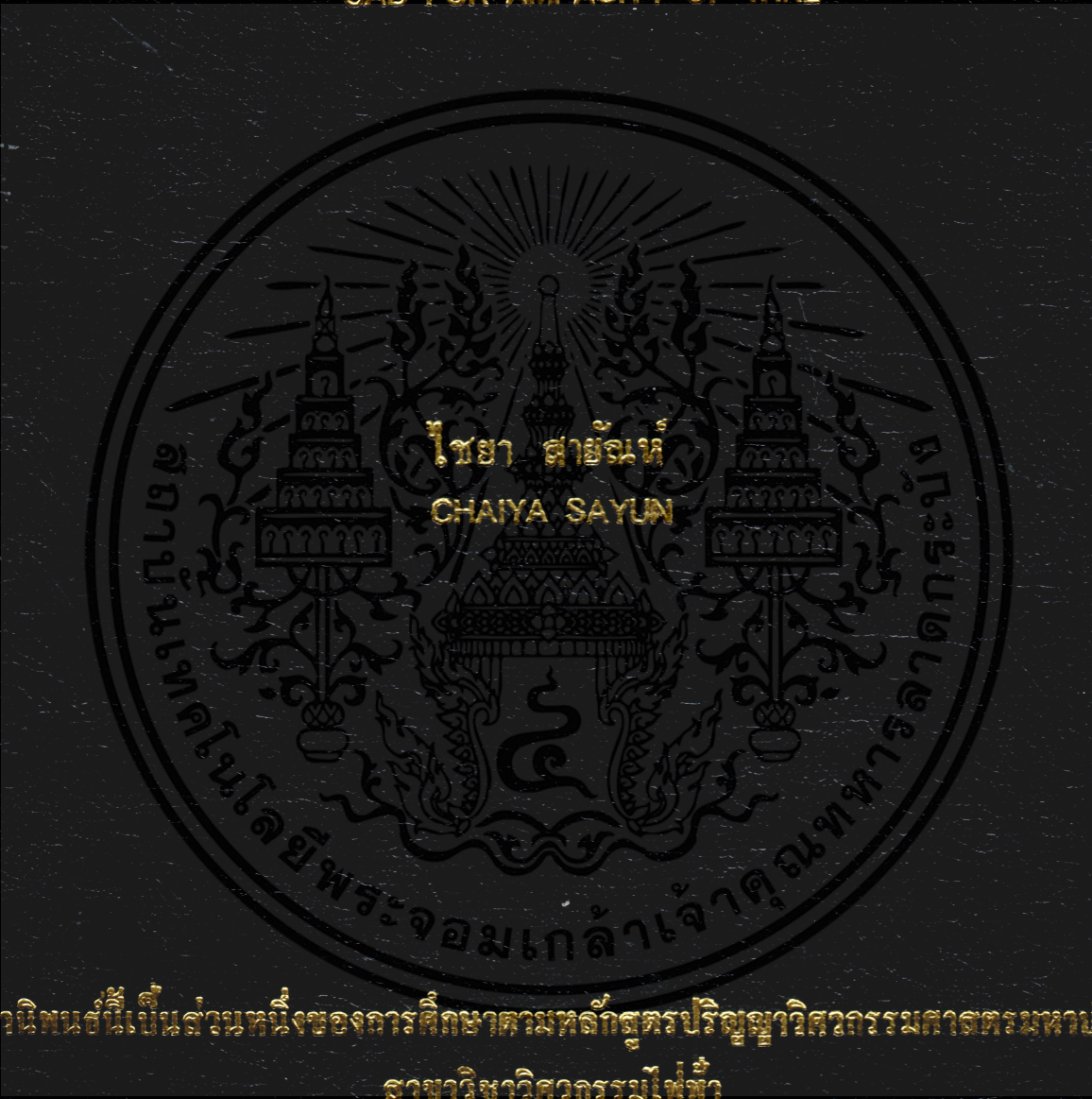


การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสไฟฟ้าสำหรับสายไฟฟ้า

CAD FOR AMPACITY OF WIRE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-427-3

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสไฟฟ้าสำหรับสายไฟฟ้า

CAD FOR AMPACITY OF WIRE



เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 40801  
วัน, เดือน, ปี 26 พ.ย. 2544

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

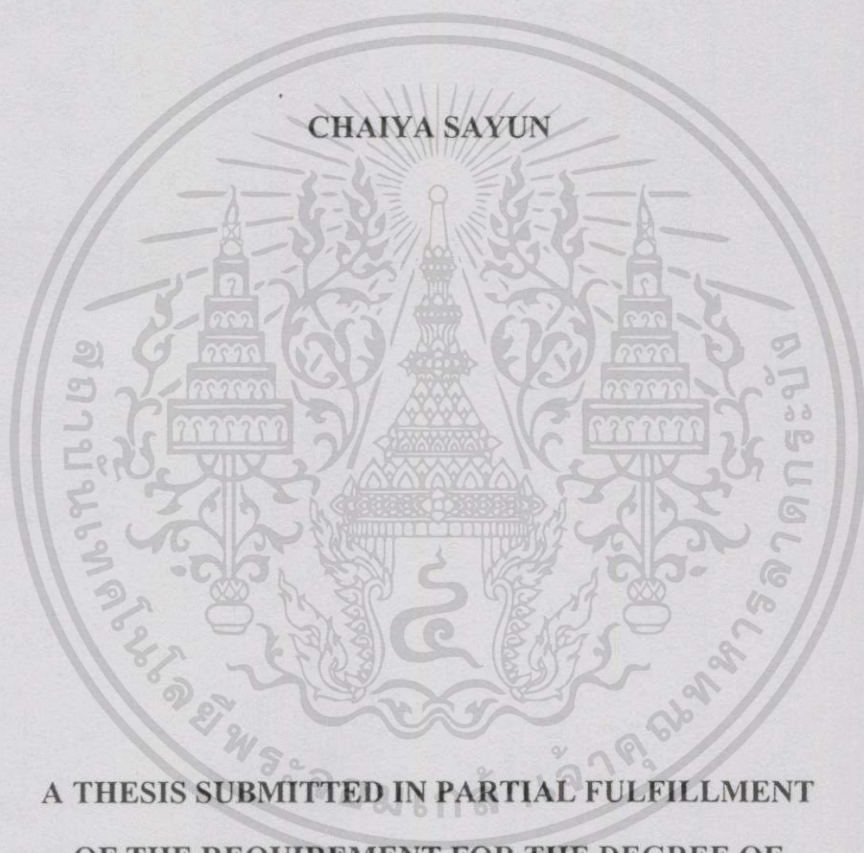
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-427-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CAD FOR AMPACITY OF WIRE



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

2001

ISBN 974-6448-427-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาด กระแสไฟฟ้าสำหรับสายไฟฟ้า  
CAD FOR AMPACITY OF WIRE

ชื่อนักศึกษา              นายไชยา              สายัณห์





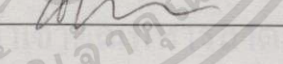
รหัสประจำตัว              39061072

ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                   วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ศุภี                      บรรจงจิตร

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม      รศ.ดร.กอบชัย              เดชหาญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.นิทัศน์	กฤษณจินดา	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ	
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 กันยายน 2544 เวลา 13.30 – 15.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 22 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสไฟฟ้า  
สำหรับสายไฟฟ้า

นักศึกษา

นายไชยา สายัณห์

รหัสประจำตัว

39061072

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2544

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ศุติ บรรจงจิตร

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ. ดร. กอบชัย เศรษฐาญ

### บทคัดย่อ

ขนาดของสายเคเบิล มีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะจะเกี่ยวข้องกับขนาดของโหลด และยังเกี่ยวข้องกับลักษณะสภาพของการใช้งานด้วย ในบทความฉบับนี้จะเป็นการแสดงผลการสำเร็จรูป เพื่อแสดงวิธีการหาขนาด กระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลในลักษณะของการใช้งาน และได้แสดงไว้ในตารางประกอบของ กฟน. และ กฟภ. ซึ่งการแสดงผลเป็นผลการสำเร็จรูปจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ สามารถนำไปประยุกต์กับงานลักษณะอื่น ๆ เช่นการใช้งานในช่องชาร์ฟ รางเดินสายและ Duct Bank

<b>Thesis Title</b>	CAD for Ampacity of wire
<b>Student</b>	Chaiyai Sayun
<b>Student ID.</b>	39061072
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Sulee Bunjongjit
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Kobchai Dejhan

### ABSTRACT

Normally, the size of the cable is important, because it is related to the load and also to physical working environment. In this paper, the conceptual equations are presented in order to determine the amount of conducted current on the cable. They are also tabulated in the association with MEA and PEA. The illustration in the forms of equations is useful for users in order to apply for various applications. For example, the applied work in sharp, conduit, duct bank via the concept of this research.

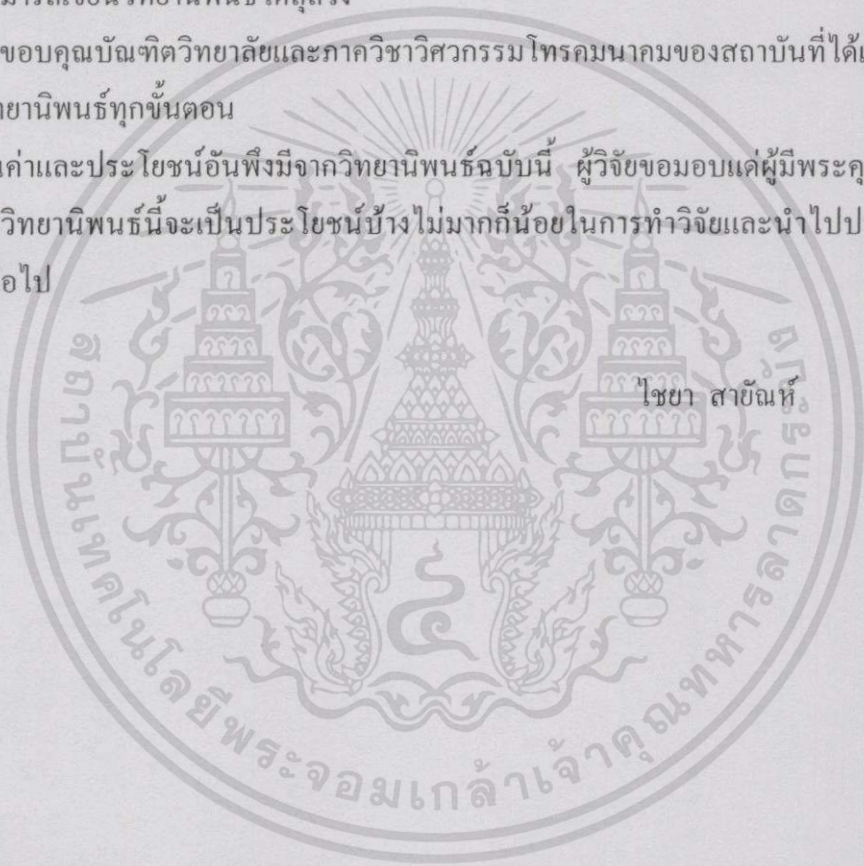
## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความกรุณาจาก อาจารย์รองศาสตราจารย์ ศุภี บรรจงจิตร รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์จนทำให้ผู้วิจัยเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ นุพการี และเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจสนับสนุนจนผู้วิจัยเกิดความมานะจนสามารถเขียนวิทยานิพนธ์ได้ลุล่วง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมของสถาบันที่ได้เอื้ออำนวยความสะดวกในการเขียนวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยในการทำวิจัยและนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไป



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	3
1.3.1 แบ่งตามชนิดของวัสดุฉนวน.....	3
1.3.2 แบ่งตามชนิดของตัวนำ.....	3
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา และวิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการออกแบบและหลักการทั่วไปของสายเคเบิลกำลัง.....	5
2.1 การออกแบบโครงสร้างของสายเคเบิล.....	5
2.1.1 ตัวนำ.....	5
2.1.2 ฉนวน.....	6
2.2 ความต้านทานและความเหนียวของสายเคเบิล.....	7
2.2.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ.....	7
2.2.2 ความเหนียว.....	8
2.3 ความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance).....	9
2.4 ความจุไฟฟ้า (Capacitance).....	11
2.4.1 ความจุไฟฟ้าของสายแกนเดี่ยว.....	11
2.4.2 ความจุไฟฟ้าของเบลท์เคเบิล 3 แกน.....	13
2.5 ตัวประกอบกำลัง ไดอิเล็กทริก ( Dielectric Loss Angle).....	13
2.6 การคำนวณค่าการกระจายความเครียดไฟฟ้า (Electric stress Distribution).....	14

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1 การกระจายความเครียดไฟฟ้ากระแสสลับในสายแกนเดี่ยวและหลายแกน...	14
2.6.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำ.....	16
2.6.3 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของตัวนำ.....	16
2.7 แหล่งกำเนิดความสูญเสียทางไฟฟ้า (Source of Electrical Losses).....	17
2.7.1 ความสูญเสียของตัวนำ (Conductor Losses).....	17
2.7.2 ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss).....	18
2.7.3 ความสูญเสียของเปลือกสาย (Sheath Loss).....	19
2.7.4 กระแสไหลวนในเปลือกสาย (Sheath eddy currents).....	19
บทที่ 3 การแยกประเภทของสายเคเบิลตามลักษณะของงาน.....	22
3.1 สายเคเบิลที่ใช้กับสถานที่ปกติทั่วไป.....	22
3.1.1 สายเคเบิลแรงสูง (High voltage Cable).....	22
3.1.1.1 สายเปลือย (Bare Cable).....	22
3.1.1.2 สายหุ้มฉนวน (Insulated Cables).....	24
3.1.2 สายเคเบิลแรงต่ำ (Low Voltage Cable).....	27
3.2 สายเคเบิลใช้งานสำหรับสถานที่อันตรายและงานเฉพาะ.....	33
3.2.1 สายโพลีเมอร์ทนไฟ (Fire Resistant Polymeric Cable).....	34
3.2.2 สายเคเบิลฉนวนแร่เปลือกโลหะ (Mineral Insulated Metal Sheathed Cable).....	35
บทที่ 4 การวิเคราะห์หลักเกณฑ์ในการเลือกขนาดของสายเคเบิล.....	38
4.1 การกำหนดความทนต่อกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิล.....	38
4.2 ความต้านทานความร้อนของฉนวนสายเคเบิล.....	42
4.3 การลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้าใช้งานเนื่องจากอุณหภูมิ.....	43
4.4 กระแสไฟฟ้าใช้งานจากการติดตั้งสายเคเบิลที่แข็ง.....	44
4.4.1 ผลของอุณหภูมิของอากาศ.....	44
4.4.2 ผลจากจำนวนสายเคเบิล.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 แรงดันตก (Voltage Drop).....	50
4.5.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล.....	51
4.5.2 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากำลังของสายเคเบิล (PF).....	52
4.5.3 ความยาวของสายเคเบิล (L).....	54
4.5.4 Internetworking, Access และ Trucking.....	54
4.6 พิกัดกระแสลัดวงจรของสายเคเบิล (Short Circuit Rating).....	54
4.7 ชนิดของกระแสลัดวงจร.....	55
4.7.1 Short-circuit Faults.....	55
4.7.2 Open-Circuit Faults.....	55
4.7.3 Winding Faults.....	55
4.7.4 Simultaneous Faults.....	55
บทที่ 5 การคำนวณสายเคเบิลแบบ Neher-McGrath .....	56
5.1 บทนำ.....	56
5.2 การวิเคราะห์เบื้องต้น.....	56
5.3 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน.....	57
5.4 สมการคำนวณหาค่ากระแส.....	59
5.5 สมการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance).....	59
5.5.1 ความต้านทานความร้อนของฉนวน.....	59
5.5.2 ความต้านทานความร้อนของ jacket.....	59
5.5.3 ความต้านทานความร้อนของสายเคเบิล ใน Ducts.....	60
5.5.4 ความต้านทานความร้อนของ cables, conduit หรือ duct เมื่อลอยอยู่ในอากาศ.....	60
5.5.5 ความต้านทานความร้อนของดิน.....	60
5.6 ตัวอย่างการคำนวณ.....	62
5.6.1 กรณีเดินลอยในอากาศ.....	62
5.6.2 กรณีเดินในท่ออลูมิเนียม.....	63
5.6.3 กรณีแบบเดินฝังดิน.....	64



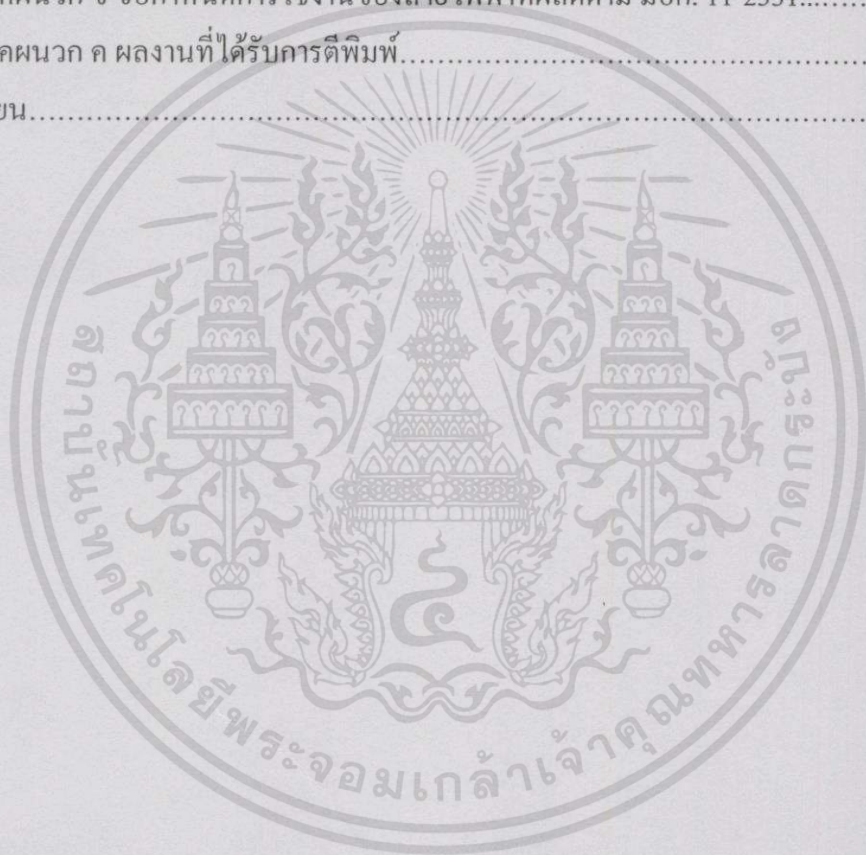
# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.5.3	ตัวประกอบความสูญเสียกำลังในฉีท และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน (Loss Factor of Sheath and Screen : $\lambda_1$ ).....	86
6.5.3.1	สายแกนเดี่ยว 2 เส้น และ 3 เส้นวางแบบสามเหลี่ยม มีการต่อฉีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และมีการสลับสาย.....	86
6.5.3.2	สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อฉีทที่ปลายทั้งสองลงกราวด์ และมีการสลับสาย.....	87
6.5.3.3	สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อฉีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และไม่มีสลับสาย.....	87
6.5.3.4	สายแกนเดี่ยว 1 เส้น มีการต่อฉีทลงกราวด์ และที่จุดปลายมีการสลับสาย.....	88
6.5.4	ค่าตัวประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเครื่องห่อหุ้ม (Power Loss Factor in Armour : $\lambda_2$ ).....	90
6.5.4.1	สายเคเบิลเป็นตัวนำแบบกลม (Round).....	90
6.5.4.2	สายเคเบิลเป็นตัวนำแบบเซกเตอร์ (Sector).....	90
6.5.5	การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance).....	91
6.5.5.1	ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับฉีท ( $T_1$ ).....	91
6.5.5.2	ความต้านทานความร้อนระหว่างฉีทกับเครื่องห่อหุ้ม ( $T_2$ ).....	92
6.5.5.3	ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล ( $T_3$ ).....	92
6.5.5.4	ความต้านทานความร้อนระหว่างฉนวนเปลือกนอกของสายถึงผิวพื้นดิน ( $T_4$ ).....	92
บทที่ 7	โพลีชาร์ต และผลการทำงานของโปรแกรม.....	95
7.1	โพลีชาร์ต.....	95
7.2	การทำงานของโปรแกรม.....	98
บทที่ 8	สรุปผลการวิจัย.....	106
8.1	สรุปผลการวิจัย.....	106

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	108
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก โปรแกรมคำนวณกระแสของสายเคเบิล.....	110
ภาคผนวก ข ข้อกำหนดการใช้งานของสายไฟฟ้าที่ผลิตตาม มอก. 11-2531.....	124
ภาคผนวก ค ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	134



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอลูมิเนียม.....	6
2.2 แสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE .....	7
4.1 แสดงค่าตัวประกอบลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้า $C_u$ ติดตั้งที่แจ้ง อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C .....	46
4.2 แสดงค่าตัวประกอบลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้า $C_u$ ติดตั้งใต้ดิน อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C .....	46
4.3 แสดงค่าตัวประกอบจำนวนสายเคเบิล $C_g$ สำหรับหลายแกนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 1 วงจรหรือมากกว่า.....	48
4.4 แสดงค่าตัวประกอบจำนวนสายเคเบิล $C_u$ สำหรับสายแกนเดี่ยวในระบบไฟฟ้า 3 เฟส.....	49
5.1 การเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากับวงจรสมมูลย์ทางความร้อน.....	58
5.2 ความหมายของตัวแปรในวงจรสมมูลย์ทางความร้อน.....	58
5.1 ค่าเฉลี่ย Latency, Delay สำหรับ Two-way Video/Voice Applications.....	48
5.2 การอธิบายโมดูลและแสดงการสูญหายของเซลล์.....	58
5.3 ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่างๆ.....	61
5.4 ค่าคงที่ A', B'.....	61
5.5 ค่าตัวแปรต่างๆ ของ duct bank .....	62
6.1 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ.....	71
6.2 แสดงค่าคงที่ A, B, C.....	78
6.3 ค่าคงที่ของตัวแปร U, V และ Y .....	93

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะพื้นที่หน้าตัดตัวนำของสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ.....	5
2.2 แสดงการคำนวณค่าความต้านทานฉนวนของสายตัวนำหุ้มฉนวน.....	10
2.3 แสดงภาพตัดขวางของสายเคเบิลที่มาของความจุไฟฟ้า.....	11
2.4 แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของ Dielectric Loss Angle .....	14
2.5 แสดงการกระจายฟลักซ์ไฟฟ้าภายในเบรลท์เคเบิล.....	15
2.6 ความเครียดสนามไฟฟ้าสถิตในสายเคเบิลแกนเดี่ยว.....	15
2.7 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามรัศมีของตัวนำ.....	17
3.1 แสดงสายเคเบิลชนิด AAC .....	23
3.2 แสดงลักษณะสายเคเบิลชนิด ACSR .....	24
3.3 แสดงลักษณะของสายเคเบิลชนิด PVC.....	25
3.4 แสดงลักษณะของสายเคเบิลชนิด SAC .....	25
3.5 แสดงลักษณะของสายเคเบิล XLPE .....	26
3.6 แสดงสายเคเบิลตามตารางที่ 2 ของ มอก. 11-2531.....	29
3.7 แสดงสายเคเบิลตามตารางที่ 11 ของ มอก. 11-2531.....	29
3.8 แสดงลักษณะของสายเคเบิลตามตารางที่ 4 มอก. 11-2531.....	30
3.9 แสดงลักษณะสายเคเบิลตามตารางที่ 7 มอก. 11-2531.....	31
3.10 แสดงลักษณะสายไฟตารางที่ 8 มอก. 11-2531.....	31
3.11 แสดงลักษณะของสายไฟตารางที่ 14 มอก. 11-2531.....	31
3.12 แสดงลักษณะของสาย CV.....	32
3.13 แสดงลักษณะของสายทนไฟชนิด F.R.....	35
3.14 แสดงลักษณะสายชนิด MI.....	36
4.1 การสูญเสียต่าง ๆ ของสายเคเบิลและการส่งถ่ายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียจากตัวนำออกสู่ ตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิล.....	42
4.2 ค่าตัวประกอบการคูณของสายเคเบิลควบคุมขึ้นอยู่กับจำนวนแกนตัวนำเฉพาะที่อยู่ภายใต้ กระแสไฟฟ้า.....	47
4.3 ก) แสดงวงจรสมมูล ข) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม.....	51
4.4 การวางสายเคเบิลแบบสายเหลี่ยมสมมาตร (Trefoil).....	53
5.1 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า.....	57
5.3 วงจรสมมูลย์ทางความร้อนสำหรับตัวนำเดี่ยวเดินลอยในอากาศ.....	57
5.4 ลักษณะของ duct bank ขนาดต่าง ๆ.....	61
6.1 วงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลชนิด 1 แกน.....	61
6.2 วงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลชนิด 3 แกน.....	62
6.3 (ก) การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม (Trefoil) (ข) การวางสายเคเบิลแบบราบ (Flat).....	62
7.1 แสดงโพล์ชาร์จการทำงานของโปรแกรม.....	96
7.2 หน้าจอหลักของโปรแกรม.....	98
7.3 แสดงหน้าจอในการเลือกรูปแบบในการคำนวณ.....	98
7.4 แสดงหน้าจอในการใส่ข้อมูล.....	99
7.5 แสดงผลการคำนวณของสายแกน Low Voltage เดี่ยวเดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	99
7.6 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น ในท่อโลหะลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	100
7.7 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้นเดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	100
7.8 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยวไม่เกิน 3 เส้น หรือสายไม่เกิน 3 แกน ฝังดินโดยตรงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	101
7.9 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้นเดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	101
7.10 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อโลหะลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	102
7.11 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	102
7.12 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	103
7.13 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 1 วงจร ฝังดิน โดยตรงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ขนาดของสายเคเบิลมีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะจะเกี่ยวข้องกับขนาดของโหลด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของสายเคเบิลนั้น ได้ถูกออกแบบและเลือกใช้จากข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิต และจำหน่าย ซึ่งในปัจจุบัน มีสายเคเบิลให้เลือกใช้มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันมาก ทั้งทางด้านโครงสร้างของสายเคเบิล ชนิดของตัวนำ ชนิดของฉนวน การใช้งานของสายเคเบิลในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันทำให้คุณลักษณะของสายเคเบิลในด้านความสามารถในการรับกระแสมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิข้างเคียง อุณหภูมิขณะใช้งาน ความร้อนที่เกิดจากวิธีการติดตั้งที่แตกต่างกัน เช่น เดินสายลอยในอากาศ เดินสายร้อยท่อบนกำแพงหรือฝังในผนังปูนฉาบ เดินสายฝังดินโดยตรงหรือ เดินสายในรางเคเบิลเป็นต้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกเช่น ความร้อนที่เกิดจากสายเคเบิลข้างเคียงขณะใช้งาน, ปัจจัยในการกำหนดแรงดันตกคร่อมของสายเคเบิล ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้านทานและความเหนี่ยวนำของตัวเอง และความเหนี่ยวนำที่เกิดจากตัวนำข้างเคียง ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในกรณีที่ใช้สายเคเบิลกับไฟฟ้ากระแสสลับขนาดของแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งประสิทธิภาพของโหลดที่เป็นพวกมอเตอร์ แต่ปัญหาของผู้ออกแบบก็คือ ไม่สามารถพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ทั้งหมด เนื่องจากมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก ซึ่งทำให้ไม่มีเวลาที่จะพิจารณาได้ทุกกรณี ดังนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดที่นิยมก็คือ หาพิດการรับกระแสจากตารางสายเคเบิล ที่ได้จากผู้ผลิตและจำหน่าย เปรียบเทียบกับกระแสโหลดที่ต้องการเดินสายเคเบิล ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยของผู้ออกแบบ จึงได้ทำการเผื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้เพียงพอในการรองรับกระแสโหลดที่มีอยู่ ตรงจุดนี้ มักทำให้การเผื่อขนาดของสายเคเบิลมีขนาดเกินความจริง บางครั้งอาจมากกว่า 100 % ของขนาดปกติ และเป็นเหตุให้ต้นทุนในการติดตั้งสายเคเบิลสูงขึ้นด้วยเป็นเงาตามตัว ในทางกลับกัน สำหรับผู้ใช้งานทั่วไป เช่นกรณีที่ต้องการติดตั้งสายเคเบิล เพิ่มเติมกับโหลดตำแหน่งใหม่ที่ไม่ได้มีการออกแบบล่วงหน้า บางครั้งเพราะความประหัดจึงเลือกขนาดสายที่มีขนาดเล็กกว่าพิດกระแสของโหลดจริง กรณีนี้อาจทำให้สายเคเบิลไม่สามารถทนต่อความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลเกินพิດ และอาจเกิดเพลิงไหม้ได้

ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด (จุดที่ปลอดภัยและประหัดที่สุด) ในการเลือกใช้สายเคเบิล จึงพยายามศึกษาและวิจัยเพื่อสร้างหลักเกณฑ์ในการออกแบบ และเลือกใช้สายเคเบิลอย่างละเอียดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดภายใต้มาตรฐานที่กำหนด ซึ่งคำนึงถึงความสะดวกและความคล่องตัวสำหรับผู้ใช้งานในการออกแบบด้วย โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อให้เป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งสำหรับผู้ออกแบบ ให้สามารถเลือกใช้สายเคเบิลในระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์มาเป็นตัวประมวลผลและคำนวณอย่างละเอียด เพื่อให้ได้สายเคเบิลที่มีขนาดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้ในการออกแบบโครงการต่างๆ เพราะเนื่องจากในปัจจุบัน ประเทศไทยมีการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ทำให้อาคารสถานที่ต่างๆ ถูกสร้างขึ้นมาอย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาคารสูง ซึ่งการออกแบบระบบไฟฟ้าในอาคารสูงเหล่านี้ นอกจากจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยแล้ว ราคาต้องสมเหตุสมผลด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาในส่วนของงานระบบไฟฟ้านั้น สายเคเบิลเปรียบเสมือนเป็นเส้นเลือดของอาคาร ซึ่งในปัจจุบัน ผู้ออกแบบมักจะเผื่อขนาดของสายให้มีขนาดใหญ่ เพื่อความปลอดภัย แต่บางครั้งก็เกินความจำเป็นอยู่มาก อีกทั้งบางครั้งอาจเลือกชนิดของสายไม่เหมาะสมกับสถานที่ใช้งาน ก็อาจเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงควรมีวิธีที่จะช่วยให้วิศวกรสามารถเลือกใช้สายเคเบิลที่มีขนาดที่เหมาะสมที่สุด และประหยัดที่สุด อีกทั้งยังเกิดความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้เครื่องมือคอมพิวเตอร์ ให้เป็นเครื่องอำนวยความสะดวกในการคำนวณ และเป็นທີ່ปรึกษาของวิศวกรได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงสำหรับข้อมูลทั้งหมดของสายเคเบิล เช่น โครงสร้างของสาย ชนิดของวัสดุฉนวน มาตรฐานการทดสอบ มาตรฐานการผลิต วิธีการติดตั้ง พักกระแส เป็นต้น โดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะเป็นผู้ประมวลผลข้อมูลต่างๆ ทั้งหมด เพื่อให้ได้คำตอบที่ต้องการ โดยผู้ที่ใช้งาน สามารถป้อนข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการออกแบบเท่านั้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลแล้วทำให้อยู่ในรูปของตัวประกอบการคูณ เพื่อให้ได้ค่าความสามารถในการรับกระแสที่ถูกต้องตามสภาพแวดล้อมที่เป็นจริง ซึ่งปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวนั้น ประกอบด้วย

- ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการติดตั้งแบบต่างๆ
- ปัจจัยที่เกิดจากอุณหภูมิรอบข้าง
- ปัจจัยที่เกิดจากกลุ่มสายข้างเคียงที่เกี่ยวข้อง
- ปัจจัยที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิอ้างอิงของสายเคเบิล

ตัวประกอบการคูณทั้งสิ้นที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ข้างต้นนั้นสามารถคำนวณได้จากบทความวิจัยที่เผยแพร่ โดย Neher-McGrath (NM) method และมาตรฐานของ IEC Publication 287 ปี 1982 ในการวิจัยครั้งนี้จะนำค่าตัวประกอบการคูณเฉพาะสายแรงดันต่ำที่สัมพันธ์กับค่าความสามารถในการรับกระแส ซึ่งคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณให้อย่างอัตโนมัติ ดังนั้นตัวประกอบการคูณที่เกิดจากปัจจัยของสิ่งแวดล้อมต่างๆ ดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าจะทำให้สายเคเบิลให้อยู่ในสภาพแวดล้อมอย่างไร ดังนั้นจึงต้องมีการรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการนำสายเคเบิลไปใช้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ ให้ครบถ้วนตามขอบเขตที่กำหนดไว้แล้วให้เครื่องคอมพิวเตอร์นำค่าต่างๆ ที่ผู้ใช้งานป้อนให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปประมวลหาผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นผลลัพธ์ที่ทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งด้านความปลอดภัย และความประหยัด

### 1.3 ขอบเขตโครงการ

การวิเคราะห์สายเคเบิลสำหรับการวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเฉพาะสายเคเบิลกำลังเท่านั้นและได้วิเคราะห์การเลือกใช้สายเคเบิลตลอดย่าน โดยกล่าวถึงทฤษฎีการออกแบบ โครงสร้างของสายเคเบิล การแยกประเภทของสายตามลักษณะของงาน มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงทั้งในและต่างประเทศ ข้อกำหนดการเดินสายของการไฟฟ้าฯ และหลักเกณฑ์ในการเลือกชนิดของสายเคเบิล ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการรับกระแสของสายที่กำหนด และ พิกัดกระแสของสายเคเบิล เนื่องจากขอบเขตการใช้งานของสายเคเบิลนั้นกว้างมาก ดังนั้นในส่วนของโปรแกรมใช้งาน จะเจาะจงไปที่สายแรงดันต่ำ เนื่องจากมีโอกาสนำมาใช้ได้มากในการออกแบบทั่วไปของวิศวกรหรือผู้ใช้งานในปัจจุบันมีผู้ผลิตและจำหน่ายสายเคเบิลออกมาหลายชนิดมีชื่อเรียกต่างๆ กัน ซึ่งแต่ละชนิดก็ออกแบบมาให้เหมาะกับสภาพแวดล้อมต่างๆ กัน ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงได้แบ่งสายเคเบิลแรงต่ำออกเป็นสายประเภทต่างๆ ตามชนิดของฉนวนที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ

#### 1.3.1 แบ่งตามชนิดของวัสดุฉนวน

- เคเบิลชนิด PVC ฉนวนทำจาก โพลีไวนิลคลอไรด์
- เคเบิลชนิด XLPE ฉนวนคลอสต์ริค โพลีเอธิลีน
- เคเบิลชนิด EPR ฉนวนทำจาก เอธิลีน โพร โพลีน
- เคเบิลชนิด MI ซึ่งมีฉนวนเป็นผงแร่แมกนีเซียมอ็อกไซด์หุ้มด้วยเปลือกสายทองแดง

#### 1.3.2 แบ่งตามชนิดของตัวนำ

- ตัวนำทองแดง
- ตัวนำอลูมิเนียม

ในการป้อนข้อมูลเพื่อหาผลลัพธ์นั้น ได้เขียนโปรแกรมแยกออกเป็น 2 ทางเลือก ทางหนึ่งคือ ถ้ารู้กระแสใช้งาน ชนิดของฉนวน ชนิดของตัวนำ วิธีการติดตั้ง ฯลฯ โปรแกรมจะคำนวณขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิลให้ ภายใต้แรงดันตกคร่อมที่กำหนด ในทางกลับกัน คือ ถ้ารู้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิล วิธีการติดตั้ง ฯลฯ โปรแกรมก็สามารถตรวจสอบค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลให้ได้ว่า จะครอบคลุมกระแสใช้งานที่มีอยู่หรือไม่ และถ้าหากว่ากระแสใช้งานมีค่าสูงมากๆ ทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิลมีขนาดใหญ่ ซึ่งถ้าหากใหญ่กว่าค่าที่มีในมาตรฐานในตลาด โปรแกรมก็จะทำการแบ่งสายเคเบิลออกเป็นสายที่อยู่ในมาตรฐานหลายๆ เส้น

ขนานกันโดยต่อกันเป็นสายควบ และจะครอบคลุมค่ากระแสใช้งานได้อย่างเหมาะสม, โปรแกรมสามารถคำนวณหาขนาดแรงดันตกคร่อมพร้อมทั้งคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ด้วย หาขนาดตัวนำนิวตรอน ตามอัตราส่วนที่ผู้ออกแบบกำหนดให้เมื่อเทียบกับสายเฟส หาขนาดตัวนำป้องกันที่เหมาะสมให้กับวงจรที่ออกแบบไว้ หากเวลาในการทริบของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร ค่ากระแสสูงสุดของตัวนำป้องกันที่สามารถทนได้ หากการส่งถ่ายพลังงานสูงสุดของสาย หากอุณหภูมิขณะใช้งาน หากความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ 20 C และที่อุณหภูมิขณะใช้งาน นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถปรับปรุงขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายให้สัมพันธ์กับจำนวนตัวนำขนานให้เหมาะสมได้ด้วย

#### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา และวิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 หาข้อมูลเกี่ยวกับสายเคเบิล ทั้งสายแรงสูง แรงต่ำ สายพิเศษ ทั้งจากในและต่างประเทศ เป็นข้อมูลทางด้านคุณลักษณะของสายเคเบิลชนิดต่างๆ ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน
- 1.4.2 หากฎและมาตรฐานอ้างอิงให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม และกฎมาตรฐานของประเทศ โดยยึดถือกฎของการไฟฟ้านครหลวงเป็นเกณฑ์ ส่วนมาตรฐานโครงสร้างของสายในประเทศจะใช้มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 11-2531 เป็นเกณฑ์ และมาตรฐานโครงสร้างของสายในต่างประเทศจะใช้มาตรฐานของ IEC
- 1.4.3 สืบหาข้อมูลวิธีการออกแบบกรณีศึกษา และการใช้งานสายเคเบิลของผู้ออกแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาเขียนโครงสร้างการใช้งานของโปรแกรมให้เกิดความสะดวกกับผู้ใช้งานให้มากที่สุด
- 1.4.4 สืบหาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกับการเลือกขนาดของสายเคเบิล
- 1.4.5 หาทฤษฎีรองรับการคำนวณหาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของสายเคเบิลทั้งหมด
- 1.4.6 นำค่าต่างๆ ที่หามาได้มาทดสอบ โดยการคำนวณด้วยมือ เพื่อให้ได้ค่าอ้างอิง
- 1.4.7 เขียนผังการทำงานของโปรแกรม เขียนโปรแกรมและทดสอบโปรแกรม

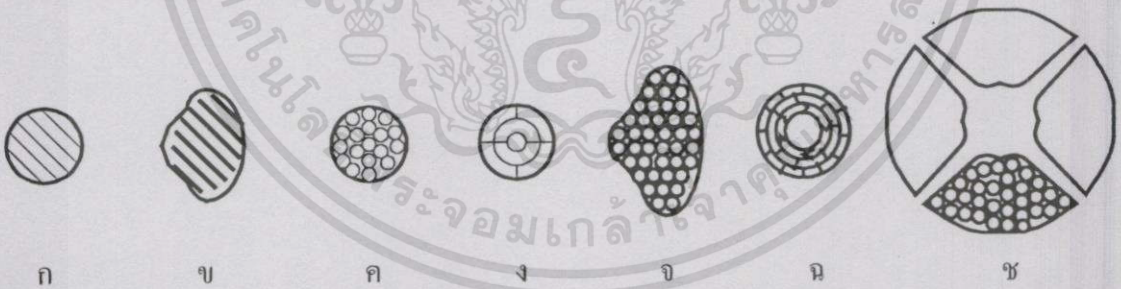
# ทฤษฎีการออกแบบและหลักการทั่วไปของสายเคเบิลกำลัง

## 2.1 การออกแบบโครงสร้างของสายเคเบิล

สายเคเบิลมีหน้าที่สำหรับส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ สายเคเบิลก็ถูกจัดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งประกอบไปด้วยตัวนำไฟฟ้า-ฉนวนและเปลือกหุ้ม ในการออกแบบสายเคเบิลให้ใช้กับงานด้านต่าง ๆ นั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นสายเคเบิลเพื่อที่สามารถใช้สายเคเบิลที่ถูกออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.1.1 ตัวนำ

ตัวนำของสายเคเบิลต้องทำจากวัสดุตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ หรืออาจพูดได้ว่ามีความนำไฟฟ้าสูงนั่นเอง ลักษณะของตัวนำอาจจะเป็นตัวนำเดี่ยวตัน (Solid) หรือตัวนำหลายเส้นตีเกลียว (Strand) ซึ่งประกอบด้วยตัวนำเล็ก ๆ ต่อกันเป็นเกลียว โดยทั่วไปมักนิยมทำด้วยวัสดุทองแดงหรืออลูมิเนียม มีลักษณะกลมหรือเป็นส่วนของวงกลม เช่นเคเบิลน้ำมัน ถ้าตัวนำของสายเคเบิลมีพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ 1,000 mm<sup>2</sup> ขึ้นไป สายตัวนำกลมจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนของวงกลม เพื่อลดปรากฏการณ์ทางผิวและมีรูตรงกลางเพื่อระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็น เช่นน้ำมัน หรือก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะพื้นที่หน้าตัดตัวนำของสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ

- ก. ตัวนำเส้นเดี่ยวแบบกลมตัน
- ข. ตัวนำแบบส่วนของวงกลม
- ค. ตัวนำแบบกลมหลายเส้น
- ง. ตัวนำแบบกลมหลายเส้นชนิดหนาแน่น
- จ. ตัวนำแบบส่วนของวงกลมหลายเส้น
- ฉ. ตัวนำแบบกลมหลายเส้นชนิดหนาแน่นและมีรูกลวง
- ช. ตัวนำแบบกลมประกอบด้วยส่วนของวงกลมมีรูกลวงใช้กับพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ๆ

ทองแดง ทองแดงเป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงมากมีความแข็งแรงและเหนียวทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่มีข้อเสียคือมีน้ำหนักมากและราคาสูง จึงไม่เหมาะกับงานด้านแรงสูง แต่จะเหมาะกับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะงานในอาคาร

อลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงรองจากทองแดงแต่เมื่อเปรียบเทียบในกรณีกระแสเท่ากันแล้ว พบว่าอลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าจึงเหมาะสมกับการใช้งานเดินสายไฟนอกอาคารและแรงดันสูง อลูมิเนียมถ้าทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดออกไซด์ของอลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนฟิล์มบาง ๆ เกาะตามผิวช่วยป้องกันการสึกกร่อน แต่จะมีข้อเสียคือทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอลูมิเนียม

คุณสมบัติ	ทองแดง	อลูมิเนียม
ความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ทองแดง = 100)	100	61
ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20 °C ( $\Omega\text{m} \times 10^{-8}$ )	1.724	2.803
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ( $\text{Per } ^\circ\text{C} \times 10^{-6}$ )	17	23
จุดหลอมเหลว ( $^\circ\text{C}$ )	1083	659
ความนำความร้อน ( $\text{W/cm } ^\circ\text{C}$ )	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20 °C ( $\text{g/cm}^3$ )	8.89	2.7

### 2.1.2 ฉนวน

ฉนวนทำหน้าที่เป็นตัวห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างตัวนำกับตัวนำหรือระหว่างตัวนำกับพื้นดิน และป้องกันตัวนำจากผลกระทบทางเคมีและทางกลต่าง ๆ ได้ในระหว่างที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้าจะเกิดพลังงานสูญเสียอยู่ในรูปของความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน ซึ่งความสามารถในการทนความร้อนของฉนวนนี้เองจะไปเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายเคเบิลได้ด้วย การเลือกฉนวนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งาน ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง วัสดุที่นิยมใช้เป็นฉนวนคือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE) นอกจากนี้ยังมีฉนวนอีกประเภทหนึ่งใช้งานกับสถานที่พิเศษนั้นคือสายฉนวนแร่เปลือกโลหะ (Mineral Insulated Metal Sheath Cable) ซึ่งฉนวนจะเป็นแร่ Magnesium Oxide โดยตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร (°C)	160	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.4	0.92
ความนำความร้อน (Cal/cm. sec °C)	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง (kg/mm <sup>2</sup> )	2.5	3

จะเห็นว่าฉนวน XLPE มีความแข็งแรงทนต่อความร้อนและถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าฉนวน PVC ปัจจุบันจึงมีผู้ใช้ฉนวน XLPE เพิ่มมากขึ้น

## 2.2 ความต้านทานและความเหนียวของสายเคเบิล

### 2.2.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของสายตัวนำได้จากค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ณ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของตัวนำ เมื่อพิจารณาถึงผลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสลับที่ไหลในตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้ามีความหนาแน่นมากที่ผิวตัวนำและตรงแกนกลางตัวนำจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเลย โดยเฉพาะกับตัวนำขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ๆ (> 185 mm<sup>2</sup>) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ปรากฏการณ์ทางผิว" (Skin Effect) นอกจากนี้จากลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลหลาย ๆ เส้น จะมีระยะต่างระหว่างสายเคเบิล แต่ละเส้นน้อยมากดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิลเส้นที่อยู่ข้างเคียงก็จะมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำสายเคเบิลที่อยู่ใกล้เคียงเช่นกันเรียกว่า "ปรากฏการณ์ความใกล้ชิด" (Proximity Effect)

จากปรากฏการณ์ทั้งสองดังกล่าว ย่อมทำให้สายตัวนำเมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าการใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการที่ 2.1

$$R_{(ac)} = R'_{(20^{\circ}C)} Y_S \cdot Y_P \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R_{(ac)}$  คือ ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวที่อุณหภูมิ 20 °C

$R'_{(20^{\circ}C)}$  คือ ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงต่อหน่วยความยาวที่อุณหภูมิ 20 °C

$Y_S$  คือ ตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

$Y_P$  คือ ตัวประกอบปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity Effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง  $R'_{(20^{\circ}\text{C})}$  ของสายตัวนำขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำจาก

$$R'_{(20^{\circ}\text{C})} = \frac{\rho}{S} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$

$$= \frac{1}{54} \left( \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}} \right) \text{ สำหรับทองแดง}$$

$$= \frac{1}{34} \left( \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}} \right) \text{ สำหรับอลูมิเนียม}$$

$S$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ( $\text{mm}^2$ )

ถ้าอุณหภูมิขณะใช้งานของตัวนำหรืออุณหภูมิที่อยู่รอบ ๆ ตัวนำไม่ใช่  $20^{\circ}\text{C}$  แล้ว ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของวัสดุตัวนำ  $\alpha$  และเป็นเหตุให้ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงไปด้วยดังนี้

$$R_t = R'_{(20^{\circ}\text{C})} [1 + \alpha(t - 20^{\circ}\text{C})] \cdot Y_s \cdot Y_p \quad (2.3)$$

เมื่อ  $R_t$  คือความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิใด ๆ

$\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของตัวนำ

$$= 0.003931 \text{ สำหรับทองแดง}$$

$$= 0.004031 \text{ สำหรับอลูมิเนียม}$$

### 2.2.2 ความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลขึ้นอยู่กับ

- เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ
- ระยะห่างระหว่างตัวนำ
- ลักษณะการตีเกลียว

ค่าความเหนี่ยวนำ (L) สามารถหาได้จากสูตร

$$L = 0.46 \log_{10} \frac{2S}{d} + K \quad (\text{H/m}) \quad (2.4)$$

เมื่อ S คือ ระยะระหว่างตัวนำ (mm)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

k คือ ค่าคงที่ของการตีเกลียว (stranding)

0.075 สำหรับ 3 เกลียว

0.064 สำหรับ 7 เกลียว

0.056 สำหรับ 19 เกลียว

0.053 สำหรับ 37 และ 61 เกลียว

0.052 สำหรับ 91 และ 127 เกลียว

0.05 สำหรับ สายตัน (Solid)

สำหรับสาย 2 แกนหรือ 3 แกน ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากสูตรข้างต้นควรนำมาคูณด้วย 1.02

ค่ารีแอคแตนซ์ ( $X_L$ ) ขึ้นอยู่กับ

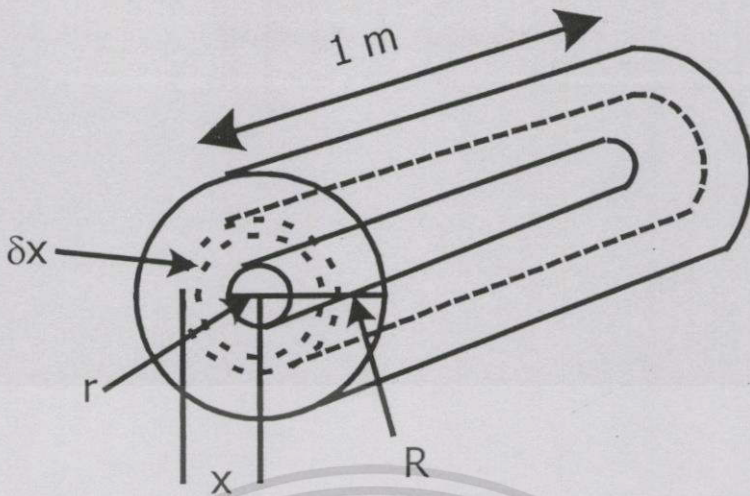
- ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วม
- ความถี่ของระบบ

ค่ารีแอคแตนซ์ หาได้จากสูตร

$$X_L = 2\pi fL \quad (\Omega/\text{m}) \quad (2.5)$$

### 2.3 ความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance)

ความต้านทานฉนวน คือความต้านทานที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านไดอิเล็กทริก ระหว่างอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ขั้วหนึ่งคือตัวนำไฟฟ้าบนสายเคเบิลเอง อีกขั้วหนึ่งทำให้เกิดความต้านทานฉนวนระหว่างตัวนำกับสายดิน เปลือกโลหะ เสื้อโลหะ หรือตัวนำข้างเคียง



รูปที่ 2.2 แสดงการคำนวณค่าความต้านทานฉนวนของสายตัวนำหุ้มฉนวน

พิจารณาคาบยาวสาย 1 หน่วย ของสายแกนเดี่ยวซึ่งมีรัศมีของตัวนำ  $r$  และรัศมีด้านนอกของฉนวน  $R$  ดังรูปที่ 2.2 ความหนาของชั้นฉนวนวงแหวน  $\Delta x$  ที่รัศมี  $x$  คือ  $2\pi x$  เท่าของหน่วยความยาว ค่าความต้านทานฉนวน  $D_R$  ของวงแหวนนี้หาได้โดย

$$D_R = \frac{\rho \Delta x}{2\pi x} \quad (\Omega) \tag{2.6}$$

ดังนั้นค่าความต้านทานฉนวนของรัศมีความหนา  $R - r$  ที่ความยาว 1 เมตร คือ

$$D_R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^R \frac{dx}{x}$$

$$D_R = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \tag{2.7}$$

จะได้

สำหรับความยาวสาย 1 เมตร จะได้

$$D_R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{R}{r} \tag{2.8}$$

ที่อุณหภูมิ  $t$  จะได้

$$D_R = \frac{\rho_{20}}{2\pi l} e^{(-\alpha t)} \ln \frac{R}{r} \tag{2.9}$$

เมื่อ  $\rho_{20}$  คือความต้านทานจำเพาะที่  $20^\circ\text{C}$

$\alpha$  คือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่อองศาเซลเซียสที่  $20^\circ\text{C}$

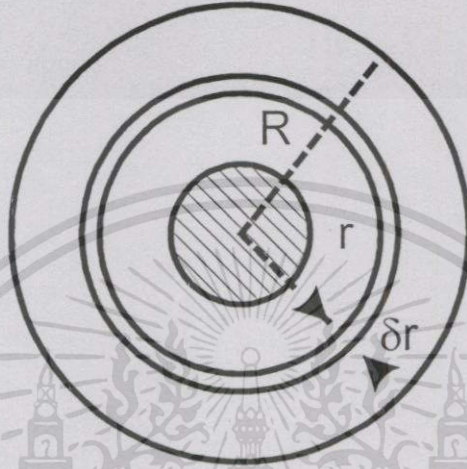
$t$  คืออุณหภูมิ ( $^\circ\text{C}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ความจุไฟฟ้า (Capacitance)

### 2.4.1 ความจุไฟฟ้าของสายแกนเดียว

ในกรณีของสายส่งแรงดันสูง โดยทั่วไปจะมีเปลือกโลหะที่ทำหน้าที่เป็นสายดินอยู่ด้วย สนามไฟฟ้าของสายแกนเดียวจึงเกิดขึ้นระหว่างตัวนำของเปลือกสายดังกล่าวในแนวรัศมี



รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของสายเคเบิลที่มีมาของความจุไฟฟ้า

พิจารณาสายแกนเดียวในตัวนำรัศมี  $r$  (m) โดยรัศมีของเปลือกสายด้านใน  $R$  (m) ดังรูปที่ 2.3 สมมุติว่าตัวนำมีประจุ  $q$  แล้วมีปลั๊กไฟฟ้าพุ่งออกมาจากตัวนำในแนวรัศมี กำหนดให้ความหนาแน่นของปลั๊กที่รัศมี  $X$  (m) จากจุดศูนย์กลางของตัวนำคือ

$$D_x = \frac{q}{2\pi X} \quad (\text{C/m}^2) \quad (2.10)$$

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $X$  คือ

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{D_x}{\epsilon_0 \epsilon_r} \\ &= \frac{q}{2\pi X \epsilon_0 \epsilon_r} \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  = ค่าพอมิตติวิตีของสุญญากาศ,  $\frac{1}{36} \times 10^{-9} \text{ F/m}$

$\epsilon_r$  = ค่าพอมิตติวิตีสัมพันธ์ของฉนวน

งานที่ได้เคลื่อนประจุบวกหนึ่งหน่วยให้เคลื่อนที่ในระยะ  $dx$  ในสนามไฟฟ้า  $E$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dw = -Edx$$

เปลี่ยนรูปเป็นศักดาไฟฟ้าในแนว dx จะได้

$$dv = -Edx$$

ดังนั้นงานที่ใช้เคลื่อนที่ประจุบวกขนาด 1 หน่วย จากผิวด้านในไปยังผิวด้านนอกของฉนวน กำหนดได้โดย

$$\begin{aligned} V &= -\int_R^r Edx \\ &= -\frac{q}{2\pi x \epsilon_0 \epsilon_r} \int_R^r \frac{dx}{x} \\ &= -\frac{q}{2\pi x \epsilon_0 \epsilon_r} \ln \frac{R}{r} \quad (V) \end{aligned} \quad (2.12)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลต่อความยาว 1 เมตร กำหนดโดย

$$\begin{aligned} C &= \frac{q}{v} \\ &= \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(R/r)} \quad (F/m) \\ &= \frac{2\pi \epsilon_r \times 10^{-9}}{36\pi \ln(R/r)} \quad (F/m) \end{aligned}$$

หรือ  $C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln(D/d)} \quad (\mu F/km) \quad (2.13)$

เมื่อ  $D =$  เส้นผ่านศูนย์กลางของสายถึงด้านนอกของฉนวน (m)

$d =$  เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (m)

$\epsilon_r =$  ค่าเพอิมิตติวิตีสัมพัทธ์

ค่าเพอิมิตติวิตีสัมพัทธ์ คือ คุณลักษณะของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ของระบบ โดยที่ค่าความถี่ไฟฟ้าและอุณหภูมิขณะทำงานปกติจะมีผลน้อยมาก สามารถละทิ้งได้ในการคำนวณทางวิศวกรรม

### 2.4.2 ความจุไฟฟ้าของเบลท์เคเบิล 3 แกน

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของเบลท์เคเบิลสามารถประมาณค่าได้โดยใช้สมการ (2.13) โดยเป็นการประมาณค่าความจุระหว่างตัวนำกับตัวนำอื่นๆที่ผูกติดกับเปลือกสายตะกั่วเมื่อให้ D เป็น

$$D = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ} + \text{ความหนาแน่นของฉนวนระหว่างตัวนำ} + \text{ความหนาแน่นของฉนวนระหว่างตัวนำใดๆ และเปลือกโลหะ}$$

ตัวแปรของความจุไฟฟ้าอื่นๆ ของเบลท์เคเบิล สามารถหาค่าประมาณได้โดยใช้สมการที่ (2.13) กับตัวประกอบการคูณต่อไปนี้

$C_1 = 1.2C$  = ความจุสมดุขยแบบสตาร์ (ความจุถึงศูนย์กลาง)

$C_2 = 0.6C$  = ความจุระหว่างตัวนำถึงตัวนำ (ตัวนำอื่นๆ, เปลือกสายอิสระ)

$C_3 = 1.8C$  = ความจุของตัวนำทั้งหมด (พวง) กับเปลือกสาย

### 2.5 ตัวประกอบกำลังไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Angle)

สายเคเบิลที่ใช้กับแรงดันขนาด 33 kV ขึ้นไป จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า Dielectric มีค่าต่ำมาก ซึ่งแสดงเป็นอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\text{Dielectric power factor} = \frac{\text{loss in dielectric}}{\text{Volt} \cdot \text{Amps}} \quad \text{Watt} \quad (2.14)$$

ในรูปที่ 2.4 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสายเคเบิลที่มีค่า Dielectric สมบูรณ์ ประจกระแส  $I_c$  จะไหลนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา และในไดอิเล็กทริกที่สมบูรณ์แบบนี้จะไม่มีองค์ประกอบของกระแสอยู่ในเฟสของแรงดัน  $U$  (ให้ดูเรื่องค่าที่ทำให้ความสูญเสียของไดอิเล็กทริกในหัวข้อต่อไป) ซึ่งกระแสนี้เองเป็นสาเหตุของค่าความสูญเสีย  $I_R U$  ในไดอิเล็กทริกซึ่งจะอยู่ในรูปของความร้อน ค่าความสูญเสียในไดอิเล็กทริกสามารถเขียนอยู่ในรูปของ Cosine ของมุมระหว่างผลของกระแส  $I_c$  กับแรงดัน  $U$  ดังนี้

$$I_t = (I_R^2 + I_C^2)^{1/2}$$

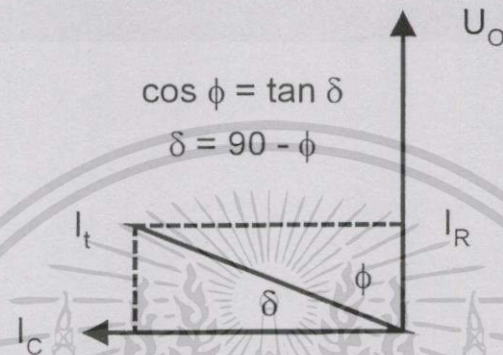
$$I_R U = I_t U \cos \theta$$

และ 
$$\cos \theta = \frac{I_R}{(I_R^2 + I_C^2)^{1/2}}$$

เมื่อมุม  $\theta$  เข้าใกล้  $90^\circ$  ค่า  $\cos\theta$  จะประมาณเท่ากับ  $\tan(90-\theta)$  หรือ  $\tan\delta$  (เมื่อ  $\delta$  เท่ากับ  $90-\theta$ ) และค่าตัวประกอบกำลัง ไดอิเล็กทริก ของสายเคเบิลมักจะอยู่ในรูปของ  $\tan\delta$  เมื่อ  $\delta$  เป็นที่รู้จักในนามของ Dielectric Loss Angle (DLA)

ค่าความสูญเสียของไดอิเล็กทริกสามารถเขียนได้ดังนี้

$$D = 2\pi fCU_0^2 \tan\delta \cdot 10^{-6} \quad (\text{Watt/km per phase}) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.4 แสดงเวกเตอร์ไออะแกรมของ Dielectric Loss Angle

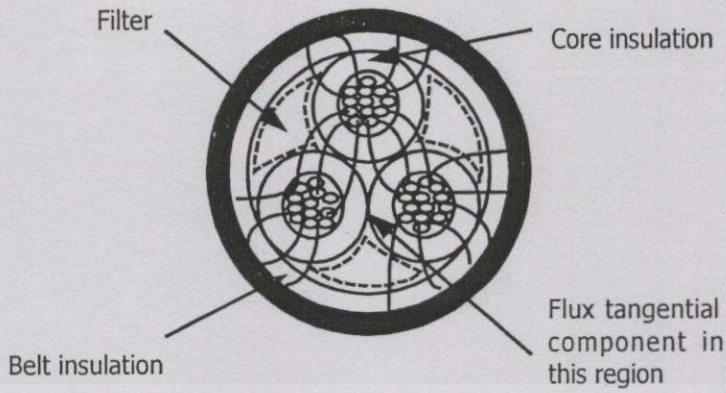
จะเห็นได้จากสมการว่า ในการออกแบบสายเคเบิลนั้น ค่าความถี่, ความจุไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้าจะถูกทำให้คงที่ และ ค่า Dielectric Loss Angle ต้องถูกรักษาระดับให้ต่ำที่สุดเพื่อให้ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำตามต้องการ

## 2.6 การคำนวณค่าการกระจายความเครียดไฟฟ้า (Electric stress Distribution)

การกระจายเส้นแรงไฟฟ้าในสายเคเบิลกระแสสลับชนิดคาด ฉนวน (Belted cable insulation) มีความซับซ้อนมากดังแสดงในรูปที่ 2.5 ค่าความเครียดสูงสุดจะอยู่ครีดยสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณผิว

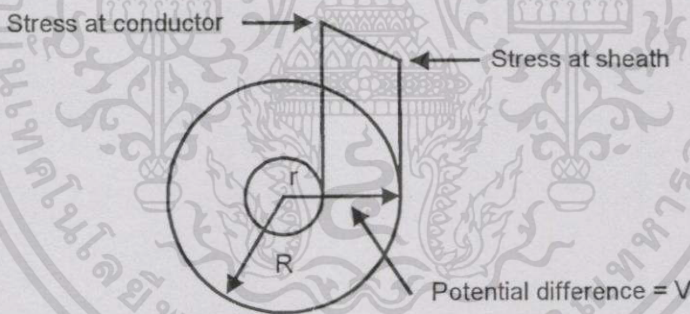
### 2.6.1 การกระจายความเครียดไฟฟ้ากระแสสลับในสายแกนเดี่ยวและหลายแกน

ผลของสายตีเกลียวของตัวนำเปลือยทำให้ค่าการกระจายความเครียดรอบ ๆ ตัวนำมีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากผิวที่ค่อนข้างไม่เรียบจากการตีเกลียว สายตัวนำ แต่มีผลน้อยมากสามารถตัดผลกระทบนี้ออกไปได้



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายฟลักซ์ไฟฟ้าภายในเบลท์เคเบิล

พิจารณากรณีของสายตัวนำที่มีตัวหุ้มประกอบด้วย ความจุไฟฟ้าทรงกระบอกกลมโดยมีตัวนำเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้านใน และตัวหุ้มตัวนำเป็นขั้วอิเล็กโทรดภายนอก โดยสมมติให้อยู่ในค่าพหุคูณเดียวกัน การกระจายความเครียดไฟฟ้าจะแปรผันกับความโค้งทางตามความโค้งของแกนตัวนำ จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดจะอยู่ที่ผิวของตัวนำและจะลดลงตามเส้นโค้ง hyperbolic



รูปที่ 2.6 ความเครียดสนามไฟฟ้าสถิตในสายเคเบิลแกนเดี่ยว

โดยการใช้สัญลักษณ์เดิมๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้จะได้

$r$  = รัศมีของตัวนำ (m)

$R$  = รัศมีด้านในของเปลือกสาย (m)

$\epsilon_0$  = ค่าพหุคูณตัวดีของสุญญากาศ

$\epsilon_r$  = ค่าพหุคูณตัวดีสัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริก

$V$  = ศักไฟฟ้าของตัวนำที่สัมพันธ์กับเปลือกสาย (V)

$q$  = ประจุไฟฟ้า (คูลอมป์/เมตร)

จากสมการที่ 2.12

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} = \frac{V}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (2.16)$$

ความเคียดสนามไฟฟ้าอาจคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 ซึ่งแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้า  $E_x$  ที่รัศมี  $X$  คือ

$$E_x = \frac{q}{2\pi X\epsilon_0\epsilon_r} \quad (2.17)$$

ดังนั้นจะได้ความเคียดที่รัศมี  $X$  เป็น

$$E_x = \frac{V}{X \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (2.18)$$

และสามารถแบ่งเป็นย่านได้เป็น

$$\text{ค่าสูงสุด} = \frac{V}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \text{ ที่ผิวของตัวนำ} \quad (2.19)$$

$$\text{ค่าต่ำสุด} = \frac{V}{R \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \text{ ที่ผิวของเปลือกสายดินใน} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ได้จะทำให้สามารถพิจารณาความเคียดในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

### 2.6.2 ความเคียดสนามไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำ

จากสมการการคำนวณค่าการกระจายความเคียดไฟฟ้าข้างบน สมมติให้ผิวของตัวนำเรียบ แต่ผลของการตีเกลียวสายตัวนำเมื่อถูกนำมาใช้กับแรงดันสูงจะต้องพึงระวังเพราะจะมีผลต่อค่าความเคียดสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรใช้แผ่นตะกั่วหรือเซมิคอนดักต์ดิ่งเทพพันรอบสายตัวนำตีเกลียวเพื่อให้ผิวของตัวนำเรียบจะช่วยลดค่าความเคียดสนามไฟฟ้าได้

### 2.6.3 ความเคียดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของตัวนำ

จากสมการที่ 2.18 เป็นสมการสำหรับความเคียดของสายเคเบิลที่แสดงค่าความเคียดสูงสุดที่ผิวของตัวนำ สมการอาจถูกปรับปรุงให้อยู่ในรูปอื่นที่แสดงสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำด้านนอกและฉนวนด้านนอกและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำจุดที่ทำให้ความเคียดต่ำสุดที่ผิวตัวนำ สำหรับแรงดันและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฉนวนที่เจาะจงจะได้

$$E_x = \frac{V}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \tag{2.21}$$

ค่าความเครียดต่ำสุดที่ตัวนำ สำหรับค่าคงที่ V และ R

$$\frac{dE_r}{dr} = 0$$

จะได้

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{V}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \right] = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left[ \frac{V}{r \ln R - r \ln r} \right] &= 0 \\ \frac{-V(\ln R - \ln r - 1)}{(r \ln R - r \ln r)^2} &= 0 \end{aligned}$$

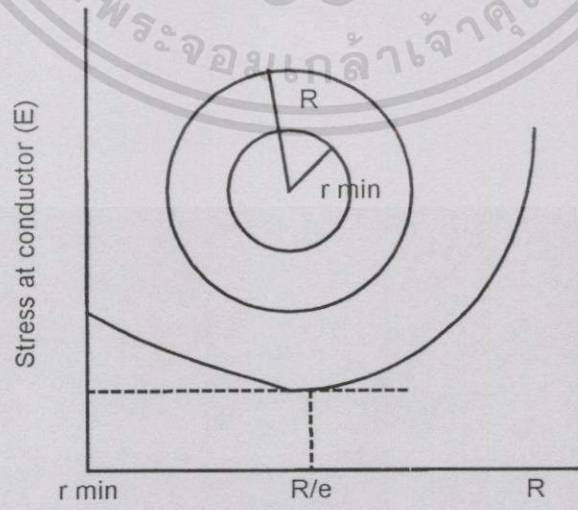
ดังนั้นจะได้  $\ln R - \ln r - 1 = 0$

$$\ln\left(\frac{R}{r}\right) = 1$$

และ  $\frac{R}{r} = e$

$$\tag{2.22}$$

ค่าความเครียดที่บริเวณตัวนำที่น้อยที่สุด จะอยู่ที่สัดส่วนของ  $R/r = e$  และเมื่อแทนค่านี้ลงในสมการความเครียดจะเห็นว่าค่าความเครียดคือ  $V/r$  แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามรัศมีของตัวนำ

## 2.7 แหล่งกำเนิดความสูญเสียทางไฟฟ้า (Source of Electrical Losses)

สายเคเบิลกำลังแบบพื้นฐานจะประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน คือ ตัวนำ ไดอิเล็กทริกและเปลือกสายภายนอก เมื่อเคเบิลถูกส่งผ่านพลังงานไปยังโหลด จะเกิดความสูญเสียซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนกระจายรอบ ๆ สายเคเบิล ซึ่งเป็นสาเหตุที่ใช้เป็นตัวกำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล

### 2.7.1 ความสูญเสียของตัวนำ (Conductor Losses)

ความสูญเสียที่เกิดจากตัวนำนั้นเนื่องมาจากความต้านทานของตัวนำคือ

$$nI^2R_t \quad (2.23)$$

เมื่อ  $I$  คือกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ (A)  
 $R_t$  คือค่าความต้านทานของตัวนำที่  $t^\circ\text{C}$  ( $\Omega$ )  
 $n$  คือจำนวนแกนของตัวนำ

ในกรณีที่สายเคเบิลถูกนำไปส่งกระแสไฟฟ้าสลับสูง ๆ การกระจายของกระแสผ่านตัวนำแต่ละเส้นจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับผลของปรากฏการณ์ทางผิว และปรากฏการณ์ความใกล้ชิดที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2.7.2 ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss)

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกของสายเคเบิลกระแสสลับ จะเป็นสัดส่วนตรงกับค่าความจุไฟฟ้า ความถี่ แรงดันเฟส และตัวประกอบกำลังหรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ ดังสมการ

$$D = \omega CU_0^2 \tan\delta \cdot 10^{-6} \quad (\text{Watt/km/phase}) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $U_0$  คือ แรงดันเฟสถึงนิวทรอล (V)  
 $\tan\delta$  คือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไดอิเล็กทริก

องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการสูญเสียของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย

- กระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านไดอิเล็กทริก ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหรือกระแสตรง

ข. ไดอิเล็กทริกอีสเทอริส เป็นผลกว้าง ๆ ที่เกิดจากการกระทำระหว่างกันของสนามไฟฟ้า กระแสสลับด้วยโมเลกุล ที่เป็นส่วนประกอบของฉนวนและเกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเท่านั้น

ค. ไอโอไนเซชันหรือพาเซียดิสซาร์จในไดอิเล็กทริก

ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของฉนวนของสายเคเบิลจะขึ้นกับความถี่ อุณหภูมิและแรงดันใช้งาน เมื่อเทียบค่าความสูญเสียของไดอิเล็กทริกกับตัวนำแล้วจะน้อยมาก แต่จะมีความสำคัญมากเมื่อพิจารณาในเรื่องความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล

### 2.7.3 ความสูญเสียของเปลือกสาย (Sheath Loss)

เมื่อมีกระแสไฟสลับไหลผ่านสายเคเบิลแกนเดียว สนามแม่เหล็กซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของกระแสจะเหนี่ยวนำ emf ในเปลือกสายของเคเบิลรอบ ๆ สายเคเบิล ดังนั้นความสูญเสียของเปลือกสาย 2 ชนิด จึงสามารถหาได้จาก emf ดังต่อไปนี้

### 2.7.4 กระแสไหลวนในเปลือกสาย (Sheath Eddy currents)

กระแสไหลวนถูกเหนี่ยวนำโดยกระแสที่ไหลในสายเคเบิลที่อยู่ใกล้กับเปลือกสายพิจารณา วงจรไฟฟ้า 2 เฟส ด้วยสายเคเบิล R Y และ B เส้นแรงไฟฟ้าของเคเบิล Y และ B จะตัดกับเปลือกสายของเคเบิล R และเส้นแรงไฟฟ้าที่ตัดกับส่วนของเปลือกสายเคเบิล R จะใกล้กับ Y และ B มากกว่าส่วนที่ไกลจาก Y และ B ดังนั้นผลของ emf จึงถูกเหนี่ยวนำเนื่องจากกระแสไหลวนที่ไหลผ่านด้านหนึ่งของเปลือกสายย้อนกลับมายังอีกด้านหนึ่งของเปลือกสาย

ผลรวมของกระแสที่ไหลในหน้าตัดของเปลือกสายจะเป็นศูนย์ซึ่งกระแสไหลวนนี้จะไม่ขึ้นกับชนิดของเปลือกสายที่ผูกติดกันซึ่งทำให้เกิดระยะระหว่างสายเคเบิลทั้งหลาย ความสูญเสียของเปลือกสายเนื่องจากกระแสไหลวนกำหนดได้ด้วยสูตร

$$S_c = I^2 \left[ \frac{3\omega^2}{R_s} \left( \frac{d_m}{2S} \right)^2 \cdot 10^{-8} \right] \quad (2.25)$$

เมื่อ  $S_c$  คือความสูญเสียของเปลือกสายเนื่องจากกระแสไหลวน

$d_m$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเลขคณิตของเปลือกสาย (m)

S คือระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของสายเคเบิล

$R_s$  คือความต้านทานของเปลือกสาย

สำหรับसानแกนเดี่ยวเปลือกสายตะกั่ว ค่าความสูญเสียเหล่านี้ปกติแล้วจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความสูญเสียของตัวนำ แต่จะถูกพิจารณามากขึ้นด้วยสายเคเบิลเปลือกอลูมิเนียมที่วางใกล้กัน

### 2.7.5 ความสูญเสียของวงจรเปลือกสาย (Sheath Current Loss)

เมื่อเปลือกสายของสายเคเบิลแกนเดี่ยวถูกมัดรวมกันกับกราวด์หรือเปลือกสายอื่น ๆ มากกว่า 1 จุด กระแสไหลในเปลือกสายจะเกิดจาก emf ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยตัวนำไฟฟ้ากระแสสลับ เรียกว่าปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง (Transformer action) ทั้งนี้เพราะว่าเปลือกสายและส่วนช้อนกลับ ซึ่งผูกไว้ที่ปลายของเปลือกสายแต่ละเส้นเป็นลูปปิด ซึ่งมีเส้นแม่เหล็ก ที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านผ่านตัวนำตัดผ่านขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับเปลือกสายจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของลูปช้อนกลับ และขึ้นอยู่กับระยะระหว่างสายเคเบิลด้วยกันหรือระหว่างเปลือกสายกับส่วนช้อนกลับและขึ้นอยู่กับระยะระหว่างสายเคเบิลด้วยกันหรือระหว่างเปลือกสายกับส่วนช้อนกลับเฉลี่ย ซึ่งมีกระแสไหลผ่านไปยังพื้นดิน

แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำในเปลือกสายกำหนดได้โดย

$$E_s = I X_m \quad (2.26)$$

เมื่อ  $X_m = 2\pi f \times 10^{-3} \Omega$

ค่าความเหนี่ยวนำรวม  $M$  ระหว่างตัวนำและเปลือกสายกำหนดได้โดย

$$M = 0.2 \ln \left( \frac{2S}{dm} \right) \quad (2.27)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของเปลือกสาย  $Z_s$  (ต่อกิโลเมตร) กำหนดได้โดย

$$Z_s = (R_s^2 + X_{m2}^2)^{1/2} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $R_s$  คือความต้านทานเปลือกสาย

ดังนั้นจะได้กระแสในเปลือกสายเป็น

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{E_s}{(R_s^2 + X_m^2)^{1/2}} \\ &= \frac{IX_m}{(R_s^2 + X_m^2)^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

ความสูญเสียของเปลือกสายต่อเฟสกำหนดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_s^2 R_s = \frac{I^2 X_m^2 R_s}{(R_s^2 + X_m^2)}$$

ดังนั้นความสูญเสียรวมของเปลือกสาย เมื่อรวมความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนบวกกับความสูญเสียเนื่องจากวงจรของเปลือกสายจะได้

$$I_s^2 R_s \left\{ \frac{X_m^2}{R_s^2 + X_m^2} + \left[ \frac{3\omega^2}{R_s^2} \left( \frac{dm}{2S} \right)^2 \cdot 10^{-8} \right] \right\} \quad (2.30)$$

ความร้อนที่ให้เกิดโดยความสูญเสียของตัวนำ โคอีเลกทริก เปลือกสาย และเกราะป้องกันสายจะกระจายอยู่รอบ ๆ สายเคเบิลซึ่งอาจจะเป็นพื้นดิน อากาศ น้ำ หรือวัตถุต่าง ๆ โดยที่ความสามารถในการรับกระแสปกติจะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิสูงสุดของตัวนำและองค์ประกอบของสายเคเบิลอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีความต้องการทางไฟฟ้าบางค่าที่มีผลต่อการกระจายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ความต้านทาน ความร้อนของดิน (ในกรณีวางเคเบิลไว้ใต้ดิน)

## บทที่ 3

### การแยกประเภทของสายเคเบิลตามลักษณะของงาน

ในการเลือกใช้สายเคเบิลนั้นควรต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ เนื่องจากสายเคเบิลนั้นมีหลายประเภท แต่ละประเภทยังได้ถูกออกแบบมาอย่างเหมาะสมกับงานด้านต่างๆ เราจึงแบ่งประเภทของสายเคเบิลตามลักษณะของงานได้เป็น 2 แบบ คือ

#### 3.1 สายเคเบิลที่ใช้กับสถานที่ปกติทั่วไป

สถานที่ปกติทั่วไปในที่นี้จะหมายถึงสถานที่ที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ไม่มีข้อจำกัดหรือข้อหวงห้ามพิเศษใด ๆ ที่จะเป็นอันตรายต่อบุคคลทั่วไป ดังนั้นสายเคเบิลสำหรับสถานที่ปกติจึงไม่สามารถใช้ได้กับอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรมในส่วนที่ไม่เป็นอันตรายเนื่องจากสารเคมี เปลวไฟ ความร้อน และความเสียด้านอื่น ๆ สายเคเบิลประเภทนี้จึงมีคุณสมบัติของฉนวนที่อยู่ใต้วงหวนแวดล้อมปกติได้ดีโดยไม่เสื่อมคุณภาพตามสภาพแวดล้อมดังกล่าวโดยง่ายจึงสามารถแบ่งแยกสายเคเบิลประเภทนี้ตามพิกัดแรงดันได้เป็น 2 ชนิด

##### 3.1.1 สายเคเบิลแรงสูง (High voltage Cable)

สายเคเบิลที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูงเป็นสายที่มีขนาดใหญ่ในลักษณะตัวนำเกลียวสายเคเบิลแรงสูงยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

- สายเปลือย (Bare Cables)
- สายหุ้มฉนวน (Insulated Cables)

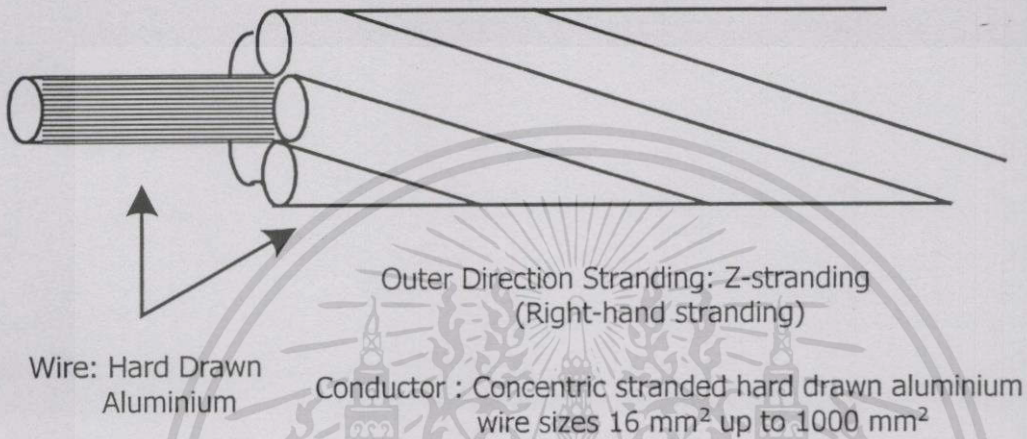
##### 3.1.1.1 สายเปลือย (Bare Cable)

เป็นสายที่ไม่มีเปลือกฉนวนหุ้มสาย ถ้าหากนำไปใช้กับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะไม่ปลอดภัย จึงใช้สายชนิดนี้กับงานแรงดันสูงระดับ 11kV ขึ้นไป สายเปลือยที่นิยมใช้ในงานแรงดันสูงมักจะทำมาจากอลูมิเนียม เพราะมีน้ำหนักเบา และราคาถูก แต่สายอลูมิเนียมล้วน จะสามารถรับแรงดันได้ต่ำ จึงมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถรับแรงดันได้สูงขึ้น โดยการเสริมแกนเหล็ก หรือ ใช้โลหะอื่นผสม สายเปลือยที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC)
- สายอลูมิเนียมผสม (AAAC)
- สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

— สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC-All Aluminium Conductor)

เป็นตัวนำอลูมิเนียมพันตีเกลียวเป็นชั้นๆ สายชนิดนี้รับแรงดึงได้ต่ำ จึงไม่สามารถขึงสายให้มีระยะห่างช่วงเสา (span) มากๆ ได้โดยปกติความยาวช่วงเสาต้องไม่เกิน 50 m. ยกเว้นสายที่มีขนาด 95 mm ขึ้นไปนั้น สามารถที่จะมีระยะห่างช่วงเสาได้ไม่เกิน 100 m. ลักษณะของสายชนิดนี้จะแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงสายเคเบิลชนิด AAC

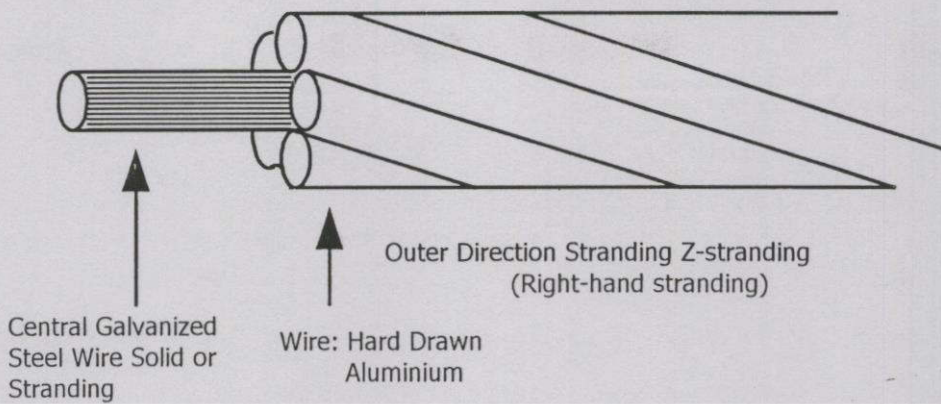
— สายอลูมิเนียมผสม (AAAC-All Aluminium Alloy conductor)

สายชนิดนี้มีส่วนผสมของอลูมิเนียม แมกนีเซียม และ ซิลิกอน สายชนิดนี้จะมีคามเหนียวและรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน จึงสามารถขึงสายให้มีระยะห่างช่วงเสาได้มากขึ้น นิยมใช้เดินสายบริเวณชายทะเล เพราะสามารถทนต่อการกัดกร่อนของไอเกลือบริเวณชายทะเลได้ดี

— สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR - Aluminium Conductor steel Reinforced)

เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวและมีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง เพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น ทำให้ขยายระยะห่างระหว่างเสาได้มากขึ้น แต่จะไม่ใช้สายชนิดนี้ในบริเวณชายทะเล เพราะว่าจะเกิดการกัดกร่อนจากไอเกลือ ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ลักษณะของสายชนิดนี้จะแสดงอยู่ในรูปที่

3.2



Conductor : Hard drawn aluminium wire sizes 16 mm<sup>2</sup> up to 680 mm<sup>2</sup>

Steel core : Galvanized steel (Zinc coated), solid or concentric sizes 2.5 mm<sup>2</sup> up to 65 mm<sup>2</sup>

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะสายเคเบิลชนิด ACSR

สายเปลือยทั้ง 3 ชนิด มีใช้ทั่วไปในระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และการไฟฟ้าภูมิภาค สำหรับสาย AAC นั้นยังมีใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงด้วย แต่ในปัจจุบันทางการไฟฟ้าได้มีนโยบายที่จะเลิกใช้สายชนิดนี้แล้วเนื่องจากการลัดวงจรจากสัตว์ และกิ่งไม้บ่อยครั้ง และได้หันมาใช้สายหุ้มฉนวนประเภท PIC และ SAC ที่จะกล่าวถึงต่อไป

### 3.1.1.2 สายหุ้มฉนวน (Insulated Cables)

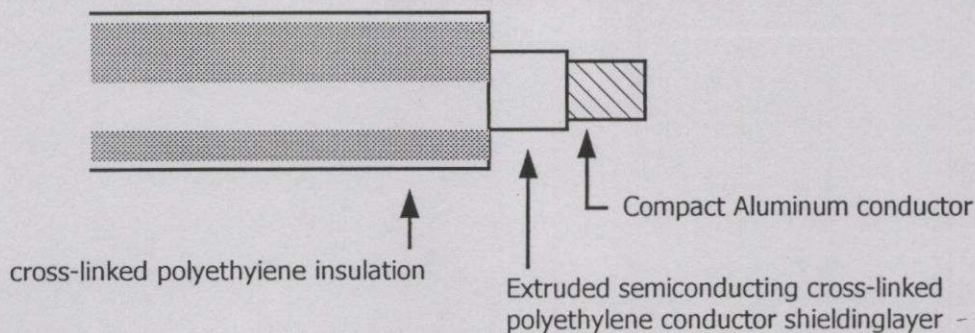
ในการเดินสายเคเบิลแรงสูงผ่านบริเวณที่มีผู้คนอาศัย เพื่อความปลอดภัยจะต้องใช้สายเคเบิลแรงสูงที่มีฉนวนหุ้มและการใช้สายหุ้มฉนวนยังช่วยลดการเกิดลัดวงจรจากสัตว์ หรือกิ่งไม้แต่ถูกสายไฟอีกด้วย ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น สายเคเบิลแรงสูงหุ้มฉนวนที่นิยมใช้มีดังนี้

- สาย Partial Insulated Cable (PIC)
- สาย Space Aerial Cable (SAC)
- สาย Preassembly Aerial Cable (PAC)
- สาย Cross-linked Polythylene (XLPE)

#### — สาย Partial Insulated Cable (PIC)

ดังได้กล่าวไปแล้วว่า การใช้สายเปลือยจะมีโอกาสเกิดลัดวงจรขึ้นได้ง่าย เพื่อลดปัญหานี้จึงได้มีการนำสาย PIC มาใช้แทนสายเปลือย โดยโครงสร้างของสาย PIC นี้ จะประกอบด้วย ตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียวหุ้มด้วยฉนวน XLPE 1 ชั้น ดังแสดงในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Construction : Conductor : Compact stranded hard drawn Aluminium wire.

Conductor shield : Semi-conducting cross-linked polyethylene.

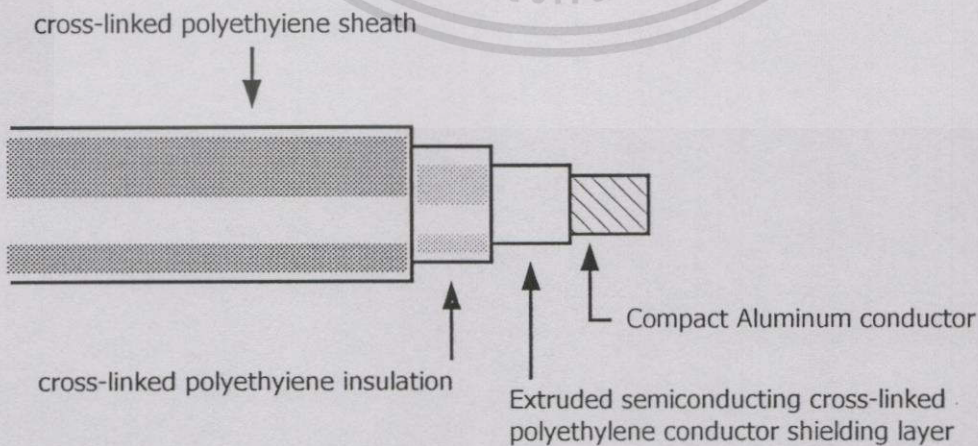
Insulation : Track resistant cross-linked polyethylene. (Black)

รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของสายเคเบิลชนิด PVC

แม้ว่าสายชนิดนี้จะมีฉนวน XLPE หุ้ม แต่ก็ไม่สามารถติดตั้งโดยตรงได้เนื่องจากฉนวนเป็นเพียงฉนวนบาง ซึ่งจะช่วยลดการเกิดลัดวงจรของสายเปลือยเท่านั้น การไฟฟ้าได้นำสายชนิดนี้มาใช้ทุกขนาด คือ 35, 50, 68, 120 และ 185 mm มาใช้งานโดยเดินในอากาศผ่านลูกถ้วยบนเสาไฟฟ้าแทนสายเปลือย

— สาย Space Aerial Cable (SAC)

สาย SAC โครงสร้างเป็นตัวนำอลูมิเนียมเคลือบด้วยฉนวน XLPE หุ้ม เช่นเดียวกับสาย PIC แต่จะมีเปลือก (Sheath) ที่ทำจาก XLPE หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ทำให้มีความทนทานมากกว่าสาย PIC ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของสายเคเบิลชนิด SAC

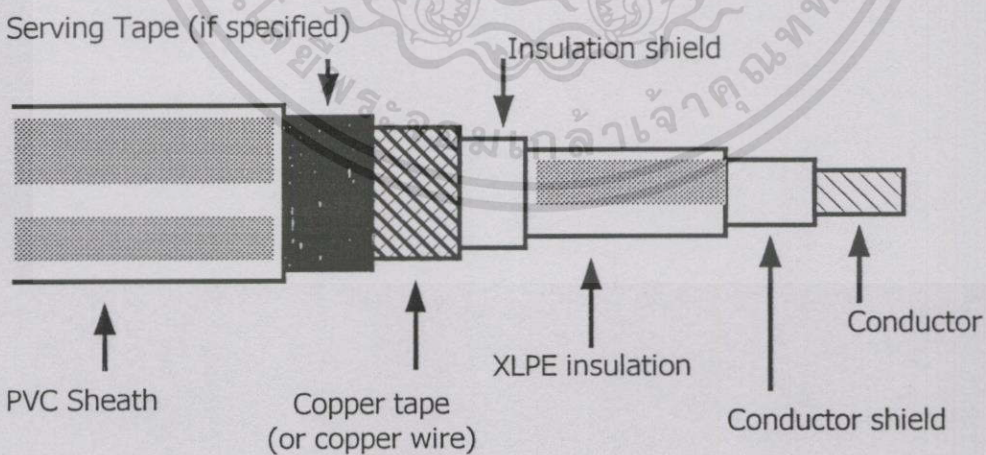
ถึงแม้ว่าสายชนิดนี้จะมีเปลือก (Sheath) หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่งแต่ก็ไม่ควรสัมผัสสายโดยตรง จะเป็นอันตรายได้ ในการใช้งานสายเคเบิลชนิดนี้ การไฟฟ้าฯ ใช้เป็นวงจรเสริมสำหรับวงจรที่ใช้สาย PIC โดยในการเดินสายจะต้องใช้ Spacer เพื่อจำกัดระยะห่างระหว่างสาย สายชนิดนี้ถึงแม้ว่าจะสามารถวางได้ใกล้กันมากกว่าสาย PIC แต่ก็ต้องไม่เกินระยะจำกัดค่าหนึ่งนอกจากนี้ จะต้องใช้ Messenger Wire ช่วยค้ำสายไว้ Messenger Wire จะต่อดึงคานทำหน้าที่เป็นสาย Overhead Ground Wire ขนาดของสายที่การไฟฟ้าฯ ใช้จะมี 3 ขนาด คือ 35, 70 และ 185 mm โดยขนาด 185 mm จะใช้เดินตามถนนสายหลักต่างๆ ขนาด 70 mm เป็นสายที่แยกจากถนนหลักเข้าชอย ส่วนขนาด 35 mm เป็นสายที่แยกจากชอยอีกที

#### — สาย Preassembly Aerial Cable (PAC)

สายชนิดนี้ มีโครงสร้างจัดเป็นสาย Fully Insulated มีโครงสร้างคล้ายสาย XLPE เนื่องจากสายชนิดนี้สามารถวางใกล้กันได้ จึงใช้สายชนิดนี้เมื่อสายไฟผ่านในบริเวณที่มีระยะห่าง (clearance) กับอาคารจำกัด หรือ ผ่านบริเวณที่มีคนอาศัยอยู่ สายชนิดนี้ยังไม่สามารถวางพาดไปกับมุมตึกได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานมาก การไฟฟ้าฯ ใช้สายชนิด อยู่ 2 ขนาด คือ 185 และ 240 mm โดยในการเดินสายจะต้องใช้ Messenger Wire ช่วยค้ำสายด้วย

#### — สาย Cross-Linked Polyethylene (XLPE)

สาย XLPE จัดเป็นสาย Fully Insulated มีโครงสร้าง และ ส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของสายเคเบิล XLPE

-ตัวนำ (Conductor) ส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงในลักษณะตีเกลียว (Strand) ซึ่งอาจจะจัดอยู่ในรูปแบบของ copper concentric strand

-ชีลด์ของตัวนำ (Conducting shield) ทำด้วยสายกึ่งตัวนำ (Semi conducting Material) มีหน้าที่ช่วยให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนกระจายอย่างสม่ำเสมอในแนวรัศมี เป็นการช่วยลดการเกิด Break Down

-ฉนวน (Insulation) เป็นชั้นที่หุ้มห่อชั้นชีลด์ของตัวนำอีกทีหนึ่งทำด้วยฉนวน XLPE สายเคเบิลที่คั่นผิวด้านนอกของชั้นฉนวน จะต้องเรียบ

-ชีลด์ของฉนวน (Insulating Shield) เป็นชั้นของ Semi-Conducting Tape พันทับชั้นของฉนวน จากนั้นก็จะห่อหุ้มด้วยชั้นของ copper tape อีกทีหนึ่งชีลด์ของฉนวนนี้จะทำหน้าที่จำกัดสนามไฟฟ้า ให้อยู่เฉพาะภายในสายเคเบิล เป็นการป้องกันระบบเกสร นอกจากนั้นการต่อชีลด์ลงดินยังช่วยลดอันตรายจากการสัมผัสลูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน

-เปลือกนอก (Jacket) ชั้นของเปลือกนอกนี้อาจจะเป็น polyvinyl chloride หรือ polyethylene ก็ได้ แล้วแต่วัสดุของงาน จะเป็นอย่างไร ถ้างานกลางแจ้งก็มักจะใช้ polyvinyl chloride เพราะว่ามันเฉื่อยต่อการคิดไฟ ในขณะที่ polyethylene มักจะใช้งานแบบเดินลอย เนื่องจากความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนในกรณีที่วางเคเบิลใต้ดิน อาจจะมีชั้นของ service tape ซึ่งอาจทำด้วยชิ้นผ้า (Fabric Tape) คั่นระหว่างชีลด์ และเปลือกนอก ช่วยป้องกันเสียดสีและการกระทบกระเทือน

สายชนิดนี้สามารถเดินลอยในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมใช้ฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้คืออยู่แล้ว

### 3.1.2 สายเคเบิลแรงต่ำ (Low Voltage Cable)

สายเคเบิลแรงต่ำเป็นสายไฟฟ้าที่ใช้ได้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ มีลักษณะเป็นสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนโดยที่ตัวนำอาจจะใช้ทองแดง หรือ อลูมิเนียม แต่ที่นิยมใช้สำหรับสายเคเบิลแรงต่ำจะเป็นสายทองแดง สายขนาดใหญ่ จะมีลักษณะตัวนำเกลียว แต่ถ้าเป็นสายไฟฟ้าขนาดเล็ก ตัวนำก็จะเป็นตัวนำเดี่ยว วัสดุฉนวนที่นิยมใช้กับสายเคเบิลแรงต่ำ ได้แก่ polyvinylchloride (PVC) และ cross-linked polyethylene (XLPE)

สำหรับฉนวน PVC นั้นเดิมตาม มอก. 11-2518 ได้แบ่งชนิดของฉนวน PVC ที่ใช้งานเป็น 2 ชนิด คือ ฉนวน PVC ธรรมดา มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และฉนวน Heat Resisting PVC มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบัน ตาม มอก. 11-2531 จะมีฉนวน PVC เพียงชนิดเดียวเท่านั้น คือ มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส

### — สายเคเบิลอลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวน PVC

สายเคเบิลชนิดนี้จะมีตัวนำเป็นอลูมิเนียม และหุ้มด้วยฉนวน PVC โดยอาจจะเป็น PVC ธรรมดา หรือเป็นแบบ Heat Resisting PVC ก็ได้ สามารถใช้ได้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ สายเคเบิลชนิดนี้จะเป็นไปตาม มอก. 293-2526

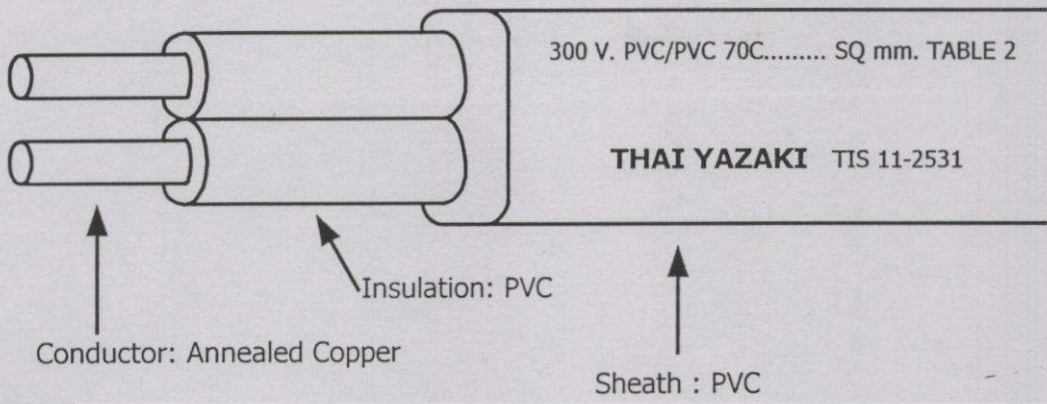
สายเคเบิลอลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวน PVC สามารถใช้งานในระบบจำหน่ายแรงต่ำ เดินภายนอก อาคารเป็นสายเมน (Main) หรือ สายป้อน (Feeder) โดยจะใช้เดินในอากาศเหนือพื้นดินทางการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะใช้สายชนิดนี้เป็นสายเมนแรงต่ำ เดินมาจากหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution transformers) พาดบนลูกถ้วยตามเสาไฟฟ้า หรือได้ขายคาบ้านหรือตึกแถว เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ สายชนิดนี้มีราคาถูก และรับแรงดึงได้พอควร

### — สายเคเบิลทองแดงหุ้มด้วยฉนวน PVC

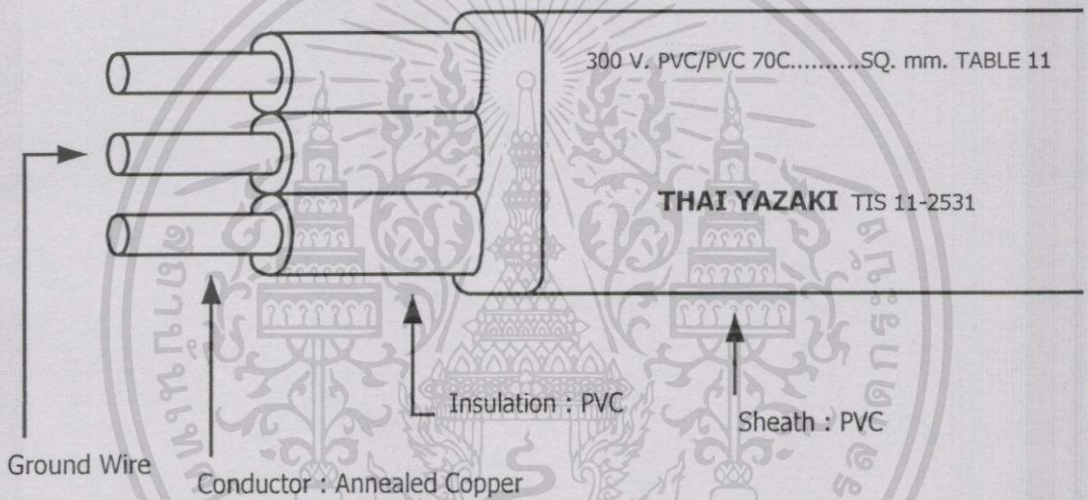
เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติข้อดีเหนือกว่าอลูมิเนียมหลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นโลหะที่มีความนำสูงกว่า การตัดต่อก็ทำได้ง่ายกว่า จึงนิยมใช้สายเคเบิลชนิดนี้กันมากสายทองแดงหุ้มด้วยฉนวน PVC มีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็เหมาะกับงานแต่ละแบบ ทำให้สามารถใช้สายเคเบิลชนิดนี้กับงาน ได้กว้างขวางมาก ตั้งแต่เป็นสายเชื่อมต่อวงจรเล็กๆ จนกระทั่งเป็นสายเมนหรือสายป้อน ในบทนี้จะขอกล่าวถึงตัวอย่างสายเคเบิลตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 11-2531 บางชนิด ส่วนรายละเอียดของข้อกำหนดทั้งหมดจะกล่าวถึงในบทต่อไปโดยในที่นี้จะกล่าวถึงสายเคเบิลที่ใช้งานในการเดินสาย Fixed Wiring ที่ใช้กันโดยทั่วไป ตามสถานประกอบการต่างๆ ดังต่อไปนี้

### — สายเคเบิล PVC ตามตารางที่ 2 และ ตารางที่ 11 ของ มอก. 11-2531

สายเคเบิลชนิดนี้ภายนอกเป็นเปลือกฉนวน PVC (Sheath) ไว้ป้องกันความชื้น และช่วยป้องกันการเสียหายทางกลกับฉนวนภายใน ซึ่งหุ้มตัวนำทองแดงอีกชั้นหนึ่ง ตัวนำทองแดงอาจเป็นตัวนำเดี่ยวหรือตีเกลียวก็ได้ สายเคเบิลตามตารางที่ 2 จะมีทั้งชนิด 2 แกน และ 3 แกน จะเรียกสายชนิดว่า VAF แต่ในตารางที่ 11 จะมีสายดินเพิ่มขึ้นอีก 1 สาย และจะเรียกสายชนิดนี้ว่า VAF-G ดังแสดงในภาพที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 แสดงสายเคเบิลตามตารางที่ 2 ของ มอก. 11-2531



รูปที่ 3.7 แสดงสายเคเบิลตามตารางที่ 11 ของ มอก. 11-2531

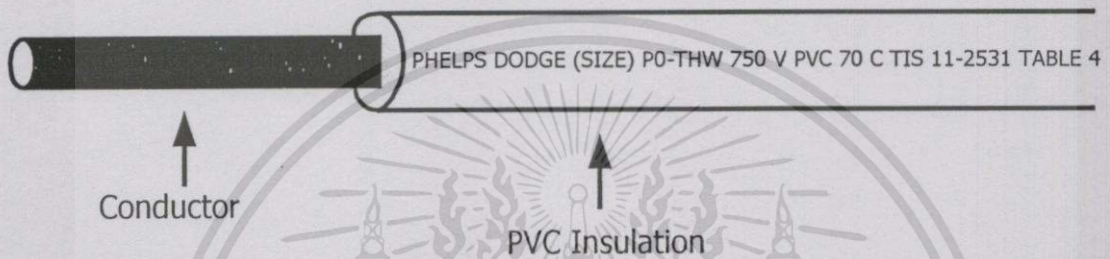
ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 300 V
- อุณหภูมิใช้งาน : 70 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง
  - เดินเกาะผนัง
  - เดินฝังในผนังปูนฉาบ
  - เดินซ่อน (Conceal) ในผนัง
  - ห้ามฝังดินโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— สายเคเบิลตามตารางที่ 4 ของ มอก. 11-2531

สายเคเบิลชนิดนี้มีลักษณะเป็นสายกลมเดี่ยวตัวนำเป็นทองแดงหุ้มฉนวน PVC โดยทั่วไป นิยมใช้สายชนิดนี้เป็นสายวงจรย่อย, สายป้อน และ สายเมน ซึ่งแต่เดิม มอก. 11-2518 ได้แบ่งสาย ชนิดนี้ออกเป็น 2 แบบ ตามชนิดของฉนวน PVC คือ ชนิดที่อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส จะมีชื่อเรียกว่า TW และชนิดที่อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส มีชื่อเรียกว่า THW แต่ในปัจจุบันตาม มอก. 11-2531 สายไฟชนิดนี้มีแบบเดียวคือ มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของสายเคเบิลตามตารางที่ 4 มอก. 11-2531

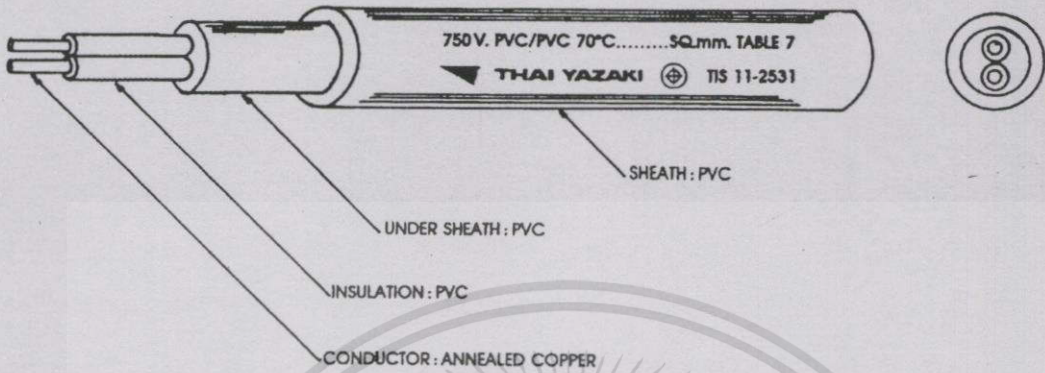
ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 750 V
- อุณหภูมิใช้งาน : 70 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง
  - เดินลอยต้องยึดด้วยวัสดุฉนวน
  - เดินในท่อร้อยสาย ในสถานที่แห้ง
  - เดินในท่อร้อยสายฝังดินแต่ต้องป้องกันไม่ให้หน้าเข้าท่อ และป้องกันไม่ให้สายมีโอกาสชนน้ำ
  - ห้ามฝังดินโดยตรง

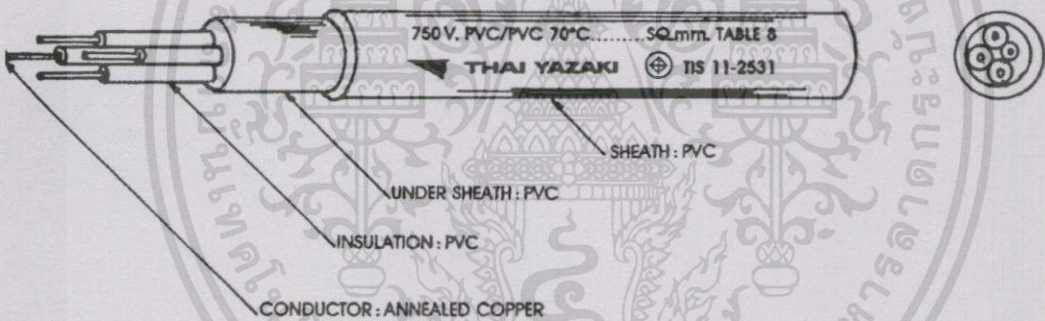
— สายเคเบิลตามตารางที่ 6, 7, 8 และ 14 ของ มอก. 11-2531

เป็นสายที่มีฉนวน 2 ชั้น โดยฉนวน PVC ชั้นใน จะทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มตัวนำเอาไว้แล้ว จะมีฉนวน PVC ชั้นนอกอีกชั้นหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นเปลือก (Sheath) ซึ่งสามารถทนความชื้นได้สูง สายชนิดนี้จึงสามารถฝังดินได้โดยตรง สายตามตารางที่ 6 จะเป็นชนิด 1 แกน มีเปลือกชั้นเดียว สายตามตารางที่ 7 และ 14 เป็นชนิด 2 ถึง 4 แกน มีเปลือกหุ้ม 2 ชั้น โดยในตารางที่ 14 จะเพิ่มสายดินอีก

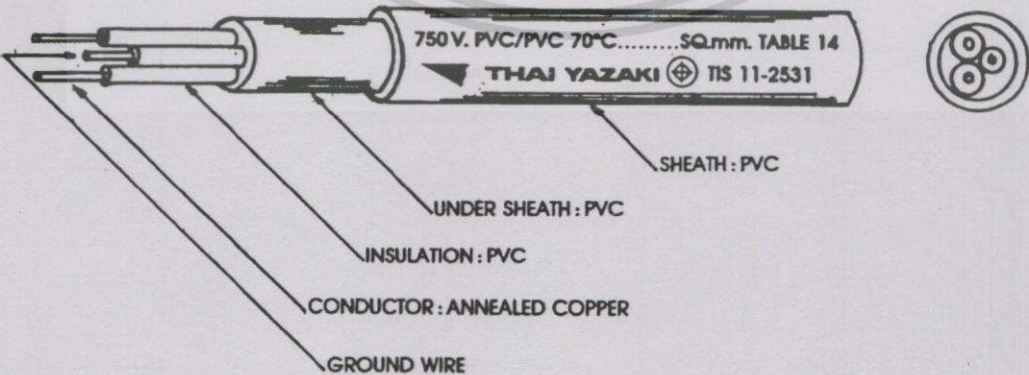
1 สายและสายไฟตารางที่ 8 เป็นชนิด 3 แกนและมีสาย Neutral เพิ่มขึ้นอีก 1 สายโดยทั่วไปนิยมใช้สายชนิดนี้เป็นสายป้อนและสายเมน จะเรียกสายชนิดนี้ว่า สาย NYY ดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.11



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะสายเคเบิลตามตารางที่ 7 มอก. 11-2531



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะสายไฟตารางที่ 8 มอก. 11-2531



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของสายไฟตารางที่ 14 มอก. 11-2531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

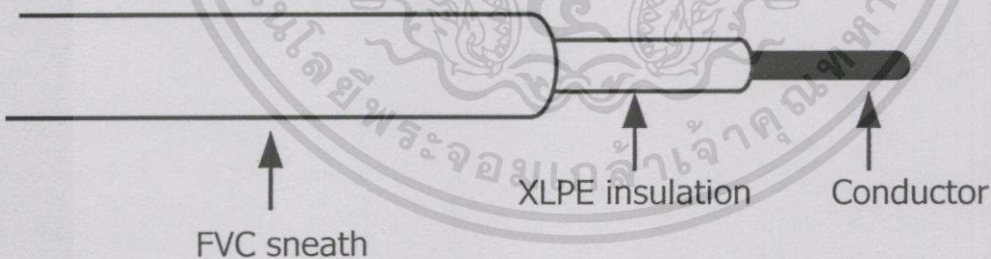
### ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 750 V
- อุณหภูมิใช้งาน : 70 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง - ใช้งานได้ทั่วไป - ผึงดินโดยตรง

### — สายเคเบิลทองแดงหุ้มด้วยฉนวน XLPE

เนื่องจากคุณสมบัติของฉนวน XLPE ที่สามารถทนต่อความร้อนได้สูงมีความแข็งแรง ทนต่อแรงทางกลและการกัดกร่อนทางเคมีได้ดี ในปัจจุบันจึงมีการใช้สายเคเบิลที่หุ้มด้วยฉนวน XLPE มากขึ้น โดยสายชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า สาย CV ซึ่งไม่อยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) แต่จะใช้ตามมาตรฐานอื่น เช่น IEC 502 โดยทั่วไปสายชนิดนี้จะสามารถใช้งานได้เหมือนกับ สาย NYY จึงนิยมใช้เป็นสายป้อนหรือสายเมน ดังแสดงในรูปที่ 3.12

Construction	: Conductor	: Compact stranded copper
	Insulation	: Cross-linked polyethylene
	Circuit Identification	: The insulation shall be natural colour with black Number marking
	Jacker	: Polyvinyl chloride (Black)



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของสาย CV

### ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 0.6/1 kV
- อุณหภูมิใช้งาน : 90 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง - ใช้งานได้โดยทั่วไป
- ผึงดินโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สายเคเบิลใช้งานสำหรับสถานที่อันตรายและงานเฉพาะ

#### – สถานที่อันตราย

หมายถึง สถานที่ใดๆ ที่มีโอกาสและความเสี่ยงต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างไม่คาดฝันถ้าหากไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบข้อบังคับของเจ้าของสถานที่อย่างเคร่งครัด โดยทั่วไปสถานที่อันตรายที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลที่จะกล่าวถึงที่เห็นได้บ่อยๆ ก็คือ โรงกลั่นน้ำมัน คลังเก็บน้ำมัน โรงแยกแก๊ส โรงงานผลิตไนโตรเจนเหลว รวมทั้งสถานที่ไวไฟ ทุกประเภทนอกจากนี้ยังรวมไปถึงสถานที่ที่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อวัสดุฉนวนได้ง่าย เช่น โรงงานปิโตรเคมี โรงปูน ฯลฯ ดังนั้น สายเคเบิลที่สามารถใช้กับงานในสถานที่อันตรายนี้จะต้องถูกออกแบบให้ได้ตามมาตรฐานของความปลอดภัยสำหรับงานนั้นๆ ด้วย เช่น สายเคเบิลที่ใช้กับโรงกลั่นน้ำมัน จะต้องมีโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุที่สามารถป้องกันการถูกทำลายจากน้ำมันได้ เช่นมีเปลือกสายตะกั่วห่อหุ้มสายเคเบิลด้านนอก และต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ติดไฟเป็นเหตุให้สายเคเบิลถูกทำลายได้ เป็นต้น สายเคเบิลที่แนะนำคือ

- สาย HOFER -Heat resistant, oil resistant and flame retardant cables for general application
  - สาย ZH -Zero halogen cables for enclosed accommodation or working areas
  - สาย FS - Fire Survival Cables for essential circuit integrity
  - สาย MI -Mineral insulated metal shield cable for hazard areas
- สายเคเบิลดังกล่าวมีทั้ง Power cable Control cable และ Instrument Cable

#### – งานเฉพาะ

หมายถึง งานที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมปกติที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างจากงานทั่วไป เช่นสายเคเบิลไดน้ำ สายเหมือง สายที่ใช้ในเรือ สายที่ใช้งานกับลิฟท์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ยังมีสภาวะบางอย่างที่มักจะมองข้ามกันไป เช่น การใช้งานกับโหลดที่เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้เกิดความสูญเสียที่อยู่ในรูปของความร้อน เป็นเหตุให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลง โหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดของ ฮาร์โมนิกส์สูงๆ เช่น คอมพิวเตอร์ UPS มอเตอร์ หม้อแปลง และ อุปกรณ์ที่เป็นพวก Non- Linear โหลดทุกประเภท สายที่แนะนำสำหรับโหลดที่มีฮาร์โมนิกส์สูงๆ คือ

- สาย MI – Mineral insulated metal sheath cable
- คุณสมบัติของสาย MI จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

## — ความปลอดภัยในอาคารสูง

ปัจจุบันมีอาคารสูงกำเนิดขึ้นมากมายซึ่งเป็นไปตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเภท ซึ่งในอาคารสูงนี้ ผู้ออกแบบมักจะคำนึงถึงความปลอดภัยในอาคารเป็นหลัก อาคารสูงเหล่านี้อาจจะสร้างขึ้นเป็นโรงแรมระดับห้าดาว อาคารสำนักงานให้เช่าหรือโรงพยาบาล ดังนั้นอาคารเหล่านี้จะต้องมีระบบไฟฉุกเฉิน ระบบจ่ายพลังงานสำรอง ซึ่งจะต้องพร้อมที่จะทำงานได้ตลอดเวลา และแม้กระทั่งเวลาเกิดเพลิงไหม้ จะต้องมียุทธศาสตร์ความปลอดภัยที่จะทำให้มีเวลาเพียงพอในการช่วยชีวิต อุปกรณ์ที่จำเป็นต่างๆ เหล่านี้ คือ

-Fire Man Lifts เป็นลิฟต์ ที่มีไว้สำหรับเจ้าหน้าที่ดับเพลิงใช้ในการปฏิบัติหน้าที่ในการดับไฟหรือช่วยชีวิตคน

-Fire pumps เป็นเครื่องสูบน้ำที่จะต้องสามารถใช้งานได้ในขณะที่เกิดเพลิงไหม้ เพื่อจ่ายให้กับ Sprinkler

-Controls for Air Handling Systems เป็นระบบควบคุมการระบายอากาศ เนื่องจากขณะเกิดเพลิงไหม้จะทำให้มีความหนาแน่นของควันไฟสูงจึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมการระบายอากาศที่

-Emergency Lighting เป็นระบบไฟฟ้าแสงสว่างฉุกเฉิน เพราะในสภาวะฉุกเฉิน จำเป็นต้องมีแสงสว่างเพียงพอในการแก้ไข ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น

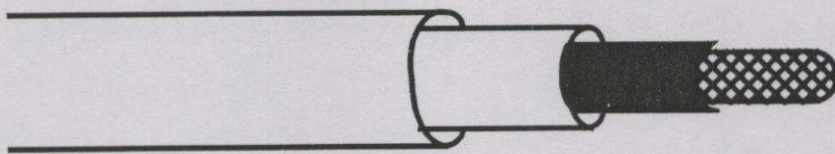
-Evacuation Warning Systems เป็นระบบเตือนภัยให้คนอยู่ในอาคารเหล่านั้นทราบล่วงหน้าว่าเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้น

-Generators เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้เป็นเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าสำรองขณะเกิดเหตุฉุกเฉิน อุปกรณ์ต่างๆ ที่กล่าวข้างต้น เป็นระบบ ที่มีความจำเป็นพื้นฐานในด้านความปลอดภัย ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้ควรจะสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ให้เพียงพอที่จะแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ นี้จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารองที่จ่ายพลังงาน ผ่านสายเคเบิลไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวจะต้องทำมาจากวัสดุพิเศษซึ่งสามารถทนต่อสภาวะของการเกิดเพลิงไหม้ได้ รวมทั้งสายเคเบิลที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

### 3.2.1 สายโพลีเมอร์ทนไฟ (Fire Resistant Polymeric Cable)

สายชนิดนี้เรียกสั้นๆ ว่า สาย F.R. ซึ่งผลิตโดยโรงงานกลุ่มเดียวกับผู้ผลิตสายประเภทโพลีเมอร์ ที่ใช้สำหรับงานทั่วไป และมีโครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลคล้ายกัน จะต่างกันก็ตรงที่สาย F.R. นั้นจะมีชั้นของฉนวนไมก้า ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชม. ตามมาตรฐานการทดสอบของ IEC 331 สายเคเบิลชนิดนี้จะมีราคาถูกเมื่อเทียบกับสายเคเบิลที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป แต่ไม่เหมาะสมกับงานที่อยู่ในสภาวะของการเกิดเพลิงไหม้ที่มีระบบ ควบคุมครบวงจร เนื่องจากมาตรฐานของ IEC 331 ไม่ครอบคลุม ถึงผลกระทบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางกลและน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้จากการดับเพลิงของเจ้าหน้าที่ ดังนั้นสายทนไฟชนิดนี้ จะต้องเดินในท่อเพื่อป้องกันผลกระทบทางกลที่อาจเกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของสายทนไฟชนิด F.R.

#### ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 0.6/1 kV
- อุณหภูมิใช้งาน : 750 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง -เดินในท่อเกาะผนัง-เดินในท่อฝังในผนังปูนฉาบ  
-ห้ามฝังดินโดยตรง

#### 3.2.2 สายเคเบิลฉนวนแร่เปลือกโลหะ (Mineral Insulated Metal Sheathed Cable)

สายชนิดนี้เรียกสั้นๆ ว่า สาย M.I. เป็นสายเคเบิลที่ไม่สามารถผลิตในโรงงานเดียวกับสายกลุ่มโพลีเมอร์ได้ ขบวนการผลิตสายชนิด M.I. จะแตกต่างกับสาย โดยลึนเชิง เรียกว่าขบวนการผลิตแบบรีดเย็น ตามมาตรฐานของ IEC 702 ซึ่งสายปกติทั่วไป จะใช้กรรมวิธีฉีดพลาสติก หรือ ที่เรียกกันว่า Extrude ตามมาตรฐาน IEC 502 โครงสร้างของสายชนิด MI นี้สามารถดูได้จากรูปที่ 3.14 ประกอบไปด้วยตัวนำ ที่ทำมาจากทองแดงเท่านั้น และมีฉนวนที่เป็นผงแร่ของ Magnesium oxide และหุ้มด้วยเปลือกสายทองแดงอีกชั้นหนึ่ง (copper sheath) แต่เมื่อนำไปใช้กับสถานที่ที่อาจเกิดการกัดกร่อนจากไปของเกลือหรือสารเคมี จะต้องมีเปลือกสายที่เป็น PVC ห่อหุ้มอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 364 ได้แบ่งตารางพิกัดกระแสของสาย M.I. ไว้เป็น 3 ชนิด คือ

-Mineral Insulation PVC cover

ให้ใช้พิกัดกระแสตามตาราง 52-C5 สำหรับวิธีการติดตั้งแบบ C และ C

ให้ใช้พิกัดกระแสตามตาราง 52-C7 สำหรับวิธีการติดตั้งแบบ E, F และ G

-Mineral Insulated Bare Exposed to touch

ให้ใช้พิกัดกระแสตามตาราง 52-C5 คู่ด้วย 0.9 สำหรับวิธีการติดตั้งแบบ C และ C

ให้ใช้พิกัดกระแสตามตาราง 52-C7 คู่ด้วย 0.9 สำหรับวิธีการติดตั้งแบบ E, F, G

-Mineral Insulated Bare Cable not Exposed to touch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

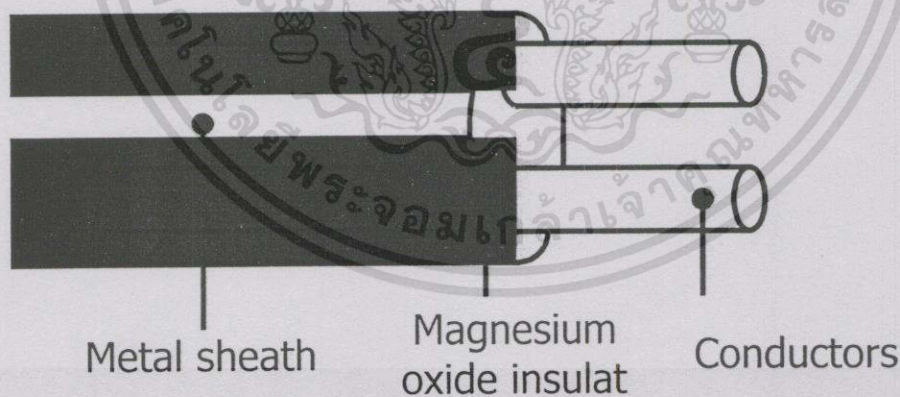
ให้ใช้พิกัดกระแสตามตาราง 52-C6 สำหรับวิธีการติดตั้งแบบ C และ C

ให้ใช้พิกัดกระแสตามตาราง 52-C8 สำหรับวิธีการติดตั้งแบบ E, F และ G

ไม่ต้องมี correction factor สำหรับวงจรข้างเคียง

คุณสมบัติของสายเคเบิลชนิด MI จะเหนือกว่าสายชนิด FR เนื่องจากเป็นสายเคเบิลที่มีวัสดุเป็นสาร อนินทรีย์ (Inorganic Material) ดังนั้นจึงไม่มีการย่อยสลายไปตามสภาวะแวดล้อม มีความทนต่อสภาวะแวดล้อมในทุกๆ สภาวะ แม้กระทั่งเวลาเกิดเพลิงไหม้ ได้มีการทดสอบสาย Cable โดยการเผาไฟที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยยึดกับแผ่นกระดาน แล้วตีแผ่นกระดานด้วยของแข็ง ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบมาตรฐาน BS 6387 ในหมวด CWZ ซึ่งเป็นหมวดสูงสุดของการทดสอบสายเคเบิลตามมาตรฐาน BS 6387 ว่าด้วยการทนต่อเปลวไฟ, น้ำ และสภาวะทางกล โดยที่สาย MI ยังสามารถนำกระแสต่อไปได้ เช่นเดียวกับสายชนิด FR แต่จะแตกต่างกันตรงที่ สาย MI สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกเพราะสายมิได้ถูกเผาไหม้ แต่สาย FR ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงถึง 950 องศาเซลเซียส ฉีกด้วยน้ำและตีด้วยของแข็งทำให้ต้องเปลี่ยนสายเคเบิล เพราะน้ำ, เปลวไฟ และของแข็งได้ทำลาย โครงสร้างภายนอกของสายจนหมดสิ้น เหลือเพียงแผ่นไมก้าที่พันรอบตัวน้ำยังสามารถป้องกันการลัดวงจรระหว่างสายได้เท่านั้น

รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างของสายชนิด MI ตามมาตรฐาน IEC 702 มีขนาดพิกัดแรงดันใช้งาน 2 ขนาดคือ แบบหน้าที่เบา (Light Duty) 0.5/0.75kV และแบบหน้าที่หนัก (Heavy Duty) 0.6/1kV



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะสายชนิด MI

## ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 0.6 / kV Heavy Duty  
0.5 / 0.75 kV Light Duty
- อุณหภูมิใช้งาน : 70 องศาเซลเซียส (PVC cover หรือ Bare Exposed to touch)  
: 105 องศาเซลเซียส (Bare Cable not Exposed to touch)
- สถานที่ใช้งาน -สถานที่อันตราย  
-ระบบฉุกเฉิน  
-สถานแห่งและเปียก
- ลักษณะการติดตั้ง -เดินในท่อเกาะผนัง  
-ฝังในผนังปูนฉาบโดยตรง  
-เดินในรางสายเคเบิล  
-ฝังดินโดยตรง



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์หลักเกณฑ์ในการเลือกขนาดของสายเคเบิล

ตัวแปรที่มีผลต่อการเลือกขนาดของสายเคเบิลที่เหมาะสมนั้นมีมากมาย เช่น อุณหภูมิรอบข้าง ค่าความต้านทานความร้อน การสูญเสียที่ตัวนำเนื่องจากกระแสไฟฟ้า การสูญเสียที่ฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็ยังมีตัวแปรตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเลือกขนาดของสายเคเบิล คือ แรงดันตก และพิสัยการทนต่อกระแสลัดวงจร

#### 4.1 การกำหนดความทนต่อกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิล

สายตัวนำที่มีฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มอยู่เช่น สายเคเบิลซึ่งเมื่อมีกระแสไหลในตัวนำ ย่อมเกิดมีการสูญเสียความร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ตัวนำและฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มตัวนำสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิรอบ ๆ สายเคเบิล ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของอากาศ สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta t = t_L - t_a \quad (4.1)$$

$\Delta t$  คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ตัวนำ

$t_L$  คือ อุณหภูมิที่ตัวนำขณะมีกระแสไฟฟ้าไหล

$t_a$  คือ อุณหภูมิรอบฉนวนไฟฟ้าด้านนอกของสายเคเบิล

ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิที่ตัวนำกับอุณหภูมิรอบฉนวนไฟฟ้า จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียทางความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล ได้แก่

1. การสูญเสียที่ตัวนำเนื่องจากกระแสไฟฟ้า
2. การสูญเสียที่ฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมการสูญเสีย  $\tan \delta$  ของฉนวนไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริก
3. การสูญเสียที่เสื่อโลหะ ซิลต์  $P_{sh}$  และ/หรือเกราะโลหะ  $P_{gr}$  ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวนที่เสื่อโลหะ ซิลต์ และ/หรือเกราะโลหะอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ

กำลังสูญเสียทางความร้อนต่าง ๆ จะต้องถูกส่งผ่านความร้อนออกสู่ด้านนอกของสายเคเบิลโดยผ่านชั้นของฉนวนไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีค่าความต้านทานความร้อน  $R_{th}$  ไม่เท่ากัน ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวนำกับด้านนอกสายเคเบิล จากสมการที่ 4.1 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta t = t_L - t_a = \Sigma [P_{\text{loss}} \times \Sigma R_t] \quad (4.2)$$

เมื่อแยกกำลังสูญเสียต่าง ๆ ในสายเคเบิลและผลต่างของอุณหภูมิจะได้

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= t_L - t_0 \\ &= P_L (R_{\text{this}} + R_{\text{thsi}} + R_{\text{thsa}}) + P_{\text{die}} (0.5R_{\text{this}} + R_{\text{thsi}} + R_{\text{thsa}}) + P_{\text{sh}} (R_{\text{thsi}} + R_{\text{thsa}}) + P_{\text{ar}} \times R_{\text{thsa}} \\ &= (P_L \times 0.5P_{\text{die}})R_{\text{this}} + (P_L + P_{\text{die}} + P_{\text{sh}})R_{\text{thsi}} + (P_L + P_{\text{die}} + P_{\text{sh}} + P_{\text{ar}})R_{\text{thsa}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $\Delta t_1$  คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ตัวนำ  $t_L$  กับอุณหภูมิที่ผิวฉนวนไฟฟ้าด้านนอกสุดของสายเคเบิล

$R_{\text{this}}$  คือค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มตัวนำ

$R_{\text{thsi}}$  คือค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนปกคลุมหุ้มเปลือกโลหะ

$R_{\text{thsa}}$  คือค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนปกคลุมด้านนอกเกราะโลหะ

ความแตกต่างของอุณหภูมิจะหว่างผิวของฉนวนด้านนอกสุดของสายเคเบิล  $t_0$  และอุณหภูมิของตัวกลาง (อากาศ) รอบ ๆ สายเคเบิล  $t_a$  ให้เป็น  $t_a$  ได้

$$\begin{aligned} \Delta t_a &= t_0 - t_a = \Sigma P_{\text{loss}} \times R_{\text{tha}} \\ &= (P_L + P_{\text{die}} + P_{\text{sh}} + P_{\text{ar}}) R_{\text{tha}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $R_{\text{tha}}$  คือค่าความต้านทานความร้อนระหว่างผิวของสายเคเบิลกับอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิล

เพราะฉะนั้นผลรวมของความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 ได้ความแตกต่างของอุณหภูมิจะหว่างตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลกับอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิล  $\Delta t$

$$\begin{aligned} \Delta t_a &= (t_L - t_0) + (t_0 - t_a) = t_L - t_a \\ &= (P_L \times 0.5P_{\text{die}})R_{\text{th}} + (P_L + P_{\text{die}} + P_{\text{sh}})R_{\text{thsi}} + (P_L + P_{\text{die}} + P_{\text{sh}} + P_{\text{ar}})(R_{\text{thsa}} + R_{\text{tha}}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิลย่อมจะต้องมีขอบเขตจำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิของฉนวนไฟฟ้าของสายเคเบิล เช่น ฉนวนไฟฟ้าประเภทวัสดุสังเคราะห์ PVC จุดจำกัดของอุณหภูมิขณะใช้งานที่ยอมให้ได้สูงสุดที่ตัวนำเพียง 70 °C หรือฉนวน XLPE ทนได้ 90 °C เป็นต้น ในการคำนวณหาขนาดกระแสไฟฟ้าที่สายเคเบิลสามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ทำให้อุณหภูมิที่ตัวนำเพิ่มขึ้นเกินขีดความสามารถที่ฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มตัวนำนั้นจะทนได้ จำเป็นต้องแยกแยะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากสมการที่ 4.5 ออกเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กทริกได้เป็น

$$\Delta t_{el} = P_L \times R_{this} + (P_L + P_{sh}) R_{thsi} + (P_L + P_{sh} + P_{ar}) (R_{thsa} + R_{tha}) \tag{4.6}$$

$$\Delta t_{die} = P_{die} (0.5R_{this} + R_{thsi} + R_{thsa} + R_{tha}) \tag{4.7}$$

ผลต่างของสมการที่ 4.5 กับสมการที่ 4.7 จะได้สมการที่ 4.8 ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta t - \Delta t_{die} &= \Delta t_{el} \\ &= P_L \times R_{this} + (P_L + P_{sh}) R_{thsi} + (P_L + P_{sh} + P_{ar}) (R_{thsa} + R_{tha}) \end{aligned} \tag{4.8}$$

ผลรวมกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งหมดจาก

$$P_{el} = P_L + P_{sh} + P_{ar} \tag{4.9}$$

ให้คูณเข้าและหารออกในสมการที่ 4.8 ได้

$$\begin{aligned} \Delta t - \Delta t_{die} &= \left[ \frac{P_L}{P_{el}} R_{this} + \frac{(P_L + P_{sh})}{P_{el}} R_{thsi} + (R_{thsa} + R_{tha}) \right] P_{el} \\ &= \left[ \frac{P_L}{P_{el}} R_{this} + \frac{(P_L + P_{sh})}{P_{el}} R_{thsi} + R_{thsa} \right] P_{el} + R_{tha} \cdot P_{el} \end{aligned} \tag{4.10}$$

เมื่อให้ผลรวมความต้านทานความร้อนของฉนวนไฟฟ้าภายในวงเล็บของสมการที่ 4.10 เป็นค่าความต้านทานความร้อนสมมูลของฉนวนไฟฟ้า  $R_{thc}$  เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 4.10 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta t - \Delta t_{die} = (R_{thc} + R_{tha}) P_{el} \quad (4.11)$$

ขณะเดียวกันถ้าแทน  $P_{el}$  ในสมการที่ 4.11 ด้วยสมการที่ 4.9 และคูณหารสมการด้วย  $P_L$  จะได้

$$\Delta t - \Delta t_{die} = (R_{thc} + R_{tha}) \left[ 1 + \frac{P_{sh}}{P_L} + \frac{P_{ar}}{P_L} \right] P_L$$

เมื่อให้สัดส่วน  $P_{sh}/P_L = \lambda_{sh}$  และสัดส่วน  $P_{ar}/P_L = \lambda_{ar}$  จะได้

$$\Delta t - \Delta t_{die} = (R_{thc} + R_{tha})(1 + \lambda_{sh} + \lambda_{ar})P_L \quad (4.12)$$

แทนกำลังสูญเสียที่ตัวนำด้วย

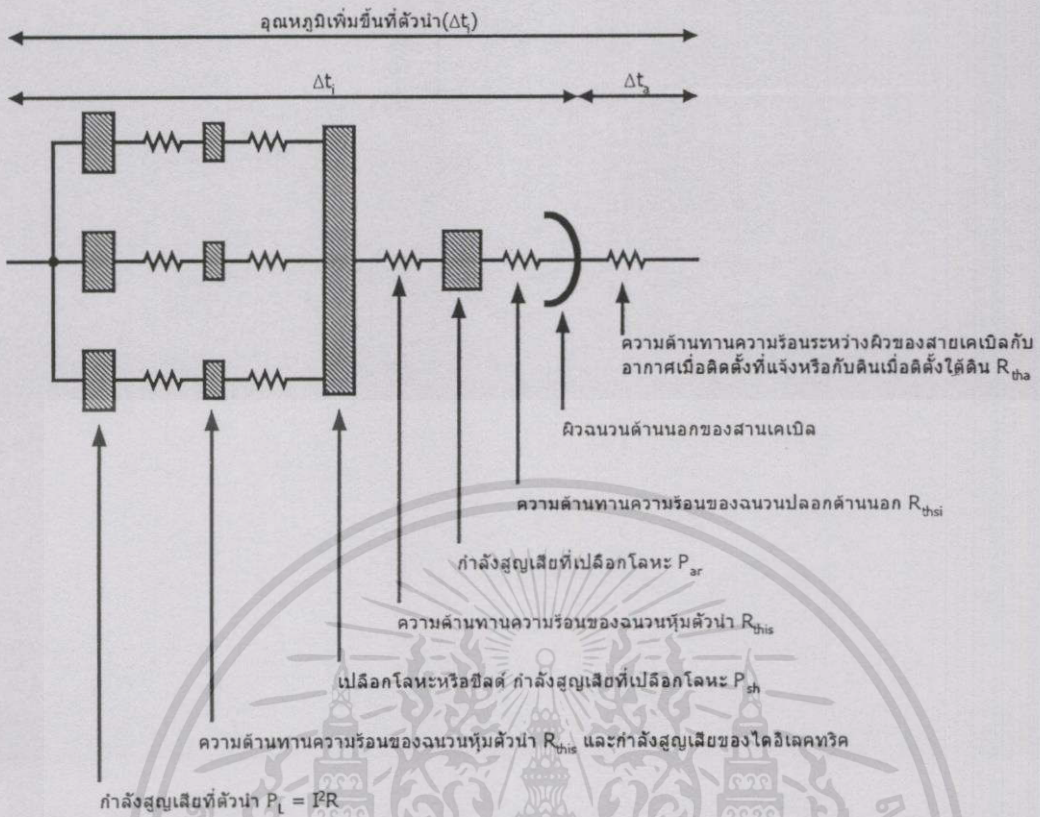
$$P_L = I_N^2 R' \quad (4.13)$$

เมื่อ  $I_N$  คือพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ใหญ่ในตัวนำตลอดเวลาโดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ตัวนำเกินกว่าพิกัดที่ฉนวนไฟฟ้าจะทนได้

$R'$  คือความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำเพราะฉะนั้น จากสมการที่ 4.13 แปลงรูปสมการจะได้

$$\begin{aligned} I_N &= \sqrt{\frac{\Delta t - \Delta t_{die}}{(R_{thc} + R_{tha})(1 + \lambda_{sh} + \lambda_{ar})R'}} \\ &= \sqrt{\frac{\Delta t - P_{die}(0.5R_{this} + R_{thsi} + R_{thas} + R_{tha})}{R'[R_{this} + (1 + \lambda_{sh})R_{thsi} + (1 + \lambda_{sh} + \lambda_{ar})(R_{thsa} + R_{tha})]}} \end{aligned} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.14 สามารถกำหนดพิกัดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลชนิดตัวนำแกนเดี่ยวซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าต่าง ๆ และกำลังสูญเสียของไดอิเล็กทริก ค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนไฟฟ้า ความต้านทานความร้อนที่ผิวนอกของสายเคเบิลขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำและอุณหภูมิที่ขอมให้เพิ่มขึ้นได้ที่ตัวนำ  $\Delta t$  ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุฉนวนไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 การสูญเสียต่าง ๆ ของสายเคเบิลและการส่งถ่ายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียจากตัวนำ ออกสู่ตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิล

ถ้าสายเคเบิลกำลังเป็นชนิดที่มีจำนวนตัวนำ  $n$  แกน และที่ทุก ๆ ตัวนำให้มีกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพเท่า ๆ กัน เช่นเบลดเคเบิลตัวนำ 3 แกน เป็นต้น ที่ฉนวนไฟฟ้าปลอกด้านใน  $R_{thsi}$  ที่ ฉนวนไฟฟ้าปลอกด้านนอก  $R_{thsa}$  และความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียของตัวนำจำนวน  $n$  แกน ออกสู่ ตัวกลางภายนอก ดังนั้นพิกัดกระแสไฟฟ้าสำหรับสายเคเบิลชนิดมีตัวนำ  $n$  แกน จึงเขียนสมการ ได้เป็น

$$I_N = \sqrt{\frac{\Delta t - P_{die} [0.5R_{this} + n(R_{thsi} + R_{thsa} + R_{tha})]}{R' [R_{this} + (1 + \lambda_{sh})nR_{thsi} + (1 + \lambda_{sh} + \lambda_{ar})n(R_{thsa} + R_{tha})]}} \quad (4.15)$$

#### 4.2 ความต้านทานความร้อนของฉนวนสายเคเบิล

ความต้านทานความร้อนของฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มตัวนำ ปลอกฉนวนไฟฟ้าหรือฉนวน ไฟฟ้าสำหรับสายเคเบิลกำลังชนิดแกนเดี่ยว สามารถพิจารณาการคำนวณได้ในทำนองเดียวกับหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า ทั้งนี้ฉนวนไฟฟ้าที่ห่อหุ้มตัวนำที่อยู่ลึกเข้าใกล้ตัวนำข้อมจะมีพื้นที่ของ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในการระบายความร้อนออกสู่ภายนอกน้อยกว่าฉนวนไฟฟ้าส่วนที่อยู่ห่างออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนตัวนำ และขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อนจำเพาะของฉนวนไฟฟ้า  $\sigma_x$  เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$R_{thx} = \frac{\sigma_x}{2\pi} \ln \frac{d_a}{d_i} \quad (4.16)$$

เมื่อ  $R_{thx}$  คือความต้านทานความร้อนของฉนวนไฟฟ้า X  
 $d_u$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางถึงผิวนอกของฉนวนไฟฟ้า  
 $d_i$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางในที่สัมผัสกับตัวนำ  
 $\sigma_x$  คือความต้านทานความร้อนจำเพาะของฉนวนไฟฟ้า X

ตัวอย่าง

ฉนวนไฟฟ้าของมาสเตอร์อิมเพรคเนทเคเบิล	= 600 °Kcm/W
ฉนวนไฟฟ้ากระดาษอบน้ำมัน	= 500 ถึง 550 °Kcm/W
ฉนวนไฟฟ้า PVC	= 700 °Kcm/W
ฉนวนไฟฟ้า PE	= 400 °Kcm/W
ฉนวนไฟฟ้า เชือกปอ	= 600 °Kcm/W

### 4.3 การลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้าใช้งานเนื่องจากอุณหภูมิ

การกำหนดพิคัดกระแสไฟฟ้าใช้งานของสายเคเบิลกำลังจากสมการที่ 4.14 และสมการที่ 4.15 ซึ่งได้พิจารณาจากความต้านทานความร้อนของวัสดุฉนวนไฟฟ้า ในการพาความร้อนจากตัวนำออกสู่ผิวนอกสายเคเบิล และความสามารถในการแผ่รังสีจากผิวของสายเคเบิลให้กับตัวกลางรอบ ๆ ถ้าสมมุติว่าตัวกลางที่ปกคลุมสายเคเบิลอยู่มีความสามารถในการพาความร้อนจากผิวของสายเคเบิลออกไปได้ดีมาก ดังนั้น  $R_{tha} = 0$  และถ้าไม่พิจารณากำลังสูญเสียของไดอิเล็กทริก  $P_{die}$  ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียทางไฟฟ้า  $P_e$  ดังนั้น สมการที่ 4.14 กำหนดพิคัดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลแกนเดี่ยวสามารถเขียนให้สั้นลงเป็น

$$I_N = \sqrt{\frac{\Delta t}{R' \sum R_{th}}} \quad (4.17)$$

เมื่อ  $\sum R_{th}$  คือผลรวมค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนไฟฟ้าหุ้มตัวนำ ปลอกหุ้มเสื่อโลหะ และ/หรือปลอกหุ้มเกราะโลหะ

จากสมการที่ 4.17 จะเห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวนำกับตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิล  $\Delta t$  ได้ถูกจำกัดจากชนิดของฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากฉนวนไฟฟ้าแต่ละชนิดมีขีดความสามารถทนต่ออุณหภูมิไม่เหมือนกัน ดังนั้นผู้ผลิตสายเคเบิลที่จะกำหนดพิภักกระแสไฟฟ้า  $I_N$  ของสายเคเบิลนั้น ๆ ลงไปได้ จำเป็นจะต้องกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง  $t_{aN}$  ของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิลก่อน ตัวอย่างเช่น สายเคเบิลของบางกอกเคเบิล กำหนดอุณหภูมิรอบ ๆ ของอากาศ  $t_{aN} = 40^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิของดินรอบ ๆ สายเคเบิลที่ติดตั้งใต้ดิน  $25^\circ\text{C}$  เช่นเดียวกับอุณหภูมิรอบข้างของอากาศ  $t_{aN} = 40^\circ\text{C}$  ของบริษัท Phelps Dodge เป็นต้น เพราะฉะนั้นการกำหนดพิภักกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลจะได้ค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิลเป็นองค์ประกอบด้วย ดังนั้นจากสมการที่ 4.17 ความแตกต่างของอุณหภูมิ  $\Delta t$  ในที่นี้จะให้เป็นความแตกต่างของอุณหภูมิตามพิภัก  $\Delta t_N$  ซึ่งได้ค่าดังนี้

$$\Delta t_N = t_{Lmax} - t_{aN} \quad (4.18)$$

เมื่อ  $t_{Lmax}$  คือค่าอุณหภูมิใช้งานที่ยอมให้สูงสุดของตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนไฟฟ้าหุ้มตัวนำ เช่น PVC มีค่า  $t_{Lmax} = 70^\circ\text{C}$  เป็นต้น

$t_{aN}$  คือค่าอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิลตามพิภัก (อุณหภูมิอ้างอิง) เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 4.17 จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_N = \sqrt{\frac{\Delta t_N}{R' \sum R_{th}}} \quad (4.19)$$

ถ้าอุณหภูมิรอบ ๆ สายเคเบิลไม่ได้เป็นไปตามอุณหภูมิอ้างอิงของบริษัทผู้ผลิตสายเคเบิล เช่น อุณหภูมิของอากาศในอุโมงค์ติดตั้งสายเคเบิล  $t_a = 45^\circ\text{C}$  เป็นต้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้กับสายเคเบิลนี้ย่อมแตกต่างไปจากพิภักกระแสไฟฟ้าในสมการที่ 4.19 ซึ่งคำนวณได้จาก

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t}{R' \sum R_{th}}} \quad (4.20)$$

เมื่อ  $I$  คือกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานได้จริงของสายเคเบิล โดยไม่ทำให้อุณหภูมิที่ตัวนำเพิ่มขึ้นเกินพิภัก  $\Delta t$  คือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวนำ  $t_{Lmax}$  กับอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิล  $t_a$  จาก

$$\Delta t = t_{Lmax} - t_a \quad (4.21)$$

เมื่อนำสมการที่ 4.20 หารด้วยสมการที่ 4.21 จะได้

$$I = I_N \sqrt{\frac{\Delta t}{\Delta t_N}} \quad (4.22)$$

และให้  $\sqrt{\frac{\Delta t}{\Delta t_N}} = C_u$  เป็นตัวประกอบการลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิเพราะฉะนั้น

$$I = I_N \cdot C_A \quad (4.23)$$

#### 4.4 กระแสไฟฟ้าใช้งานจากการติดตั้งสายเคเบิลที่แจ้ง

การติดตั้งสายเคเบิลที่แจ้งหมายถึง การติดตั้งสายเคเบิลนอกตัวอาคารหรือภายในตัวอาคาร อาจจะเป็นการติดตั้งพาดบนเสาไฟฟ้าเช่นเดียวกับการติดตั้งสายเปลือยหรือติดตั้งให้ยึดติดกับผนังอาคาร วางบนพื้นหรือติดตั้งบนรางสายเคเบิล เป็นต้น

การติดตั้งสายเคเบิลที่แจ้งจึงมีอากาศเป็นตัวกลางปกคลุมอยู่รอบนอกสายเคเบิล การระบายความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าภายในตัวนำสายเคเบิล อยู่ในเงื่อนไขเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 และขนาดกระแสไฟฟ้าที่จะใช้ได้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของสายเคเบิล อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ สายเคเบิลและจำนวนสายเคเบิลในบริเวณใกล้เคียงกัน

##### 4.4.1 ผลของอุณหภูมิของอากาศ

ผลของอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นหรือลดลง ทั้งนี้ แล้วแต่ว่าอากาศบริเวณที่ติดตั้งสายเคเบิลต่ำกว่าหรือสูงกว่าอุณหภูมิอ้างอิง  $t_{uN}$  จากสมการที่ 4.23 สามารถใช้คำนวณกระแสไฟฟ้าที่จะใช้ได้จริงกับสายเคเบิล โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิของตัวนำสูงเกินกว่าปกติและตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวประกอบลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้า  $C_u$  สำหรับการติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้ง โดยมีอุณหภูมิอ้างอิง  $t_{uN} = 30^\circ\text{C}$  วัสดุฉนวนไฟฟ้าหุ้มตัวนำทำจากวัสดุสังเคราะห์ PVC, XLPE/EPR และทำจากแร่ Mg Oxide เปลือกโลหะที่เรียกว่า MI Cable

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวประกอบลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้า  $C_u$  ติดตั้งที่แจ้ง อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

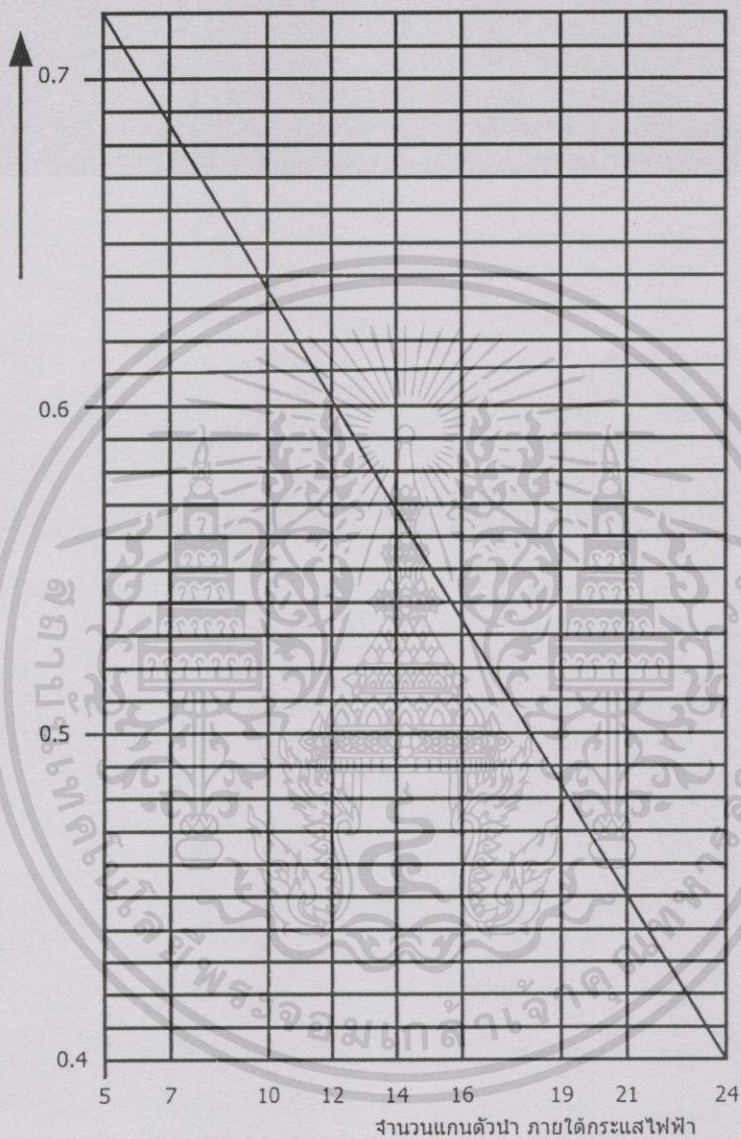
Ambient Temperature	Insulator			
	PVC	XLPE and EPR	Mineral	
			PVC covered or bare and exposed to loads 70 °C	Ere not exposed to touch 105 °C
10	1.22	1.15	1.26	1.14
15	1.17	1.12	1.20	1.11
20	1.12	1.08	1.14	1.07
25	1.06	1.04	1.07	1.04
35	0.94	0.96	0.93	0.96
40	0.87	0.91	0.85	0.92
45	0.79	0.87	0.87	0.88
50	0.71	0.82	0.67	0.84
55	0.61	0.76	0.57	0.80
60	0.50	0.71	0.45	0.75
65	-	0.65	-	0.70
70	-	0.58	-	0.65
75	-	0.50	-	0.60
80	-	0.41	-	0.54
85	-	-	-	0.45
90	-	-	-	0.40
95	-	-	-	0.32

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวประกอบลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้า  $C_u$  ติดตั้งใต้ดิน อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C

Ground Temperature (°C)	Insulation	
	PVC	XLPE และ EPR
10	1.10	1.07
15	1.05	1.04
25	0.95	0.96
30	0.89	0.93
35	0.84	0.89
40	0.77	0.85
45	0.71	0.80
50	0.63	0.76
55	0.55	0.71
60	0.45	0.65
65	-	0.60
70	-	0.53
75	-	0.46
80	-	0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสายเคเบิลเป็นพวกสายควบคุม ซึ่งมีจำนวนแกนตัวนำมากกว่าพวกสายเคเบิลกำลัง การลดทอนกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิสามารถใช้สมการที่ 4.23 คำนวณได้ในทำนองเดียวกัน แต่มีเงื่อนไขจากจำนวนแกนตัวนำมากกว่าสายเคเบิลกำลัง จึงต้องมีตัวประกอบการคูณเพิ่มขึ้นอีกตัวหนึ่งเนื่องจากจำนวนแกนตัวนำดังแสดงในรูปที่ 4.2



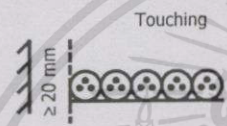
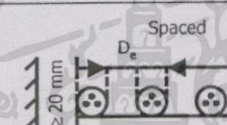
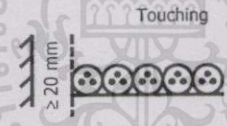
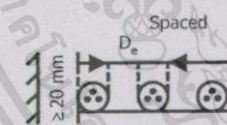
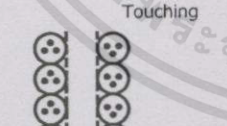
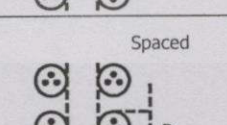
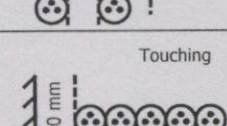

รูปที่ 4.2 ค่าตัวประกอบการคูณของสายเคเบิลควบคุมขึ้นอยู่กับจำนวนแกนตัวนำเฉพาะที่อยู่ภายใต้กระแสไฟฟ้า

#### 4.4.2 ผลจากจำนวนสายเคเบิล

ตัวประกอบการลดกระแสไฟฟ้าใช้งานของสายเคเบิลติดตั้งที่แจ้งอีกตัวหนึ่ง คือตัวประกอบจำนวนสายเคเบิล  $C_c$  ทั้งนี้ได้พิจารณาจากการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของสายเคเบิลออกสู่อากาศรอบ ๆ เมื่อจำนวนสายเคเบิลมากขึ้น อากาศบริเวณติดตั้งสายเคเบิลย่อมจะมีอุณหภูมิสูงกว่า การติดตั้งสายเคเบิลเพียงเส้นเดียวและเป็นผลให้การระบายความร้อนของสายเคเบิลแต่ละเส้นยาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอีกด้วย ตารางที่ 4.3 ได้ให้ค่าตัวประกอบจำนวนสายเคเบิลสำหรับสายหลายแกนและตารางที่ 4.4 ได้ให้ค่าตัวประกอบจำนวนสายเคเบิลสำหรับสายแกนเดี่ยวติดตั้งบนรางเคเบิลและวางบนไดโน ลักษณะเรียงสายเคเบิลเป็นแบบลำดับราบ Flat formation หรือวางเป็นรูปสามเหลี่ยม 1 วงจร (3 เส้น) Trefoil หรือมากกว่า

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวประกอบจำนวนสายเคเบิล C<sub>g</sub> สำหรับหลายแกนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 1 วงจรหรือมากกว่า

Installation method in Table 52-B2		Number of cables							
		Number of trays	1	2	3	4	5	6	
Unperforated trays (Note 3)	H	 <p>Touching</p>	1	0.95	0.85	0.80	0.75	0.70	0.70
			2	0.95	0.85	0.75	0.75	0.70	0.65
			3	0.95	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60
		 <p>Spaced</p>	1	1.00	0.95	0.95	0.95	0.90	-
			2	0.95	0.95	0.90	0.90	0.85	-
			3	0.95	0.95	0.90	0.90	0.85	-
Perforated Trays (Note 3)	J	 <p>Touching</p>	1	1.00	0.90	0.80	0.80	0.75	0.75
			2	1.00	0.85	0.80	0.75	0.75	0.70
			3	1.00	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
		 <p>Spaced</p>	1	1.00	1.00	1.00	0.95	0.90	-
			2	1.00	1.00	0.95	0.90	0.85	-
			3	1.00	1.00	0.95	0.90	0.85	-
Vertical Perforated Trays (Note 4)	K	 <p>Touching</p>	1	1.00	0.90	0.80	0.75	0.75	0.70
			2	1.00	0.90	0.80	0.75	0.70	0.70
		 <p>Spaced</p>	1	1.00	0.90	0.90	0.90	0.85	-
			2	1.00	0.90	0.90	0.85	0.85	-
Ladder supports, cleats, etc. (Note 3)	L	 <p>Touching</p>	1	1.00	0.85	0.80	0.80	0.80	0.80
			2	1.00	0.85	0.80	0.80	0.75	0.75
			3	1.00	0.85	0.80	0.75	0.75	0.70
		 <p>Spaced</p>	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
			2	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	-
			3	1.00	1.00	0.95	0.95	0.95	-

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าตัวประกอบจำนวนสายเคเบิล  $C_c$  สำหรับสายแกนเดี่ยวในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

Installation method in Table 52-B2			Number of three-phase circuits (Note 5)				Use as a multiplier to rating for
			Number of trays	1	2	3	
Unperforated trays (Note 3)	M		1	0.95	0.90	0.85	Three cables in horizontal formation
			2	0.92	0.85	0.80	
			3	0.90	0.80	0.75	
Perforated trays (Note 3)	N		1	0.95	0.90	0.85	
			2	0.95	0.85	0.80	
			3	0.90	0.85	0.80	
Vertical Perforated trays (Note 4)	P		1	0.95	0.85	-	Three cables in vertical formation
			2	0.90	0.85	-	
Ladder supports, cleats, Etc. (Note 3)	Q		1	1.00	0.95	0.95	Three cables in horizontal formation
			2	0.95	0.90	0.90	
			3	0.95	0.90	0.85	
Unperforated trays (Note 3)	M		1	1.00	0.95	0.95	Three cables in trefoil formation
			2	0.95	0.90	0.85	
			3	0.95	0.90	0.85	
Perforated trays (Note 3)	N		1	1.00	1.00	0.95	
			2	0.95	0.95	0.90	
			3	0.95	0.90	0.85	
Vertical perforated trays (Note 4)	P		1	1.00	0.90	0.90	
			2	1.00	0.90	0.85	
Ladder supports, cleats, etc. (Note 3)	Q		1	1.00	1.00	1.00	
			2	0.95	0.95	0.95	
			3	0.90	0.90	0.90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 แรงดันตก (Voltage Drop)

แรงดันตกคือความแตกต่างระหว่างขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จุดแหล่งจ่ายต้นทางและจุดรับไฟฟ้าปลายทาง แรงดันตกเกิดจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายเคเบิลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของตัวสายเคเบิลเอง

แรงดันตกเป็นปัญหาสำคัญมากอีกปัญหาหนึ่งที่จะต้องพิจารณาเมื่อใช้สายไฟฟ้าที่มีความยาวมาก ๆ ผลของแรงดันตกมีมากมายเช่น ความสว่างของหลอดไฟฟ้าจะแปรตามแรงดันยกกำลังสอง ถ้ามีแรงดันตก 1 เปอร์เซ็นต์ ก็จะส่งผลให้ความสว่างของหลอดไฟลดลง 2 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีแรงดันตกถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ความสว่างของหลอดไฟจะลดลงถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) การที่แรงดันตกจะทำให้การสตาร์ทยาก บัลลาสต์ร้อนเกินไปเป็นต้น การที่เกิดปัญหาต่าง ๆ จากแรงดันตก จึงต้องมีข้อกำหนดเกี่ยวกับแรงดันตกที่ยอมรับได้สำหรับงานประเภทต่าง ๆ ขนาดแรงดันตกควรจะมีค่าดังนี้

- แรงดันตกจากสายหลัก (Service) ไปยังโหลด (Load) มีค่าไม่เกิน 5%
- แรงดันตกในสายป้อน (Feeder) มีค่าไม่เกิน 2 %
- แรงดันตกในวงจรย่อย (Branch Circuit) มีค่าไม่เกิน 3%

การคำนวณหาแรงดันตกสามารถทำได้โดยพิจารณาวงจรสมมูล 1 เฟสและเฟสเซอร์โอะแกรมในรูปที่ 4.3

จากรูปเมื่อคำนวณแรงดันตกที่ความยาวสายเคเบิล 1 เมตร จะได้

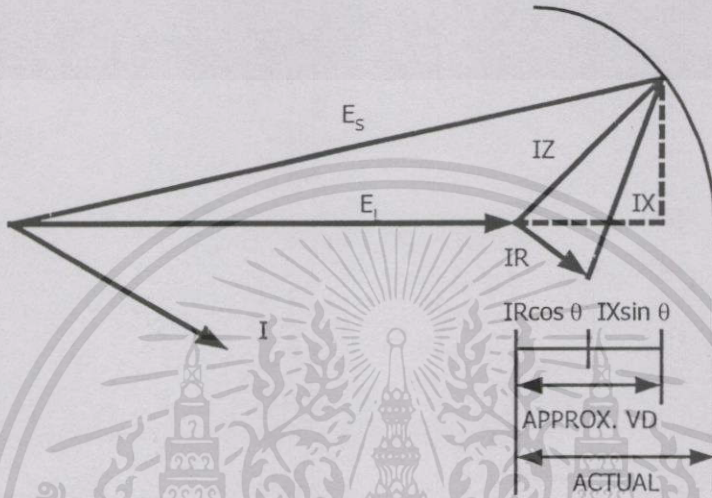
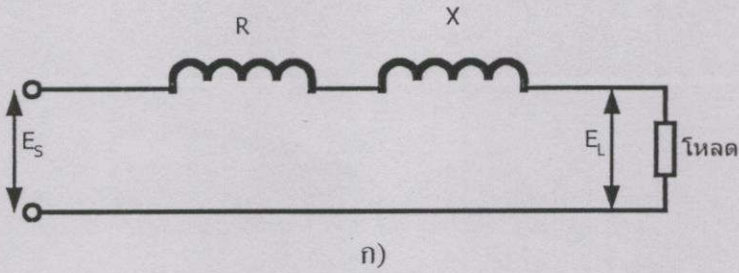
$$VD \approx I(R \cos\theta + X \sin\theta) \quad [V/m] \quad (4.24)$$

เมื่อ	VD	คือแรงดันตก (Volt)
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (A)
	R	คือความต้านทานทางเดียวของสายไฟฟ้า ( $\Omega$ )
	X	คือรีแอกแตนซ์ทางเดียวของสายไฟฟ้า ( $\Omega$ )
	Cos $\theta$	คือตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลด (pF)

ถ้าสายเคเบิลยาว L เมตรจะได้แรงดันตก

สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย

$$VD \approx 2IL(R \cos\theta + X \sin\theta) \quad [V]$$



รูปที่ 4.3 ก) แสดงวงจรสมมูล ข) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

$$VD \approx \sqrt{3} IL(R \cos \theta + X \sin \theta) \text{ [V]}$$

จากสมการที่ 4.24 จะเห็นว่าค่าแรงดันตกขึ้นอยู่กับ

- ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลประกอบด้วยค่า R และค่า X
- ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหรือ PF ของโหลด
- ความยาวของสายเคเบิล

#### 4.5.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล

ค่า R ของสายเคเบิลสามารถหาได้จากมาตรฐานสายไฟฟ้า ซึ่งได้ค่าที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งคำนวณตามสมการที่ 4.25 สำหรับการคำนวณค่าแรงดันตกจะต้องปรับ R ไปที่อุณหภูมิใช้งานซึ่งมีค่า t °C โดยอุณหภูมิ t คำนวณได้ตามสมการที่ 4.26 ส่วนสมการที่ 4.27 เป็นการคำนวณค่า R ที่อุณหภูมิ t °C

$$R_{20} = \frac{\rho}{S} \quad (4.25)$$

เมื่อ  $\rho = \frac{1}{54} [\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$  สำหรับตัวนำทองแดง  
 $= \frac{1}{34} [\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$  สำหรับตัวนำอลูมิเนียม  
 $S =$  ขนาดพื้นที่หน้าของสายเคเบิล

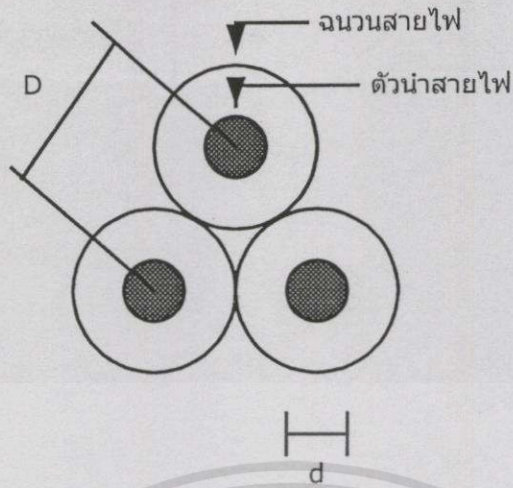
$$t = t_a + \Delta t \left( \frac{I_L}{I_Z} \right)^2 \quad (4.26)$$

เมื่อ  $t$  เป็นอุณหภูมิรอบตัวนำขณะมีกระแสไฟฟ้าไหล  $[\text{°C}]$   
 $t_a$  เป็นอุณหภูมิอ้างอิงรอบข้าง  $[\text{°C}]$   
 $\Delta t$  เป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอ้างอิงที่  $t - t_a$   $[\text{°C}]$   
 $I_L$  เป็นกระแสโหลดที่ไหลผ่านสายเคเบิล  $[\text{A}]$   
 $I_Z$  เป็นความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล  $[\text{A}]$

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20)] \quad (4.27)$$

เมื่อ  $R_t$  เป็นค่า  $R$  ที่อุณหภูมิ  $t \text{ C}$   
 $R_{20}$  เป็นค่า  $R$  ที่อุณหภูมิ  $20 \text{ C}$   
 $\alpha_{20}$  เป็นสัมประสิทธิ์ด้านอุณหภูมิของตัวนำ  
 0.00393 สำหรับทองแดง  
 0.00403 สำหรับอลูมิเนียม  
 $t$  เป็นอุณหภูมิรอบตัวนำขณะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ค่า  $X$  ของสายเคเบิลขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำและระยะห่างระหว่างตัวนำ สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่สายไฟฟ้าวางที่มุมสามเหลี่ยมสมมาตร (Trefoil) ในอากาศดังรูปที่ 4.4 ส่วนสมการความเหนี่ยวนำและสมการของ  $X$  จะแสดงในสมการที่ 4.28 และสมการที่ 4.29



รูปที่ 4.4 การวางสายเคเบิลแบบสายเหลื่อมสมมาตร (Trefoil)

ค่าความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$L = 0.46 \log \left( \frac{2D}{d} \right) + K \quad [\text{mH/m}] \quad (4.28)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่ของสายตีเกลียว (Stranding)

= 0.075 สำหรับ 3 strand

= 0.064 สำหรับ 7 strand

= 0.056 สำหรับ 19 strand

= 0.053 สำหรับ 37 ถึง 61 strand

= 0.052 สำหรับ 91-127 strand

= 0.05 สำหรับสายตัวนำเดี่ยว Solid

สำหรับสาย 2 แกนหรือ 3 แกน ค่าความเหนี่ยวนำจากสูตรข้างต้นให้คูณด้วย 1.02

ดังนั้นจะได้

$$X = 2\pi fL \quad [\Omega/\text{m}] \quad (4.29)$$

#### 4.5.2 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากำลังของสายเคเบิล (PF)

ค่ากระแส  $I_L$  ของโหลดมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับโหลดชนิดนั้น ๆ โหลดบางชนิดที่ PF คงที่ เช่น หลอดฟลูออโรเรสเซนต์ แต่โหลดบางชนิดมีค่า PF เปลี่ยนไปตามการใช้งานเช่นมอเตอร์ ดังนั้น การกำหนดค่า PF สำหรับโหลดเพื่อคำนวณแรงดันตกจึงทำได้ยาก โดยทั่วไปผู้คำนวณจะต้อง กำหนดค่า PF ขึ้นเองและค่า PF ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ 80 % ตามหลัง (Lagging)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.3 ความยาวของสายเคเบิล (L)

ความยาวของสายเคเบิลมีผลต่อค่าแรงดันตกขีงค่า L มีค่ามากเท่าไร ก็จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณหาแรงดันตก ควรจะคำนึงถึงความยาวของสายเคเบิลด้วย

#### 4.6 พิกัดกระแสลัดวงจรของสายเคเบิล (Short Circuit Rating)

ในการออกแบบและเลือกใช้สายเคเบิลนั้นควรต้องคำนึงถึงพิกัดการทนต่อกระแสลัดวงจรของสายเคเบิลด้วย เนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังมีโอกาสเกิดการลัดวงจรเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ที่บางครั้งไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ แต่สามารถป้องกันได้โดยใช้อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรที่เรียกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งสามารถตัดการนำกระแสได้เมื่อเกิดวงจร แต่เนื่องจากการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ในการป้องกันสายเคเบิลนั้นจะต้องเลือกให้สามารถตัดการนำกระแสได้ภายในเวลาที่สายเคเบิลสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรนั้น ๆ ได้ ดังนั้นพิกัดกระแสลัดวงจรของสายเคเบิลจึงสามารถกำหนดได้โดยการตั้งเวลาในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยดังแสดงในสมการที่ 4.30

$$I_c \geq \sqrt{\frac{K^2 S^2}{t}} \quad [\text{KA}] \quad (4.30)$$

เมื่อ	$I_c$	เป็นพิกัดกระแสลัดวงจร
	$S$	เป็นขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายเคเบิล
	$t$	เป็นเวลาที่สามารถตัดการนำกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์
	$K$	เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวน

ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากทราบค่ากระแสลัดวงจรที่จุดใด ๆ ก็สามารถคำนวณหาเวลาในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้จากสมการ

$$t \leq \frac{K^2 S^2}{I_f^2} \quad (6.42)$$

เมื่อ  $I_f$  เป็นค่ากระแสลัดวงจรที่จุดใด ๆ

## 4.7 ชนิดของกระแสลัดวงจร

ชนิดของกระแสลัดวงจรที่เป็นไปได้มีดังนี้

### 4.7.1 Short-circuit Faults

- Three-phase fault clear to earth fault
- Three-phase-to-earth fault.
- Phase-to-phase fault
- Single-phase-to-earth fault
- Two-phase-to-earth-fault
- Phase-to-phase plus single-phase-to-earth fault

### 4.7.2 Open-Circuit Faults

- Single-phase open circuit fault
- Two phase open circuit
- Three phase open circuit

### 4.7.3 Winding Faults

- Winding-to-earth short-circuit
- Winding-to-winding short circuit
- Open-circuited winding

### 4.7.4 Simultaneous Faults

เป็นการเกิด Faults ที่มากกว่า 2 Faults ในเวลาเดียวกัน ซึ่ง Faults ที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็น Fault ชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกันหรืออาจเกิดขึ้นในที่เดียวกันหรือเกิดขึ้นต่างที่กันก็ได้

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหลักเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาเลือกใช้สายเคเบิลประกอบด้วย

- เลือกสายเคเบิลที่มีความสามารถในการรับกระแสของโหลดเพียงพอสารทนต่ออุณหภูมิขณะมีกระแสไหลได้โดยที่สายเคเบิลไม่เกิดความเสียหาย
- มีแรงดันตกในสายอยู่ในขอบเขตที่กำหนด
- พิจารณาพิสัยการทนต่อกระแสลัดวงจรของสายเคเบิลในเวลาที่กำหนด

## การคำนวณสายเคเบิลแบบ Neher-McGrath

### 5.1 บทนำ

กล่าวถึงการใช้ Neher-McGrath (NM) คำนวณหาค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิล (ไม่มี shield 2000 V) โดยอธิบายในรูปวงจรมูลฐานทางความร้อน พร้อมมีตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นด้วย

ในปี 1975 Neher และ McGrath ได้นำเสนอผลงานออกสู่สาธารณชนโดยกล่าวถึงการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ กับอุณหภูมิขณะทำงาน ซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรูปแบบตัวนำและเงื่อนไขการติดตั้งแบบต่างๆ ได้ด้วย

เพื่อให้ง่ายขึ้นต่อการคำนวณค่าต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึง เฉพาะในสภาวะคงตัว (steady-state) เท่านั้น

วิธีการคำนวณแบบ Neher-McGrath ได้รับการยอมรับจากหลายๆ สถาบันเพื่อใช้เป็นพื้นฐาน ในการคำนวณหากระแสในสายเคเบิล เช่น NEC, ICEA เป็นต้น

### 5.2 การวิเคราะห์เบื้องต้น

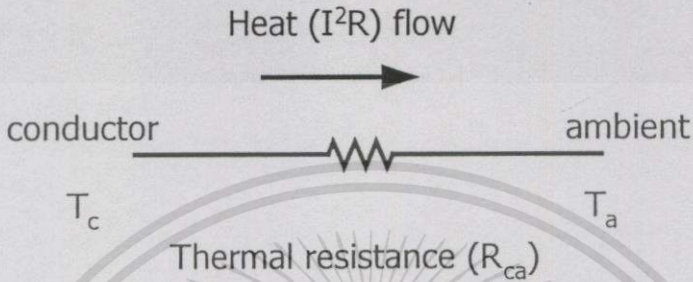
เมื่อกระแสถูกผ่านเข้าไปในตัวนำ จะทำให้เกิดความร้อน ( $I^2R$ ) ขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะแผ่กระจายออกไปยังอากาศรอบ ๆ ตัวนำหรือผ่านไปสู่ดินในกรณีที่ตัวนำเป็นแบบฝัง เนื่องจากระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถูกจำกัดโดยพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ของฉนวนเคเบิล ดังนั้นพิกัดอุณหภูมิของฉนวนจึงเป็นขีดจำกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิล ความร้อน  $I^2R$  ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลนำมาเขียนเป็นวงจรมูลฐานความต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 5.1 และจากรูปที่ 5.1 แปลงให้อยู่ในรูปวงจไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.2 สัญลักษณ์และหน่วยของตัวแปรในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 แสดงดังตารางที่ 5.1

#### ข้อสังเกต

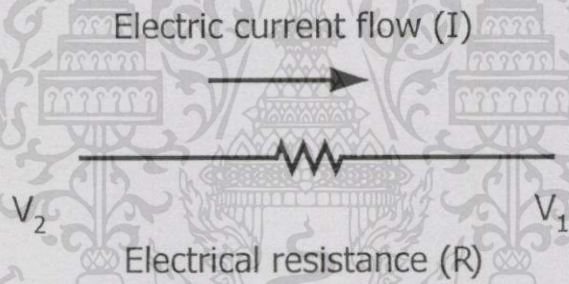
ในตารางที่ 5.2 แสดงความหมายของสัญลักษณ์ที่มีตัวห้อยต่างๆ ซึ่งตัวห้อยเหล่านี้จะมีความหมายสอดคล้องตามตำแหน่งนั้นๆ ของวงจรมูลฐานทางความร้อน

### 5.3 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน

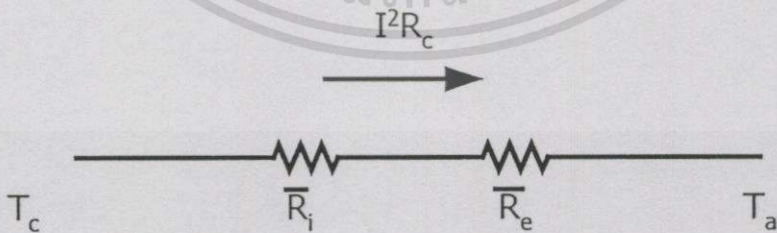
การคำนวณตามวิธี Neher-McGrath จะนึ่งเขียนวงจรสมมูลย์ทางความร้อนตามรูปแบบและการติดตั้งของสายเคเบิลนั้นๆ ตัวอย่าง เช่น เคเบิลแบบ 1 แกน เดินในอากาศมีวงจรสมมูลย์ทางความร้อนดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลย์ทางความร้อน



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลย์ทางความร้อนสำหรับตัวนำเดี่ยวเดินลอยในอากาศ

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้ากับวงจรสมมูลย์ทางความร้อน

Electrical Circuit			Thermal Circuit		
สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย	สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย
V	Voltage	V	T	Temperature	°C
I	Current	A	I2R	Heatflow	W/ft
R	Resistance	$\Omega$	$\bar{R}$	Thermal resistance	°C.ft/W

ตารางที่ 5.2 ความหมายของตัวแปรในวงจรสมมูลย์ทางความร้อน

สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย
$T_c$	Conductor temperature	°C
$T_a$	Ambient temperature	in
$R_c$	Conductor resistance thermal resistance	$\mu\Omega/\text{ft}$
$\bar{R}_i$	Insulation	°C.ft/W
$\bar{R}_j$	Jacket	
$\bar{R}_{sd}$	Between cable and surrounding enclosure	
$\bar{R}_d$	Duct wall	
$\bar{R}_e$	Between cable and ambient air	
$\bar{R}_{ca}$	Total between conductor and ambient	
$\bar{R}'_c$	Earth	

การหาวงจรสมมูลย์ทางความร้อนของสายเคเบิล มีขั้นตอนดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 หาค่าความต้านทานความร้อนในแต่ละส่วน

ขั้นที่ 2 นำค่าความต้านทานความร้อนส่วนต่างๆ ระหว่างตัวนำและอากาศรอบข้างรวมเข้า

ด้วยกัน

ขั้นสุดท้าย นำค่าความต้านทานที่ได้ในขั้นที่ 2 มาต่ออนุกรมกัน ส่วนสมการของ Neher-McGrath เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนแสดงไว้ในหัวข้อ 4.4 ซึ่งมีทั้งตัวนำแบบแกนเดี่ยวและ 3 แกน ทั้งแบบเดินลอยในอากาศ ร้อยท่อเดินในอากาศ เดินในท่อฝังดิน และฝังดินโดยตรง

ความร้อน

ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในสายตัวนำเนื่องจากกระแสไหลผ่านมีค่า  $= I^2 R_{\infty}$  ( $R_{\infty}$  คือความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ) ในที่นี้ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแสดงในหน่วยของ W/ft

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางระบบ ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำเป็นผลรวมจากฉนวนของเคเบิล metallic shield และ raceway อย่างไรก็ตามสำหรับระบบ 2000V. ค่า dielectric loss มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่ได้คิดผลจาก metallic shield และ raceway ส่วนค่า mutual heating จากสายเคเบิล ที่วางอยู่ใกล้กันจะนำมาคิดด้วยในสมการ เพื่อหาความต้านทานความร้อน

#### 5.4 สมการคำนวณหาค่ากระแส

ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำ (W/ft) คูณด้วย ความต้านทานความร้อนจากตัวนำถึงอากาศรอบข้าง ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{ft}/\text{W}$ ) แสดงถึงระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำจากอุณหภูมิรอบข้างนั่นคือ

$$(I^2 R_{ac}) \bar{R}_{ca} = T_c - T_a \quad (5.1)$$

หรือ

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times \bar{R}_{ca}}} \quad (5.2)$$

(I มีหน่วยเป็น kA เพราะ  $R_{ac}$  มีหน่วยเป็น  $\mu\Omega/\text{ft}$ )

สมการที่ (5.2) แสดงถึงกระแสของตัวนำซึ่งสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิเมื่อมีรูปแบบการใช้งานแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นค่ากระแสที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ฉนวนของสายเคเบิลนั้นๆ จะยอมรับได้

#### 5.5 สมการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

##### 5.5.1 ความต้านทานความร้อนของฉนวน

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log(DI / DC) \quad (5.3)$$

เมื่อ DC คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวนำ

DI คือเส้นผ่าศูนย์กลางรวมฉนวน

$\bar{\rho}_i$  คือความต้านทานความร้อนของวัสดุ ( $\bar{\rho}_i$  ของวัสดุต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.3)

##### 5.5.2 ความต้านทานความร้อนของ jacket

$$\bar{R}_j = 0.0104 \bar{\rho}_j n' \frac{t}{D-t} \quad (5.4)$$

เมื่อ  $\bar{\rho}_j$  = ความต้านทานความร้อนของวัสดุ ( $\bar{\rho}_j$  ของวัสดุต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- t = ความหนาของ jacket  
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางรวม jacket  
 n' = จำนวนตัวนำกระแสภายใน D  
 $\bar{R}_d$  = ความต้านทานความร้อนของผนังท่อ

### 5.5.3 ความต้านทานความร้อนของสายเคเบิล ใน Ducts

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A'}{Ds' + B'} \quad (5.5)$$

- เมื่อ n' = จำนวนตัวนำกระแสภายใน Ds  
 Ds' = effective diameter ของเคเบิลใน duct  
 A', B' = ค่าคงที่ ดังตารางที่ 5.4

### 5.5.4 ความต้านทานความร้อนของ cables, conduit หรือ duct เมื่อลอยอยู่ในอากาศ

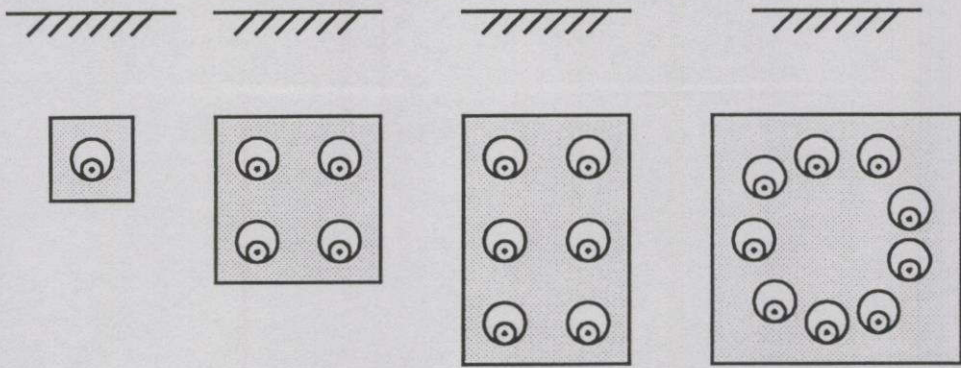
$$\bar{R}_e = \frac{9.5n'}{1 + 1.7Ds'(\varepsilon + 0.41)} \quad (5.6)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  = effective diameter of surface emissivity

### 5.5.5 ความต้านทานความร้อนของดิน

$$\bar{R}_e = 0.012 \bar{\rho}_e n' \left[ \log \frac{8.3}{De} + LF \log \frac{4L \times F}{8.3} \right] \quad (5.7)$$

- เมื่อ n' = จำนวนตัวนำกระแสภายใน De  
 $\bar{\rho}_e$  = ความต้านทานความร้อนของดิน  
 LF = loss factor  
 L = ความลึกของการฝังดิน  
 De = เส้นผ่าศูนย์กลางส่วนที่เริ่มในดินของวงจรสมมูลความร้อน  
 (diameter at start of the earth portion of the thermal circuit)  
 F = mutual heating factor (ดังตารางที่ 5.5)



รูปที่ 5.4 ลักษณะของ duct bank ขนาดต่างๆ

ตารางที่ 5.3 ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	$\bar{\rho}_i$ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{ft}/\text{W}$ )
Paper insulator (solid type)	700
Varnished insulator	600
Paper insulator (other type)	500
Rubber and rubber-like	500
Jute and textile protective covering	500
Fiber duct	480
Polyethylene	450
Transits duct	200
Somastic	100
Concrete	85

ตารางที่ 5.4 ค่าคงที่ A', B'

Condition	A'	B'
In metallic conduit	3.2	0.19
In fiber duct in air	5.6	0.33
In fiber duct in concrete	4.6	0.27
In metallic duct in air	4.4	0.26
In metallic duct in concrete	3.7	0.22
Gas-filled pipe cable at 200 lb/in <sup>2</sup>	2.1	0.68
Oil-filled pipe cable	2.1	0.45

ตารางที่ 5.5 ค่าตัวแปรต่างๆ ของ duct bank

Condition	Figure	n'	N	L	F
One three-conductor cable	1	3	1	35.8	1
Three three-conductor cables	2	3	3	35.8	102
Six three-conductor cables	3	3	6	43.3	$1.02 \times 10^5$
Nine three-conductor cables	4	3	9	57.7	$6.81 \times 10^6$
Three single-conductor cables	2	1	3	35.8	102
Six single-conductor cables	3	1	6	43.3	$1.02 \times 10^5$
Nine single-conductor cables	4	1	9	57.7	$6.81 \times 10^6$

## 5.6 ตัวอย่างการคำนวณ

### 5.6.1 กรณีเดินลอยในอากาศ

ให้คำนวณหากระแสของ I/O AWG compact aluminum XHMW อุณหภูมิรอบข้าง  $40^\circ\text{C}$

- เส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำ (DC) = 0.336 นิ้ว
- ความหนาของฉนวน (2t) = 0.120 นิ้ว
- ความต้านทานความร้อนของฉนวน =  $400^\circ\text{C ft/W}$
- effective diameter of surface emissivity ( $\bar{\rho}_i$ ) = 0.95
- $R_{dc}$  ของ cable ที่  $25^\circ\text{C}$  =  $168 \mu\Omega/\text{ft}$
- ac/dc = 1.00
- พิกัดอุณหภูมิของฉนวน =  $90^\circ\text{C}$

วิธีทำ :

$$DC = 0.336$$

$$DI = DC + 2t = 0.456$$

$$\bar{R}_i = 0.012\bar{\rho}_i \log(DI / DC) = 0.012(400) \log(0.456/0.336)$$

$$= 0.637$$

$$\bar{R}_e = \frac{9.5n'}{1 + 1.7Ds'(\epsilon + 0.41)} = \frac{9.5(1)}{1 + 1.7(0.456)(0.95 + 0.41)}$$

$$= 4.625$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_e = 0.637 + 4.625 = 5.262$$

$$\text{จาก } R_{dc} \text{ ที่ } 90^\circ\text{C} = 168 \times \frac{228.1 + 90}{228.1 + 25}$$

$$\text{จาก } R_{ac} \text{ ที่ } 90^\circ\text{C} = 168 \times \frac{228.1 + 90}{228.1 + 25} \times 1.0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่ขอทำขึ้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 211 \\
 I &= \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times \bar{R}_{ca}}} = \sqrt{\frac{90 - 40}{211 \times 5.262}} \\
 &= 212 \text{ A} \#
 \end{aligned}$$

### 5.6.2 กรณีเดินในท่ออลูมิเนียมเหนียวหนา

คำนวณหากระแสของ three I/O AWG compact aluminum XHMW cable ซึ่งร้อยในท่ออลูมิเนียมขนาด 1 1/4 นิ้ว (ID = 1.38 นิ้ว, OD = 1.66 นิ้ว) อุณหภูมิรอบข้าง 40 °C

$$\begin{aligned}
 \text{ข้อมูล DC} &= 0.336 \text{ นิ้ว} \\
 2t &= 0.120 \text{ นิ้ว} \\
 \bar{\rho}_l &= 400 \text{ }^\circ\text{C ft/W} \\
 R_{dc} \text{ ที่ } 25 \text{ }^\circ\text{C} &= 168 \text{ } \mu\Omega/\text{ft} \\
 ac/de &= 1.00 \\
 T_c &= 90 \text{ }^\circ\text{C} \\
 \epsilon &= 0.5 \\
 A' &= 3.2 \\
 B' &= 0.19
 \end{aligned}$$

วิธีทำ :

จากหัวข้อที่ 5.6.1

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_l &= 0.637 \\
 \bar{R}_{sd} &= \frac{n' A'}{Ds' + B'} \\
 \text{จาก } Ds' &= 216 DI = 216 \times 0.456/100 = 0.984
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_{sd} &= \frac{3(3.2)}{0.984 + 0.19} \\
 &= 8.177
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_e &= \frac{9.5n'}{1 + 1.7Ds'(\epsilon + 0.41)} = \frac{9.5(3)}{1 + 1.7(1.66)(0.5 + 0.41)} \\
 &= 7.987
 \end{aligned}$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_l + \bar{R}_e + \bar{R}_{sd} = 0.637 + 8.177 + 7.987 = 16.8$$

จากหัวข้อที่ 5.6.1

$$\begin{aligned}
 R_{sc} &= 211 \\
 I &= \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times \bar{R}_{ca}}} = \sqrt{\frac{90 - 40}{211 \times 16.8}} \\
 &= 119 \text{ A}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.3 กรณีแบบเดินฝังดิน

คำนวณหากระแสของ three I/O AWG concentric copper type USE cables. เดินแบบฝังดิน ลึก 36 นิ้ว มี loss factor เท่ากับ 0.75  $\bar{\rho}_e$  เท่ากับ 90 °C cm/W. อุณหภูมิรอบข้าง 20 °C

$$\begin{aligned} DC &= 0.373 \text{ นิ้ว} \\ 2t &= 0.160 \text{ นิ้ว} \\ \bar{\rho}_i &= 400 \text{ °C ft/W} \\ R_{dc} \text{ ที่ } 25 \text{ °C} &= 106 \text{ } \mu\Omega/\text{ft} \\ L &= 36 \text{ นิ้ว} \\ F &= 1 \\ T_c &= 90 \text{ °C} \end{aligned}$$

วิธีทำ

$$DI = DC + 2t = 0.373 + 0.160 = 0.533$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_i &= 0.012 \bar{\rho}_i \log(DI / DC) = 0.012(400) \log(0.533/0.373) \\ &= 0.744 \end{aligned}$$

$$\bar{R}_e = 0.012 \bar{\rho}_e \left[ \log \frac{8.3}{De} + LF \log \frac{4L \times F}{8.3} \right]$$

จาก

$$De = 1.6 DI$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_e &= 0.012(90)(3) \left[ \log \frac{8.3}{1.6(0.533)} + 0.75 \log \frac{4(36) \times 1}{8.3} \right] \\ &= 6.213 \end{aligned}$$

$$\bar{R}_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_e = 0.744 + 6.213 = 6.957$$

จาก  $R_{dc}$  ที่ 90 °C

$$= 106 \times \frac{234.5 + 90}{234.5 + 25}$$

จาก  $R_{ac}$  ที่ 90 °C

$$= 106 \times \frac{234.5 + 90}{234.5 + 25} \times 1.0$$

$$= 132.55$$

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{ac} \times \bar{R}_{ca}}} = \sqrt{\frac{90 - 40}{132.55 \times 6.957}}$$

$$= 276 \text{ A } \#$$

## บทที่ 6

### การคำนวณหากระแสในสายเคเบิล

ในการคำนวณหาค่ากระแสที่ภาวะของอุณหภูมิเปลี่ยนไปนั้นจะต้องคำนวณทั้งสภาวะเสถียร และในตอนที่ไม่เสถียรที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน โดยจะอาศัยกฎของโอห์มและกฎของเคอร์ชอฟฟ์ในการเขียนเป็นวงจรทางความร้อนขึ้นมาเมื่อมีความร้อนก็จะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและจะทำให้เกิด dielectric loss ขึ้นมาซึ่งเป็นผลมาจากกระแสนั่นเอง พร้อมทั้งต้องคำนึงถึงการสูญเสียที่มาจาก sheath และ conduit ส่วนในกรณีที่เป็นระบบสายเคเบิลใต้ดิน จะต้องพิจารณาถึงความต้านทานทางความร้อนของดิน และยังคงคำนึงถึงผลของความร้อนที่มาจากสายเคเบิลอื่นๆ ที่อยู่ในระบบเดียวกันหรือระบบข้างเคียงด้วย

#### 6.1 ความหมายของสัญลักษณ์ (Nomenclature)

ก่อนอื่นจะกล่าวถึงสัญลักษณ์ที่ใช้เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยสัญลักษณ์บางตัวจะมีใช้เฉพาะในโครงการนี้เท่านั้น สัญลักษณ์ดังกล่าวมีดังนี้

- (AF) หมายถึง attainment factor, per unit (pu)
- As หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของ shielding tape หรือ skid wire, square inches
- $\alpha$  หมายถึง ค่าของความร้อนที่แผ่ออกมา, square inches per hour
- CI หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, circular inches
- D หมายถึง ระยะห่าง, inches
- $d_{12}$  หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 2
- $d_{12'}$  หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงส่วน image ของตัวที่ 2
- $d_{ii}$  หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงจุดที่มีสิ่งรบกวน
- $d_{ii'}$  หมายถึง จากจุดศูนย์กลางสายเคเบิลตัวที่ 1 ถึงส่วน image ของสิ่งรบกวน
- D หมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลาง, inches
- $D_o$  หมายถึง ภายในของตัวนำ
- $D_c$  หมายถึง ภายนอกของตัวนำ
- $D_i$  หมายถึง ภายนอกของ insulation
- $D_r$  หมายถึง ภายนอกของ sheath
- $D_{sm}$  หมายถึง ภายนอกเฉลี่ยของ sheath
- D หมายถึง ภายนอกของ jacket

$D_s$	หมายถึง เฉลี่ยของสายเคเบิลที่วางใกล้กันเป็นรูปสามเหลี่ยม
$D_p$	หมายถึง ภายในของ duct wall, pipe หรือ conduit
$D_e$	หมายถึง เริ่มจาก earth portion ของวงจรทางความร้อน
E	หมายถึง แรงดัน line to neutral, kilovolt (kV)
$\epsilon$	หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการแผ่กระจายตามผิว
$\epsilon_r$	หมายถึง ตามแต่ชนิดของ ความเหนียวน้ำ หรือ ความจุ ของ insulation
f	หมายถึง ความถี่, circle per second
$F, F_{int}$	หมายถึง ผลคูณอัตราส่วนของ ระยะห่าง
$F(x)$	หมายถึง ค่าที่ได้จากฟังก์ชัน Bessel ของ x (ตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.1)
G	หมายถึง geometric factor
$G_1$	หมายถึง ได้จากความต้านทานของ insulation
$G_2$	หมายถึง ได้จาก dielectric loss
$G_b$	หมายถึง ได้จาก duct bank (รูปที่ 6.2)
I	หมายถึง ค่ากระแสของตัวนำ, kiloamperes
$k_s$	หมายถึง แฟคเตอร์ความถูกต้องของ skin effect
$k_p$	หมายถึง แฟคเตอร์ความสัมพันธของการส่งผ่านความร้อน
I	หมายถึง ความหนาของ shielding หรือ skid wire, inches
L	หมายถึง ความลึกของการฝังสายเคเบิลนับจากพื้นดิน, inches
$L_b$	หมายถึง ความลึกจากพื้นดินถึงจุดศูนย์กลางของ duct bank, inches
(lf)	หมายถึง load factor, per unit
(LF)	หมายถึง load factor, per unit
n	หมายถึง จำนวนตัวนำต่อหนึ่งชุดสายเคเบิล
$n'$	หมายถึง จำนวนตัวนำภายในหนึ่งสายเคเบิล
N	หมายถึง จำนวนของกลุ่มสายเคเบิลในระบบ
P	หมายถึง ความยาวโดยรอบของ duct bank, inches
$\cos\phi$	หมายถึง เพาเวอร์แฟคเตอร์ของ insulation
$q_s$	หมายถึง อัตราส่วนผลรวมของความสูญเสียใน conductor และ sheath ต่อความสูญเสียใน conductor
$q_e$	หมายถึง อัตราส่วนผลรวมของความสูญเสียใน conductor, sheath และ conduit ต่อความสูญเสียใน conductor
R	หมายถึง ความต้านทานทางไฟฟ้า, ohms
$R_d$	หมายถึง ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{ac}$	หมายถึง ความต้านทานกระแสลัดรวมต่อตัวนำ
$R_s$	หมายถึง ความต้านทานกระแสตรงของ sheath หรือใน shield-skid wire
$\bar{R}$	หมายถึง ความต้านทานทางอุณหภูมิ (ต่อความสูญเสียของตัวนำ). Thermal ohm-feet
$\bar{R}_i$	หมายถึง ของ insulation
$\bar{R}_j$	หมายถึง ของ jacket
$\bar{R}_{sd}$	หมายถึง ระหว่างผิวของสายเคเบิลกับบริเวณรอบข้าง
$\bar{R}_d$	หมายถึง ของ duct wall หรือวัสดุที่ใช้หุ้มสายเคเบิล
$\bar{R}_{se}$	หมายถึง ระหว่าง sheath กับเส้นผ่าศูนย์กลาง De
$\bar{R}_e$	หมายถึง ระหว่าง conduit กับ ambient
$\bar{R}_{e'}$	หมายถึง ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลาง De กับ ambient earth
$\bar{R}_{ca'}$	หมายถึง ระหว่าง conductor กับ ambient สำหรับ conductor loss
$\bar{R}_{ct'}$	หมายถึง ช่วง transient ของระบบสายเคเบิล
$\bar{R}_{da'}$	หมายถึง ระหว่าง conductor กับ ambient สำหรับ dielectric loss
$\bar{R}_{int}$	หมายถึง ได้จากผลของ interference
$\bar{R}_{ya}$	หมายถึง ระหว่าง steam pipe กับ ambient earth
$\rho$	หมายถึง ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า, circular mil ohms per foot
$\bar{\rho}$	หมายถึง ความต้านทานจำเพาะทางความร้อน, degrees celsius centimeter per watt
s	หมายถึง ระยะในสายเคเบิลที่มี 3-conductor ระหว่างกระแสที่จุด center ของตัวนำ และแกนของสายเคเบิล, inches
S	หมายถึง ระยะห่างของสายเคเบิลที่อยู่ติดกันนับจากแกนของสายเคเบิล, inches
t,T	หมายถึง ความหนา, inches
T	หมายถึง อุณหภูมิ, degrees celsius
$T_u$	หมายถึง อุณหภูมิรอบข้างเป็น air หรือ earth
$T_c$	หมายถึง อุณหภูมิของตัวนำ
$T_m$	หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของ medium
$\Delta T$	หมายถึง ผลต่างของอุณหภูมิ, degrees celsius
$\Delta T_c$	หมายถึง ของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากกระแสทำให้เกิดความสูญเสีย
$\Delta T_d$	หมายถึง ของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจาก dielectric loss
$\Delta T_{int}$	หมายถึง ของสายเคเบิลที่เพิ่มขึ้นจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอก
$\tau$	หมายถึง อุณหภูมิที่ความต้านทานศูนย์, degress celsius

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หมายถึง ความเร็วลม, miles per hour เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W$	หมายถึง ความสูญเสียในสายเคเบิล , watt per conductor foot
$W_c$	หมายถึง ความสูญเสียในตัวนำ
$W_s$	หมายถึง ความสูญเสียใน sheath หรือ shield
$W_p$	หมายถึง ความสูญเสียใน pipe หรือ conduit
$W_d$	หมายถึง ความสูญเสียใน dielectric
$X_m$	หมายถึง mutual reactance ของ conductor ถึง sheath หรือ shield, microohms per foot
$Y$	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของ ac/dc ratio, pu
$Y_c$	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน conductor
$Y_s$	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน sheath หรือ shield
$Y_p$	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน pipe หรือ conduit
$Y_a$	หมายถึง ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน armor

## 6.2 การพิจารณาวงจรทางความร้อน

### 6.2.1 การคำนวณหาผลต่างของอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากตัวนำถึงบริเวณรอบๆ ของตัวนำจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น สามารถแยกออกเป็นสองส่วนดังนี้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกระแส ( $I^2R$ ) ใน conductor sheath หรือ conduit คือ  $\Delta T_c$  และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก dielectric loss คือ  $\Delta T_d$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$T_c - T_a = \Delta T_c + \Delta T_d \text{ (degrees celsius)} \quad (6.1)$$

โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่ละส่วนเกิดจากความร้อน heat flow ไหลผ่านความต้านทานทางความร้อน และเมื่อเกิดความสูญเสียขึ้นในระบบสายเคเบิลหลายๆจุดจะทำให้ heat flow ในวงจรทางความร้อน เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น

$$\Delta T_c = W_c(\bar{R}_l + q_s \bar{R}_{se} + q_c \bar{R}_e) \text{ (degrees celsius)} \quad (6.2)$$

ในการจ่ายกระแสให้โหลดนั้น โดยทั่วไปโหลดจะมีแบบคงที่และแบบไม่คงที่ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงค่าของ load factor (lf) ด้วย และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะทำให้ loss factor (LF) เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งทั้ง load factor และ loss factor จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันดังนี้

$$(LF) = 0.3(lf) + 0.7(lf)^2 \quad (\text{per unit}) \quad (6.3)$$

เมื่อพิจารณาระบบสายเคเบิลใต้ดินจะได้ว่า ในการหาค่าสูงสุดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปนั้น หาได้จากระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดบ่อยๆ และเป็นวัฏจักรเหมือนเดิม ส่วนความสูญเสีย และ heat flow หาได้จากช่วงที่มีโหลดสูงสุด โดยจะให้ loss factor เป็น base และ heat flow ก็ จะลดลงด้วยค่า loss factor ดังนั้นจากสมการที่ 6.2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta T_c = W_c [\bar{R}_l + q_s \bar{R}_{se} + q_c (\bar{R}_{ex} + (LF) \bar{R}_{xa})] \text{ (degrees celsius)} \quad (6.4)$$

ส่วนผลต่างของอุณหภูมิจาก conductor ถึง  $D_x$  ที่ขึ้นอยู่กับ heat loss ได้มาจากช่วงที่โหลด สูงสุด และผลต่างของอุณหภูมิจาก  $D_x$  ถึง ambient ก็ขึ้นอยู่กับ average loss ที่คิดในช่วง 24 ชั่วโมง สำหรับสายเคเบิลหรือท่อในอากาศจะมีความร้อนสะสมในระบบนั้นน้อย และผลต่างของ อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดที่โหลดสูงสุดเช่นกัน

เมื่อจำนวนของสายเคเบิลที่ติดตั้งด้วยกันใต้พื้นดินหรือใน duct bank ความร้อนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายเคเบิลแต่ละตัวนั่นเอง ในการคำนวณหาผลต่างของอุณหภูมิที่สายเคเบิลแต่ละสาย นั้น หาได้จากสมการที่ 6.4 โดยจะต้องสมมติให้กระแสไหลในสายเคเบิลแต่ละสายเท่าๆ กันและ ง่ายโหลดที่มีวัฏจักรเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อมีจำนวนของสายเคเบิลในระบบอยู่  $N$  ตัวจะได้ว่า

$$\Delta T_c = W_c [\bar{R}_l + q_s \bar{R}_{se} + q_c (\bar{R}_{ex} + (LF) \bar{R}_{xa} + (N-1) \bar{R}_{pa})] \text{ (degrees celsius)} \quad (6.5)$$

$$\Delta T_c = W_c [\bar{R}_l + q_s \bar{R}_{se} + q_c \bar{R}_e] \text{ (degrees celsius)} \quad (6.5A)$$

เมื่อสมการที่ 6.5 เขียนอยู่ในเทอมของความต้านทานทางความร้อน  $Re'$

ส่วนผลต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจาก dielectric loss นั้นในระบบแรงดันต่ำไม่ค่อยมีผล มากนัก แต่ในระบบแรงสูงมีผลมาก ซึ่งจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยจะ ต้องคำนวณทั้งในช่วง transient และ steady state ค่าของ dielectric loss เกิดขึ้นที่ช่วงกลางของความ ต้านทานทางความร้อนระหว่าง conductor กับ sheath ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก dielectric loss  $\Delta T_d$  หาได้จาก

$$\Delta T_c = W_d \bar{R}_{da}' \text{ (degrees celsius)} \quad (6.6)$$

โดยที่ค่าความต้านทานทางความร้อน  $\bar{R}_{dc}$ , จะขึ้นอยู่กับค่าของ  $\bar{R}_j$ ,  $\bar{R}_{se}$  และ  $\bar{R}_e$ , ตามแต่กรณี ดังสมการที่ผ่านมา

### 6.2.2 การคำนวณหาขนาดกระแสของสายเคเบิล

ในการคำนวณหาขนาดกระแสจะต้องคิดผลของความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำเข้า ด้วย ซึ่งจะอยู่ในหน่วย micro-ohms per foot ดังนั้นในสมการที่ 6.5A นำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta T_c = I R_{dc} (1 + Y_c) \bar{R}_{ca'} \quad (\text{degrees celsius}) \quad (6.7)$$

ซึ่งในส่วนของ  $R_{dc}(1 + Y_c)$  เป็นค่าของความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำ และ  $\bar{R}_{ca'}$  เป็นความต้านทานทางความร้อนรวมของวงจรทางความร้อนดังนี้

$$\bar{R}_{ca'} = \bar{R}_j + q_s \bar{R}_{se} + q_e \bar{R}_e \quad (\text{thermal ohm-feet}) \quad (6.8)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 6.1 จะได้ว่า

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc} (1 + Y_c) \bar{R}_{ca'}}} \quad (\text{kiloamperes}) \quad (6.9)$$

## 6.3 การพิจารณาหาค่าความสูญเสียและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

### 6.3.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานกระแสตรง

การคำนวณหาค่าความต้านทานของตัวนำจะต้องรวม lay factor เพิ่มขึ้นอีก 2% จากตารางที่ 6.1 จะได้ว่า

ตารางที่ 6.1 ความต้านทานของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	Resistivity (ohm.cm at 20 °C)	Temperature coefficient per deg C at 20 °C
Copper	$1.7241 \times 10^{-6}$	$3.93 \times 10^{-3}$
Aluminium	$2.8264 \times 10^{-6}$	$4.03 \times 10^{-3}$
Lead or lead alloy	$21.4 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-3}$
Steel	$13.8 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-3}$
Bronze	$3.5 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-3}$
Stainless steel	$70 \times 10^{-6}$	Negligible

$$R_{dc} = \frac{1.02 \rho_e}{CI} \quad (\text{Micro-ohms per foot at } 20^\circ\text{C}) \quad (6.10)$$

หรือ

$$R_{dc} = \frac{12.9}{CI} \quad (\text{for 100\% IACS copper conductor at } 75^\circ\text{C}) \quad (6.10A)$$

หรือ

$$R_{dc} = \frac{21.2}{CI} \quad (\text{for 61\% IACS aluminum at } 75^\circ\text{C}) \quad (6.10B)$$

เมื่อ CI คือ ขนาดของตัวนำในหน่วย circular inches และ  $\rho_c$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า ในหน่วย circular mil ohms per foot โดยในการหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ จะต้องทำการเทียบจากค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  จาก  $(\tau + T)/(\tau + 20)$  ส่วนความต้านทานของ sheath หาได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\rho_c}{4D_{smt}} \quad (\text{micro-ohms per foot at } 20^\circ\text{C}) \quad (6.11)$$

หรือ

$$R_s = \frac{37.9}{D_{smt}} \quad (\text{for lead at } 50^\circ\text{C}) \quad (6.11A)$$

หรือ

$$R_s = \frac{4.75}{D_{smt}} \quad (\text{for 61\% aluminum at } 50^\circ\text{C}) \quad (6.11B)$$

และ

$$D_{sm} = D_s - t \quad (\text{inches}) \quad (6.12)$$

สำหรับตัวนำที่มี shield หรือ skid wire ด้วยสามารถหาค่าความต้านทานได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\pi \rho_s}{4A_s} \sqrt{1 + \left( \frac{\pi D_{sm}}{l} \right)^2} \quad (\text{per part, micro-ohms per foot at } 20^\circ\text{C}) \quad (6.13)$$

ค่าความต้านทานของ shield และ skid wire ด้วยสามารถหาจากการวัดทางไฟฟ้าได้เหมือนกัน

### 6.3.2 การคำนวณหาค่าความสูญเสียต่าง ๆ

ความสูญเสียใน conductor, sheath และ pipe หรือ conduit นิยมหาในสัดส่วนของ ac/dc ดัง

นี้

$$R_{ac} / R_{dc} = 1 + Y_c + Y_s + Y_p \quad (6.14)$$

โดยอัตราส่วน ac/dc ของ conductor คือ  $1 + Y_c$  เมื่อพิจารณาที่ sheath หรือ shield จะได้  $1 + Y_c + Y_s$  และเมื่อพิจารณาที่ pipe หรือ conduit จะได้  $1 + Y_c + Y_s + Y_p$  ซึ่งจะได้ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นใน conductor, sheath และ pipe ดังนี้

$$P_c = I^2 R_{dc} (1 + Y_c) \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (6.15)$$

$$P_s = I^2 R_{dc} Y_s \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (6.16)$$

$$P_p = I^2 R_{dc} Y_p \quad (\text{watt per conductor foot}) \quad (6.17)$$

เมื่อรู้ค่าของ  $Y_c$ ,  $Y_s$  และ  $Y_p$  ก็สามารถหาค่าความสูญเสียต่างๆ ได้ ซึ่งค่าความสูญเสียนี้อาจนำไปหาค่า  $q_s$  และ  $q_e$  ต่อไปโดย

$$q_s = \frac{W_c + W_s}{W_c} = 1 + \frac{Y_s}{1 + Y_c} \quad (6.18)$$

$$q_e = \frac{W_c + W_s + W_p}{W_c} = 1 + \frac{Y_s + Y_p}{1 + Y_c} \quad (6.19)$$

โดยที่ตัวแฟกเตอร์  $Y_c$  เป็นผลรวมของ  $Y_{cs}$  ที่เกิดจาก skin effect และ  $Y_{cp}$  ที่เกิดจาก proximity effect และค่าความสูญเสียของตัวนำสามารถหาได้จาก

$$c = I^2 R_{dc} (1 + Y_{cs} + Y_{cp}) \text{ (watt per conductor foot)} \quad (6.20)$$

ซึ่งจะเป็นการคิดผลของ skin effect เข้ามาด้วยโดยหาจาก skin effect function  $F(x)$  ดังนี้

$$Y_{cs} = F(x_s) \quad (6.21)$$

$$x_s = 0.875 \sqrt{\frac{fk_s}{R_{dc}}} = \frac{6.80}{\sqrt{R_{dc} / k_s}} \quad (6.22)$$

หาค่า  $k_s$  ได้จากการคำนวณดังนี้

$$k = \frac{D_c - D_o}{D_c + D_o} \left( \frac{D_c + 2D_o}{D_c + D_o} \right)^2 \quad (6.23)$$

ค่า  $Y_{cp}$  สามารถหาได้ดังนี้

$$Y_{cp} = F(x_p) \left( \frac{D_c}{S} \right)^2 \left[ \frac{1.18}{F(x_p) + 0.27} + 0.312 \left( \frac{D_c}{S} \right)^2 \right] \quad (6.24)$$

เมื่อเทอมที่สองมีค่าน้อยกว่าเทอมที่หนึ่งมากๆ จึงสามารถเขียนสมการที่ 6.24 ใหม่ได้ดังนี้

$$Y_{cp} = 4F(x_p) \left[ \frac{0.295(D_c / S)^2}{F(x_p) + 0.27} \right] = 4 \left( \frac{D_c}{S} \right)^2 F(x_p') \quad (6.24A)$$

และค่าของ  $x_p$  หาได้จาก

$$x_p = \frac{6.80}{\sqrt{R_{dc} / k_p}} \quad (6.25)$$

การติดตั้งตัวนำไว้กับรางรองสายมีลักษณะคล้ายกันกับการติดตั้งไว้ในท่อ การหาค่าต่างๆ ประมาณได้จากสมการที่ 6.24 และ 6.24A โดยที่แฟกเตอร์  $Y_s$  เป็นผลรวมของแฟกเตอร์สองตัว คือ

$Y_{sc}$  ที่ทำให้เกิดกระแส circulating และ  $Y_{se}$  ที่ทำให้เกิดกระแส eddy ส่วนค่าความสูญเสียที่ shield หรือ sheath หาได้จาก

$$s = I^2 R_{dc} (Y_{sc} + Y_{se}) \quad (6.26)$$

ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากยิ่งขึ้น เมื่อมีการติดตั้งสายเคเบิลสามเส้นไว้ในท่อเดียวกัน และเมื่อพิจารณาสายเคเบิลตัวนำเดี่ยวที่มี sheath สามชั้นจะได้ค่า  $Y_{sc}$  ดังนี้

$$Y_{sc} = \frac{R_s / R_{dc}}{1 + (R_s / X_m)^2} \quad (6.27)$$

เมื่อ  $(R_s / X_m)^2$  มีค่ามากๆ และเป็นกรณีของสายเคเบิลแบบ shielded nonleaded จะสามารถเขียนสมการที่ 6.27 ใหม่ได้ดังนี้

$$Y_{sc} = \frac{X_m}{R_s R_{dc}} \quad (6.27A)$$

และ  $X_m = 0.882 f \log(2S/D_{sm})$  (micro-ohm per foot) (6.28)

$$X_m = 52.9 \log(2S/D_{sm}) \quad (\text{micro-ohm per foot at 60 cycle}) \quad (6.28A)$$

สำหรับการติดตั้งแบบใช้รางรองสายค่า  $X_m$  หาได้จาก

$$X_m = 52.9 \log\left(\frac{2.52S}{D_{sm}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{S}{D_p - S}\right)^2} \quad (\text{micro-ohm per foot at 60 cycle}) \quad (6.29)$$

หรือ

$$X_m = 52.9 \log(2.3S/D_{sm}) \quad (\text{approximately}) \quad (6.29A)$$

ผลของกระแส eddy ในสายเคเบิลที่ติดตั้งจะได้ค่า  $Y_{se}$  ออกมาดังนี้

$$Y_{se} = \frac{3R_s / R_{dc}}{\left(\frac{5.2R_s}{f}\right)^2 + \frac{1}{5}\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)} \left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2 \left[1 + \frac{5}{12}\left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2\right] \quad (6.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อค่าของ  $(5.2R_s/f)^2$  มากกว่า  $(1/5)(2S/D_{sm})$  มาก ๆ จะสามารถเขียนใหม่ว่า

$$se = \frac{326}{R_s R_{ds}} \left( \frac{D_{sm}}{2S} \right)^2 \left[ 1 + \frac{5}{12} \left( \frac{D_{sm}}{2S} \right)^2 \right] \quad (\text{approximately at 60 cycle}) \quad (6.30A)$$

เมื่อเกิดการ short-circuit sheath จะทำให้ค่าความสูญเสีย eddy loss ที่ sheath นั้นลดลง และสมการที่ 6.30 หรือ 6.30A ต้องคูณด้วยอัตราส่วนดังนี้  $R_s^2 / (R_s^2 + X_m^2)$  ซึ่งในสมการที่ 6.30 และ 6.30A ใช้ในการคำนวณผลของกระแส eddy สำหรับสายเคเบิลแบบหนึ่งตัวนำที่ติดตั้งในท่อที่แยกกัน ในกรณีของสายแบบสามสายเคเบิลก็สามารถประมาณค่าความสูญเสียออกมาได้จากสมการที่ผ่านมา ส่วนผลของกระแส eddy สำหรับสายเคเบิลแบบสามตัวนำหาได้จาก

$$se = \frac{3R_s}{R_{dc}} \left[ \frac{\left( \frac{2s}{D_{sm}} \right)^2}{\left( \frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + 1} + \frac{\left( \frac{2s}{D_{sm}} \right)^4}{4 \left( \frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + 1} + \frac{\left( \frac{2s}{D_{sm}} \right)^8}{16 \left( \frac{5.2R_s}{f} \right)^2 + 1} + K \right] \quad (6.31)$$

เมื่อ  $(5.2R_s/f)^2$  เป็นส่วนที่ทำให้สมการมีค่ามากที่สุด ในเทอมที่หนึ่งและมีความมากกว่า 1 มาก ๆ ดังนั้นนำมาเขียนใหม่จะได้ว่า

$$se = \frac{3f^2}{5.2R_s R_{dc}} \left( \frac{2s}{D_{sm}} \right) \quad (\text{ประมาณค่า}) \quad (6.31A)$$

เมื่อ  $s = 1.155T + 0.60$  (Vgauge.depth) (for compact sectors)

$$s = 1.155T + 0.58D_c \quad (\text{for round conductors}) \quad (6.32)$$

เมื่อ T คือ ความหนาของ insulation ที่รวมความหนาของ shielding tapes ด้วย (ถ้ามี) โดยสมการที่ 6.31 จะใช้สำหรับสายเคเบิลแบบ aluminum sheath และสมการที่ 6.31A ใช้สำหรับสายเคเบิลแบบ lead sheath

ในสายเคเบิลแบบสามตัวนำที่มีการชีลด์ด้วย shielded paper lead จะต้องใช้ tape ที่เป็น copper หรือ bronze ประมาณ 3-mil หรือ 5-mil แทรกระหว่าง paper tape เพื่อใช้ในการ shielding และเป็นตัวมัด (binder) สายเคเบิลเข้าไว้ด้วยกัน โดยความต้านทานแรงแสดงตรง copper tape 5-mil ที่ 0.75 นิ้ว จะได้ประมาณ 2,200 micro-ohms per foot ที่ 20 °C ซึ่งเป็นความต้านทานแบบ linear ที่จะต้องคูณด้วย lay correction factor ตามสมการที่ 6.13 และมีค่าอยู่ระหว่าง 4 ถึง 12 หรือมากกว่า การที่มี shielding และ binder นี้จะทำให้ได้ค่าความต้านทาน approximately ของสายเคเบิลออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10,000 micro-ohms per foot หรือมากกว่า ยิ่งไงก็ตามก็ต้องกำหนดให้ค่าความต้านทานนั้นลดลงครึ่งหนึ่ง อันเนื่องมาจากตัวนำที่วางติดกันนั่นเอง ส่วนในการคำนวณของ lead sheath ใช้สมการที่ 6.27 กับ 6.30 สำหรับสายเคเบิลสามตัวนำแบบ shielded paper lead ที่มีการ shielding และ binder จะไม่คำนึงถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นเลยก็ได้

สมการที่ 6.31 นั้นจะใช้ในการประมาณค่าของ  $Y_p$  สำหรับสายเคเบิลที่ติดตั้งไว้ในรางรองสาย ซึ่งจะยึดพื้นฐานมากจากการคำนวณแบบ pipe ที่ไม่เป็นตัวนำแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามจะต้องหาค่าเฉลี่ยของระยะห่าง  $S$  ในบริเวณ wide triangular จาก  $s = (D_p - D_s)/2$  และถ้าคิดที่จุดศูนย์กลางของ pipe ในบริเวณ close triangle ก็จะได้  $s = 0.578 D_s$

สำหรับในกรณีของ magnetic pipe หรือ conduit จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$p = \frac{1.54s - 0.115D_p}{R_{dc}} \quad (3\text{-conductor cable}) \quad (6.33)$$

$$p = \frac{0.89S - 0.115D_p}{R_{dc}} \quad (1\text{-conductor, close triangular}) \quad (6.34)$$

$$p = \frac{0.34S - 0.175D_p}{R_{dc}} \quad (1\text{-conductor, cradled}) \quad (6.35)$$

จากสมการข้างบนสามารถนำไปใช้ได้กับ steel pipe และ iron conduit แต่กรณี iron conduit จะต้องคูณด้วย 0.8 เสียก่อน สำหรับค่าที่ถูกต้องของผลที่เกิดใน pipe ที่เป็น magnetic pipe หรือ conduit ทั้งการติดตั้งแบบ triangular และ cradled จะต้องคูณ  $Y_c$  และ  $Y_s$  ด้วย 1.7 เสียก่อน

### 6.3.3 การคำนวณหาค่าความสูญเสีย dielectric loss

ค่าของ dielectric loss ( $W_d$ ) สำหรับสายเคเบิลแบบ shielded สามตัวนำและสายเคเบิลหนึ่งตัวนำหาได้ดังนี้

$$d = \frac{0.00246E^2 \varepsilon_r \cos \phi}{\log\left(\frac{2T + D_c}{D_c}\right)} \quad (\text{watts per conductor foot at 60 cycles}) \quad (6.36)$$

และสำหรับสายเคเบิลแบบ belted สามตัวนำหาได้จาก

$$d = \frac{0.019E^2 \varepsilon_r \cos \phi}{G_2} \quad (\text{watts per conductor foot at 60 cycles}) \quad (6.37)$$

เมื่อค่า  $\varepsilon$  คือค่าความสูญเสีย dielectric loss ของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 การคำนวณค่าความต้านทานทางความร้อน

### 6.4.1 ความต้านทานความร้อนของ insulation สำหรับสายเคเบิลหนึ่งตัวนำ

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \log \left( \frac{D_i}{D_c} \right) \quad (6.38)$$

เมื่อ  $\bar{\rho}_i$  คือความต้านทานทางความร้อนจำเพาะของ insulation ในสายเคเบิลแบบตัวนำหลายตัวก็ จะเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณระหว่าง conductor กับ sheath และจะแผ่ออกมาจาก conductor ไปยัง sheath ความต้านทานแบบนี้หาได้จาก

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i G_1 \quad (6.39)$$

โดยที่ค่า  $G_1$  ของสายเคเบิลแบบ shielded สามตัวนำหาได้จากสมการที่ผ่านๆ มา

### 6.4.2 ความต้านทานทางความร้อนของ Jackets, Duct Walls และ Coating

ความต้านทานทางความร้อนจะสัมพันธ์กับความหนาของ jackets และ fiber duct walls สามารถหาได้จาก

$$\bar{R} = 0.0104 \rho' n' \left( \frac{t}{D-t} \right) \quad (6.39)$$

เมื่อ  $D$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก และ  $n'$  คือจำนวนของตัวนำในส่วนที่มีความร้อนไหลผ่าน

### 6.4.3 ความต้านทานทางความร้อนระหว่างผิวของสายเคเบิลกับบริเวณรอบข้างที่เป็น Pipe, Conduit หรือ Duct Wall

เป็นการหาค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างผิวของสายเคเบิล กับสิ่งที่นำมาล้อมรอบ หาได้จาก

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n' A}{1 + (B + CT_m) D_s} \quad (6.41)$$

ซึ่งค่า A, B และ C คือค่าคงที่  $D_s$ , แทนเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของสายหรือกลุ่มของสายเคเบิลและ  $n$  คือจำนวนตัวนำที่อยู่ภายใน  $D_s$ , โดยที่ค่าคงที่ A, B และ C หาได้จากตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าคงที่ A, B, C,

Installation condition	A	B	C
In metallic conduit	5.2	1.4	0.011
In fiber duct in air	5.2	0.83	0.006
In fiber duct in concrete	5.2	0.91	0.010
In asbestos cement duct in air	5.2	1.2	0.006
In asbestos cement duct in concrete	5.2	1.1	0.011
Gas pressure cable in a pipe	0.95	0.46	0.0021
Oil pressure pipe-type cable	0.26	0.0	0.0026

ซึ่งเป็นกรณีของการเดินสายใน ducts ค่า  $\bar{R}_{sd}$  จะเป็นค่าที่อยู่ภายใน duct wall และความต้านทานทางความร้อนของ duct wall ก็จะรวมกับค่า  $\bar{R}_{se}$

#### 6.4.4 ความต้านทานทางความร้อนจากสายเคเบิล Conduits หรือ Ducts ที่ติดตั้งในอากาศ

ความต้านทานทางความร้อน  $\bar{R}_e$  ระหว่างสายเคเบิล conduits หรือ ducts ที่ติดตั้งในอากาศสามารถหาได้จาก

$$\bar{R}_e = \frac{15.6n'}{D_s' \left[ \left( \frac{\Delta T}{D_s'} \right)^{\frac{1}{4}} + 1.6\varepsilon(1 + 0.0167T_m) \right]} \quad (6.42)$$

เมื่อ  $\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวของสายเคเบิล  $T_s$  กับอุณหภูมิที่อากาศรอบข้าง  $T_a$  และถ้าสมมติให้  $T_s = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 30^\circ\text{C}$  และ  $D_s'$  มีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 10 จะเขียนสมการที่ 6.42 ใหม่ได้ดังนี้

$$R_e = \frac{9.5n'}{1 + 1.7D_s'(\varepsilon + 0.41)} \quad (6.42A)$$

เมื่อค่า  $\varepsilon$  ของ pipes, conduits หรือ ducts เท่ากับ 0.95 และของ lead และ aluminum sheaths เท่ากับ 0.2 ถึง 0.5 และจะมีค่าเท่ากับ 0.41 ถ้า pipes, conduits หรือ ducts มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 3.5 นิ้ว

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นไป เมื่อนำสายเคเบิลไปติดตั้งแบบลอยในอากาศ จะมีผลของลมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ 6.42 ใหม่ได้ดังนี้

$$R_e = \frac{3.5n'}{D_s'(\sqrt{V_w/D_s'} + 0.62\varepsilon)} \quad (6.42B)$$

#### 6.4.5 ความต้านทานทางความร้อนยังผลระหว่างสายเคเบิล หรือ Ducts หรือ Pipes และ Ambient Earth

ในกรณีที่สายเคเบิลติดตั้งอยู่ใน duct bank จะต้องพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างค่า  $\bar{\rho}_e$  ของคอนกรีตกับค่า  $\bar{\rho}_e$  ของพื้นที่ และความต้านทานทางความร้อนระหว่างจุดใดๆ ของสายเคเบิล ในดินกับ ambient earth หาได้จาก

$$\bar{R}_{\rho_e} = 0.012 \bar{\rho}_e \log\left(\frac{d'}{d}\right) \quad (6.43)$$

โดยที่  $\bar{\rho}_e$  เป็นค่าความต้านทานทางความร้อนจำเพาะของดิน  $d'$  เป็นระยะจากการ image ของสายเคเบิลถึงจุด P และ  $d$  เป็นระยะจากสายเคเบิลถึงจุดศูนย์กลาง P ถ้าสายเคเบิลเป็นแบบฝังดินโดยตรง และใช้ชนิดดินที่ฝังดินจะได้อ่า

$$\bar{R}_{\rho_e} = 0.012 \bar{\rho}_e n' \left[ \log\left(\frac{D_x}{D_e}\right) + (LF) \log\left(\frac{4L \times F}{D_x}\right) \right] \quad (6.44)$$

โดยที่  $D_x$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางที่กำหนดขึ้นมาเนื่องจากผลของ loss factor ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $\alpha$  และช่วงของ loss cycle สามารถหาได้จาก

$$D_x = 1.02 \sqrt{\alpha(\text{length of cycle in hours})} \quad (6.45)$$

สำหรับใน dielectric loss cycle จะใช้ค่า  $\alpha = 2.75$  square inches per hour และ  $D_x$  เท่ากับ 8.3 นิ้ว เมื่อใช้กับแบบฝังดิน ส่วนค่าแฟกเตอร์ F เกิดจากผลต่างความร้อนของสายเคเบิลหาได้จาก

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}}\right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}}\right) \Lambda \left(\frac{d_{1M'}}{d_{1N}}\right) \quad (6.46)$$

เมื่ออุณหภูมิของตัวนำมีค่าสูงสุดก็จะทำให้  $4LR/D_x$  มีค่าสูงสุดด้วย  $N$  แทนจำนวนของสายเคเบิลหรือท่อ และ  $F$  จะเป็น unity เมื่อ  $N = 1$  เมื่อสายเคเบิลถูกติดตั้งไว้ในคอนกรีตอย่างเช่นใน duct bank จะทำให้ค่าของความต้านทานทางความร้อนจำเพาะแตกต่างออกไปจากเดิม โดยในการคำนวณนั้น ต้องรวมเอาค่าความต้านทานทางความร้อนที่ชั้นกลางระหว่างท่อกับดินก็คือคอนกรีต  $\bar{\rho}_c$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 6.44 ใหม่ได้เป็น

$$\bar{R}_e = 0.012\bar{\rho}_e n' \left[ \log\left(\frac{D_x}{D_e}\right) + (LF) \log\left(\frac{4L \times F}{D_x}\right) \right] + 0.012(\bar{\rho}_e - \bar{\rho}_c) n' N (LF) G_b$$

เมื่อพิจารณาที่ผิวของ duct bank จะได้รับรัศมี  $r_b$  ออกมา ความต้านทานทางความร้อนระหว่าง duct bank กับ ผิวดินจะอยู่ในเทอมของ  $r_b$  และ  $L_b$  ซึ่งสามารถเขียนสมการของ  $G_b$  ได้ดังนี้

$$G_b = \log \frac{Lb^2 + \sqrt{Lb^2 - rb}}{rb} = \log \frac{Lb}{rb} + \sqrt{\left(\frac{Lb}{rb}\right)^2 - 1} \quad (6.45)$$

เมื่อกำหนดให้  $X$  เป็นขนาดความกว้างและ  $Y$  เป็นขนาดความยาวของ duct bank ดังนั้นรัศมีที่สัมผัสขอบภายในของ duct bank คือ

$$r_1 = x/2 \quad (6.46)$$

และรัศมีที่สัมผัสมุมทั้งสี่ของ duct bank และเป็นรัศมีใหญ่สุดจะได้ดังนี้

$$r = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2} \quad (6.47)$$

เมื่อพิจารณาค่าของ  $P$  ใน duct bank จะได้ว่า

$$P = 2(x + y) = 4 \frac{x}{2} \left(1 + \frac{y}{x}\right) \quad (6.48)$$

ค่าพารามิเตอร์  $P$  นี้จะนำไปเขียนอยู่ในเทอมอัตราส่วน  $L_b/P$  ซึ่งหาได้จากสมการ 6.45 และ สมการ 6.48 ที่ค่าอัตราส่วน  $Y/X$  ต่างๆ กัน

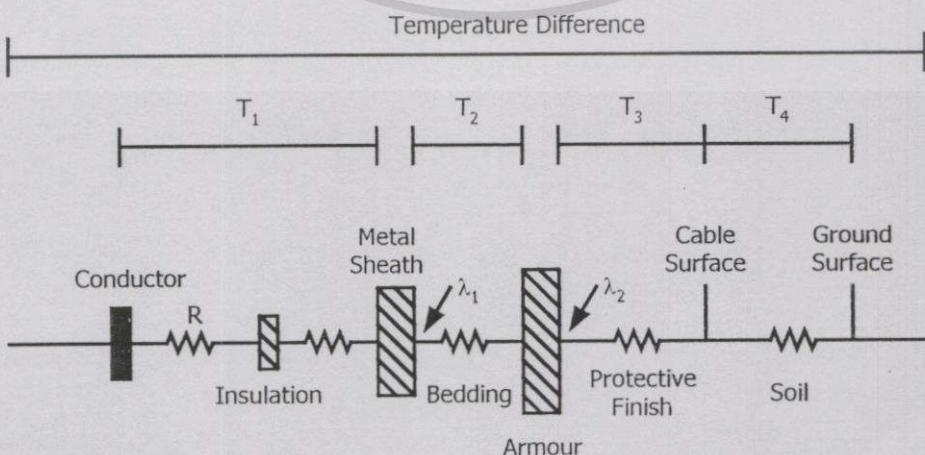
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 การคำนวณหากระแสในสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC.287

การคำนวณหาพิกัดของกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ในสภาวะการจ่ายโหลดภายใต้เงื่อนไขการใช้งานหนึ่งๆ สามารถคำนวณได้หลายวิธี และหลายมาตรฐาน แต่วิธีการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรมสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีการคำนวณอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 287 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการใช้งานที่มีการยอมรับกันทั่วโลก และการไฟฟ้านครหลวงก็เป็นอีกหน่วยงานหนึ่งที่เลือกใช้มาตรฐานนี้อ้างอิงการติดตั้งระบบไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทยเพื่อให้สามารถเลือกขนาดสายเคเบิลได้เหมาะสม การออกแบบสายไฟฟ้าใต้ดินจะต้องคำนึงถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายบนพื้นฐานจุดวิกฤตที่เกี่ยวกับความร้อน และไม่พิจารณาเกี่ยวกับการไหลของความร้อนในการคำนวณจะกำหนดให้สายอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) นั่นคือกระแสจะมีค่าคงที่ต่อเนื่องกันตลอดที่ตัวประกอบภาระโหลด 100% (100% Load Factor) การคำนวณหาค่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ไหลในสายเคเบิลต้องคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างของสายเคเบิล ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการคำนวณหากระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

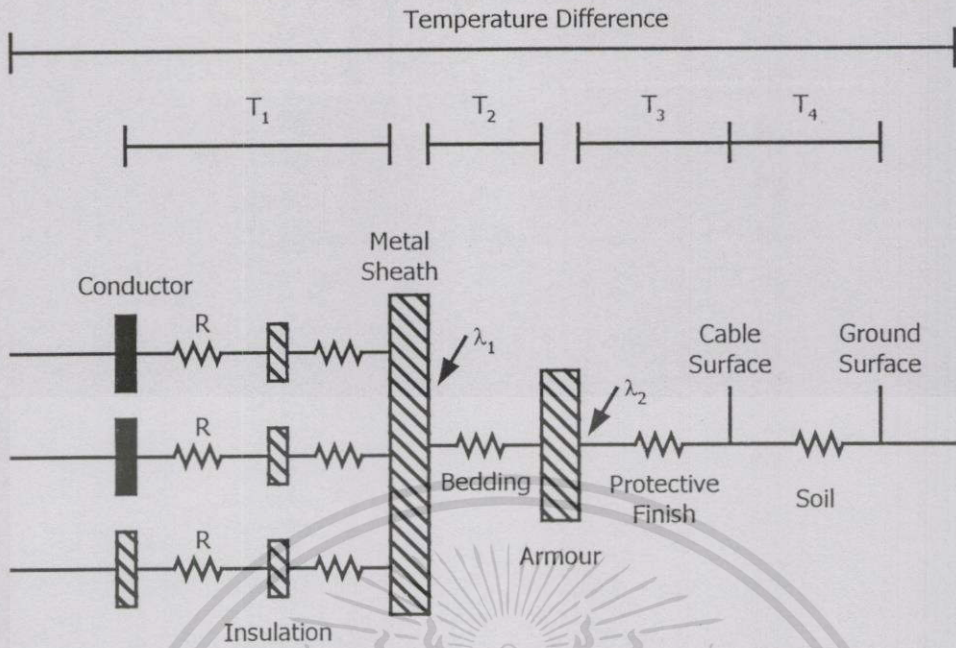
- 1) คุณสมบัติของสายเคเบิล เช่น ความต้านทานความร้อน
- 2) สภาวะแวดล้อมในบริเวณที่ติดตั้งสายเคเบิล
- 3) ข้อมูลที่ได้จากการประชุมระหว่างผู้ผลิต และผู้ใช้เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

จากวงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลชนิด 1 แกน และชนิด 3 แกน ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 ตามลำดับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ทนได้ในสายเคเบิล ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ยอมให้ไหลผ่านได้สูงสุดในหนึ่งตัวนำในสภาวะการใช้งานขณะนั้นๆ โดยไม่ทำให้สายเคเบิลเสียหาย (Calculation of Continuous Current Rating of Cable :  $I_{AC}$ ) สามารถคำนวณหาตามมาตรฐาน IEC 287 ได้จากสมการที่ (6.49)



รูปที่ 6.1 วงจรสมมูลย์ของสายเคเบิลชนิด 1 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 วงจรสมมูลของสายเคเบิลชนิด 3 แกน

$$I_{AC} = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{1/2} \quad (6.49)$$

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

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่อหน่วยความยาวของตัวนำที่อุณหภูมิสูงสุด ( $\Omega/\text{m}$ )

$W$  = พลังงานสูญเสียในฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล ( $\text{W}/\text{m}$ )

$T_1$  = ความต้านทานความร้อนต่อระหว่างตัวนำกับฉนวน ( $\text{km}/\text{W}$ )

$T_2$  = ความต้านทานความร้อนระหว่างฉนวนกับเครื่องห่อหุ้ม (Armour) ( $\text{km}/\text{W}$ )

$T_3$  = ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล (External Serving) ( $\text{km}/\text{W}$ )

$T_4$  = ความต้านทานความร้อนภายนอก (ระหว่างผิวฉนวนเปลือกนอกของสายถึงผิวดิน) ( $\text{km}/\text{W}$ )

$n$  = จำนวนตัวนำ (แกน) ในสายเคเบิล

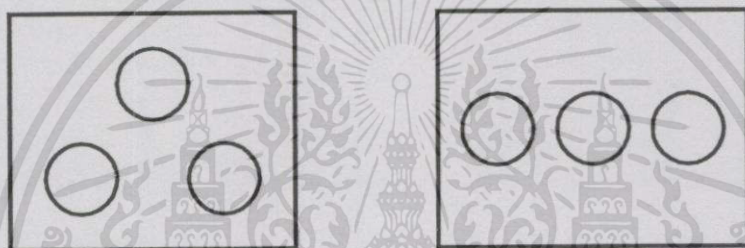
$\lambda_1$  = องค์กรประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในฉนวน โลหะ และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน

$\lambda_2$  = องค์กรประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในเครื่องห่อหุ้มของสายเคเบิลใต้ดิน

จากสมการสามารถสรุปได้ว่าลักษณะการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลในสายจะแตกต่างกันออกไปเมื่อ

1. ชนิดของตัวนำแตกต่างกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด 1 แกน และชนิด 3 แกน

2. รูปแบบการวางสายเคเบิลในท่อร้อยสาย โดยสามารถวางได้ 2 แบบ คือ วางแบบสามเหลี่ยม (Trefoil) และวางแบบราบ (Flat) ดังรูปที่ 3.3 ก) และรูปที่ 3.3 ข) ตามลำดับ
3. ลักษณะ และขนาดของตัวนำ ถ้าเป็นตัวนำที่มีขนาดใหญ่ต้องนำค่าตัวประกอบ F (Factor) เข้ามาพิจารณาด้วย
4. ลักษณะของสารที่ใช้ทำฉนวน
5. ตำแหน่งการร้อยสายเคเบิลในท่อร้อยสาย
6. ชนิดของท่อ
7. ชนิดของสายเคเบิล ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือแบบสกรีน (Screen) กับแบบเข็มขัด (Belted)



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) การวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยม (Trefoil)

(ข) การวางสายเคเบิลแบบราบ (Flat)

### 6.5.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำ (AC Resistance of Conductor : R)

ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.50 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการที่ 6.51 นี้ สามารถหาได้จากตั้งแต่สมการที่ 6.51 จนถึงสมการที่ 6.58

$$R = R' (1 + Y_s + Y_p) \quad (6.50)$$

เมื่อ  $R$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$R'$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$Y_s$  = ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect)

$Y_p$  = ผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity Effect)

#### 6.5.1.1 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (DC Resistance of Conductor : R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (6.51)$$

เมื่อ  $R_0$  = ความต้านทานไฟกระแสดตรงของตัวนำที่อุณหภูมิ 20 °C ( $\Omega/m$ )

$\alpha_{20}$  = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่ 20 °C

$\theta$  = ค่าอุณหภูมิสูงสุดขณะทำงาน (°C)

### 6.1.1.2 ผลจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect : $Y_s$ )

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลในตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำมีความหนาแน่นมากแต่แกนกลางของตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลน้อยซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ ขนาดของตัวนำ และขนาดของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ ดังนั้นสามารถหาค่าผลจากปรากฏการณ์ทางผิวได้จากสมการที่ 6.52 นั่นคือ

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (6.52)$$

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} K_s \quad (6.53)$$

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

$K_s$  = ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณค่า  $X_s$

$f$  = ความถี่ไฟฟ้าที่ป้อน (Hz)

### 6.1.1.3 ผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity Effect : $Y_p$ )

ลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลหลายๆ เส้นจะมีระยะห่างระหว่างสายเคเบิลน้อยมาก ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิลที่อยู่ข้างเคียงจึงมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำสายเคเบิลเส้นที่อยู่ใกล้เคียงกัน ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จึงถูกเรียกว่าผลจากปรากฏการณ์ความใกล้ชิด ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

$$p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + \left[ \frac{d_c}{s} \right]^2 \left[ 0.312 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \quad (6.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} K_p \quad (6.55)$$

เมื่อ  $d_c$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

$s$  = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

$X_p$  = Argument of a Bessel Function ที่ใช้ในการคำนวณผลจากปรากฏการณ์ความถี่สูง (ค่า  $X$  ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.8 เพื่อให้ได้ค่า  $Y$  ที่ถูกต้องแม่นยำ)

$K_p$  = ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้คำนวณ  $X$

### 6.5.2 ค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล (Dielectric loss : $W_d$ )

พลังงานสูญเสียของฉนวนมีผลทำให้ฉนวนเกิดความร้อนขึ้นซึ่งอาจร้อนพอๆ กันกับความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวนำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับแรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ สามารถหาค่าพลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวในเฟสเดียวกันคำนวณได้จากสมการที่ 6.56 และสามารถหาค่าความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว (Capacitance :  $C$ ) ได้ดังสมการที่ 6.57 ค่าความสูญเสียของฉนวนจะมีความสำคัญก็ต่อเมื่อค่าความต่างศักย์ของพื้นดินมีค่ามากกว่า 30 kV สำหรับฉนวนกระดาษ และ 6 kV สำหรับฉนวนพีวีซีทั้งเคเบิลชนิด 1 แกน และ 3 แกน

$$P_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (6.56)$$

เมื่อ  $W_d$  = พลังงานสูญเสียของฉนวนต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิล (W/m)

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

$$\omega = 2\pi f$$

$U_0$  = แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายมีไฟกับดิน (Voltage to Earth) (volt)

$C$  = ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว (F/m)

#### 6.5.2.1 ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left( \frac{D_i}{D_c} \right)} \times 10^{-9} \quad (6.57)$$

เมื่อ  $\epsilon$  = ความซึมซับสัมพัทธ์ของฉนวน (Relative Permittivity of Insulation)

$D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของฉนวน (mm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_c$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำรวมถึง Conductor Screen (mm.)

### 6.5.3 ตัวประกอบความสูญเสียกำลังในชีท และสกรีนของสายเคเบิลใต้ดิน (Loss Factor of Sheath and Screen : $\lambda_1$ )

ค่าตัวประกอบความสูญเสียในชีท และสกรีนมีสาเหตุมาจากกระแสไหลวน (Circulating Current :  $\lambda_1'$ ) และกระแสเอ็ดดี้ (Eddy Current :  $\lambda_1''$ ) ที่ไหลอยู่ในชีท และสกรีนสามารถหาค่าตัวประกอบความสูญเสีย ได้จาก

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (6.58)$$

ในการคำนวณหาค่าประกอบความสูญเสียในชีท และสกรีนนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างและลักษณะการวางสาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

#### 6.5.3.1 สายแกนเดี่ยว 2 เส้น และ 3 เส้นวางแบบสามเหลี่ยม มีการต่อชีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และมีการสลับสาย

เนื่องจากกระแสเอ็ดดี้สำหรับลักษณะสาย และการวางสายแบบนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ [9] ดังนั้นค่าตัวประกอบความสูญเสียในชีท และสกรีนมีค่าเฉพาะ  $\lambda_1$  ซึ่งเป็นค่าตัวประกอบความสูญเสียในชีทและสกรีนมีสาเหตุมาจากกระแสไหลวน ดังนี้

$$\lambda_1 = \lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \right] \quad (6.59)$$

โดยที่

$$X = 2\omega \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad (6.60)$$

$$d = \sqrt{d_M \times d_m} \quad (6.61)$$

เมื่อ  $R_s$  = ความต้านทานของชีท หรือสกรีนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายที่อุณหภูมิทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำที่อุณหภูมิทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$X$  = ค่ารีแอกแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของชีท หรือสกรีน ( $\Omega/m$ )

$S$  = ระยะห่างระหว่างแกนกลางของตัวนำ (mm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุม มีค่าเท่ากับ (rad)

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีท (mm.)

$d_M$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของซีท (mm.)

$d_m$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของซีท (mm.)

6.5.3.2 สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อซีทที่ปลายทั้งสองลงกราวด์ และมีการสลับสาย

$$\lambda_1 = \lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{R_s}{X_1} \right)^2} \right] \quad (6.62)$$

โดยที่

$$X_1 = 2\omega \times 10^{-7} \ln \left[ 2 \times \sqrt[3]{2} \left( \frac{2S}{d} \right) \right] \quad (6.63)$$

$$d = \sqrt{d_M \times d_m} \quad (6.64)$$

เมื่อ  $X_1$  = รีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของซีท ( $\Omega/m$ )

6.5.3.3 สายแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ มีการต่อซีทที่ปลายสายทั้งสองลงกราวด์ และไม่มีการสลับสาย

ระยะจากสายเคเบิลเส้นกลางไปสู่เคเบิลอีก 2 เส้น มีระยะเท่ากัน ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนจึงมีค่าค่อนข้างสูงเพราะว่าสายเคเบิลด้านนอกจะเป็นเฟสต้านลิ่ง ดังนั้นจะได้

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (6.65)$$

$$\lambda_{12} = \frac{R_s}{R} \left[ \frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (6.66)$$

$$\lambda_{1m} = \frac{R_s}{R} \left( \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right) \quad (6.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$P = X + X_m \quad (6.68)$$

$$Q = X - \left( \frac{X_m}{3} \right) \quad (6.69)$$

$$X = 2\omega \times 10^{-7} \ln \left( \frac{2S}{d} \right) \quad (6.70)$$

$$X_m = 2\omega \times 10^{-7} \ln 2 \quad (6.71)$$

เมื่อ  $\lambda_{11}$  = ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนของสายเคเบิลด้านนอกเส้นที่ 1

$\lambda_{12}$  = ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนของสายเคเบิลด้านนอกอีกเส้นหนึ่ง

$\lambda_{1m}$  = ค่าตัวประกอบความสูญเสียในซีท และสกรีนของสายเคเบิลเส้นกลาง

$X_m$  = ค่า Mutual Reactor ต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลระหว่างซีทของสายเคเบิลด้านนอกกับตัวนำของสายที่เหลืออีกสองเส้น ( $\Omega/m$ )

6.5.3.4 สายแกนเดี่ยว 1 เส้น มีการต่อซีทลงกราวด์ และที่จุดปลายมีการสลับสาย การทำในลักษณะนี้จะทำให้ค่ากระแสสแลโวลวนมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\lambda_1 = \lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[ g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (6.72)$$

$$g_s = 1 + \left( \frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s \times 10^{-3} - 1.6) \quad (6.73)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}} \quad (6.74)$$

เมื่อ  $\rho_s$  = ความต้านทานฉนวนไฟฟ้าจำเพาะของซีท (Electrical Resistivity of Sheath) ( $\Omega/m$ )

$D_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของซีท (mm)

$t_s$  = ความหนาของซีท (mm)

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

$\beta_1$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสียกระแสสแลโวลวน (Coefficient of Eddy Current Losses)

$\lambda_0, \Delta_1, \Delta_2$  = สัมประสิทธิ์การใช้งาน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการวางสาย และลักษณะของสายซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. สายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบสามเหลี่ยม

$$\lambda_0 = 3 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2 \quad (6.75)$$

$$\Delta_1 = (1.14m^{2.45} + 0.33) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.66)} \quad (6.76)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (6.77)$$

2. สายเคเบิลแกนเดี่ยว 3 เส้น วางแบบราบ

- ก) สายเคเบิลเส้นกลาง

$$\lambda_0 = 6 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2 \quad (6.78)$$

$$\Delta_1 = (0.86m^{3.08}) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(1.4m+0.7)} \quad (6.79)$$

$$\Delta_2 = 0$$

- ข) สายเคเบิลเส้นนอกที่เป็นเฟสหน้า

$$\lambda_0 = 1.5 \left( \frac{m^2}{1+m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2 \quad (6.80)$$

$$\Delta_1 = (4.7m^{0.7}) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(0.6m+2)} \quad (6.81)$$

$$\Delta_2 = (21m^{3.3}) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(1.47m+5.06)} \quad (6.82)$$

ค) สายเคเบิลเส้นนอกที่เป็นฟอสฟอรัส

$$\lambda_0 = 1.5 \left( \frac{m^2}{i + m^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^2 \quad (6.83)$$

$$\Delta_1 = - \left( \frac{0.74(m+2)m^{0.5}}{2 + (m-0.3)^2} \right) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(m+1)} \quad (6.84)$$

$$\Delta_2 = (0.97m^{3.7}) \left( \frac{d}{2s} \right)^{(m+2)} \quad (6.85)$$

#### 6.5.4 ค่าตัวประกอบความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของเครื่องห่อหุ้ม (Power Loss Factor in Armour : $\lambda_2$ )

สายเคเบิลแบบ 3 แกน มีเครื่องห่อหุ้มเป็นลวดโลหะ แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 กรณี คือ

##### 6.5.4.1 สายเคเบิลเป็นตัวนำแบบกลม (Round)

จะไม่มีกรแก้ไขด้วยค่าปรับแต่ง (F Factor) เมื่อตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า หรือเท่ากับ 400 ตารางเมตร สามารถหาค่ากำลังสูญเสียของเครื่องห่อหุ้มฉนวน  $\lambda_2$  ได้จากสมการที่ 6.86

$$\lambda_2 = 1.23 \frac{R_A \left( \frac{2c}{d_A} \right)^2}{\left[ \frac{1}{\left( \frac{2.77 R_A \times 10^6}{\omega} \right) + 1} \right]} \quad (6.86)$$

เมื่อ  $R_A$  = ความต้านทานของเครื่องห่อหุ้มที่อุณหภูมิการทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$d_A$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเครื่องห่อหุ้ม (mm)

$C$  = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำ และศูนย์กลางของเคเบิล (mm)

##### 6.5.4.2 สายเคเบิลเป็นตัวนำแบบเซกเตอร์ (Sector)

$$\lambda_2 = 0.358 \frac{R_A \left( \frac{2r_1}{d_A} \right)^2}{\left[ \frac{1}{\left( \frac{2.77 R_A \times 10^6}{\omega} \right) + 1} \right]} \quad (6.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $r_1 =$  รัศมีโดยรอบตัวนำทั้ง 3 แกน (mm)

### 6.5.5 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

จากวงจรสมมูลของสายเคเบิลดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 จะเห็นว่าความต้านทานความร้อนของส่วนต่างๆ ของสายเคเบิลใต้ดิน แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีท ( $T_1$ ) ความต้านทานความร้อนระหว่างซีทกับเครื่องหล่อหุ้ม ( $T_2$ ) ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล ( $T_3$ ) และความต้านทานความร้อนระหว่างผิวฉนวนเปลือกนอกของสายถึงพื้นผิวดิน ( $T_4$ ) สำหรับชั้นของสกรีนนั้นถ้าเป็นเทปโลหะให้พิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของตัวนำซีท ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำให้พิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของฉนวน

#### 6.5.5.1 ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีท ( $T_1$ )

ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับซีทขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนเป็นสำคัญโดย

1) สายเคเบิลแกนเดี่ยว

$$r_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (6.88)$$

เมื่อ  $\rho_T =$  ความต้านทานความร้อนของฉนวน (km/W)

$d_c =$  เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

$t_1 =$  ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำกับซีท สำหรับซีทที่เป็นรอนนั้น  $t_1$  จะมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเฉลี่ยของซีท (mm)

2) สายเคเบิล 3 แกนแบบเข็มขัด

$$r_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (6.89)$$

เมื่อ  $G =$  แฟกเตอร์เรซารณิตขึ้นอยู่กับขนาด และรูปแบบของตัว

3) สายเคเบิล 3 แกนแบบมีสกรีนเทปโลหะ

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

$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (6.90)$$

#### 6.5.5.2 ความต้านทานความร้อนระหว่างฉีกับเครื่องห่อหุ้ม ( $T_2$ )

สำหรับสายเคเบิลชนิด 1 แกน ชนิด 2 แกน และชนิด 3 แกน ที่มีฉีทโลหะจะได้

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left( 1 + \frac{2t_2}{D_s} \right) \quad (6.91)$$

เมื่อ  $t_2$  = ความหนาของ Bedding (mm)

$D_s$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของฉีท (mm)

$\rho_T$  = ความต้านทานความร้อนของฉีท (km/W)

#### 6.5.5.3 ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล ( $T_3$ )

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2t_3}{D_a} \right) \quad (6.92)$$

เมื่อ  $t_3$  = ความหนาของเปลือกนอกของสายเคเบิล (mm)

$D_a$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเครื่องห่อหุ้ม (mm)

$\rho_T$  = ความต้านทานความร้อนของเครื่องห่อหุ้ม (km/W)

#### 6.5.5.4 ความต้านทานความร้อนระหว่างฉนวนเปลือกนอกของสายถึงผิวพื้นดิน ( $T_4$ )

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (6.93)$$

เมื่อ  $T_4'$  = ความต้านทานความร้อนระหว่างสายเคเบิลกับท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\dot{q}_4$  = ความต้านทานความร้อนระหว่างผนังตู้ผนังของท่อ

$\dot{q}_4''$  = ความต้านทานความร้อนภายนอกของท่อถึงผิวพื้นดิน

### 1) ความต้านทานความร้อนระหว่างสายเคเบิลกับท่อ ( $\dot{q}_4$ )

ค่า  $\dot{q}_4$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.94 ซึ่งใช้สำหรับสายเคเบิลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25-100 มม. ร้อยในท่อร้อยสาย และใช้คำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของอากาศที่อยู่ระหว่างสายเคเบิลกับผิวของท่อเหล็ก รวมทั้งใช้ในกรณีที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลย์ของสายเคเบิล 3 เส้นในท่อเหล็กมีค่าระหว่าง 75-125 มม. ในส่วนของค่าคงที่ของตัวแปร U, V และ Y มีค่าเป็นดังตารางที่ 6.3

$$\dot{q}_4 = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (6.94)$$

ตารางที่ 6.3 ค่าคงที่ของตัวแปร U, V และ Y

Installation condition	U	V	Y
In metallic conduit	5.20	1.40	0.011
In fiber duct in concrete	5.20	0.91	0.01
In asbestos cement duct in concrete	5.20	1.10	0.011
Gas pressure cable in pipe	0.95	0.46	0.0021
Oil pressure pipe-type cable	0.26	0.00	0.0026
Earthenware ducts	1.87	0.28	0.0036

เมื่อ U, V, Y = ค่าคงที่ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการติดตั้ง

$D_e$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของสายเคเบิล (mm)

$\theta_m$  = อุณหภูมิระหว่างสายเคเบิลกับท่อ (mm)

### 2) ความต้านทานความร้อนระหว่างผนังตู้ผนังของท่อ ( $\dot{q}_4$ )

ในกรณีที่เป็นท่อเดี่ยว ไม่มีคอนกรีตเทหุ้ม รัศมีภายนอกของท่อจะรวมถึงวัสดุคลุม ปกป้อง หรือท่อหุ้มท่อด้วย ถ้าเป็นท่อเดี่ยวมีคอนกรีตเทหุ้มต้องสมมติให้ตัวกลางที่อยู่ด้านนอกท่อมี่ค่าความต้านทานความร้อนเท่ากับของคอนกรีตหุ้มท่อนั้น

$$\frac{r}{4} = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (6.95)$$

เมื่อ  $D_0$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อ (mm)

$D_d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (mm)

$\rho_T$  = ความต้านความร้อนตามชนิดของท่อ (km/W)

### 3) ความต้านทานความร้อนภายนอกของท่อถึงผิวพื้นดิน

$$\frac{r}{4} = \frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln(\mu + \sqrt{\mu^2 - 1}) \quad (6.96)$$

เมื่อ  $N$  = จำนวนสายเคเบิลในท่อร้อยสาย (เส้น)

$\rho_e$  = ความต้านความร้อนของดิน (km/W)

$\rho_c$  = ความต้านความร้อนของคอนกรีต (km/W)

โดยที่

$$\mu = \frac{L_G}{r_b} \quad (6.97)$$

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left( \frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left( 1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \left( \frac{x}{2} \right) \quad (6.98)$$

เมื่อ  $L_G$  = ความลึกของท่อร้อยสายจากผิวดิน (mm)

$r_b$  = รัศมีของท่อคอนกรีต (mm)

$x$  = ความกว้างของท่อร้อยสาย (mm)

$y$  = ความยาวของท่อร้อยสาย (mm)

## โพลีเมอร์ และผลการทำงานของโปรแกรม

### 7.1 โพลีเมอร์

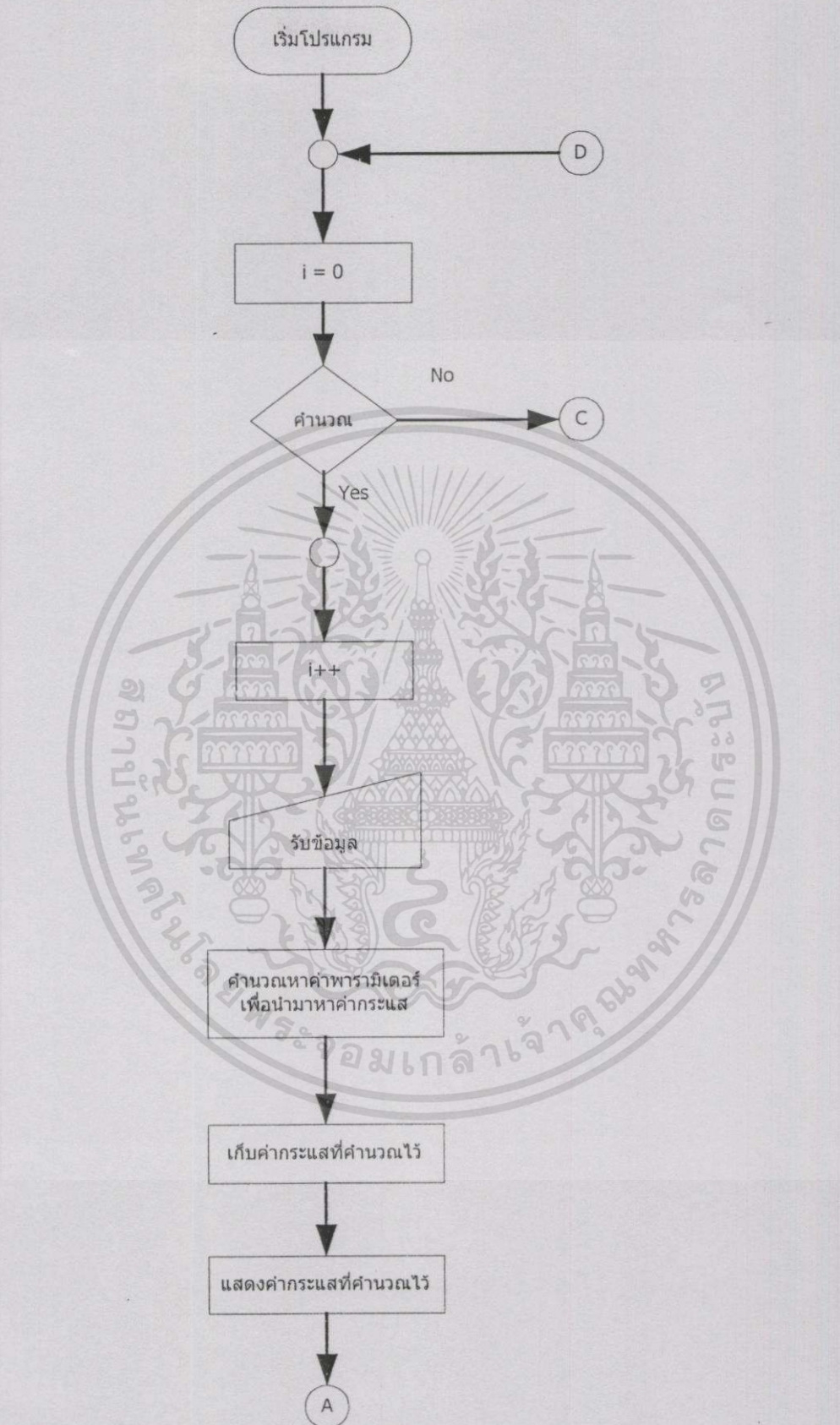
การทำงานของโปรแกรมสามารถเขียนโพลีเมอร์การทำงานได้ดังรูปที่ 7.1 ในรูปที่ 7.1 แสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก โดยมีส่วนรับข้อมูล ตรวจสอบข้อมูล ส่วนประมวลผล และแสดงผลของข้อมูล โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในรูปของตารางการคำนวณและเส้นกราฟ จากโพลีเมอร์นำไปเขียนโปรแกรมการทำงานด้วยโปรแกรม Visual Basic โดยเมื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรมจะแสดงหน้าจอหลักในรูปที่ 7.2

จากหน้าจอหลักเมื่อกดปุ่มรูปมือจะเข้าสู่หน้าจอรับข้อมูลในรูปที่ 7.3 ซึ่งแสดงหน้าจอในการรับข้อมูล โดยสามารถเลือกแบบการคำนวณเป็น Neher-McGrath (N-M) หรือ IEC ในกรอบของแรงดันของสายสามารถเลือกเป็น ชนิดแรงดันต่ำ (Lower Voltage) หรือ แรงดันระดับกลาง (Medium Voltage) ในกรอบรูปแบบการเดินสายสามารถเลือกได้เป็น เดินลอยในอากาศ เดินร้อยท่อในอากาศ เดินฝังดินโดยตรง เดินร้อยท่อฝังดิน ในกรอบชนิดตัวนำสามารถเลือกได้เป็น Copper หรือ Aluminum และสามารถเลือกสายเคเบิลแบบ XLPE เบอร์ต่าง ๆ

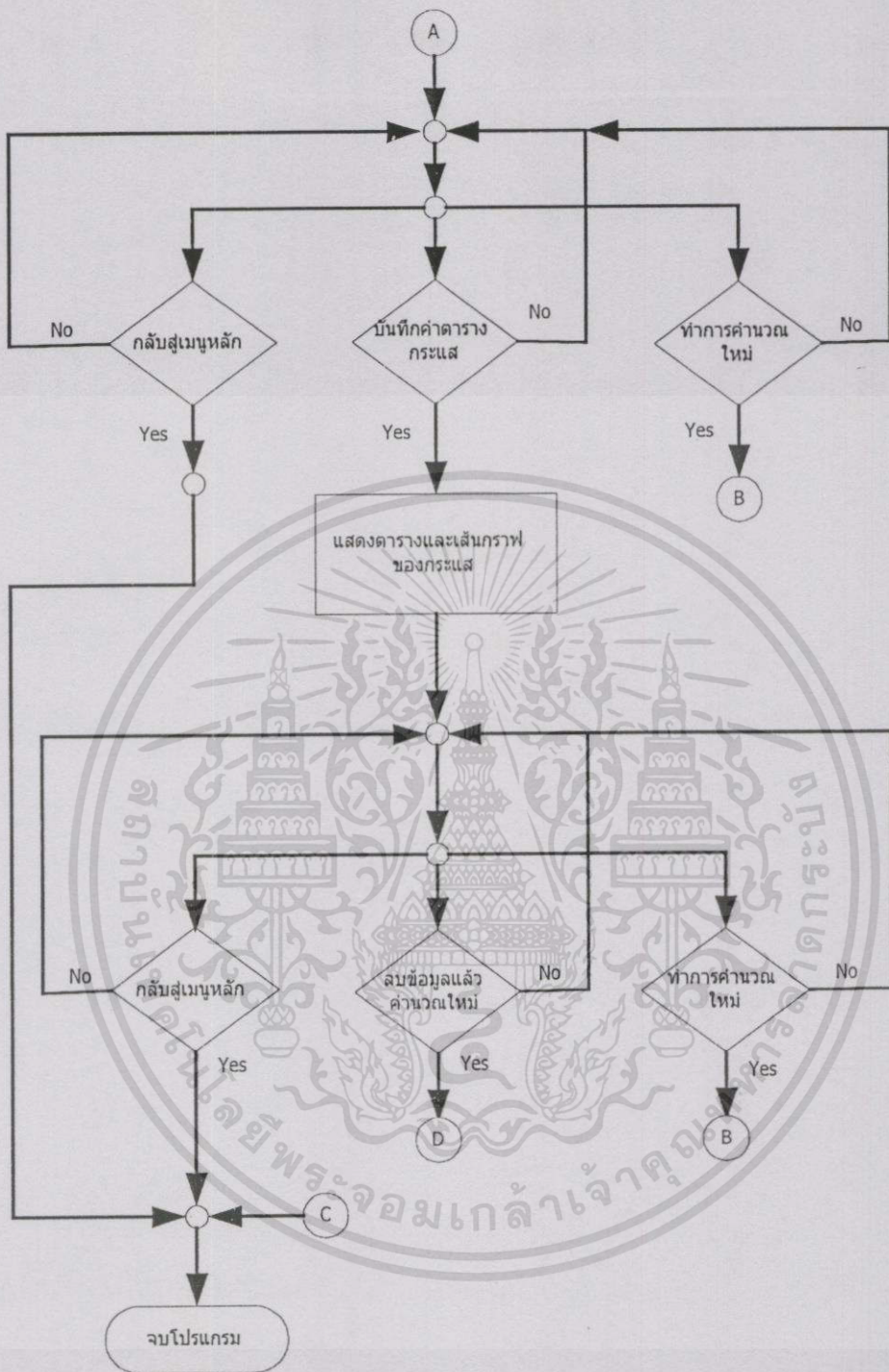
จากรูปที่ 7.4 แสดงหน้าจอรับข้อมูล ซึ่งแสดง Number of Conductor, Outside dimension of Conductor, Approximate outside dimension, Insulation thickness, Jacket thickness, Voltage, Frequency, Conductor Temperature, Ambient Temperature และ Ampcities of Cable

จากรูปที่ 7.5 แสดงผลการคำนวณของสายแกน Low Voltage เดี่ยวเดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ

จากรูปที่ 7.6 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น ในท่อโลหะลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ

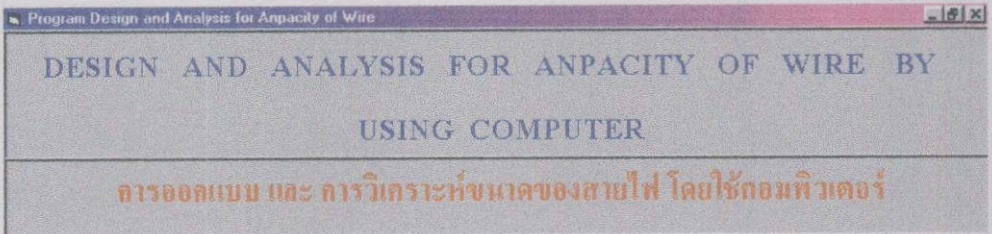


รูปที่ 7.1 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

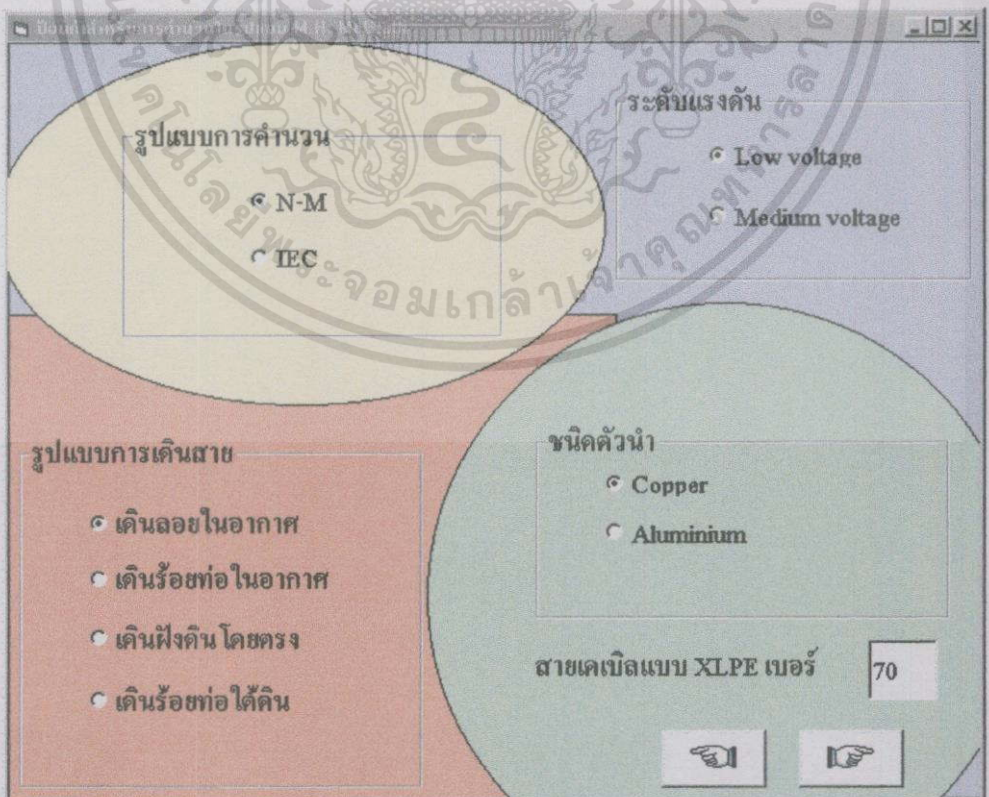


รูปที่ 7.1 (ต่อ) แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

## 7.2 การทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 7.2 หน้าจอหลักของโปรแกรม



รูปที่ 7.3 แสดงหน้าจอในการเลือกรูปแบบในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INPUT DATA**

Copper conductor  
Copper

Number of conductor:       Conductor temperature:  degree C

Outside diameter of conductor:  mm      Ambient temperature:  degree C

Approximate outside diameter:  mm

Insulation thickness:  mm

Jacket thickness:  mm

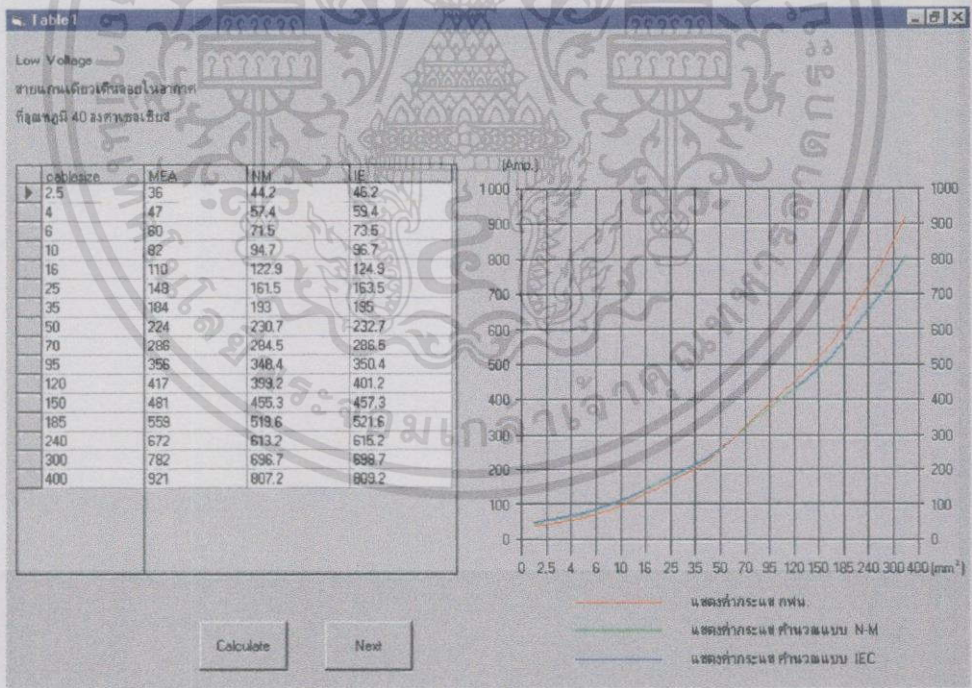
Voltage:  kV

Frequency:  Hz

AMPERES OF THE CABLE IS

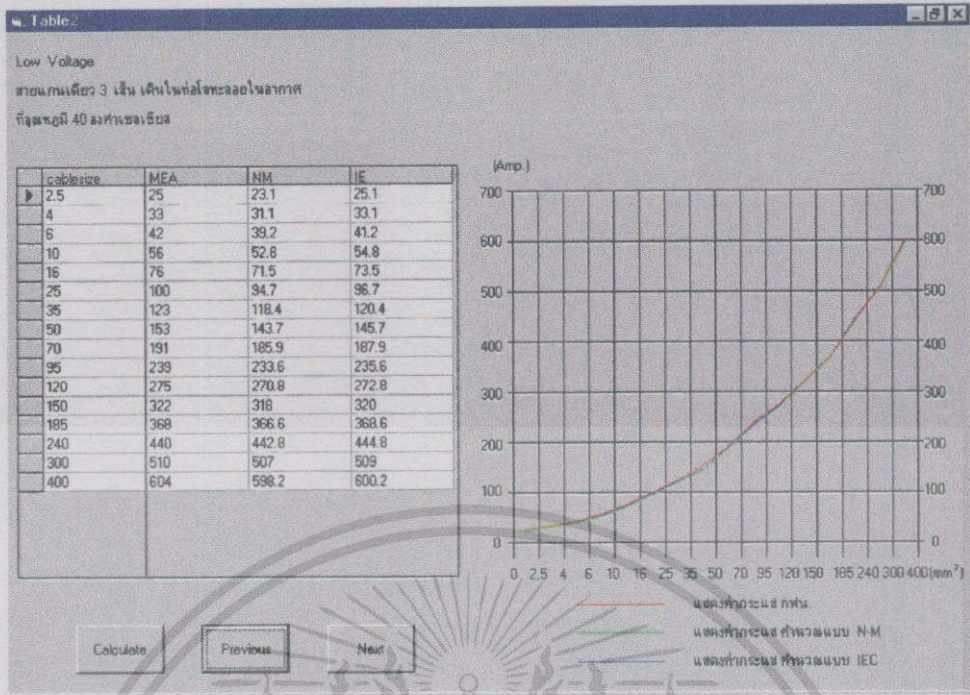
Ampares

รูปที่ 7.4 แสดงหน้าจอในการใส่ข้อมูล

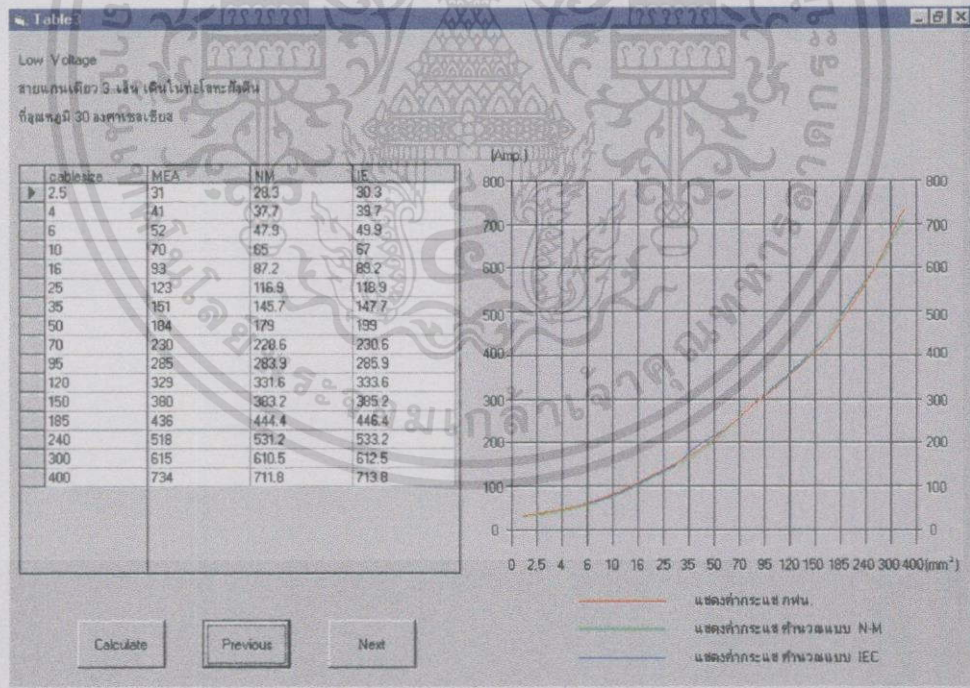


รูปที่ 7.5 แสดงผลการคำนวณของสายเคเบิล Low Voltage เดี่ยวเดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

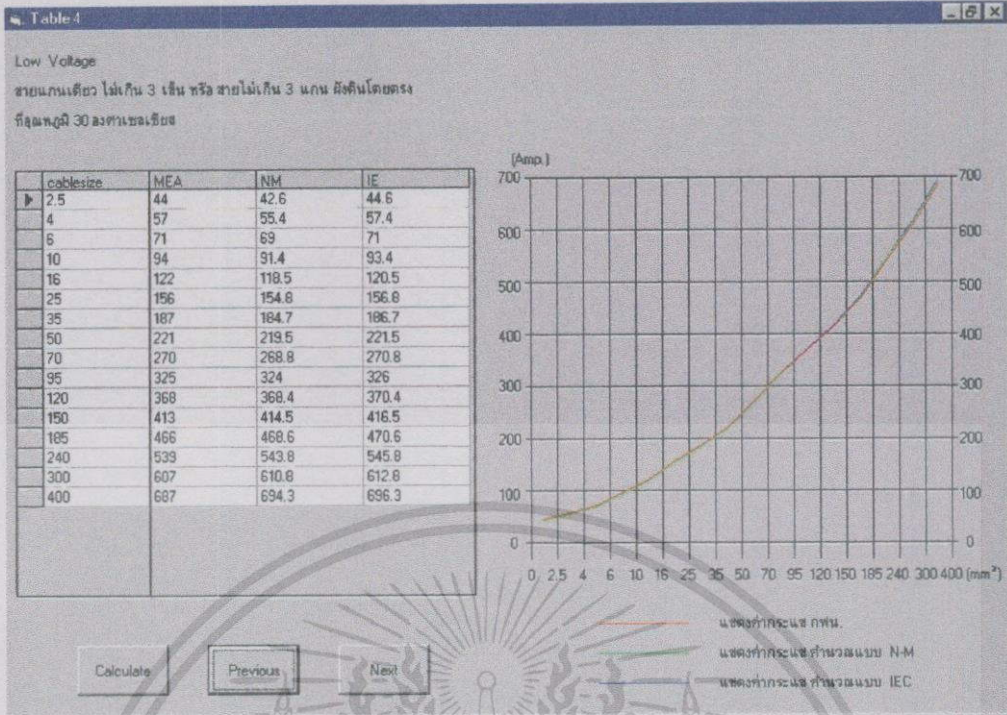


รูปที่ 7.6 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดียว 3 เส้น ในท่อโลหะลอยในอากาศที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

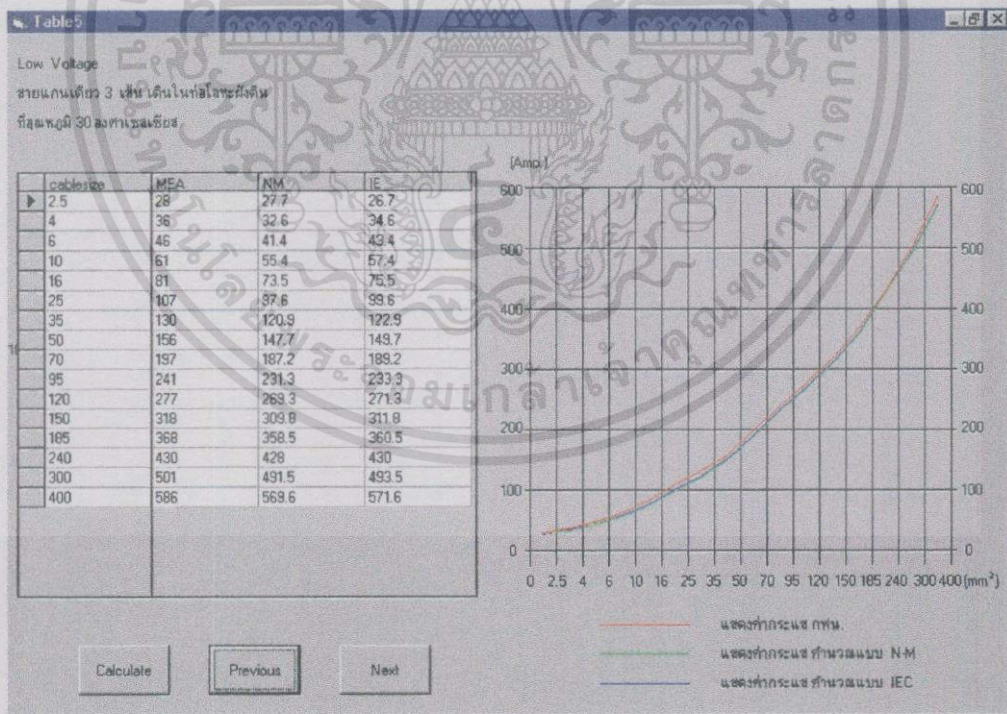


รูปที่ 7.7 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดียว 3 เส้นเดินในท่อโลหะฝังดินที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

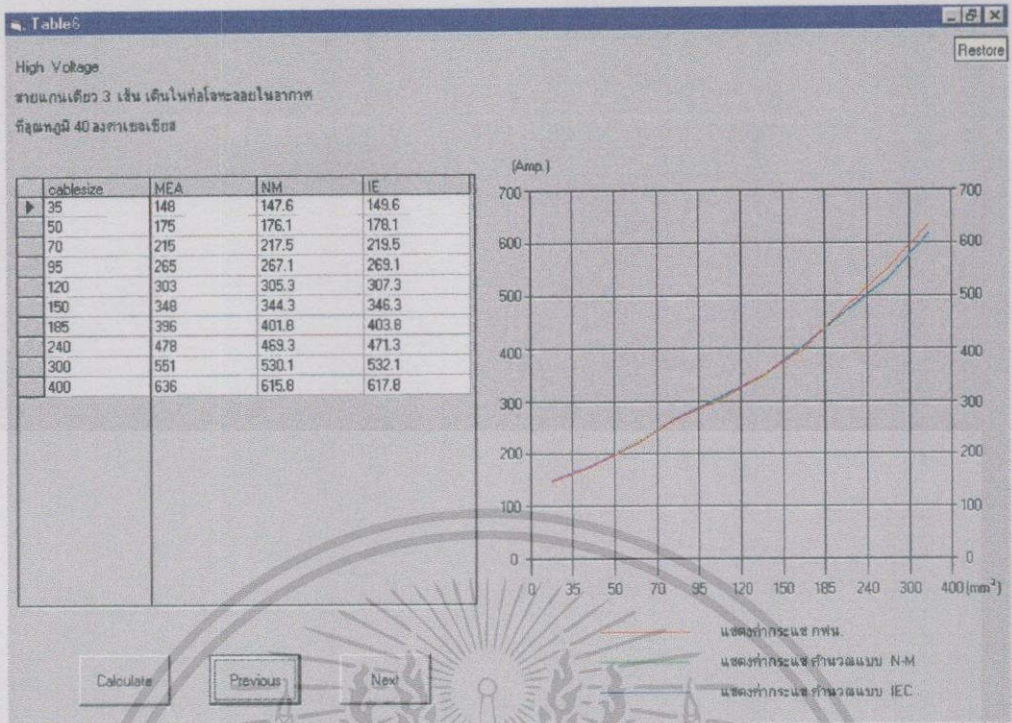


รูปที่ 7.8 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยวไม่เกิน 3 เส้น หรือสายไม่เกิน 3 แกน ผึงคืน โดยตรงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

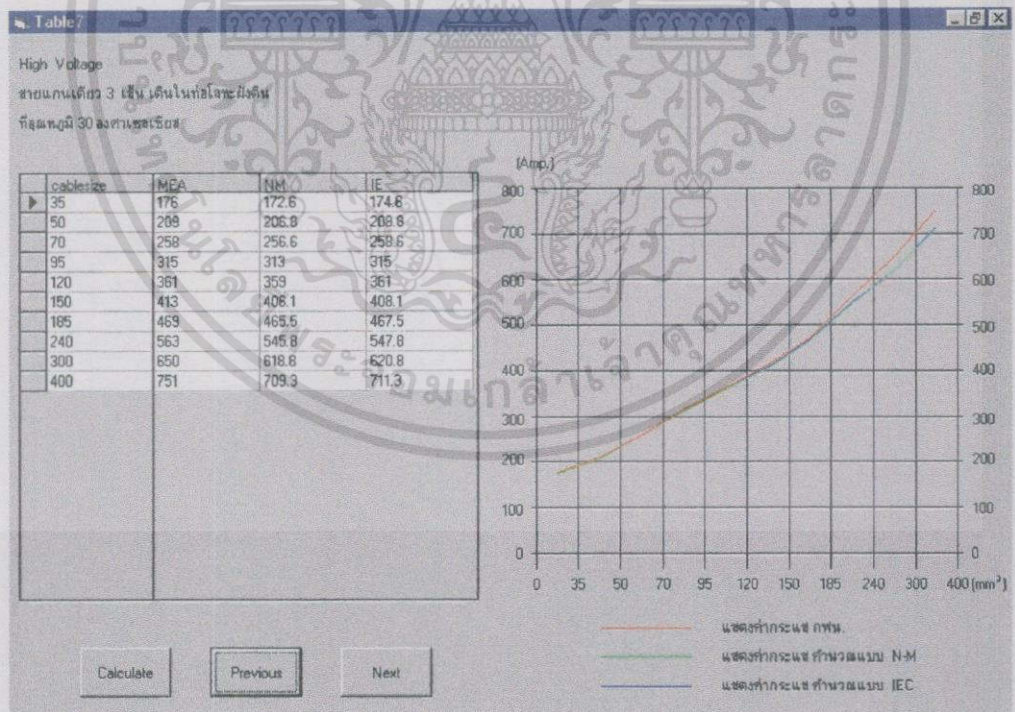


รูปที่ 7.9 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อ โลหะผึงคืนที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

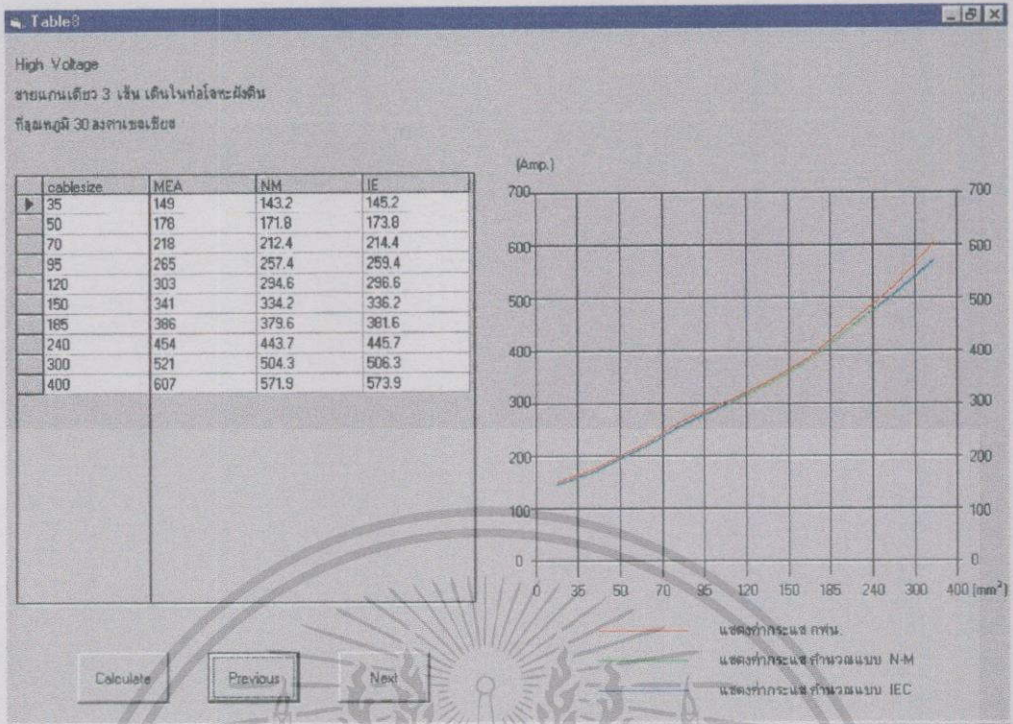


รูปที่ 7.10 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อ โลหะลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

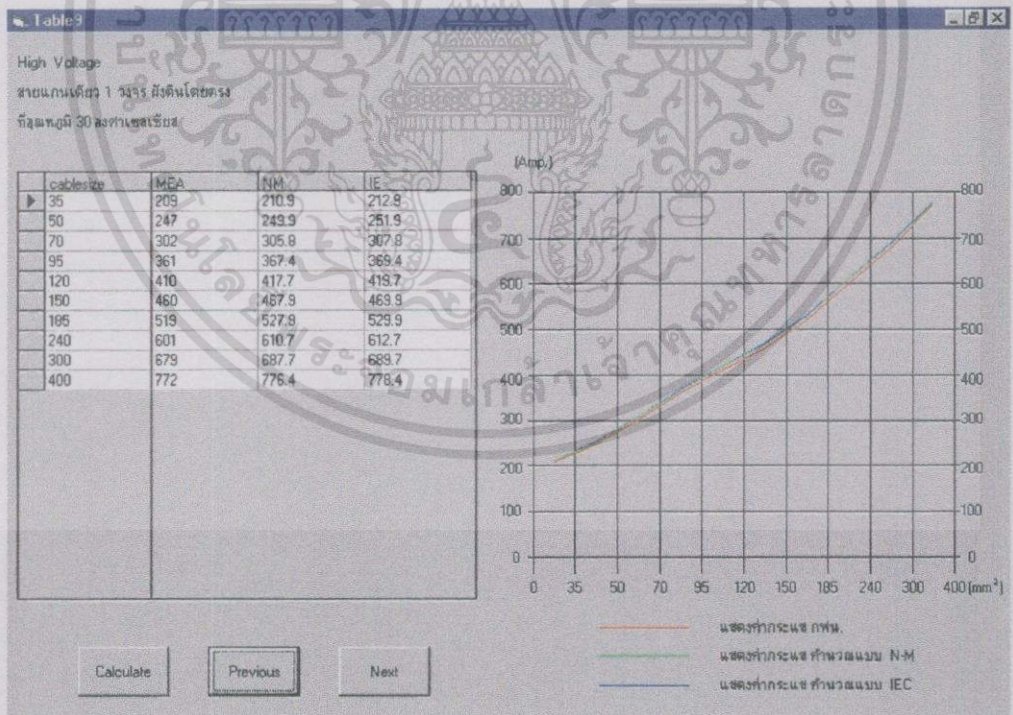


รูปที่ 7.11 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เดินในท่อ โลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.12 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 3 เส้น เส้นในทอโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7.13 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แกนเดี่ยว 1 ว่างร ผังดิน โดยตรงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเมนูหลัก (Main Menu) ดังรูปที่ 7.2 สามารถเลือกการคำนวณได้ 2 แบบ คือ

1. แบบ N-M (M.H. McGrath)
2. แบบ IEC

หลังจากเลือกรูปแบบการคำนวณแล้วคลิกเมาส์เข้าสู่เมนูย่อยดังรูปที่ 7.3 ซึ่งมีหัวข้อให้เลือกดังนี้

1. รูปแบบการคำนวณ
2. ระดับแรงดัน
3. รูปแบบการเดินสาย
4. ชนิดของตัวนำ

เมื่อเลือกเสร็จแล้วก็จะคลิกไปที่หน้าต่างต่อไปโดยคลิกที่รูปมือทางด้านขวาของโปรแกรม จะพบเมนูของ Input Data ดังรูปที่ 7.4 จากนั้นป้อนข้อมูลที่ปรากฏอยู่ในเมนูของ Input Data เสร็จแล้วสามารถเลือก การคำนวณ (Calculate) เริ่มโปรแกรมใหม่ (Again) ไปที่ตาราง (Table) และออกจากโปรแกรม (Exit)

ค่าที่ใช้ในการป้อนค่าในเมนู Input Data

1. Number of Conductor
2. Outside diameter of Conductor
3. Approximate outside diameter
4. Insulation thickness
5. Jacket thickness
6. Voltage
7. Frequency
8. Conductor Temperature
9. Ambient Temperature

ถ้ากด Calculate จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7.5 – 7.13 แล้วแต่ชนิดสาย สถานที่วางสาย อุณหภูมิที่ใช้

จากรูปที่ 7.7 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดียว 3 เส้นเดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.27 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.007 %

จากรูปที่ 7.8 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แกนเดียวไม่เกิน 3 เส้น หรือสาย

ไม่เกิน 3 แกน ฝังดินโดยตรงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางวิชาการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.014 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.006 %

จากรูปที่ 7.9 แสดงผลการคำนวณของสาย Low Voltage แขนเดียว 3 เส้นเดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.033 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.013 %

จากรูปที่ 7.10 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แขนเดียว 3 เส้น เดินในท่อโลหะลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.004 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.016 %

จากรูปที่ 7.11 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แขนเดียว 3 เส้น เดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.034 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.014 %

จากรูปที่ 7.12 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แขนเดียว 3 เส้น เดินในท่อโลหะฝังดินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.058 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.038 %

จากรูปที่ 7.13 แสดงผลการคำนวณของสาย High Voltage แขนเดียว 1 วงจร ฝังดินโดยตรงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยแสดงตาราง ขนาดของสายเคเบิล ค่ากระแสของกฟน. ค่ากระแสของ N-M ค่ากระแสของ IEC ตามลำดับ และแสดงกราฟค่ากระแสกับขนาดของสายเคเบิลของ กฟน. N-M และ IEC ตามลำดับ ซึ่งผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ N-M จะเท่ากับ 0.01 % และผลต่างของกระแสที่คำนวณได้ของค่ามาตรฐานกับ IEC จะเท่ากับ 0.039 %

## บทที่ 8

# สรุปผลการวิจัย

### 8.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์หาขนาดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ใช้ในช่องชาร์ฟ รางเดินสาย และ Duct Bank นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและตัวแปรจำนวนมาก เช่น โครงสร้างของสายเคเบิล อุณหภูมิและวิธีการติดตั้ง โดยพบว่าอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด ซึ่งสายเคเบิลที่สามารถรับกระแสได้สูง ๆ นั้น ย่อมหมายความว่าต้องสามารถระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกให้ได้อย่างรวดเร็วที่สุด ดังนั้นผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำมาผลิตรูปแบบโครงสร้างต้องระบายความร้อน ลักษณะการติดตั้งคือต้องการเดินสายลอยในอากาศ ฟังคืนโดยตรง ในช่องชาร์ฟ หรือ Duct Bank ซึ่งสมการและวงจรสมมูลย์สำหรับวิเคราะห์หาขนาดกระแสของสายเคเบิล โดยใช้มาตรฐานของ IEC และ Neher-McGrath ในการคำนวณเงื่อนไขสภาวะที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ในส่วนของตัวแปรที่จะนำมาวิเคราะห์ทำให้ต้องให้ข้อมูลมากซึ่งการพัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์หาขนาดของกระแสไฟฟ้า โดยใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรม Visual Basic สาเหตุที่เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Visual Basic พัฒนา เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ให้ความสะดวกและยืดหยุ่นต่อการเขียน โปรแกรมและพัฒนาโปรแกรมให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบันได้เป็นอย่างดี และเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

สาเหตุที่ทำให้ค่าที่คำนวณได้จากมาตรฐาน IEC มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าคำนวณของทฤษฎีของ J. H. Neher และ M. H. McGrath เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.2 ซึ่งใช้ในการออกแบบ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการคำนวณแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ

1. ตัวแปรที่เกี่ยวกับสายเคเบิล เช่น ความต้านทาน ความร้อนของฉนวนวัสดุ
2. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม คือการเลือกใช้สายขึ้นอยู่กับสถานที่ติดตั้ง
3. ตัวแปรซึ่งกำหนดให้เป็นมาตรฐานระหว่างผู้ผลิตกับผู้ใช้เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น ค่าสูงสุดของอุณหภูมิสำหรับตัวนำ

จากการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ทำให้ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลที่เปลี่ยนไปคือ อุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่สภาวะแวดล้อมต่างกันกระแสที่ได้ก็จะไม่เท่ากัน และเนื่องจากสายเคเบิลแต่ละชนิดมีความสามารถทนต่ออุณหภูมิไม่เท่ากัน จึงทำให้เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านสายเคเบิลต่างชนิดกัน ความสามารถในการรับกระแสมจะไม่เท่ากัน เพราะเมื่อกระแสไหลผ่านสายเคเบิลก็ย่อมต้องทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นจึงได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิของสายเคเบิลและเป็นที่มาของตัวแปรที่ใช้ในตัวโปรแกรมคือ ปัจจัยของอุณหภูมิ

ข้างเคียงอ้างอิง (Ambient temperature) ปัจจัยของอุณหภูมิที่เกิดจากสายเคเบิลข้างเคียง (Grouping)

และปัจจัยของอุณหภูมิที่ระบายผ่านความต้านทานความร้อนของดิน (Thermal resistivity) ในกรณีคิดตั้งได้ดิน ปัจจัยที่ต่อมาที่ทำให้ความสามารถในการรับกระแสต่ำลงคือ ขนาดของสายเคเบิล และความยาวของสายเคเบิล โดยผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม

ประโยชน์ที่จะนำไปใช้งานจริง เพื่อให้ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าที่ต้องออกแบบสายเคเบิลสำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งเปรียบเสมือนเส้นเลือดหล่อเลี้ยงอาคารสถานที่ให้สามารถใช้งานได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ สามารถใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นมาให้ออกแบบและเลือกใช้สายเคเบิลแรงดันต่ำและแรงดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเกิดประโยชน์สูงสุด

จากการป้อนข้อมูลจริงแล้วทำการเปรียบเทียบกับกรคำนวณด้วยมือ ซึ่งการคำนวณด้วยมือจะใช้เวลาในการคำนวณที่ยุ่งยากและช้ามาก ซึ่งมีโอกาสผิดพลาดได้มาก และจากการทำสอบด้วยคำนวณด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบกับกรคำนวณด้วยมือจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่การใช้งานโปรแกรมมีข้อดีคือสามารถตรวจสอบและแก้ไขค่าพารามิเตอร์บางตัวที่อาจเปลี่ยนแปลงไป

แนวทางในการพัฒนาต่อ เนื่องจากการออกแบบโปรแกรมในการวิจัยนี้ จะเน้นไปที่สายเคเบิลความดันต่ำและความดันปานกลาง สำหรับผู้ที่พัฒนาต่อไป สามารถพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในสายเคเบิลความดันสูงและสายเคเบิลชนิดอื่น ๆ ได้อีก ซึ่งจะต้องใช้ฐานข้อมูลเป็นจำนวนมาก การทำให้โปรแกรมสามารถหาค่ากระแสที่วางอยู่บนเคเบิลเกรย์และอื่น ๆ และกรณีสายเคเบิลที่เป็นแรงดันสูงพิเศษ

## บรรณานุกรม

- [1] การไฟฟ้านครหลวง “กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า,” พิมพ์ครั้งที่ 1, 2538
- [2] P. Pollak, “Neher-Mc Grath Calculations for Insulated Power Cables,” IEEE Trans. Ind. App., Vol. Ia-21, No.5, Sep./Oct., 1985.
- [3] J. Hegyi and A. Y. Klistoff, “Current-Carrying Capability for Industrial Underground Cable Installations,” IEEE Trans. Ind. App., Vol. 24, No. 1, Jan./Feb., 1988.
- [4] J.H. Neher and M.N. McGrath, “The calculations of the temperature rise and load capability of Cable systems,” AIEE Trans. Power App. Syst., Pt. III, Vol. 76, pp. 752, Oct., 1957.
- [5] Thai Yazaki Technical Data and Specification, TIS II-2518.
- [6] IEC Publication No. 287. Calculation of The Continuous Current Rating of Cables (100% Load Factor). Second Edition., 1982.
- [7] IEC Publication No. 364-5-523, Electrical Installations of Buildings Part 5: Selection and Erection of Electrical Equipment. Chapter 52, Wiring System, Section 523-Current-Carrying Capacities. First Edition, 1983.
- [8] IEC Publication No. 502. Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cables for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV. Fourth Edition, 1994.
- [9] IEC Publication No. 702. Mineral Insulated Cables With a Rated Voltage not Exceed 750 V., First Edition, 1981.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## โปรแกรมคำนวณกระแสของสายเคเบิล

```
Option Explicit
Dim Ret As Integer ' Scratch integer.
Dim Temp As String ' Scratch string.
Dim TermLine As Long ' Terminal Line Count
Dim hLogFile As Integer ' Handle of open log file.
Dim StartTime As Date ' Stores starting time for port timer
```

```
' Command Buffer
Dim Txcomm(10) As String
Dim Txcount As Integer
Dim EndComm As Boolean
Private Sub cmdText_KeyPress_OK(KeyAscii As Integer)
```

```
    'Debug.Print (cmdText.Text)
```

```
    Dim Start
```

```
    'Debug.Print (KeyAscii)
```

```
    'Check "enter" OR ";"
```

```
    If (KeyAscii = 13 Or KeyAscii = 59) Then
```

```
        'Send cmdText to Comport
```

```
            Txcomm(Txcount) = cmdText.Text
```

```
            cmdText.Text = "<"
```

```
            cmdText.SelStart = 1
```

```
            EndComm = True
```

```
        'Debug.Print Txcomm(Txcount)
```

```
        'Txcount = Txcount + 1
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdText_KeyPress_nec(KeyAscii As Integer)
```

```
    Dim Start 'Timer for <
```

```
    Dim CommSend As String
```

```
    'Check "enter" OR ";"
```

```
    If (KeyAscii = 13 Or KeyAscii = 59) Then
```

```
        'Send cmdText to Comport
```

```
            CommSend = cmdText.Text
```

```

Txcomm(Txcount) = cmdText.Text
cmdText.Text = "<"
cmdText.SelStart = 1
EndComm = True
'Send cmdText to Comport
Dim chrCount As Integer
Dim byteSend As Integer
chrCount = Len(CommSend)
'Send prompt "<"
byteSend = 1
'Debug.Print (Mid(CommSend, byteSend, 1))
MSComm1.Output = Mid(CommSend, byteSend, 1)
' prompt "<" Delay 1 sec.
Start = Timer ' Set start time.
Do While Timer < Start + 1
'DoEvents ' Yield to other processes.
Loop
'Send Remain Command
For byteSend = 2 To chrCount
'Debug.Print (Mid(CommSend, byteSend, 1))
MSComm1.Output = Mid(CommSend, byteSend, 1)
Next byteSend
MSComm1.Output = Chr$(59) 'Send End with semicolon;"
End If
End Sub
Private Sub cmdText_KeyPress(KeyAscii As Integer)
Dim Start 'Timer for <
Dim CommSend As String
MSComm1.Output = "C;"
'MSComm1.Output = Chr$(59) 'Send End with semicolon;"
MSComm1.Output = Chr$(13) 'Send End with enter
End Sub
Private Sub cmdText_KeyUp(KeyCode As Integer, Shift As Integer)
If (EndComm = True) Then ' key ;'
cmdText.Text = Left("<", 1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cmdText.SelStart = 1
End If
If (KeyCode = 38) Then
cmdText.Text = Txcomm(1)
cmdText.SelStart = Len(cmdText.Text)
End If
End
Comm = False
End Sub
Private Sub Command1_Click()
MSComm1.Output = Chr$(6) & Chr$(7) & "STATSSP;" & Chr$(3) & Chr$(7) & Chr$(6)
'MSComm1.Output = Chr$(59) 'Send End with semicolon';"
'MSComm1.Output = Chr$(13) 'Send End with enter
End Sub
Private Sub Form_Load()
Dim CommPort As String, Handshaking As String, Settings As String
PrevData = 0
LogFileLine = 0
On Error Resume Next
' Command prepare
Txcount = 1
cmdText.Text = "<"
cmdText.SelStart = 1
EndComm = False
' Set the default color for the terminal
txtTerm.SelLength = Len(txtTerm)
txtTerm.SelText = ""
txtTerm.ForeColor = vbBlack
TermLine = 1
' Set Title
App.Title = "Visual Basic Terminal"
' Set up status indicator light
' Center Form

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
frmTerminal.Move (Screen.Width - Width) / 2, (Screen.Height - Height) / 2
```

```
' Load Registry Settings
```

```
Settings = "9600,e,7,1" ' GetSetting(App.Title, "Properties", "Settings", "") '
```

```
frmTerminal.MSComm1.Settings\
```

```
If Settings <> "" Then
```

```
MSComm1.Settings = Settings
```

```
If Err Then
```

```
MsgBox Error$, 48
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
End If
```

```
CommPort = GetSetting(App.Title, "Properties", "CommPort", "") ' frmTerminal.MSComm1.CommPort
```

```
If CommPort <> "" Then MSComm1.CommPort = CommPort
```

```
Handshaking = GetSetting(App.Title, "Properties", "Handshaking", "")
```

```
'frmTerminal.MSComm1.Handshaking
```

```
If Handshaking <> "" Then
```

```
MSComm1.Handshaking = Handshaking
```

```
If Err Then
```

```
MsgBox Error$, 48
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
End If
```

```
Echo = GetSetting(App.Title, "Properties", "Echo", "") ' Echo
```

```
On Error GoTo 0
```

```
'For Test Only
```

```
Call mnuOpen_Click
```

```
Call mnuOpenLog_Click
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Resize()
```

```
' Resize the Term (display) control
```

```
txtTerm.Move 0, 0, frmTerminal.ScaleWidth, frmTerminal.ScaleHeight * 0.8
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

'- sbrStatus.Height - cmdText.Height * 1.5
'Resize the Command text
cmdText.Move 0, frmTerminal.ScaleHeight - sbrStatus.Height * 2, frmTerminal.ScaleWidth, 200
' Position the status indicator light
Frame1.Left = ScaleWidth - Frame1.Width * 1.5
End Sub
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
Dim Counter As L
If MSComm1.PortOpen Then
' Wait 10 seconds for data to be transmitted.
Counter = Timer + 10
Do While MSComm1.OutBufferCount
Ret = DoEvents()
If Timer > Counter Then
Select Case MsgBox("Data cannot be sent", 34)
' Cancel.
Case 3
Cancel = True
Exit Sub
' Retry.
Case 4
Counter = Timer + 10
' Ignore.
Case 5
Exit Do
End Select
End If
Loop

MSComm1.PortOpen = 0
End If

' If the log file is open, flush and close it.
If hLogFile Then mnuCloseLog_Click
End
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Private Sub mnuCloseLog_Click()
    ' Close the log file.
    Close hLogFile
    hLogFile = 0
    frmTerminal.Caption = "Visual Basic Terminal"
End Sub

' This procedure sets the InputLen property, which determines how
' many bytes of data are read each time Input is used
' to retrieve data from the input buffer.
' Setting InputLen to 0 specifies that
' the entire contents of the buffer should be read.
Private Sub mnuInputLen_Click()
    On Error Resume Next

    Temp = InputBox$("Enter New InputLen:", "InputLen", Str$(MSComm1.InputLen))
    If Len(Temp) Then
        MSComm1.InputLen = Val(Temp)
        If Err Then MsgBox Error$, 48
    End If
End Sub

' Toggles the state of the port (open or closed).
Private Sub mnuOpen_Click()
    On Error Resume Next

    Dim OpenFlag

    MSComm1.PortOpen = Not MSComm1.PortOpen
    If Err Then MsgBox Error$, 48

    OpenFlag = MSComm1.PortOpen

    If MSComm1.PortOpen Then
        ' Enable dial button and menu item

```

```
' Enable hang up button and menu item
```

```
sbrStatus.Panels("Settings").Text = "Settings: " & MSComm1.Settings & _
```

```
" Line : " & LogFileLine
```

```
StartTiming
```

```
Else
```

```
sbrStatus.Panels("Settings").Text = "Settings: "
```

```
StopTiming
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub mnuOpenLog_Click()
```

```
Dim replace
```

```
Dim DateText, TimeText
```

```
On Error Resume Next
```

```
DateText = Now
```

```
TimeText = Now
```

```
Temp = Format(DateText, "mmd") ' + Format(TimeText, "hhmm")
```

```
Temp = Temp + ".log"
```

```
' Temp = "test.log"
```

```
' Open the log file.
```

```
hLogFile = FreeFile
```

```
Open Temp For Binary Access Write As hLogFile
```

```
If Err Then
```

```
MsgBox Error$, 48
```

```
Close hLogFile
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

hLogFile = 0
Exit Sub
Else
' Go to the end of the file so that new data can be appended.
Seek hLogFile, LOF(hLogFile) + 1
End If
frmTerminal.Caption = "ISAC Terminal ->LOG FILE: " + Temp
End Sub

' The OnComm event is used for trapping communications events and errors.
Private Static Sub MSComm1_OnComm()
Dim EVMsg$
Dim ERMsg$
' Branch according to the CommEvent property.
Select Case MSComm1.CommEvent
' Event messages.
Case comEvReceive
Dim Buffer As Variant
Buffer = MSComm1.Input
'Debug.Print "Receive - " & StrConv(Buffer, vbUnicode)
PrevData = StrConv(Buffer, vbUnicode)
' Debug.Print PrevData

ShowData txtTerm, (StrConv(Buffer, vbUnicode))
Case comEvSend
Case comEvCTS
EVMsg$ = "Change in CTS Detected"
Case comEvDSR
EVMsg$ = "Change in DSR Detected"
Case comEvCD
EVMsg$ = "Change in CD Detected"
Case comEvRing
EVMsg$ = "The Phone is Ringing"
Case comEvEOF
EVMsg$ = "End of File Detected"

```

```

' Error messages.
Case comBreak
    ERMsg$ = "Break Received"
Case comCDTO
    ERMsg$ = "Carrier Detect Timeout"
Case comCTSTO
    ERMsg$ = "CTS Timeout"
Case comDCB
    ERMsg$ = "Error retrieving DCB"
Case comDSRTO
    ERMsg$ = "DSR Timeout"
Case comFrame
    ERMsg$ = "Framing Error"
Case comOverrun
    ERMsg$ = "Overrun Error"
Case comRxOver
    ERMsg$ = "Receive Buffer Overflow"
Case comRxParity
    ERMsg$ = "Parity Error"
Case comTxFull
    ERMsg$ = "Transmit Buffer Full"
Case Else
    ERMsg$ = "Unknown error or event"
End Select

If Len(EVMsg$) Then
    ' Display event messages in the status bar.
    sbrStatus.Panels("Status").Text = "Status: " & EVMsg$

    ' Enable timer so that the message in the status bar
    ' is cleared after 2 seconds
    Timer2.Enabled = True

ElseIf Len(ERMsg$) Then
    ' Display event messages in the status bar.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sbrStatus.Panels("Status").Text = "Status: " & ERMMsg$

' Display error messages in an alert message box.
Beep
Ret = MsgBox(ERMMsg$, 1, "Click Cancel to quit, OK to ignore.")

' If the user clicks Cancel (2)...
If Ret = 2 Then
    MSCComm1.PortOpen = False ' Close the port and quit.
End If

' Enable timer so that the message in the status bar
' is cleared after 2 seconds
Timer2.Enabled = True
End If
End Sub

' This procedure adds data to the Term control's Text property.
' It also filters control characters, such as BACKSPACE,
' carriage return, and line feeds, and writes data to
' an open log file.
' BACKSPACE characters delete the character to the left,
' either in the Text property, or the passed string.
' Line feed characters are appended to all carriage
' returns. The size of the Term control's Text
' property is also monitored so that it never
' exceeds MAXTERMSIZE characters.
Private Static Sub ShowData(Term As Control, Data As String)
    On Error GoTo Handler
    Const MAXTERMSIZE = 16000
    Dim TermSize As Long, i
    Dim j As Integer

    ' Make sure the existing text doesn't get too large.
    TermSize = Len(Term.Text)

```

```

If TermSize > MAXTERMSIZE Then
    Term.Text = Mid$(Term.Text, 4097)
    TermSize = Len(Term.Text)
End If

```

```

' Point to the end of Term's data.
Term.SelStart = TermSize

```

```

' Filter/handle BACKSPACE characters.

```

```

Do
    i = InStr(Data, Chr$(8))
    If i Then
        If i = 1 Then
            Term.SelStart = TermSize - 1
            Term.SelLength = 1
            Data = Mid$(Data, i + 1)
        Else
            Data = Left$(Data, i - 2) & Mid$(Data, i + 1)
        End If
    End If
End If
Loop While i

```

```

' Eliminate line feeds.

```

```

Do
    i = InStr(Data, Chr$(10))
    If i Then
        Data = Left$(Data, i - 1) & Mid$(Data, i + 1)
    End If
Loop While i

```

```

' Make sure all carriage returns have a line feed.

```

```

i = 1
Do

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i = InStr(i, Data, Chr$(13))
If i Then
    Data = Left$(Data, i) & Chr$(10) & Mid$(Data, i + 1)
    i = i + 1
sbrStatus.Panels("Settings").Text = "Settings: " & MSComm1.Settings & _
" Line : " & LogFileLine
LogFileLine = LogFileLine + 1
    If LogFileLine > 200 Then
        Call mnuCloseLog_Click
        LogFileLine = 0
        Call mnuOpenLog_Click
    End If
End If

Loop While i

' Add the filtered data to the SelText property.
Term.SelText = Data

' Log data to file if requested.
If hLogFile Then
    i = 2
    Do
        Err = 0
        Put hLogFile, , Data
    If Err Then
        i = MsgBox(Error$, 21)
        If i = 2 Then
            mnuCloseLog_Click
        End If
    End If
    Loop While i <> 2
End If

Term.SelStart = Len(Term.Text)

Exit Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Handler:

MsgBox Error\$

Resume Next

End Sub

Private Sub Timer2\_Timer()

sbrStatus.Panels("Status").Text = "Status: "

Timer2.Enabled = False

End Sub

' Keystrokes trapped here are sent to the MSComm

' control where they are echoed back via the

' OnComm (comEvReceive) event, and displayed

' with the ShowData procedure.

Private Sub txtTerm\_KeyPress\_x(KeyAscii As Integer)

' If the port is opened...

If MSComm1.PortOpen Then

' Send the keystroke to the port.

MSComm1.Output = Chr\$(KeyAscii)

' Unless Echo is on, there is no need to

' let the text control display the key.

' A modem usually echos back a character

If Not Echo Then

' Place position at end of terminal

txtTerm.SelStart = Len(txtTerm)

KeyAscii = 0

End If

End If

End Sub

Private Sub Timer1\_Timer()

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

' Display the Connect Time
sbrStatus.Panels("ConnectTime").Text = Format(Now - StartTime, "hh:nn:ss") & " "
End Sub

' Call this function to start the Connect Time timer
Private Sub StartTiming()
    StartTime = Now
    Timer1.Enabled = True
End Sub

' Call this function to stop timing
Private Sub StopTiming()
    Timer1.Enabled = False
    sbrStatus.Panels("ConnectTime").Text = ""
End Sub

```



## ภาคผนวก ข

## ข้อกำหนดการใช้งานของสายไฟฟ้าที่ผลิตตาม มอก. 11-2531

(อุณหภูมิใช้งาน 70 องศาเซลเซียส)

สายไฟฟ้าตาม มอก. 11-2531 ตารางที่ 1	แรงดันที่กำหนด (โวลต์)	สถานที่ใช้งาน	ลักษณะการติดตั้ง
1	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เดินลอย (open wiring) ต้องยึดด้วยวัสดุฉนวน</li> <li>- เดินในท่อสายในสถานที่แห้ง</li> <li>- ห้ามร้อยท่อฝังดินหรือฝังดินโดยตรง</li> </ul>
2	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	<p>สายกลม</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เดินลอย</li> <li>- เดินฝังในผนังปูนฉาบ</li> <li>- เดินซ่อน (Conceal) ในผนัง แต่ต้องป้องกันไม่ให้สายมีโอกาสเช่น้ำ</li> <li>- ห้ามฝังดินโดยตรง</li> </ul> <p>สายแบน</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เดินเกาะผนัง</li> <li>- เดินซ่อน (Conceal) ในผนัง</li> <li>- ห้ามฝังดินโดยตรง</li> <li>- เดินฝังในผนังปูนฉาบ</li> </ul>
4	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เดินลอย (open wiring) ต้องยึดด้วยวัสดุฉนวน</li> <li>- เดินในท่อสายในสถานที่แห้ง</li> <li>- ห้ามฝังดินโดยตรง</li> <li>- ร้อยท่อฝังดินได้แต่ต้องป้องกันไม่ให้ น้ำเข้าไปในท่อ และป้องกันไม่ให้สายมีโอกาสเช่น้ำ</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟฟ้าตาม มอก. 11-2531 ตารางที่ 1	แรงดันที่กำหนด (โวลต์)	สถานที่ใช้งาน	ลักษณะการติดตั้ง
5	750	ใช้ในสถานที่แห้ง	สายกลม - เดินลอย - เดินฝังในผนังปูนฉาบ - เดินซ่อน (Conceal) ในผนัง แต่ต้องป้องกันไม่ให้สายมี โอกาสชนน้ำ - ห้ามฝังดินโดยตรง สายแบน - เดินเกาะผนัง - เดินซ่อน (Conceal) ในผนัง - ห้ามฝังดินโดยตรง เดินฝังในผนังปูนฉาบ
6	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้งานได้ทั่วไป - ฝังดินโดยตรง
7	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้งานได้ทั่วไป - ฝังดินโดยตรง
8	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้งานได้ทั่วไป - ฝังดินโดยตรง
9	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้งานได้ทั่วไป - ฝังดินโดยตรง
10	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้ต่อเข้าเครื่องใช้ไฟฟ้า ชนิดหีบขกได้และใช้ต่อ เข้าดวงโคม
11	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- เดินเกาะผนัง - เดินฝังในผนังปูนฉาบ - เดินซ่อนในผนัง - ห้ามร้อยท่อฝังดินหรือฝัง ดินโดยตรง
12	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้งานได้ทั่วไป - ห้ามฝังดินโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อื่นใดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟฟ้าตาม มอก. 11-2531 ตารางที่ 1	แรงดันที่กำหนด (โวลต์)	สถานที่ใช้งาน	ลักษณะการติดตั้ง
13	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- เดินเกาะผนัง - เดินซ่อน (conceal) ในผนัง - เดินฝังในผนังปูนฉาบ - ห้ามฝังดินโดยตรง
14	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้งานได้ทั่วไป - ฝังดินโดยตรง
15	750	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้ต่อเข้าเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องใช้ไฟฟ้า
16	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้ต่อเข้าเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าและใช้ต่อเข้าดวงโคม
17	300	ใช้ในสถานที่แห้ง และสถานที่เปียก	- ใช้ต่อเข้าเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องใช้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

ไชยา สายพันธ์ สุทธิ บรรจงจิตร “การวิเคราะห์ขนาดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ใช้ในช่องชาร์ฟ  
รางเดินสาย และ ท่อร้อยสายใต้ดิน,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, หน้า 95-100,  
มิถุนายน 2543



# การวิเคราะห์ขนาดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ใช้ในช่องชาร์ฟ รางเดินสาย และ ท่อร้อยสายใต้ดิน

## Analysis of Ampacity for cable in shaft wire way and Duct Bank

ไชยา สายัณห์

ศุทธิ บรรจงจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ขนาดของสายเคเบิล มีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะจะเกี่ยวข้องกับขนาดของโหลด และยังเกี่ยวข้องกับลักษณะสภาพของการใช้งานด้วย ในบทความฉบับนี้จะเป็นการแสดงสมการสำเร็จรูป เพื่อแสดงวิธีการหาขนาด กระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลในลักษณะของการใช้งาน และได้แสดงไว้ในตารางประกอบของ กฟน. และ กฟภ. ซึ่งการแสดงเป็นสมการสำเร็จรูปจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ สามารถนำไปประยุกต์กับงานลักษณะอื่น ๆ เช่นการใช้งานในช่องชาร์ฟ รางเดินสายและ Duct Bank โดยอาศัยหลักการของงานวิจัยฉบับนี้

### Abstract

Normally the size of the cable is important. This is because it is related to the load and also to physical working environment. In this paper, the conceptual equations are presented in order to determine the amount of current conducted on the cable. Also, they are tabulated in the association with MEA and PEA. The illustration in the forms of equations is useful for users in order to apply for various applications. For example the applied work in sharp, conduit, duct bank via the concept of this research.

### 1. บทนำ

การคำนวณขนาดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิล ที่ติดตั้งในอากาศหรือฝังดิน มักจะพิจารณาจาก บทความวิจัยที่เผยแพร่ และมาตรฐานสากล คือ Neher-McGrath [1-3] และ IEC Publication 287 [5-8] แต่ในลักษณะการติดตั้งของสายเคเบิลมีลักษณะการใช้งานที่นอกเหนือจากการเผยแพร่ของเอกสารดังกล่าว อีกทั้ง กฟน. และ กฟภ. ก็ได้นำเสนอขนาดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ติดตั้ง ในลักษณะต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ แต่ในกรณีที่มีผู้ที่มีความสนใจที่จะนำสายเคเบิล ไปใช้กับการติดตั้งที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้ในตารางขนาดกระแสของ กฟน. และ กฟภ. แล้วขอมอบทำได้ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะแสดงการคำนวณขนาดกระแส

ไฟฟ้า เพื่อใช้กับการติดตั้งในลักษณะต่างๆ เพื่อจะเป็นแนวทางให้ผู้สนใจ สามารถนำหลักการไปคำนวณได้ด้วยตนเอง

### 2. ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิล

การคำนวณขนาดกระแสในสายเคเบิลได้นำมาตรฐาน 2 ระบบมาคือ

#### ก. มาตรฐาน IEC287

ในการคำนวณมาตรฐาน IEC287. นี้ ใช้ในสภาวะที่สายเคเบิล อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ในขณะที่ทำงานในช่องชาร์ฟ รางเดินสายหรือ Duck bank “Steady State” หมายถึงค่ากระแสคงที่ที่ต่อเนื่อง (100% load factor) ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรสำคัญที่มีผลต่อการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบ มี 3 ประเภท คือ

1. คุณสมบัติของสายเคเบิล เช่น ความต้านทาน ความร้อน
  2. สภาวะแวดล้อมในบริเวณที่ติดตั้ง สายเคเบิล
  3. จากการประชุมระหว่างผู้ผลิต และผู้ใช้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน
- สมการต่อไปนี้เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณขนาดของกระแสเคเบิล

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

โดยที่

$I_{AC}$  = ขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดของสายเคเบิล (Amp)

$\Delta\theta$  = ค่าอุณหภูมิของตัวนำสูงสุดขณะทำงาน ( $^{\circ}C$ )

$W_d$  = ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ต่อหน่วยความยาว ต่อเมตร (W/m)

$N$  = จำนวน ตัวนำในสายเคเบิล (core)

$R$  = ความต้านทานในกระแสสลับของตัวนำที่ อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$\lambda_1, \lambda_2$  = อัตราส่วนในการสูญเสียในMetallic sheath และ armour รวมกันเป็นค่าสูญเสียของตัวนำ

$T_1$  = ความต้านทานความทานร้อนระหว่างตัว นำและ sheath (km/w)

$T_2$  = ความต้านทานความร้อนระหว่าง metal sheath กับเปลือกโลหะ (km/w)

$T_3$  = ความต้านทานความร้อนของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิล (external serving) (kw/w)

$T_4$  = ความต้านทานความร้อน ของผิวของฉนวนเปลือกนอกของสายเคเบิลกับท่อ (kw/w)

ในการคำนวณนั้นสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (2) ถึงสมการที่ (11) จึงทำให้ทราบว่าตัวแปรแต่ละตัวมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะต่าง ๆ พอสรุปได้ดังนี้

- ตัวแปรที่เป็นตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิด 3 แกนและชนิด 1 แกน

- การวางสายแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ แบบ trefoil และแบบ flat

- ตัวนำที่มีขนาดใหญ่ต้องนำค่า F factor มาคำนวณด้วย

- วัสดุที่ใช้ทำฉนวนของสายเคเบิล

- ลักษณะตำแหน่งการวางสายเคเบิลในท่อ (duct bank)

- ชนิดของท่อ (duct bank)

เมื่อลักษณะและคุณสมบัติที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นนี้มีการเปลี่ยนแปลง สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ก็ต้องนำไปแทนในสมการที่ (1) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1.1 ความต้านทานไฟกระแสสลับของตัวนำที่ R (resistance of conductor)

$$R = R'(1 + Y_s + Y_p) \quad (2)$$

$R$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวนำที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$R'$  = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่อุณหภูมิขณะทำงานสูงสุด ( $\Omega/m$ )

$Y_s$  = the skin effect factor

$Y_p$  = the proximity factor

ค่า dielectric loss จะมีความสำคัญก็คือเมื่อ ค่าความต่างศักย์ของพื้นดินมีค่าเกิน 30 kV สำหรับฉนวนกระดาษ หรือ 6 kV สำหรับเคเบิลที่ใช้ PVC เป็นฉนวนที่มี 3 แกน และแกนเดียว ความต่างศักย์ของ Duty Rubber และ Polyethylene ก็สามารพิจารณาได้ภายใต้เงื่อนไขนี้ ค่า dielectric loss ต่อหนึ่งหน่วยความยาวในเฟสเดียว

$$W_d = \omega C U_o^2 \tan\delta \quad (3)$$

$\tan\delta$  = loss factor of insulation

$\omega$  =  $2\pi f$  = (1/s)

$C$  = ความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาว (F/cm)

$U_o$  = ค่าแรงดันเมื่อวัดเทียบกับดิน (volt)

ค่ากำลังสูญเสียใน sheath มีสาเหตุมาจากกระแสรอบ ๆ และกระแสที่ไหลวน ดังนั้น

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\lambda_1$  = ค่าการสูญเสียในเปลือกนอกหรือตะแกรง  
 $\lambda'_1$  = ค่าการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม  
 $\lambda''_1$  = ค่าการสูญเสียเนื่องจากกระแสสวน

$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (8)$$

2.2.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน  $T_2$

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} e_T \ln \left[ 1 + \frac{2t^2}{D_s} \right] \quad (9)$$

2.1.2 ค่าการสูญเสียในเกราะโลหะและส่วนที่เสริมให้แข็งแรงของสายเคเบิล

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2 \quad (5)$$

$t_2$  = ความหนาของฉนวนระหว่าง vetal sheath กับ เปลือกนอกของสายเคเบิล (mm)

$D_s$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของ metal sheath (mm)

$\lambda_2$  = ค่าการสูญเสียในเปลือกโลหะหุ้มสายไฟและส่วนที่เสริมให้แข็งแรง

2.2.3 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน  $T_3$

$\lambda'_2$  = ค่าการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} e_T \ln \left[ 1 + \frac{2t_3}{D'_s} \right] \quad (10)$$

$\lambda''_2$  = ค่าการสูญเสียเนื่องจากกระแสสวน

$t_3$  = ความหนาของเปลือกนอกของสายเคเบิล

$D'_s$  = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเกราะโลหะ

2.2 การคำนวณหาค่าความสูญเสียเนื่องจากผลของความร้อนที่มีต่อส่วนต่างๆของสายเคเบิลใต้ดิน

2.2.4 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน  $T_4$

2.2.1 ความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับ metal sheath, TI เคเบิลแกนเดี่ยว (single-core cables)

(External thermal resistance)

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (6)$$

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (11)$$

$d_c$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

$T_4'$  = ค่าความต้านทานความร้อนของอากาศในช่องว่างระหว่างผิวของสายเคเบิลกับผิวในของท่อ (Duct Bank) หรือท่อเหล็ก (pipe)

$t_1$  = ความหนาของฉนวนระหว่างตัวนำกับ metal sheath (mm)

$T_4''$  = ค่าความต้านทานความร้อนของตัวท่อ

$T_4'''$  = ค่าความต้านทานความร้อนภายนอกท่อ

$\rho_T$  = ความต้านทานความร้อนของฉนวน (K.m/w)

ข. Neher-McGrath (NM) method

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} G \quad (7)$$

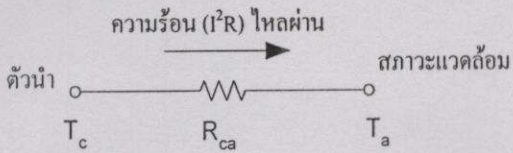
เนื่องจากเมื่อกระแสถูกผ่านเข้าไปในตัวนำ จะทำให้เกิดความร้อน ( $I^2R$ ) ขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะแผ่กระจายออกไปยังอากาศรอบ ๆ ตัวนำหรือผ่านไปสู่ดินในกรณีที่ตัวนำเป็นแบบฝัง เนื่องจากระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถูกจำกัดโดยพิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ของฉนวนเคเบิล ดังนั้นพิกัดอุณหภูมิของฉนวนจึงเป็นขีดจำกัดกระแสใช้งานของสายเคเบิล ความร้อน  $I^2R$  ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล นำมาเขียนเป็น วงจรสมมูลย์ความต้านทานความร้อนได้ดังรูป 1

$G$  = แฟกเตอร์เรซาคณิต

- เคเบิล 3 แกน แบบ screen (Three core cables metal tape screen-type)

เคเบิลแบบนี้ พิจารณาเช่นเดียวกับในกรณีแบบ belt แต่ค่า  $t_1/t = 0.5$  ดังนั้นจึงมีผลต่อตัวนำความร้อนของ metal sheath จะมีผลให้ค่า  $T_1$  ต้องคูณกับค่าแฟกเตอร์  $K$  ซึ่งเราเรียกว่า screening factor ดังนั้น

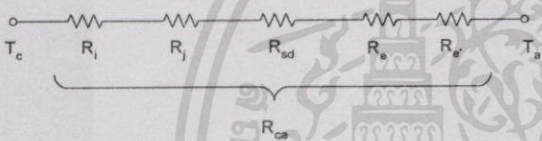
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของความร้อนที่เกิดขึ้นบนตัวนำ

เมื่อ  $R_{ca}$  = ความต้านทานเชิงความร้อน (Thermal Resistance)

โดยที่ความต้านทานเชิงความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือวัสดุ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการระบายความร้อนนอกจากนี้ถ้าจะพิจารณาไปถึงลักษณะของการใช้งาน ตลอดจนโครงสร้างของสายเคเบิลเองแล้วจะสามารถแสดงถึงความต้านทานเชิงความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของความต้านทานเชิงความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นพิจารณาทั้งโครงสร้างของสายเคเบิลและลักษณะของการใช้งานประกอบกัน

ตารางที่ 1 ความหมายของตัวแปรในวงจรสมมูลย์ ทางความร้อน

Symbol	Parameter	Unit
$T_c$	conductor temperature	$^{\circ}C$
$T_a$	ambient temperature	in
$R_c$	conductor resistance	$\mu\Omega/\text{ft}$
	Thermal resistance	$^{\circ}C.\text{ft}/W$
$R_i$	insulation	
$R_j$	jacket	
$R_{sd}$	between cable and surrounding enclosure	
$R_d$	duct wall	
$R_c$	between cable and ambient air	
$R'_c$	earth	
$R_{ca}$	total between conductor and ambient	

- สมการคำนวณหาค่ากระแส :

ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำ (W/ft) ถูกด้วย ความต้านทานความร้อนจากตัวนำถึงอากาศรอบข้าง ( $C \text{ ft}/W$ ) แสดงถึงระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวนำจาก อุณหภูมิรอบข้างนั้นคือ

$$(I^2 R_{ac}) \times R_{ca} = T_c - T_a \quad (12)$$

หรือ 
$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{acx} R_{ca}}} \quad (13)$$

(I มีหน่วยเป็น kA เพราะ  $R_{ac}$  มีหน่วยเป็น  $\mu\Omega/\text{ft}$ )

สมการที่ (13) แสดงถึงกระแสของตัวนำซึ่งสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิเมื่อมีรูปแบบการใช้งานแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นค่ากระแสที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ ฉนวนของสายเคเบิลนั้นๆ จะยอมรับได้

- สมการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)
- ความต้านทานความร้อนของฉนวน

$$R_i = 0.012 \pi \log D_i / D_c \quad (14)$$

เมื่อ  $D_c$  เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ  
 $D_i$  เส้นผ่าศูนย์กลางรวมฉนวน  
 $\rho_i$ : ความต้านทานความร้อนของวัสดุ

- ความต้านทานความร้อนของ jacket

$$R_j = 0.0104 \rho_j n' \frac{t}{D-t} \quad (15)$$

เมื่อ  $t$  = ความหนาของ jacket  
 $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางรวม jacket  
 $n'$  = จำนวนตัวนำกระแสภายใน  $D$   
 $R_j$  = ความต้านทานความร้อนของผนังท่อ

- ความต้านทานความร้อนของสายเคเบิล ใน Ducts

$$R_{sd} = \frac{nA}{D_{s'} + B} \quad (16)$$

เมื่อ  $n'$  = จำนวนตัวนำกระแสภายใน  $D_s$

$D_{s'}$  = effective diameter ของสายเคเบิลใน duct

$A', B'$  = ค่าคงที่ ในตาราง

- ความต้านทานความร้อนของ cables, conduit หรือ duct เมื่อลอยอยู่ในอากาศ

$$Re = \frac{9.5n}{1 + 1.7D_{s'}(\epsilon + 0.41)} \quad (17)$$

เมื่อ  $D_{s'}$  = effective diameter ของ cables conduit หรือ duct

$\epsilon$  = effective diameter surface emissivity

ตารางที่ 2 ความต้านทานความร้อนของวัสดุต่างๆ

Material	$\rho_i$ °C ft/w
Paper insulator(solid type)	700
Varnished insulator	600
Paper insulator(other type)	500
Rubber and rubber-like	500
Jute and textile protective conversing	500
Fiber duct	480
Polyethylene	450
Transite duct	200
Somastic	100
Concrete	85

ตารางที่ 3 ค่าคงที่  $A', B'$

Condition	$A'$	$B'$
In metallic conduit	3.2	0.19
In fiber duct in air	5.6	0.33
In fiber duct in concrete	4.6	0.27
In metallic duct in air	4.4	0.26
In metallic duct in concrete	3.7	0.22
Gas-filled pipe cable at 200lb/in2	2.1	0.68
Oil-filled pipe cable	2.1	0.45

- สายเคเบิลใน Trays

ในการคำนวณหาขนาดของสายเคเบิลใน Trays ได้จากมาตรฐาน ICEA 1986 ในการทำให้กระแสสมคูนใน Trays จากสมการที่ 9 จะได้

$$W_{total} = \sum_{i=1}^N n_i R_i I_i^2 = h_s A_s (\theta_s - \theta_{amb}) + \sigma \epsilon A_s (\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}) \quad (18)$$

เมื่อ  $n_i$  คือจำนวนสายเคเบิลในกลุ่มย่อยของขนาดเดียวกัน

### 3. ผลการคำนวณ

จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบได้ดังนี้

- สาย XLPE แแกนเดี่ยวเดินใน Duct Bank ฟังดิน

พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	จากการวิเคราะห์		ไทยสาขาภิ Amp.
	M. H. McGrath	I.E.C.	
120	295	310	305
150	315	310	350
185	320	335	410
240	326	346	490
300	540	552	565
400	635	645	655

- สาย XLPE แแกนเรียงจำนวน 3 เส้นเดินบนราง (Wire Way)

พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	จากการวิเคราะห์		ไทยสาขาภิ Amp.
	M. H. McGrath	I.E.C.	
25	134	136	125
35	153	163	150
50	187	190	185
70	240	252	230
95	295	289	280
120	335	345	325
150	345	355	370

#### 4. สรุป

จากการวิเคราะห์หาขนาดกระแสไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ใช้ในช่องชาร์ฟ รางเดินสาย และ Duct Bank นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและตัวแปรจำนวนมาก เช่น โครงสร้างของสายเคเบิล อุณหภูมิและวิธีการติดตั้ง โดยพบว่าอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด ซึ่งสายเคเบิลที่สามารถรับกระแสได้สูง ๆ นั้น ย่อมหมายความว่าต้องสามารถระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกให้ได้อย่างรวดเร็วอย่างที่สุด ดังนั้นผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำมาผลิตรูปแบบโครงสร้างต้องระบายความร้อน ลักษณะการติดตั้งคือ การเดินสายลอยในอากาศ ผังดินโดยตรง ในช่องชาร์ฟ หรือ Duct Bank ซึ่งสมการและวงจรสมมูลย์สำหรับการวิเคราะห์ขนาดกระแสของสายเคเบิลในบทความนี้เป็นเพียงแนวทางในการวิเคราะห์ที่ละเอียดยิ่งขึ้นต่อไป เนื่องจากเงื่อนไขสภาวะที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ในส่วนของตัวแปรที่จะนำมาวิเคราะห์ทำให้ต้องให้ข้อมูลมากซึ่งการพัฒนาในขั้นต่อไปจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยต่อไป

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Pollak, "Neher-Mc Grath Calculations for Insulated Power Cables," IEEE Trans. Ind. App., Vol. Ia-21, No.5, Sep./Oct., 1985.
- [2] J. Hegyi and A. Y. Klistoff, "Current-Carrying Capability for Industrial Underground Cable Installations," IEEE Trans. Ind. App., Vol. 24, No. 1, Jan./Feb., 1988.
- [3] J.H. Neher and M.N. McGrath, "The calculations of the temperature rise and load capability of Cable systems," AIEE Trans. Power App. Syst., Pt. III, Vol. 76, pp. 752, Oct., 1957.
- [4] Thai Yazaki Technical Data and Specification, TIS II-2518.
- [5] IEC Publication No. 287. Calculation of The Continuous Current Rating of Cables (100% Load Factor). Second Edition., 1982.
- [6] IEC Publication No. 364-5-523, Electrical Installations of Buildings Part 5: Selection and Erection of Electrical Equipment. Chapter 52, Wiring System, Section 523-Current-Carrying Capacities. First Edition, 1983.
- [7] IEC Publication No. 502. Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cables for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV. Fourth Edition, 1994.
- [8] IEC Publication No. 702. Mineral Insulated Cables With a Rated Voltage not Exceed 750 V., First Edition, 1981.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ว่าที่ รต.ไชยา สายัณห์ เกิดวันที่ 8 มิถุนายน 2507 สถานที่เกิดจังหวัดปราจีนบุรี จบการศึกษา อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ปีการศึกษา 2535 ปัจจุบันรับราชการตำแหน่งอาจารย์ 1 ระดับ 5 วิทยาลัยเทคนิคปราจีนบุรี สังกัดกรมอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้