อ

$\lambda_{eddy}$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูญเสียในซีลด์โลหะ  
และในตัวนำเนื่องจากกระแสไหลวน

$\lambda_0$  = สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการคูณ

$\Delta_1$  = สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการคูณ

$\Delta_2$  = สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการคูณ

$th_s$  = ความหนาของท่อซีลด์โลหะ

$d_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีลด์โลหะ

$D_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกสุดของซีลด์โลหะ

### 3.4 ความต้านทานทางความร้อนของการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

ความต้านทานทางความร้อนของการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินจะพิจารณาส่วนที่ไม่เป็นนำไฟฟ้า เช่น ส่วนที่เป็นฉนวน เปลือกและลักษณะการติดตั้งเป็นต้น ความต้านทานทางความร้อนจะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำ เราสามารถคำนวณหาความต้านทานความร้อนของการติดตั้งสายเคเบิลในแต่ละส่วนดังนี้ [2]

#### 3.4.1 ความต้านทานทางความร้อนของฉนวน

ความต้านทานทางความร้อนของฉนวนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายเคเบิลซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

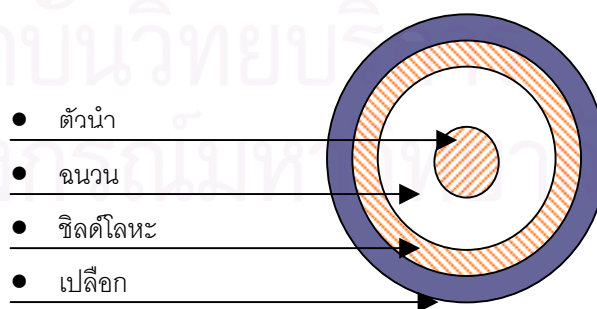
##### 3.4.1.1 สำหรับสายเคเบิลหนึ่งแกน

ความต้านทานทางความร้อนของฉนวนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_i = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_i}{d_c}\right) \quad (3.4-1)$$

เมื่อ

- $\rho_i$  = สภาพต้านทานของฉนวน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
- $d_c$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (มิลลิเมตร)
- $t_i$  = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและชิลด์โลหะ (มิลลิเมตร)
- $T_i$  = ความต้านทานทางความร้อนของฉนวน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)



รูป 3.4-1 สายเคเบิลหนึ่งแกน

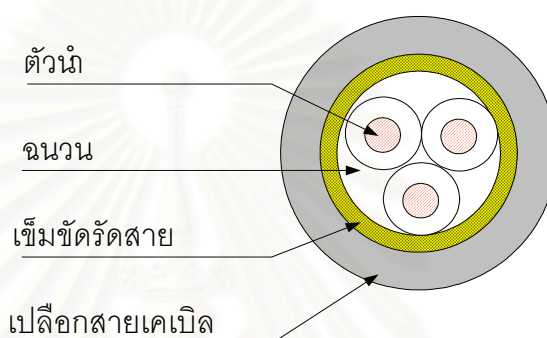
### 3.4.1.2 สำหรับเคเบิลหลายแกน

ร้อนของฉนวนดังนี้

ในกรณีสายเคเบิลหลายแกนสามารถคำนวณหาความต้านทานทางความ

with circular )

#### 3.4.1.2.1 สายสามแกนชนิดเข็มขัดรัดทรงกลม ( Three core belted cables with circular )



รูปที่ 3.4-2 สายเคเบิลชนิดสามแกนเข็มขัดรัดทรงกลม

$$T_i = \frac{\rho_i}{2\pi} G \quad (3.4-2)$$

เมื่อ  $G$  = ตัวประกอบทางเรขาคณิต (geometric factor)

การคำนวณหาตัวประกอบทางเรขาคณิตของสายเคเบิลสามแกนตามมาตรฐาน

ฐาน IEC60287 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$G = M \cdot G_s \quad (3.4-3)$$

$$X = \frac{t_1}{d_c} \quad (3.4-4)$$

$$Y = \left( \frac{2t_1}{t} \right) - 1 \quad (3.4-5)$$

เมื่อ

$t$  = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำ

$t_1$  = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและเปลือก

$$M = \ln \left[ \frac{1 - \alpha\beta + [(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)]^{\frac{1}{2}}}{\alpha - \beta} \right] \quad (3.4-6)$$

$$\alpha = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{2X}{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{2X}{1+Y} \right)} \right]^3} \quad (3.4-7)$$

$$\beta = \alpha \cdot \left[ \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{2X}{1+Y} \right) - 3}{\frac{2}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{2X}{1+Y} \right) + 3} \right] \quad (3.4-8)$$

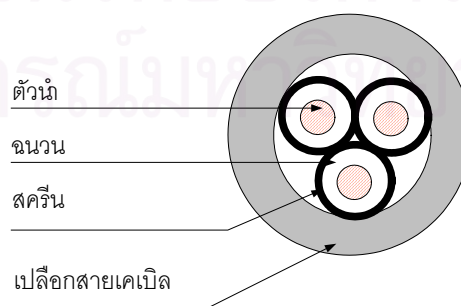
$$G_s(X,0) = 1.09414 - 0.0944045X + 0.0234464X^2 \quad (3.4-9)$$

$$G_s(X,0.5) = 1.09605 - 0.0801857X + 0.0176917X^2 \quad (3.4-10)$$

$$G_s(X,1) = 1.09831 - 0.0720631X + 0.0145909X^2 \quad (3.4-11)$$

$$G_s(X,Y) = G_s(X,0) + Y[-3 G_s(X,0) + 4 G_s(X,0.5) - G_s(X,1)] + Y^2[2 G_s(X,0) - 4 G_s(X,0.5) + 2 G_s(X,1)] \quad (3.4-12)$$

#### 3.4.1.2.2 สายสามแกนชนิดสกรีน (three core screened cables)



รูปที่ 3.4-3 ภาพสายเคเบิลชนิด สายสามแกนชนิดสกรีน

$$T_i = K \cdot \frac{\rho_i}{2\pi} G \quad (3.4-13)$$

$$X = \frac{\delta_1 \rho_T}{d_c \rho_m} \quad (3.4-14)$$

เมื่อ

$\rho_T$  = สภาพต้านทานของฉนวน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$\delta_1$  = ความหนาของสกรีนโลหะ

$\rho_m$  = สภาพต้านทานของสกรีนโลหะ (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

ตารางที่ 3.4-1 แสดงค่าของสภาพต้านทานของสกรีนโลหะ

ชนิดโลหะ	สภาพต้านทานของสกรีนโลหะ ( $\rho_m$ ) (C. m/W)
ทองแดง	$27 \times 10^{-4}$
อลูมิเนียม	$48 \times 10^{-4}$

$$Y = \frac{t_{1s}}{d_c} \quad (3.4-15)$$

เมื่อ

$t_{1s}$  = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำและสกรีน

กรณี เมื่อ  $0 < X \leq 6$  แล้วจะได้

$$K(X, 0.2) = 0.998095 - 0.123369X + 0.0202620X^2 - 0.00141667X^3 \quad (3.4-16)$$

$$K(X, 0.6) = 0.999452 - 0.0896589X + 0.0120239X^2 - 0.000722228X^3 \quad (3.4-17)$$

$$K(X, 1) = 0.997976 - 0.0528571X + 0.00345238X^2 \quad (3.4-18)$$

กรณี เมื่อ  $6 < X \leq 25$  แล้วจะได้

$$K(X, 0.2) = 0.824160 - 0.0288721X + 0.000928511X^2 - 0.0000137121X^3 \quad (3.4-19)$$

$$K(X, 0.6) = 0.853348 - 0.0246874X + 0.000966967X^2 - 0.0000159967X^3 \quad (3.4-20)$$

$$K(X, 1) = 0.883287 - 0.0153782X + 0.000260292X^2 \quad (3.4-21)$$

$$Z = 1.25Y - 0.25 \quad (3.4-22)$$



$$K(X,Y) = K(X,0.2) + Z[-3K(X,0.2) + 4K(X,0.6) - K(X,1)] + Z^2[2K(X,0.2) - 4K(X,0.6) + 2K(X,1)] \quad (3.4-23)$$

### 3.4.2 ความต้านทานทางความร้อนของเปลือกเคเบิล (Jacket)

ความต้านทานทางความร้อนของเปลือกเคเบิลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_j = N_{\text{conductor}_j} \times \frac{\rho_j}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_j}{d_s}\right) \quad (3.4-24)$$

เมื่อ

$\rho_j$  = สภาพต้านทานของเปลือกเคเบิล (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$d_s$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของซิลด์โลหะ (มิลลิเมตร)

$t_j$  = ความหนาของเปลือกเคเบิล (มิลลิเมตร)

$T_j$  = ความต้านทานทางความร้อนของเปลือก (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$N_{\text{conductor}_j}$  = จำนวนตัวนำภายในเปลือกเคเบิล

ตารางที่ 3.4-2 สภาพต้านทานของเปลือกเคเบิลชนิดต่างๆ

ชนิดของเปลือกเคเบิล	สภาพต้านทานของเปลือกเคเบิล (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)
Rubber sandwich protection	6
Polychloroprene	5.5
P.V.C. ใช้กับแรงดันไม่เกิน 35 kV	5
P.V.C. ใช้กับแรงดันเกิน 35 kV	6
PE	3.5

### 3.4.3 ความต้านทานทางความร้อนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิล

ความต้านทานทางความร้อนที่อยู่ภายนอกสายเคเบิลมีหลายส่วนซึ่งประกอบด้วยดังนี้

- ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ
- ความต้านทานทางความร้อนของท่อ

- ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของตัวประกอบโหลด ( Load Factor )
- ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลความลึกในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน
- ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากการปรับแก้ของความต้านทานดิน
- ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากความร้อนของสายเคเบิลใกล้เคียง

3.4.3.1. ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ  
การคำนวณความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อจะขึ้นอยู่กับ  
กับชนิดของท่อและรูปแบบการติดตั้งซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_{sd} = \frac{N_{\text{conductor}} \times U}{[1 + 0.1(V + Y \cdot t_m) D_e]} \quad (3.4-25)$$

เมื่อ

$T_{sd}$  = ความต้านทานทางความร้อนระหว่างสายเคเบิลและท่อ  
(องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$U$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง

$V$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง

$Y$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการติดตั้ง

$D_e$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (มิลลิเมตร)  
(สำหรับติดตั้งสายเคเบิลหนึ่งแกนแบบสามเหลี่ยมด้าน  
เท่า  $D_e = 2.15 \times$  เส้นผ่านศูนย์กลางของสายเคเบิลหนึ่ง  
แกน)

$t_m$  = อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวกลางที่อยู่ระหว่างสายเคเบิลและท่อ  
(องศาเซลเซียส)

$N_{\text{conductor}}$  = จำนวนตัวนำภายในท่อ

ตารางที่ 3.4-3 .ค่าคงที่ U, V, Y

สภาวะการติดตั้ง	U	V	Y
ในท่อโลหะ( metallic conduit )	5.2	1.4	0.011
ในท่อไฟเบอร์ในอากาศ ( fiber duct in air)	5.2	0.83	0.006
ในท่อไฟเบอร์ในคอนกรีต ( fiber duct in concrete)	5.2	0.91	0.010
ในท่อเอสเบสทอสซีเมนต์ (asbestos cement)			
ก. เดินท่อในอากาศ	5.2	1.2	0.006
ข. เดินท่อในคอนกรีต	5.2	1.1	0.011
สายเคเบิลชนิดอัดก๊าซในท่อ (Gas pressure cable in pipe)	0.95	0.46	0.0021
สายเคเบิลชนิดอัดน้ำมัน( Oil pressure pipe type cable)	0.26	0	0.0026
ท่อพลาสติก(Plastic ducts)	กำลังพิจารณา	กำลังพิจารณา	กำลังพิจารณา
ท่ออิฐดินเผา (Earthenware duct)	1.87	0.28	0.0036

## 3.4.3.2. ความต้านทานทางความร้อนของท่อ

การคำนวณความต้านทานทางความร้อนของท่อจะขึ้นกับชนิดของท่อสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$T_d = N_{\text{conductor}} \cdot \frac{1}{2\pi} \rho_d \ln \left[ \frac{D_{\text{outerduct}}}{D_{\text{innerduct}}} \right] \quad (3.4-26)$$

เมื่อ

$T_d$  = ความต้านทานทางความร้อนของท่อ (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

$D_{\text{outerduct}}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ(มิลลิเมตร)

$D_{\text{innerduct}}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (มิลลิเมตร)

$\rho_d$  = สภาพความต้านทานทางความร้อนของวัสดุที่ทำท่อ (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

### 3.4.3.3. ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของตัวประกอบโหลด (Load Factor)

ในวงจรที่มีตัวประกอบโหลด จะมีผลของความร้อนที่เกิดจากโหลดที่เพิ่มขึ้นและลดลงนี้ จึงมีการคำนวณหาระยะของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_x$  ขึ้นมาโดยระยะที่อยู่ภายในเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_x$  นี้ อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด ส่วนระยะที่อยู่ภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_x$  อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด สมการที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D_x$  ดังนี้

$$T_{dx} = N_{\text{conductor}} \cdot \frac{1}{2\pi} \rho_s \ln \left[ \frac{D_x}{D_{\text{outerduct}}} \right] \quad (3.4-27)$$

$$D_x = 1.02 \times \sqrt{\alpha \cdot t_{lx}} \times 25.4 \quad (3.4-28)$$

$$\alpha = \frac{104}{\left( \frac{\rho_s}{100} \right)^{0.8}} \quad (3.4-29)$$

เมื่อ

- $T_{dx}$  = ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของตัวประกอบโหลด
- $t_{lx}$  = ระยะเวลาในรอบการเปลี่ยนแปลงของโหลด (ชม.)
- $\rho_s$  = สภาพความต้านทานทางความร้อนของดิน (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

### 3.4.3.4. ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของความลึกในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

การติดตั้งสายใต้ดินที่ตำแหน่งความลึกต่างๆจะมีผลต่อค่าความสามารถในการระบายความร้อนของสายเคเบิลและมีผลต่อค่าการนำกระแสด้วย เช่นการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินที่

ตำแหน่งลึกกว่าย่อมมีความต้านทานทางความร้อนที่สูงกว่าเนื่องจากการระบายความร้อนมาที่ผิวดินทำได้ยากและทำให้ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าลดลงด้วย สมการที่ใช้ในการคำนวณหา มีดังนี้

$$T_{\text{earth}} = (LF_{\text{loss}}) \cdot (N_{\text{conductor}}) \cdot \frac{\rho_s}{2\pi} \left[ \frac{4L_e}{D_x} \right] \tag{3.4-30}$$

เมื่อ

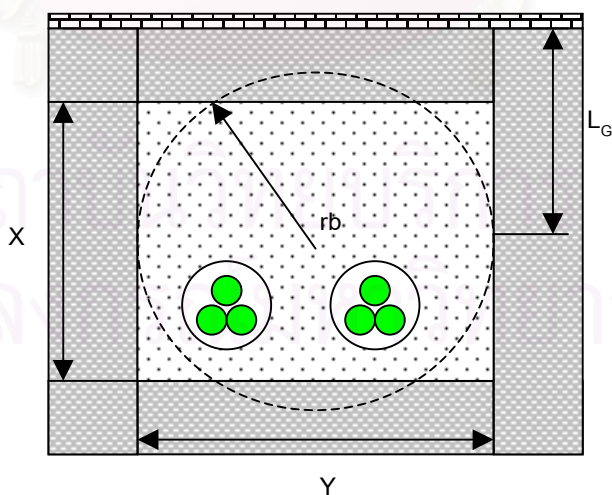
$T_{\text{earth}}$  = ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลของตัวประกอบโหลด

$LF_{\text{loss}}$  = ตัวประกอบกำลังการสูญเสียโหลด

$L_e$  = ความลึกของสายเคเบิล

### 3.4.3.5. ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากการปรับแก้ของความต้านทานดิน

ในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินที่มีการเติมดินที่มีคุณสมบัติในการระบายความร้อนดีกว่าดินเดิมลงไปเพื่อช่วยทำให้ความสามารถในการนำกระแสเพิ่มขึ้นหรือความต้านทานทางความร้อนของดินกับของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสายที่ไม่เท่ากันทำให้ต้องมีการปรับแก้ความต้านทานดินเนื่องจากสาเหตุดังกล่าว โดยความต้านทานทางความร้อนที่มีการปรับแก้สามารถคำนวณได้ดังนี้



รูป 3.4-4 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของ คอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย

$$rb = \exp \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{y} \cdot \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \cdot \ln \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \right] \quad (3.4-31)$$

$$u = \frac{L_G}{rb} \quad (3.4-32)$$

$$Gb = \ln \left( u + \sqrt{(u^2 - 1)} \right) \quad (3.4-33)$$

$$T_{\text{correction}} = (LF_{\text{loss}}) \cdot \frac{N_{\text{conductor}}}{2\pi} (\rho_s - \rho_c) \cdot Gb \quad (3.4-34)$$

เมื่อ

$T_{\text{correction}}$  = ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากการปรับแก้ของ ความต้านทานดิน

$\rho_c$  = สภาพต้านทานของดินที่เติมเพื่อปรับแก้ หรือ คอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย (องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์)

X = ความยาวของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสายด้านที่สั้นที่สุด(มิลลิเมตร)

Y = ความยาวของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสายด้านที่ยาวที่สุด(มิลลิเมตร)

$L_G$  = ความลึกของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย

rb = รัศมีสมมูลของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย

#### 3.4.3.6. ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากความร้อนของสายเคเบิลใกล้

เคียง

การคำนวณหาความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิลใต้ดินจำเป็นต้องคำนึงถึงความร้อนที่มาจากสายเคเบิลใกล้เคียงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิลลดลง

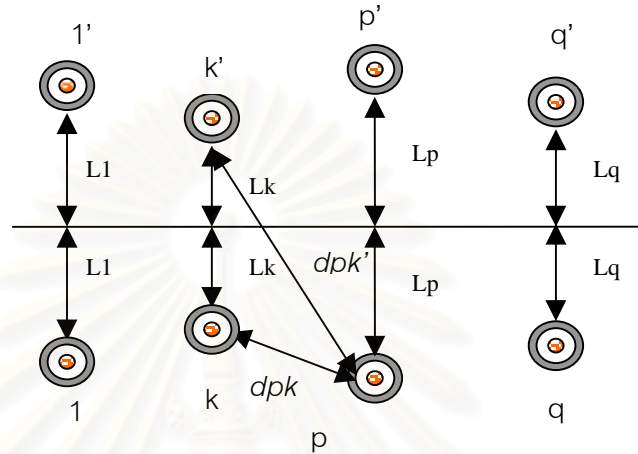
โดยสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp} \quad (3.4-35)$$

เมื่อ

$\Delta\theta_p$  = อุณหภูมิรวมเนื่องมาจากผลของความร้อนจากสายเคเบิลอื่นๆที่ใกล้เคียงทั้งหมดกระทำต่อสายเคเบิลที่ p

$\Delta\theta_{kp}$  = อุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนของสายเคเบิลที่ k กระทำต่อสายเคเบิลที่ p



รูป 3.4-5 แสดงกลุ่มของสายเคเบิลที่ผลทางความร้อนต่อกัน

อุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนของสายเคเบิลที่ k กระทำต่อสายเคเบิลที่ p สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} \rho_s \cdot W_k \cdot \ln\left(\frac{dpk'}{dpk}\right) \quad (3.4-36)$$

เมื่อ

$W_k$  = พลังงานสูญเสียของสายเคเบิลที่ k

$dpk'$  = ระยะห่างระหว่างจุด p ไ้ยังจุด k'

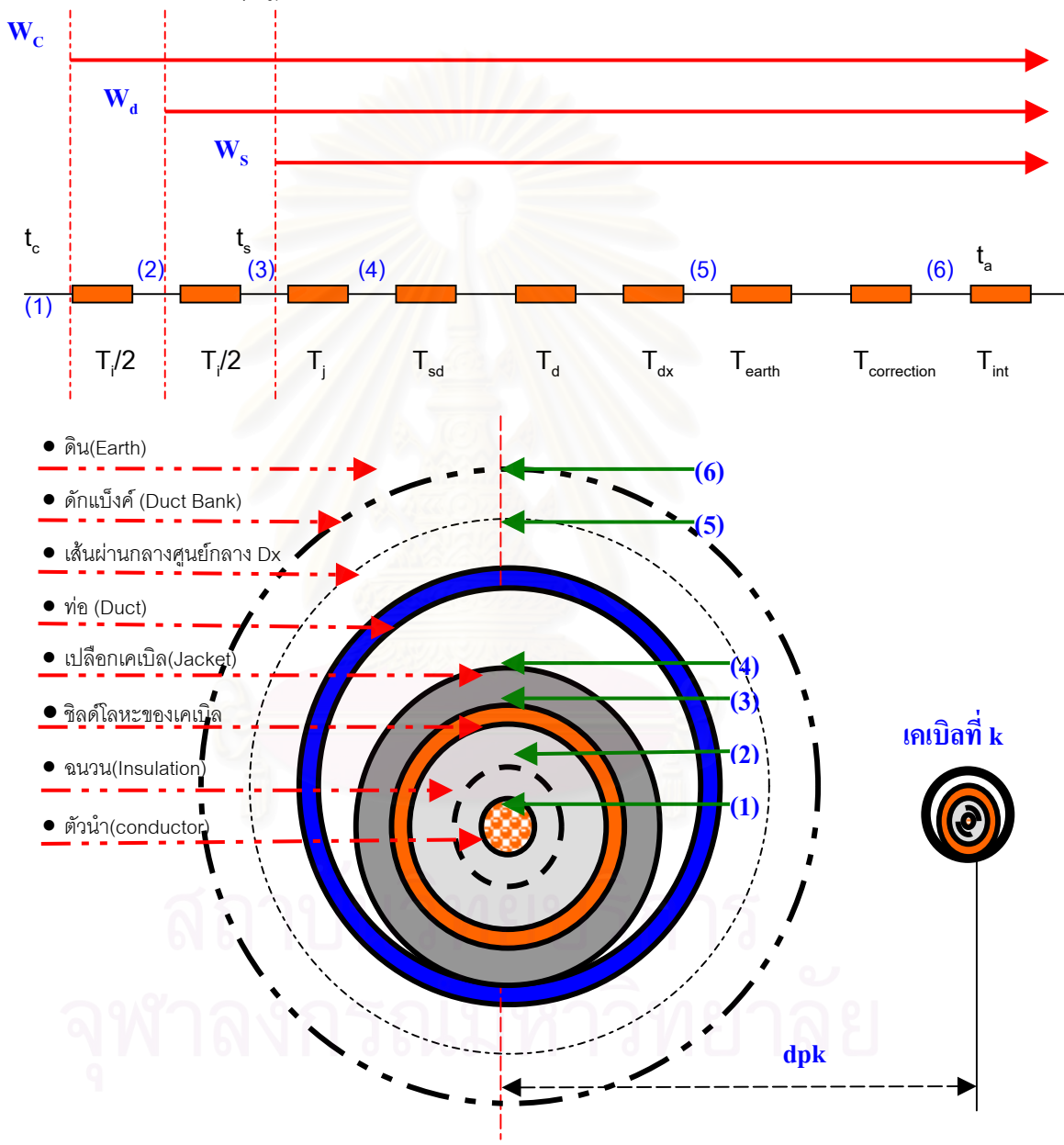
$dpk$  = ระยะห่างระหว่างจุด p ไ้ยังจุด k

ความต้านทานทางความร้อนที่เกิดจากความร้อนของสายเคเบิลที่ k กระทำต่อสายเคเบิลที่ p สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_{int} = T_{kp} = \frac{1}{2\pi} \rho_s \cdot \frac{W_k}{W_p} \cdot \ln\left(\frac{dpk'}{dpk}\right) \quad (3.4-37)$$

3.4.4 การคำนวณหาความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าในสายเคเบิล

การคำนวณหาความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าในสายเคเบิลจำเป็นต้องรู้โครงสร้างของสายเคเบิลเพื่อนำมาพิจารณาในการคำนวณได้ถูกต้องโดยแยกแต่ละส่วนให้อยู่ในรูปของความต้านทานและใช้ทฤษฎีทางความร้อนและทางไฟฟ้าแก่สมการดังนี้ [5]



รูป 3.4-6 วงจรสมมูลของสายเคเบิล



$$\begin{aligned}
t_c - t_a &= W_c \times (T_i + T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int}) \\
&\quad + W_d \times \left( \frac{T_i}{2} + T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int} \right) \\
&\quad + W_s \times (T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int})
\end{aligned}$$

$$t_c - t_a - \Delta_d = W_c \left[ T_i + \frac{W_s}{W_c} \cdot (T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int}) \right]$$

$$t_c - t_a - \Delta_d = I^2 R_{ac} \cdot \left[ T_i + \lambda_1 \cdot (T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int}) \right]$$

$$I = \sqrt{\frac{(T_c - t_a - \Delta_d)}{R_{ac} \cdot \left[ T_i + \lambda_1 \cdot (T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int}) \right]}} \quad (3.4-38)$$

เมื่อ

$$\Delta_d = W_d \times \left( \frac{T_i}{2} + T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int} \right)$$

$I$  = กระแสสูงสุดที่สามารถไหลในสายเคเบิลได้ (แอมแปร์)

$t_c$  = อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำที่สายเคเบิลทนได้ (องศาเซลเซียส)

$t_a$  = อุณหภูมิของดิน(องศาเซลเซียส)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ทฤษฎีการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

ในการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลจะมีการพิจารณาในเรื่องกำลังสูญเสียด้วยมิใช่พิจารณาเพียงแค่เลือกขนาดของสายเคเบิลให้เล็กพอดีกับความสามารถในการรับกระแสที่ต้องการเพียงอย่างเดียว จึงได้มีมาตรฐานของ IEC 60287-3-2 ที่กำหนดวิธีคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการลงทุน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับราคาทั้งหมดของการก่อสร้างสายเคเบิลคำนวณได้ดังนี้

$$CT = CI + CL \quad (4-1)$$

เมื่อ

CT = ราคาทั้งหมด

CI = ราคาของการติดตั้งตลอดความยาวของสายเคเบิล

CL = ราคาสมมูลของกำลังสูญเสียในตลอดช่วงอายุการใช้งาน

#### 4.1 การประเมินราคากำลังสูญเสียในความต้านทานสายเคเบิลตลอดช่วงอายุการใช้งาน

ตัวแปรที่มีความสำคัญมากในการเลือกสายเคเบิลคือกำลังสูญเสียในสายเคเบิล ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่เสียไปโดยเปล่าประโยชน์ การคำนวณการสูญเสียนี้จะคำนวณมาเป็นราคาสมมูลเทียบปัจจุบันในช่วงตลอดอายุการใช้งานสามารถคำนวณได้ดังนี้ [6]

$$CL = \frac{I_o^2 \cdot R \cdot L \cdot N_p \cdot N_c \cdot [T \cdot P \cdot Q_p(N) + D \cdot Q_D(N)]}{1+i} \quad (4-2)$$

$$Q_p(N) = \sum_{n=1}^N r_p^{(n-1)} \quad (4-3)$$

$$Q_D(N) = \sum_{n=1}^N r_D^{(n-1)} \quad (4-4)$$

$$r_p = \frac{(1+a)^2 + (1+b)}{(1+i)} \quad (4-5)$$

$$r_b = \frac{(1+a)^2 (1+c)}{(1+i)} \quad (4-6)$$

$$F(N) = [F_1(N) + F_2(N)] \quad (4-7)$$

$$F_1(N) = \frac{[T.P.N_p.N_c.Q_p(N)]}{1+i} \quad (4-8)$$

$$F_2(N) = \frac{[D.N_p.N_c.Q_D(N)]}{1+i} \quad (4-9)$$

เมื่อ

- a = การเพิ่มขึ้นของโหลดต่อปี
- b = การเพิ่มขึ้นราคาของพลังงานต่อปี
- c = ตัวประกอบการเพิ่มขึ้นของความต้องการกำลังไฟฟ้า
- D = ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ในแต่ละปี
- $I_0$  = กระแสโหลดสูงสุดของสายเคเบิลในช่วงระหว่างปีแรก
- i = อัตราการลดลง ( discount rate ) ซึ่งไม่รวมอัตราเงินเฟ้อ
- L = ความยาวสายเคเบิล
- N = จำนวนปีอายุการใช้งานของสายเคเบิล
- $N_p$  = จำนวนของตัวนำเฟสต่อวงจร
- $N_c$  = จำนวนวงจร
- P = ราคาพลังงานที่ 1 วัตต์-ชม.
- R = ความต้านทานไฟสล็บของตัวนำต่อความยาว
- T = จำนวนชั่วโมงต่อปีที่กระแสโหลดสูงสุดของสายเคเบิล
- $Q_p(N)$ , = ค่าสัมประสิทธิ์ ที่แสดงความสัมพันธ์, การเพิ่มขึ้นของโหลด, การเพิ่มขึ้นราคาของพลังงานและอัตราการลดลงของอายุใช้งาน
- $Q_D(N)$  = ค่าสัมประสิทธิ์ ที่แสดงความสัมพันธ์, การเพิ่มขึ้นของโหลด, ความต้องการกำลังไฟฟ้า และอัตราการลดลงของอายุใช้งาน

การคำนวณหาค่า  $T$  ได้ดังนี้

$$T = LF_{\text{loss}} \cdot 8760 \quad (4-10)$$

การคำนวณหาตัวประกอบกำลังสูญเสียโหลดสามารถคำนวณโดยประมาณดังนี้

$$LF_{\text{loss}} = p \cdot LF + (1 - p) \cdot LF^2 \quad (4-11)$$

เมื่อ

$LF_{\text{loss}}$  = ตัวประกอบกำลังสูญเสียโหลด

$p$  = 0.3 สำหรับระบบส่ง และ 0.2 สำหรับระบบจำหน่าย

$LF$  = ตัวประกอบโหลด

การคำนวณหา ความต้านทานไฟสลัของตัวนำต่อความยาว ดังนี้

$$R = R_{\text{dc}} \cdot (1 + Y_{\text{cs}} + Y_{\text{cp}}) (1 + \lambda) \quad (4-12)$$

$$R_{\text{dc}} = \frac{R_{20} (\beta + Ta)}{2 (\beta + 20)} \left( \frac{1}{1 - \gamma} + \frac{1}{1 - g\gamma} \right) \quad (4-13)$$

$$\gamma = \left[ \frac{I_0}{I_z} \right]^2 \left[ \frac{t_c - t_a}{\beta + t_c} \right] \quad (4-14)$$

$$g = (1 + a)^{2(N-1)} \quad (4-15)$$

เมื่อ

$I_z$  = ความสามารถในการรับกระแสที่ยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด

$R$  = ความต้านทานไฟสลัของตัวนำต่อความยาว

$\beta$  = 228 สำหรับอลูมิเนียม และ 234.4 สำหรับทองแดง

$R_{20}$  = ความต้านทานไฟตรงที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$

$t_a$  = อุณหภูมิล้อมรอบ ( ambient temperature )

$t_c$  = อุณหภูมิตัวนำ

$Y_{\text{cs}}$  = ปรากฏการณ์ทางผิว ของตัวนำ

$Y_{cp}$  = ปรากฏการณ์ความใกล้เคียงของตัวนำ

$\lambda$  = อัตราส่วนระหว่างกำลังสูญเสียในชีทกับกำลังสูญเสียในตัวนำ

การเติบโตของตัวประกอบโหลด ( Growing Load Factor) จะมีผลต่อการคำนวณราคาการสูญเสียด้วยเนื่องจากพฤติกรรมการใช้กระแสโหลดเปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณ ได้ดังนี้

$$T_n = c' - 0.9576^{(n-1)} \cdot d' + 0.917^{(n-1)} \cdot e' \quad (4-16)$$

$$c' = 8760 \cdot [p \cdot LF_u + (1-p) \cdot LF_u^2] \quad (4-17)$$

$$d' = 8760 [p \Delta LF + (1-p) 2 LF_u \cdot \Delta LF] \quad (4-18)$$

$$e' = 8760 \cdot (1-p) \cdot \Delta LF^2 \quad (4-19)$$

$$\Delta LF = LF_u - LF_p \quad (4-20)$$

$$F_1(N) = \frac{P \cdot N_p \cdot N_c \cdot Q'_p(N)}{(1+i)} \quad (4-21)$$

$$Q'_p(N) = c \cdot Q_p(N) - d \cdot Q_{p1}(N) + e \cdot Q_{p2}(N) \quad (4-22)$$

$$Q_{pk}(N) = \frac{1 - r_{pk}^N}{1 - r_{pk}}, k = 1, 2 \quad (4-23)$$

$$r_{p1} = \frac{0.9576(1+a)^2(1+b)}{1+i} \quad (4-24)$$

$$r_{p2} = \frac{0.9170(1+a)^2(1+b)}{1+i} \quad (4-25)$$

เมื่อ

$LF_u$  = ตัวประกอบไหลดสุดท้าย

$LF_p$  = ตัวประกอบไหลดปัจจุบัน

ถ้าการเจริญเติบโตของไหลดมีการหยุดที่ปี  $N_0$  ซึ่งน้อยกว่าอายุการใช้งานของสายเคเบิลแล้วสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$F_1(N) = \frac{P \cdot N_p \cdot N_c \cdot Q_p^*(N)}{(1+i)} \quad (4-26)$$

$$F_2(N) = \frac{D \cdot N_p \cdot N_c \cdot Q_D^*(N)}{(1+i)} \quad (4-27)$$

$$Q_p^*(N) = Q_p'(N_0) + ff \left[ Q_p''(N) - Q_p''(N_0) \right] \quad (4-28)$$

$$Q_D^*(N) = Q_D(N_0) + (1+a)^{2(N_0-1)} \left[ Q_D''(N) - Q_D''(N_0) \right] \quad (4-29)$$

$$ff = 8760(1+a)^{2(N_0-1)} LF_{\text{loss}} \cdot N_0 \quad (4-30)$$

$$Q_p''(N_0) = \frac{1 - r_p'^{N_0}}{1 - r_p'} \quad (4-31)$$

$$Q_D''(N_0) = \frac{1 - r_D'^{N_0}}{1 - r_D'} \quad (4-32)$$

$$r_p' = \frac{1+b}{1+i} \quad (4-33)$$

$$r_D' = \frac{1+c}{1+i} \quad (4-34)$$

#### 4.2 การประเมินราคาของกำลังสูญเสียกระแสอัดประจุและไดอิเล็กตริก

นอกจากกำลังสูญเสียเนื่องมาจากความต้านทานของตัวนำในสายเคเบิลแล้วยังมีกำลังสูญเสียเนื่องมาจากผลของกระแสอัดประจุและกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อการประเมินราคา [2]

กำลังสูญเสียเนื่องจากระแสอัดประจุ ( $W_{ch}$ ) คำนวณได้ดังนี้

$$W_{ch} = \frac{1}{3} \cdot I_c^2 \cdot L^3 \cdot R \quad (4-35)$$

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $W_d$ ) คำนวณได้ดังนี้

$$W_d = 2\pi f \cdot L \cdot C \cdot E_o^2 \tan \delta \quad (4-36)$$

ราคาทั้งหมดที่รวมผลของกระแสอัดประจุและกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

$$CT = CI + I_0^2 \cdot R \cdot L \cdot F(N) + \left( \frac{1}{3} \cdot I_c^2 \cdot R \cdot L^3 + W_d \right) \cdot F_3(N) \quad (4-37)$$

$$F_3(N) = \frac{N_p \cdot N_c \cdot [8760 \cdot P \cdot Q_p''(N) + D \cdot Q_D''(N)]}{1 + i} \quad (4-38)$$

#### 4.3 การเลือกขนาดของตัวนำที่เหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์

การคำนวณหาขนาดตัวนำในแง่เศรษฐศาสตร์ จะไม่พิจารณากำลังสูญเสียที่ขึ้นกับแรงดัน (กระแสอัดประจุและกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก) วิธีการคำนวณจะจัดรูปสมการที่ใช้หาราคาทั้งหมดของการประเมินอยู่ในรูปของพื้นที่หน้าตัดของตัวนำได้ดังนี้ [2]

$$CT = CI(\bar{S}) + I_0^2 \cdot R(\bar{S}) \cdot L \cdot F(N) \quad (4-39)$$

$$CI(\bar{S}) = L(A \cdot \bar{S} + G_s) \quad (4-40)$$

เมื่อ

$\bar{S}$  = ขนาดของพื้นที่หน้าตัดตัวนำ

A = ราคาที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวนำ

$G_s$  = ค่าคงที่ของราคาที่ไม่สัมพันธ์กับขนาดของตัวนำ

$$\begin{aligned} CT &= L.(A).(\bar{S}) + \frac{I_0^2.(B).[1 + \alpha_{20}(t_{av} - 20)].L.F(N)}{(\bar{S})} \\ &= \frac{L.(A).(\bar{S})^2 + I_0^2.(B).[1 + \alpha_{20}(t_{av} - 20)].L.F(N)}{(\bar{S})} \end{aligned} \quad (4-41)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการของ CT เทียบกับขนาดตัวนำให้เท่ากับศูนย์แล้วหาขนาดของตัวนำที่เหมาะสมได้ดังนี้

$$Sec = 1000 \sqrt{\frac{I_0^2.F(N).p_{20}.B[1 + \alpha_{20}(t_{av} - 20)]}{A}} \quad (4-42)$$

เมื่อ

Sec = ขนาดของตัวนำของสายเคเบิลที่เหมาะสม

B =  $(1 + Y_{cs} + Y_{cp}).(1 + \lambda)$

$p_{20}$  = ความต้านทานตัวนำที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  ( $\Omega.M$ )

$\alpha_{20}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$

$t_{av}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### การเขียนโปรแกรมคำนวณและการใช้งานโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมในวิชานีพจน์จะใช้โปรแกรมของ วิชาลเบสิก เวอร์ชัน 6 (Visual Basic ) ช่วยในการเขียนโปรแกรม ซึ่งจะนำเอาทฤษฎีต่างๆ มาเขียนเป็นโปรแกรมมีดังนี้

#### 5.1 การเขียนโปรแกรมคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน

การเขียนโปรแกรมจะนำเอาวิธีการคิดที่ผสมระหว่างการคำนวณหาค่ากระแสในสายเคเบิล จากสมการทางความร้อนกับสมการทางไฟฟ้าโดยมีขั้นตอนการเขียนโปรแกรม แบ่งเป็นขั้นตอนการทำงานที่สำคัญเป็น 6 ส่วนตามรูปที่ 5-1 ดังนี้

##### ส่วนที่ 1

โปรแกรมจะใช้ทำหน้าที่รับข้อมูลทั้งหมดเพื่อใช้ในการประมวลผล เช่น ชนิดของสายเคเบิล ขนาดมิติต่างๆของสายเคเบิลลักษณะการติดตั้ง เป็นต้น

##### ส่วนที่ 2

คำนวณค่าพิกัดของกระแสในสายเคเบิลโดยใช้วิธีทางทฤษฎีทางความร้อนมาคำนวณซึ่งมีขั้นตอนตามรูปที่ 5-2 ถึง 5-7 โดยมีส่วนที่ต้องคำนวณดังนี้

-คำนวณหาค่าความต้านทานของตัวนำและฉนวนของสายเคเบิลในแต่ละวงจรทั้งหมดตามขั้นตอนในรูปที่ 5-2

-คำนวณหาค่าความต้านทานของซิลต์โลหะและเปลือกของสายเคเบิลในแต่ละวงจรทั้งหมดตามขั้นตอนในรูปที่ 5-3

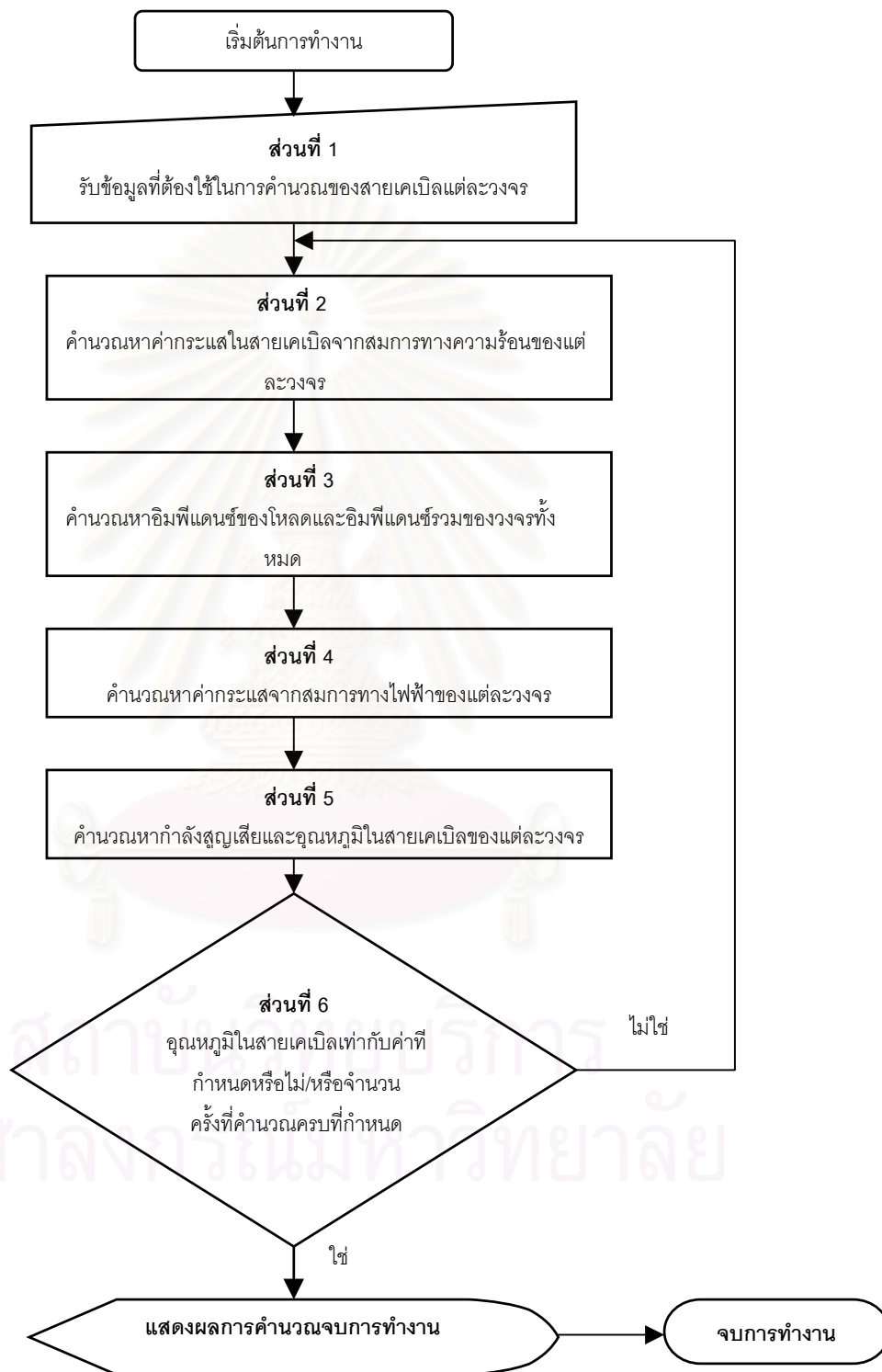
-คำนวณหาค่าความต้านทานระหว่างสายเคเบิลและท่อร้อยสายและความต้านทานของท่อร้อยสายแต่ละวงจรทั้งหมด ตามขั้นตอนในรูปที่ 5-4

-คำนวณหาค่าความต้านทานเนื่องจากผลของตัวประกอบไหล, ความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากผลความลึกในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน ,ความต้านทานทางความร้อน และการปรับแก้ของความต้านทานดิน ตามขั้นตอนในรูปที่ 5-5

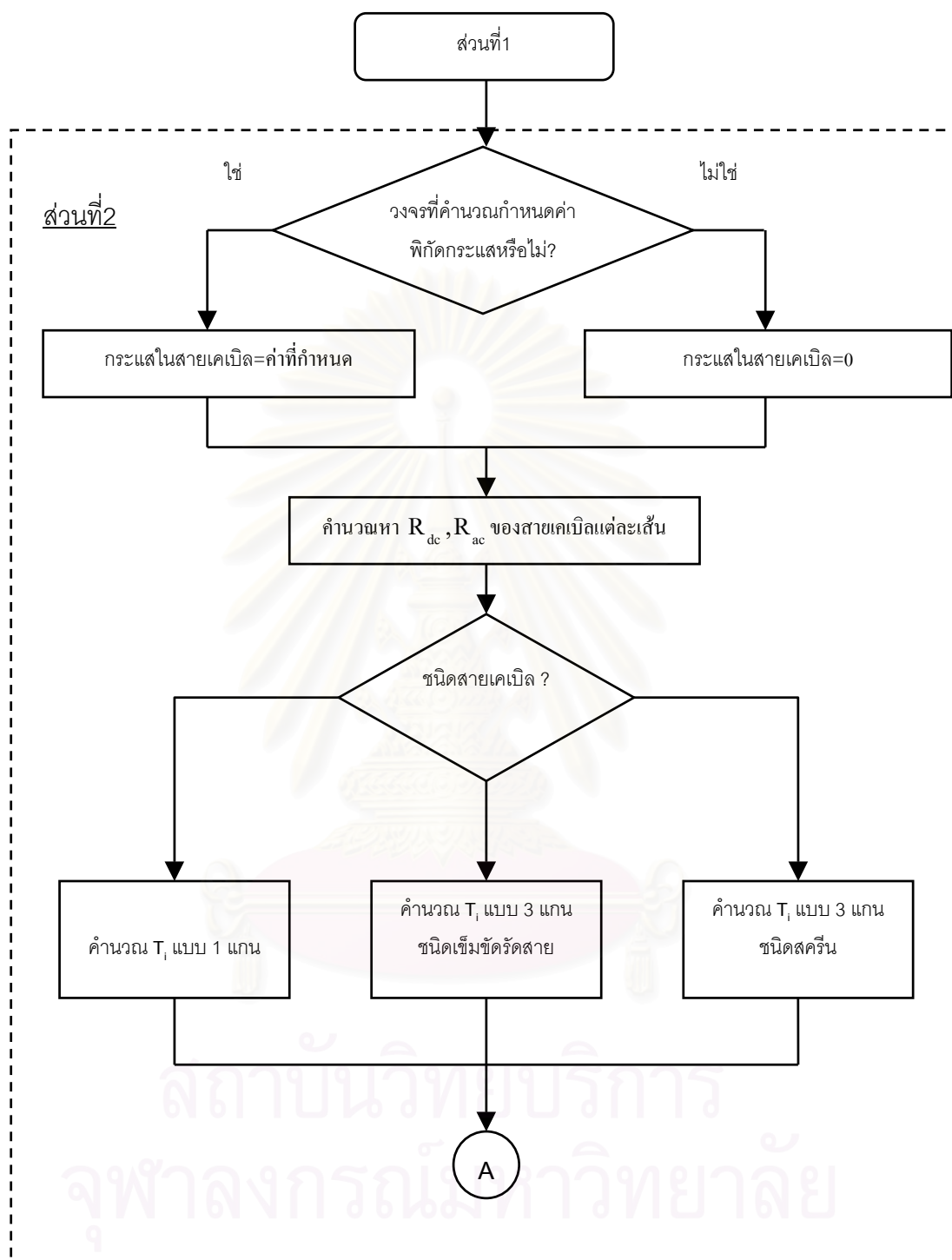
-คำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อนเนื่องจากความร้อนของสายเคเบิลใกล้เคียงและอัตราการสูญเสียในซิลต์โลหะต่อกำลังสูญเสียในตัวนำของสายเคเบิลตามขั้นตอนใน รูปที่

5-6

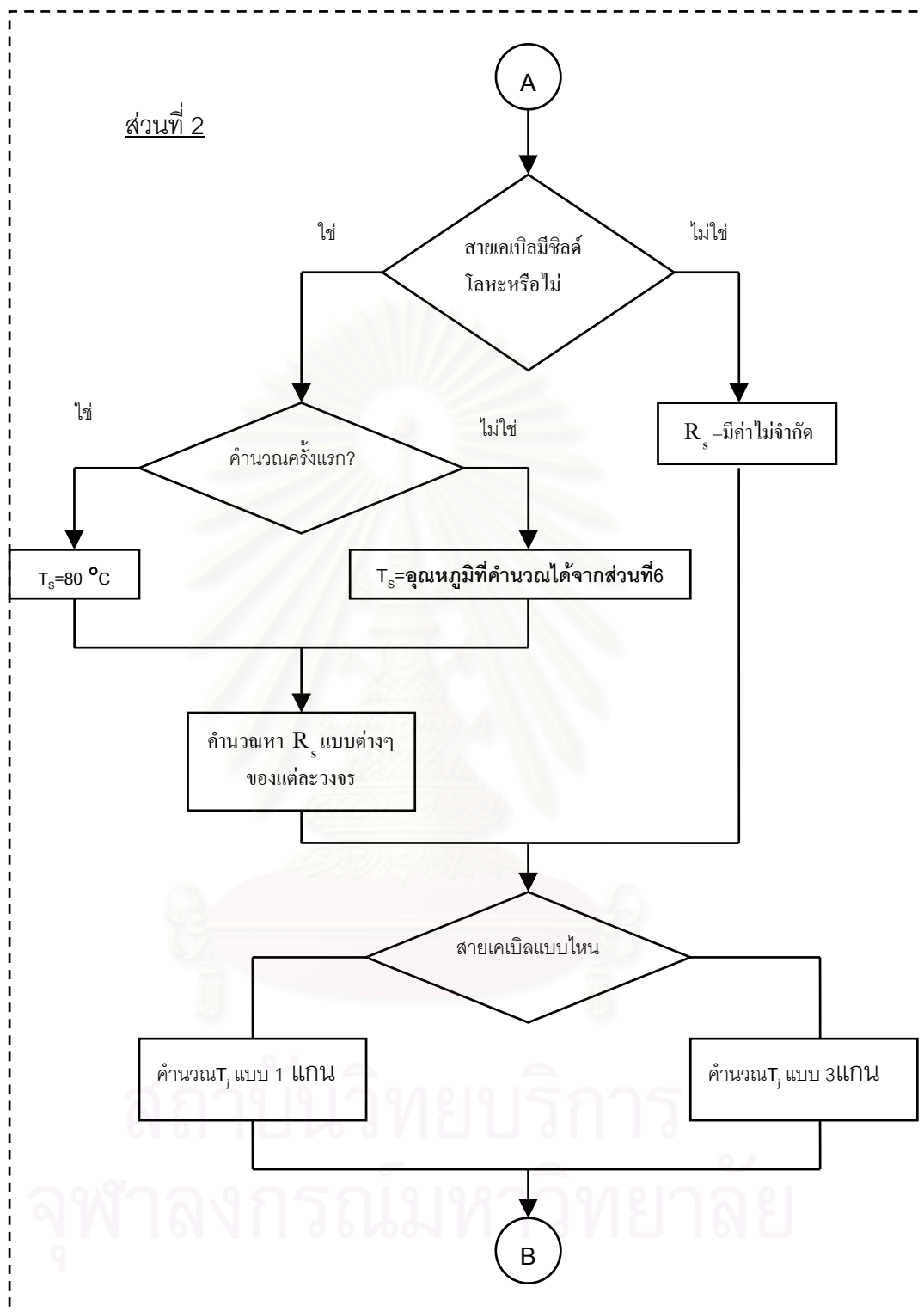
-คำนวณหาค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกในฉนวนสายเคเบิล และค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลตามขั้นตอนในรูปที่ 5-7



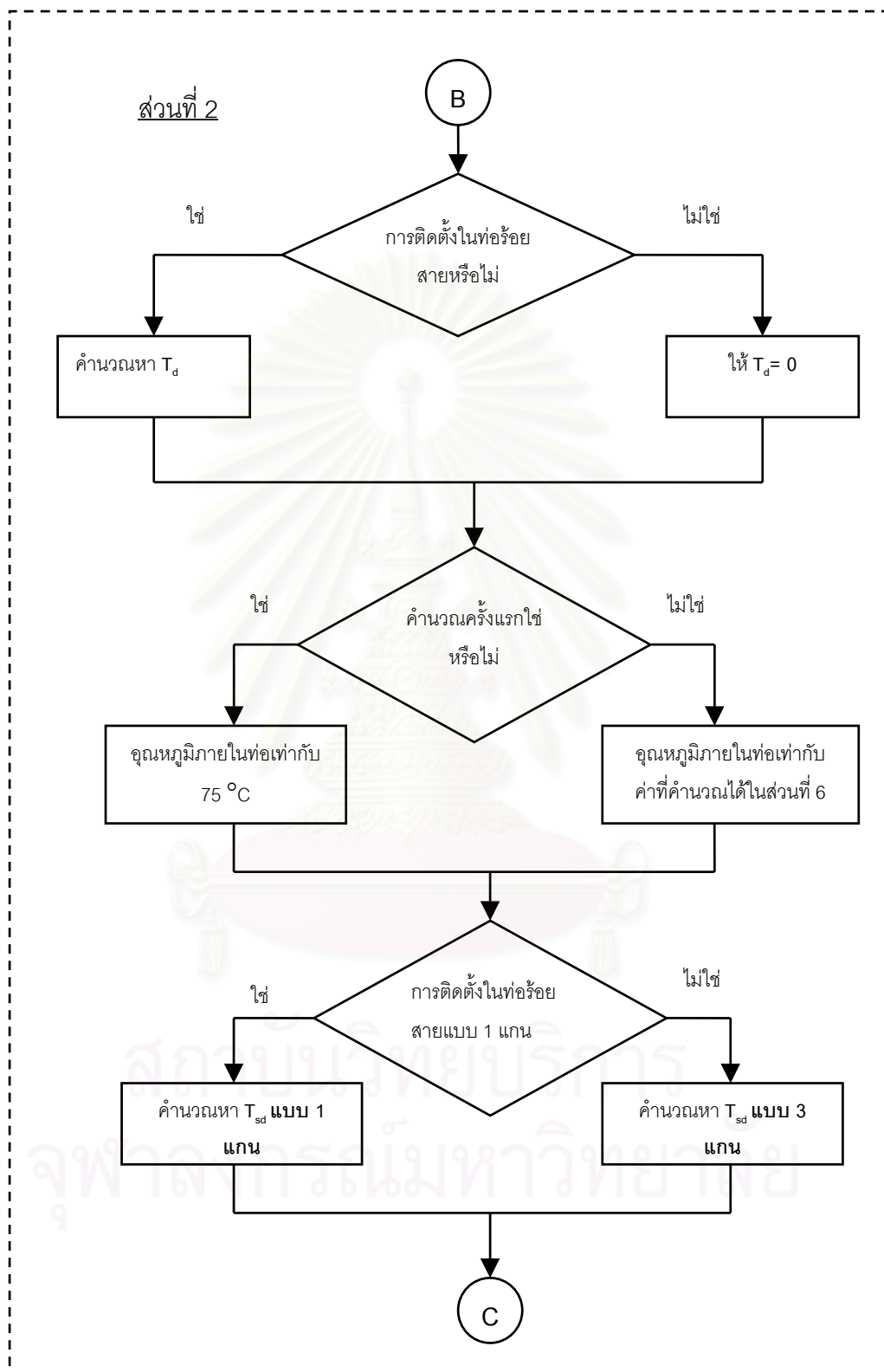
รูปที่ 5-1 ขั้นตอนการทำงานหลักของโปรแกรม



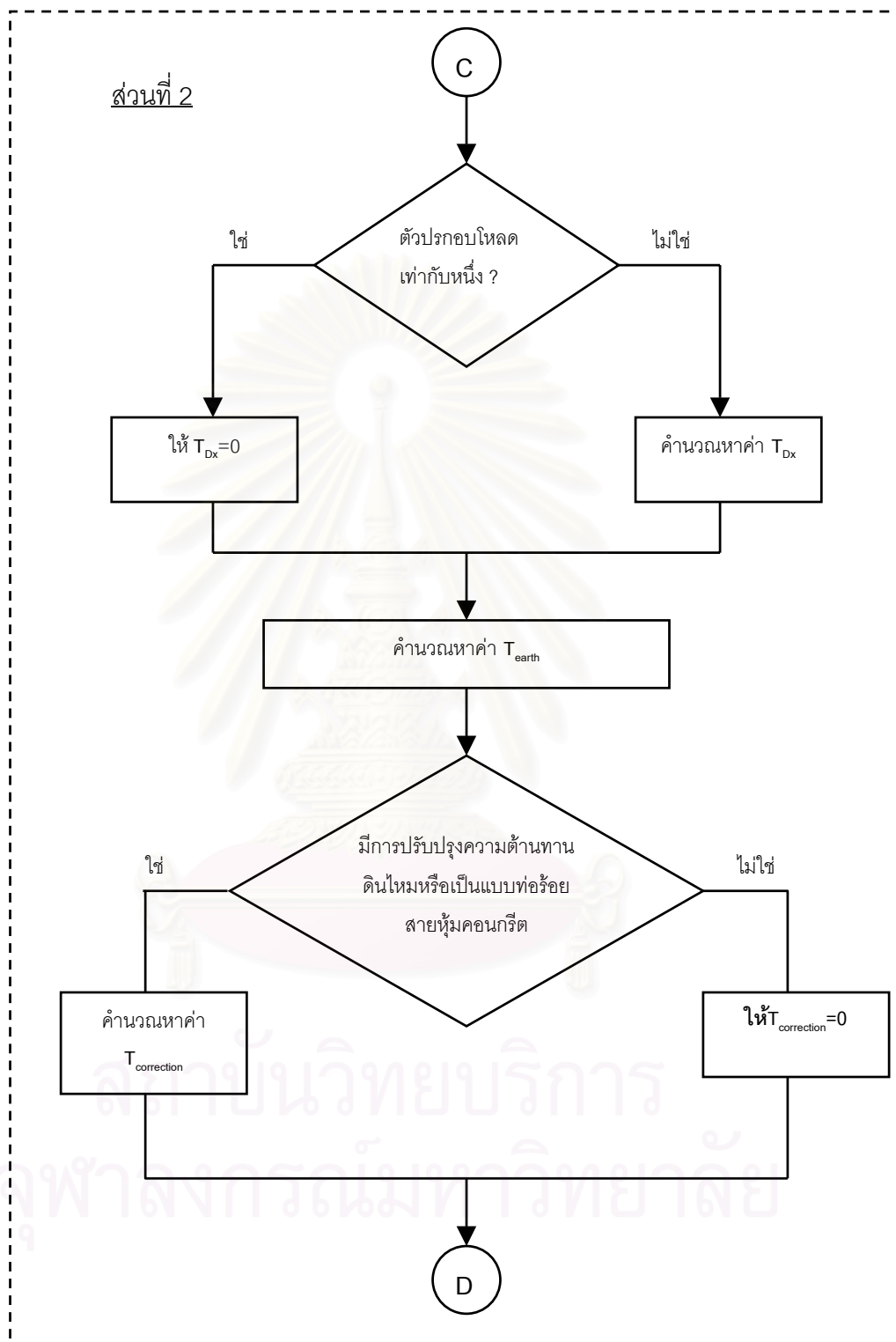
รูปที่ 5-2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 1



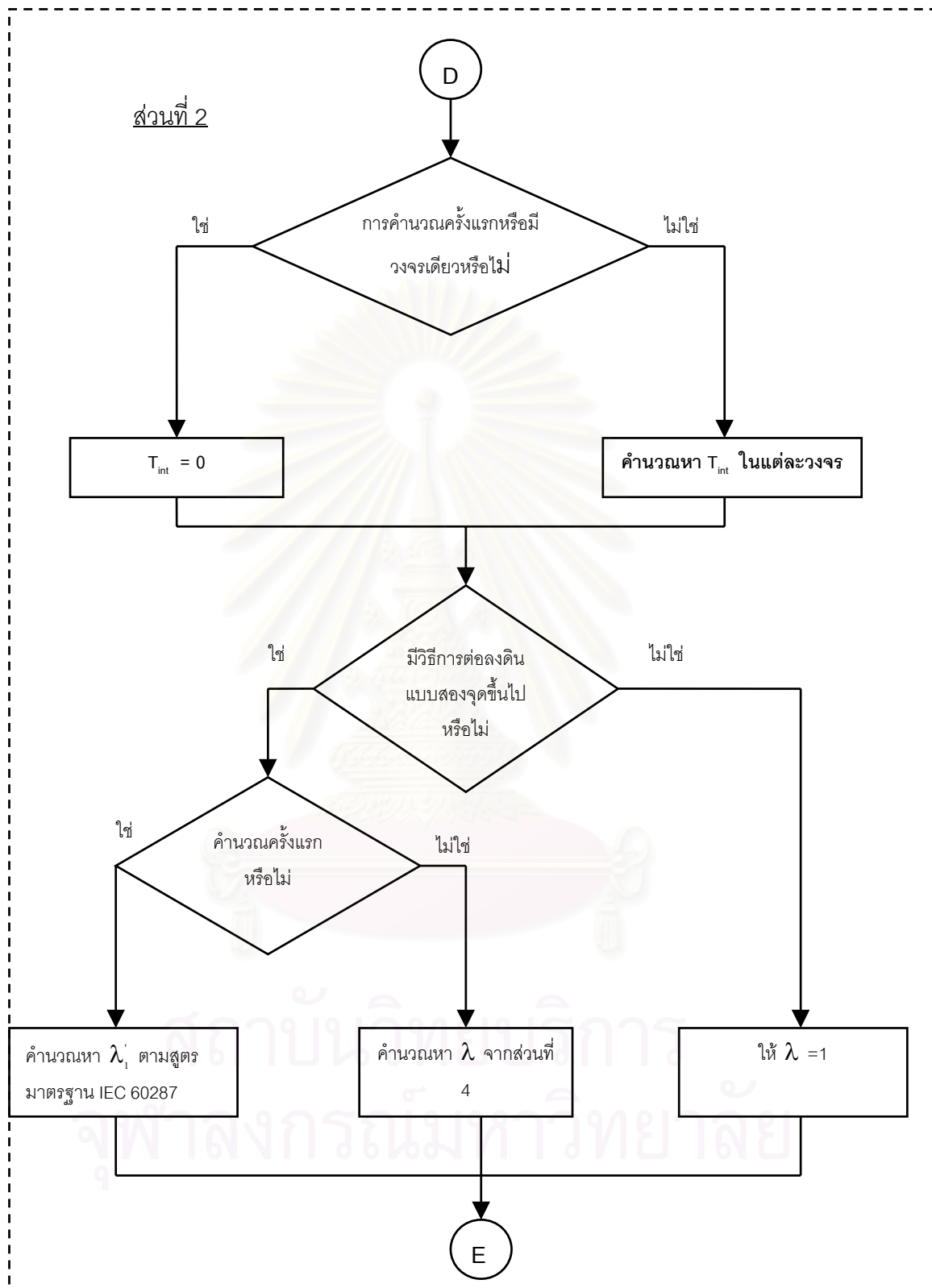
รูปที่ 5-3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 2



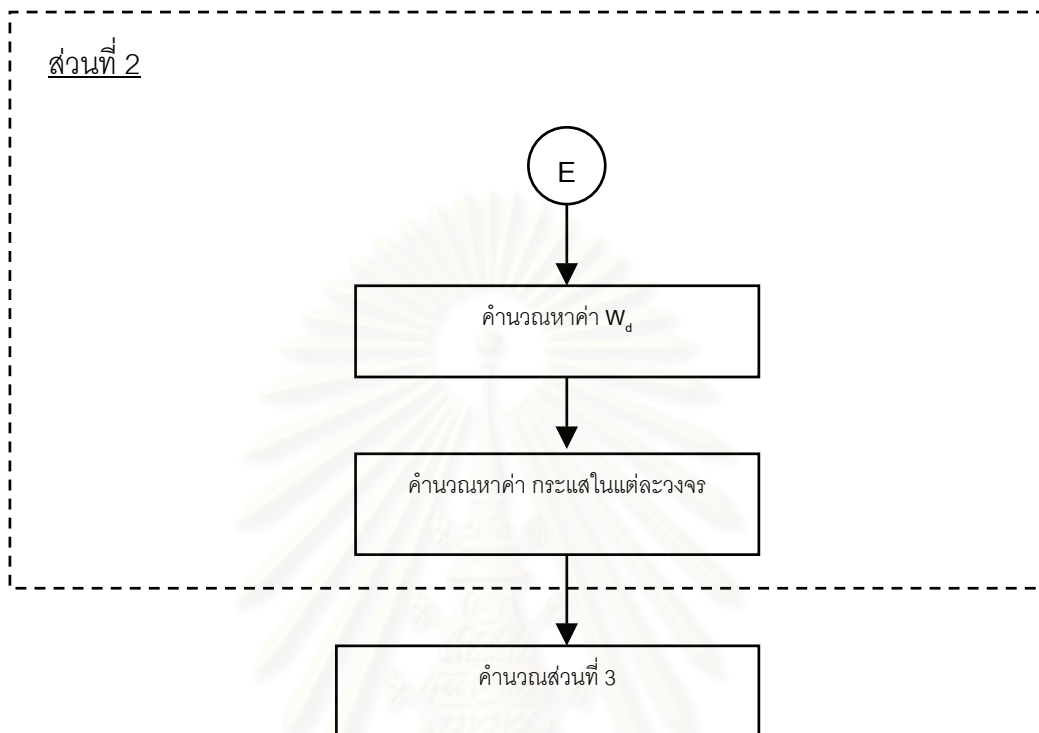
รูปที่ 5-4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 3



รูปที่ 5-5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 4



รูปที่ 5-6 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 5



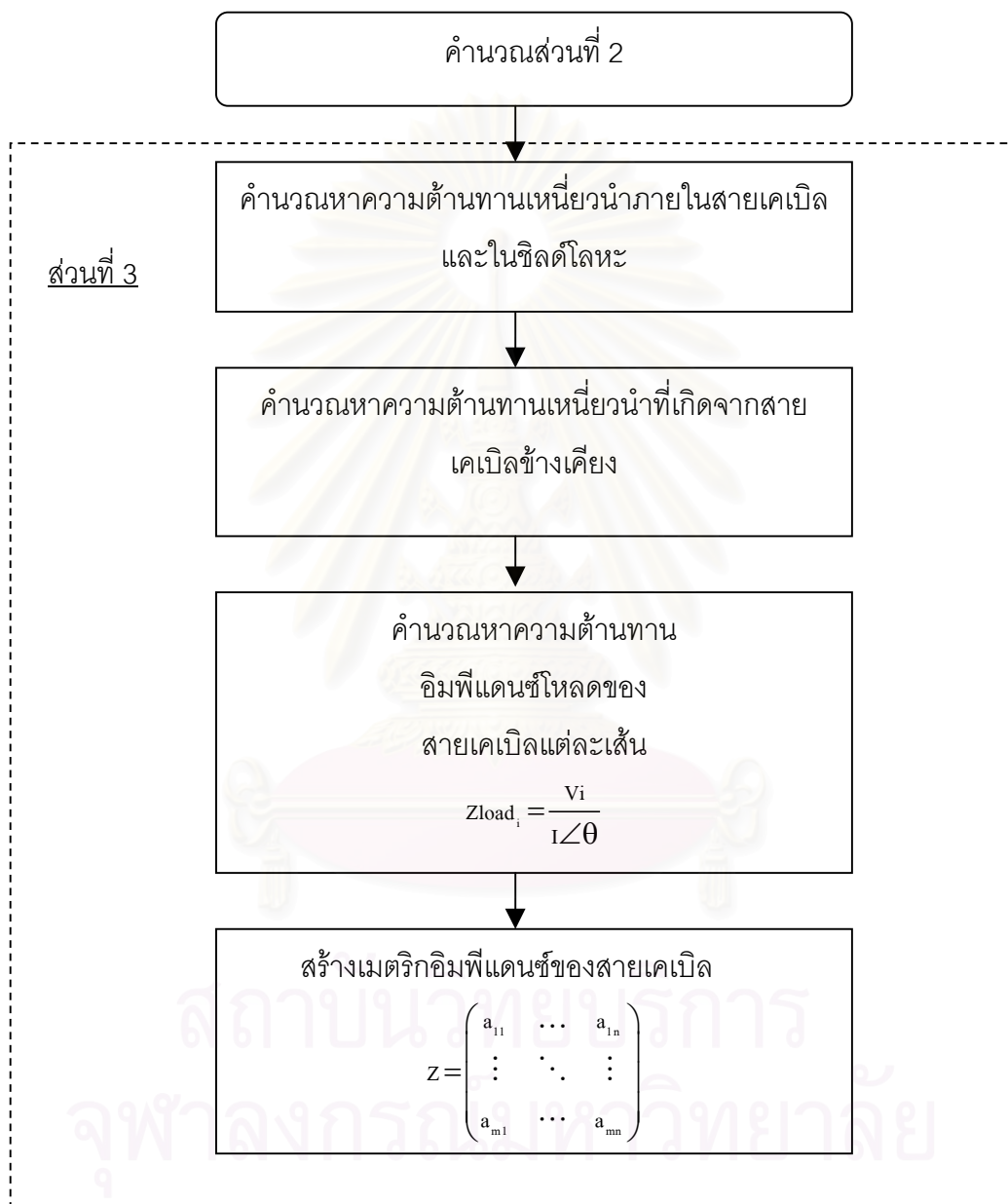
รูปที่ 5-7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 2 ตอนที่ 6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### ส่วนที่ 3

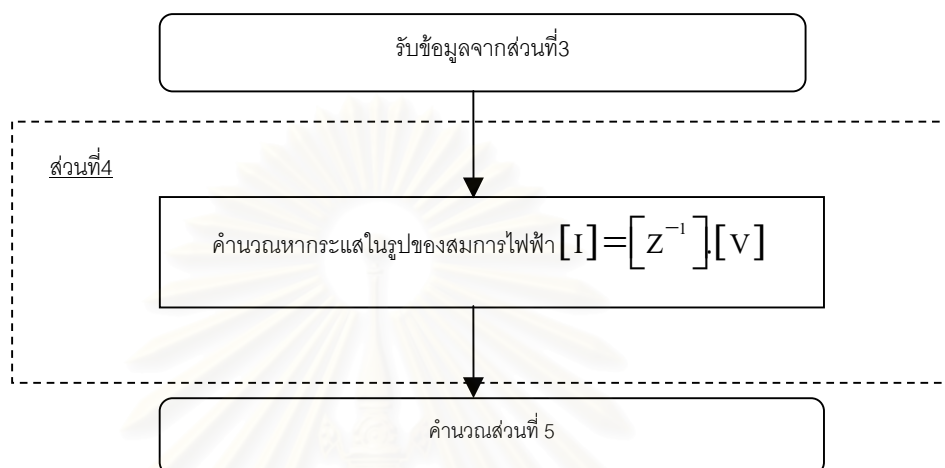
คำนวณหาความต้านทานอิมพีแดนซ์ในสายเคเบิลและความต้านทานอิมพีแดนซ์โหลดตามรูปที่ 5-8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 3



รูปที่ 5-8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 3

#### ส่วนที่ 4

ส่วนที่ 4 จะแก้สมการเพื่อหาค่ากระแสของสายเคเบิลและในซิลด์โลหะ



รูปที่ 5-9 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 4

#### ส่วนที่ 5

คำนวณย้อนกลับเพื่อดูว่ากระแสที่คำนวณได้นี้จะทำให้ได้อุณหภูมิตัวนำที่อยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ตามรูปที่ 5-10 ซึ่งการคำนวณย้อนกลับของสายเคเบิลชนิดหนึ่งแกนมีซิลด์โลหะมีสมการดังนี้

$$W_c = I^2 \times R_{ac} \quad (5-1)$$

$$W_k = W_c \times qs \times lf + W_d \quad (5-2)$$

$$\Delta t_{\text{shiled\_insulation}} = T_i \times W_c + \frac{T_i}{2} \times W_d \quad (5-3)$$

$$\Delta t_j = W_c \times (T_i + qs \times T_j) + W_d \times \left( \frac{T_i}{2} + T_j \right) \quad (5-4)$$

$$\Delta t_d = W_c \times (T_i + qs \times T_j + T_{sd} + T_d) + W_d \times \left( \frac{T_i}{2} + T_j + T_{sd} + T_d \right) \quad (5-5)$$

คำนวณหาอุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิล

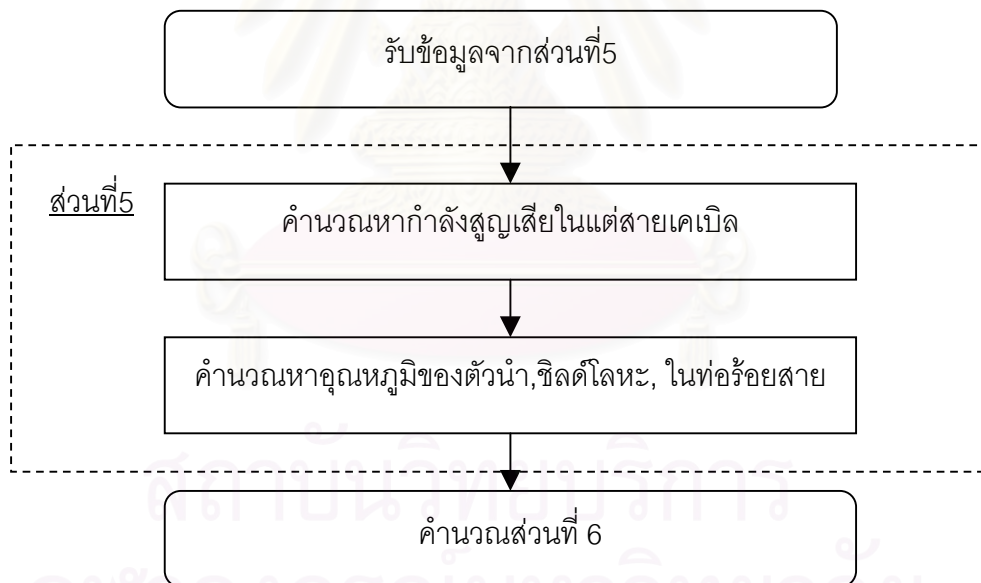
$$t_c = W_c \times (T_i + q_s \times T_j + T_{sd} + T_d + T_{dx} + T_{earth} + T_{correction} + T_{int}) + W_d \times \left( \frac{T_i}{2} + T_j + T_{sd} + T_d + T_{earth} + T_{correction} + T_{int} \right) + t_a \quad (5-6)$$

คำนวณหาอุณหภูมิของซิลต์โลหะ

$$t_s = t_c - \Delta t_{shiled\_insulation} \quad (5-7)$$

คำนวณหาอุณหภูมิภายในท่อร้อยสาย

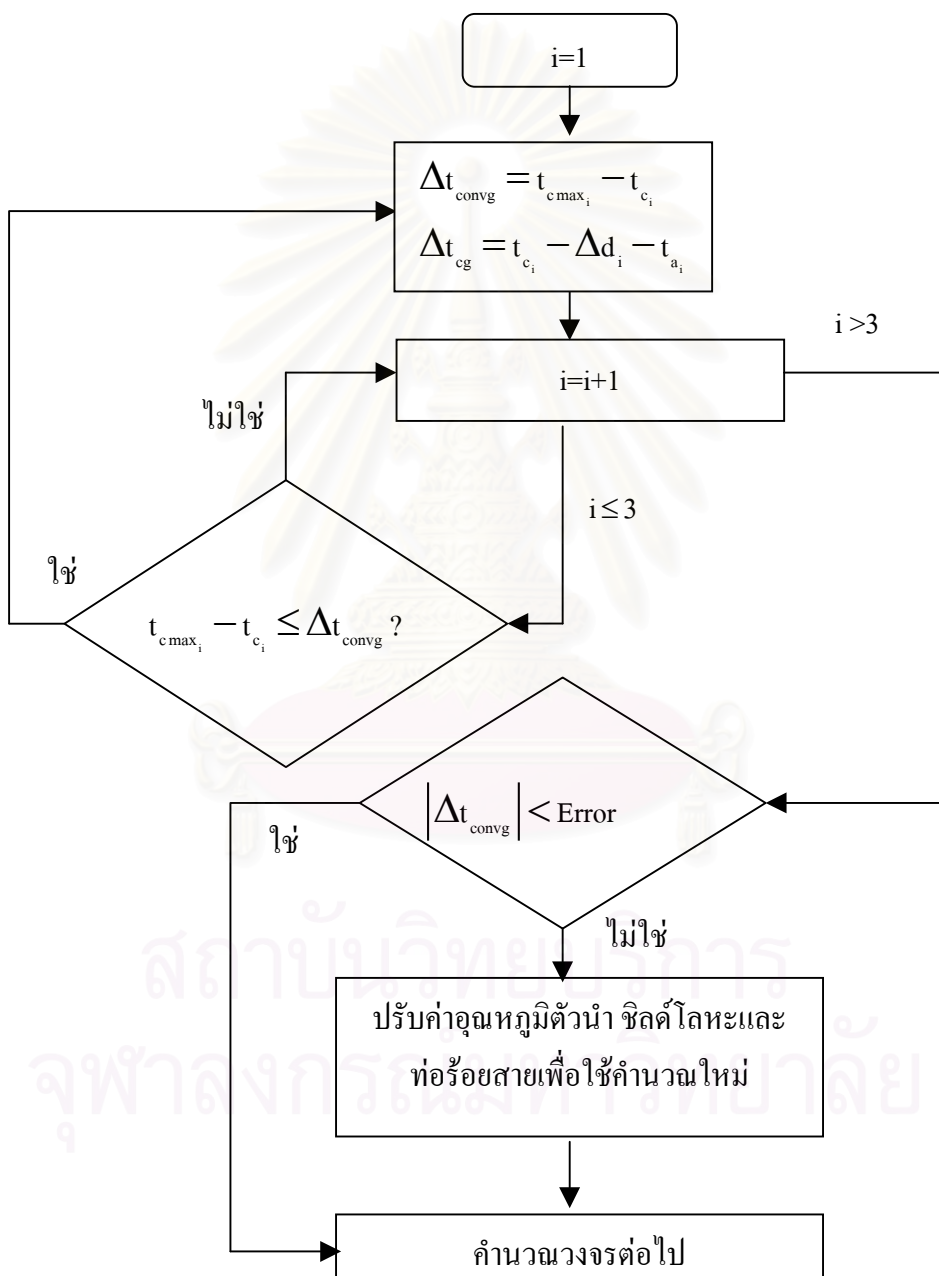
$$t_{innerduct} = \left[ \frac{(t_c - \Delta t_j) + (t_s - \Delta t_d)}{2} \right] \quad (5-8)$$



รูปที่ 5-10 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 5

### ส่วนที่ 6

จะพิจารณาอุณหภูมิที่คำนวณได้จากส่วนที่ 5 ว่าอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ โดยจะมีการปรับค่าอุณหภูมิของตัวนำเพื่อนำกลับไปคำนวณใหม่จนกระทั่งจะมีการคำนวณย้อนกลับจนได้อุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือครบกำหนดจำนวนการคำนวณวนซ้ำที่กำหนด



รูปที่ 5-11 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนที่ 6

การปรับค่าอุณหภูมิตามรูปที่ 5-11 ดังนี้

$$t_{c_i(\text{new})} = t_{c_i(\text{old})} + \Delta t_{\text{convg}} \times \left( \frac{\Delta t_{c_i(\text{old})}}{\Delta t_{c_g}} \right) \quad (5-9)$$

$$\Delta t_{c_i(\text{old})} = t_{c_i} - \Delta d_i - t_{a_i} \quad (5-10)$$

$$t_{s(\text{new})_i} = t_{c(\text{new})_i} - T_i \times W_c + \frac{T_i}{2} \times W_d \quad (5-11)$$

เมื่อ

$t_{c_i(\text{new})}$  = อุณหภูมิของตัวนำที่ปรับค่าใหม่

$t_{s(\text{new})_i}$  = อุณหภูมิของซิลต์โลหะที่ปรับค่าใหม่

#### ความสามารถของโปรแกรม

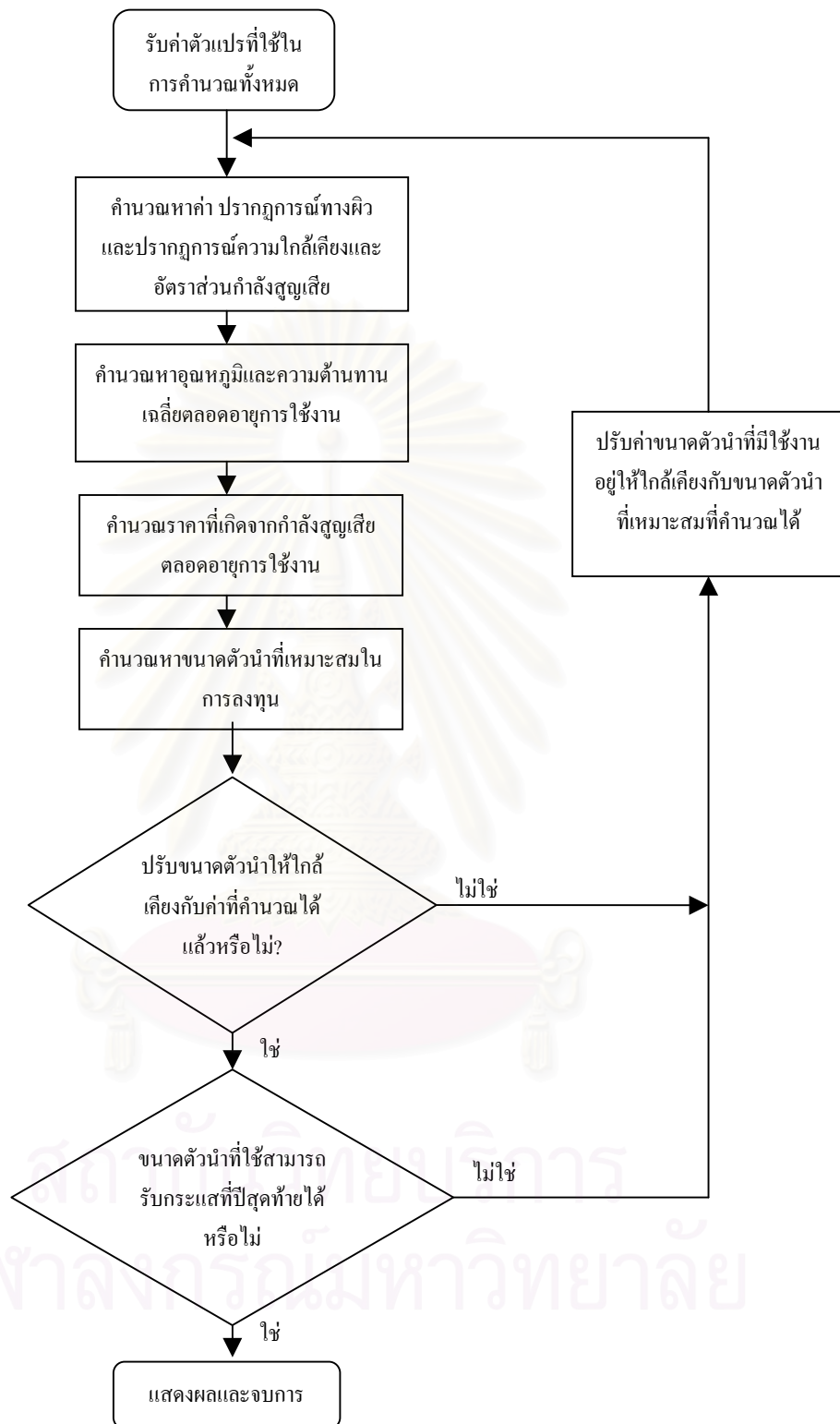
- สามารถคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลจนจนกระทั่งสำหรับชนิด หนึ่งแกนและสามแกนได้
- สามารถคำนวณได้หลายรูปแบบการติดตั้งใน ท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีต
- มีการคำนวณอุณหภูมีย้อนกลับเพื่อตรวจสอบและทำให้อุณหภูมิตัวนำอยู่ในค่าที่กำหนด
- สามารถคำนวณสายเคเบิลที่มีโครงสร้างต่างกันได้ในคราวเดียวกันเมื่อเทียบกับโปรแกรมของ EPRI ที่สายเคเบิลต้องมีโครงสร้างเดียวเท่านั้นถึงจะคำนวณได้
- ไม่จำกัดวงจรในการคำนวณ
- สามารถหาอุณหภูมิภายในส่วนต่างๆได้เช่น ภายในท่อร้อยสาย ซิลต์โลหะ, จนวน, อุณหภูมิที่มาจากสายเคเบิลอื่นที่ใกล้เคียง เป็นต้น
- ในกรณีที่มีการติดตั้งสายเคเบิลหลายวงจรและชนิดสายเคเบิลต่างกันสามารถคำนวณหาพิกัดกระแสของแต่ละวงจร โดยทุกวงจรสามารถรับกระแสได้สูงสุดภายในอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดได้เอง
- ในการคำนวณจะพิจารณาถึงผลของ ความต้านทานเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากวงจรใกล้เคียง มาคำนวณด้วยทำให้สามารถเพิ่มพิกัดกระแสจากจัดรูปแบบการวางของสายเคเบิลได้

## 5.2 การเขียนโปรแกรมการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

โปรแกรมนี้จะใช้ทฤษฎีในบทที่ 4 มาเขียนโปรแกรมซึ่งมีโครงสร้างการเขียนโปรแกรมแสดงไว้ดังรูปที่ 5-12

### ความสามารถของโปรแกรม

- คำนวณหาราคาต้นทุนในการติดตั้งตลอดอายุการใช้งานของสาย โดยคิดทั้งอัตราการเพิ่มขึ้นของโหลด อัตราค่าพลังงาน และพฤติกรรมการใช้โหลด
- คำนวณค่ากำลังสูญเสียต่างๆเช่นกำลังสูญเสียในตัวนำกำลังสูญเสียกระแสอัดประจุและไดอิเล็กตริก
- คำนวณหาขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งที่ให้ราคาในการลงทุนต่ำและเหมาะสม ตลอดอายุ
- แสดงการเปรียบเทียบราคาในการลงทุนในรูปแบบต่างๆเพื่อช่วยในการตัดสินใจ

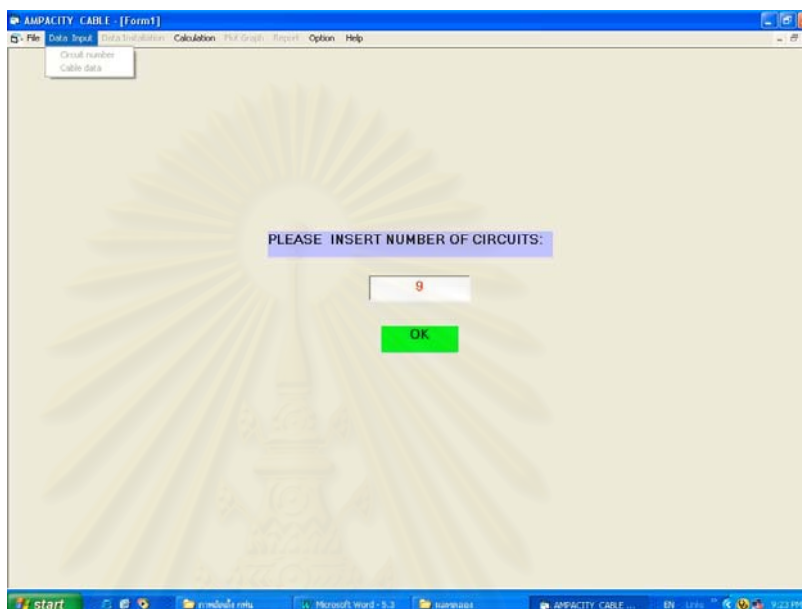


รูปที่ 5-12 โครงสร้างโปรแกรมการประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

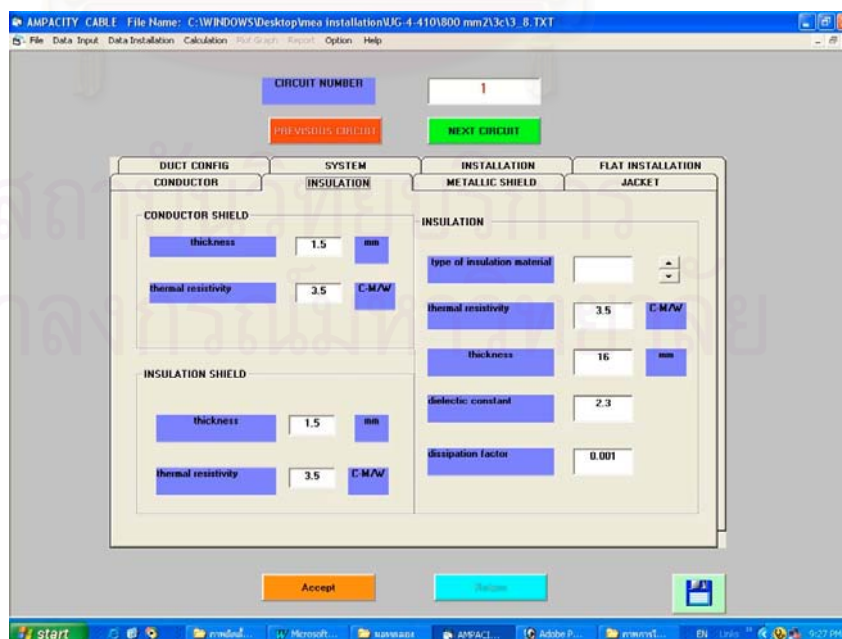
### 5.3 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม

#### 5.3.1 การใช้งานโปรแกรมคำนวณพิกัดกระแสในสายเคเบิลใต้ดิน

-เปิดโปรแกรมและใส่จำนวนวงจรที่ต้องการคำนวณ



- ใส่ค่าตัวแปรต่างๆของแต่ละวงจรที่ใช้ในการคำนวณ ป้อนคุณสมบัติของฉนวน





- ป้อนคุณสมบัติของซิลด์โลหะ

The screenshot shows the AMPACITY CABLE software interface. The main window title is "AMPACITY CABLE File Name: C:\WINDOWS\Desktop\mca installation\UG-4-410\800 mm\13c\13\_8.TXT". The menu bar includes "File", "Data Input", "Data Installation", "Calculation", "Plot Graph", "Report", "Option", and "Help".

At the top, there are buttons for "CIRCUIT NUMBER" (set to 1), "PREVIOUS CIRCUIT", and "NEXT CIRCUIT". Below these are four tabs: "DUCT CONFIG", "SYSTEM", "INSTALLATION", and "FLAT INSTALLATION". The "INSTALLATION" tab is active, and within it, the "METALLIC SHIELD" sub-tab is selected.

The configuration panel includes:

- BONDING MODE:** Radio buttons for "multipoint", "single point", and "cross bonded". Below are "Section Bond 1", "Section Bond 2", and "Section Bond 3", each with a dropdown menu set to "1".
- MATERIAL:** Radio buttons for "none shield", "solid copper", "copper wire", and "copper tape".
- SHIELD WIRE:** Input fields for "diameter of over shield" (74.000 mm), "diameter of wire" (0.000 mm), "resistance at 20 C" (146.550 micro ohm/m), "number wire" (0), and "tape thickness" (mm). A "ratio of lay length" field is set to 0.0.

At the bottom of the panel are "Accept" and "Cancel" buttons, and a save icon.

-ป้อนคุณสมบัติของท่อร้อยสาย

The screenshot shows the AMPACITY CABLE software interface. The main window title is "AMPACITY CABLE File Name: C:\WINDOWS\Desktop\mca installation\UG-4-410\800 mm\13c\13\_8.TXT". The menu bar includes "File", "Data Input", "Data Installation", "Calculation", "Plot Graph", "Report", "Option", and "Help".

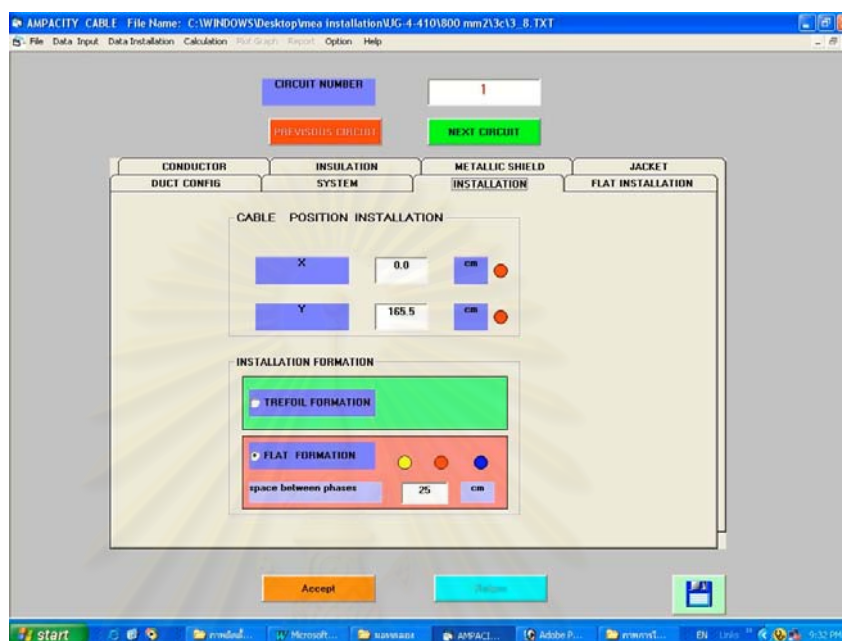
At the top, there are buttons for "CIRCUIT NUMBER" (set to 1), "PREVIOUS CIRCUIT", and "NEXT CIRCUIT". Below these are four tabs: "DUCT CONFIG", "SYSTEM", "INSTALLATION", and "FLAT INSTALLATION". The "DUCT CONFIG" tab is active.

The configuration panel includes:

- DUCT PROPERTIES:** A dropdown menu for "type of duct" set to "FIBRE". Input fields for "thermal resistivity" (4.0 C/M/W), "outer diameter" (140.000 mm), and "inner diameter" (123.000 mm).
- DUCT CONFIGURATION:** A dropdown menu set to "Fiber Duct in Concrete".

At the bottom of the panel are "Accept" and "Cancel" buttons, and a save icon.

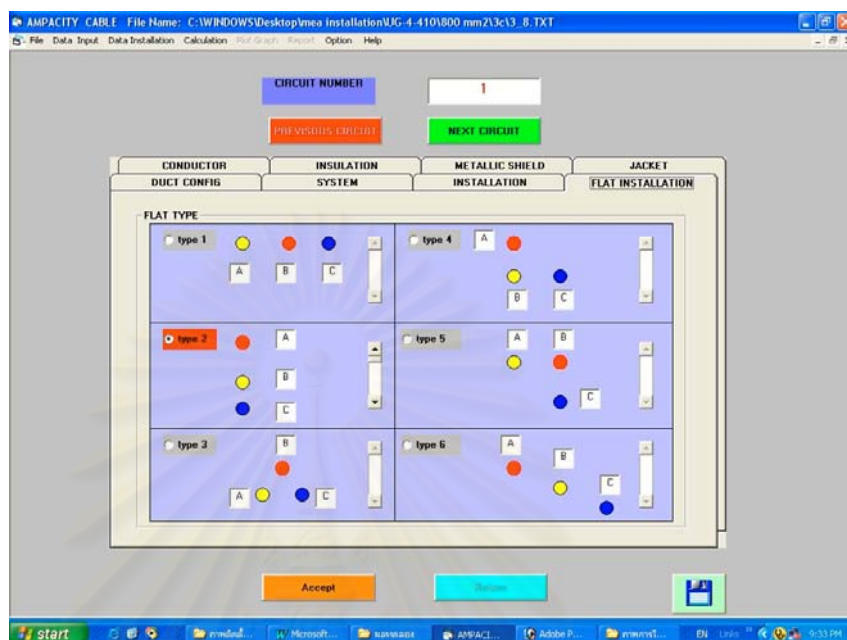
ป้อนค่าแรงดัน ตัวประกอบโพลด ตัวประกอบกำลัง และค่ากระแสในวงจร(ถ้ากำหนด)



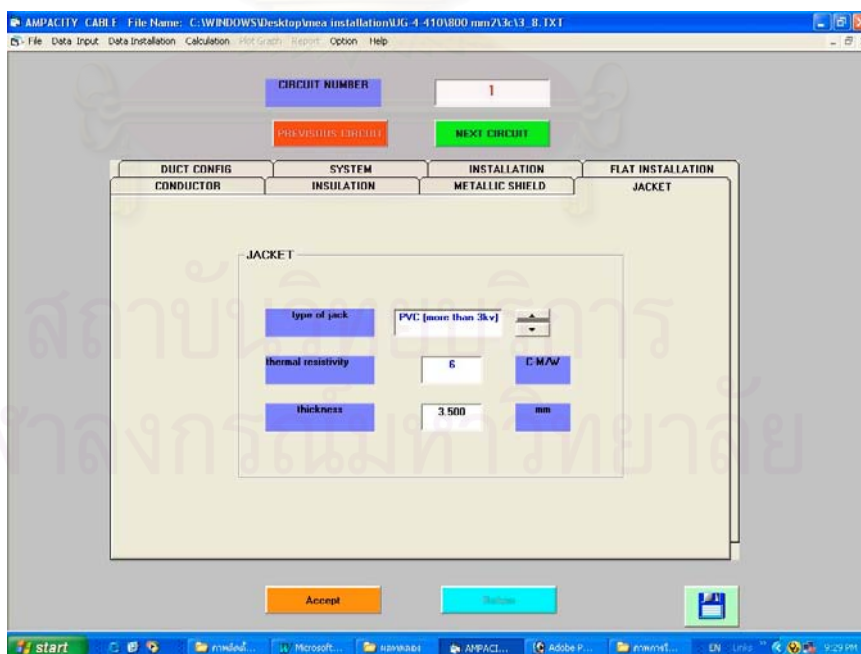
- ป้อนตำแหน่งในการจัดวางสายเคเบิลและรูปแบบการจัดวาง



- เลือกตำแหน่งในการจัดวางลำดับเฟสของแต่ละวงจร



- ป้อนคุณสมบัติของเปลือกสายเคเบิล



- ป้อนคุณสมบัติของท่อร้อยและอุณหภูมิของดิน

The screenshot shows the AMPACITY software interface with the following input fields:

TRENCH DIMENSION		SOIL / BACK FILL	
<b>SOIL</b>			
AMBIENT TEMPERATURE	30	C	
THERMAL RESISTANCE	1	C/M/W	
<b>BACKFILL DUCTBANK</b>			
HEIGHT	150.0	CM	
THERMAL RESISTANCE	1	C/M/W	

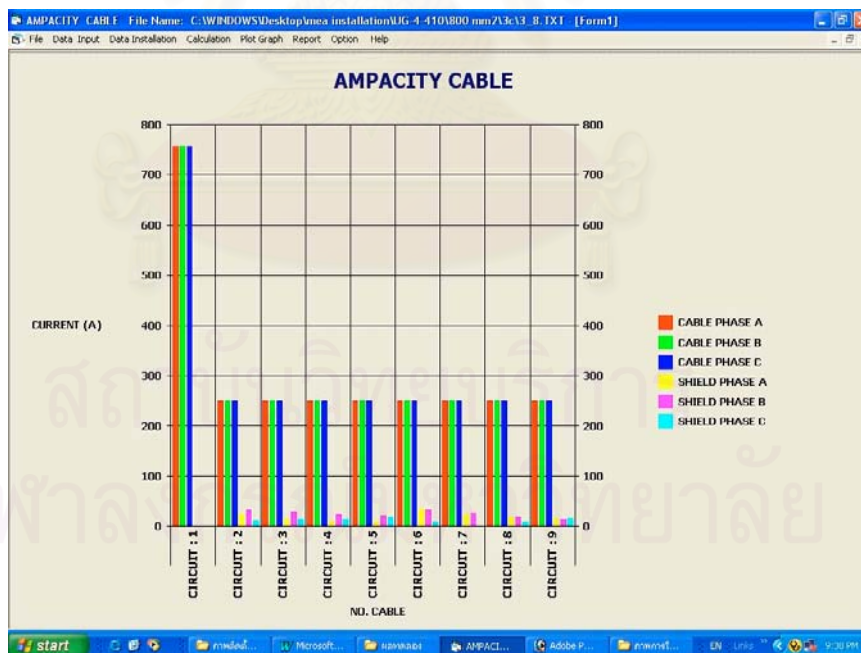
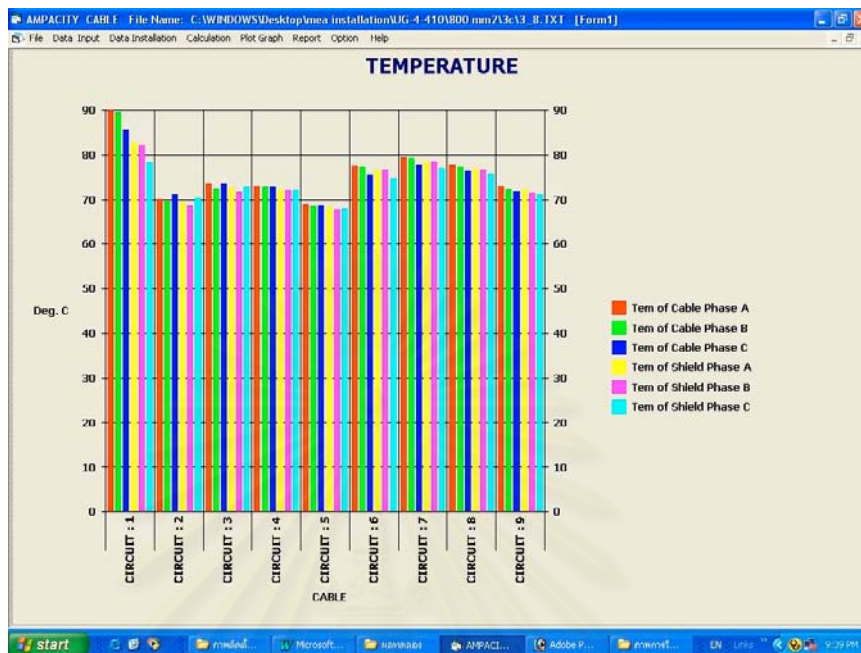
Buttons: ACCEPT, CALCULATE, SHOW PICTURE

-คลิกที่คำสั่ง calculation และคลิกเพื่อทำการคำนวณพร้อมแสดงผลการคำนวณและรายงานผลการคำนวณ

The screenshot shows the AMPACITY software interface displaying calculation results for circuit number 1. The results are organized into three main sections: Conductor Resistance, Loss Factor, and Losses.

Conductor Resistance	Loss Factor			Losses
	Temperature	AMPACITY		
Current				
	phase A	phase B	phase C	
Current of Conductor	757	757	757	A
Current of Shield/Sheath	0	0	0	A

Buttons: BACK, NEXT



Calculation Report

File Edit View Print

---

**CALCULATION REPORT**

---

1) INPUT DATA (Technical Data)

---

1.1) OPERATING CONDITIONS

---

Total Circuit Number:  
: 9

System Volt. Line-to-Line(kV):  
[1]: 115 [2]: 24 [3]: 24 [4]: 24 [5]: 24 [6]: 24 [7]: 24 [8]: 24 [9]: 24

Power Frequency (Hz):  
[1]: 50 [2]: 50 [3]: 50 [4]: 50 [5]: 50 [6]: 50 [7]: 50 [8]: 50 [9]: 50

Load Factor :  
[1]: 1.0 [2]: 1.0 [3]: 1.0 [4]: 1.0 [5]: 1.0 [6]: 1.0 [7]: 1.0 [8]: 1.0 [9]: 1.0

Power Factor :  
[1]: 1.0 [2]: 1.0 [3]: 1.0 [4]: 1.0 [5]: 1.0 [6]: 1.0 [7]: 1.0 [8]: 1.0 [9]: 1.0

Soil Ambient Temperature(Deg C) :  
: 30

Max. Conductor Temp.(Deg C) :  
[1]: 90 [2]: 90 [3]: 90 [4]: 90 [5]: 90 [6]: 90 [7]: 90 [8]: 90 [9]: 90


Emergency Operation(Deg C) :  
--

---

1.2 )CABLE PARAMETERS

---

Conductor



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.2 วิธีการใช้งานโปรแกรมคำนวณเพื่อเลือกขนาดสายเคเบิลใต้ดินที่เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุใช้งานมีขั้นตอนสำคัญดังนี้

- ป้อนจำนวนช่วงที่แยกต่อโหลดและราคาอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้าง

The screenshot shows the 'Economic Data' input screen. At the top, 'NUMBER OF SECTION' is set to 3. Below it are buttons for 'PREVIOUS SECTION' and 'NEXT SECTION'. A table lists materials with columns for NO, DESCRIPTION OF MATERIAL COST, Price\$/kWh/line, Quantity, and Price Total.

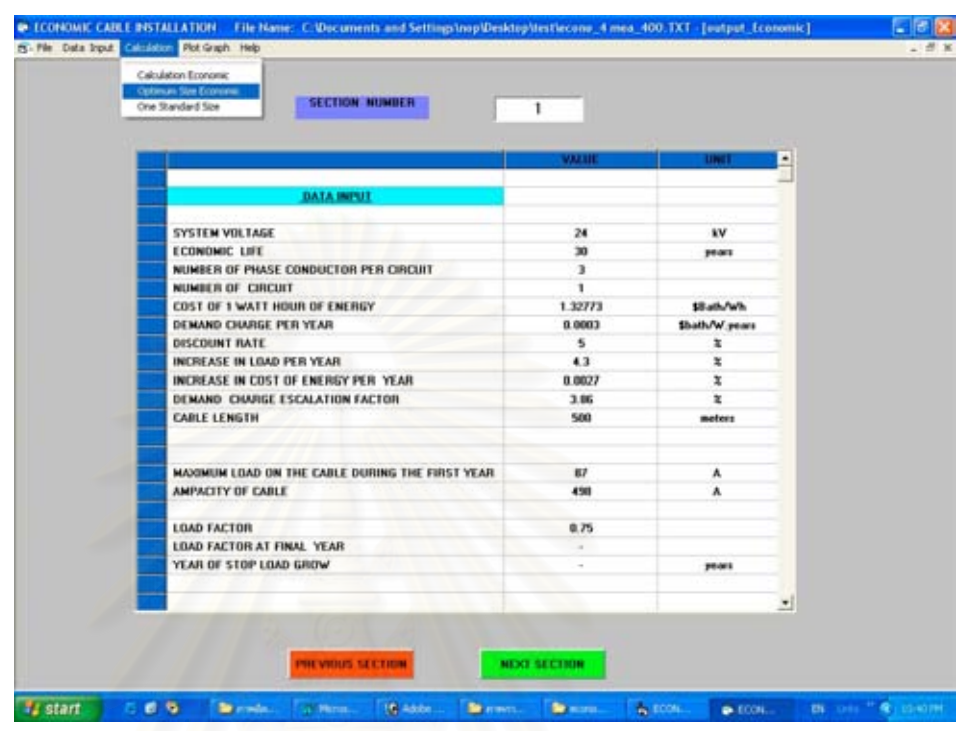
NO	DESCRIPTION OF MATERIAL COST	Price\$/kWh/line	Quantity	Price Total
1	TERMINATOR	10000	12	120000
2	SUPPORT	50	1000	50000
3				0
4				0
5				0
6				0

Total Price: 170000

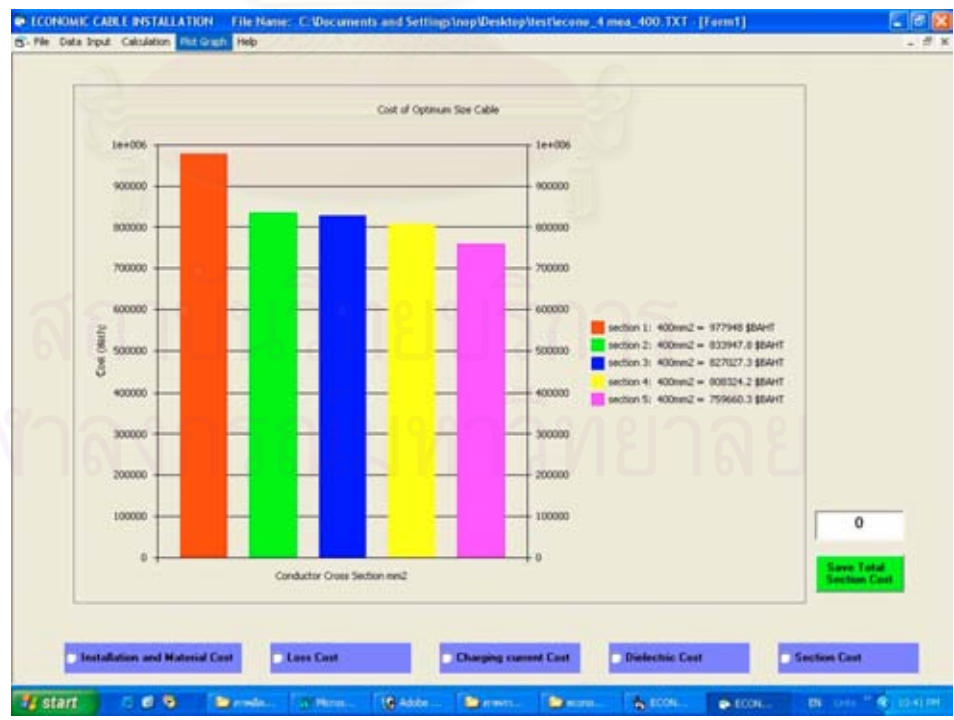
- ป้อนค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณต่างๆลงในโปรแกรม

The screenshot shows the 'Economic Data' input screen with conductor and resistivity parameters. The 'Conductor' section includes options for aluminum or copper, conductor size (300 mm2), ambient temp (20 Deg), max temp (90 Deg), and resistivity effect (0.0047). The 'Resistor' section includes options for IEC recommended or Specific, and frequency (50 Hz). The 'Calculation Optimum Size' section shows the optimum size as 388.2501 mm2.

- คลิกที่คำสั่ง calculation เพื่อคำนวณและแสดงผล



- คลิกที่คำสั่ง plot graph





## บทที่ 6

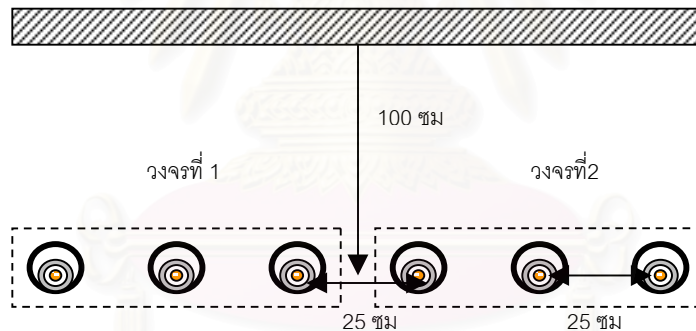
### การศึกษาออกแบบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษาออกแบบสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถได้ข้อแนะนำในการติดตั้ง การเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและความสามารถในการคำนวณรูปแบบต่างๆและการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับโปรแกรมอื่นๆดังนี้

#### 6.1 การจัดวางตำแหน่งของสายเคเบิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน

##### 6.1.1 สายเคเบิลที่มีขั้วลวดโลหะต่อลงดินด้วยวิธีต่อลงดินหลายจุด

ในกรณีที่มีการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินที่มีหลายวงจรการจัดวางสายเคเบิลจะมีผลต่อค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิล จึงได้ใช้โปรแกรมลองคำนวณรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลที่เหมาะสม โดยกำหนดให้เฟส "A" นำหน้าเฟส "B" อยู่ 120 องศา และ "C" ล้าหลังเฟส "B" อยู่ 120 องศา



รูปที่ 6.1-1 แบบการติดตั้งในแนวนอน

จากรูปที่ 6.1-1 สมมติว่าวงจรทั้งสองมี ขนาดสายที่ใช้คือ 400 มิลลิเมตรของกรไฟฟ้านครหลวง. มีระยะห่างระหว่างวงจรและสายเคเบิลคือ 25 เซนติเมตร อุณหภูมิรอบท่อร้อยสาย 30 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยสายภายนอกเท่ากับ 140 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 123 มิลลิเมตร ความต้านทานทางความร้อนของดินและคอนกรีตที่ใช้หุ้มท่อร้อยสายมีค่าเท่ากับ 1 องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์ วิธีต่อลงดินแบบหลายจุด รูปแบบการจัดวาง ดังนี้

แบบที่ 1 = A1 B1 C1 B2 C2 A2

แบบที่ 2 = A1 B1 C1 C2 B2 A2

ตารางที่ 6.1-1 แสดงผลการคำนวณกรณี ทั้งสองวงจรต่อ ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสโหลด

การติดตั้ง	กระแสในตัวนำ(แอมแปร์)						กระแสในซิลิคิลโหะ(แอมแปร์)					
	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A1	B1	C1	A2	B2	C2
แบบที่1	484	532	442	486	440	531	106	89	98	109	89	88
แบบที่2	458	458	458	458	458	458	104	80	112	104	80	112

ตารางที่ 6.1-2 แสดงผลการคำนวณกรณี ทั้งสองวงจรไม่ได้ต่อขนานกัน

การติดตั้ง	กระแสในตัวนำ(แอมแปร์)						กระแสในซิลิคิลโหะ(แอมแปร์)					
	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A1	B1	C1	A2	B2	C2
แบบที่1	467	467	467	481	481	481	107	78	106	111	100	80
แบบที่2	458	458	458	458	458	458	104	80	112	104	80	112

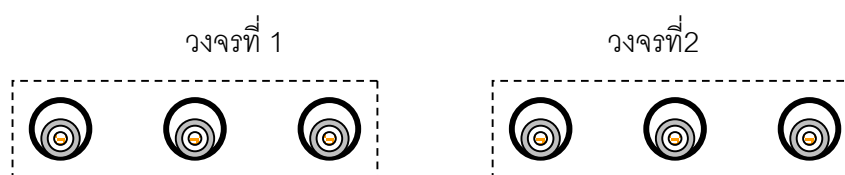
จากผลการคำนวณสรุปได้ดังนี้

1. วงจรที่มีการต่อขนานกันเพื่อจ่ายกระแสโหลดถ้ามีการจัดวางลำดับเฟสไม่ถูกต้อง จะทำให้เกิดการไม่สมมาตรกันของความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิล แต่ถ้ามีการจัดเรียงเฟสที่ถูกต้องจะทำให้เกิดการสมมาตรกันของความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิล และของกระแสในซิลิคิลระหว่างวงจรด้วย

2. วงจรที่ไม่ได้ต่อขนานกันเพื่อจ่ายกระแสโหลดการจัดวางลำดับเฟสจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการไม่สมมาตรกันของความสามารถในตัวนำกระแสแต่ละวงจร

ทดลองใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณหารูปแบบในการจัดวางที่เหมาะสมแบบต่างๆ ของวงจรที่ไม่ได้ต่อขนานกันเพื่อจ่ายกระแสโหลดซึ่งมีระยะห่างของสายเคเบิลแต่ละเส้นเท่ากันให้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและสูงสุดดังนี้

## แบบที่ 1



รูปที่ 6.1-2 แบบการติดตั้งที่ 1

ตารางที่ 6.1-3 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและสมมาตรของการติดตั้งรูปที่ 6.1-2

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 1						พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรรที่ 1			วงจรรที่ 2			วงจรรที่ 1	วงจรรที่ 2	ค่าเฉลี่ย
							1	2	
1	A1	B1	C1	C2	B2	A2	458	458	458
2	B1	C1	A1	A1	C2	B2	458	458	458
3	C1	A1	B1	B2	A2	C2	458	458	458

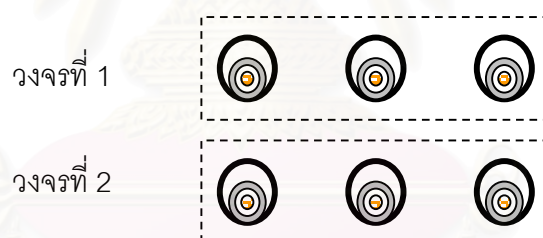
ตารางที่ 6.1-4 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสมมาตรของการติดตั้งรูปที่ 6.1-2

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 1						พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรรที่ 1			วงจรรที่ 2			วงจรรที่ 1	วงจรรที่ 2	ค่าเฉลี่ย
							1	2	
4	C1	B1	A1	A2	B2	C2	464	464	464
5	B1	A1	C1	C2	A2	B2	464	464	464
6	A1	C1	B1	B2	C2	A2	464	464	464

ตารางที่ 6.1-5 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิ้งค์กระแสสูงสุดและอสมมาตรของการติดตั้ง  
รูปที่ 6.1-2

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 1						พิ้งค์กระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่ 1			วงจรที่ 2			วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด
7	A1	B1	C1	A2	B2	C2	483	486	484.5
8	B1	A1	C1	B2	A2	C2	486	483	484.5
9	C1	B1	A1	C2	B2	A2	486	483	484.5
10	A1	C1	B1	A2	C2	B2	486	483	484.5
11	B1	C1	A1	B2	C2	A2	483	486	484.5
12	C1	A1	B1	C2	A2	B2	483	486	484.5

แบบที่ 2



รูปที่ 6.1-3 แบบการติดตั้งที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

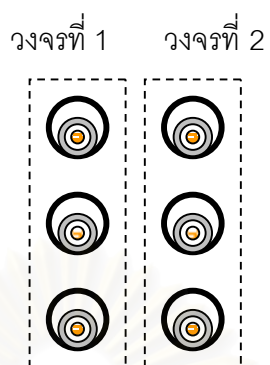
ตารางที่ 6.1-6 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและอสมมาตรของการติดตั้งรูปที่ 6.1-3

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 2				พิกัดกระแส (แอมแปร์)
1	วงจรที่1	A1	B1	C1	468
	วงจรที่2	A2	B2	C1	439
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				453.5
2	วงจรที่1	B1	A1	C1	468
	วงจรที่2	B2	A2	C2	439
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				453.5
3	วงจรที่1	C1	B1	A1	468
	วงจรที่2	C2	B2	A2	439
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				453.5
4	วงจรที่1	A1	C1	B1	468
	วงจรที่2	A2	C2	B2	439
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				453.5
5	วงจรที่1	B1	C1	A1	468
	วงจรที่2	B2	C2	A2	439
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				453.5
6	วงจรที่1	C1	A1	B1	468
	วงจรที่2	C2	A2	B2	439
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				453.5

ตารางที่ 6.1-7 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิทักกระแสสูงสุดของการติดตั้งรูปที่ 6.1-3

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 2				พิทักกระแส (แอมแปร์)
7	วงจรที่1	C1	B1	A1	493
	วงจรที่2	A2	B2	C2	463
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				478
8	วงจรที่1	A1	B1	C1	493
	วงจรที่2	C2	B2	A2	463
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				478
9	วงจรที่1	B1	A1	C1	493
	วงจรที่2	C2	A2	B2	463
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				478
10	วงจรที่1	A1	C1	B1	493
	วงจรที่2	B2	C2	A2	463
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				478
11	วงจรที่1	B1	C1	A1	493
	วงจรที่2	A2	C2	B2	463
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				478
12	วงจรที่1	C1	A1	B1	493
	วงจรที่2	B2	A2	C2	463
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				478

## แบบที่ 3



รูปที่ 6.1-4 แบบการติดตั้งที่ 3

ตารางที่ 6.1-8 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสต่ำสุดและสมมาตรของการติดตั้งรูปที่ 6.1-4

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 3		พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	A1	A2	417	417	417
	B1	B2			
	C1	C2			
2	B1	B2	417	417	417
	C1	C2			
	A1	A2			
3	C1	C2	417	417	417
	A1	A2			
	B1	B2			

ตารางที่ 6.1-9 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสมมาตรของการติดตั้งรูปที่ 6.1-4

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 3		พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่1	วงจรที่2	ค่าเฉลี่ย
4	C1	C2	423	423	423
	B1	B2			
	A1	A2			
5	B1	B2	423	423	423
	A1	A2			
	C1	C2			
6	A1	A2	423	423	423
	C1	C2			
	B1	B2			

ตารางที่ 6.1-8 และ 6.1-9 จะ สังเกตได้ว่ามีรูปแบบการจัดวางที่คล้ายกันแต่มีพิกัดกระแสไม่เท่ากัน ซึ่งถ้าไม่คิดคำนวณถึงผลของความร้อนร่วมและตำแหน่งการวางรูปแบบการจัดวางทั้งสองจะให้ค่าเหมือนกันของกระแสในตัวนำและในซิลด์โลหะ แต่ถ้าคำนวณผลของความร้อนร่วมและตำแหน่งในการวางแล้วค่าที่ได้จะเป็นดังตารางข้างต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากกระแสในซิลด์ของสายเคเบิลในแต่ละเส้นไม่เท่ากันรูปแบบการจัดวางของตารางที่ 6.1-8 นั้น ค่ากระแสในซิลด์โลหะที่มีค่าสูงที่สุดจะอยู่ในตำแหน่งลึกที่สุดทำให้ได้พิกัดกระแสน้อยกว่าแบบการจัดวางของตารางที่ 6.1-9 ซึ่งค่าของกระแสในซิลด์โลหะที่สูงสุดไม่ได้อยู่ในตำแหน่งลึกที่สุด

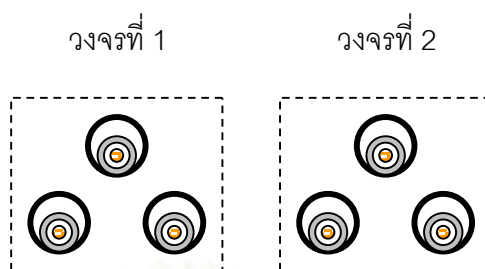
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 6.1-10 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิกัดกระแสสูงสุดและสมมาตรของ การติดตั้ง  
รูปที่6.1-4

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 3		พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่1	วงจรที่2	ค่าเฉลี่ย
7	C1	A2	463	463	463
	B1	B2			
	A1	C2			
8	A1	C2	463	463	463
	B1	B2			
	C1	A2			
9	B1	C2	463	463	463
	A1	A2			
	C1	B2			
10	A1	B2	463	463	463
	C1	C2			
	B1	A2			
11	B1	A2	463	463	463
	C1	C2			
	A1	B2			
12	C1	B2	463	463	463
	A1	A2			
	B1	C2			

## แบบที่ 4



รูปที่ 6.1-5 แบบการติดตั้งที่ 4

ตารางที่ 6.1-11 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแสต่ำสุด และ สมมาตรของ การติดตั้งรูปที่ 6.1-5

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 4						พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่ 1			วงจรที่ 2			วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	C1	B1	A1	A2	B2	C2	464	464	464
2	A1	B1	C1	C2	B2	A2	464	464	464
3	B1	A1	C1	C2	A2	B2	464	464	464
4	A1	C1	B1	B2	C2	A2	464	464	464
5	B1	C1	A1	A2	C2	B2	464	464	464
6	C1	A1	B1	B2	A2	C2	464	464	464

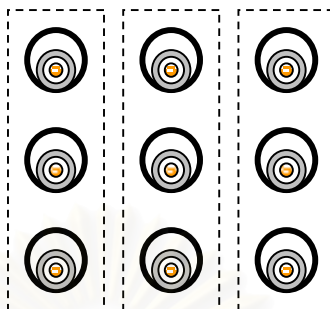
ตารางที่ 6.1-12 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ได้ค่าพิัดกระแสสูงสุดและอสมมาตรของการติดตั้ง  
รูปที่ 6.1-5

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 4						พิัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่ 1			วงจรที่ 2			วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	ค่าเฉลี่ย
							1	2	
7	B1	A1	C1	A2	B2	C2	477	476	476.5
8	A1	C1	B1	A2	B2	C2	476	477	476.5
9	B1	A1	C1	B2	C2	A2	476	477	476.5
10	C1	B1	A1	B2	C2	A2	477	476	476.5
11	C1	B1	A1	C2	A2	B2	476	477	476.5
12	A1	C1	B1	C2	A2	B2	477	476	476.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## แบบที่ 5

วงจรที่ 1    วงจรที่ 2    วงจรที่ 3



รูปที่ 6.1-6 แบบการติดตั้งที่ 5

ตารางที่ 6.1-13 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแสต่ำสุด และ สมมาตร ระหว่างวงจรที่ 1 และ 3 ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-6

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 5			พิกัดกระแส (แอมแปร์)			
	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	วงจรที่ 3	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	วงจรที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	A1	A2	A3	378	314	378	356.66
	B1	B2	B3				
	C1	C2	C3				
2	C1	C2	C3	378	314	378	356.66
	A1	A2	A3				
	B1	B2	B3				
3	B1	B2	B3	378	314	378	356.66
	C1	C2	C3				
	A1	A2	A3				

ตารางที่ 6.1-14 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแสสมมาตร ระหว่างวงจรที่ 1 และ 3 ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-6

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 5			พิกัดกระแส (แอมแปร์)			
	วงจรที่ 1	วงจรที่2	วงจรที่3	วงจรที่1	วงจรที่ 2	วงจรที่ 3	ค่า เฉลี่ย
4	A1	C2	A3	427	376	427	410
	B1	B2	B3				
	C1	A2	C3				
5	C1	B2	C3	427	376	427	410
	A1	A2	A3				
	B1	C2	B3				
6	B1	A2	B3	427	376	427	410
	C1	C2	C3				
	A1	B2	A3				
7	B1	C2	B3	428	376	428	410.67
	A1	A2	A3				
	C1	B2	C3				
8	A1	B2	A3	428	376	428	410.67
	C1	C2	C3				
	B1	A2	B3				
9	C1	A2	C3	428	376	428	410.67
	B1	B2	B3				
	A1	C2	A3				

ตารางที่ 6.1-15 ผลการจัดเรียงลำดับเฟสที่ทำให้ค่าเฉลี่ย พิกัดกระแสสูงสุด และ อสมมาตร ระหว่าง  
วงจรที่ 1 และ 3 ของการติดตั้งรูปที่ 6.1-6

แบบจัดวางที่	แบบการติดตั้งที่ 5			พิกัดกระแส (แอมแปร์)			
	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่3	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่3	ค่าเฉลี่ย
10	A1	C2	B3	434	394	436	421.33
	C1	B2	A3				
	B1	A2	C3				
11	C1	B2	A3	434	394	436	421.33
	B1	A2	C3				
	A1	C2	B3				
12	B1	A2	C3	434	394	436	421.33
	A1	C2	B3				
	C1	B2	A3				
13	C1	A2	B3	436	394	434	421.33
	B1	C2	A3				
	A1	B2	C3				
14	B1	C2	A3	436	394	434	421.33
	A1	B2	C3				
	C1	A2	B3				
15	A1	B2	C3	436	394	434	421.33
	C1	A2	B3				
	B1	C2	A3				

## สรุป

การจัดเรียงลำดับเฟสในกรณีไม่มีการต่อขนานกันของวงจร เพื่อจ่ายพิกัดกระแสโหลดสูงสุด  
ควรจัดวางเรียงลำดับเฟสตามตารางดังนี้

ตารางที่ 6.1-16 ตารางแสดงแบบการติดตั้งที่ให้พิกัดกระแสสูงสุดแบบต่างๆ

การจัดวาง		พิกัดกระแสสูงกว่าการจัดวางแบบต่ำสุด (เปอร์เซ็นต์)
<u>แบบที่ 1</u>	ตารางที่ 6.1-5	5.7
<u>แบบที่ 2</u>	ตารางที่ 6.1-7	5.4
<u>แบบที่ 3</u>	ตารางที่ 6.1-10	11.03
<u>แบบที่ 4</u>	ตารางที่ 6.1-12	2.7
<u>แบบที่ 5</u>	ตารางที่ 6.1-15	18.13

## 6.1.2 สายเคเบิลที่มีซิลิโคนที่ต่อลงดินด้วยวิธีต่อลงดินจุดเดียว

ทดลองใช้โปรแกรมคำนวณรูปแบบการจัดวางสายเคเบิลแบบติดตั้งที่ 1 ถึง 5 ด้วยวิธีต่อลงดิน  
จุดเดียว โดยเปรียบเทียบรูปแบบการจัดวางที่ให้ค่าพิกัดกระแสสูงสุดและต่ำสุดของวิธีการต่อลงดิน  
หลายจุดดังนี้

ตารางที่ 6.1-17 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 1 วิธีต่อลงดินจุดเดียว

รูปแบบการจัดวาง ที่ให้ค่าพิกัดกระแส	การจัดวางแบบที่ 1						พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่ 1			วงจรที่ 2			วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	ค่า เฉลี่ย
ค่าสูงสุด	A1	B1	C1	A2	B2	C2	603	603	603
ค่าต่ำสุด	A1	B1	C1	C2	B2	A2	603	603	603

ตารางที่ 6.1-18 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 2 วิธีต่อลงดินจุดเดียว

รูปแบบการจัดวาง ที่ให้ค่าพิกัดกระแส	การจัดวางแบบที่ 2				พิกัดกระแส (แอมแปร์)
	วงจรที่1	A1	B1	C1	
ค่าสูงสุด	วงจรที่1	A1	B1	C1	599
	วงจรที่2	C2	B2	A2	566
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				582.5
ค่าต่ำสุด	วงจรที่1	A1	B1	C1	599
	วงจรที่2	A2	B2	C2	566
	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด				582.5

ตารางที่ 6.1-19 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 3 วิธีต่อลงดินจุดเดียว

รูปแบบการจัดวาง ที่ให้ค่าพิกัดกระแส	การจัดวางแบบที่ 3		พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่1	วงจรที่2	ค่าเฉลี่ย
ค่าสูงสุด	A1	C2	562	562	562
	B1	B2			
	C1	A2			
ค่าต่ำสุด	A1	A2	562	562	562
	B1	B2			
	C1	C2			



ตารางที่ 6.1-20 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 4 วิธีต่อลงดินจุดเดียว

รูปแบบการจัดวาง ที่ให้ค่าพิกัดกระแส	การจัดวางแบบที่ 4						พิกัดกระแส (แอมแปร์)		
	วงจรที่ 1			วงจรที่ 2			วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	ค่าเฉลี่ย
ค่าสูงสุด	A1	C1	B1	A2	B2	C2	573	573	573
ค่าต่ำสุด	A1	B1	C1	C2	B2	A2	573	573	573

ตารางที่ 6.1-21 ผลการคำนวณการจัดวางแบบที่ 5 วิธีต่อลงดินจุดเดียว

รูปแบบการจัดวาง ที่ให้ค่าพิกัด กระแส.	การจัดวางแบบที่ 5			พิกัดกระแส (แอมแปร์)			
	วงจรที่ 1	วงจรที่2	วงจรที่3	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่3	ค่าเฉลี่ย
ค่าสูงสุด	A1	C2	B3	521	470	521	504
	C1	B2	A3				
	B1	A2	C3				
ค่าต่ำสุด	A1	A2	A3	521	470	521	504
	B1	B2	B3				
	C1	C2	C3				

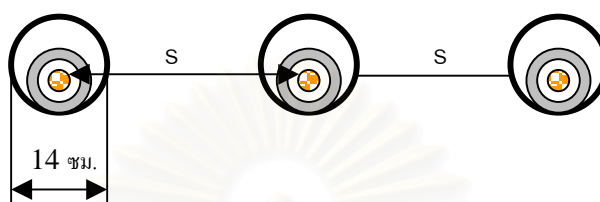
## สรุป

สายเคเบิลใต้ดินที่มีวิธีการต่อลงดินจุดเดียวการจัดเรียงลำดับเฟสรูปแบบต่างๆในการจัดวาง จะไม่มีผลต่อค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิล เนื่องจากไม่มีกระแสไหลในซิลด์โลหะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายกระแสโดยวิธีการปรับระยะห่างระหว่างสายเคเบิล

การปรับระยะห่างสายเคเบิลจะมีผลต่อค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลจากการใช้โปรแกรมคำนวณเปรียบเทียบดังนี้



รูปที่ 6.2-1 รูปแสดงระยะห่างของการติดตั้งสายเคเบิล1 เส้นในท่อร้อยสายจำนวน 1วงจร

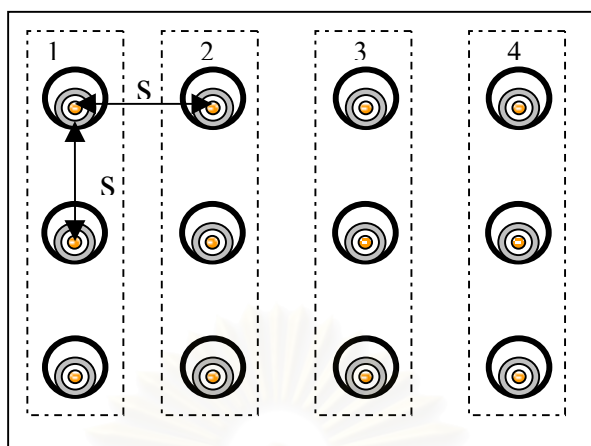
ตารางที่ 6.2-1 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในรูปที่ 6.2-1 ขนาดสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตรโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟส

ระยะห่าง ระหว่างเฟส (เซนติเมตร)	วิธีต่อลงดินแบบหลายจุด		วิธีต่อลงดินจุดเดียวหรือแบบครอสบอนด์	
	กระแสในตัวนำ (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ขั้วดีโหลหะทั้ง3เฟส (แอมแปร์)	กระแสในตัวนำ (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ขั้วดีโหลหะทั้ง3เฟส (แอมแปร์)
14	532	259	621	0
25	512	310	641	0
50	488	362	665	0
75	474	389	678	0
100	464	406	687	0
150	450	428	699	0
200	440	441	707	0
250	433	450	712	0
300	426	457	716	0
350	421	463	719	0
400	417	469	722	0

ตารางที่ 6.2-2 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในรูปที่ 6.2-1 ขนาดสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตรโดยการ  
เพิ่มระยะห่างระหว่างเฟส

ระยะห่าง ระหว่างเฟส (เซนติเมตร)	วิธีต่อลงดินแบบหลายจุด		วิธีต่อลงดินจุดเดียวหรือแบบครอสบอนด์	
	กระแสในตัวนำ (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ซิดด์โลหะทั้ง3เฟส (แอมแปร์)	กระแสในตัวนำ (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ซิดด์โลหะทั้ง3เฟส (แอมแปร์)
14	708	308	882	0
25	667	369	921	0
50	623	430	969	0
75	601	461	999	0
100	586	483	1021	0
150	567	510	1052	0
200	553	528	1073	0
250	543	540	1088	0
300	534	548	1099	0
350	527	555	1108	0
400	520	561	1114	0

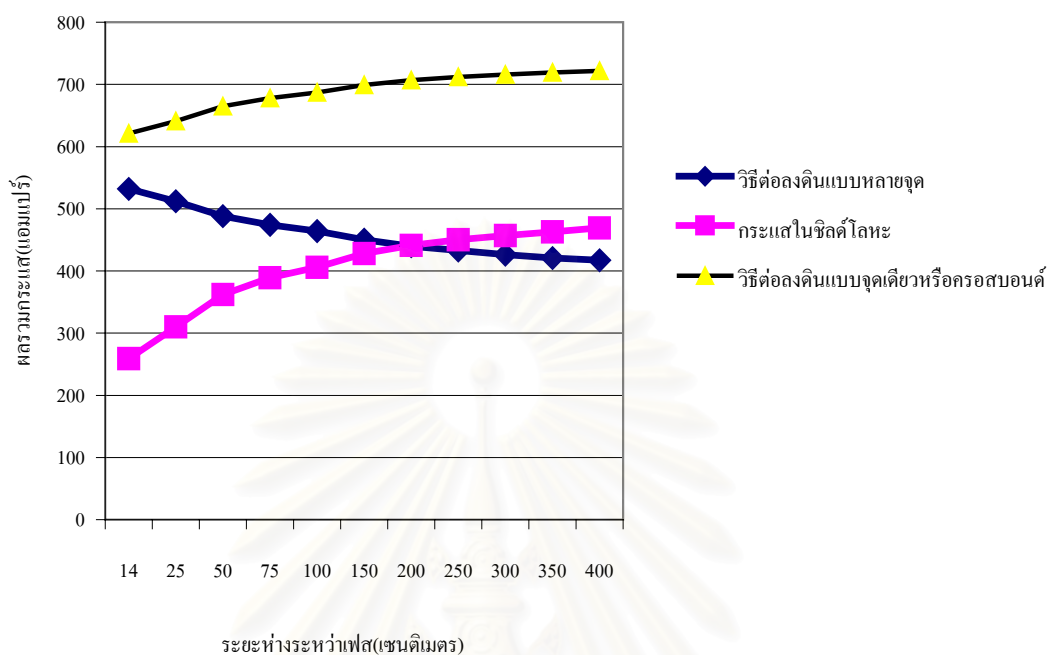
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



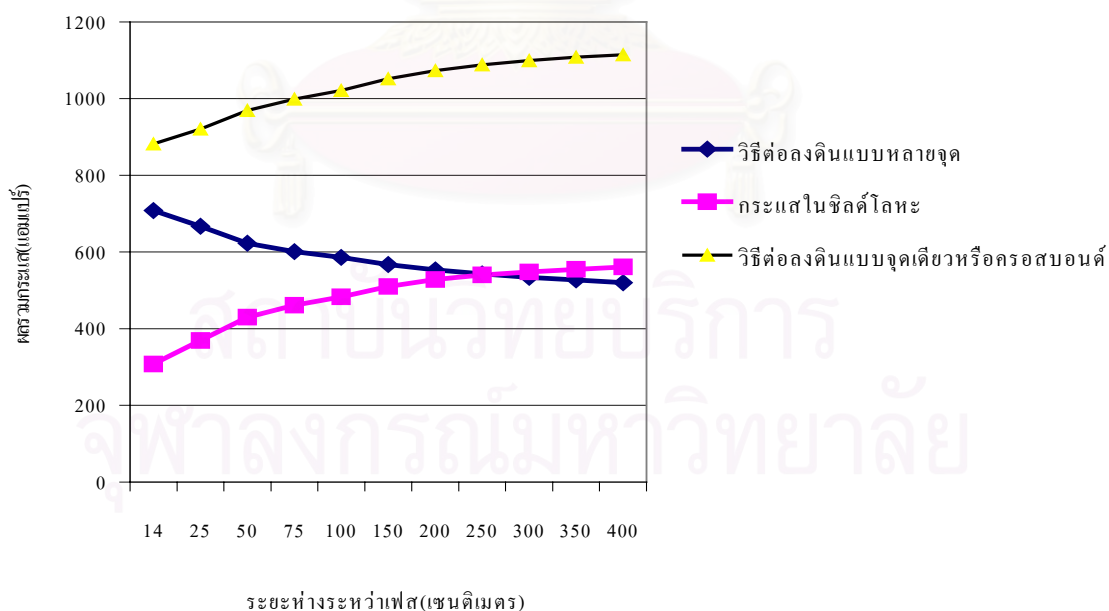
รูปที่ 6.2-2 รูปแสดงระยะห่างของการติดตั้งสายเคเบิล 1 เส้นในท่อร้อยสาย จำนวน 4 วงจร

ตารางที่ 6.2-3 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในรูปที่ 6.2-2 ขนาดสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟส

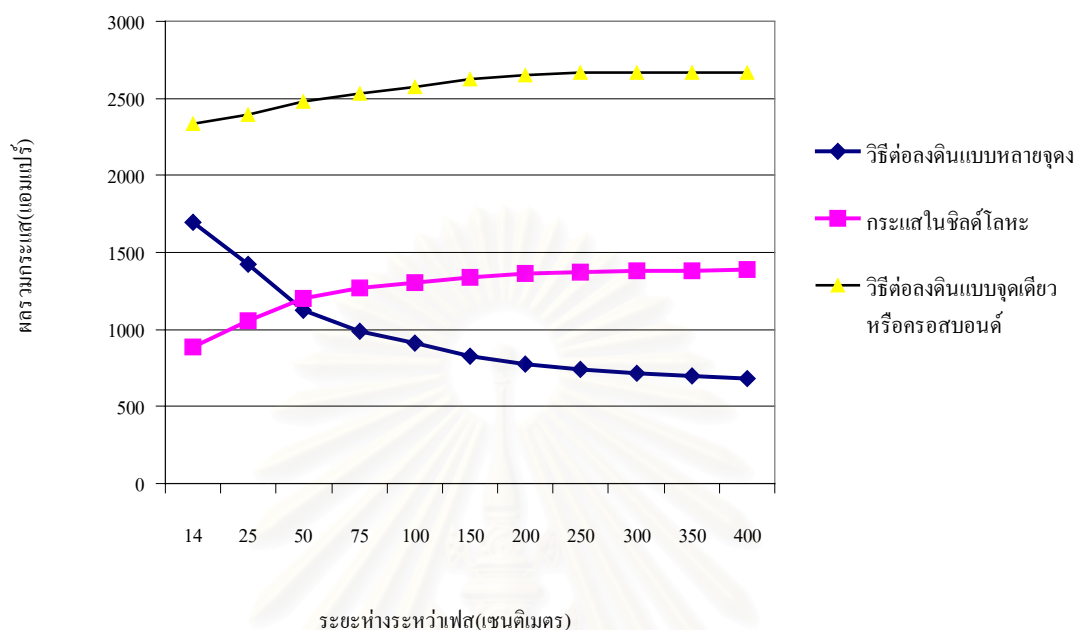
ระยะห่าง ระหว่างเฟส  (เซนติเมตร)	วิธีต่อลงดินแบบหลายจุด		วิธีต่อลงดินจุดเดียวหรือแบบครอส บอนด์	
	ผลรวมกระแสใน ตัวนำทั้งหมด (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ชิลด์โลหะทั้งหมด (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ตัวนำทั้งหมด (แอมแปร์)	ผลรวมกระแสใน ชิลด์โลหะทั้งหมด (แอมแปร์)
14	1698	888	2336	0
25	1424	1058	2396	0
50	1124	1204	2478	0
75	988	1270	2534	0
100	912	1302	2572	0
150	824	1340	2624	0
200	774	1362	2654	0
250	742	1374	2664	0
300	718	1382	2666	0
350	702	1384	2666	0
400	686	1386	2666	0



รูปที่ 6.2-3 ภาพกราฟแสดงผลรวมกระแสของสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร แบบติดตั้งรูป 6.2-1



รูปที่ 6.2-4 ภาพกราฟแสดงผลรวมกระแสของสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร แบบติดตั้งรูป 6.2-1



รูปที่ 6.2-5 ภาพกราฟแสดงผลรวมกระแสของสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร แบบติดตั้งรูป 6.2-2

### สรุป

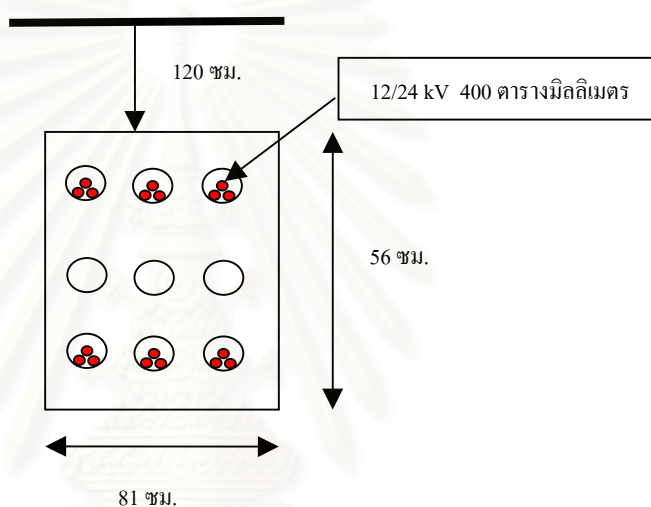
จากผลการคำนวณและกราฟในรูปที่ 6.2-3 , 6.2-4 และ 6.2-5 ระยะห่างระหว่างเฟสที่ติดตั้งในแนวระนาบในรูปที่ 6.2-1 และ 6.2-2 มีผลต่อพิกัดกระแสในสายเคเบิลดังนี้

1. ระยะห่างระหว่างเฟสยิ่งเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พิกัดกระแสในสายเคเบิลน้อยลงของแบบที่มีการต่อชิลด์โลหะด้วยวิธีลงดินหลายจุดเนื่องจากกระแสในชิลด์โลหะจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างเฟส

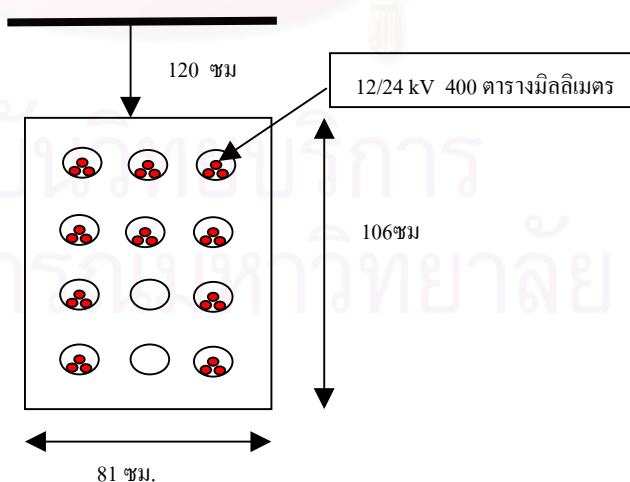
2. ระยะห่างระหว่างเฟสยิ่งเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พิกัดกระแสในสายเคเบิลเพิ่มขึ้นของแบบที่มีการต่อชิลด์โลหะด้วยวิธีลงดินแบบจุดเดี่ยวหรือแบบครอสบอนด์

### 6.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายกระแสโดยให้แต่ละวงจรจ่ายกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดที่กำหนด

ตามแบบของการไฟฟ้าหรือของโปรแกรมของ EPRI จะให้ค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลกรณีหลายวงจรเป็นค่าเฉลี่ยพิกัดกระแสของวงจรทั้งหมด ซึ่งหากต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายกระแสเราสามารถที่จะคำนวณโดยให้แต่ละวงจรมักจ่ายกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจ่ายกระแสได้ดังตัวอย่างการคำนวณดังนี้



รูปที่ 6.3-1 ภาพการติดตั้งสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 6 วงจร



รูปที่ 6.3-2 ภาพการติดตั้งสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 10 วงจร

ตามรูปที่ 6.3-1 และ 6.3-2 เป็นรูปแบบการติดตั้งในแบบ UG-4-310 ของการไฟฟ้านครหลวงขนาดสาย 400 ตารางมิลลิเมตรแบบวิธีต่อกราด์หลายจุดซึ่งค่าพิกัดกระแสในแบบดังกล่าวจะเป็นแบบค่าเฉลี่ยของวงจรทั้งหมด ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นลงคำนวณในแบบค่าเฉลี่ยและแบบที่แต่ละวงจรมำกระแสที่ค่าอุณหภูมิสูงสุดได้ดังนี้

ตารางที่ 6.3-1 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยในรูปที่ 6.3-1 แบบวิธีต่อลงดินหลายจุด

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	325	325	325	83.85	83.51	85.02
ที่2	325	325	325	88.00	86.96	88.00
ที่3	325	325	325	85.02	83.51	83.85
ที่4	325	325	325	84.88	86.07	86.10
ที่5	325	325	325	88.99	89.72	88.99
ที่6	325	325	325	86.11	86.07	84.88
ผลรวม	1950	1950	1950	-	-	-

ตารางที่ 6.3-2 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปที่ 6.3-1 แบบวิธีต่อลงดินหลายจุด

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	353	353	353	88.82	88.45	90.00
ที่2	316	316	316	90.00	88.96	90.00
ที่3	353	353	353	90.00	88.45	88.82
ที่4	342	342	342	88.74	90.00	89.93
ที่5	296	296	296	89.24	90.00	89.23
ที่6	342	342	342	89.94	90.00	88.74
ผลรวม	2002	2002	2002	-	-	-



ตารางที่ 6.3-3 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยในรูปแบบที่ 6.3-2 แบบวิธีต่อลงดินหลายจุด

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	271	271	271	81.18	80.52	82.12
ที่2	271	271	271	84.55	83.31	84.55
ที่3	271	271	271	82.12	80.52	81.18
ที่4	271	271	271	85.97	86.20	87.03
ที่5	271	271	271	89.40	89.26	89.40
ที่6	271	271	271	87.03	86.20	85.97
ที่7	271	271	271	85.73	86.41	86.53
ที่8	271	271	271	86.52	86.41	85.74
ที่9	271	271	271	81.97	83.02	82.53
ที่10	271	271	271	82.53	83.02	81.97
ผลรวม	2710	2710	2710	-	-	-

ตารางที่ 6.3-4 ผลคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดแต่ละวงจรรูปที่ 6.3-2 วิธีต่อลงดินหลายจุด

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	322	322	322	89.00	88.39	90.00
ที่2	287	287	287	90.00	88.82	90.00
ที่3	322	322	322	90.00	88.39	89.00
ที่4	258	258	258	88.98	89.29	90.00
ที่5	218	218	218	90.00	89.94	90.00
ที่6	258	258	258	90.00	89.29	88.98
ที่7	263	263	263	89.20	89.77	90.00
ที่8	263	263	263	90.00	89.77	89.21
ที่9	309	309	309	88.93	90.00	89.54
ที่10	309	309	309	89.54	90.00	88.93
ผลรวม	2,809	2,809	2,809	-	-	-

ตารางที่ 6.3-5 ตารางเปรียบเทียบผลรวมของกระแสทุกวงจรถัดตั้งรูปแบบที่ 6.3-1 และ 6.3-2

แบบการติดตั้ง	ผลรวมของกระแสทุกวงจร (แอมแปร์)		
	แบบค่าเฉลี่ย	แบบที่อุณหภูมิสูงสุด ของแต่ละวงจร	ผลต่าง (%)
รูปที่ 6.3-1	1950	2002	2.67
รูปที่ 6.3-2	2710	2,809	3.65

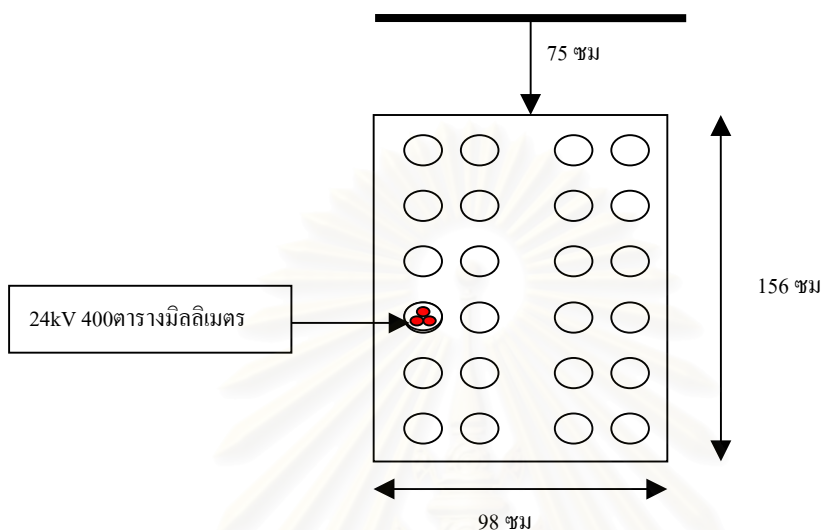
### สรุป

จากตารางที่ 6.3-5 จะเห็นได้ว่าการคำนวณโดยให้แต่ละวงจรมำกระแสที่อุณหภูมิสูงของแต่ละวงจรจะทำให้ได้ผลรวมกระแสสูงกว่าแบบค่าเฉลี่ย ซึ่งจากตัวอย่างดังกล่าวสูงกว่าประมาณ 2-3 % โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งด้วย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 6.4 การเพิ่มประสิทธิภาพจ่ายกระแสโดยวิธีการต่อซิลต์โลหะลงดิน

รูปแบบการต่อลงดินของสายเคเบิลที่มีซิลต์โลหะจะมีผลต่อค่าพิกัดการนำกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งใช้โปรแกรมคำนวณในรูปแบบต่างๆได้ดังนี้



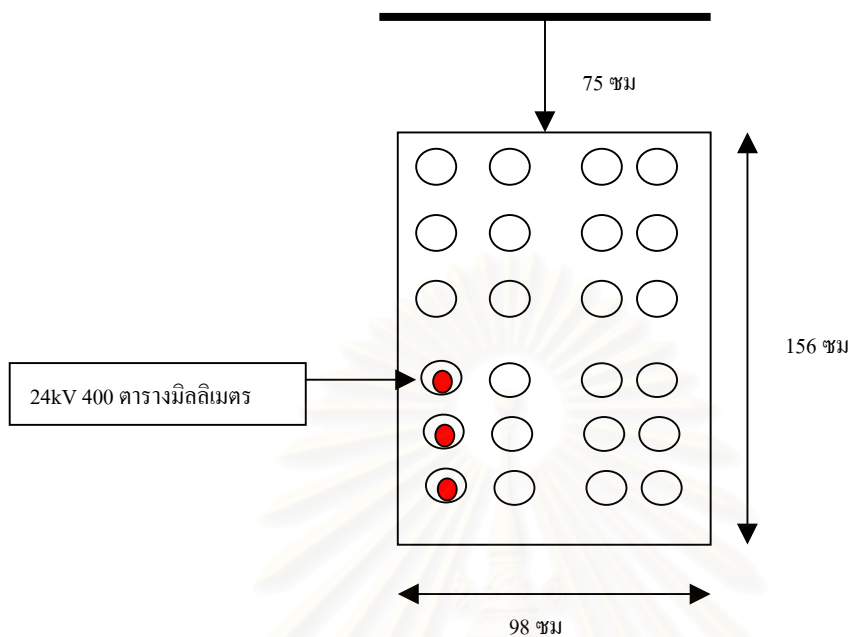
รูปที่ 6.4-1 ภาพการติดตั้งแบบ 3เส้นในหนึ่งท่อ สายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร 24 kV 1วงจร

ตารางที่ 6.4-1 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปที่ 6.4-1 แบบวิธีต่อลงดินจุดเดียวและแบบครอสบอนด์

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	540	540	540	90.00	90.00	90.00

ตารางที่ 6.4-2 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปที่ 6.4-1 แบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	531	531	531	90.00	90.00	90.00



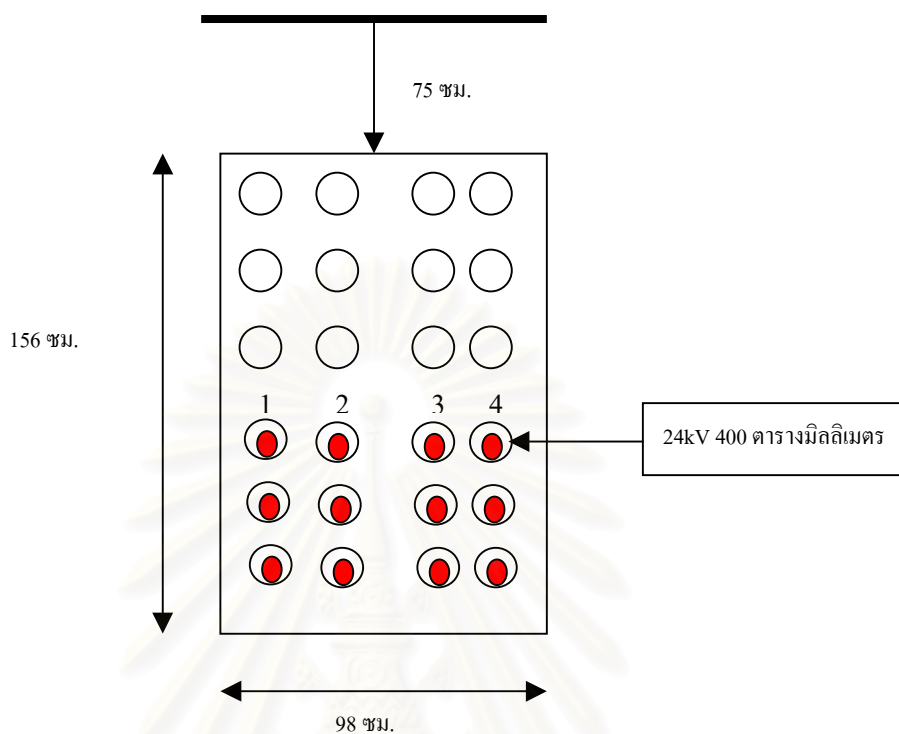
รูปที่ 6.4-2 ภาพการติดตั้งหนึ่งเส้นในหนึ่งท่อน สายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร 24 kV 1วงจร

ตารางที่ 6.4-3 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดในรูปที่ 6.4-2 แบบวิธีต่อลงดินจุดเดียวและแบบครอสบอนด์

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	641	641	641	87.17	90.00	87.66

ตารางที่ 6.4-4 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดในรูปที่ 6.4-2 แบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	512	512	512	88.43	87.55	90.00



รูปที่ 6.4-3 ภาพการติดตั้งหนึ่งเส้นในหนึ่งท่อสายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร 24 kV 4วงจร

ตารางที่ 6.4-5 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปที่ 6.4-3 แบบวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวและแบบครอสบอนด์

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	464	464	464	86.26	90.00	88.43
ที่2	398	398	398	85.76	90.00	88.10
ที่3	398	398	398	85.76	90.00	88.10
ที่4	464	464	464	86.26	90.00	88.43
ผลรวม	1,724	1,724	1,724	-	-	-

ตารางที่ 6.4-6 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปแบบที่ 6.4-3 แบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	336	336	336	86.27	86.63	90.00
ที่2	259	259	259	85.98	86.51	90.00
ที่3	259	259	259	85.98	86.51	90.00
ที่4	336	336	336	86.26	86.63	90.00
ผลรวม	1,190	1,190	1,190	-	-	-

แบบการติดตั้งในหัวข้อ 6.3 รูปที่ 6.3-1 และรูปที่ 6.3-2 เป็นแบบวิธีต่อลงดินหลายจุดหากเปลี่ยนวิธีการต่อลงดินเป็นแบบหนึ่งจุดและแบบครอสบอนด์โดยใช้โปรแกรมคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 6.4-7 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปแบบที่ 6.3-1 แบบวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวและแบบครอสบอนด์

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	359	359	359	88.78	88.41	90.00
ที่2	322	322	322	90.00	88.91	90.00
ที่3	359	359	359	90.00	88.42	88.79
ที่4	348	348	348	88.77	90.00	89.93
ที่5	302	302	302	89.28	90.00	89.28
ที่6	348	348	348	89.93	90.00	88.77
ผลรวม	2,038	2,038	2,038	-	-	-

ตารางที่ 6.4-8 ผลการคำนวณพิกัดกระแสที่อุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวงจรในรูปที่ 6.3-2 แบบวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวและแบบครอสบอนด์

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
ที่1	327	327	327	88.96	88.36	90.00
ที่2	292	292	292	90.00	88.79	90.00
ที่3	327	327	327	90.00	88.37	88.97
ที่4	263	263	263	88.99	89.33	90.00
ที่5	222	222	222	90.00	89.92	90.00
ที่6	263	263	263	90.00	89.33	89.00
ที่7	268	268	268	89.23	89.85	90.00
ที่8	268	268	268	90.00	89.85	89.23
ที่9	314	314	314	88.89	90.00	89.48
ที่10	314	314	314	89.48	90.00	88.90
ผลรวม	2,858	2,858	2,858	-	-	-

ตารางที่ 6.4-9 ตารางเปรียบเทียบวิธีการต่อลงดินที่ติดตั้งรูปแบบ 1 เส้นในท่อร้อยสาย

การติดตั้งแบบ 1 เส้น ในท่อร้อยสาย	ผลรวมของกระแสทุกวงจร( แอมแปร์)		
	แบบวิธีต่อลงดินแบบ หลายจุด	แบบวิธีต่อลงดินแบบ จุดเดียวและแบบครอส บอนด์	ผลต่าง(%)
รูปที่ 6.4-2(1วงจร)	512	641	25.2
รูปที่ 6.4-3(4วงจร)	1,190	1,724	44.87

ตารางที่ 6.4-10 ตารางเปรียบเทียบวิธีการต่อลงดินที่ติดตั้งรูปแบบ 3 เส้นในท่อร้อยสาย

การติดตั้งแบบ 3 เส้น ในท่อร้อยสาย	ผลรวมของกระแสทุกวงจร( แอมแปร์)		
	แบบวิธีต่อลงดินแบบ หลายจุด	แบบวิธีต่อลงดินแบบ จุดเดียวและแบบครอส บอนด์	ผลต่าง(%)
รูปที่ 6.4-1(1 วงจร)	531	540	1.7
รูปที่ 6.3-1(6 วงจร)	2,002	2,038	1.79
รูปที่ 6.3-2(10 วงจร)	2,809	2,858	1.74

### สรุป

1. จากผลการคำนวณในตารางที่ 6.4-9 และตารางที่ 6.4-10 จะเห็นได้ว่าวิธีต่อการลงดินแบบจุดเดียวหรือแบบครอสบอนด์จะให้พิกัดกระแสของสายเคเบิลสูงกว่าวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด เนื่องจากไม่มีกระแสครบวงจรไหลในซิลด์โลหะ

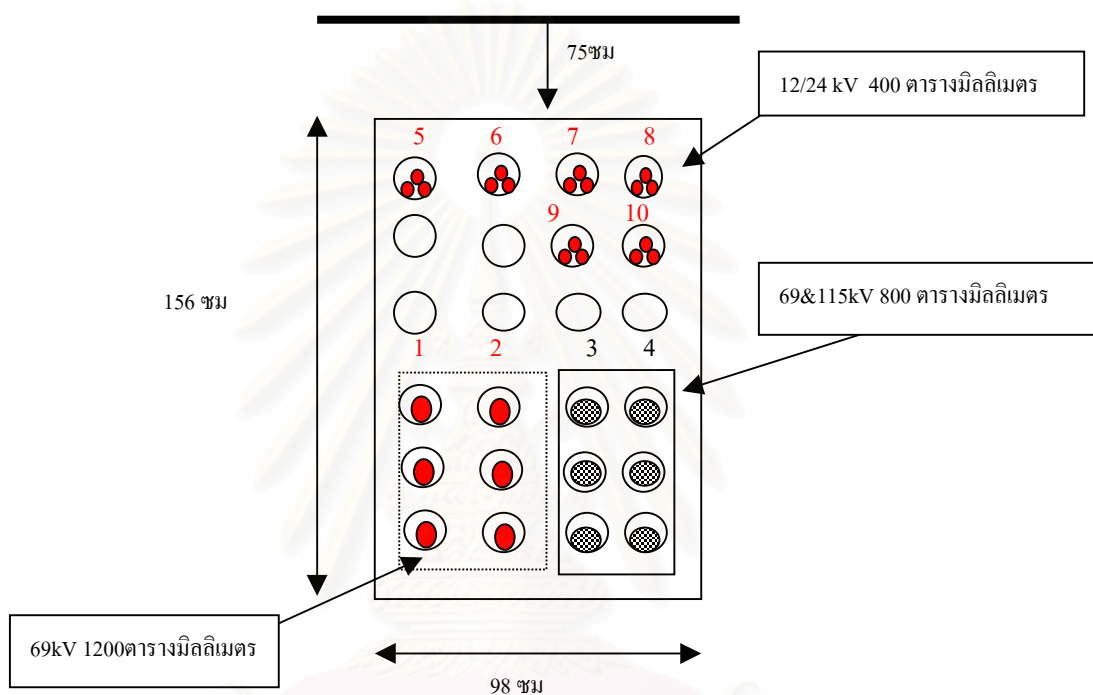
2 วิธีต่อการลงดินแบบจุดเดียวหรือแบบครอสบอนด์ ของแบบติดตั้ง 3เส้นในท่อร้อยสายจะให้พิกัดกระแสสูงกว่าแบบวิธีต่อหลายจุดประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์ และแบบการติดตั้งแบบ 1 เส้นในท่อร้อยสายจะให้กระแสมากกว่าสูงสุดถึงประมาณ 44.87 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งด้วย

3. วิธีต่อการลงดินแบบจุดเดียวหรือแบบครอสบอนด์เหมาะสำหรับการติดตั้งสายเคเบิล 1 เส้นในท่อร้อยสายมากกว่าแบบติดตั้ง 3 เส้นในท่อร้อยสาย



## 6.5 การคำนวณหาอุณหภูมิในสายเคเบิล

สมมติว่ามีความต้องการจะทราบค่าอุณหภูมิของสายเคเบิลในแต่ละเส้นที่ติดตั้งตามรูป 6.5-1 ว่ามีอุณหภูมิเท่าไร โดยสายเคเบิลมีขนาดตามการไฟฟ้านครหลวง และซึ่งมีกระแสจริงในแต่ละวงจรดังนี้



รูปที่ 6.5-1 ภาพการติดตั้งการคำนวณหาอุณหภูมิในสายเคเบิล

ตารางที่ 6.5-1 กระแสของสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส (แอมแปร์)
1	580
2	300

ตารางที่ 6.5-2 กระแสของสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส (แอมแปร์)
3	320
4	456

ตารางที่ 6.5-3 กระแสของสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส (แอมแปร์)
5	300
6	120
7	145
8	200
9	137
10	189

ผลการใช้โปรแกรมคำนวณเพื่อหาอุณหภูมิของสายเคเบิลแต่ละเส้นได้ดังนี้

ตารางที่ 6.5-4 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	580	580	580	65.62	65.95	64.13
2	300	300	300	62.07	62.37	60.53

ตารางที่ 6.5-5 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
3	320	320	320	63.48	63.74	61.87
4	456	456	456	65.06	65.35	63.61

ตารางที่ 6.5-6 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
5	300	300	300	70.61	70.72	70.22
6	120	120	120	58.02	57.41	57.29
7	145	145	145	57.95	57.09	57.41
8	200	200	200	59.55	58.26	58.69
9	137	137	137	59.43	59.17	59.34
10	189	189	189	59.90	59.43	59.38

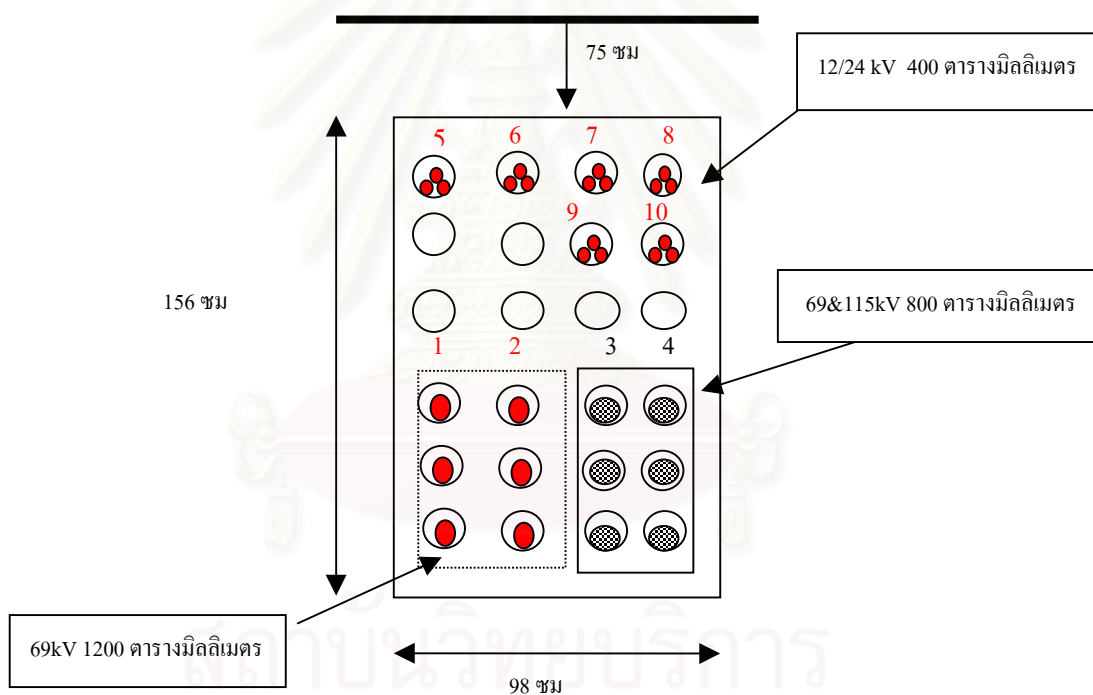
สรุป

หากทราบค่ากระแสที่ไหลจริงในสายเคเบิลจะสามารถใช้โปรแกรมคำนวณหาอุณหภูมิในแต่ละสายเคเบิลได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.6 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณกับแบบ UG-4-410 แผ่นหมายเลขที่ 2 ของการไฟฟ้านครหลวง

ตามแบบที่ UG-4-410 แผ่นหมายเลขที่ 2 ใน ภาคผนวก ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งตามรูปที่ 6.6-1 ของการไฟฟ้านครหลวงจะพบว่าการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร โดยให้กระแสในสายเคเบิล ของ 12/24 กิโลโวลต์และ 69/115 กิโลโวลต์ (ขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร) คงที่ที่ ขนาด 250 และ 600 แอมแปร์ ตามลำดับ จากการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นลองคำนวณหาพิกัดกระแสซึ่งสายเคเบิลใช้ตามโครงสร้างของสายเคเบิลของการไฟฟ้านครหลวง ดังนี้



รูปที่ 6.6-1 ภาพการติดตั้งแบบ UG 4-410

### เงื่อนไขที่ 1

ใช้เงื่อนไขตามแบบ UG-4-410 แผ่นหมายเลขที่ 2 โดยกำหนดให้ระบบ 12/24 กิโลโวลต์ใช้สายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร มีพิกัดกระแส 250 แอมแปร์ และระบบ 69/115 กิโลโวลต์ สายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร มีพิกัดกระแส 600 แอมแปร์ คำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร ที่อุณหภูมิสายเคเบิลสูงสุด 90 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6.6-1 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1,200 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	500	500	500	83.5	84.2	81.8
2	500	500	500	89.4	90	66.7

ตารางที่ 6.6-2 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
3	600	600	600	98.7	99.4	95.3
4	600	600	600	95.7	96.6	92.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.6-3 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
5	250	250	250	79.0	79.2	79.4
6	250	250	250	84.6	84.0	83.9
7	250	250	250	85.5	83.9	84.5
8	250	250	250	82.7	80.4	81.2
9	250	250	250	88.2	87.9	88.2
10	250	250	250	85.8	84.9	84.8

การคำนวณจะพิจารณาสายเคเบิลที่มีโครงสร้างไม่เหมือนกันต่างชนิดกันไปพร้อมกันจะมีความยุ่งยากในการคำนวณมาก เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงมักกำหนดให้สายเคเบิลอื่นที่ไม่ได้พิจารณามีค่ากระแสคงที่ แต่จากผลของการคำนวณในตารางที่ 6.6-2 จะพบว่าสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร มีอุณหภูมิของสายเกิน 90 องศาเซลเซียส ทำให้รูปแบบการติดตั้งนี้ไม่สามารถใช้ติดตั้งจริงได้เพราะเสี่ยงที่จะสายเคเบิลจะมีอุณหภูมิเกินค่าที่กำหนด

## เงื่อนไขที่ 2

ต้องการให้ สายเคเบิลขนาด 1200 ตารางมิลลิเมตรมีขนาดกระแสเท่ากับ 500 แอมแปร์ตามี่คำนวณได้ในเงื่อนไขที่ 1 และสายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร มีพิกัดกระแส 250 แอมแปร์ จึงคำนวณหาขนาดพิกัดกระแสของสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร ว่าควรจะมีค่าเท่าไร ผลจากการใช้โปรแกรมคำนวณดังนี้

ตารางที่ 6.6-4 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1200 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	500	500	500	79.71	80.09	77.66
2	500	500	500	84.64	84.90	81.68

ตารางที่ 6.6-5 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร

วงจร	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
3	506	506	506	89.82	90.00	86.32
4	578	578	578	89.81	90.00	86.63

ตารางที่ 6.6-6 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
5	250	250	250	77.01	77.30	77.39
6	250	250	250	82.43	81.98	81.75
7	250	250	250	83.32	81.75	82.31
8	250	250	250	80.47	78.27	78.95
9	250	250	250	84.96	84.78	84.98
10	250	250	250	82.68	81.85	81.65

เงื่อนไขที่ 3

ใช้เงื่อนไขตามเงื่อนไขที่ 1 แต่อุณหภูมิของสายเคเบิลทุกเส้นต้องไม่เกินค่าที่ 90 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6.6-7 ผลการคำนวณสายเคเบิล 1200 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	260	260	260	69.90	69.62	67.76
2	260	260	260	75.62	75.35	72.57

ตารางที่ 6.6-8 ผลการคำนวณสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
3	600	600	600	89.87	89.80	85.97
4	600	600	600	88.50	88.63	85.04

ตารางที่ 6.6-9 ผลการคำนวณสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตร

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
5	250	250	250	74.72	75.21	75.29
6	250	250	250	80.15	80.00	79.68
7	250	250	250	81.17	79.86	80.32
8	250	250	250	78.68	76.69	77.25
9	250	250	250	82.34	82.29	82.46
10	250	250	250	80.60	79.86	79.64



ตารางที่ 6.6-10 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณในแต่ละเงื่อนไข

เงื่อนไขที่	คุณสมบัติสายเคเบิลเกินค่าที่กำหนด (90 องศาเซลเซียส)	ผลรวมกระแสที่จ่ายในสายเคเบิลขนาด 800 และ 1200 ตารางมิลลิเมตร
1	เกิน(สาย 800 mm <sup>2</sup> )	-
2	ไม่เกิน	2,168
3	ไม่เกิน	1,720

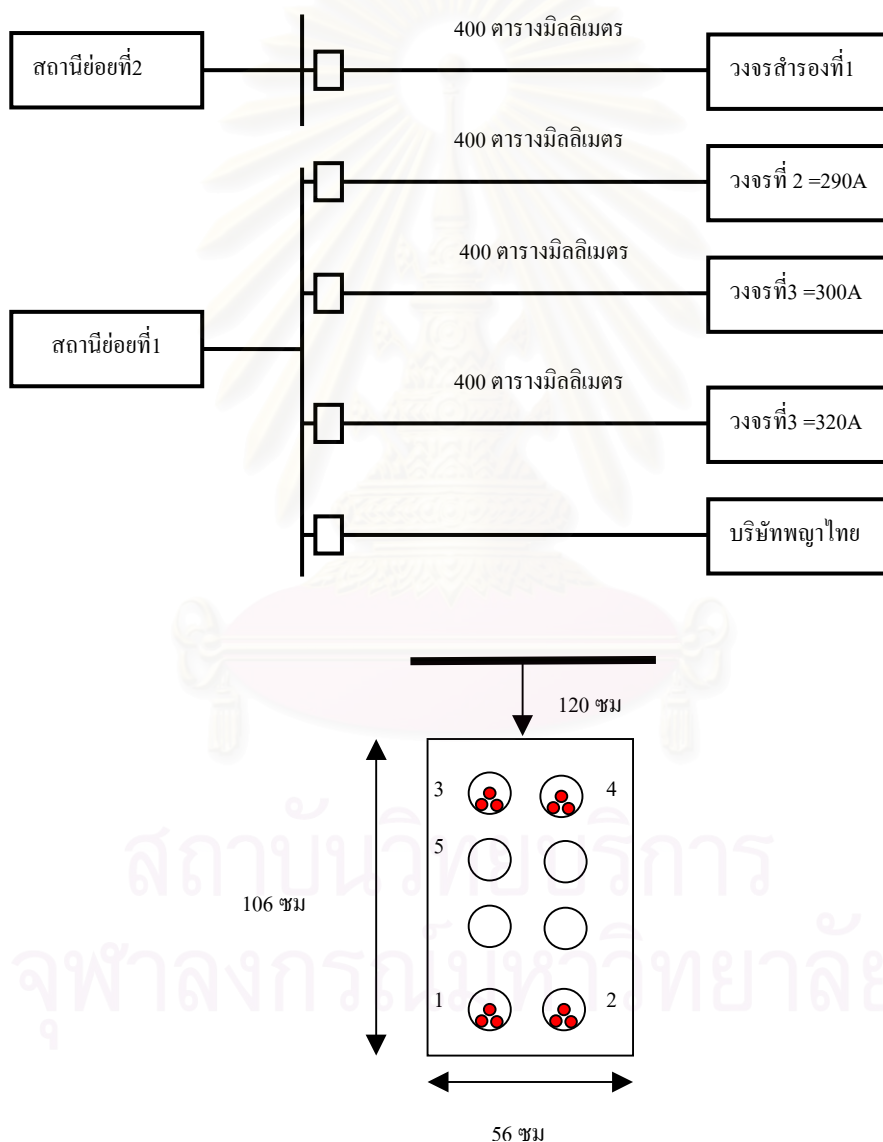
### สรุป

ในการคำนวณพิกัดของสายเคเบิลที่มีโครงสร้างของสายต่างกันและขนาดต่างกันควรต้องมีการพิจารณาพิกัดกระแสและอุณหภูมิของสายเคเบิลทั้งหมดไปพร้อมกันจึงจะได้ค่าพิกัดที่ถูกต้องและสามารถใช้งานจริงได้ การกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณในเงื่อนไขที่ 1 ไม่ได้มีการพิจารณาอุณหภูมิสายเคเบิล 400 ตารางมิลลิเมตรและ 800 ตารางมิลลิเมตร ร่วมด้วยหากนำไปติดตั้งใช้งานจริงอาจจะทำให้สายเคเบิลเหล่านี้เสียหายได้และ ตามตารางที่ 6.6-10 การเลือกกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณสายเคเบิลจะพบว่าเงื่อนไขที่ 2 จะให้ค่าพิกัดกระแสรวมสูงที่สุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.7 การใช้โปรแกรมคำนวณในการขยายวงจรเพิ่ม

มีการจ่ายไฟให้ลูกค้าในท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีตขนาด  $2 \times 4$  ตามรูปที่ 6.7-1 และสมมุติว่ามีลูกค้ารายใหญ่คือ บริษัทพญาไทยธานี มีโหลดเป็นโรงพยาบาลซึ่งมีความต้องการพิเศษที่จะรับไฟโดยตรงจากการไฟฟ้าเพื่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ขนาด 24 kV 6,000 kVA จะมีวิธีออกแบบติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินใหม่อย่างไรโดยที่ไม่กระทบกับพิกัดของสายเคเบิลเดิมที่ติดตั้งอยู่แล้ว



รูปที่ 6.7-1 ภาพการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินก่อนจ่ายไฟฟ้าให้บริษัทพญาไทยธานี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยสายภายนอกเท่ากับ 140 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อภายในเท่ากับ 123 มิลลิเมตรขนาดสายเคเบิลที่ใช้คำนวณจะใช้สายเคเบิลตามโครงสร้างการไฟฟ้านครหลวง. ความต้านทานทางความร้อนของดินและคอนกรีตที่ใช้หุ้มท่อร้อยสายมีค่าเท่ากับ 1 องศาเซลเซียส-เมตร/วัตต์ และอุณหภูมิของดินภายนอกท่อร้อยสายเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างท่อร้อยสายเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ความลึกของผิวดินถึงคอนกรีตเท่ากับ 1200 มิลลิเมตร ตำแหน่งติดตั้งคือวงจรถั้ว ตามรูปที่ 6.7-1 ใช้โปรแกรมที่ลองคำนวณในกรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งเพิ่มวงจรว่าอุณหภูมิในแต่ละวงจรมีค่าเท่าไรได้ดังนี้

ตารางที่ 6.7-1 ผลการคำนวณพิกัดกระแสในสายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตรที่ติดตั้งในรูปที่ 6.7-1

วงจรถั้ว	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	385	385	385	90	90	90
2	385	385	385	90	90	90
3	408	408	408	90	90	90
4	408	408	408	90	90	90

ตารางที่ 6.7-2 ผลการคำนวณอุณหภูมิในสายเคเบิลที่รับกระแสจริงก่อนปรับปรุงตามที่ติดตั้งในรูปที่ 6.7-1

วงจรถั้ว	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	0	0	0	-	-	-
2	290	290	290	55.74	55.90	55.70
3	300	300	300	57.95	58.06	58.43
4	320	320	320	60.16	59.82	59.76

บริษัทพญาไทยธานีใช้โหลดขนาด 24 kV 6,000 kVA คำนวณกระแสในสายเบิลที่สามารถรับได้ดังนี้

$$I = \frac{6000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 24 \times 10^3} = 144.337 \quad \text{A}$$

ลองเลือกขนาดสาย 70 ตารางมิลลิเมตรในการติดตั้งจะได้

ตารางที่ 6.7-3 ผลการคำนวณพิกัดกระแสสูงสุดในสายเคเบิ้ลขนาดสาย 70 ตารางมิลลิเมตร วงจรที่ 5 ตามที่ติดตั้งในรูปที่ 6.7-1

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	0	0	0	-	-	-
2	290	290	290	65.89	66.23	65.69
3	300	300	300	71.72	71.00	72.22
4	320	320	320	72.42	71.42	71.57
5	188	188	188	89.55	90.00	89.83

ตารางที่ 6.7-4 ผลการคำนวณอุณหภูมิในสายเคเบิ้ลขนาดสาย 70 ตารางมิลลิเมตรวงจรที่ 5 ที่กระแส 145 A ตามที่ติดตั้งในรูปที่ 6.7-1

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	0	0	0	-	-	-
2	290	290	290	61.13	61.39	61.00
3	300	300	300	65.37	65.01	65.86
4	320	320	320	66.87	66.17	66.23
5	145	145	145	70.99	71.42	71.25

ในกรณีฉุกเฉินสายเคเบิลวงจรที่ 1 จะทำงานแทนวงจรที่เกิดข้อผิดพลาด สมมติว่า วงจรที่ 4 เกิดผิดพลาดต้องให้สายเคเบิลวงจรที่ 1 รับภาระกระแสไหลทดแทนคำนวณในกรณีนี้ว่าจะมีผลทำให้วงจรอื่นมีอุณหภูมิเกิน 90 องศาเซลเซียสที่กำหนดหรือไม่

ตารางที่ 6.7-5 ผลการคำนวณอุณหภูมิในสายเคเบิลต่างๆ กรณีฉุกเฉินวงจรที่ 1 รับกระแสไหลทดแทนวงจรที่ 4 ตามที่ติดตั้งในรูปที่ 6.7-1

วงจรที่	กระแส(แอมแปร์)			อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)		
	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C	เฟสที่ A	เฟสที่ B	เฟสที่ C
1	320	320	320	68.23	68.70	68.61
2	290	290	290	65.86	65.78	65.25
3	300	300	300	63.83	63.09	63.87
4	0	0	0	-	-	-
5	145	145	145	71.27	71.25	71.34

จากผลการคำนวณตามตารางที่ 6.7-4 และ 6.7-5 สามารถใช้สายเคเบิลขนาด 70 ตารางมิลลิเมตรติดตั้งเพื่อจ่ายกระแสไหลทดของ บริษัทพญาไทยธานีได้ทั้งกรณีสภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉิน

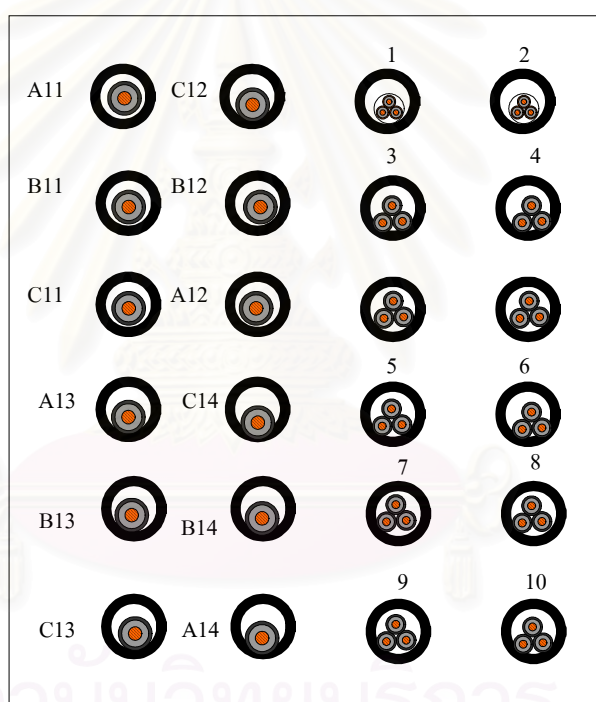
#### สรุป

การใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณสะดวกในการออกแบบและพิจารณาครอบคลุมถึงในสภาวะต่างๆ ได้ถูกต้องและลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.8 การใช้โปรแกรมคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลที่แต่ละวงจรมีโครงสร้างชนิดสายที่แตกต่างกัน

รูปที่ 6.8-1 แสดงการติดตั้งสายเคเบิลที่มีมีโครงสร้างสายเคเบิล, วิธีการต่อลงดิน, ตัวประกอบโหลด, ตัวประกอบกำลังและอื่นๆ ที่แตกต่างกันของแต่ละวงจร สามารถคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นดังนี้



รูปที่ 6.8-1 การติดตั้งสายเคเบิลหลายขนาดและรูปแบบการติดตั้งต่างกัน

ความต้านทานดิน = 100 โอห์ม-เซนติเมตร/วัตต์

ความต้านทานของคอนกรีตหุ้มที่ร้อยสาย = 100 โอห์ม-เซนติเมตร/วัตต์

ตารางที่ 6.8-1 ตำแหน่งติดตั้งของแต่ละวงจร ของรูป 6.8-1

วงจรที่	ตำแหน่ง	ตำแหน่ง	วงจรที่	ตำแหน่ง	ตำแหน่ง
	แกน X (ซม)	แกน Y (ซม)		แกน X (ซม)	แกน Y (ซม)
1	0	95	8	25	170
2	25	95	9	0	195
3	0	120	10	25	195
4	25	120	11	-75	95
5	0	145	12	-50	95
6	25	145	13	-75	145
7	0	170	14	-50	145

ตารางที่ 6.8-2 ข้อมูลของแต่ละวงจรของรูป 6.8-1

	วงจรที่						
	1	2	3	4	5	6	7
ชนิดสายตัวนำ	สายสาม แกน	สายสาม แกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน
วัสดุตัวนำ	ทองแดง	ทองแดง	อลูมิเนียม	อลูมิเนียม	ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง
อุณหภูมิสูงสุดในการทำงาน (°C)	90	90	80	80	85	85	90
จำนวนตัวนำในท่อร้อยสาย	1	1	3	3	3	3	3
ตัวประกอบโหลด	1	1	0.7	0.7	0.85	0.85	0.75
ตัวประกอบกำลัง	1	1	0.85	0.85	0.9	0.9	0.85
กระแสต่อเฟส (A)	0	0	60	80	120	150	0
ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	35	35	70	70	240	240	400
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยสาย ภายนอก(mm)	140	140	140	140	140	140	140
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยสาย ภายใน(mm)	123	123	123	123	123	123	123
วิธีการต่อลงดิน	-	-	แบบจุด เดียว	แบบจุด เดียว	แบบหลาย จุด	แบบหลาย จุด	แบบหลาย จุด
ระบบแรงดัน (kV)	0.6	12	12	24	24	24	24

ตารางที่ 6.8-2 ข้อมูลของแต่ละวงจร ของรูป 6.8-1 (ต่อ )

	วงจรที่						
	8	9	10	11	12	13	14
ชนิดสายตัวนำ	หนึ่ง แกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน	หนึ่งแกน
วัสดุตัวนำ	ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง
อุณหภูมิสูงสุดในการทำงาน ( °C)	90	90	90	85	85	90	90
จำนวนตัวนำในท่อร้อยสาย	3	3	3	1	1	1	1
ตัวประกอบโหลด	0.75	0.7	0.7	0.85	0.85	0.9	0.9
ตัวประกอบกำลัง	0.85	1	1	0.85	0.85	0.9	0.9
กระแสต่อเฟส (A)	0	300	300	400	400	0	0
ขนาดสาย (mm <sup>2</sup> )	400	400	400	800	800	1,200	1,200
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยสาย ภายนอก(mm)	140	140	140	140	140	140	140
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยสาย ภายใน(mm)	123	123	123	123	123	123	123
วิธีการต่อลงดิน	แบบ หลาย จุด	แบบจุด เดียว	แบบจุด เดียว	แบบหลาย จุด	แบบหลาย จุด	แบบจุด เดียว	แบบจุด เดียว
ระบบแรงดัน (kV)	24	24	24	115	115	69	69

จากการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณตามรูปแบบการติดตั้งในรูป 6.8-1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 6.8-3 แสดงผลการคำนวณ กระแสในสายเคเบิลและซิลด์

วงจรที่	พิกัดกระแส ในตัวนำ(แอมแปร์)			พิกัดกระแสในซิลด์โลหะ (แอมแปร์)		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	103	103	103	0	0	0
2	108	108	108	0	0	0
3	60	60	60	0	0	0
4	80	80	80	0	0	0
5	120	120	120	3	3	3
6	150	150	150	3	3	4
7	293	293	293	15	17	17
8	333	333	333	18	19	20
9	300	300	300	15	17	17
10	300	300	300	16	17	17
11	400	400	400	0	0	0
12	400	400	400	0	0	0
13	761	761	761	0	0	0
14	653	653	653	0	0	0

ตารางที่ 6.8-4 แสดงผลการคำนวณกำลังสูญเสีย

วงจรรที่	กำลังสูญเสียในตัวนำ วัตต์/เมตร			กำลังสูญเสียในซิลด์ วัตต์/เมตร			กำลังสูญเสียในฉนวน วัตต์/เมตร		
	1	6.83	6.81	6.83	0	0	0	0	0
2	7.49	7.46	7.47	0	0	0	0	0	0
3	1.85	1.85	1.85	0	0	0	0	0	0
4	3.31	3.30	3.30	0	0	0	0.01	0.01	0.01
5	1.34	1.34	1.34	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
6	2.09	2.09	2.09	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
7	5.10	5.10	5.10	0.20	0.26	0.27	0.02	0.02	0.02
8	6.59	6.58	6.57	0.29	0.33	0.34	0.02	0.02	0.02
9	5.33	5.34	5.32	0.20	0.25	0.26	0.02	0.02	0.02
10	5.29	5.29	5.28	0.23	0.26	0.26	0.02	0.02	0.02
11	4.66	4.76	4.77	0	0	0	0.28	0.28	0.28
12	4.70	4.81	4.83	0	0	0	0.28	0.28	0.28
13	13.04	13.13	13.05	0	0	0	0.16	0.16	0.16
14	9.59	9.66	9.59	0	0	0	0.16	0.16	0.16

ตารางที่ 6.8-5 แสดงผลการคำนวณ คุณณภูมิในสายเคเบิลของแต่ละวงจร

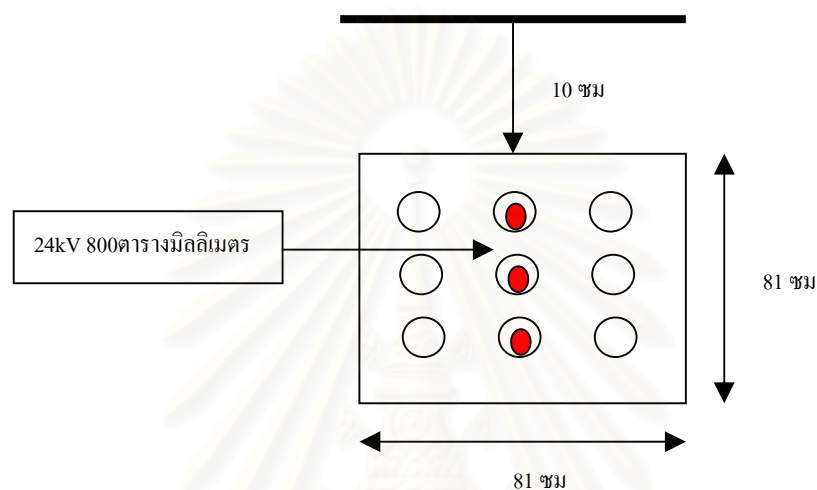
วงจรที่	คุณณภูมิในตัวนำ(องศาเซลเซียส)		
	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	89.83	89.23	90.00
2	90.00	89.08	89.42
3	81.45	81.25	81.45
4	82.90	82.49	82.37
5	82.24	81.86	82.10
6	81.01	80.36	80.26
7	90.00	89.97	89.91
8	90.00	89.55	89.06
9	87.71	88.34	87.61
10	85.25	85.48	84.43
11	67.73	75.67	76.53
12	71.02	79.16	81.6
13	86.66	90	87.27
14	86.84	90.00	87.01

### สรุป

โปรแกรมนี้สามารถคำนวณค่าพิกัดกระแสและคุณณภูมิของสายเคเบิลในแต่ละวงจรที่มีชนิดสายเคเบิล, ระบบแรงดัน, วิธีต่อลงดิน, กระแสไหลด, ตัวประกอบไหลด, ตัวประกอบกำลัง รูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกันได้

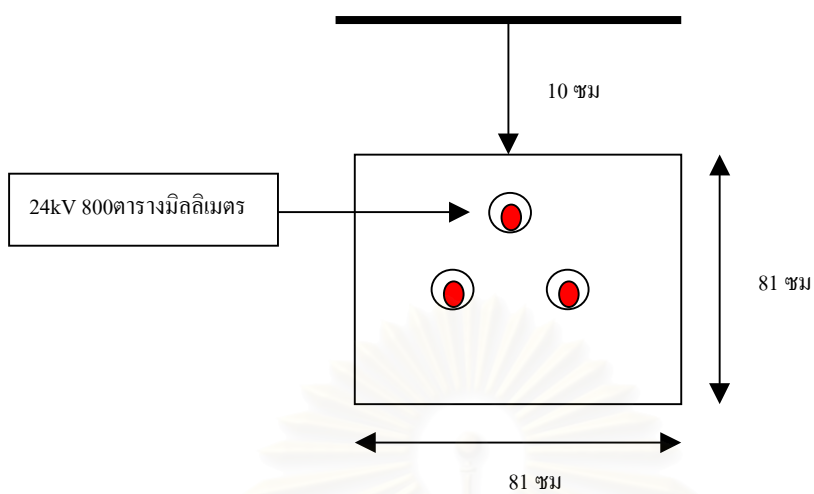
## 6.9 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำในซิลต์โลหะกรณีสายเคเบิลต่อลงดินแบบจุดเดียว

ใช้โปรแกรมคำนวณในกรณีวิธีการต่อลงดินแบบจุดเดียวของสายเคเบิลขนาด 800 มิลลิเมตร กำหนดให้  $S$  คือระยะห่างระหว่างเฟส และ  $d_s$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของซิลต์โลหะ สามารถคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่ระยะห่างระหว่างเฟสต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 6.9-1 การติดตั้งในแนวตั้งของสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร ตารางที่ 6.9-1 ผลการคำนวณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะตามรูปที่ 6.9-1

S/d <sub>s</sub>	แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดในวงจร (โวลต์/เมตร)		
	I=1,000 A, R <sub>s</sub> =703 μΩ/m	I=500 A, R <sub>s</sub> =703 μΩ/m	I=1000 A, R <sub>s</sub> =1,400 μΩ/m
4	0.188	0.094	0.188
5	0.205	0.102	0.205
6	0.218	0.109	0.218
7	0.230	0.115	0.230
8	0.239	0.12	0.239
9	0.248	0.124	0.248
10	0.256	0.128	0.256
20	0.308	0.154	0.308



รูปที่ 6.9-2 การติดตั้งแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า

ตารางที่ 6.9-2 ผลการคำนวณแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขั้วดีโละตามรูปที่ 6.9-2

S/ds	แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดในวงจร (โวลต์/เมตร)		
	I=1,000 A, Rs=703 $\mu\Omega$ /m	I=500 A, Rs=703 $\mu\Omega$ /m	I=1000 A, Rs=1,400 $\mu\Omega$ /m
4	0.153	0.077	0.153
5	0.170	0.85	0.170
6	0.184	0.092	0.184
7	0.195	0.098	0.195
8	0.205	0.103	0.205
9	0.214	0.107	0.214
10	0.222	0.111	0.222
20	0.274	0.137	0.274

## สรุป

1. วิธีการต่อลงดินแบบจุดเดียวมีข้อดีคือสามารถช่วยเพิ่มค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลได้แต่ก็มีข้อเสียคือจะมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ซิลต์โลหะของสายเคเบิลจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของสายเคเบิล
2. แรงดันเหนี่ยวนำในสายเคเบิลจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดสายเคเบิลและความต้านทานซิลต์โลหะแต่จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสายเคเบิลและกระแสในสายเคเบิล
3. การวางสายเคเบิลให้ระยะห่างระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นก็จะทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
4. การวางสายในลักษณะรูป 6.9-2 จะทำให้ได้แรงดันเหนี่ยวนำที่ซิลต์น้อยกว่าแบบในรูป 6.9-1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

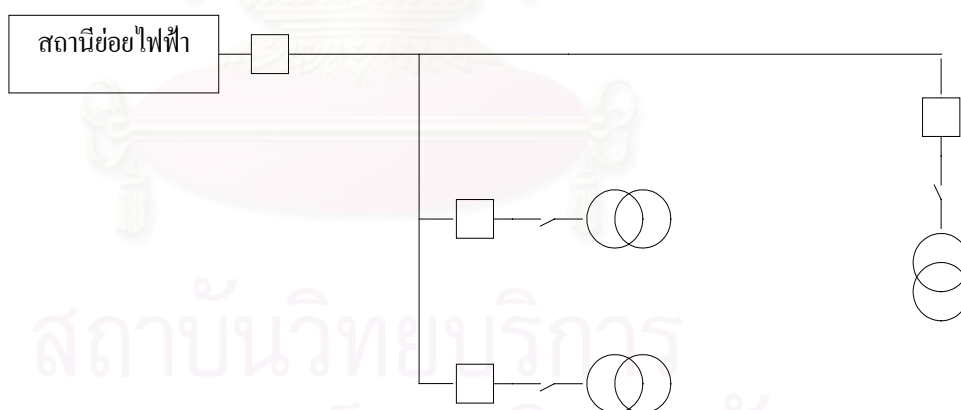
## 6.10 การประเมินราคาการก่อสร้างสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

การออกแบบการก่อสร้างสายไฟฟ้าใต้ดินเพื่อจ่ายกระแสไหลดในสายบ่อนของการไฟฟ้า นครหลวง มีรูปแบบทั่วไปดังนี้

- แบบเรเดียล (Radial )
- แบบการเลือกสายบ่อน (Primary Selective)
- แบบอนุกรมเปิดลูป (Series Open Loop)
- แบบการสำรองสายบ่อน (special spare line)

### แบบเรเดียล

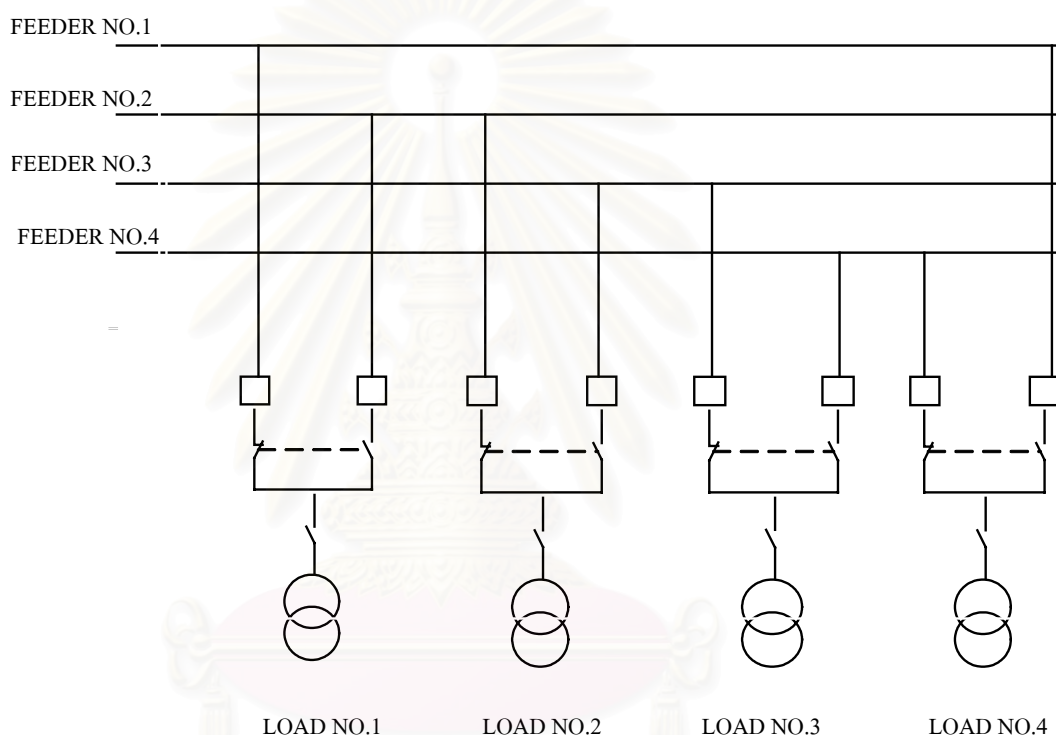
แบบนี้จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปให้ลูกค้าโดยตรงไม่มีสายบ่อนสำรองในกรณีสายบ่อนเกิดเหตุผิดปกติ ใช้สายบ่อนขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร ยอมให้จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 300 แอมแปร์ ระบบนี้ปัจจุบันไม่นิยมใช้แล้วในระบบสายบ่อนในการไฟฟ้านครหลวงแสดงดังภาพที่ 6.10-1



รูปที่ 6.10-1 ระบบการจ่ายไฟแบบเรเดียล

### แบบเลือกสายป้อน

แบบนี้จะใช้สายป้อนขนาดเดียวกันคือ 400 มิลลิเมตรยอมให้จ่ายกระแสได้ 320 แอมแปร์ ระบบนี้จะมี 2 สายป้อนประกอบด้วยสายป้อนหลักและสายป้อนสำรองอย่างละหนึ่งสาย ป้อนไว้เปลี่ยนสลับในกรณีสายป้อนใดสายป้อนหนึ่งมีปัญหา แสดงดังรูปที่ 6.10-2

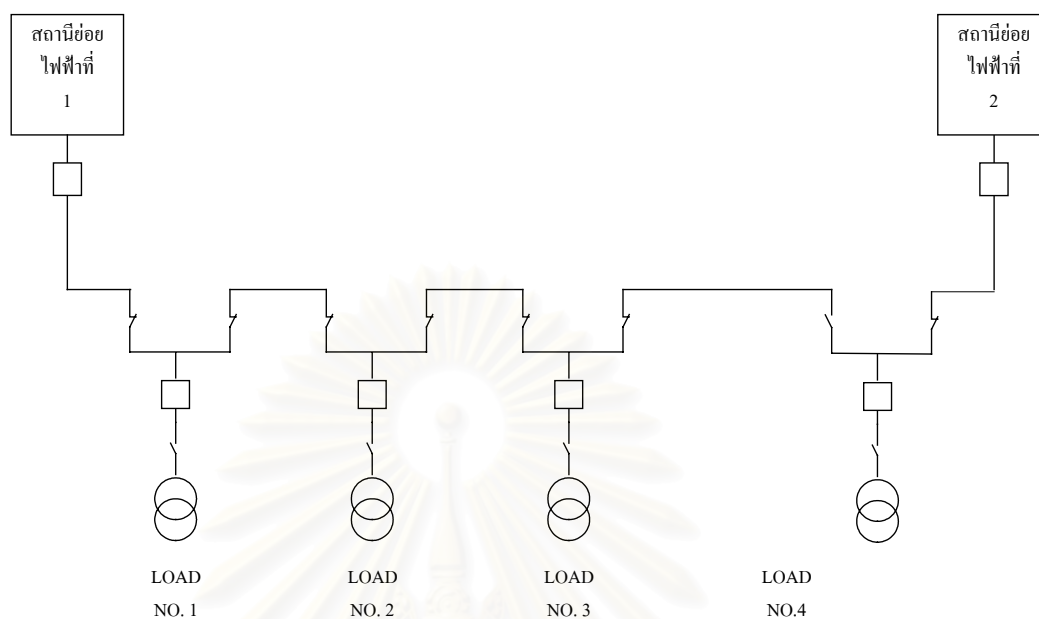


รูปที่ 6.10-2 ระบบการจ่ายไฟแบบเลือกสายป้อน

### แบบอนุกรมเปิดดูป

แบบนี้จะใช้สายป้อนขนาดเดียวกันคือ 400 มิลลิเมตรยอมให้จ่ายกระแสได้ 320 แอมแปร์ ระบบนี้จะมีสองสายป้อนจ่ายกระแสในลักษณะอนุกรมแต่ไม่ได้สับชนทั้งสองสายป้อนในกรณีที่สายป้อนใดสายป้อนหนึ่งมีปัญหาจะมีการสับชนอีกสายป้อนเข้ามาจ่ายกระแสไหลทดแทนแสดงดังรูปที่ 6.10-3





รูปที่ 6.10-3 ระบบการจ่ายไฟแบบอนุกรมเปิดลูป

#### แบบการสำรวจสายป้อน

แบบนี้มีทั้งหมด 4 สายป้อนจ่ายกระแสปกติ 3 สายป้อนสำรวจไว้จ่ายกระแสกรณีฉุกเฉิน 1 สายป้อน ใช้สายขนาด 400 ตารางมิลลิเมตรยอมให้จ่ายกระแสได้ 320 แอมแปร์ จำนวนจุดต่อจะไม่เกิน 3 จุด ยกเว้นสายป้อนสำรวจ โดยจุดต่อแยกในแต่ละสายป้อนย่อยที่ต่อจากสายป้อนหลักจะใช้ขนาด 240 ตารางมิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 6.10-4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การไฟฟ้ามีโครงการจะเปลี่ยนระบบการจ่ายไฟจากระบบสายอากาศเป็นระบบสายเคเบิลใต้ดินแห่งหนึ่งที่มีระบบการจ่ายไฟฟ้าแบบสำรองสายบ่อนดงรูปที่ 6.10-5 เราจะใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาขนาดสายเคเบิลที่จะติดตั้งให้เหมาะสมโดยเปรียบเทียบกับวิธีติดตั้งของการไฟฟ้านครหลวงและข้อมูลในระบบการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งประมาณค่าได้ดังนี้

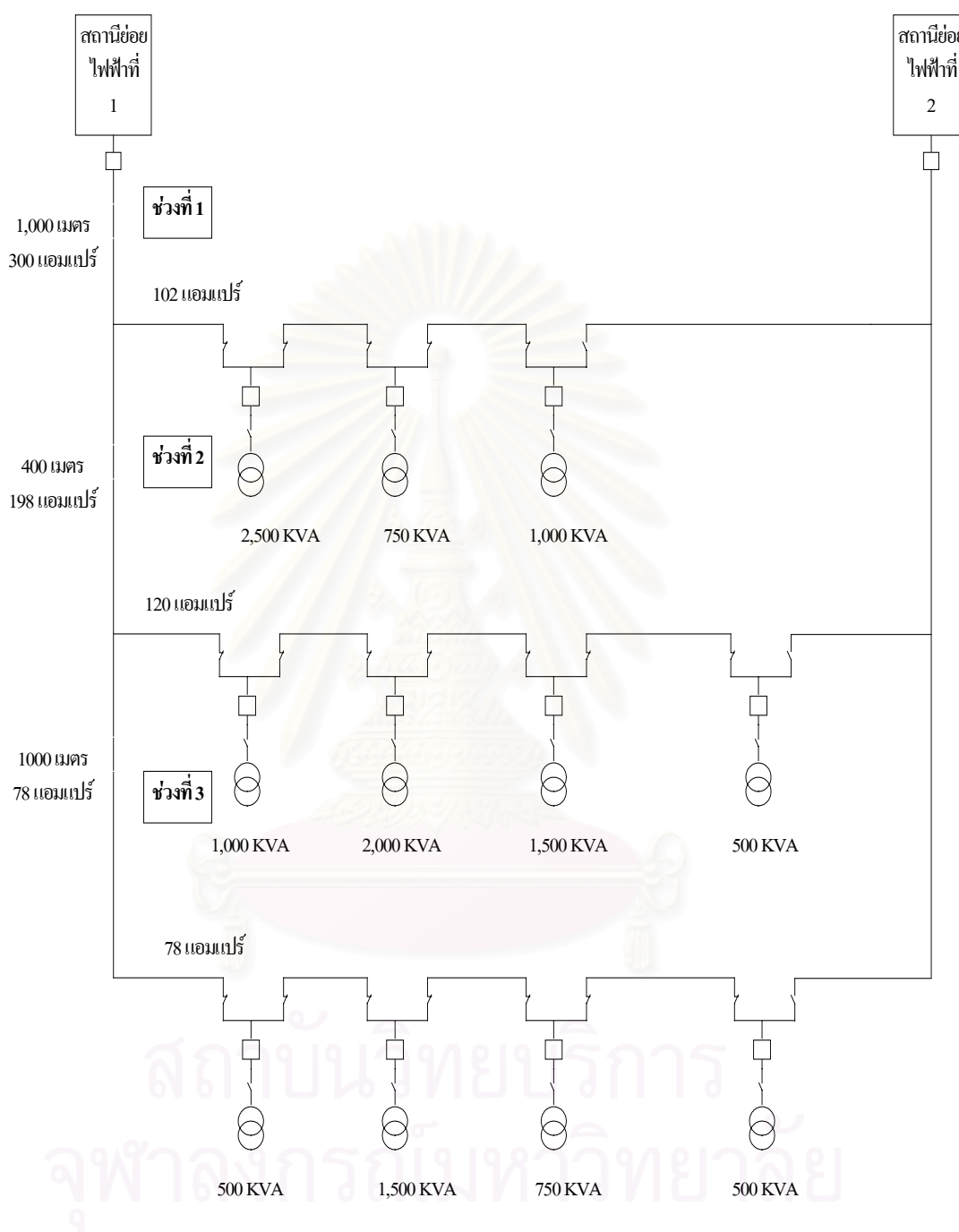
- การเพิ่มขึ้นของโหลดต่อปี เท่ากับ 1 % (โหลดเกือบคงที่)
- การเพิ่มขึ้นของราคาเท่ากับ 4.7%
- การเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานสูงสุด เท่ากับ1%(โหลดเกือบคงที่)
- ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 0.196 บาท/วัตต์
- ราคาพลังงานที่ 1 วัตต์-ชม เท่ากับ1.7034 บาท
- กระแสโหลดในปีแรก 300 แอมแปร์
- อัตราการเสื่อมราคากำหนดให้ เท่ากับ 5%
- อายุการใช้งานของสายเคเบิลใต้ดินเท่ากับ 30 ปี
- ตัวประกอบโหลดเท่ากับ 0.75
- ราคาที่มีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวนำ 3.2 บาท/เมตร.พื้นที่หน้าตัดตัวนำ

ใช้โปรแกรมคำนวณค่าพิกัดกระแสของ วงจรที่ 1 ในรูปที่ 6.10-6 และ 6.10-7 ที่พิจารณาขนาดสายเคเบิลต่างๆดังนี้

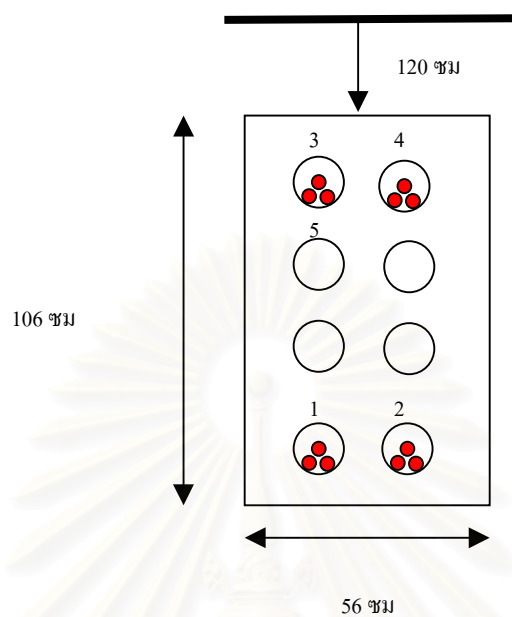
ตารางที่ 6.10-1 แสดงค่าพิกัดกระแสที่ขนาดสายต่างๆ

ขนาดสายเคเบิล (ตารางมิลลิเมตร)	พิกัดกระแสวงจร ที่ 1	ปรากฏการณ์ ทางผิว	ปรากฏการณ์ ความใกล้เคียง	อัตราส่วนการ สูญเสียของซิลด์ โลหะ
35	129	0.0002	0.0001	0.00188
70	185	0.0008	0.0006	0.00366
120	248	0.0024	0.0021	0.007
240	357	0.0094	0.0105	0.0305
400	454	0.0257	0.0368	0.0489
500	504	0.0398	0.0584	0.0577
800	720	0.1027	0.0060	0

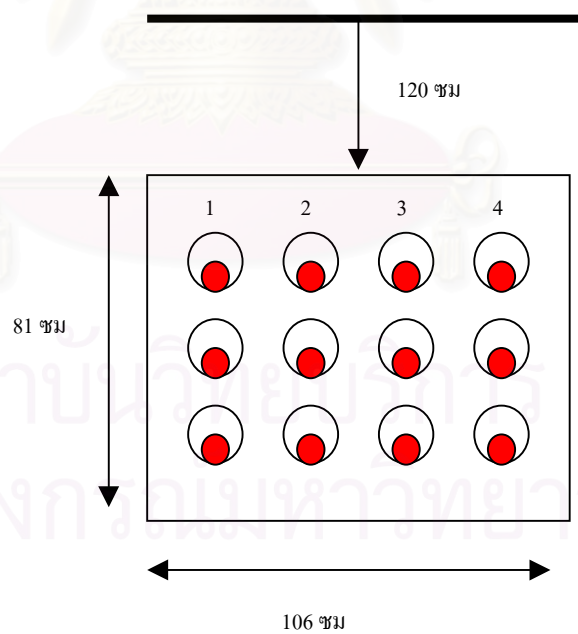
หมายเหตุ สายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตรตารางที่ 6.10-1 ติดตั้ง เส้นในท่อวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียว



รูปที่ 6.10-5 ระบบการจ่ายไฟสำหรับสายป้อนที่ถนนพหลโยธิน



รูปที่ 6.10- 6 การติดตั้งระบบสำรองสายป้อนสำหรับสายเคเบิลไม่เกิน 800 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 6.10- 7 การติดตั้งระบบสำรองสายป้อนสำหรับสายเคเบิล 800 ตารางมิลลิเมตร

ราคาการก่อสร้างท่อร้อยสายหุ้มคอนกรีตจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดสายเคเบิลมากนักจึงกำหนดให้มีค่าคงที่สำหรับการติดตั้งสายเคเบิลทั้งหมด ลองใช้โปรแกรมวิเคราะห์เพื่อเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการลงทุนเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานสายเคเบิลดังนี้

แบบที่ 1 เลือกขนาดสายป้อนเดียว 400 ตารางมิลลิเมตร ตามรูปแบบการติดตั้งของการไฟฟ้านครหลวง สามารถใช้โปรแกรมคำนวณค่าได้ตามตารางที่ 6.10-2 ดังนี้

ตารางที่ 6.10- 2 ราคาสายและค่าใช้จ่ายกำลังสูญเสียตลอดอายุการใช้งาน 30 ปีเมื่อใช้สายขนาดเดียว 400 ตารางมิลลิเมตร

ช่วง การ เดิน สาย เคเบิล	กระแส เริ่มต้น ปีแรก	กระแส ของปี สุดท้าย	ขนาด สาย	กระแส ของ สาย เคเบิลที่ รับได้	ราคา เคเบิลใน แต่ละ ช่วง	ราคา กำลังสูญเสีย ในตัว นำ	ราคา กำลัง สูญเสีย จาก กระแส อัด ประจุ	ราคา กำลัง สูญเสีย จากได อิเล็ก ตริก	ราคา รวม
	(A)	(A)	(mm <sup>2</sup> )	(A)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)
1	300	400.3	400	454	1280,00 0	5,427,07 8	115.42	185,700	6,892,893
2	198	264.23	400	454	512,000	881,670	6.89	74,280	1,467,957
3	78	104.09	400	454	1280,00 0	327,751	103.11	185,700	1,793,555
รวมราคาทั้งหมด									10,154,405

แบบที่ 2 เลือกลักษณะสายเคเบิลโดยใช้โปรแกรมหาขนาดสายที่เหมาะสม

ตารางที่ 6.10- 3 ราคาสายและค่าใช้จ่ายกำลังสูญเสียตลอดอายุการใช้งาน 30 ปีที่ใช้โปรแกรมเลือกขนาดสายเคเบิล

ช่วง การ เดิน สาย เคเบิล	กระแส เริ่มต้น ปีแรก (A)	กระแส ของปี สุดท้าย (A)	ขนาด สาย (mm <sup>2</sup> )	กระแส ของ สาย เคเบิลที่ รับได้ (A)	ราคา เคเบิลใน แต่ละ ช่วง (บาท)	ราคา กำลังสูญเสีย ในตัว นำ (บาท)	ราคา กำลัง สูญเสีย จาก กระแส อัด ประจุ (บาท)	ราคา กำลัง สูญเสีย จากได อิเล็ก ตริก (บาท)	ราคารวม (บาท)
1	300	400.3	800	720	2,560,000	2,505,644	100.58	255,122	5,320,867
2	198	264.2	500	504	640,000	728,037	7.1	83,008	1,451,052
3	78	104.09	240	357	768,000	517,600	112	154,052	1,439,765
รวมราคาทั้งหมด									8,211,683

ตารางที่ 6.10- 4 ตารางเปรียบเทียบราคาก่อสร้างระหว่างแบบติดตั้งของ กฟน. และแบบโปรแกรมเลือกขนาดสายเคเบิล

รูปแบบการติดตั้ง	ราคารวมทั้งหมด	เปอร์เซ็นต์
กฟน.	10,154,405	100
โปรแกรมคำนวณ	8,211,683	80.87
ผลต่างราคา		19.13

## สรุป

1. ตารางที่ 6.10-4 จะเห็นได้ว่าหากใช้โปรแกรมคำนวณเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมจะประหยัดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานกว่า 19 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ เกือบ 2 ล้านบาทเมื่อเทียบกับการติดตั้งแบบสายเคเบิลขนาดเดียวของการไฟฟ้า เนื่องจากการใช้โปรแกรมเลือกขนาดสายจะช่วยลดค่าใช้จ่ายจากกำลังสูญเสีย

2. การติดตั้งแบบการเลือกสายป้อน และแบบอนุกรมเปิดรูป ไม่เหมาะที่จะใช้โปรแกรมคำนวณเพื่อเลือกขนาดสายเคเบิลเนื่องจากมีการสลับสายป้อนในกรณีเกิดเหตุผิดปกติทำให้มีการจ่ายไฟย้อนกลับทิศทางได้หรือมีลักษณะการต่อโหลดในสายป้อนเปลี่ยนไป การเลือกใช้สายเคเบิลที่มีหลายขนาดจึงไม่เหมาะสมในการใช้งานจริง

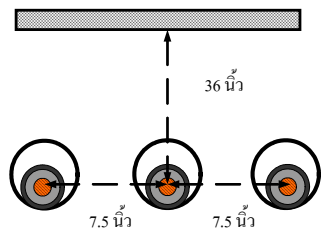
3. การติดตั้งแบบสำรองสายป้อนสามารถใช้โปรแกรมคำนวณในการเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการติดตั้งของแต่ละช่วงติดตั้งสายป้อนได้ถึงแม้จะมีการสลับเป็นสายป้อนสำรองในกรณีฉุกเฉิน เนื่องจากสายป้อนย่อยใช้ขนาดเดียว



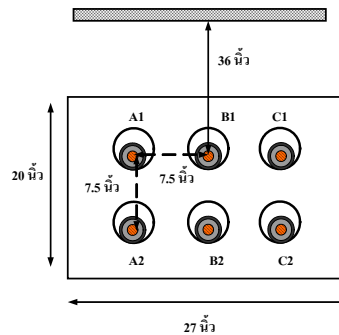
## 6.11 การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับโปรแกรมของEPRI และมาตรฐาน IEEE 835 (1994)

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างอิงวิธีการคำนวณตามมาตรฐาน IEC 60287 เป็นหลัก สำหรับมาตรฐาน IEEE 835 จะมีการอ้างอิงการคำนวณตามมาตรฐานของ IEC 60287 แต่มีความแตกต่างกันที่ชัดเจนคือมาตรฐาน IEC 60287 จะใช้สำหรับการคำนวณเฉพาะที่ตัวประกอบโหลดเท่ากับหนึ่งเท่านั้น ส่วนมาตรฐาน IEEE 835 สามารถคำนวณที่ตัวประกอบโหลดไม่เท่ากับหนึ่งได้ ซึ่งเงื่อนไขในการคำนวณเปรียบเทียบจะมีดังนี้ [7]

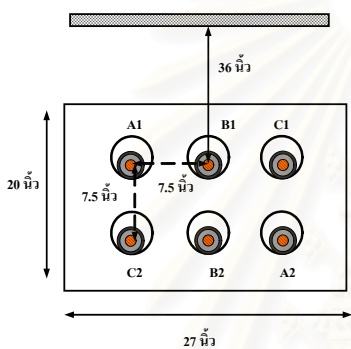
อุณหภูมิดิน	=25 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสูงสุดของสาย	=75 หรือ 90 องศาเซลเซียส
ชนิดของตัวนำ	= อลูมิเนียม หรือ ทองแดง
ความต้านทานของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย	=60 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์
วิธีการต่อลงดิน	=แบบหลายจุด และ open คือแบบจุดเดียว
ชนิดท่อของการติดตั้งท่อหุ้มคอนกรีต	=ไฟเบอร์
การติดตั้ง	=สายเคเบิลเส้นเดียวและสามเส้นในท่อ
ชนิดสาย	=ใช้สายเคเบิลชนิด 3 และ 4 ตามมาตรฐานของ IEEE 835
แรงดัน	=46กิโลโวลต์ สำหรับสายเคเบิลชนิดที่ 3 และ 138 kV สำหรับสายเคเบิลชนิดที่ 4และ



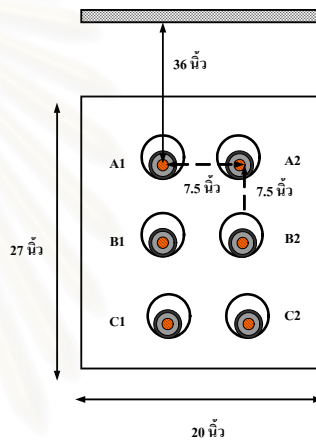
แบบติดตั้งที่ 1



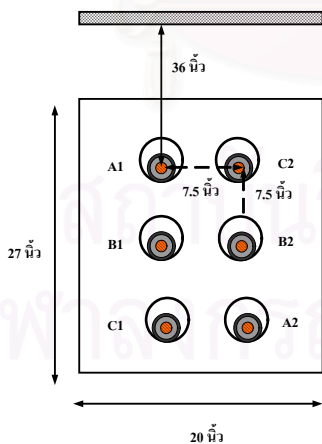
แบบติดตั้งที่ 2



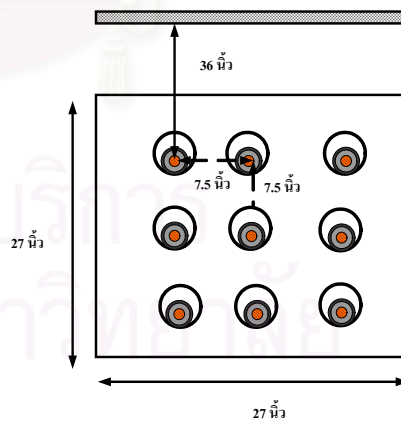
แบบติดตั้งที่ 3



แบบติดตั้งที่ 4

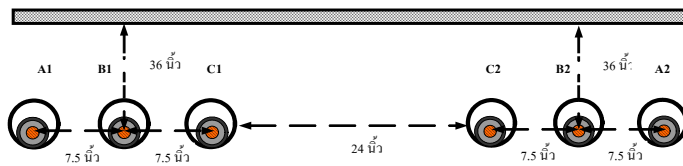


แบบติดตั้งที่ 5

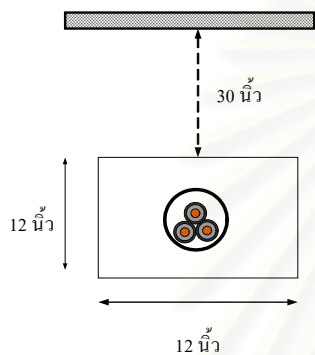


แบบติดตั้งที่ 6

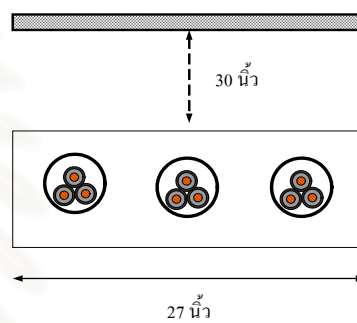
รูปที่ 6.11-1 รูปแบบการติดตั้งสายเคเบิลชนิดที่ 3



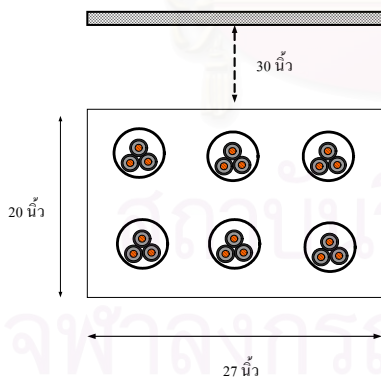
แบบติดตั้งที่ 7



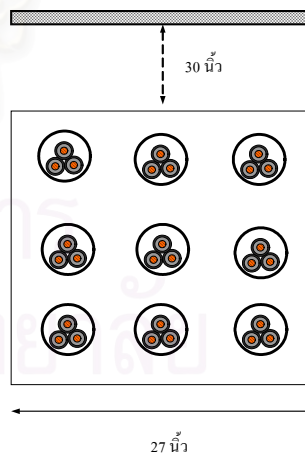
แบบติดตั้งที่ 8



แบบติดตั้งที่ 9

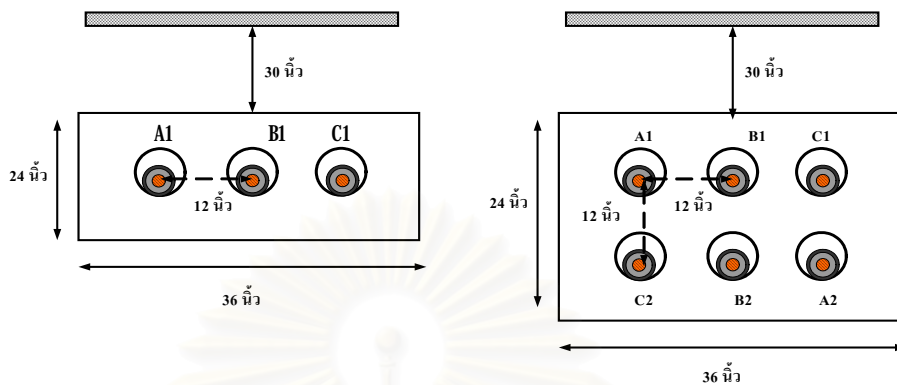


แบบติดตั้งที่ 10



แบบติดตั้งที่ 11

รูปที่ 6.11-2 รูปแบบการติดตั้งสายเคเบิลชนิดที่ 3



แบบติดตั้งที่ 12

แบบติดตั้งที่ 13

รูปที่ 6.11-3 รูปแบบการติดตั้งสายเคเบิลชนิดที่ 4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.11-1 ผลการคำนวณการติดตั้งแบบที่ 1 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	325	322	-0.92	326	0.31
500-1/6	414	408.3	-1.38	406	-1.93
1000-1/6	476	460.6	-3.24	457	-3.99
1250-1/6	494	488.8	-1.05	482	-2.43
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	380	382	0.53	378	-0.53
500-1/6	487	481	-1.23	474	-2.67
1000-1/6	573	551	-3.84	544	-5.06
1250-1/6	597	586	-1.84	578	-3.18
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม, T <sub>c</sub> =75 °C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	271	279	2.95	276	1.85
500-1/6	372	378.6	1.77	373	0.27
1000-1/6	467	463.2	-0.81	458	-1.93
1250-1/6	490	509	3.88	490	0.00

ตารางที่ 6.11-2 การติดตั้งแบบที่ 2 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง(%)
250-1/6	270.8	272	0.44
500-1/6	320.6	321	0.12
1000-1/6	356	358	0.56
1250-1/6	369.4	372	0.70
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง(%)
250-1/6	326	330	1.23
500-1/6	390	394	1.03
1000-1/6	444	447	0.68
1250-1/6	468.3	457	-2.41
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม, T <sub>c</sub> =75 °C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง(%)
250-1/6	210	209	-0.48
500-1/6	273	281	2.93
1000-1/6	322	324	0.62
1250-1/6	347.5	339	-2.45

ตารางที่ 6.11-3 การติดตั้งแบบที่ 3 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง(%)
250-1/6	283	285	0.71
500-1/6	361	362	0.28
1000-1/6	414.4	417	0.63
1250-1/6	428.7	430	0.30
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง(%)
250-1/6	343	347	1.17
500-1/6	443	448	1.13
1000-1/6	522	529	1.34
1250-1/6	548.2	550	0.33
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม, T <sub>c</sub> =75 °C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง(%)
250-1/6	214	216	0.93
500-1/6	290	301	3.79
1000-1/6	371	375	1.08
1250-1/6	407	398	-2.21

ตารางที่ 6.11-4 การติดตั้งแบบที่ 4 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำ ทองแดง ,T <sub>c</sub> =90 °C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง( %)
250-1/6	266.8	262	-1.80
500-1/6	314.3	320	1.81
1000-1/6	350	352	0.57
1250-1/6	370.6	369	-0.43
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำ ทองแดง,T <sub>c</sub> =90 °C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง( %)
250-1/6	322	318	-1.2
500-1/6	385.5	393	1.9
1000-1/6	436.9	438	0.3
1250-1/6	469	463	-1.3
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม ,T <sub>c</sub> =75 °C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง( %)
250-1/6	213	208	-2.3
500-1/6	276	281	1.8
1000-1/6	315	324	2.9
1250-1/6	344	339	-1.5



ตารางที่ 6.11-5 การติดตั้งแบบที่ 5 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำ ทองแดง ,T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	272	282	3.68	284	4.41
500-1/6	349	357	2.29	361	3.44
1000-1/6	401	410.3	2.32	412	2.74
1250-1/6	414	432.7	4.52	428	3.38
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำ ทองแดง,T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	342	341	-0.29	330	-3.51
500-1/6	448	440	-1.79	445	-0.67
1000-1/6	526	519	-1.33	520	-1.14
1250-1/6	547	552	0.91	546	-0.18
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม ,T <sub>c</sub> =75 °C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	214	218	1.87	216	0.93
500-1/6	291	297	2.06	301	3.44
1000-1/6	363	369	1.65	377	3.86
1250-1/6	381	404	6.04	400	4.99

ตารางที่ 6.11-6 การติดตั้งแบบที่ 6 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง( %)
250-1/6	270	246	-8.89
500-1/6	387.3	349	-9.89
1000-1/6	548	531	-3.10
1250-1/6	611	587	-3.93
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	EPRI	โปรแกรม	
	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าแตกต่าง( %)
250-1/6	336	336	0.00
500-1/6	488	485	-0.61
1000-1/6	703	692	-1.56
1250-1/6	792	774	-2.27

ตารางที่ 6.11-7 การติดตั้งแบบที่ 7 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	IEEE 835	โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด( %)
250-1/6	298	299	0.34
500-1/6	372	367	-1.34
1000-1/6	423	410	-3.07
1250-1/6	437	430	-1.60
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	IEEE 835	โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด( %)
250-1/6	357	357	0.00
500-1/6	454	444	-2.20
1000-1/6	526	504	-4.18
1250-1/6	547	533	-2.56
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม, T <sub>c</sub> =75 °C		
	IEEE 835	โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด( %)
250-1/6	244	240	-1.64
500-1/6	329	316	-3.95
1000-1/6	404	398	-1.49
1250-1/6	422	415	-1.66

ตารางที่ 6.11-8 การติดตั้งแบบที่ 8 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	309	315.5	2.10	316	2.27
500-1/6	433	445.8	2.96	450	3.93
1000-1/6	561	581.7	3.69	587	4.63
1250-1/6	601	616.6	2.60	616	2.50
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	345	349.2	1.22	353	2.32
500-1/6	502	499	-0.60	511	1.79
1000-1/6	668	668.7	0.10	681	1.95
1250-1/6	728	712	-2.20	719	-1.24

ตารางที่ 6.11-9 การติดตั้งแบบที่ 9 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	231	246.7	6.80	240	3.90
500-1/6	316	342	8.23	332	5.06
1000-1/6	396	433	9.34	409	3.28
1250-1/6	415	454.9	9.61	421	1.45
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	292	298.8	2.33	298	2.05
500-1/6	405	420	3.70	419	3.46
1000-1/6	520	546	5.00	533	2.50
1250-1/6	555	577	3.96	553	-0.36

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.11-10 การติดตั้งแบบที่ 10 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	173	195.8	13.18	188	8.67
500-1/6	232	270	16.38	249	7.33
1000-1/6	282	338	19.86	300	6.38
1250-1/6	291	354	21.65	306	5.15
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส (A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
250-1/6	234	251	7.26	245	4.70
500-1/6	319	351	10.03	338	5.96
1000-1/6	397	448	12.85	420	5.79
1250-1/6	416	473.4	13.80	432	3.85

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.11-11 การติดตั้งแบบที่ 11 สายเคเบิลชนิดที่ 3

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	IEEE 835	โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด( %)
250-1/6	147	151	2.72
500-1/6	195	202	3.59
1000-1/6	232	243	4.74
1250-1/6	237	249	5.06
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C		
	IEEE 835	โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด( %)
250-1/6	203	211	3.94
500-1/6	273	287	5.13
1000-1/6	334	355	6.29
1250-1/6	347	367	5.76
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำอลูมิเนียม, T <sub>c</sub> =75 °C		
	IEEE 835	โปรแกรม	
	ค่าพิกัดกระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด( %)
250-1/6	136	118	-13.24
500-1/6	158	163	3.16
1000-1/6	204	212	3.92
1250-1/6	216	225	4.17

ตารางที่ 6.11-12 การติดตั้งแบบที่ 12 สายเคเบิลชนิดที่ 4

ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัด กระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
750-138	533	535	0.38	533	0.00
750-open	654	692	5.81	683	4.43
1000-138	591	588	-0.51	586	-0.85
1000-open	757	802.9	6.06	792	4.62
1250-138	635	629.9	-0.80	627	-1.26
1250-open	843	895.1	6.18	883	4.74
1500-open	916	974.8	6.42	962	5.02
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัด กระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
750-138	639	615	-3.76	618	-3.29
750-open	768	783.3	1.99	782	1.82
1000-138	715	681	-4.76	684	-4.34
1000-open	895	914	2.12	912	1.90
1250-138	773	733	-5.17	736	-4.79
1250-open	1002	1024.3	2.23	1022	2.00
1500-open	1093	1119.7	2.44	1117	2.20



ตารางที่ 6.11-13 การติดตั้งแบบที่ 13 สายเคเบิลชนิดที่ 4

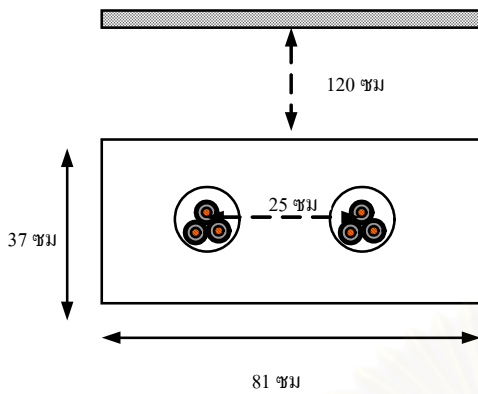
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 120 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 1 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัด กระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
750-138	440	456.5	3.75	429	-2.50
750-open	530	568.6	7.28	560	5.66
1000-138	487	504.5	3.59	497	2.05
1000-open	610	655.5	7.46	645	5.74
1250-138	524	542	3.44	533	1.72
1250-open	679	728	7.22	716	5.45
1500-open	734	789.7	7.59	776	5.72
ขนาดสาย เคเบิล (mm <sup>2</sup> )	ความต้านทานดิน 90 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์ และLF= 0.75 ตัวนำทองแดง, T <sub>c</sub> =90°C				
	IEEE 835	EPRI		โปรแกรม	
	ค่าพิกัด กระแส(A)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)	ค่าคำนวณได้ (A)	ค่าผิดพลาด (%)
750-138	561	565.8	0.86	532	-5.17
750-open	668	691	3.44	688	2.99
1000-138	626	630	0.64	628	0.32
1000-open	774	802.4	3.67	798	3.10
1250-138	677	680	0.44	636	-6.06
1250-open	863	896	3.82	890	3.13
1500-open	937	975	4.06	969	3.42

หมายเหตุ : บางตารางที่ไม่มีการเปรียบเทียบกับ EPRI หรือ IEEE 835 เนื่องจากไม่มีรูปแบบการติดตั้ง  
ในเงื่อนไขที่กำหนด

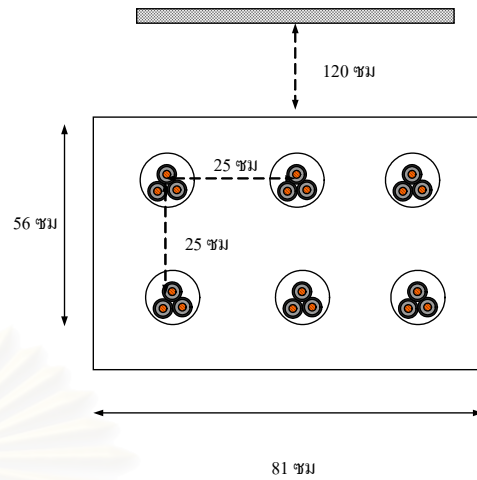
## 6.12 การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับมาตรฐานการติดตั้งของการไฟฟ้านครหลวง

ใช้โปรแกรมลงคำนวณเปรียบเทียบกับมาตรฐานการติดตั้งของการไฟฟ้านครหลวงแบบหมายเลข UG-4-310 และแบบหมายเลข UG -4-410 ซึ่งมีเงื่อนไขในการคำนวณดังนี้

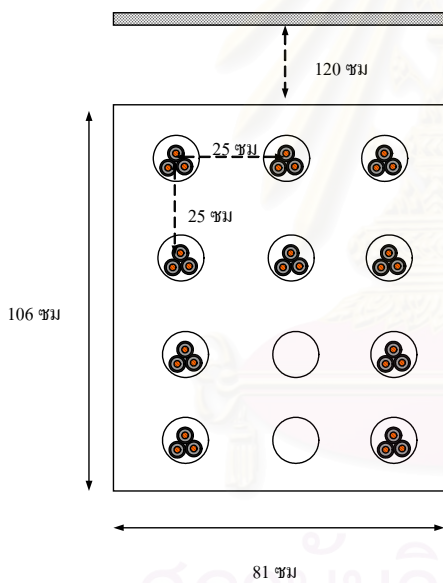
อุณหภูมิดิน	= 30 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิสูงสุดของสาย	= 90 องศาเซลเซียส
ชนิดของตัวนำ	= ตามภาคผนวก
ความต้านทานดิน	= 100 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์
ความต้านทานของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยสาย	= 100 องศาเซลเซียส-เซนติเมตร/วัตต์
วิธีการต่อลงดิน	= แบบหลายจุด และ แบบจุดเดียว
ชนิดท่อของการติดตั้งท่อหุ้มคอนกรีต	= โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
การติดตั้ง	= สายเคเบิลเส้นเดียวและสามเส้นในท่อร้อยสาย
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยภายนอก	= 140 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อยภายใน	= 123 มิลลิเมตร
แรงดัน	= 24 ,69 และ 115 กิโลโวลต์



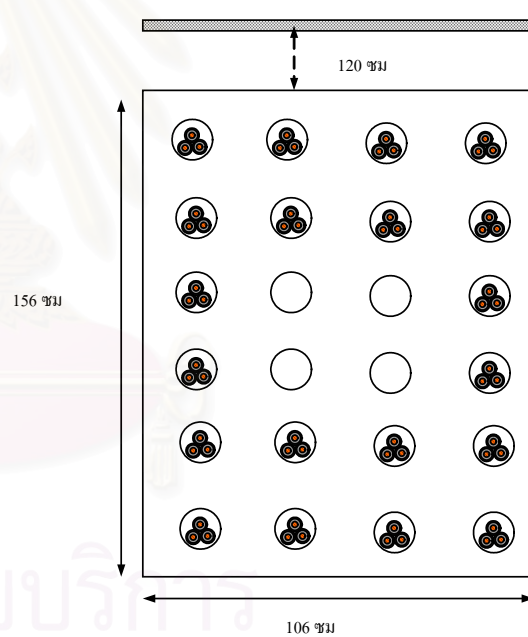
ภาพติดตั้งที่ 1



ภาพติดตั้งที่ 2

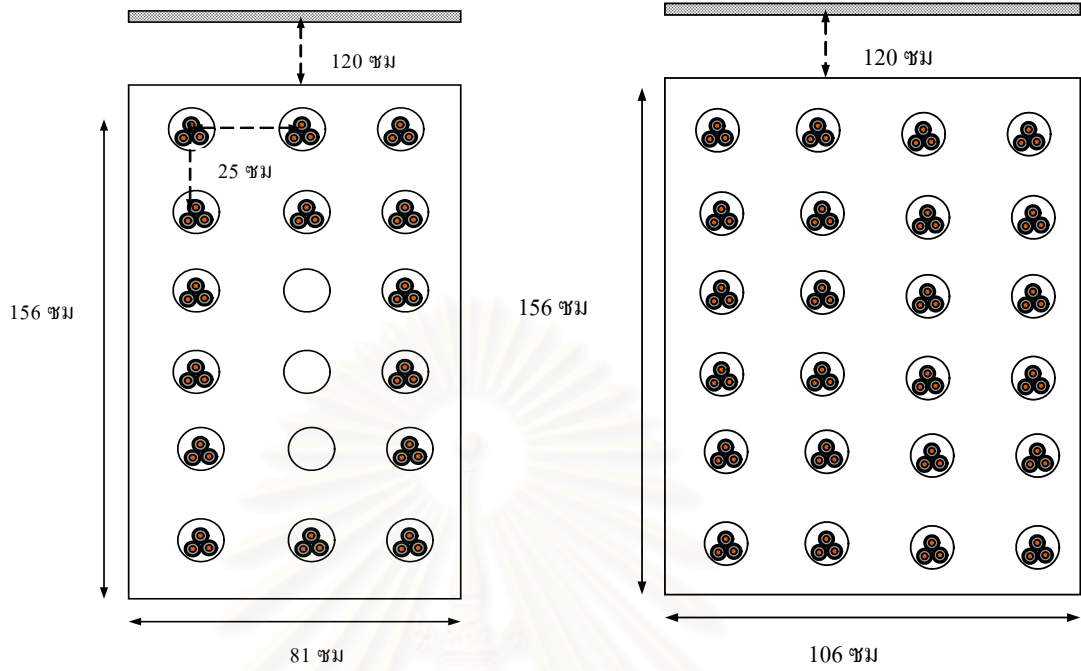


ภาพติดตั้งที่ 3



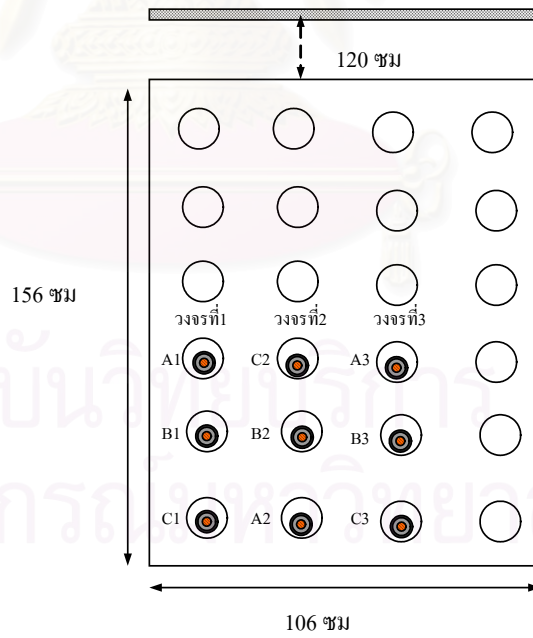
ภาพติดตั้งที่ 4

รูปที่ 6.12-1 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG 4-310



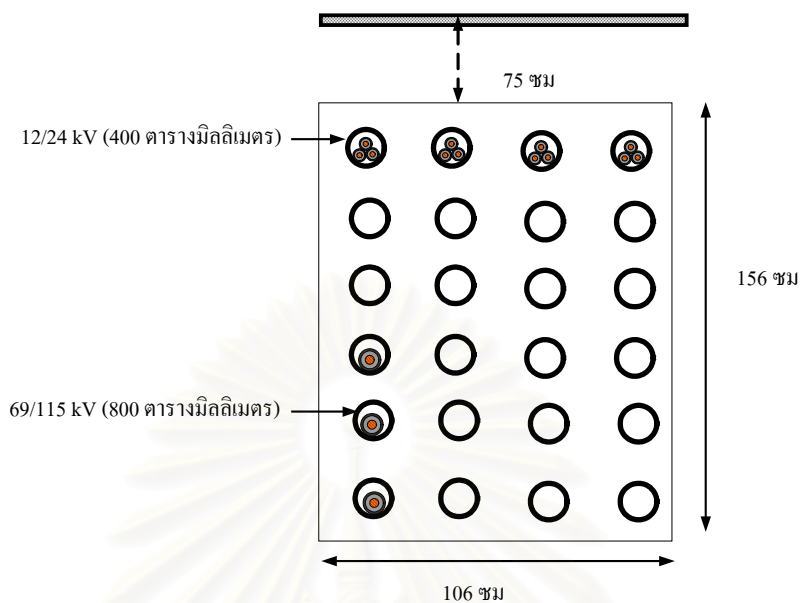
ภาพติดตั้งที่ 5

ภาพติดตั้งที่ 6

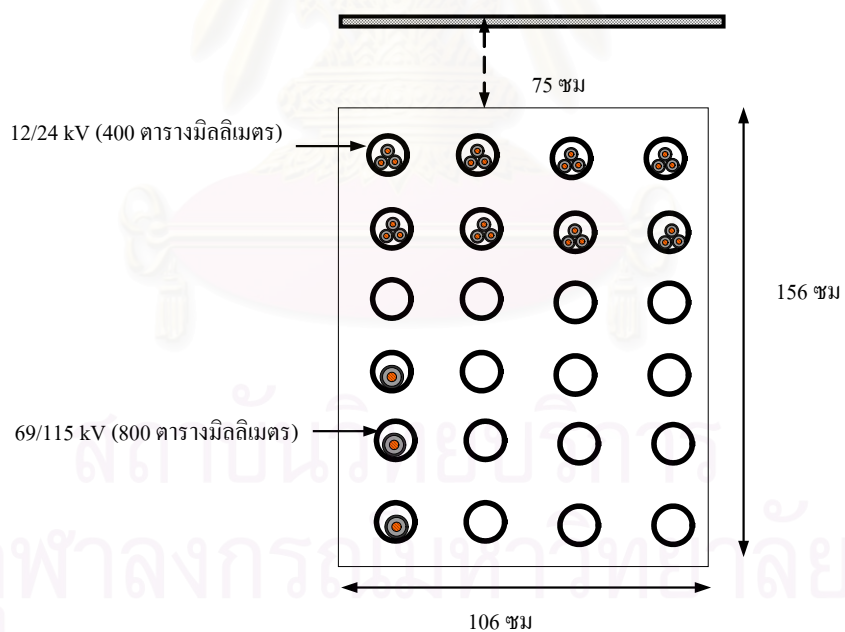


ภาพติดตั้งที่ 7

รูปที่ 6.12-2 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-310

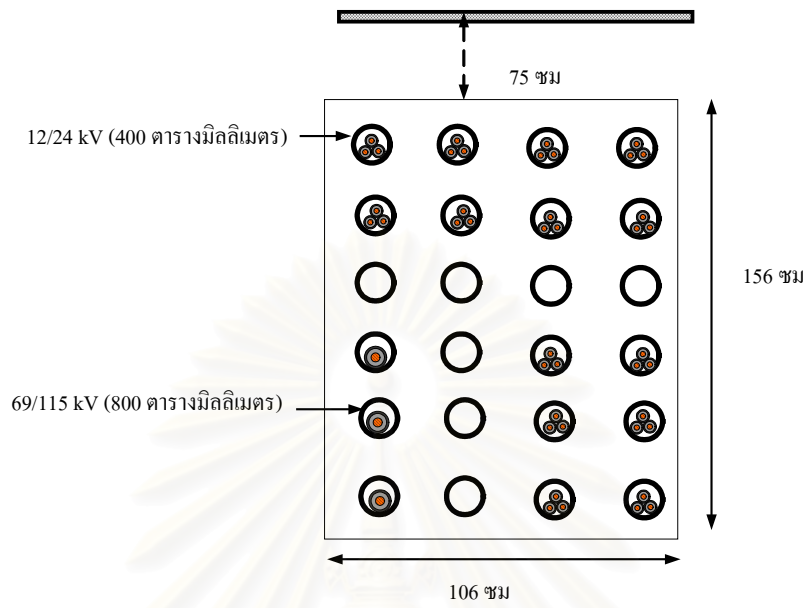


ภาพติดตั้งที่ 8

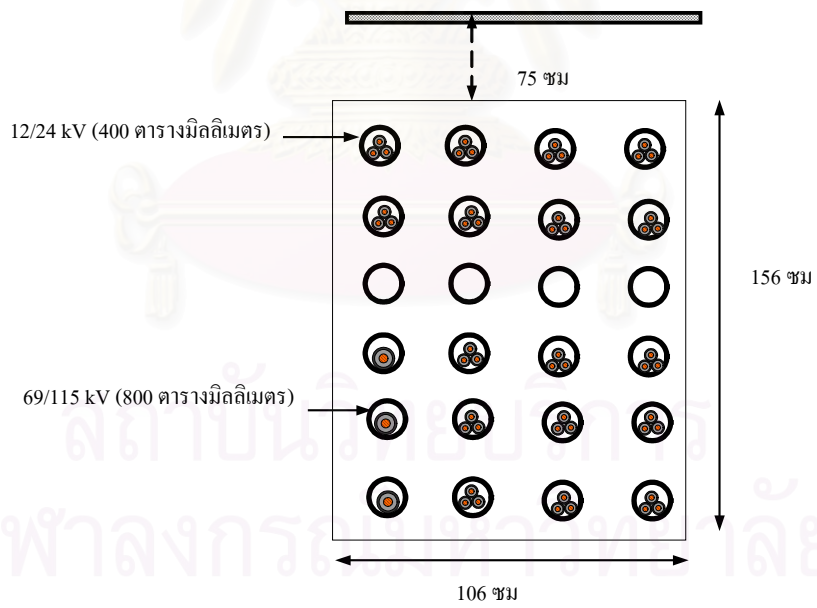


ภาพติดตั้งที่ 9

รูปที่ 6.12-3 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410

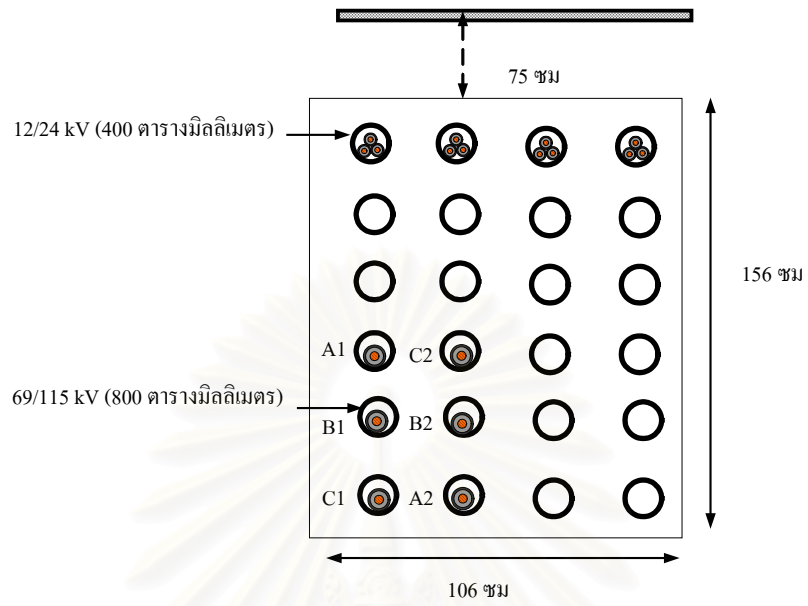


ภาพติดตั้งที่ 10

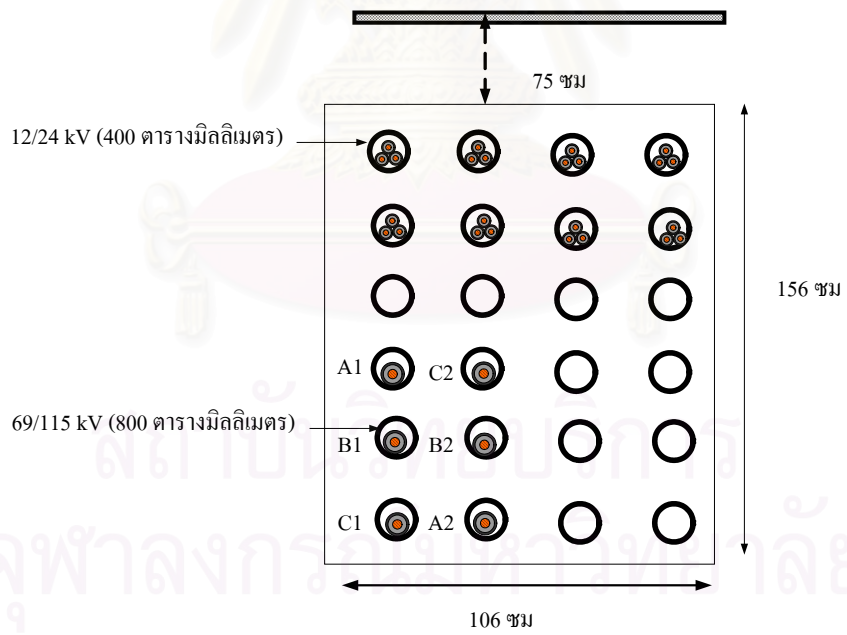


ภาพติดตั้งที่ 11

รูปที่ 6.12- 4 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410

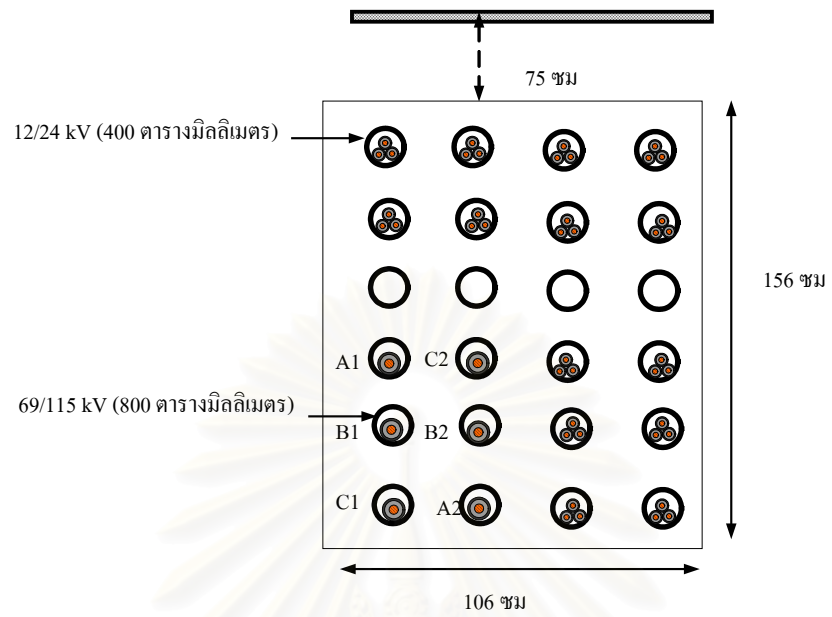


ภาพติดตั้งที่ 12

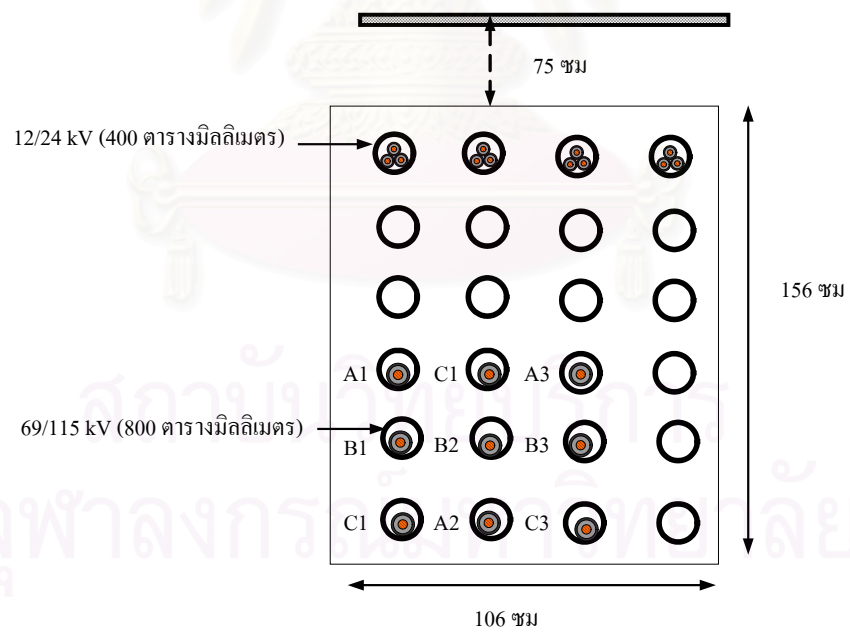


ภาพติดตั้งที่ 13

รูปที่ 6.12- 5 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410



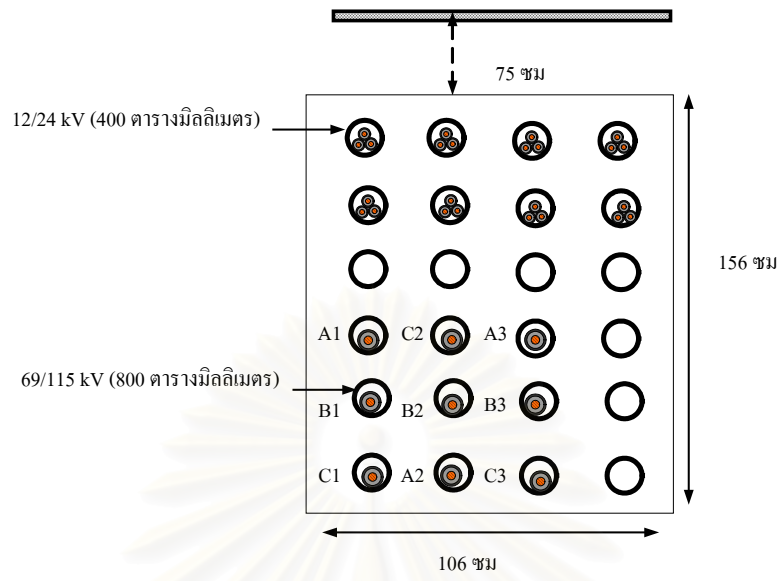
ภาพติดตั้งที่ 14



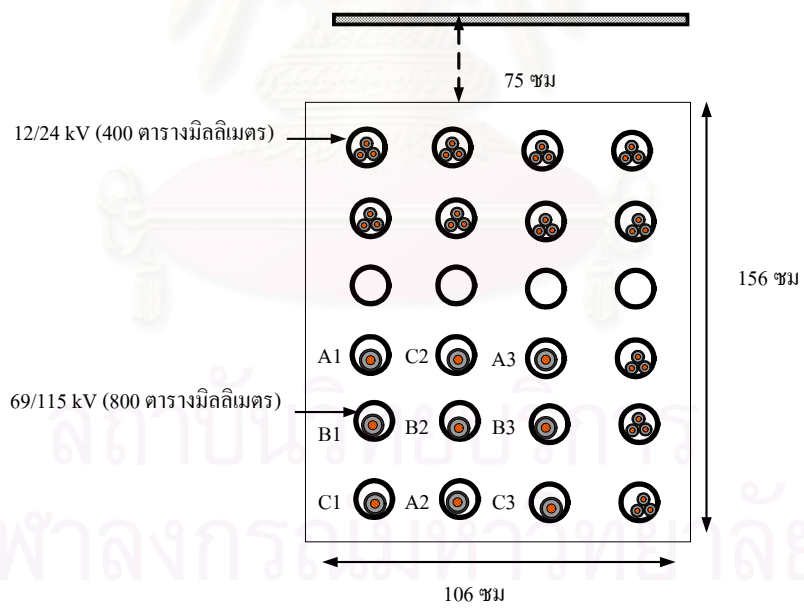
ภาพติดตั้งที่ 15

รูปที่ 6.12-6 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410



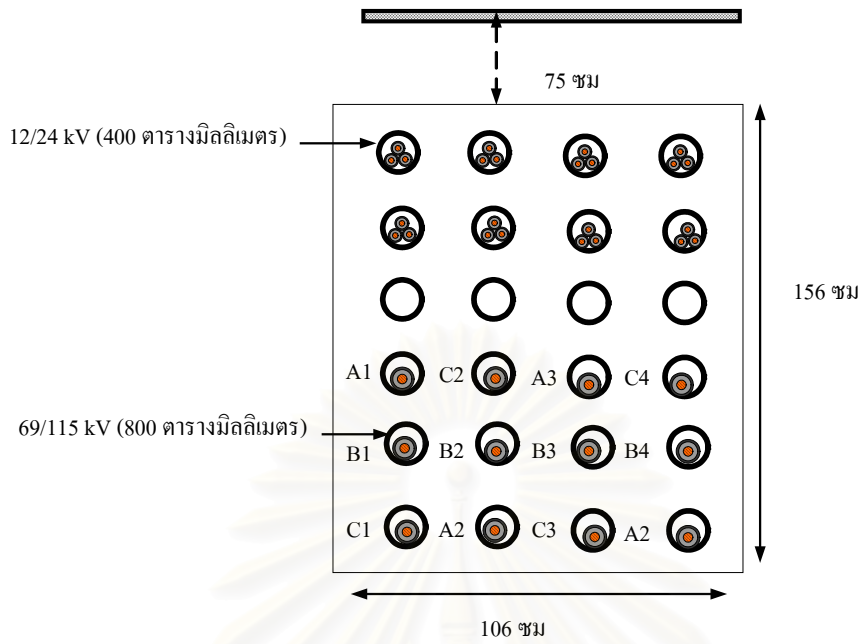


ภาพติดตั้งที่ 16

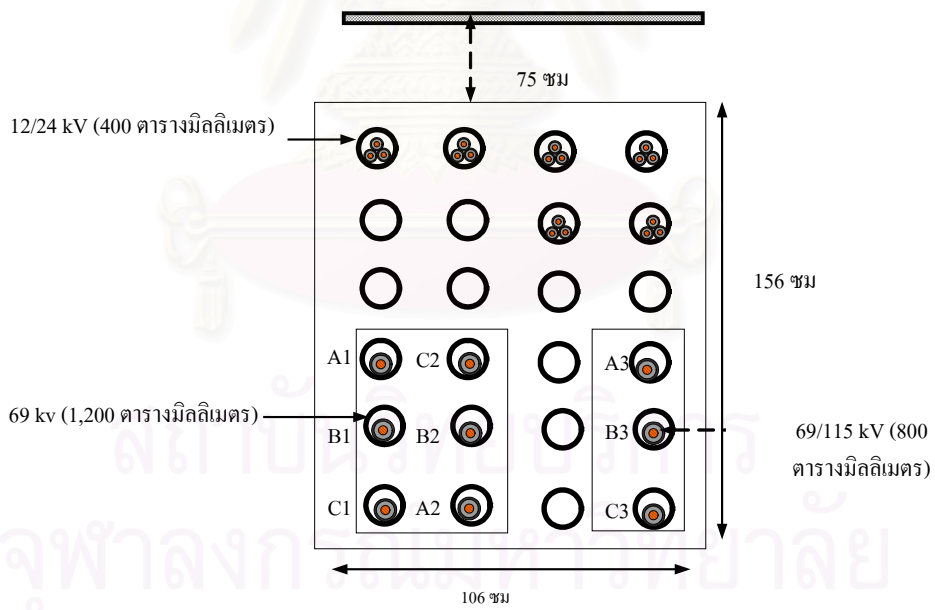


ภาพติดตั้งที่ 17

รูปที่ 6.12-7 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410

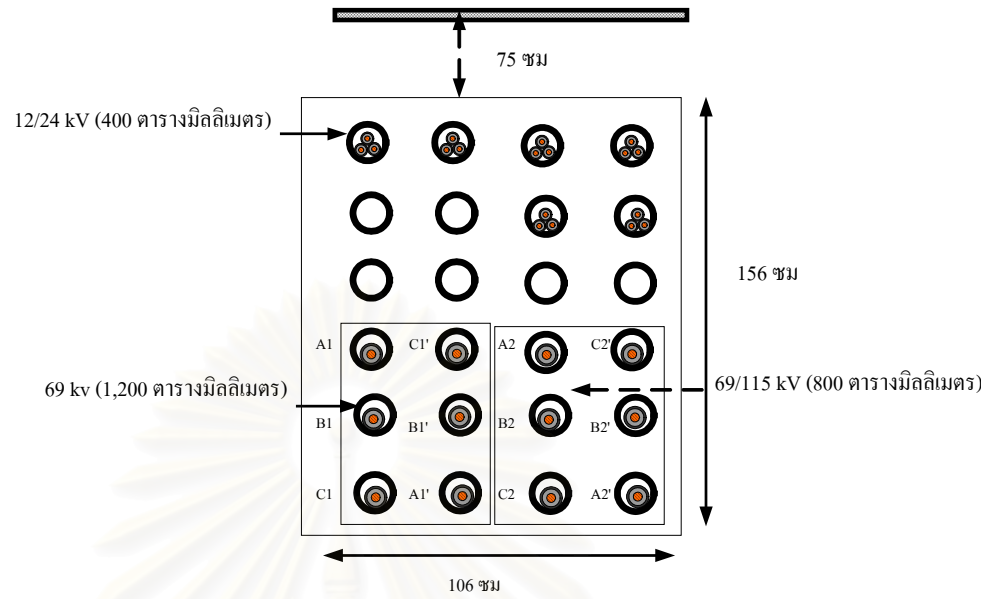


ภาพติดตั้งที่ 18

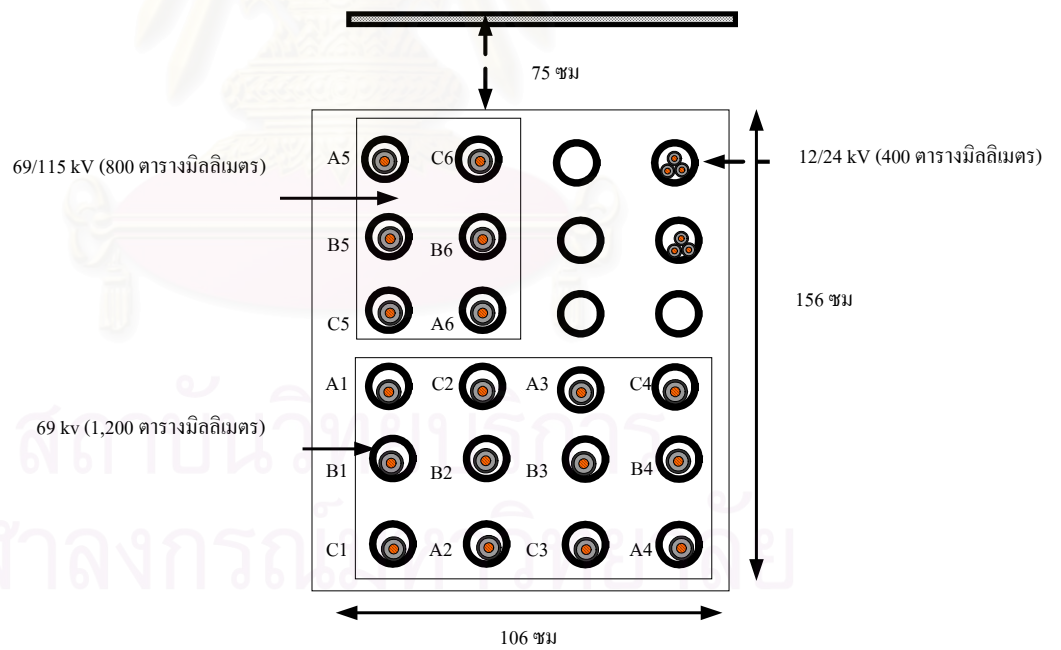


ภาพติดตั้งที่ 19

รูปที่ 6.12-8 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410



ภาพติดตั้งที่ 20



ภาพติดตั้งที่ 21

รูปที่ 6.12-9 ภาพการติดตั้งของแบบที่ UG-4-410

ตารางที่ 6.12-1 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 70 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 24 kV, สายเคเบิล 70 mm <sup>2</sup>										
รูปแบบการติดตั้ง	จำนวนวงจร	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของกฟน.			ค่าผิดพลาด (%)		
		LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
		0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1
ภาพติดตั้งที่ 1	2	213	200	188	211	196	183	0.9	2.0	2.7
ภาพติดตั้งที่ 2	6	166	151	137	183	167	153	-9.3	-9.6	-10.5
ภาพติดตั้งที่ 3	10	143	128	116	153	137	123	-6.5	-6.6	-5.7
ภาพติดตั้งที่ 4	15	130	116	103	129	113	101	0.8	2.7	2.0
ภาพติดตั้งที่ 5	20	113	101	91	115	101	90	-1.7	0.0	1.1
ภาพติดตั้งที่ 6	24	103	86	82	106	92	81	-2.8	-6.5	1.2

ตารางที่ 6.12 -2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 120 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 24 kV, สายเคเบิล 120 mm <sup>2</sup>										
รูปแบบการติดตั้ง	จำนวนวงจร	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของกฟน.			ค่าผิดพลาด (%)		
		LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
		0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1
ภาพติดตั้งที่ 1	2	289	271	253	288	267	248	0.3	1.5	2.0
ภาพติดตั้งที่ 2	6	222	200	182	248	225	205	-10.5	-11.1	-11.2
ภาพติดตั้งที่ 3	10	190	169	153	206	183	164	-7.8	-7.7	-6.7
ภาพติดตั้งที่ 4	15	168	150	135	172	151	134	-2.3	-0.7	0.7
ภาพติดตั้งที่ 5	20	148	132	119	154	134	119	-3.9	-1.5	0.0
ภาพติดตั้งที่ 6	24	137	117	108	141	122	108	-2.8	-4.1	0.0

ตารางที่ 6.12 –3 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 24 kV, สายเคเบิล 240 mm <sup>2</sup>										
รูปแบบการติดตั้ง	จำนวนวงจร	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของกฟน.			ค่าผิดพลาด (%)		
		LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
		0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1
ภาพติดตั้งที่ 1	2	423	393	364	417	384	354	1.4	2.3	2.8
ภาพติดตั้งที่ 2	6	316	284	257	355	320	291	-11.0	-11.3	-11.7
ภาพติดตั้งที่ 3	10	267	238	215	292	258	231	-8.6	-7.8	-6.9
ภาพติดตั้งที่ 4	15	234	209	189	242	212	188	-3.3	-1.4	0.5
ภาพติดตั้งที่ 5	20	205	183	166	216	188	166	-5.1	-2.7	0.0
ภาพติดตั้งที่ 6	24	150	133	121	196	170	150	-23.5	-21.8	-19.3

ตารางที่ 6.12 –4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 400 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 24 kV, สายเคเบิล 400 mm <sup>2</sup>										
รูปแบบการติดตั้ง	จำนวนวงจร	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของกฟน.			ค่าผิดพลาด (%)		
		LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
		0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1
ภาพติดตั้งที่ 1	2	539	498	461	529	486	447	1.9	2.5	3.1
ภาพติดตั้งที่ 2	6	397	356	322	448	403	364	-11.4	-11.7	-11.5
ภาพติดตั้งที่ 3	10	334	297	269	365	322	287	-8.5	-7.8	-6.3
ภาพติดตั้งที่ 4	15	290	260	236	302	260	233	-4.0	0.0	1.3
ภาพติดตั้งที่ 5	20	252	227	207	268	233	206	-6.0	-2.6	0.5
ภาพติดตั้งที่ 6	24	226	203	186	244	211	186	-7.4	-3.8	0.0

ตารางที่ 6.12-5 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 24 kV, สายเคเบิล 800 mm <sup>2</sup>										
รูปแบบการติดตั้ง	จำนวนวงจร	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของกฟน.			ค่าผิดพลาด (%)		
		LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
		0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1
ภาพติดตั้งที่ 7	1	1056	974	899	1099	1013	936	-3.9	-3.8	-4.0
ภาพติดตั้งที่ 7	2	891	802	726	934	841	763	-4.6	-4.6	-4.8
ภาพติดตั้งที่ 7	3	783	696	625	826	735	660	-5.2	-5.3	-5.3

ตารางที่ 6.12-6 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 800 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 115 kV สายเคเบิล 800 mm <sup>2</sup>										
รูปแบบการติดตั้ง	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของกฟน.			ค่าผิดพลาด (%)			
	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	
	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	
ภาพติดตั้งที่ 8	977	905	839	853	924	1002	14.5	-2.1	-16.3	
ภาพติดตั้งที่ 9	871	809	751	952	878	810	-8.5	-7.9	-7.3	
ภาพติดตั้งที่ 10	624	577	535	712	659	610	-12.4	-12.4	-12.3	
ภาพติดตั้งที่ 11	336	309	284	491	452	417	-31.6	-31.6	-31.9	
ภาพติดตั้งที่ 12	839	758	690	845	761	690	-0.7	-0.4	0.0	
ภาพติดตั้งที่ 13	745	680	617	657	725	805	13.4	-6.2	-23.4	
ภาพติดตั้งที่ 14	470	425	375	604	546	496	-22.2	-22.2	-24.4	
ภาพติดตั้งที่ 15	745	665	600	745	662	595	0.0	0.5	0.8	
ภาพติดตั้งที่ 16	670	600	535	707	629	564	-5.2	-4.6	-5.1	
ภาพติดตั้งที่ 17	665	590	530	686	606	542	-3.1	-2.6	-2.2	
ภาพติดตั้งที่ 18	618	548	490	651	576	514	-5.1	-4.9	-4.7	

ตารางที่ 6.12-7 ผลการคำนวณเปรียบเทียบสายเคเบิลขนาด 1200 ตารางมิลลิเมตร

แรงดัน 69&115 kV สายเคเบิล 1200 mm <sup>2</sup>									
รูปแบบการติดตั้ง	ค่าพิกัดกระแสที่ใช้ โปรแกรมคำนวณ			ค่าพิกัดกระแสของ กพน.			ค่าผิดพลาด (%)		
	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF
ภาพติดตั้งที่ 19	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1	0.7	0.85	1
ภาพติดตั้งที่ 20	858	770	695	812	728	657	5.7	5.8	5.8
ภาพติดตั้งที่ 21	690	620	560	675	605	546	2.2	2.5	2.6
ภาพติดตั้งที่ 21	626	560	500	562	506	458	11.4	10.7	9.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุปผลการวิจัย

โปรแกรมที่พัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้จะช่วยในการออกแบบสายเคเบิลใต้ดินคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลใต้ดินได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ช่วยหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินและสามารถออกแบบคำนวณพิกัดกระแสสายเคเบิลใต้ดินที่มีลักษณะหลากหลายรูปแบบได้และวิเคราะห์ในการเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการติดตั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายได้ตลอดอายุใช้งานได้ ซึ่งประโยชน์ของโปรแกรมที่พัฒนามีดังนี้

7.1.1 สามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์ออกแบบสายเคเบิลใต้ดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้

7.1.2 สามารถคำนวณหาพิกัดของกระแสได้สะดวกรวดเร็วของสายเคเบิลฉนวนแข็งชนิดหนึ่งแกนและสามแกนได้

7.1.3 สามารถคำนวณพิกัดของกระแสที่มีการติดตั้งสายเคเบิลหลายวงจรมี ชนิดสายเคเบิลและการติดตั้งที่แตกต่างกันได้

7.1.4 ในกรณีที่มีการติดตั้งสายเคเบิลเพิ่มจากจำนวนวงจรเดิมที่มีติดตั้งอยู่แล้วสามารถคำนวณพิกัดกระแสใหม่ของแต่ละวงจรโดยไม่ทำให้คุณสมบัติของสายเคเบิลเกินค่าที่กำหนดได้

7.1.5 มีการคำนวณหาอุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิลที่ใช้งานอยู่ได้

7.1.6 การคำนวณจะพิจารณาถึงการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายเคเบิลใกล้เคียงทำให้สามารถพิจารณาการจลวงที่เหมาะสมได้

7.1.7 ในกรณีที่มีการติดตั้งหลายวงจรสามารถคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลที่อุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายกระแสได้

7.1.8 คำนวณขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมในการติดตั้งเพื่อลดค่าใช้จ่ายได้ตลอดอายุใช้งาน  
ได้



## 7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินมีดังนี้

7.2.1.1 วงจรที่มีการต่อขนานกันเพื่อจ่ายกระแสโหลดต้องจัดเรียงลำดับเฟสให้สมมาตรกันเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสสมมาตรขึ้นในวงจร

7.2.1.2 การจัดวางลำดับเฟสในการติดตั้งสายเคเบิลที่ถูกต้องจะช่วยเพิ่มพิกัดกระแสในสายเคเบิลได้

7.2.1.3 สายเคเบิลที่มีซิลต์โลหะต่อลงดินแบบหลายจุดติดตั้งแบบเส้นเดียวในท่อร้อยสายควรให้ระยะห่างในการวางสายเคเบิลใกล้กันเพราะค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเฟส

7.2.1.4 สายเคเบิลที่มีซิลต์โลหะต่อลงดินแบบจุดเดียวติดตั้งแบบเส้นเดียวในท่อร้อยสายค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลจะแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างเฟส

7.2.1.5 สายเคเบิลที่มีการติดตั้งแบบสามเส้นในท่อร้อยสายควรต่อลงดินแบบวิธีต่อหลายจุดมากกว่าแบบต่อจุดเดียวเนื่องจากการต่อลงดินแบบจุดเดียวไม่ทำให้ค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลเพิ่มขึ้นเท่าใดนัก

7.2.1.6 สายเคเบิลที่มีซิลต์โลหะต่อลงดินแบบจุดเดียวติดตั้งแบบเส้นเดียวในท่อร้อยสายหากต้องการหลีกเลี่ยงแรงดันเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะมีค่าสูงไม่ควรติดตั้งให้ระยะห่างระหว่างเฟสห่างกันมากเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเฟส

7.2.1.7 แรงดันเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะจะขึ้นอยู่กับกระแสและระยะห่างของตัวนำไม่ขึ้นอยู่กับความต้านทานของซิลต์โลหะ

7.2.1.8 การต่อซิลต์โลหะลงดินแบบจุดเดียวหรือแบบครอสบอนด์จะให้ค่าพิกัดกระแสมากกว่าแบบวิธีต่อลงดินแบบหลายจุด

7.2.1.9 วิธีการต่อลงดินแบบจุดเดียวหรือครอสบอนด์เหมาะที่จะใช้เพิ่มค่าพิกัดกระแสสำหรับการติดตั้งสายเคเบิลแบบเส้นเดียวในท่อร้อยสายมากกว่าสามเส้นในท่อร้อยสาย

7.2.1.10 การติดตั้งสายเคเบิลแบบเส้นเดียวในท่อร้อยสายด้วยวิธีต่อลงดินแบบจุดเดียวควรวางสายเคเบิลให้เป็นแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าจะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำที่ซิลต์โลหะได้

7.2.1.11 การจัดวางลำดับเฟสของสายเคเบิล ที่ถูกต้องจะสามารถช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำในซิลต์โลหะได้

7.2.1.12 วิธีการต่อลงดินแบบจุดเดียวมีข้อเสียคือไม่ปลอดภัยเนื่องจากมีแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ซิลต์โลหะสามารถแก้ไขโดยวิธีการต่อแบบครอสบอนด์แต่เป็นวิธีที่มีราคาแพงในทางปฏิบัติทำยาก ซึ่งแสดงตารางการเปรียบเทียบตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการลงดินแบบต่างๆ

ชนิดของการต่อลงดินของซิลต์โลหะ	ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล	กระแสในซิลต์โลหะ	ความปลอดภัย	ราคา
แบบครอสบอนด์	เพิ่มขึ้น	ไม่มี	ปานกลาง	แพงมาก
แบบต่อกราวด์จุดเดียว	เพิ่มขึ้น	ไม่มี	น้อยมาก	ถูก
แบบต่อกราวด์หลายจุด	ลดลง	มี	มาก	ปานกลาง

7.2.1.13. ในกรณีที่มีการติดตั้งหลายวงจรรวมการคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลให้ทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดของแต่ละวงจรจะช่วยเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสได้มากขึ้น

7.2.1.14 ในการคำนวณค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลจะต้องพิจารณาตัวประกอบโหลดของวงจรจริงด้วยจะช่วยเพิ่มค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลได้

7.2.1.15 การปรับปรุงสภาพดินที่อยู่รอบสายเคเบิลจะช่วยทำให้การระบายความร้อนได้ดีและเพิ่มค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิล

7.2.1.16 การเลือกติดตั้งขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมก็จะช่วยลดกำลังสูญเสียและค่าใช้จ่ายตลอดอายุใช้งานได้

## 7.2.2. ข้อเสนอแนะในการคำนวณ

7.2.2.1 ในการคำนวณในกรณีหลายวงจรที่แต่ละวงจรมีโครงสร้างสายเคเบิลและวิธีติดตั้งที่แตกต่างกันควรต้องมีการคำนวณพิจารณาไปพร้อมกันและคำนึงถึงผลกระทบของแต่ละวงจรที่มีต่อกันและกันด้วยจะทำให้การคำนวณถูกต้องมากยิ่งขึ้น

7.2.2.2 ต้องมีการคำนวณอุณหภูมิย้อนกลับของค่าพิกัดกระแสที่คำนวณได้ว่าทำให้อุณหภูมิของสายเคเบิลอยู่ในค่าพิกัดที่กำหนดหรือไม่ และ อุณหภูมิของซิลต์โลหะและอุณหภูมิภายในท่อร้อยสายที่ใช้ในการคำนวณจะไม่ทราบค่าเริ่มต้นตอนคำนวณในครั้งแรก ต้องใช้วิธีการคำนวณซ้ำถึงจะทราบค่าเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณให้ได้ค่าถูกต้อง

## รายการอ้างอิง

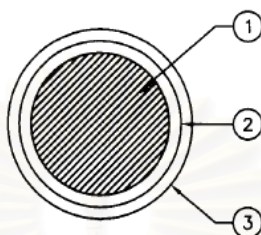
- [1] J .A. Williams. Under ground system reference book. Newyork 1992
- [2] George J.Anders. Rating of Electric Power cables Ampacity Computions FOR Tranmission,Distribution, and Industrial Application 1997.
- [3] International Electrotechnical Commission IEC 60287-1-1Electirical cables calculation of the current rating part 1-1 current rating equation(100% load factor) and calculation of losses general. 2001.
- [4] International Electrotechnical Commission IEC 60287-1-3 Electirical cables calculation of the current rating part 1-3 current rating equation(100% load factor)and calculation of losses-current sharing between parallel single –core cables and calculation of circulating current losses. 2002.
- [5] T.L. Jones,” The calculation of cable parameter using combined thermal and electrical circuit model” , IEEE Transaction on Power delivery .,vol 4,no3 ,pp.1529- 1540, July 1989
- [6] International Electrotechnical Commission IEC 60287-3-2.Electirical cables calculation of the current rating part 3 Section on operating conditions- Section:Economic optimization of power cable size. 2002.
- [7] IEEE Std 835 .IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables.1994.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PHYSICAL CHARACTERISTICS  
OF  
0.6/1 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**



DESCRIPTION	NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>						
	35	70	120	185	240	400	
MINIMUM NUMBER OF STRAND WIRES	6	12	18	30	34	53	
DIAMETER OF CONDUCTOR, mm ①	6.70	9.40	12.95±1%	15.98±1%	18.47±1%	23.39±1%	
THICKNESS OF INSULATION, mm ②	0.9	1.1	1.2	1.6	1.7	2.0	
THICKNESS OF NON-METALLIC SHEATH, mm ③	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9	
OVERALL DIAMETER (D), mm	12.00	15.00	18.35	22.38	25.27	31.19	
WEIGHT OF CABLE, kg/km (APPROX.)	400	750	1,200	1,900	2,500	3,900	
MINIMUM BENDING RADIUS	8D						
MAXIMUM PERMISSIBLE PULLING FORCE, kgf (lbf)	WITH PULLING EYE	245 <sup>b)</sup> (540)	490 <sup>b)</sup> (1,080)	840 <sup>b)</sup> (1,852)	1,295 <sup>b)</sup> (2,855)	1,680 <sup>b)</sup> (3,704)	2,268 (5,000)
	WITH PULLING GRIP	245(540)		454(1,000)			
MAXIMUM ALLOWABLE SIDEWALL PRESSURE, kgf/m (lbf/ft)	744(500)						




CONDUCTOR SIZE, mm <sup>2</sup>	CODE NO.
35	-
70	-
120	6145-237-12000
185	6145-237-18500
240	6145-237-24000
400	6145-237-40000

- NOTES** 1. SEE MEA'S SPECIFICATION FOR MORE DETAILS EXCEPT SIZE 35 & 70 mm<sup>2</sup> BASED ON IEC 60502-1  
2. PULLING FORCE ARE BASED ON MAXIMUM ALLOWABLE STRESS ON CONDUCTOR 7 kgf/mm<sup>2</sup>




REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS	BY	DATE
DR. <i>Paramej</i> CHK. <i>Pongsan</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE
DIR.DIV. <i>R.Than</i>	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS	SUPERSEDING	
DIR.DEPT. <i>Juyachai</i>	OF	SH.NO.	1 OF 3
DEP.GOV. <i>[Signature]</i>	0.6/1 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE	DWG. NO.	<b>UG-4-011</b>
DATE 24/1/2549			

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**  
**OF**  
**0.6/1 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**




**CABLE SIZE 35 mm<sup>2</sup>**

DESCRIPTION	CABLE CONFIGURATION			
				
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.524			
POSITIVE- & NEGATIVE-SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.668	0.668	0.668
	REACTANCE, Ω/km	0.0964	0.1110	0.1548
ZERO-SEQUENCE <sup>2)</sup>	RESISTANCE, Ω/km	2.67	2.67	2.67
	REACTANCE, Ω/km	0.289	0.333	0.464
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO	3.98	3.98	3.95	

**CABLE SIZE 70 mm<sup>2</sup>**

DESCRIPTION	CABLE CONFIGURATION			
				
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.268			
POSITIVE- & NEGATIVE-SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.342	0.342	0.342
	REACTANCE, Ω/km	0.0891	0.1037	0.1475
ZERO-SEQUENCE <sup>2)</sup>	RESISTANCE, Ω/km	1.368	1.368	1.368
	REACTANCE, Ω/km	0.267	0.311	0.442
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO	3.94	3.92	3.86	

**CABLE SIZE 120 mm<sup>2</sup>**

DESCRIPTION	CABLE CONFIGURATION			
				
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.153			
POSITIVE- & NEGATIVE-SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.1964	0.1961	0.1956
	REACTANCE, Ω/km	0.0816	0.0962	0.1400
ZERO-SEQUENCE <sup>2)</sup>	RESISTANCE, Ω/km	0.786	0.784	0.782
	REACTANCE, Ω/km	0.245	0.289	0.420
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO	3.87	3.83	3.69	




**NOTES**

1. A.C. RESISTANCE ARE BASED ON 90 °C
2. ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE ARE BASED ON RETURN CURRENT BOTH IN NEUTRAL CONDUCTOR AND IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH.




REV.NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
DR. Manthol	CHK. Pongsan	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE	
DR. DIV. R. Thum		PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS	SUPERSEDING		
DR. DEPT. Ussachai		OF	SH.NO. 2 OF 3		
DEP. GOV. 10		0.6/1 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE	DWG. NO.	UG-4-011	
DATE 24/1/2549					

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**  
**OF**  
**0.6/1 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**




**CABLE SIZE 185 mm<sup>2</sup>**

DESCRIPTION	CABLE CONFIGURATION			
				
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.0991			
POSITIVE- & NEGATIVE-SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.1285	0.1279	0.1272
	REACTANCE, Ω/km	0.0808	0.0955	0.1393
ZERO-SEQUENCE <sup>2)</sup>	RESISTANCE, Ω/km	0.514	0.512	0.509
	REACTANCE, Ω/km	0.242	0.286	0.418
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO	3.74	3.67	3.49	

**CABLE SIZE 240 mm<sup>2</sup>**

DESCRIPTION	CABLE CONFIGURATION			
				
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.0754			
POSITIVE- & NEGATIVE-SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.0990	0.0982	0.0973
	REACTANCE, Ω/km	0.0794	0.0940	0.1378
ZERO-SEQUENCE <sup>2)</sup>	RESISTANCE, Ω/km	0.484	0.482	0.479
	REACTANCE, Ω/km	0.238	0.282	0.413
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO	4.25	4.11	3.75	

**CABLE SIZE 400 mm<sup>2</sup>**

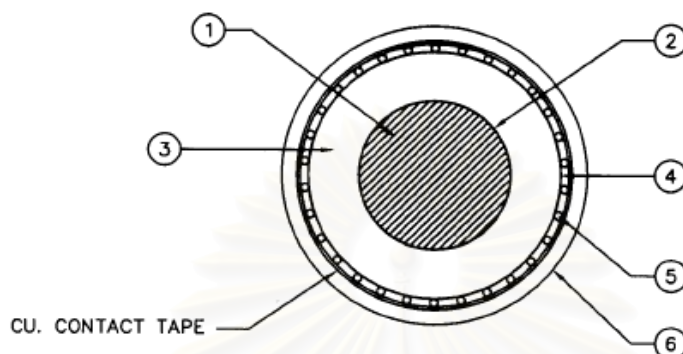
DESCRIPTION	CABLE CONFIGURATION			
				
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.0470			
POSITIVE- & NEGATIVE-SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.0645	0.0632	0.0618
	REACTANCE, Ω/km	0.0778	0.0924	0.1362
ZERO-SEQUENCE <sup>2)</sup>	RESISTANCE, Ω/km	0.361	0.358	0.354
	REACTANCE, Ω/km	0.233	0.277	0.409
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO	4.26	4.04	3.61	

**NOTES**

1. A.C. RESISTANCE ARE BASED ON 90 °C
2. ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE ARE BASED ON RETURN CURRENT BOTH IN NEUTRAL CONDUCTOR AND IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH.

REV.NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
DR. Manthol	CHK. Pongsan	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY		SCALE	NONE
DIR.DIV. R Thana	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS		SUPERSEDING		
DIR.DEPT. Surachai	OF		SH.NO.	3	OF 3
DEP.GOV.	0.6/1 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE		DWG. NO.	UG-4-011	
DATE 24/1/2549					

**PHYSICAL CHARACTERISTICS**  
**OF**  
**12/20 (24) kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**



DESCRIPTION	NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>					
	70	120	240	400	800	
MINIMUM NUMBER OF STRAND WIRES	12	18	34	53	53	
DIAMETER OF CONDUCTOR, mm ①	9.73±1%	12.95±1%	18.47±1%	23.39±1%	34.00±1%	
MINIMUM THICKNESS OF CONDUCTOR SCREEN, mm ②	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	
THICKNESS OF INSULATION, mm ③	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	
RANGE OF DIAMETER OVER INSULATION, mm	21.7-23.9	25.0-27.4	30.5-33.5	35.4-38.9	46.0-50.6	
MINIMUM THICKNESS OF INSULATION SCREEN, mm ④	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	0.0635	
MINIMUM NUMBER OF SCREEN WIRES	20	20	30	30	35	
MINIMUM TOTAL SECTIONAL AREA OF CU. WIRE SCREEN, mm <sup>2</sup> ⑤	10	10	25	25	25	
THICKNESS OF NON-METALLIC SHEATH, mm ⑥	1.8	2.0	2.1	2.3	2.6	
RANGE OF OVERALL DIAMETER (D), mm	28.0-30.0	31.0-35.0	39.0-42.2	44.5-48.0	57.5-61.0	
WEIGHT OF CABLE, kg/km (APPROX.)	1,200	1,700	3,200	4,600	9,000	
MINIMUM BENDING RADIUS	←————— 12D —————→					
MAXIMUM PERMISSIBLE PULLING FORCE, kgf (lbf)	WITH PULLING EYE	490 <sup>3)</sup> (1,080)	840 <sup>3)</sup> (1,852)	1,680 <sup>3)</sup> (3,704)	2,268 (5,000)	2,268 (5,000)
	WITH PULLING GRIP	←————— 454(1,000) —————→				-
MAXIMUM ALLOWABLE SIDEWALL PRESSURE, kgf/m (lbf/ft)	←————— 744(500) —————→					






CONDUCTOR SIZE, mm <sup>2</sup>	CODE NO.	
	PE JACKET	FIRE RETARDANT JACKET
70	6145-235-07100	6145-235-07300
120	6145-235-12100	-
240	6145-235-24100	6145-235-24300
400	6145-235-40100	6145-235-40300
800	6145-235-80100	6145-235-80300

- NOTES**
- SEE MEA'S SPECIFICATION FOR MORE DETAILS.
  - PULLING FORCE ARE BASED ON MAXIMUM ALLOWABLE STRESS ON CONDUCTOR 7 kgf/mm<sup>2</sup>

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS			BY	DATE
DR. Paramej	CHK. Pongsen	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY		SCALE	NONE
DIR.DIV. R. Thon	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF 12/20 (24) kV XLPE INSULATED COPPER CABLE			SUPERSEDING	
DIR.DEPT. Jussachai				SH.NO.	1
DEP.GOV. <i>[Signature]</i>				DWG. NO.	<b>UG-4-015</b>
DATE 24/1/2549					



**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**  
**OF**  
**12/20 (24) kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**

DESCRIPTION	CONDUCTOR SIZE (mm <sup>2</sup> )					
	70	120	240	400	800	
CABLE CONFIGURATION						
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km	0.268	0.153	0.0754	0.0470	0.0221	
POSITIVE- & NEGATIVE- SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.344	0.1976	0.1022	0.0669	0.0313
	REACTANCE, Ω/km	0.1308	0.1225	0.1121	0.1053	0.1549
ZERO- <sup>2)</sup> SEQUENCE	RESISTANCE, Ω/km	1.317	1.156	0.815	0.776	0.1800
	REACTANCE, Ω/km	1.093	1.080	0.374	0.371	1.718
Z <sub>0</sub> / Z <sub>1</sub> RATIO	4.65	6.80	5.91	6.89	10.93	
SHIELD RESISTANCE @ 80 °C, Ω/km	2.24	2.24	0.895	0.895	0.895	
SHUNT CAPACITIVE REACTANCE, MΩ·km	0.018	0.014	0.011	0.009	0.006	
CHARGING CURRENT @ U <sub>0</sub> , A/km	0.787	0.967	1.271	1.540	2.11	
DIELECTRIC LOSS @ U <sub>0</sub> , W/km	43.6	53.6	70.4	85.3	117.2	

**NOTES**

1. A.C. RESISTANCE ARE BASED ON 90 °C
2. ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE ARE BASED ON RETURN CURRENT BOTH IN SHIELD WIRE AND IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH EXCEPT SIZE 800 mm<sup>2</sup> BASED ON ALL RETURN CURRENT IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH. (i.e. SHIELDS GROUNDED AT ONE END)

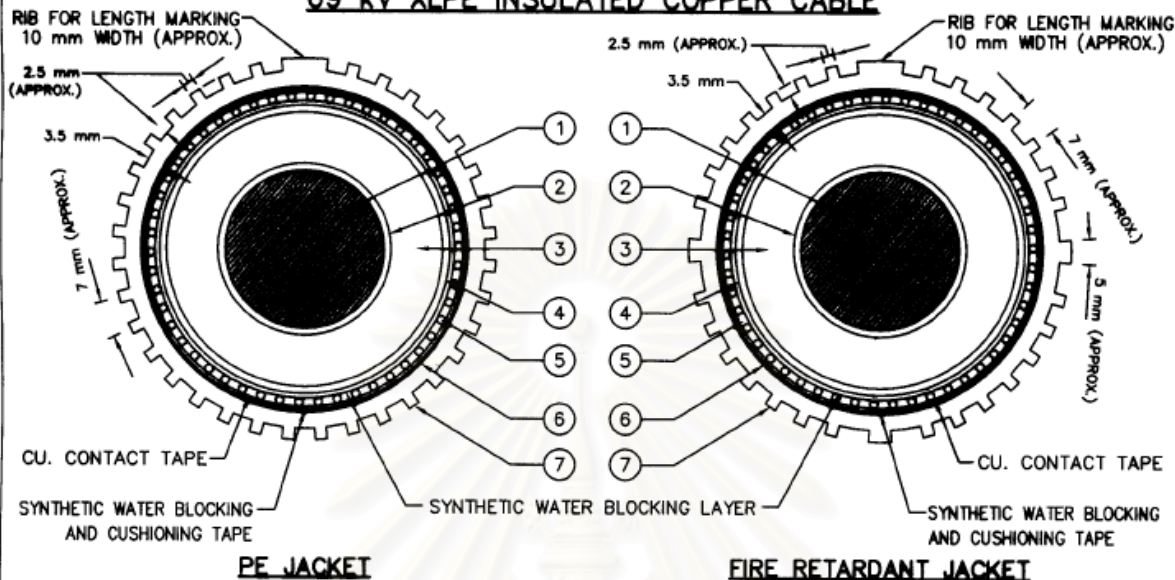
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS		BY	DATE
DR. Manthol	CHK. Pongsan	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE
DIR.DIV. R. Than		PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS	SUPERSEDING	
DIR.DEPT. Luvachai		OF	SH.NO. 2	OF 2
DEP.GOV.		12/20 (24) kV XLPE INSULATED COPPER CABLE	DWG. NO.	<b>UG-4-015</b>
DATE 24/10/2549				

**PHYSICAL CHARACTERISTICS**

**OF**

**69 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**



DESCRIPTION	NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>	
	800	1200
MINIMUM NUMBER OF STRAND WIRES	53	-
DIAMETER OF CONDUCTOR, mm ①	34.0	41.7
THICKNESS OF CONDUCTOR SCREEN, mm ②	1.5	1.5
THICKNESS OF INSULATION, mm ③	11	11
RANGE OF DIAMETER OVER INSULATION, mm	59-62	66.7-72.7
THICKNESS OF INSULATION SCREEN, mm ④	1.5	1.5
MINIMUM NUMBER OF SCREEN WIRES	50	70
MINIMUM TOTAL SECTIONAL AREA OF CU. WIRE SCREEN, mm <sup>2</sup> ⑤	120	120
AVERAGE THICKNESS OF AL. TAPE IN RADIAL WATER BARRIER (MIN.), mm ⑥	0.19	0.19
THICKNESS OF NON-METALLIC SHEATH (EXCLUDING RIB), mm ⑦	3.5	3.5
RANGE OF DIAMETER OVER RIB BOTTOM OF JACKET (D), mm	76-81	83.7-91.7
WEIGHT OF CABLE, kg/km (APPROX.)	12,000	15,000
MINIMUM BENDING RADIUS	20D	20D
MAXIMUM PERMISSIBLE PULLING FORCE WITH PULLING EYE, kgf (lbf)	2,268 (5,000)	2,268 (5,000)
MAXIMUM ALLOWABLE SIDEWALL PRESSURE, kgf/m (lbf/ft)	744 (500)	744 (500)

CONDUCTOR SIZE, mm <sup>2</sup>	CODE NO.	
	PE JACKET	FIRE RETARDANT JACKET
800	6145-234-80100	6145-234-80300
1200	6145-234-12100	-

NOTE SEE MEA'S SPECIFICATION FOR MORE DETAILS.

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS	BY	DATE
DR. <i>Paramej</i> / CHK. <i>Pongsan</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE
DIR.DIV. <i>R.Than</i>	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS	SUPERSEDING	
DIR.DEPT. <i>Luvachai</i>	OF	SH.NO. 1 OF 2	
DEP.GOV. <i>[Signature]</i>	69 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE	DWG. NO. <b>UG-4-017</b>	
DATE 24/1/2549			

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**  
**OF**  
**69 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**

DESCRIPTION		CONDUCTOR SIZE (mm <sup>2</sup> )				
		800			1200	
TYPE OF INSTALLATION		IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)	IN PIPE- JACKING	IN ENCLOSED TRENCH (AT TERMINAL/ SUBSTATION)	IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)	IN ENCLOSED TRENCH (AT TERMINAL/ SUBSTATION)
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km		0.0221			0.0151	
POSITIVE- & NEGATIVE- SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.0310	0.0310	0.0311	0.0230	0.0232
	REACTANCE, Ω/km	0.200	0.1857	0.1729	0.1874	0.1678
ZERO- <sup>2)</sup> SEQUENCE	RESISTANCE, Ω/km	0.213 (0.1797)	0.213 (0.1797)	- (0.1798)	0.205 (0.1717)	- (0.1719)
	REACTANCE, Ω/km	0.0766 (1.628)	0.0763 (1.657)	- (1.683)	0.0708 (1.615)	- (1.654)
Z <sub>0</sub> /Z <sub>1</sub> RATIO		1.118 (8.09)	1.202 (8.85)	1.287 (9.63)	1.149 (8.60)	1.279 (9.82)
SHIELD RESISTANCE @ 70 °C, Ω/km		0.1805	0.1805	0.1805	0.1805	0.1805
SHUNT CAPACITIVE REACTANCE, MΩ·km		0.014			0.012	
CHARGING CURRENT @ U <sub>0</sub> , A/km		2.89			3.38	
DIELECTRIC LOSS @ U <sub>0</sub> , W/km		115.3			135.0	

**NOTES**

1. A.C. RESISTANCE ARE BASED ON 90 °C
2. ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE ARE BASED ON RETURN CURRENT BOTH IN SHIELD WIRE AND IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH EXCEPT VALUE IN PARENTHESES BASED ON ALL RETURN CURRENT IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH. (i.e. SHIELDS GROUNDED AT ONE END)

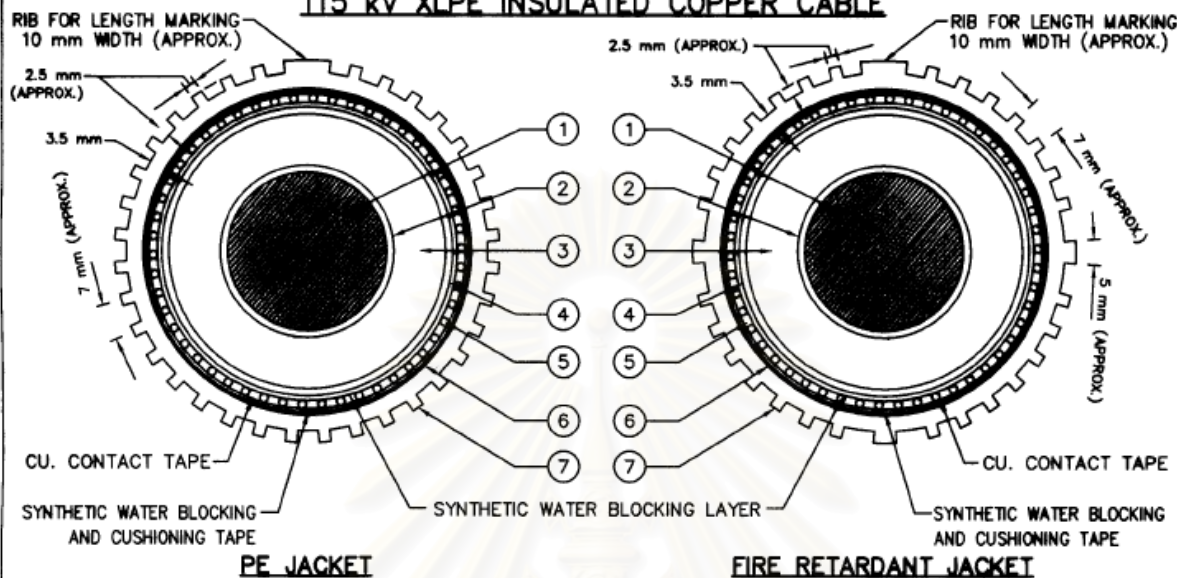
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS			BY	DATE
DR. Manthol	CHK. Pongsan	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY		SCALE	NONE
DIR.DIV.	R Man	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS		SUPERSEDING	
DIR.DEPT.	Jurochai	OF		SH.NO.	2 OF 2
DEP.GOV.		69 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE		DWG.	UG-4-017
DATE	24/1/2549			NO.	

**PHYSICAL CHARACTERISTICS**

**OF**

**115 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**



DESCRIPTION	NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>
MINIMUM NUMBER OF STRAND WIRES	53
DIAMETER OF CONDUCTOR, mm ①	34.0
THICKNESS OF CONDUCTOR SCREEN, mm ②	1.5
THICKNESS OF INSULATION, mm ③	16
RANGE OF DIAMETER OVER INSULATION, mm	69-72
THICKNESS OF INSULATION SCREEN, mm ④	1.5
MINIMUM NUMBER OF SCREEN WIRES	70
MINIMUM TOTAL SECTIONAL AREA OF CU. WIRE SCREEN, mm <sup>2</sup> ⑤	120
AVERAGE THICKNESS OF AL. TAPE IN RADIAL WATER BARRIER (MIN.), mm ⑥	0.19
THICKNESS OF NON-METALLIC SHEATH (EXCLUDING RIB), mm ⑦	3.5
RANGE OF DIAMETER OVER RIB BOTTOM OF JACKET (D), mm	86-91
WEIGHT OF CABLE, kg/km (APPROX.)	14,000
MINIMUM BENDING RADIUS	20D
MAXIMUM PERMISSIBLE PULLING FORCE WITH PULLING EYE, kgf (lbf)	2,268 (5,000)
MAXIMUM ALLOWABLE SIDEWALL PRESSURE, kgf/m (lbf/ft)	744 (500)

CONDUCTOR SIZE, mm <sup>2</sup>	CODE NO.	
	PE JACKET	FIRE RETARDANT JACKET
800	6145-238-80000	6145-238-80300

**NOTE** SEE MEA'S SPECIFICATION FOR MORE DETAILS.

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS		BY	DATE
DR. <i>Paramey</i>	CHK. <i>Pongsan</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE
DIR.DIV. <i>R. Thon</i>	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS		SUPERSEDING	
DIR.DEPT. <i>Lurachai</i>	OF		SH.NO. 1 OF 2	
DEP.GOV. <i>[Signature]</i>	115 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE		DWG. NO. <b>UG-4-019</b>	
DATE 24/1/2549				

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**  
**OF**  
**115 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE**

DESCRIPTION		CONDUCTOR SIZE (mm <sup>2</sup> )		
		800		
TYPE OF INSTALLATION		IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)	IN PIPE-JACKING	IN ENCLOSED TRENCH (AT TERMINAL/ SUBSTATION)
D.C. RESISTANCE @ 20 °C, Ω/km		0.0221		
POSITIVE- & NEGATIVE- SEQUENCE	RESISTANCE <sup>1)</sup> , Ω/km	0.0310	0.0310	0.0311
	REACTANCE, Ω/km	0.200	0.1857	0.1802
ZERO- <sup>2)</sup> SEQUENCE	RESISTANCE, Ω/km	0.213 (0.1797)	0.213 (0.1797)	- (0.1798)
	REACTANCE, Ω/km	0.0857 (1.628)	0.0854 (1.657)	- (1.668)
$Z_0/Z_1$ RATIO		1.134 (8.09)	1.129 (8.85)	- (9.17)
SHIELD RESISTANCE @ 70 °C, Ω/km		0.1805	0.1805	0.1805
SHUNT CAPACITIVE REACTANCE, Ω · km		0.018		
CHARGING CURRENT @ $U_0$ , A/km		3.86		
DIELECTRIC LOSS @ $U_0$ , W/km		256		

**NOTES**

1. A.C. RESISTANCE ARE BASED ON 90 °C
2. ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE ARE BASED ON RETURN CURRENT BOTH IN SHIELD WIRE AND IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH EXCEPT VALUE IN PARENTHESES BASED ON ALL RETURN CURRENT IN 40 Ω·m (AVERAGE) EARTH. (i.e. SHIELDS GROUNDED AT ONE END)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REV.NO.	DESCRIPTION	OF	REVISIONS	BY	DATE
DR. Monthol	CHK. Pongsan	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY		SCALE	NONE
DIR.DIV.	R. Thon	PHYSICAL & ELECTRICAL CHARACTERISTICS		SUPERSEDING	
DIR.DEPT.	Jurachai	OF		SH.NO.	2 OF 2
DEP.GOV.		115 kV XLPE INSULATED COPPER CABLE		DWG.	
DATE	24/1/2549			NO.	<b>UG-4-019</b>

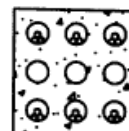
**ALLOWABLE AMPACITIES IN AMPERES  
FOR CABLE RATED  $U_0/U = 12/20$  kV IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)  
INSTALLATION METHOD**

AMBIENT EARTH TEMPERATURE = 30 °C  
NATIVE SOIL THERMAL RESISTIVITY = 1.0 K·m/W (AVERAGE)  
CONCRETE THERMAL RESISTIVITY = 1.0 K·m/W

DEPTH OF LAYING = 1.2 m (AVERAGE)

SHIELD BONDING : MULTIPLE-GROUNDED FOR CABLE SIZE UP TO 400 mm<sup>2</sup>  
: SINGLE-POINT GROUNDED FOR CABLE SIZE 800 mm<sup>2</sup>

ARRANGEMENT IN CONDUIT : THREE CABLES IN COMMON DUCT FOR CABLE SIZE UP TO 400 mm<sup>2</sup>  
: ONE CABLE IN ONE DUCT FOR CABLE SIZE 800 mm<sup>2</sup>



**TYPICAL INSTALLATION**

**TABLE 4-310A CONDUCTOR SIZE UP TO 400 mm<sup>2</sup>**

NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>	NUMBER OF CIRCUITS								
	1-2			3-6			7-10		
	If=0.7	If=0.85	If=1.0	If=0.7	If=0.85	If=1.0	If=0.7	If=0.85	If=1.0
70	211	196	183	183	167	153	153	137	123
120	288	267	248	248	225	205	206	183	164
240	417	384	354	355	320	291	292	258	231
400	529	486	447	448	403	364	365	322	287

NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>	NUMBER OF CIRCUITS								
	11-15			16-20			21-24		
	If=0.7	If=0.85	If=1.0	If=0.7	If=0.85	If=1.0	If=0.7	If=0.85	If=1.0
70	129	113	101	115	101	90	106	92	81
120	172	151	134	154	134	119	141	122	108
240	242	212	188	216	188	166	196	170	150
400	302	260	233	268	233	206	244	211	186

**TABLE 4-310B CONDUCTOR SIZE 800 mm<sup>2</sup>**

NOMINAL CROSS-SECTIONAL AREA OF CONDUCTOR, mm <sup>2</sup>	3 ELECTRICAL DUCTS			6 ELECTRICAL DUCTS			9 ELECTRICAL DUCTS		
	If=0.7	If=0.85	If=1.0	If=0.7	If=0.85	If=1.0	If=0.7	If=0.85	If=1.0
800	1099	1013	936	934	841	763	826	735	660

NOTE SEE APPLICATION OF LOAD FACTOR (If) ON UG-4-100 SH.NO.2

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS			BY	DATE	
DR. <i>Manthol</i>	CHK. <i>Pongsan</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY			SCALE	NONE
DIR.DIV.	<i>R. Man</i>	POWER CABLE AMPACITIES			SUPERSEDING	
DIR.DEPT.	<i>A. Masawat</i>	CABLE LAID IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)			SH.NO.	1 OF 1
DEP.GOV.	<i>g</i>	(SHIELDED EXTRUDED INSULATION CU CONDUCTOR, RATED 12/20 kV)			DWG. NO.	<b>UG-4-310</b>
DATE	16/10/2548					

**ALLOWABLE AMPACITIES IN AMPERES  
FOR CABLE RATED 69 & 115 kV IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)  
INSTALLATION METHOD**

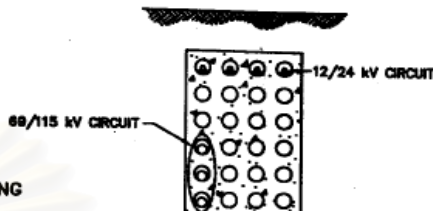
AMBIENT EARTH TEMPERATURE = 30 °C  
NATIVE SOIL THERMAL RESISTIVITY = 1.0 K·m/W (AVERAGE)  
CONCRETE THERMAL RESISTIVITY = 1.0 K·m/W

DEPTH OF LAYING = 0.75 m (MIN.)

SHIELD BONDING : SINGLE-POINT GROUNDED OR CROSS-BONDING

ARRANGEMENT IN CONDUIT : ONE CABLE IN ONE DUCT

CRITERION : THE MAXIMUM DESIGN CURRENT IN 12/24 kV CIRCUIT AND 69/115 kV (800 mm<sup>2</sup>) CIRCUIT SHALL BE 250 AND 600 A RESPECTIVELY.



**TYPICAL INSTALLATION**

**TABLE 4-410A CONDUCTOR SIZE 800 mm<sup>2</sup> (FOR 69 & 115 kV)**

NUMBER OF CABLES	NUMBER OF 12/24 kV CIRCUITS IN THE SAME DUCT BANK	AMPACITY (A)		
		If = 0.7	If = 0.85	If = 1.0
3	0	1063	980	905
	1-4	1002	924	853
	5-8	952	878	810
	9-14	712	659	610
	15-17	491	452	417
6	0	901	811	736
	1-4	845	761	690
	5-8	805	725	657
	9-14	604	546	498
9	0	794	707	635
	1-4	745	662	595
	5-8	707	629	564
	9-11	598	534	481
12	0	732	647	579
	1-4	686	606	542
	5-8	651	576	514
18	0	664	583	519
	1-2	644	565	503

NOTE SEE APPLICATION OF LOAD FACTOR (If) ON UG-4-100 SH.NO.2

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS	BY	DATE
DR. <i>Manthol</i>   CHK. <i>Pongsan</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY		
DIR.DIV. <i>R Man</i>	POWER CABLE AMPACITIES	SCALE	NONE
DIR.DEPT. <i>S Man</i>	CABLE LAID IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)	SUPERSEDING	
DEP.GOV. <i>Man</i>	(SHIELDED EXTRUDED INSULATION CU CONDUCTOR, RATED 69 & 115 kV)	SH.NO. 1 OF 2	
DATE 16/11/2548		DWG. NO. <b>UG-4-410</b>	

**TABLE 4-410B CONDUCTOR SIZE 1200 mm<sup>2</sup> (FOR 69 kV ONLY)**

NUMBER OF CABLES	NUMBER OF 69/115 kV (800 mm <sup>2</sup> ) CABLES IN THE SAME DUCT BANK	NUMBER OF 12/24 kV CIRCUITS IN THE SAME DUCT BANK	AMPACITY (A)		
			If = 0.7	If = 0.85	If = 1.0
3	0	0	1283	1176	1081
		1-4	1205	1105	1015
		5-8	1146	1050	965
		9-14	859	791	729
		15-17	594	545	501
	3	0	1132	1038	954
		1-4	1043	956	878
		5-8	973	892	820
	6	0	997	914	840
		1-4	894	819	753
		5-8	812	744	684
	9	0	870	798	733
1-4		750	688	632	
5-8		650	596	548	
12	0	739	677	622	
	1-5	510	469	432	
6	0	0	1076	965	871
		1-4	1008	903	816
		5-8	958	858	775
		9-12	802	721	653
	3	0	949	851	788
		1-4	871	780	705
		5-8	812	728	657
	6	0	835	749	676
		1-4	745	668	603
		5-8	675	605	546
	9	0	745	668	603
		1-4	631	565	510
5-8		537	483	437	
12	0	634	570	515	
	1-2	562	505	458	

NOTE SEE APPLICATION OF LOAD FACTOR (If) ON UG-4-100 SH.NO.2

REV.NO.	DESCRIPTION OF REVISIONS		BY	DATE
DR. <i>Manthol</i>	CHK. <i>Pongsan</i>	METROPOLITAN ELECTRICITY AUTHORITY	SCALE	NONE
DIR.DIV. <i>R. Man</i>	POWER CABLE AMPACITIES		SUPERSEDING	
DIR.DEPT. <i>A. Madhu</i>	CABLE LAID IN DUCT BANK (CONCRETE ENCASED)		SH.NO. 2	OF 2
DEP.GOV. <i>[Signature]</i>	(SHIELDED EXTRUDED INSULATION CU CONDUCTOR, RATED 69 & 115 kV)		DWG. NO.	<b>UG-4-410</b>
DATE 16/11/2548				



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นพพร บุญเพียร เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2539 เข้าทำงานที่การไฟฟ้านครหลวง ปี 2540 จนถึงปัจจุบัน และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาต้นปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย