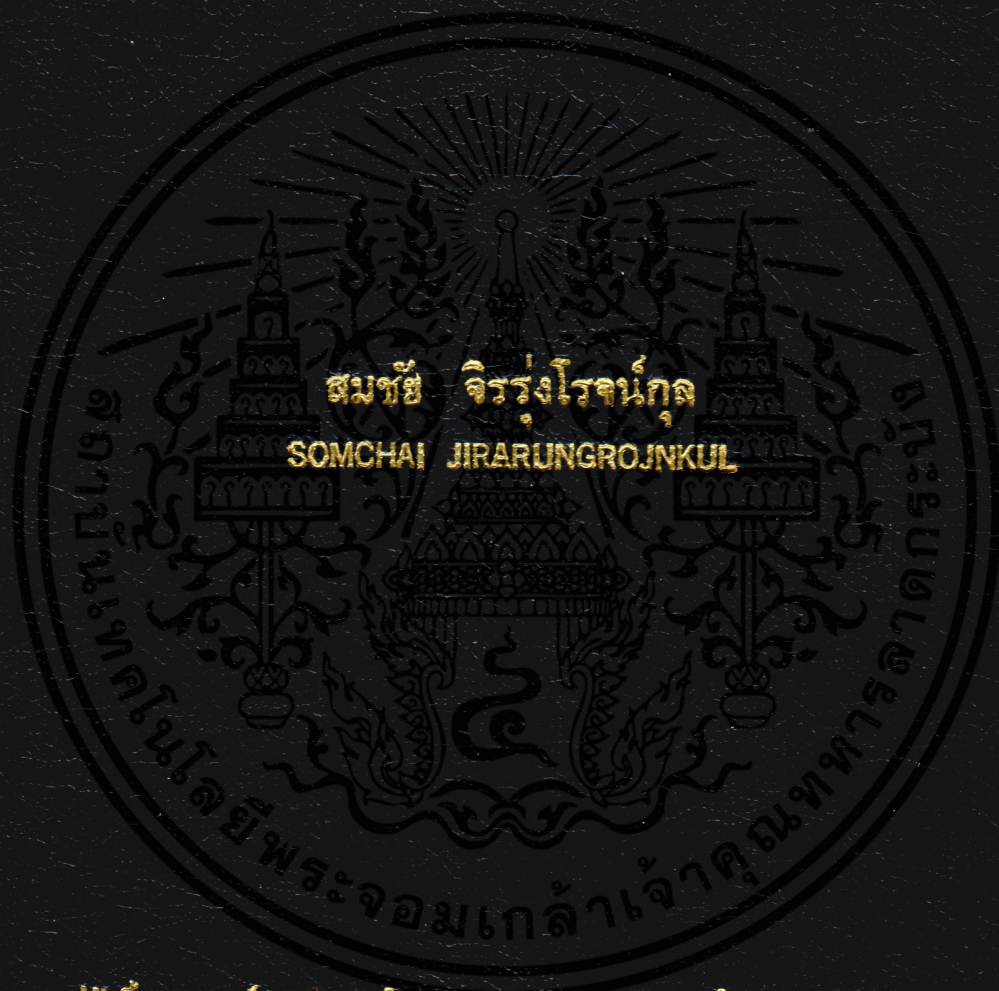


การคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก

THE CALCULATION OF CABLE AMPACITIES INCLUDING
THE EFFECT OF HARMONICS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

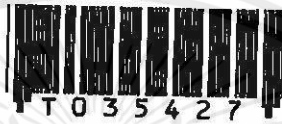
พ.ศ. 2548

ISBN 974-622-674-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การคำนวณหาพิสัยกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก

THE CALCULATION OF CABLE AMPACITIES INCLUDING
THE EFFECT OF HARMONICS



นายสมชาย จิรรุ่งโรจน์กุล

SOMCHAI JIRARUNGROJNKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-674-6

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 35427
วัน, เดือน, ปี..... 25 เม.ย. 2543

ให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE CALCULATION OF CABLE AMPACITIES INCLUDING
THE EFFECT OF HARMONICS**

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered, ornate structures resembling traditional Thai stupas or shrines, each supported by a decorative base. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top of the border reads 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) and the text at the bottom reads 'ก่อตั้งเมื่อปี ๒๕๐๒' (Established in 1959).

SOMCHAI JIRARUNGRONKUL

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

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-622-674-6
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

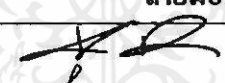





COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG ที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิล โดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์โมนิก
THE CALCULATION OF CABLE AMPACITIES INCLUDING THE EFFECT OF HARMONIC
ชื่อนักศึกษา นายสมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล
รหัสประจำตัว 37061127
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศุภี บรรจงจิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย	
รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน	
ดร.วิจิตร กิณเรศ	
รศ.ศุภี บรรจงจิตร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 17 ธันวาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่.....10.....เดือน.....พ.ศ.....๒5๔๓

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิล โดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก
นักศึกษา	นายสมชาย จิรรุ่งโรจน์กุล
รหัสประจำตัว	37061127
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สุลี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการในการคำนวณความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล โดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ส่งผลตอบสนองต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งปัจจุบันอุปกรณ์เหล่านี้ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากกับงานด้านระบบไฟฟ้า ปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่เกิดจากผลกระทบของฮาร์มอนิกได้แก่ ความสูญเสียอันเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดผลตามมาก็คือการเพิ่มอุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิล ถ้ามีค่าเกินอุณหภูมิที่พิกัดของสายเคเบิลที่สามารถรับได้ จะส่งผลให้ขีดความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลจึงลดลง จากประเด็นดังกล่าว ได้นำมาสู่การพัฒนาวิธีการคำนวณความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก ด้วยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการคำนวณขนาดกระแสในรูปของตัวคูณลดฮาร์มอนิก (Harmonic Derating Factor) โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการคำนวณได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการคำนวณค่าตัวประกอบการกระจายฮาร์มอนิก (Harmonic Distribution Factor) ส่วนที่สอง คือการคำนวณหาค่าความต้านทานทางไฟฟ้า กระแสสลับของตัวนำ (Total AC Conductor Resistance) ซึ่งได้รวมผลของปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) และปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity Effect) วิธีการดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้เป็นหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกขนาดของสายเคเบิลที่จะนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Calculation of Cable Ampacities Including the Effect of Harmonics
Student	Mr. Somchai Jirarungrojnkul
Student ID.	37061127
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Suree Banjongjit

ABSTRACT

This thesis presents a study of a calculation method for cable ampacity in the harmonic presence for a cable system caused by nonlinear loads. Nowadays, they are becoming a majority part of the electrical load in electrical power system. One significant effect resulting from harmonic will increase ohmic loss and operating temperature of conductor cable. It can exceed the rated temperature of the cable, as it is unsuitable to carry an additional harmonic current. These results shall derate the ampacity of cable due to harmonic currents. The calculation method for cable based on harmonic has been developed by using computer program in order to simplify the rated ampacity calculation by means of harmonic derating factor, which composes of two main parts. The first is calculation of harmonics distribution factor and the second is calculation of total ac conductor resistance including the skin effect and proximity effect. Finally, the ampacities of cable can be suitably and accurately selected in electrical power system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจากท่าน
อาจารย์ศุติ บรรจงจิตร ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความ
อนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพรักยิ่งตลอดจนถึงพี่น้องที่ให้การสนับสนุนรวมทั้ง
ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและมิตรสหายที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษา	3
1.5 ขอบเขตการศึกษา	3
1.6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินการศึกษา	3
บทที่ 2 พื้นฐานเกี่ยวกับสายเคเบิลกำลัง	5
2.1 โครงสร้างของสายเคเบิล	5
2.1.1 ตัวนำ	5
2.1.2 ฉนวน	7
2.1.3 เปลือกสายหรือสายนำกระแสฉนวนทอ	7
2.1.4 เกราะป้องกันสายเคเบิล	8
2.1.5 เปลือกนอก	8
2.2 แหล่งกำเนิดความสูญเสียทางไฟฟ้า	9
2.2.1 ความสูญเสียในตัวนำ	9
2.2.1.1 ความต้านทานของสายเคเบิล	9
2.2.1.2 ปรากฏการณ์ทางผิว	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.1.3	ปรากฏการณ์ความถี่แกว่ง	13
2.2.2	ความสูญเสียไดอิเล็กทริก	16
2.2.3	ความสูญเสียจากกระแสฮาร์จิจ	17
2.2.4	ความสูญเสียของเปลือกโลหะ	17
2.2.4.1	ความสูญเสียจากกระแสไหลวนในเปลือกสาย	17
2.2.4.2	ความสูญเสียของวงจรเปลือกสาย	18
2.2.4.3	การเชื่อมต่อ(Bonding)เปลือกของสายเคเบิล 1 แกน	18
2.2.5	ความสูญเสียของเปลือกโลหะและ screen ของสายชนิด Pipe-Type cable.....	25
2.2.6	ความสูญเสียของเกราะป้องกันสาย.....	26
2.2.7	ความสูญเสียจากท่อร้อยสาย	26
2.3	ประเภทของสายเคเบิลแบ่งตามลักษณะของงาน	28
2.3.1	สายเคเบิลที่ใช้กับสถานที่ปกติทั่วไป	28
2.3.1.1	สายเคเบิลแรงสูง	28
2.3.1.2	สายเคเบิลแรงต่ำ	31
2.3.2	สายเคเบิลใช้งานสำหรับสถานที่อันตรายและงานเฉพาะ	34
2.3.2.1	สถานที่อันตราย	34
2.3.2.2	งานเฉพาะ	35
2.3.3	การวิเคราะห์หลักเกณฑ์ในการกำหนดขนาดของสายเคเบิล.....	36
บทที่ 3	ทฤษฎีของฮาร์มอนิก	37
3.1	ทฤษฎีของฮาร์มอนิก	37
3.1.1	ชนิดของฮาร์มอนิก	37
3.1.2	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	38
3.1.2.1	โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น	38
3.1.2.2	ความไม่สมดุลของเฟส	41
3.1.2.3	กระแสกระตุ้นและเฟอร์โรเรโซแนนซ์	42
3.1.2.4	เรโซแนนซ์	42
3.1.2.5	แหล่งกำเนิดอื่นๆ	44
3.2	ผลกระทบของฮาร์มอนิก	44

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง.....	45
3.2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรกลกลไฟฟ้า	46
3.2.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเบงค์คาปาซิเตอร์	46
3.2.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อฟิวส์	47
3.2.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า.....	47
3.2.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า.....	47
3.2.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร.....	48
3.2.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสายเคเบิลกำลัง	48
บทที่4 ทฤษฎีการคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลเคเบิลเมื่อคำนึงถึง ผลกระทบของฮาร์มอนิก	51
4.1 การคำนวณอุณหภูมิของตัวนำเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก	52
4.2 การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก	53
4.3 แผนผังการทำงาน	56
บทที่5 ตัวอย่างการคำนวณและการวิเคราะห์ผลจากการศึกษา.....	59
5.1 ตัวอย่างการคำนวณ.....	59
5.2 การคำนวณ โดยโปรแกรม.....	69
5.3 การวิเคราะห์ผลจากการศึกษา.....	74
5.3.1 การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรที่มีผลต่อ Derating Factor.....	74
5.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating Factor และขนาดของตัวนำ.....	76
5.3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating Factor และลักษณะการวางสายเคเบิล.....	79
5.3.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating Factor และความถี่ไฟฟ้า.....	80
5.3.5 การวิเคราะห์ขนาดของสายเคเบิลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน.....	81
5.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับผลการศึกษารายอื่น.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4.1	เปรียบเทียบค่า Derating Factor กับมาตรฐานของการไฟฟ้า นครหลวง.....	86
5.4.2	เปรียบเทียบค่า Derating Factor ที่ได้จากการศึกษานี้และวิธีของ Ajit Hiranandani.....	89
บทที่ 6	สรุปและข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง		93
ภาคผนวก		95
ภาคผนวก ก	คู่มือการใช้โปรแกรม	96
ภาคผนวก ข	คุณสมบัติและขนาดกระแสของสายไฟฟ้า	109
ภาคผนวก ค	ตัวอย่างการพิสูจน์หากระแสในนิวทรอลระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย เมื่อกระแสเป็น Square Wave.....	114
ประวัติผู้เขียน		119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงและอลูมิเนียม	6
2.2 แสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE	7
2.3 แสดงค่า K_s และ K_p	14
3.1 แสดงลำดับฮาร์โมนิกและลำดับเฟสต่างๆ	38
3.2 แสดงส่วนประกอบของกระแสลัดที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ	39
5.1 แสดงค่า HDF ที่คำนวณจากค่า β ต่างๆ	74
5.2 แสดงค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ในอุดมคติ	77
5.3 แสดงค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 12 พัลส์ในอุดมคติ	78
5.4 แสดงค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อมีการวางสายเคเบิลในลักษณะต่างๆ เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ในอุดมคติ	79
5.5 แสดงสายเคเบิลในรูปต่อหน่วยที่เหมาะสมกับโหลดประเภทเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ในอุดมคติ โดยมีกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5, 7, 11 และ 13	85
5.6 แสดงค่า Derating Factor ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ..	87
5.7 แสดงขนาดกระแสของสายนิวทรอล (I_N) ของหม้อแปลงที่ขนาดพิกัดต่างๆ เปรียบเทียบกับมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง	88
5.8 แสดงเปรียบเทียบค่า Derating Factor ที่ได้จากการศึกษาและวิธีของ Ajit Hiranandani	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะพื้นที่หน้าตัดตัวนำของสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ	6
2.2 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบ 1 จุด	18
2.3 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบโดยตรง	19
2.4 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบไขว้ โดยไม่มีการสลับสายระหว่างเฟส (Transposition)	19
2.5 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบไขว้ โดยมีการสลับสายระหว่างเฟส	20
2.6 แสดงลักษณะของสายเคเบิลตามตารางที่ 4 มอก. 11-253.....	32
2.7 แสดงลักษณะสายเคเบิลตามตารางที่ 6 มอก. 11-2531	33
2.8 แสดงลักษณะสายเคเบิลตามตารางที่ 7 มอก. 11-2531	33
2.9 แสดงลักษณะของสาย CV	34
3.1 แสดงวงจรคอนเวอเตอร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์	40
3.2 แสดง Voltage Notch ในช่วงที่คอมมิวเตชัน	41
3.3 แสดงวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ	43
3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์โมนิก แรงดันฮาร์โมนิก และอิมพีแดนซ์ ของระบบ	45
3.5 แสดงผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ในสายนิวทรอลของระบบ 3 เฟส 4 สาย	50
4.1 แสดงแผนผังการทำงาน	58
5.1 แสดงลักษณะการจัดเรียงและติดตั้งสายเคเบิล	59
5.2 แสดงโครงสร้างของสายเคเบิลชนิด 10 kV Single XLPE Cable.....	65
5.3 แสดงหน้าตัดเมนูหลัก	69
5.4 แสดงหน้าตัด Fundamental Load current และ Fundamental Transformer Current	70
5.5 แสดงหน้าตัด Conduit Size	71
5.6 แสดงการป้อนข้อมูลในหน้าตัด Harmonics Content by User	71
5.7 แสดงหน้าตัดแสดงผลการคำนวณค่า Derating Factor	72
5.8 แสดงหน้าตัดแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรอลซึ่งคิดในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
5.9 แสดงหน้าตาต่างแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Derating Factor และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3	73
5.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ β	75
5.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ α (% 3 rd Harmonic Load x 10)	76
5.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และความถี่ของกระแสฮาร์โมนิก	80
5.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์โมนิกเมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ trefoil ในรางเคเบิล	81
5.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์โมนิกเมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ trefoil ในท่อร้อยสาย	82
5.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลในรูปคิดต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์โมนิก เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ trefoil ในรางเคเบิล ท่อร้อยสาย	83
5.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลในรูปคิดต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์โมนิก เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ trefoil ในท่อร้อยสาย	84
5.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรอลในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ Trefoil ในท่อร้อยสาย	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดขนาดของสายเคเบิลนั้นมีหลายประการ เช่น อุณหภูมิรอบข้าง ค่าความต้านทานความร้อน การสูญเสียที่ตัวนำและส่วนประกอบที่เป็นโลหะเนื่องจากกระแสไฟฟ้า การสูญเสียที่ฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนไฟฟ้า แรงดันตก และพิสัยการทนต่อกระแสลัดวงจร เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวแปรที่กำหนดความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล ในอดีตที่ผ่านมาการคำนวณหาขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้ โดยไม่ก่อให้เกิดความร้อนเกินพิสัยหรือความเสียหายต่อสายเคเบิลจะถูกพิจารณาจากปัจจัยต่างๆดังกล่าว แต่ปัจจุบันอุปกรณ์ที่ส่งผลตอบสนองต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear devices) ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานระบบไฟฟ้าและอุตสาหกรรม อุปกรณ์เหล่านี้จะให้กำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ เมื่อกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิล จะส่งผลให้เกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดผลตามมาคือการเพิ่มอุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิล ถ้ามีค่าเกินอุณหภูมิที่พิสัยของสายเคเบิลที่สามารถรับได้ จะส่งผลให้ขีดความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลลดลง อุปกรณ์ที่ส่งผลตอบสนองต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้นได้แก่ อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คาอิมพิแดนซ์ภายในตัวอุปกรณ์เหล่านี้จะมีค่าไม่คงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคาอิมพิแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ผลรวมของสัญญาณในแต่ละความถี่กับสัญญาณที่ความถี่มูลฐานจะผิดเฟสกันไปจากเดิม ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร เช่น ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง ทำให้ความสูญเสียในสายเคเบิล หม้อแปลง และคาปาซิเตอร์สูงขึ้น ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาด เป็นต้น ส่งผลให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งานสั้นลงหรือทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด

ในระบบ 3 เฟส 4 สาย แม้ว่าจะมีโหลดทั้ง 3 เฟสสมดุลก็ตามสายนิวทรัลจะมีกระแสไหลเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ ที่สำคัญได้แก่กระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ที่เป็นพหุคูณของ 3 (Triplen Harmonics) จะมีลำดับเฟสเป็นศูนย์ (Zero sequence) กระแสของทั้ง 3 เฟสจะมีขนาดและมุมเฟสเหมือนกัน ดังนั้นผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟสในสายนิวทรัลจะเสริมกันโดยมีขนาดเป็น 3 เท่าของกระแสลำดับศูนย์ในสายเฟส เมื่อรวมกับกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ลำดับอื่นๆ จะมีบางส่วนเสริมและหักล้างกัน กระแสในสายนิวทรัลอาจมีขนาดตั้งแต่ 1.73 - 3 เท่า [1] ของกระแสเฟสทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและมุมเฟสของแต่ละฮาร์มอนิก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างมากในการคำนวณหาขนาดสายเคเบิลเพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของโหลดหรืออุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบและสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลได้โดยไม่ทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหาย

หาย ซึ่งจะนำมาสู่ความปลอดภัยของผู้ที่เกี่ยวข้องและอุปกรณ์ต่างๆที่ต่ออยู่ในระบบรวมทั้งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการดูแลซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาก็คือการหาแนวทางในการคำนวณพิกัดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิล และศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลในการกำหนดความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิก โดยงานศึกษานี้ได้นำเสนอรูปแบบการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกโดยพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณกระแสของสายเคเบิลในรูปของ“ตัวคูณลดฮาร์มอนิก” (Harmonics Derating Factor) ซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว เมื่อนำค่าตัวคูณลดฮาร์มอนิกมาคูณกับค่าพิกัดกระแสในสภาวะปกติแล้ว จะทำให้ทราบถึงพิกัดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวนำนั้น วิธีการดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้เป็นหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกขนาดของสายเคเบิลที่จะนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมกับโหลดหรืออุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบ อันจะนำมาสู่ความน่าเชื่อถือของระบบและความปลอดภัยของอุปกรณ์และผู้ที่เกี่ยวข้อง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาที่ตั้งไว้ก็คือค่าพิกัดกระแสจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนต่างๆของสายเคเบิล ถ้าสายเคเบิลสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีเท่าไร ก็ยังสามารถรับกระแสได้ดีด้วยเช่นกัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น วัสดุที่ใช้ทำฉนวน วิธีการติดตั้งสายเคเบิล โครงสร้างของสายเคเบิล และอุณหภูมิที่อยู่บริเวณรอบๆ เป็นต้น การคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลในอดีตที่ผ่านมา เราไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิล ดังนั้นเมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิลจะก่อให้เกิดความสูญเสียในรูปความร้อนที่เพิ่มขึ้นในส่วนต่างๆของสายเคเบิล ถ้าสายเคเบิลมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไม่ดีพอ จะส่งผลให้ขีดความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลลดลง นอกจากนี้จะไม่คิดผลจากความสูญเสียอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ความสูญเสียไดโอดทริกและความสูญเสียที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำหรือระบบจำหน่าย(Distribution system) เนื่องจากความสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยมาก จึงสามารถละเลยได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา

ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ประยุกต์ใช้กับงานศึกษานี้ได้พัฒนาและประยุกต์วิธีการคำนวณความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิล[2,3] ซึ่งจะปรากฏอยู่ในรูปของความร้อนภายในตัวนำ ฉนวน และส่วนประกอบต่างๆที่เป็นโลหะของสายเคเบิลได้แก่ เปลือกสาย โลหะ เกราะป้องกันสายและท่อร้อยสาย เป็นต้น ค่าพิกัดกระแสจะขึ้นอยู่กับเส้นทางที่ความร้อนถูกส่งผ่านไปตามผิวของส่วนต่างๆของสายเคเบิล และกระจายไปรอบๆ อุณหภูมิ ณ ส่วนต่างๆที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนนี้จะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลภายใต้สภาวะคงตัว(Steady state) และมีความสัมพันธ์กับผลรวมของความสูญเสียในรูปความร้อนที่เพิ่มขึ้น กฎของการไหลของความร้อนจะคล้ายกับกฎของโอห์ม โดยที่การไหลของความร้อน (Heat flow) จะสอดคล้องกับการไหลของกระแสไฟฟ้า ผลต่างของอุณหภูมิจะสอดคล้องกับความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้า และความต้านทานของความร้อน (Thermal resistance) จะสอดคล้องกับความต้านทานทางไฟฟ้า จากความสัมพันธ์ระหว่าง Heat losses และ Ohmic losses ดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาพิกัดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกสั้ไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิล

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตของงานวิจัยชิ้นนี้คือการพิจารณาหาแนวทางในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคำนวณค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับและวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิลซึ่งขนาดกระแสของสายเคเบิลจะถูกคำนวณออกมาในรูปของตัวคูณลดขนาดกระแส สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำ โดยพื้นที่หน้าตัดมีขนาดตั้งแต่ 95 ถึง 500 ตารางมิลลิเมตร รวมทั้งการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาพิกัดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้โดยรวมผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิก จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับตัวคูณลดขนาดกระแสตามมาตรฐานกฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าพ.ศ. 2538 ของการไฟฟ้านครหลวง [4] ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และตัวคูณลด (Derating factor) ที่นำเสนอโดยวิธีของ Ajit Hiranadani [5] ซึ่งได้พัฒนาวิธีการคำนวณมาจากโมเดลของ Neher-Mcgrath [6].

1.6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินการศึกษา

เอกสารนี้เป็นการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้ง วิธีที่ใช้ในการดำเนินการศึกษานี้จะใช้การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีและสมมติฐานที่ได้กล่าวไปแล้วโดยจำลองค่าพารามิเตอร์บางค่า เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อ

การกำหนดค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิล เช่น โครงสร้างของสายเคเบิล ขนาดของตัวนำ ลักษณะการติดตั้งและจัดเรียงสายเคเบิล ความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ เป็นต้น รวมทั้งการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณหาพิกัดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้โดยรวมผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

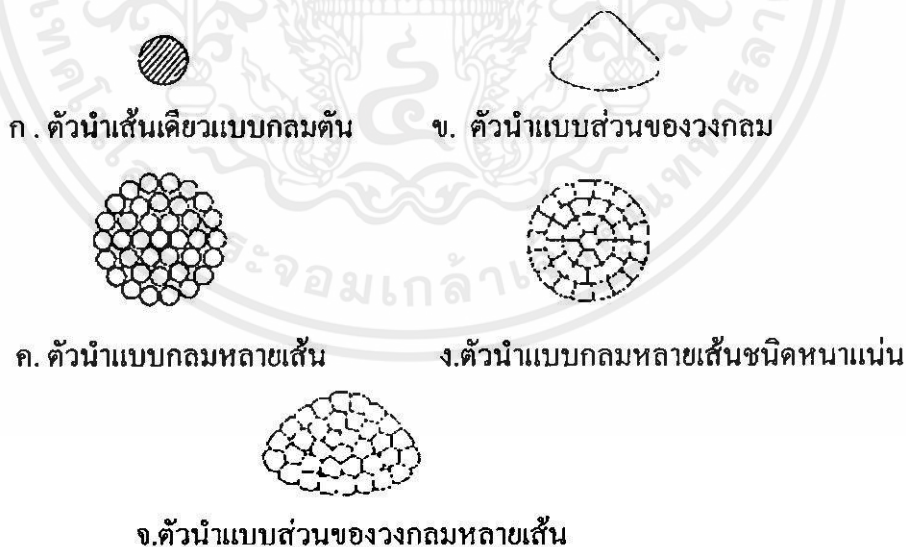
พื้นฐานเกี่ยวกับสายเคเบิลกำลัง

2.1 โครงสร้างของสายเคเบิล

สายเคเบิลมีหน้าที่สำหรับส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ สายเคเบิลก็ถูกจัดเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วยตัวนำไฟฟ้า ฉนวน และเปลือกหุ้ม ในการออกแบบสายเคเบิลให้ใช้กับงานด้านต่าง ๆ นั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นสายเคเบิลเพื่อที่สามารถใช้สายเคเบิลที่ถูกออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

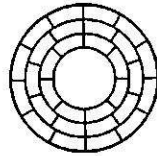
2.1.1 ตัวนำ

ตัวนำของสายเคเบิลต้องทำจากวัสดุตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ หรืออาจพูดได้ว่ามีความนำไฟฟ้าสูงนั่นเอง ลักษณะของตัวนำอาจจะเป็นตัวนำเดี่ยวตัน (Solid) หรือตัวนำหลายเส้นตีเกลียว (Strand) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวนำเล็ก ๆ ตีกันเป็นเกลียว โดยทั่วไปมักนิยมทำด้วยวัสดุทองแดงหรืออลูมิเนียม มีลักษณะกลม หรือเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม เช่นเคเบิลน้ำมัน ถ้าตัวนำของสายเคเบิลมีพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ $1,000 \text{ mm}^2$ ขึ้นไป สายตัวนำกลมจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนของวงกลมเพื่อลดปรากฏการณ์ทางผิว และมีรูตรงกลางเพื่อระบายความร้อนด้วยสายหล่อเย็น เช่นน้ำมัน หรือก๊าซดังแสดงในรูปที่ 2.1

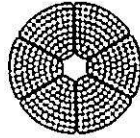


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะพื้นที่หน้าตัดตัวนำของสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฉ. ตัวนำแบบกลมหลายเส้นชนิดหนาแน่นและมีรูกลวง



ช. ตัวนำแบบกลมประกอบด้วยส่วนของวงกลมมีรูกลวงใช้กับพื้นที่หน้าตัดใหญ่

รูปที่ 2.1 (ต่อ)

ทองแดง ทองแดงเป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงมากมีความแข็งแรงและเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่มีข้อเสียคือมีน้ำหนักมากและราคาสูง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานด้านแรงสูง แต่จะเหมาะกับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะงานในอาคาร

อลูมิเนียม เป็นโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูงรองจากทองแดงแต่เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีกระแสเท่ากันแล้ว พบว่าอลูมิเนียมจะมีน้ำหนักเบาและราคาถูกกว่าจึงเหมาะกับการใช้งานเดินสายไฟนอกอาคารและแรงดันสูง อลูมิเนียมถ้าทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดออกไซด์ของอลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนฟิล์มบาง ๆ เกาะตามผิวช่วยป้องกันการสึกกร่อน แต่มีข้อเสียคือทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

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 ($\text{Per}^{\circ}\text{C} * 10^{-6}$)	17	23
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1083	659
ความนำความร้อน ($\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$)	3.8	2.4
ความหนาแน่นที่ 20°C (g/cm^3)	8.89	2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ฉนวน

ฉนวนทำหน้าที่เป็นตัวหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างตัวนำกับตัวนำหรือระหว่างตัวนำกับพื้นดิน และป้องกันตัวนำจากผลกระทบทางเคมีและทางกลต่าง ๆ ได้ ในระหว่างที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้าจะเกิดพลังงานสูญเสียอยู่ในรูปของความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวน ซึ่งความสามารถในการทนความร้อนของฉนวนนี้เองจะไปเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนความร้อนของสายเคเบิลได้ด้วย การเลือกฉนวนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิใช้งาน, ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง ฉนวนที่ดีควรมีค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำ และความสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำด้วย วัสดุที่นิยมใช้เป็นฉนวนมากที่สุดในขณะนี้ก็คือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE) นอกจากนี้ยังมีฉนวนอีกประเภทหนึ่งซึ่งใช้งานกับสถานที่พิเศษ นั่นก็คือสายฉนวนแร่เปลือกโลหะ (Mineral Insulated Metal Sheath Cable) ซึ่งฉนวนจะเป็นแร่ Magnesium Oxide ตารางที่ 2.2 จะแสดงคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร ($^{\circ}\text{C}$)	160	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	6	2.4
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.4	0.92
ความนำความร้อน ($\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$)	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง (kg/mm^2)	2.5	3

จะเห็นว่าฉนวน XLPE มีความแข็งแรง ทนต่อความร้อนและถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าฉนวน PVC ปัจจุบันจึงมีผู้ใช้ฉนวน XLPE เพิ่มมากขึ้น

2.1.3 เปลือกสายหรือสายนำกระแสชนิดทอ (Sheath/Concentric Neutral Wires)

เปลือกโลหะมีความจำเป็นสำหรับเคเบิลประเภทที่ฉนวนเป็นกระดาษ (paper-insulated) ทำหน้าที่แยกและป้องกันน้ำจากส่วนที่เป็นฉนวนและรักษาความชุ่มชื้นของของเหลวในสายเคเบิลประเภทที่เติมของเหลวที่มีความดันต่ำ (Low-pressure fluid-filled) ช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับสายเคเบิลที่ไม่มีฉนวนและป้องกันฉนวนของสายเคเบิลด้วย นอกจากนี้เปลือกของสายเคเบิล ถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของสายเคเบิลในการนำกระแสชนิดทอและ/หรือกระแสเฟสอลต์ลงสู่ดิน เมื่อเกิดภาวะผิดปกติขึ้นในระบบ สาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคเบิลบางประเภทอาจจะมี โครงสร้างที่มีสายนำกระแสเนิวทรอล (concentric neutral wires) เพื่อที่จะนำกระแสฟลัท แทนเปลือกโลหะซึ่งอาจจะเป็นทองแดงหรืออลูมิเนียมก็ได้

การเชื่อมต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิล 1 แกน ในระบบ 3 เฟส จะมีผลต่อการกำหนดค่าพิคกกระแสของสายเคเบิลด้วย

2.1.4 เกราะป้องกันสายเคเบิล (Armor)

ทำหน้าที่ป้องกันสายเคเบิลในการรับแรงเค้นทางกล โดยทั่วไปทำจากลวดเหล็กหรือเทป เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นเหล็กดังนั้นจะก่อให้เกิดความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และ ความสูญเสียของวงจรเปลือกสายจากกระแสไหลวน (circulating current) ขึ้นซึ่งจะลดความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิลลง เพื่อที่จะลดความสูญเสียฮิสเทอรีซิส สายเคเบิลควรมีโครงสร้างของเกราะป้องกันสายที่ทำมาจากสารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (nonmagnetic) เช่นอลูมิเนียมหรือทองแดง เป็นต้น เมื่อสายเคเบิลซึ่งประกอบไปด้วยเปลือกสายตะกั่ว และเกราะป้องกันสายถูกใช้ติดตั้งในระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยมีระยะห่างระหว่างสายน้อย จะก่อให้เกิดความสูญเสียในเปลือกสายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกราะป้องกันสายจะมีผลทำให้ความต้านทานของเปลือกสายลดลง (โดยที่วงจรของเปลือกสายและเกราะป้องกันสายต่อขนานกัน) และความสูญเสียจะมีค่ามากที่สุด เมื่อความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของเปลือกสายมีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปเมื่อสายเคเบิลไม่มีเกราะป้องกันสายค่ารีแอกแตนซ์ของเปลือกสายจะมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทาน เพื่อที่จะลดค่าความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นนี้ให้น้อยที่สุดนั้นเกราะป้องกันสายควรทำจากวัสดุที่มีความต้านทานสูง เช่น โลหะผสมระหว่างทองแดง, ซิลิกอนและแมงกานีส เมื่อสายเคเบิลถูกจัดวางโดยมีระยะห่างจากกันเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้เกราะป้องกันสายอาจทำมาจากวัสดุที่มีความต้านทานต่ำได้ เช่น โลหะผสมอลูมิเนียม เนื่องจากค่าความต้านทานรวมจะมีค่าต่ำกว่ารีแอกแตนซ์มาก ดังนั้นความสูญเสียจะมีค่าลดลงด้วย

2.1.5 เปลือกนอก (External Covertng)

ชั้นของเปลือกนอกนี้อาจจะเป็น polyethylene (PE) หรือ polyvinylchloride (PVC) ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน เช่น ถ้าเป็นงานกลางแจ้งก็มักจะใช้ Polyvinylchloride เนื่องจากคุณสมบัติที่เฉื่อยต่อการติดไฟ ในขณะที่ polyethylene มักจะใช้งานแบบเดินลอย เนื่องจากคุณสมบัติทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ สายเคเบิลบางชนิดจะมีชั้นของ armor serving ซึ่งทำมาจากวัสดุที่เป็นผ้า (fibrous) หรือมีชั้นของ armor bedding ซึ่งทำมาจากวัสดุประเภทเดียวกัน และมีคุณสมบัติที่ไม่นำไฟฟ้า โดยคั่นอยู่ระหว่างเปลือกโลหะกับเกราะป้องกันสาย เปลือกนอกของสายเคเบิลอาจจะทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากตัวนำสู่ภายนอกลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับกระแสลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานความร้อนของเปลือกนอกจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ ซึ่ง polyethylene จะมีคุณสมบัติตัวนำทางความร้อนที่ดีกว่า polyvinylchloride

2.2 แหล่งกำเนิดความสูญเสียทางไฟฟ้า (Sources of Electrical Losses)

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล จะปรากฏอยู่ในรูปของความร้อนภายในตัวนำ, ฉนวน และ ส่วนประกอบต่างๆที่เป็นโลหะของสายเคเบิล เมื่อเคเบิลถูกส่งผ่านพลังงานไปยังโหลด จะเกิดความสูญเสียซึ่งอยู่ในรูปของความร้อนกระจายอยู่รอบๆ สายเคเบิล ค่าพิกัดกระแสจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนต่างๆของสายเคเบิล อุณหภูมิ ณ ส่วนต่างๆที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนนี้จะ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) และมีความสัมพันธ์กับผลรวมของความสูญเสียในรูปความร้อนที่เกิดขึ้น

2.2.1 ความสูญเสียในตัวนำ (Conductor Losses)

ความสูญเสียในตัวนำเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_{ac} ของตัวนำมีค่าเท่ากับ $\sum I_n^2 R_{ac(n)}$ เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดความสูญเสียในตัวนำ (P) ดังนี้

$$P = I_1^2 R_{ac(1)} + I_3^2 R_{ac(3)} + I_5^2 R_{ac(5)} + \dots + I_n^2 R_{ac(n)} \quad [2.1]$$

โดย P = ความสูญเสียในตัวนำ [Watt]

I_n = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

$R_{ac(n)}$ = ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับของตัวนำที่ $t^\circ C$ [Ω]

2.2.1.1 ความต้านทานของสายเคเบิล

1) ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง R_{20} ของสายตัวนำขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำ และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ดังสมการ

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}}{S} \quad [2.2]$$

โดยที่ ρ_{20} = ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่อุณหภูมิ $20^\circ C$

S = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ หน่วยเป็น (mm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าอุณหภูมิขณะใช้งานของตัวนำหรืออุณหภูมิที่อยู่รอบ ๆ ตัวนำไม่ใช่ 20°C แล้ว ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของวัสดุตัวนำ α และเป็นเหตุให้ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลงไปด้วย ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ณ อุณหภูมิขณะใช้งานของตัวนำหรืออุณหภูมิที่อยู่รอบ ๆ ตัวนำไม่ใช่ 20°C สามารถหาได้ดังนี้

$$R_{dc} = R_{20}(1 + \alpha_{20^{\circ}\text{C}}(t - 20)) \quad [2.3]$$

โดยที่ R_{20} = ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ 20°C

$\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$ = สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของตัวนำ (สำหรับทองแดงเท่ากับ 3.93×10^{-3})

t = อุณหภูมิของตัวนำ $^{\circ}\text{C}$

2) ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของสายตัวนำได้จากค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ณ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของตัวนำ เมื่อพิจารณาถึงผลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสลับที่ไหลในตัวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้ามีความหนาแน่นมากที่ผิวตัวนำและตรงแกนกลางตัวนำจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเลย โดยเฉพาะกับตัวนำขนาดพื้นที่หน้าตัดใดๆจะเห็นได้ชัด ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ทางผิว” (Skin Effect) นอกจากนั้น จากลักษณะการติดตั้งสายเคเบิลหลายเส้น ๆ จะมีระยะต่างระหว่างสายเคเบิล แต่ละเส้นน้อยมากดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิลเส้นที่อยู่ข้างเคียงจะมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำสายเคเบิลที่อยู่ใกล้เคียงเช่นกันเรียกว่า “ปรากฏการณ์ความใกล้เคียง” (Proximity Effect) จากปรากฏการณ์ทั้งสองดังกล่าว ย่อมทำให้ตัวนำมีค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับสูงกว่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงดั้งเดิม

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + Y_s + Y_p) \quad [2.4]$$

โดยที่ R_{dc} = ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของตัวนำที่ $t^{\circ}\text{C}$

Y_s = ตัวประกอบของปรากฏการณ์ทางผิว

Y_p = ตัวประกอบของปรากฏการณ์ความใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)

ความต้านทานกระแสสลับที่ปรากฏบนตัวนำจะมีค่ามากกว่าความต้านทานกระแสตรงของตัวนำเสมอ ฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากกระแสสลับบนตัวนำจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back e.m.f.) ซึ่งจะส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนวิ่งตัดผ่านบริเวณศูนย์กลางของตัวนำ และจะลดลงบริเวณผิวของตัวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวเมื่อพิจารณาถึงความเหนี่ยวนำในตัวเอง (self-inductance) นั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟสตลอดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำโดยมีค่ามากบริเวณศูนย์กลางของตัวนำ และจะลดลงบริเวณที่ห่างออกจากศูนย์กลางของตัวนำ ดังนั้นกระแสจะหนาแน่นมากบริเวณที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่าต่ำสุด กล่าวคือบริเวณผิวของตัวนำนั่นเอง [7] ปรากฏการณ์ที่กระแสไหลหนาแน่นบริเวณผิวของตัวนำเรียกว่า ปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) ผลกระทบจากการที่ความหนาแน่นของกระแสมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดบนตัวนำจะก่อให้เกิดความต้านทานกระแสสลับของตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในรูปความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ขนาดของปรากฏการณ์ทางผิวจะขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสสลับ ขนาดและชนิดของตัวนำ

1) การคำนวณ ตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect factor)

ในการคำนวณค่าของตัวประกอบของปรากฏการณ์ทางผิวนั้นจะขึ้นกับค่าของ X_s โดยจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของตัวนำต่าง ๆ ในกรณีของตัวนำแท่งตัน(circular conductor) จะหาได้จากตารางที่ 3 ดังนั้นค่าตัวประกอบของปรากฏการณ์ทางผิวของตัวนำแท่งตันรวมถึงตัวนำแบบส่วนของวงกลม(sector) และ oval-shaped conductor จะหาได้จาก [2]

$$X^2 = \left(\frac{md_c}{2} \right)^2 = \frac{8\pi f}{R} \cdot 10^{-7} \quad [2.5]$$

$$X_s^2 = X^2 k_s = \frac{8\pi f}{R} \cdot 10^{-7} k_s \quad [2.6]$$

$$\text{ถ้า } 0 < X_s \leq 2.8$$

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad [2.7]$$

$$\text{ถ้า } 2.8 < X_s \leq 3.8$$

$$y_s = -0.136 - 0.0177X_s + 0.0563X_s^2 \quad [2.8]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $3.8 < X_s$

$$y_s = \frac{X_s}{2\sqrt{2}} - \frac{11}{15} \quad [2.9]$$

สำหรับตัวนำแบบกลวง (Tubular Conductor) จะหาค่า K_s ได้จาก

$$k_s = \frac{d'_c - d_l}{d'_c + d_l} \left(\frac{d'_c + 2d_l}{d'_c + d_l} \right)^2 \quad [2.10]$$

โดยที่

d'_c = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวนำที่เป็นแบบกลวง(mm)

d_l = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของตัวนำ(mm)

ในการคำนวณเพื่อหาค่าตัวประกอบของปรากฏการณ์ทางผิวของตัวนำที่มีความถูกต้องมากขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับสมการ Bessel Function [3] ดังนี้

$$Y_s = a(z) \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] \quad [2.11]$$

โดยที่ $a(z), b(z)$ เป็น Bessel Function มีค่าเท่ากับ

ถ้า $0 < z \leq 5$,

$$a(z) = \frac{7z^2}{315 + 3z^2} \quad [2.12]$$

$$b(z) = \frac{56}{211 + z^2} \quad [2.13]$$

ถ้า $5 < z \leq 30$,

$$a(z) = 0.19701 - 0.1546295z + 0.073796z^2 - 9.02854 \cdot 10^{-3} z^3 + 6.27032 \cdot 10^{-4} z^4 \\ - 2.69028 \cdot 10^{-5} z^5 + 7.0647 \cdot 10^{-7} z^6 - 1.4301 \cdot 10^{-8} z^7 + 6.62315 \cdot 10^{-11} z^8 \quad [2.14]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+1.03728739 \cdot 10^{-3} z^4 - 5.8238557 \cdot 10^{-5} z^5 + 1.91099645 \cdot 10^{-6} z^6 - 3.38936767 \cdot 10^{-8} z^7 + 2.509622 \cdot 10^{-10} z^8 \quad [2.15]$$

ถ้า $z > 30$,

$$a(z) = \sqrt{\frac{z}{2} - 1} \quad [2.16]$$

$$b(z) = \frac{2}{4\sqrt{2z-5}} \quad [2.17]$$

$$\beta = 1 - \frac{d_i}{d_c} \quad [2.18]$$

$$Z = 0.25 m^2 K_S (d_c - d_i)^2 \quad [2.19]$$

$$m^2 = \frac{2\pi\mu_r\mu_0 f}{\rho} \quad [2.20]$$

โดยที่ d_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของตัวนำ(mm)

d_c = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ(mm)

K_S = Factor ของตัวนำ

μ_r = ความซึมซาบทางแม่เหล็ก(สำหรับทองแดง มีค่าเท่ากับ 1)

μ_0 = ความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศ เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (wb/AT- m)

f = ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

ρ = ความต้านทานเฉพาะของตัวนำ

2.2.1.3 ปฏิกิริยาความใกล้เคียง (Proximity effect)

เมื่อตัวนำที่มีกระแสสลับไหลผ่านสองตัวนำขนานและอยู่ใกล้กัน สนามแม่เหล็กจากตัวนำหนึ่งจะส่งผลกระทบต่อตัวนำอื่น โดยทำให้ความหนาแน่นของกระแสบริเวณด้านที่หันหน้าเข้าหากันจะมีค่าลดลง และบริเวณด้านที่ห่างกันออกไปจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำหนึ่งจะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำอื่นๆ ถ้าตัวนำสองตัวมีกระแสสลับไหลผ่านในทิศทางตรงข้ามกัน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำต่อ

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันจะก่อให้เกิดแรงผลึกออกจากกันซึ่งจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับลวดที่เพิ่มขึ้นรอบๆ ตัวนำด้านที่อยู่ใกล้กันมีค่าลดลง ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องกับลวดที่อยู่ห่างออกไปจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของกระแสบริเวณส่วนที่อยู่ใกล้กันของตัวนำหรือบริเวณที่มี emf. ด้านกลับต่ำสุด ถ้ากรณีตัวนำสองตัวมีกระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวกัน จะให้ผลลัพท์ในทางกลับกัน กล่าวคือ กระแสจะหนาแน่นบริเวณส่วนของตัวนำที่ห่างกัน ผลกระทบจากปรากฏการณ์นี้จะทำให้ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ก็เป็นไปได้ที่ผลของปรากฏการณ์นี้จะหักล้างกับผลของปรากฏการณ์ทางผิวทำให้กระแสที่ไหลในตัวนำมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น[7] ขนาดของปรากฏการณ์ความใกล้เคียงจะขึ้นกับความถี่ของกระแสสลับ, ระยะห่างระหว่างตัวนำและลักษณะการจัดวางสายเคเบิล ดังนั้นสามารถลดผลจากปรากฏการณ์นี้ได้โดยเลือกชนิดของตัวนำและลักษณะการจัดวางสายเคเบิลที่เหมาะสม [8]

ตารางที่ 2.3 ค่า K_s และ K_p

ชนิดของตัวนำ	Whether dried and Impregnated or not	K_s	K_p
Round, stranded	Yes	1	0.8
Round, stranded	No	1	1
Round, compact	Yes	1	0.8
Round, compact	No	1	1
Round, segmental		0.435	0.37
Hollow, helical stranded	Yes	0.8
Sector - shaped	Yes	1	0.8
Sector - shaped	No	1	1

1.) การคำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity effect factor)

สามารถคำนวณได้จาก [3]

กรณีสายเคเบิล 2 แกนและแกนเดี่ยว 2 เส้น

$$Y_p = \frac{y^2 G(x_p)}{1 - y^2 A(x_p) - y^4 B(x_p)} \quad [2.21]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีสายเคเบิล 3 แกนและ แกนเดี่ยว 3 เส้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_p = \frac{3y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} \quad [2.22]$$

สายเคเบิลที่มีคว้านำตีเกลียวแบบส่วนย่อย 3 เส้นซึ่งนำกระแส 3 เฟส

(Three stranded segmental conductors carrying three – phase current)

$$Y_p = \frac{2.5y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} \quad [2.23]$$

$A(x_p), B(x_p), H(x_p), G(x_p)$ เป็น Bessel Function มีค่าเท่ากับ

ถ้า $0 < x_p \leq 2.8$,

$$A(x_p) = \frac{0.042 + 0.012x_p^4}{1 + 0.0236x_p^4} \quad [2.24]$$

$$B(x_p) = 0 \quad [2.25]$$

$$G(x) = \frac{11x_p^4}{704 + 20x_p^4} \quad [2.26]$$

$$H(x_p) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 0.0283x_p^4}{1 + 0.0042x_p^4} \quad [2.27]$$

ถ้า $2.8 < x_p \leq 3.8$,

$$A(x_p) = -0.223 + 0.237x_p - 0.0154x_p^2 \quad [2.28]$$

$$B(x_p) = 0 \quad [2.29]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(x_p) = -1.04 + 0.72x_p - 0.08x_p^2 \quad [2.30]$$

$$H(x_p) = 0.095 + 0.119x_p + 0.0384x_p^2 \quad [2.31]$$

ถ้า $3.8 < x_p$,

$$A(x_p) = 0.75 - 1.128x_p^{-1} \quad [2.32]$$

$$B(x_p) = 0.094 - 0.376x_p^{-1} \quad [2.33]$$

$$G(x_p) = \frac{x_p}{4\sqrt{2}} - \frac{1}{8} \quad [2.34]$$

$$H(x_p) = \frac{2x_p - 4.69}{x_p - 1.16} \quad [2.35]$$

โดยที่ $x_p^2 = \frac{8\pi \cdot f \cdot 10^{-7} K_p}{R_{dc}}$

[2.36]

$$y = \frac{d_c}{S} \quad [2.37]$$

และ

K_p = Factor ของตัวนำ

S = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ(mm)

2.2.2 ความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss)

ความสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็นผลมาจากการสะสมของพลังงานของวัสดุที่เป็นฉนวน เมื่อถูกชาร์จประจุจากการได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกของสายเคเบิลกระแสไฟฟ้าสลับ จะเป็นสัดส่วนตรงกับค่าความจุไฟฟ้า, ความถี่, แรงดันเฟส และตัวประกอบกำลังหรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \omega \cdot C \cdot U_0^2 \tan \delta \cdot 10^{-6} \text{ (watt/km/phase)} \quad [2.38]$$

โดยที่

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

C = ค่าความจุไฟฟ้า ($\mu F / km$)

U_0 = แรงดันเฟส (V)

$\tan \delta$ = ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไดอิเล็กทริก

ในระบบแรงดันจำหน่าย (Distribution system) เราสามารถละเลยผลของความสูญเสียไดอิเล็กทริกได้

2.2.3 ความสูญเสียจากกระแสชาร์จจิ่ง (Charging current)

กระแสชาร์จจิ่งก่อให้เกิดความสูญเสียในรูปแบบ Ohmic loss ในสายเคเบิลขณะที่เคเบิลได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าและขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล โดยปกติแล้วมักจะไม่นิยามผลของความสูญเสียนี้ในการคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิล

2.2.4 ความสูญเสียของเปลือกโลหะ (Sheath Loss)

เมื่อมีกระแสไฟสลับไหลผ่านสายเคเบิลแกนเดี่ยว สนามแม่เหล็กซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของกระแสจะเหนี่ยวนำ emf (Electromotive force) ในเปลือกสายเคเบิลรอบ ๆ สายเคเบิล ความสูญเสียของเปลือกสายประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

2.2.4.1 ความสูญเสียจากกระแสไหลวนในเปลือกสาย (Sheath eddy currents losses)

กระแสไหลวนถูกเหนี่ยวนำโดยกระแสที่ไหลในสายเคเบิลที่อยู่ใกล้กับเปลือกสาย พิจารณาวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยสายเคเบิล R, Y และ B เส้นแรงไฟฟ้าของเคเบิล Y และ B จะตัดกับเปลือกสายของเคเบิล R และเส้นแรงไฟฟ้าที่ตัดกับส่วนของเปลือกของสายเคเบิล R จะใกล้กับ Y และ B มากกว่าส่วนที่ไกลจาก Y และ B ดังนั้นผลของ emf จึงถูกเหนี่ยวนำเนื่องจากกระแสไหลวนที่ไหลผ่าน ด้านหนึ่งของเปลือกสายย้อนกลับมาอีกด้านหนึ่งของเปลือกสาย ผลรวมของกระแสที่ไหลในหน้าตัดของเปลือกสายจะเป็นศูนย์ซึ่งกระแสไหลวนนี้จะไม่ขึ้นกับชนิดของเปลือกสายที่เชื่อมต่อกันซึ่งทำให้ลดระยะระหว่างสายเคเบิลทั้งหลาย

สำหรับสายแกนเดี่ยวเปลือกสายตะกั่ว ค่าความสูญเสียเหล่านี้ปกติแล้วจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความสูญเสียของตัวนำ แต่จะถูกพิจารณามากขึ้นสำหรับสายเคเบิลเปลือกอลูมิเนียมที่วางใกล้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.2 ความสูญเสียของวงจรเปลือกสาย (Sheath circulating current losses)

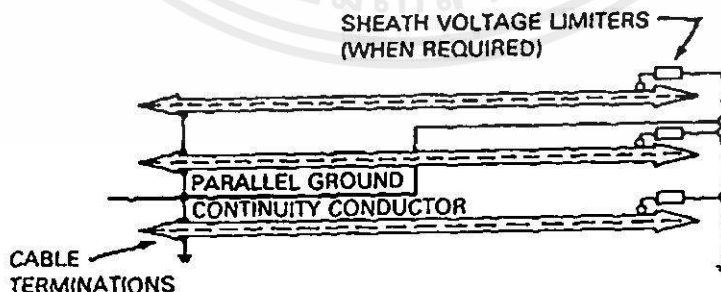
เมื่อเปลือกสายเคเบิลแกนเดี่ยวถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันกับพื้นดินหรือเปลือกอื่น ๆ มากกว่า 1 จุด กระแสที่ไหลในเปลือกสายจะเกิดจากemfที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยตัวนำไฟฟ้ากระแสสลับเรียกว่า "Transformer action" หรือปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพราะว่าเปลือกสายและส่วนย้อนกลับซึ่งเชื่อมต่อไว้ที่ปลายของเปลือกสายแต่ละเส้นเป็นลูปปิด ซึ่งมีเส้นแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำตัดผ่านขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับเปลือกสายจะขึ้นอยู่กับ ขนาดของลูปย้อนกลับและขึ้นอยู่กับระยะระหว่างสายเคเบิลด้วยกันหรือระหว่างเปลือกสายกับส่วนย้อนกลับเฉลี่ย ซึ่งมีกระแสไหลผ่านไปยังพื้นดิน

2.2.4.3 การเชื่อมต่อ(Bonding)เปลือกของสายเคเบิล 1 แกน

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสูญเสียของเปลือกสายก็คือการเชื่อมต่อ (Bonding) เปลือกสาย วัตถุประสงค์ในการเชื่อมต่อเปลือกสายได้แก่ การกำจัดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนเปลือกสาย, เป็นเส้นทางเดินหรือวงจรทางไฟฟ้ากรณีเกิดกระแสฟอลท์ และยังเป็นการป้องกันเสร็จจากฟ้าผ่าและสวิตช์ซึ่งเป็นดิน โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 3 วิธี [9] ดังนี้

1) การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบ 1 จุด (Single point bonding)

เป็นรูปแบบการเชื่อมต่อเปลือกสายที่ง่ายที่สุด โดยจะมีการเชื่อมต่อเปลือกของสายเคเบิลทั้ง 3 เฟส เข้าด้วยกัน และต่อลงดินเพียงจุดเดียว การเชื่อมต่อวิธีนี้จะก่อให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยแรงดันไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำตลอดความยาวของสายเคเบิล ส่วนความสูญเสียของวงจรเปลือกสายถูกกำจัดไป แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลบนตัวนำและความยาวของสายเคเบิลที่ติดตั้ง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างของสายเคเบิลเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ จึงควรป้องกันโดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสร็จที่ปลายของเปลือกสาย

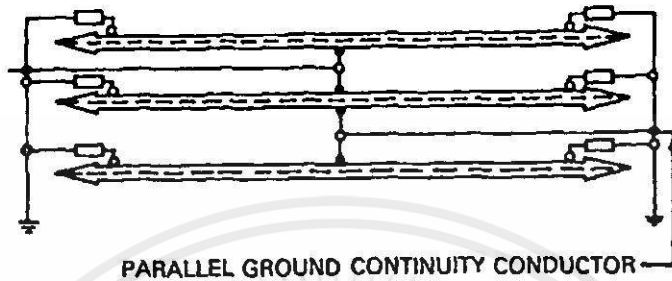


รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบ 1 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเชื่อมต่อเปลือกสายโดยตรง (Solid bonding)

การเชื่อมต่อวิธีนี้จะกำจัดแรงดันไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำได้โดยการเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองด้านของเปลือกสาย แต่ข้อเสียคือกระแสที่ไหลวนในเปลือกสาย จะลดความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลให้ลดลง



รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบโดยตรง

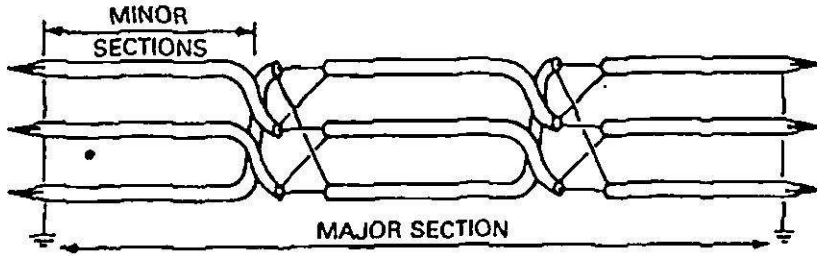
3) การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบไขว้ (Cross - bonding)

การเชื่อมต่อวิธีนี้โดยแบ่งเปลือกสายของแต่ละเฟสออกเป็นสามส่วนเท่ากันและมีการเชื่อมต่อแบบไขว้กัน โดยมีการเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองด้านของเปลือกสายทั้ง 3 เฟสลงดิน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ารวมของส่วนย่อยทั้ง 3 เฟสและกระแสไหลวนของวงจรเปลือกสายมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นความสูญเสียที่เกิดขึ้นในเปลือกสายซึ่งเกิดจากกระแสไหลวนเท่านั้น เมื่อเพิ่มระยะห่างของสายเคเบิลจะเพิ่ม Thermal independence ของแต่ละเคเบิล และยังทำให้ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นด้วย วิธีนี้มักใช้กับการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้าแรงดันสูง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบไขว้ โดยไม่มีการสลับสายระหว่างเฟส (Transposition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบไขว้ โดยมีการสลับสายระหว่างเฟส

1) การคำนวณค่าประกอบความสูญเสียของเปลือกโลหะ

ตัวประกอบความสูญเสียของเปลือกโลหะของสายเคเบิล (λ_1) ประกอบไปด้วย ความสูญเสียของวงจรเปลือกสาย (λ_1') และค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (λ_1'') ดังนั้นค่าความสูญเสียรวมในเปลือกโลหะ จะเท่ากับ

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad [2.39]$$

ในการหาค่าของ λ_1' และ λ_1'' นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเชื่อมต่อเปลือกโลหะ และการจัดวางสายเคเบิล [2] ดังนี้

1.1) การเชื่อมต่อเปลือกสายแบบโดยตรง

เมื่อมีการเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองด้านของเปลือกสาย จะมีผลให้ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าเท่ากับศูนย์กล่าวคือ $\lambda_1'' = 0$ ยกเว้นกรณีที่สายเคเบิลมีโครงสร้างของตัวนำแบบส่วนย่อย (segmental) ที่มีตัวนำขนาดใหญ่ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของสายและลักษณะการวางสายดังนี้

- สายเคเบิลชนิด 1 แกน 2 เส้นหรือสายเคเบิลชนิด 1 แกน 3 เส้นวางแบบสามเหลี่ยม

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad [2.40]$$

โดยที่

R_s คือ ค่าความต้านของเปลือกสายเคเบิล (Ω / m)

X คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของเปลือกสายเคเบิล (Ω / m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในห้องเรียนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2\omega * 10^{-7} \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad [2.41]$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

S = ระยะห่างระหว่างแกนของตัวนำ (mm)

สำหรับสายเคเบิลที่มีตัวนำรูปวงรี (Oval – shaped conductor)

$$d = \sqrt{d_M \cdot d_m} \quad [2.42]$$

โดยที่ d_M คือ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านยาวของเปลือกสาย

d_m คือ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านสั้นของเปลือกสาย

สำหรับสายเคเบิลที่มีเปลือกสายแบบ corrugated

$$d = \sqrt{(D_{oc} + D_{ic})} \quad [2.43]$$

โดยที่

D_{oc} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนจินตภาพรูปทรงกระบอกซึ่งสัมผัสกับส่วนนอกของเปลือกสายแบบ corrugated

D_{ic} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนจินตภาพรูปทรงกระบอกซึ่งสัมผัสกับผิวด้านในส่วนที่อยู่ต่ำสุดของเปลือกสายแบบ corrugated

- สายเคเบิลชนิด 1 แกน 3 เส้นวางแบบราบและมีการสลับสาย (Transposition) สามารถคำนวณค่าตัวประกอบความสูญเสียได้โดย

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2} \quad [2.44]$$

โดยที่

X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของเปลือกสายเคเบิล (Ω / m)

- สายเคเบิลชนิด 1 แกน 3 เส้นวางแบบราบโดยไม่มีการสลับสาย (Transposition) สามารถคำนวณค่าตัวประกอบความสูญเสียได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งด้านนอกสุดที่มีเฟสตาม

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad [2.45]$$

- สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งด้านนอกสุดที่มีเฟสหน้า

$$\lambda_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad [2.46]$$

- สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งตรงกลาง

$$\lambda_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad [2.47]$$

และ

$$P = X + X_m \quad [2.48]$$

โดยที่

X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมระหว่างเปลือกของสายเคเบิลด้านนอกและตัวนำของสายเคเบิลที่เหลืออีก 2 เส้น มีค่าเท่ากับ $2\omega \cdot 10^{-7} \ln(2) (\Omega / m)$

ซึ่งทั้ง 3 กรณีนี้ ไม่คิดค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในเปลือกสาย ดังนั้น $\lambda_i = 0$

สำหรับสายเคเบิลมีโครงสร้างของตัวนำแบบส่วนย่อย (segmental) ที่มีตัวนำขนาดใหญ่ โครงสร้างของสายเคเบิลดังกล่าวไม่มีผลในการช่วยลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียงของตัวนำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนโดยการคูณด้วยค่าตัวประกอบ F ซึ่ง สามารถคำนวณได้จาก

$$F = \frac{4M^2 N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)} \quad [2.49]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-กรณีที่มีการจัดวางสายเคเบิลเป็นแบบสามเหลี่ยม

$$M = N = R_s / X \quad [2.50]$$

-กรณีที่มีการจัดวางสายเคเบิลเป็นแบบราบ โดยมีระยะห่างเท่ากัน

$$M = R_s / (X + X_m) \quad [2.51]$$

$$N = R_s / (X - X_m / 3) \quad [2.52]$$

1.2) การเชื่อมต่อเปลือกโลหะแบบ 1 จุด หรือแบบไขว้

ตัวประกอบความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในเปลือกสาย หาได้ดังนี้

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^2}{12 \times 10^{12}} \right] \quad [2.53]$$

โดยที่

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6) \quad [2.54]$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}} \quad [2.55]$$

ρ_s = ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฉนวน (Ω/m)

t_s = ความหนาของฉนวน (mm)

D_s = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกของเปลือกสาย (mm)

สำหรับเปลือกตะกั่ว, g_s มีค่าเท่ากับ 1 และ $\frac{(\beta_1 t_s)^2}{12 \times 10^{12}} = 0$

สำหรับค่า $\lambda_0, \Delta_1, \Delta_2$ สามารถคำนวณได้โดยกำหนดให้ $m = \omega / R_s \cdot 10^{-7}$

ถ้า $m \leq 0.1$, Δ_1, Δ_2 มีค่าเท่ากับศูนย์

ค่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในเปลือกสาย จะขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางสายเคเบิลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายเคเบิลชนิด 1 แกน 3 เส้นวางแบบสามเหลี่ยม

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad [2.56]$$

$$\Delta_1 = (1.14m^{2.45} + 0.33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.66)} \quad [2.57]$$

$$\Delta_2 = 0 \quad [2.58]$$

- สายเคเบิลชนิด 1 แกน 3 เส้นวางแบบราบ

- สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งตรงกลาง

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad [2.59]$$

$$\Delta_1 = 0.86m^{3.08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.4m+0.7)} \quad [2.60]$$

$$\Delta_2 = 0 \quad [2.61]$$

- สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งด้านนอกสุดที่มีเฟสนำ

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad [2.62]$$

$$\Delta_1 = 4.7m^{0.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.16m+2)} \quad [2.63]$$

$$\Delta_2 = 21m^{3.3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.47m+5.06)} \quad [2.64]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งด้านนอกสุดที่มีเฟสตาม

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad [2.65]$$

$$\Delta_1 = - \frac{0.74(m+2)m^{0.5}}{2+(m-0.3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)} \quad [2.66]$$

$$\Delta_2 = 0.92m^{3.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)} \quad [2.67]$$

ส่วนค่าความสูญเสียเนื่องจากวงจรเปลือกสายจะมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีที่เปลือกสายมีการเชื่อมต่อแบบ 1 จุด รวมทั้งการเชื่อมต่อแบบไขว้ ซึ่งมีการแบ่งสายเคเบิลออกเป็นส่วนที่เท่าๆกันทางไฟฟ้า แต่ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อแบบไขว้โดยมีการแบ่งสายเคเบิลออกเป็นส่วนๆที่ไม่มีความสมดุลทางไฟฟ้านั้น จะมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกค้างซึ่งจะก่อให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากวงจรเปลือกสายในส่วนนั้น

2.2.5 ความสูญเสียในเปลือกโลหะและ screen ของสายเคเบิลชนิด Pipe-type cable

ในกรณีที่ตัวนำของสายเคเบิลชนิด pipe-type cable [16] มี screen หุ้มเฉพาะส่วนที่เป็นฉนวน เช่น เปลือกตะกั่ว หรือเทปทองแดง จะหาตัวประกอบความสูญเสียในเปลือกโลหะ ได้จาก

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \times \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2} \quad [2.68]$$

ถ้าแต่ละแกนของเคเบิลมีแผ่นหุ้มเปลือกสายที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กและ reinforcement สามารถใช้สูตรในการหาตัวประกอบความสูญเสียในเปลือกโลหะได้ดังสมการดังกล่าว โดยแทนค่า R_s ด้วยความต้านทานขนานระหว่างเปลือกโลหะและ reinforcement ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกโลหะหรือ screen (d) ในสูตรจะใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของเปลือกโลหะ และ reinforcement (d') แทนดังนี้

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}} \quad [2.69]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d' = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเปลือกโลหะและ reinforcement (mm)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเปลือกโลหะและ screen (mm)

d_r = เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของ reinforcement (mm)

2.2.6 ความสูญเสียของเกราะป้องกันสาย (Armor losses)

สายเคเบิลบางชนิดจะมีโครงสร้างของเกราะป้องกันสาย ซึ่งช่วยในการรับแรงเค้นทางกลที่เกิดขึ้น ความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในเกราะป้องกันสายจะเท่ากับความสูญเสียในรูปของกระแสไหลวน และ ฮิสเตอร์เรซิส

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2 \quad [2.68]$$

ในการใช้งานทั่วไปนั้น จะมีการเชื่อมต่อเกราะป้องกันสายลงดินหลายจุด ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากวงจรของเกราะป้องกันสาย (Circulating current) ในการคำนวณพิกัดกระแสของสายเคเบิลที่มีเกราะป้องกันสายซึ่งทำมาจากวัสดุประเภทที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Nonmagnetic material) เราสามารถคำนวณผลของความสูญเสียของเกราะป้องกันสายและเปลือกสายรวมกันได้ แต่ถ้าเกราะป้องกันสายมีโครงสร้างเป็นลวดเหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก หรือ เทป จะต้องคิดผลของความสูญเสียฮิสเตอร์เรซิสด้วย สำหรับในงานศึกษานี้จะไม่กล่าวถึงสูตรที่ใช้ในการคำนวณความสูญเสียที่เกิดขึ้นในเกราะป้องกันสาย ซึ่งประกอบด้วยความสูญเสียในรูปของฮิสเตอร์เรซิส และกระแสไหลวน เนื่องจากมีการใช้สายเคเบิลประเภทนี้ค่อนข้างน้อย

2.2.7 ความสูญเสียจากท่อร้อยสาย (Pipe or conduit losses)

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อความสูญเสียในสายเคเบิลก็คือความสูญเสียจากท่อร้อยสาย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและรูปแบบการวางของสายเคเบิลดังนี้

สำหรับสายเคเบิล 3 แกน

$$\lambda_2 = \left(\frac{f}{60}\right)^2 \left(\frac{0.0199 \cdot S - 0.001485 \cdot d_d}{R_{ac}}\right) 10^{-5} \quad [2.69]$$

โดยที่

S = ระยะห่างของแกนที่อยู่ใกล้กับตัวนำ (mm)

d_d = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (mm)

R_{ac} = ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ ณ อุณหภูมิการทำงานสูงสุด (Ω/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสายเคเบิล 1 แกนวางแบบสามเหลี่ยม (Trefoil formation)

$$\lambda_2 = \left(\frac{f}{60}\right)^{1.5} \left(\frac{0.0115 \cdot S - 0.001485 \cdot d_d}{R}\right) 10^{-5} \quad [2.70]$$

สำหรับสายเคเบิล 1 แกนวางแบบแครดเดิล (Cradle formation)

$$\lambda_2 = \left(\frac{f}{60}\right)^{1.5} \left(\frac{0.00438 \cdot S + 0.00226 \cdot d_d}{R}\right) 10^{-5} \quad [2.71]$$

ในทางปฏิบัติมักจะใช้สูตรสำหรับกรณีของสายเคเบิล 1 แกนที่วางลักษณะแบบสามเหลี่ยมหรือแครดเดิล ได้จาก

$$\lambda_2 = \left(\frac{f}{60}\right)^{1.5} \left(\frac{0.00794 \cdot S + 0.00039 \cdot d_d}{R}\right) 10^{-5} \quad [2.72]$$

เมื่อรวมผลของความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวนำ, เปลือกสาย, กระจกป้องกันสายเคเบิลและท่อร้อยสาย สามารถคำนวณความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับเป็นได้จาก

$$R_{ac(n)} = R_{dc} (1 + Y_{S(n)} + Y_{P(n)}) (1 + \lambda_{1(n)} + \lambda_{2(n)}) \quad [2.73]$$

โดยที่

$Y_{S(n)}$ คือ ตัวประกอบของปรากฏการณ์ทางผิวที่ความถี่ n เท่าของความถี่มูลฐาน

$Y_{P(n)}$ คือ ตัวประกอบของปรากฏการณ์ความใกล้เคียงที่ความถี่ n เท่าของความถี่มูลฐาน

$\lambda_{1(n)}$ คือ ตัวประกอบของความสูญเสียในเปลือกสายโลหะที่ความถี่ n เท่าของความถี่มูลฐาน

$\lambda_{2(n)}$ คือ ตัวประกอบของความสูญเสียในกระจกป้องกันสาย และท่อร้อยสาย ที่ความถี่ n เท่าของความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ประเภทของสายเคเบิลแบ่งตามลักษณะของงาน

ในการเลือกใช้สายเคเบิลนั้นควรต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ เนื่องจากสายเคเบิลนั้นมีหลายประเภท แต่ละประเภทยังได้ถูกออกแบบมาอย่างเหมาะสมกับงานด้านต่าง ๆ เราจึงแบ่งประเภทของสายเคเบิลตามลักษณะของงานได้เป็น 2 แบบ คือ

2.3.1 สายเคเบิลที่ใช้กับสถานที่ปกติทั่วไป

สถานที่ปกติทั่วไปในที่นี้หมายถึงสถานที่ที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ไม่มีข้อจำกัดหรือข้อหวงห้ามพิเศษใด ๆ ที่จะป็นอันตรายต่อบุคคลทั่ว ๆ ไป ดังนั้นสายเคเบิลสำหรับสถานที่ปกติจึงไม่สามารถใช้ได้กับอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรมในส่วนที่ไม่เป็นอันตรายเนื่องจากสารเคมี เปลวไฟ ความร้อน และความเสี่ยงด้านอื่น ๆ สายเคเบิลประเภทนี้จึงมีคุณสมบัติของฉนวนที่อยู่ในสถานะแวดล้อมปกติได้ดีโดยไม่เสื่อมคุณภาพตามสภาพแวดล้อมดังกล่าวโดยง่ายจึงสามารถแบ่งแยกสายเคเบิลประเภทนี้ตามพิคัดแรงดันได้เป็น 2 ชนิด

2.3.1.1 สายเคเบิลแรงสูง(High voltage Cable)

สายเคเบิลที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูงเป็นสายที่มีขนาดใหญ่ในลักษณะตัวนำทีเกลียวสายเคเบิลแรงสูงยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) สายเปลือย(Bare Cables)

เป็นสายที่ไม่มีเปลือกฉนวนหุ้มสาย ถ้าหากนำไปใช้กับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะไม่ปลอดภัย จึงใช้สายชนิดนี้กับงานแรงดันสูงระดับ 11 kV ขึ้นไป สายเปลือยที่นิยมใช้ในงานแรงดันสูงมักจะทำมาจากอลูมิเนียม เพราะมีน้ำหนักเบา และราคาถูก แต่สายอลูมิเนียมล้วน จะสามารถรับแรงดันได้ต่ำ จึงมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถรับแรงดันได้สูงขึ้น โดยการเสริมแกนเหล็กหรือใช้โลหะอื่นผสม สายเปลือยที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC : All Aluminium Conductor)

เป็นตัวนำอลูมิเนียมพันตีเกลียวเป็นชั้น ๆ สายชนิดนี้รับแรงดันได้ต่ำ จึงไม่สามารถขึงสายมีระยะห่างช่วงเสา (span) มาก ๆ ได้ โดยปกติความยาวช่วงเสาต้องไม่เกิน 50 m ยกเว้นสายที่ขนาด 95 mm² ขึ้นไปนั้น สามารถที่จะมีระยะห่างช่วงเสาได้ไม่เกิน 100 m

- สายอลูมิเนียมผสม (AAAC : All Aluminium Alloy conductor)

สายชนิดนี้มีส่วนผสมของอลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิกอน สายชนิดนี้ จะมีความเหนียว และรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน จึงสามารถขึงสายให้มีระยะห่างช่วงเสาได้มากขึ้น นิยมใช้เดินสายบริเวณชายทะเล เพราะสามารถทนต่อการกัดกร่อนของไอเกลือบริเวณชายทะเลได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการสื่อสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR : Aluminium Conductor steel Reinforced)

เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวและมีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง เพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้นทำให้ขยายระยะห่างระหว่างเสาได้มากขึ้น แต่จะไม่ใช้สายชนิดนี้ในบริเวณชายทะเล เพราะว่าจะไม่ทนการกัดกร่อนจากไอเกลือ ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

สายเปลือยทั้ง 3 ชนิด มีใช้ทั่วไปในระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และการไฟฟ้าภูมิภาค สำหรับสาย AAC นั้นยังมีใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงด้วย แต่ในปัจจุบันทางการไฟฟ้าได้มีนโยบายที่จะเลิกใช้สายชนิดนี้แล้ว เนื่องจากมีการลัดวงจรจากสัตว์ และกิ่งไม้บ่อย และได้หันมาใช้สายหุ้มฉนวนประเภท PIC และ SAC ที่จะกล่าวถึงต่อไป

2) สายหุ้มฉนวน (Insulated Cables)

ในการเดินสายเคเบิลแรงสูงผ่านบริเวณที่มีผู้คนอาศัยเพื่อความปลอดภัยจะต้องใช้สายเคเบิลแรงสูงที่มีฉนวนหุ้มและการใช้สายหุ้มฉนวนยังช่วยลดการเกิดลัดวงจรจากสัตว์ หรือกิ่งไม้ถูกสายไฟอีกด้วย ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือสูงขึ้นสายเคเบิลแรงสูงหุ้มฉนวนที่นิยมมีดังนี้

- สาย Partial Insulated Cable(PIC)

ดังได้กล่าวไปแล้วว่า การใช้สายเปลือยจะมีโอกาสเกิดลัดวงจรขึ้นได้ง่าย เพื่อลดปัญหานี้จึงได้มีการนำสาย PIC มาใช้แทนสายเปลือย โดยโครงสร้างของสาย PIC นี้จะประกอบด้วย ตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียวหุ้มด้วยฉนวน XLPE 1 ชั้นสาย Space Aerial Cable (SAC) แม้ว่าสายชนิดนี้จะมีฉนวน XLPE หุ้ม แต่ก็ไม่สามารถแตะต้องโดยตรงได้เนื่องจากฉนวนเป็นเพียงฉนวนบาง ซึ่งจะลดการเกิดลัดวงจรของสายเปลือกเท่านั้น การไฟฟ้าได้นำสายชนิดนี้มาใช้ทุกขนาด คือ 35 , 50 , 95 , 120 และ 185 mm² มาใช้งานโดยเดินในอากาศผ่านลูกถ้วยบนเสาไฟแทนสายเปลือย

- สาย Preassembly Aerial Cable (PAC)

สายชนิดนี้ มีโครงสร้างจัดเป็นสาย Fully Insulated มีโครงสร้างคล้ายสาย XLPE เนื่องจากสายชนิดนี้สามารถวางใกล้กันได้ จึงใช้สายชนิดนี้เมื่อสายไฟผ่านในบริเวณที่มีระยะห่าง (clearance) กับอาคารจำกัด หรือผ่านบริเวณที่คนอาศัยอยู่ สายชนิดนี้ยังไม่สามารถสางพาดไปกับมุมตึกได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานมาก การไฟฟ้าฯ ใช้สายชนิดนี้ อยู่ 2 ขนาด คือ 185 และ 240 mm² โดยในการเดินสายจะต้องใช้ Messenger Wire ช่วยคึงสายด้วย

- สาย Space Aerial Cable (SAC)

สาย SAC โครงสร้างเป็นตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียว มีฉนวน XLPE หุ้ม เช่นเดียวกับสาย PIC แต่จะมีเปลือก (Sheath) ที่ทำจาก XLPE หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ทำให้มีความทนทานมากกว่าสาย PIC ถึงแม้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายชนิดนี้จะมีเปลือก (Sheath) หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่งแต่ก็ไม่ควรสัมผัสสายโดยตรง จะเป็นอันตรายได้ ในการใช้งานสายเคเบิลชนิดนี้ การไฟฟ้าฯ ใช้เป็นวงจรเสริมสำหรับวงจรที่ใช้สาย PIC โดยในการเดินสายจะต้องใช้ Spacer เพื่อจำกัดระยะห่างระหว่างสาย สายชนิดนี้ถึงแม้ว่าจะสามารถวางได้ใกล้กันมากกว่าสาย PIC แต่ก็ต้องไม่เกินระยะจำกัดค่าหนึ่ง นอกจากนี้ จะต้องใช้ Messenger Wire ช่วยค้ำสายไว้ Messenger Wire จะต่อลงดินทำหน้าที่เป็นสาย Overhead Ground Wire ขนาดของสายที่การไฟฟ้าฯ จะมี 3 ขนาด คือ 35 ,70 และ 185 mm² โดยขนาด 185 mm² จะใช้เดินตามถนนสายหลักต่าง ๆ ขนาด 70mm² เป็นสายที่แยกจากถนนหลักเข้าซอย ส่วนขนาด 35 mm² เป็นสายที่แยกจากซอยอีกที

- สาย Cross - linked Polyethylene (XLPE)

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

ชีลด์ของตัวนำ (Conducting shield) ทำด้วยสายกึ่งตัวนำ (Semi conducting Material) มีหน้าที่ช่วยให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนกระจายอย่าง สม่ำเสมอในแนวรัศมี เป็นการช่วยลดการเกิด Break Down

ฉนวน (Insulation) เป็นชั้นที่หุ้มห่อชั้นชีลด์ของตัวนำอีกทีหนึ่งทำด้วยฉนวน XLPE สายเคเบิลที่คั่นผิวด้านนอกของชั้นฉนวน จะต้องเรียบ

ชีลด์ของฉนวน (Insulating Shield) เป็นชั้นของ Semi - Conducting Tape พันทับชั้นของฉนวน จากนั้นก็จะหุ้มด้วยชั้นของ copper tape อีกทีหนึ่งชีลด์ของฉนวนนี้จะทำหน้าที่จำกัดสนามไฟฟ้า ให้อยู่เฉพาะภายในสายเคเบิล เป็นการป้องกันรบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อชีลด์ลงดินยังช่วยลดอันตรายจากการสัมผัสถูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน

เปลือกนอก (Jacket) ชั้นของเปลือกนอกนี้อาจจะเป็น polyvinyl chloride หรือ polyethylene ก็ได้ แล้วแต่ว่าลักษณะของงาน จะเป็นอย่างไร ถ้างานกลางแจ้งก็มักจะใช้ polyvinyl chloride เพราะว่ามันเฉื่อยต่อการตีไฟ ในขณะที่ polyethylene มักจะใช้งานแบบเดินลอย เนื่องจากความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนในกรณีที่วางเคเบิลใต้ดิน อาจจะมีชั้นของ Service tape ซึ่งอาจทำด้วยชิ้นผ้า (Fabric Tape) คั่นระหว่างชีลด์ และเปลือกนอก ช่วยป้องกันเสียดสีและการกระทบกระแทก

สายชนิดนี้สามารถเดินลอยในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมใช้ฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้คืออยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 สายเคเบิลแรงต่ำ (Low Voltage Cable)

สายเคเบิลแรงต่ำเป็นสายไฟฟ้าที่ใช้ได้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ มีลักษณะเป็นสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนโดยที่ตัวนำอาจจะใช้ทองแดง หรืออลูมิเนียม แต่ที่นิยมใช้สำหรับสายเคเบิลแรงต่ำจะเป็นสายทองแดง สายขนาดใหญ่ จะมีลักษณะตัวนำเกลียว แต่ถ้าเป็นสายไฟฟ้าขนาดเล็กตัวนำก็จะเป็นตัวนำเดี่ยว วัสดุฉนวนที่นิยมใช้กับสายเคเบิลแรงต่ำ ได้แก่ polyvinylchloride (PVC) และ cross linked polyethylene (XLPE)

สำหรับฉนวน PVC นั้นเดิมตาม มอก.11-2518 ได้แบ่งชนิดของฉนวน PVC ที่ใช้งานเป็น 2 ชนิด คือฉนวน 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 สามารถใช้ได้รับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ สายเคเบิลชนิดนี้จะเป็นไปตาม มอก. 293-2526

สายเคเบิลอลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวน PVC สามารถใช้งานในระบบจำหน่ายแรงต่ำ เดิมภายนอกอาคารเป็นสายเมน(Main) หรือ สายป้อน (Feeder) โดยจะใช้เดินในอากาศเหนือพื้นดินทางการไฟฟ้า นครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะใช้สายชนิดนี้เป็นสายเมนแรงต่ำ เดินมาจากหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution transformers) พาดบนลูกถ้วยตามเสาไฟฟ้า หรือได้ขายคาบ้านหรือตึกแถว เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ สายชนิดนี้มีราคาถูก และรับแรงดึงได้พอควร

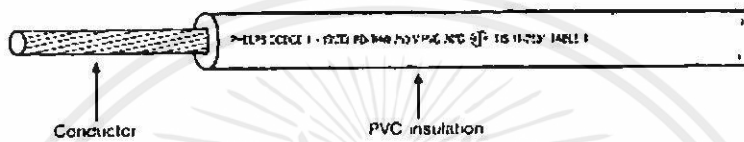
• สายเคเบิลทองแดงหุ้มด้วยฉนวน PVC

เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติข้อดีเหนือกว่าอลูมิเนียมหลายประการด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นโลหะที่มีความนำสูงกว่า การตัดต่อก็ทำได้ง่ายกว่า จึงนิยมใช้สายเคเบิลชนิดนี้กันมากสายทองแดงหุ้มด้วยฉนวน PVC มีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็เหมาะกับงานแต่ละแบบ ทำให้สามารถใช้สายเคเบิลชนิดนี้กับงานได้กว้างขวางมาก ตั้งแต่เป็นสายเชื่อมต่อวงจรเล็ก ๆ จนกระทั่งเป็นสายเมน หรือสายป้อน จะขอกกล่าวถึงตัวอย่างสายเคเบิลตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 11-2531 บางชนิดซึ่งมีการใช้งานทั่ว ๆ ไปตามสถานประกอบการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายเคเบิลตามตารางที่ 4 ของมอก.11-2531

สายเคเบิลชนิดนี้มีลักษณะเป็นสายกลมเดี่ยวตัวนำเป็นทองแดงหุ้มฉนวน PVC โดยทั่วไปนิยมใช้สายชนิดนี้เป็นสายวงจรย่อย , สายป้อนและสายเมน ซึ่งแต่เดิม มอก. 11-2518 ได้แบ่งสายชนิดนี้ออกเป็น 2 แบบ ตามชนิดของฉนวน PVC คือ ชนิดที่อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส จะมีชื่อเรียกว่า TW และชนิดที่อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส มีชื่อเรียกว่า THW แต่ในปัจจุบันตามมอก. 11-2531 สายไฟชนิดนี้มีมีแบบเดียวคือ มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของสายเคเบิลตามตารางที่ 4 มอก. 11-2531

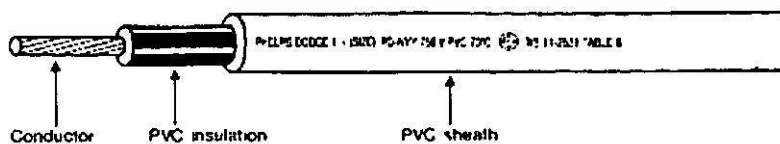
ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 750V
- อุณหภูมิใช้งาน : 70 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง
 - เดินลอยต้องยึดด้วยวัสดุฉนวน
 - เดินในท่อร้อยสาย ในสถานที่แห้ง
 - เดินในท่อร้อยสายฝังดินแต่ต้องป้องกันไม่ให้น้ำเข้าท่อ และป้องกันไม่ให้สายมีโอกาสแช่น้ำ
 - ห้ามฝังดินโดยตรง

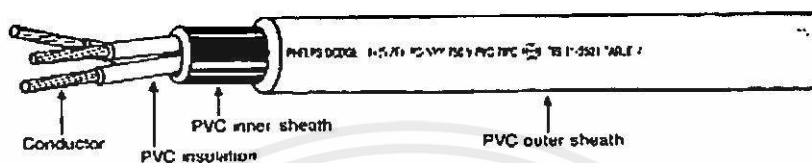
- สายเคเบิลตามตารางที่ 6,7 ของ มอก. 11-2531

เป็นสายที่มีฉนวน 2 ชั้น โดยฉนวน PVC ชั้นใน จะทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มตัวนำเอาไว้แล้วจะมีฉนวน PVC ชั้นนอกอีกชั้นหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นเปลือก (Sheath) ซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูง สายชนิดนี้จึงสามารถฝังดินได้โดยตรง สายตามตารางที่ 6 จะเป็นชนิด 1 แกน มีเปลือกชั้นเดียว สายตามตารางที่ 7 เป็นชนิด 2 ถึง 4 แกน มีเปลือกหุ้ม 2 ชั้น โดยทั่วไปนิยมใช้สายชนิดนี้เป็นสายป้อนและสายเมน จะเรียกสายชนิดนี้ว่า สาย NXY ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะสายเคเบิลตามตารางที่ 6 มอก. 11-2531



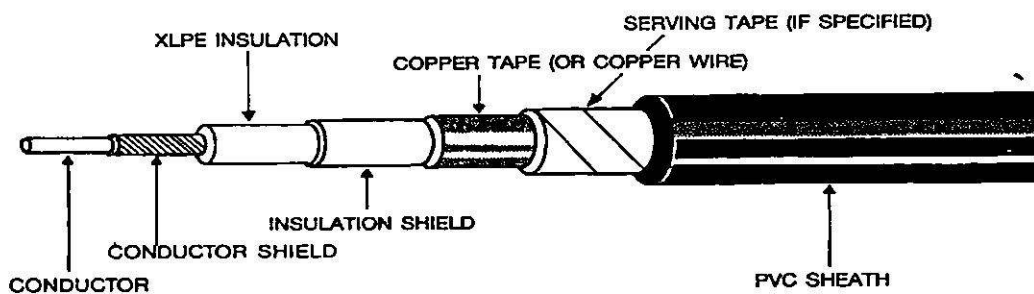
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะสายเคเบิลตามตารางที่ 7 มอก. 11-2531

ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 750V
 - อุณหภูมิใช้งาน : 70 องศาเซลเซียส
 - สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
 - ลักษณะการติดตั้ง - ใช้งานได้ทั่วไป - ฟังคืนโดยตรง
- สายเคเบิลทองแดงหุ้มด้วยฉนวน XLPE

เนื่องจากคุณสมบัติของฉนวน XLPE ที่สามารถทนต่อความร้อนได้สูงมีความแข็งแรง ทนต่อแรงทางกลและการกัดกร่อนทางเคมีได้ดี ในปัจจุบัน จึงมีการใช้สายเคเบิลที่หุ้มด้วยฉนวน XLPE มากขึ้น โดยสายชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า สาย CV ซึ่งไม่อยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.) แต่จะใช้มาตรฐานอื่น เช่น IEC 502 โดยทั่วไปสายชนิดนี้จะสามารถใช้งานได้เหมือนกับสาย NYY จึงนิยมใช้เป็นสายป้อนหรือสายเมน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของสาย CV

ข้อกำหนดการใช้งาน

- แรงดันใช้งาน : 0.6/1 KV
- อุณหภูมิใช้งาน : 90 องศาเซลเซียส
- สถานที่ใช้งาน : สถานที่แห้งและสถานที่เปียก
- ลักษณะการติดตั้ง - ใช้งานได้โดยทั่วไป
- ฝังดิน โดยตรง

2.3.2 สายเคเบิลใช้งานสำหรับสถานที่อันตรายและงานเฉพาะ

2.3.2.1 สถานที่อันตราย

หมายถึง สถานที่ใด ๆ ที่มีโอกาสและความเสี่ยงต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างไม่คาดฝัน ถ้าหากไม่ปฏิบัติตามกฎระเบียบข้อบังคับของเจ้าของสถานที่อย่างเคร่งครัด โดยทั่วไปสถานที่อันตรายที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลที่จะกล่าวถึงที่เห็นได้บ่อย ๆ ก็คือ โรงกลั่นน้ำมัน คลังเก็บน้ำมัน โรงแยกแก๊ส โรงงานผลิตไนโตรเจนเหลว รวมทั้งสถานที่ไว้ไฟ ทุกประเภทนอกจากนี้ยังรวมไปถึง สถานที่ที่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อวัสดุฉนวนได้ง่าย เช่น โรงงานปิโตรเคมี โรงปูน ฯลฯ ดังนั้น สายเคเบิลที่สามารถใช้ปฏิบัติงานในสถานที่อันตรายนี้จะต้องถูกออกแบบให้ได้ตามมาตรฐานของความปลอดภัยสำหรับงานนั้น ๆ ด้วย เช่น สายเคเบิลที่ใช้กับโรงกลั่นน้ำมัน จะต้องมีโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุที่สามารถป้องกันการถูกทำลายจากน้ำมันได้ เช่นมีเปลือกสายตะกั่วห่อหุ้มสายเคเบิลด้านนอก และต้องมีคุณสมบัติที่ไม่ติดไฟเป็นเหตุให้สายเคเบิลถูกทำลายได้ เป็นต้น

สายเคเบิลที่แนะนำคือ

- สาย HOFR - Heat resistant, oil resistant and flame retardant cables for

general application

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 sheath cable for hazard areas

สายเคเบิลดังกล่าวมีทั้ง Power cable Control และ Instrument Cable

2.3.2.2 งานเฉพาะ

หมายถึง งานที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมปกติที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างจากงานทั่วไป เช่น สายเคเบิลใต้น้ำ สายเหมือง สายที่ใช้ในเรือ สายที่ใช้งานกับลิฟท์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ยังมีสภาวะบางอย่างที่มักจะมองข้ามกันไป เช่น การใช้งานกับโหลดที่เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิก เนื่องจากฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้เกิดความสูญเสียที่อยู่ในรูปของความร้อน เป็นเหตุให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลง โหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดของ ฮาร์มอนิก สูง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ UPS มอเตอร์ หม้อแปลงและอุปกรณ์ที่เป็นพวกโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นทุกประเภท สายเคเบิลที่ใช้ในงานเฉพาะได้แก่

- สายโพลีเมอร์ทนไฟ(Fire Resistant Polymeric Cable)

สายชนิดนี้เรียกสั้น ๆ ว่า สาย F.R. จะมีชั้นของฉนวนไมก้า ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชม. ตามมาตรฐานการทดสอบของ IEC 331 ไม่เหมาะสมกับงานที่อยู่ในสภาวะของการเกิดเพลิงไหม้ที่มีระบบ ควบคุมครบวงจร เนื่องจากมาตรฐานของ IEC 331 ไม่ครอบคลุมถึงผลกระทบทางกลและน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้จากการดับเพลิงของเจ้าหน้าที่ ดังนั้นสายทนไฟชนิดนี้ จะต้องเดินในท่อเพื่อป้องกันและผลกระทบทางกลที่อาจเกิดขึ้นได้

- สายเคเบิลฉนวนแร่เปลือกโลหะ (Mineral Insulated Metal Sheathed Cable)

สายชนิดนี้เรียกสั้น ๆ ว่า สาย M.I. ขบวนการผลิตสายชนิด M.I. ต่างกับสายโดยสิ้นเชิง เรียกว่า ขบวนการผลิตแบบรีดเย็น ตามมาตรฐานของ IEC 702 ซึ่งสายปกติทั่วไป จะใช้กรรมวิธีฉีดพลาสติกหรือที่เรียกว่า Extrude ตามมาตรฐาน IEC 502 โครงสร้างของสายชนิด M.I ประกอบไปด้วยตัวนำที่ทำมาจากทองแดงเท่านั้น และมีฉนวนที่เป็นผงแร่ของ Magnesium oxide และหุ้มด้วยเปลือกสายทองแดงอีกชั้นหนึ่ง (copper sheath) แต่เมื่อนำไปใช้กับสถานที่ที่อาจเกิดการกักความร้อนจากไอของเกลือหรือสารเคมี จะต้องมิเปลือกสายที่เป็น PVC ห่อหุ้มอีกชั้นหนึ่งคุณสมบัติของสายเคเบิลชนิด MI จะเหนือกว่าสายชนิด FR เนื่องจากเป็นสายเคเบิลที่มีวัสดุเป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic Material) ดังนั้นจึงไม่มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่อยสลายไปตามสภาวะแวดล้อม มีความทนต่อสภาวะแวดล้อมในทุก ๆ สภาวะ แม้กระทั่งเวลาเกิดเพลิงไหม้

2.3.3 การวิเคราะห์หลักเกณฑ์ในการกำหนดขนาดของสายเคเบิล

ตัวแปรที่มีผลต่อการกำหนดขนาดของสายเคเบิลที่เหมาะสมนั้นมีหลายประการ เช่น อุณหภูมิรอบข้าง ค่าความต้านทานความร้อน การสูญเสียที่ตัวนำและส่วนประกอบที่เป็นโลหะเนื่องจากกระแสไฟฟ้า การสูญเสียที่ฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนไฟฟ้า แรงดันตก และพิบัติการทนต่อกระแสลัดวงจร เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล ในอดีตที่ผ่านมาการคำนวณหาขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสายเคเบิลและระบบจะกำหนดมาจากปัจจัยต่างๆดังกล่าวแต่ในปัจจุบันนี้มีการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ส่งผลตอบสนองต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้นในงานอุตสาหกรรมมากมาย อุปกรณ์เหล่านี้จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้น ปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่เกิดจากผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อสายเคเบิลได้แก่ ความสูญเสียในรูปความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดผลตามมาคือการเพิ่มอุณหภูมิของตัวนำ เปลือกโลหะ เกราะป้องกันสายและส่วนประกอบโลหะอื่นๆในระบบของสายเคเบิลนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขีดความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลลดลง กำลังสูญเสียทางความร้อนต่าง ๆ จะต้องถูกส่งผ่านความร้อนออกสู่ด้านนอกของสายเคเบิลโดยผ่านชั้นของฉนวนไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีค่าความต้านทานความร้อน R_{th} ไม่เท่ากัน ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางรอบ ๆ สายเคเบิลย่อมจะต้องมีขอบเขตจำกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิของฉนวนไฟฟ้าของสายเคเบิล เช่น ฉนวนไฟฟ้าประเภทวัสดุสังเคราะห์ PVC ชิดจำกัดของอุณหภูมิขณะใช้งานที่ยอมให้ให้ได้สูงสุดที่ตัวนำเพียง 70°C หรือฉนวน XLPE ทนได้ 90°C เป็นต้น ในการคำนวณหาขนาดกระแสไฟฟ้าที่สายเคเบิลสามารถรับได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ทำให้อุณหภูมิที่ตัวนำเพิ่มขึ้นขีดความสามารถที่ฉนวนไฟฟ้าห่อหุ้มตัวนำนั้นจะทนได้ จำเป็นต้องแยกแยะอุณหภูมิที่ตัวนำเพิ่มออกเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ เปลือกโลหะ เกราะป้องกันสาย และท่อร้อยสาย จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มขึ้น เราสามารถคำนวณหาขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวนำในรูปของตัวคูณลดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีฮาร์มอนิก

3.1 ทฤษฎีฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบของสัญญาณไซน์ ที่เป็นรายคาบใด ซึ่งมีความถี่ที่เป็นผลคูณของจำนวนเต็มเท่ากับความถี่มูลฐานของระบบ เช่นความถี่มูลฐานที่ 50 Hz ดังนั้น ฮาร์มอนิกที่ 2 จึงมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐาน คือ 100 Hz และฮาร์มอนิกที่ 3 มีค่าความถี่เป็นสามเท่าของความถี่มูลฐาน คือ 150 Hz

ฮาร์มอนิกรายคาบใด ๆ สามารถคำนวณหาโดยใช้ อนุกรมฟูเรียร์ ดังสมการ

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \quad [3.1]$$

โดยที่

$f(t)$ = สัญญาณรายคาบ

C_0 = องค์ประกอบกระแสตรง

n = อันดับฮาร์มอนิก

ω_0 = ความถี่มูลฐาน

C_n = ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ n

ϕ_n = มุมของฮาร์มอนิกอันดับที่ n

จากสมการดังกล่าว สัญญาณรายคาบใด ๆ จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระแสตรง และองค์ประกอบของสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน

3.1.1 ชนิดของฮาร์มอนิก

ในการวิเคราะห์การเกิดฟอลท์ เราสามารถแยกลำดับของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าโดยใช้องค์ประกอบสมมาตรออกเป็นลำดับบวก (Positive sequence) ลำดับลบ (Negative sequence) และลำดับศูนย์ (zero sequence) โดยในแต่ละลำดับจะมีคุณสมบัติและการเกิดที่แตกต่างกันออกไป ชนิดของฮาร์มอนิกก็เช่นกันก็จะประกอบด้วยฮาร์มอนิกทั้ง 3 แบบดังกล่าวโดยทั่วไปแล้ววงจรสามเฟสชนิดต่อแบบสตาร์ ถ้าสายนิวทรอตถูกต่อลงดินแล้วฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ ก็จะไม่มีเช่นเดียวกับในวงจรเดลต้าที่มีเฟสสมดุลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เฟสเซอร์ของกระแสฮาร์โมนิกอาจมีทิศทางการหมุนที่ต่างจากเฟสเซอร์ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental) นั่นคือมี ลำดับ (Sequence) ต่างกัน [10] โดยแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงลำดับฮาร์โมนิกและลำดับเฟสต่างๆ

ลำดับฮาร์โมนิก	ความถี่(Hz)	ลำดับเฟส
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0

โดยที่ + คือ กระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิกลำดับบวก (Positive sequence)

- คือ กระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิกลำดับลบ (Negative sequence)

0 คือ กระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิกลำดับศูนย์ (Zero sequence)

ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 9, 15 เรียกว่า Triple Harmonics ซึ่งมีลำดับเฟสเป็นลำดับศูนย์ และมีผลต่อการกำหนดขนาดของสายนิวทรอลดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.1.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายแหล่งด้วยกัน ได้แก่

3.1.2.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load)

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง อุปกรณ์เหล่านี้มีการดึงกระแสที่มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากเดิมเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ภายในตัวอุปกรณ์เหล่านี้จะมีค่าไม่คงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิก

ลำดับต่างๆ ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ โหลดที่รับไฟผ่านเรกติฟายเออร์ โหลดซึ่งรับไฟรวมทั้งระบบการเรกติฟายซึ่งมีผลต่อแหล่งจ่ายไฟหรือเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรทางด้านกระแสตรงมาก ความเหนี่ยวนำซึ่งมีหน้าที่ทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้นในวงจร ไทริสเตอร์เป็นตัวต้นเหตุที่ทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ มีรูปคลื่นใกล้เคียงคลื่นสแควร์(SquareWave) มาก ในเรกติฟายเออร์ แบบไม่มีการควบคุม (Uncontrolled Rectifier) และในคอนเวอเตอร์แบบความถี่ (Frequency Converter) ก็มีผลแบบเดียวกันเกิดขึ้น ถ้าหากมีการใช้ความเหนี่ยวนำสำหรับทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้น

ถ้าหากกระแสทางด้านโหลดใช้ความจุสำหรับทำให้สัญญาณเรียบขึ้นแทนที่จะใช้ความเหนี่ยวนำ กระแสสลับทางด้านอินพุตจะไหลเฉพาะช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่านั้นในช่วงครึ่งไซเคิล สัญญาณกระแสแบบตัด (Chopped Current Wave) เกิดขึ้นเพราะกระแสไหลได้เฉพาะช่วงของไซเคิลที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแหล่งจ่ายมากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ครอบคลุมความจุช่วงระยะที่กระแสไหลในแต่ละครึ่งไซเคิลขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุ ยิ่งขนาดใหญ่ก็ทำให้กระแสตรงที่ออกมาเรียบมากขึ้นและพัลส์ (Pulse) กระแสสลับมีระยะเวลาสั้นแต่มีขนาดสูง

ในกรณีที่ไม่ได้มีการใช้ทั้งความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้นทางด้านกระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟก็มีความเพี้ยนจากชายน้อย เรกติฟายเออร์ แบบคลื่นเต็มเฟสเดี่ยว (Full Wave Single Phase) เมื่อจ่ายกระแสให้โหลดที่เป็นความต้านทานอย่างเดียวก็น่าจะไม่มีค่าความเพี้ยนของชายนทางด้านกระแสของแหล่งจ่ายก็เกิดขึ้น

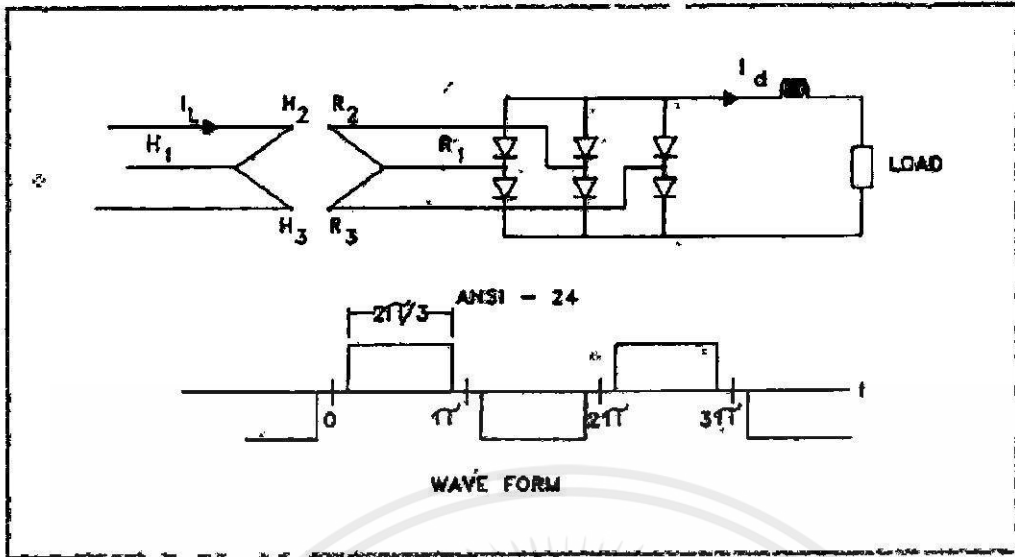
ค่าความเพี้ยนจากชายนี่เนื่องจากการใช้เรกติฟายเออร์ที่มากที่สุดก็คือสัญญาณสามเฟส กระแสสลับแบบคลื่นสแควร์ที่ผ่านเรกติฟายเออร์โดยมีความเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เพื่อทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้น ขนาดของฮาร์มอนิกได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งมีค่าสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้จากสัญญาณคลื่นสแควร์ด้านกระแสสลับของแหล่งจ่าย เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ในอุดมคติ

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของกระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ

ฮาร์มอนิก	ขนาด(Per Unit)
ความถี่พื้นฐาน(Fundamental)	1.0
5	0.2
7	0.143
11	0.09
13	0.077

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรคอนเวอเตอร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์

วงจรคอนเวอเตอร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์ เปลี่ยนแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยจ่ายกระแสตรงออกมาเรียบ ส่วนกระแสสลับมีลักษณะเป็นคลื่นสแควร์ กระแสสแควร์ทางด้านอินพุตที่มาจากแหล่งจ่ายไฟนั้นก็คือคลื่นที่ผิดเพี้ยนจากไซน์ซึ่งเมื่อแยกคลื่นออกโดยใช้ Fourier Analysis จะได้

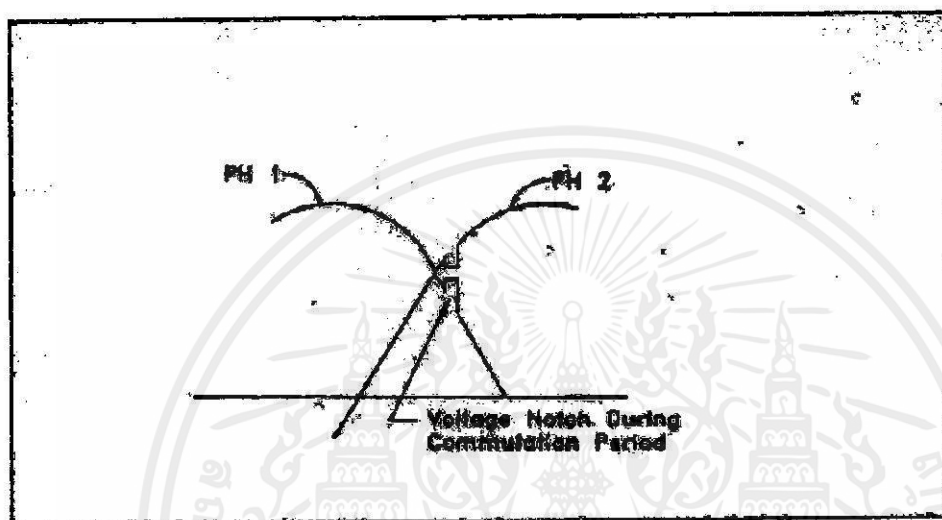
$$I_{ac} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos\theta - \frac{1}{5}\cos 5\theta + \frac{1}{7}\cos 7\theta - \frac{1}{11}\cos 11\theta + \frac{1}{13}\cos 13\theta \dots) \quad [3.2]$$

ลำดับคลื่นฮาร์โมนิก (n) ที่กำเนิดเท่ากับ $6k+1$ และ $6k-1$ โดยที่ $k = 1, 2, 3, \dots$ และขนาดฮาร์โมนิกแต่ละลำดับเท่ากับ I_d/n ดังตารางที่ 3.2

ค่าความเพี้ยนจากไซน์ของสัญญาณแหล่งจ่ายไฟอันเนื่องมาจากวงจรไทรสเตอร์ก็มีสาเหตุอีกประการที่เรียกว่าคอมมิวเตชันนอช (Commutation Notches) มันจะเกิดขึ้นทุก ๆ ครึ่งไซเคิลในแต่ละเฟสของระบบ 6 พัลส์ สาเหตุเกิดเนื่องจากการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้น ไทรสเตอร์บางขณะก็อยู่ในช่วงเป็นตัวนำและบางขณะก็ไม่เป็นตัวนำ (Conducting and Non-conducting) การที่ทำเช่นนั้นได้นั้น การคอมมิวเตทกระแสกับไทรสเตอร์ตัวถัดไปจำเป็นต้องลดวงจรทางด้านกระแสสลับชั่วขณะเป็นไมโครวินาที การจำกัดกระแสลดวงจรให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดความเหนี่ยวนำในสายและระบบ ความเหนี่ยวนำยิ่งมากกระแสลดวงจรน้อยและระยะเวลาที่เกิดก็ต้องให้นานพอควรในการทำให้เกิดคอมมิวเตชันที่สมบูรณ์

คอมมิวเตชันนอชอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ไม่ทราบว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดค่าความเพี้ยนจากชาวน้ เช่น มอเตอร์ขนาด 500 แรงม้า อาจมีขนาดคอมมิวเตชันนอชเกิดขึ้นขนาด 70% เป็นเวลา 0.25 ms โดยเกิด 6 ครั้ง ภายในครึ่งไซเคิลซึ่งก็คือ 1.5 ms ภายในหนึ่งไซเคิลหรือประมาณ 10% ของเวลา และถ้าหากมีมอเตอร์ดังกล่าวหลาย ๆ ชุดต่อกับบัสเดียวกันก็อาจทำให้มีผลเสียมากขึ้น ความถี่ของคอมมิวเตชันนอชอยู่ในย่านความถี่ Mid-Audio หรือสูงกว่าที่ทำให้เกิดการรบกวนคลื่นวิทยุและเกิดค่าความเพี้ยนจากชาวน้ในสัญญาณจากแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 3.2 แสดง Voltage Notch ในช่วงที่คอมมิวเตชัน

3.1.2.2 ความไม่สมดุลของเฟส (phase unbalance)

ความไม่สมดุลของเฟสที่เกิดขึ้นในระบบก็มีผลต่อระบบเช่นเดียวกับค่าความเพี้ยนจากชาวน้เพราะมันมีผลต่อมอเตอร์เช่นเดียวกับค่าความเพี้ยนของความถี่ สาเหตุของการเกิดความไม่สมดุลของเฟสก็เนื่องมาจากโหลดไม่สมดุลหรืออิมพีแดนซ์ของเฟสไม่สมดุลหรืออาจเกิดเนื่องมาจากมีโหลดแบบเฟสเดียวที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น เช่นการขับเคลื่อนแบบให้ไทรสเตอร์เฟสเดียวเป็นต้น ซึ่งทำให้มีปัญหาทางด้านฮาร์โมนิกเกิดขึ้นนอกเหนือจากเฟสไม่สมดุล

สาเหตุของความไม่สมดุลของเฟสที่คาดไม่ถึงอีกประการ คือ เมนเฟิร์สเฟสหนึ่งของคาปาซิเตอร์ขาดและเฟิร์สที่ขาดแบบนี้โดยทั่วไปก็ไม่ทราบว่ามันเกิดขึ้น ดังนั้นทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส ถ้าคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น 4% ของระบบเมื่อเฟิร์สขาดไปหนึ่งเฟส จะเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2% ทำให้เกิดความสูญเสียในมอเตอร์ประมาณ 8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

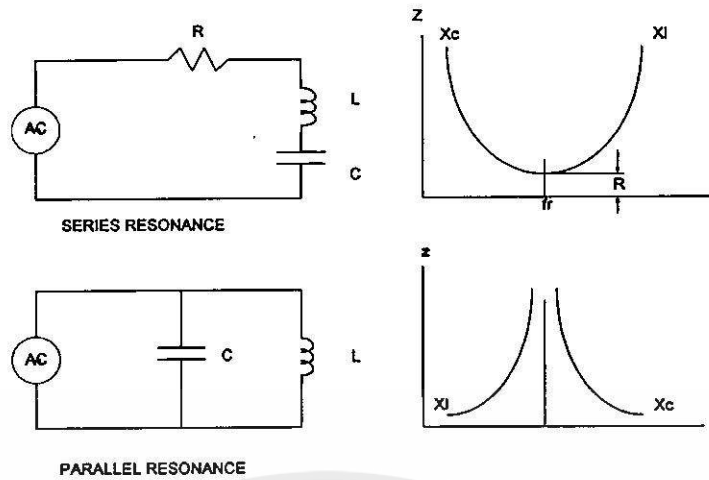
3.1.2.3 กระแสกระตุ้นและเฟอโรเรโซแนนซ์ (Exciting current and Ferroresonance)

กระแสกระตุ้น (Exciting Current) โดยปกติไม่ได้ทำให้เกิดค่าความเพี้ยนของคลื่น (Wave Distortion) แต่ปัญหาเกิดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเพราะกระแสกระตุ้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ตามมาตรฐานแล้วหม้อแปลงที่แรงดันไฟฟ้า 110% ของอัตรากระแสไม่ควรเกิดความร้อนมากเกินไป (Overheat) เมื่อไม่มีโหลดนั้นก็คือที่ 110% ของอัตราแรงดันไฟฟ้าความสูญเสียเนื่องจากกระแสกระตุ้นมีค่าเท่ากับความสูญเสียในหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดเต็มที่ ที่ 130% ของอัตราแรงดันไฟฟ้ากระแสกระตุ้น อาจมีขนาดใกล้เคียงกับกระแสโหลดเต็มที่ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 หรือ มากกว่ามีขนาดมากกว่า 50% และทำให้เกิดค่าความเพี้ยนของคลื่น

เฟอโรเรโซแนนซ์เป็นสิ่งที่ผิดปกติอีกอย่างที่เกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนักแต่เมื่อเกิดขึ้นแล้ว ก็ทำให้เกิดค่าความเพี้ยนของคลื่นและเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้น (Overvoltage) เฟอโรเรโซแนนซ์อาจเกิดขึ้นได้เมื่อเฟสหนึ่งเปิดวงจรออกและเฟสหนึ่งของหม้อแปลงถูกจ่ายไฟผ่านทางความจุ เกล็บบยาว 30-60 เมตร สามารถให้ความจุมากพอที่จะทำให้เกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ สาเหตุที่เกิดขึ้นอาจเป็นได้ว่าพิวส์ต้นทางตัวหนึ่งของสายที่จ่ายมายังหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 5000 kVA ขนาดลง ขนาดของกระแสคาปาซิเตอร์แม้เพียง 1% ของกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงก็สามารถทำให้เกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ได้กับหม้อแปลงที่ไม่ได้จ่ายโหลด โดยทั่วไปเฟอโรเรโซแนนซ์ไม่เกิดขึ้นถ้าหม้อแปลงจ่ายโหลดมากกว่า 30% ของอัตราวิธีป้องกันระบบก็คือพยายามไม่ให้เกิดการเอ็กไซไซด์หม้อแปลงผ่านความจุที่ต่ออนุกรมและพยายามให้หม้อแปลงจ่ายโหลดเสมอ เมื่อเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ขึ้นให้รีบปลดเฟสอื่น ๆ ของหม้อแปลงทันที

3.1.2.4 เรโซแนนซ์(Resonances)

กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลไปในระบบและมีความถี่ตรงกับเรโซแนนซ์ของระบบจะก่อให้เกิดกระแสขนาดสูงมากไหลในระบบ เรโซแนนซ์ในระบบมี 2 แบบ คือ เรโซแนนซ์ขนานและเรโซแนนซ์อนุกรม วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนานรวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขนานกระแสเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ส่วนวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเมื่อเกิดแล้วแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดกระแสไหลสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ [11,12] ถ้าไม่มีค่าความเหนี่ยวนำของคลื่นหรือไม่มีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น เรโซแนนซ์ที่มีอยู่ในระบบก็ไม่สร้างปัญหาแต่อย่างใด

ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จาก [11,12]

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} \quad [3.3]$$

$$= 50 \cdot \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVA_c}} \quad [3.4]$$

- L คือ ความเหนี่ยวนำของระบบ
 C คือ ความจุของระบบหรือคาปาซิเตอร์
 kVA_{sc} คือ kVA ลัดวงจรของระบบตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์
 kVA_c คือ kVA ของคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรโซแนนซ์อนุกรมโดยปกติเป็นวงจรที่ถูกออกแบบไว้คือ ตั้งใจทำขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาเนื่องจากเรโซแนนซ์ขนาน โดยใช้เรโซแนนซ์อนุกรมเป็นทางผ่านสำหรับฮาร์มอนิกที่ต้องการเรโซแนนซ์อนุกรมประกอบด้วยความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับความจุหรือคาปาซิเตอร์เพื่อเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่หนึ่งและอิมพีแดนซ์รวมของความเหนี่ยวนำและความจุมีค่าต่ำมากทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ดังกล่าวไหลเข้าไปในวงจรเรโซแนนซ์ที่หล่อไว้เพื่อไม่ให้ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้า บางครั้งก็เรียกวงจรเรโซแนนซ์ที่หล่อไว้ว่า แทรป (Trap) วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงมากๆ ดังนั้นจึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดเรโซแนนซ์ขนานที่ความถี่สูงๆ นี้เมื่อเพิ่มวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเข้าไป การต่อความเหนี่ยวนำอนุกรมเข้าไปทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ขนานต่ำลง

สำหรับกรณีการทำงานปกติของคอนเวอเตอร์พาราเมเตอร์ของวงจรซึ่งได้แก่ ความเหนี่ยวนำ ความจุและความต้านทานไม่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์เข้ากับความถี่ที่กำหนดจากคอนเวอเตอร์ ความจุของหม้อแปลง เคเบิลและสายมีค่าน้อยมากและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง เคเบิลและสายทำให้เกิดเรโซแนนซ์ได้แต่เป็นความถี่สูงมากๆ ซึ่งไม่มีปัญหาต่อระบบ แต่ถ้าเติมคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบมีโอกาสที่จะตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอเตอร์และนี่แหละที่เป็นปัญหาต้องแก้ไขเมื่อจะใช้คาปาซิเตอร์

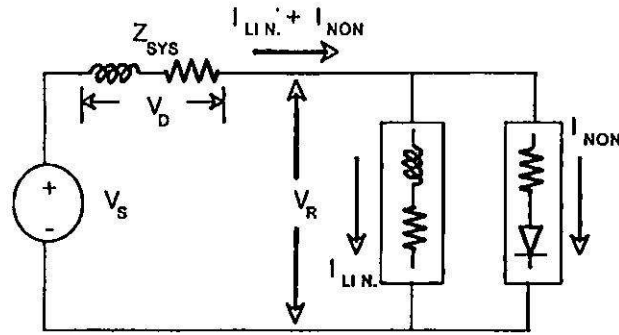
3.1.2.5 แหล่งกำเนิดอื่น ๆ

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอื่นๆ ได้แก่ สวิตช์เสิร์จ, ฟ้าผ่า, ฟอลท์ เป็นต้น

3.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิก

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบและอุปกรณ์ต่างๆ มีหลายประการ [13] เช่น ในกรณีที่โหลดซึ่งได้รับแรงดันไฟฟ้าในรูปของคลื่นไซน์ แต่มีการดึงกระแสที่มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากเดิม เมื่อวิเคราะห์โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์จะสามารถแยกรูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนไปออกเป็นส่วนประกอบความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกต่าง ๆ เมื่อพิจารณารูปที่ 3.4 ผลรวมของกระแสโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (I_{non}) และกระแสโหลดที่เป็นเชิงเส้น (I_{Ln}) นั้นจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบ (Z_{sys}) จะทำให้แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบ (V_D) เกิดผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ซึ่งจะทำให้แรงดันปลายทาง (V_R) ที่เป็นผลรวมของแรงดันแหล่งจ่ายไฟ (V_s) กับแรงดันตกคร่อมในอิมพีแดนซ์ของระบบ (V_D) เกิดความผิดเพี้ยนไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์มอนิกแรงดันฮาร์มอนิก และอิมพีแดนซ์ของระบบ

ฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆที่ต่ออยู่ในระบบ ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.2.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง มี 3 ประการดังนี้

1) กระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีไหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) มีค่าเพิ่มขึ้น

2) แรงดันฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียกระแสวน(Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่ายจ่ายแหล่งคลื่นรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{core} = (k_f f + k_f' f') V^2 \quad [3.5]$$

โดยที่	P_{core}	คือ	กำลังสูญเสียแกนเหล็ก
	$k_f f$	คือ	กำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส
	$k_f' f'$	คือ	กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก
	V	คือ	แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3) ทำให้เกิดเรโซแนนซ์(ที่ความถี่ฮาร์มอนิก) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย(Line Capacitors)

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซึ่งเกิดขึ้นความถี่ โดยกำลังสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกสูงๆ จะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าที่ฮาร์มอนิกต่ำๆ ถ้าหม้อแปลงต้องจ่ายโหลดที่มีฮาร์มอนิกมากๆ จะพบว่าความสามารถ

ในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงจะลดลง

สำหรับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกยังมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux Density Wave) ออกมาทำให้เกิดสัญญาณรบกวนอย่างมาก (Higher Noise Emission) เมื่อเทียบกับกรณีเป็นแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply) ฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพท์ (Resultant Flux) กระจายในช่องอากาศ (Air Gap) และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ค็อกกิ้ง (Cogging) คือการที่ไม่สามารถเดินเครื่อง (Start) มอเตอร์ได้ หรือเกิดครอว์ลิ่ง (Crawling) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

คู่ของฮาร์มอนิก (Harmonic Pairs) เช่นฮาร์มอนิกอันดับ 5 และ 7 จะมีศักยภาพที่จะทำให้เกิดการออสซิลเลตทางกล (Mechanical Oscillations) กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำ (Turbine-Generator) หรือระบบมอเตอร์-โหลด (Motor-Load System) การออสซิลเลตทางกลเกิดขึ้นเมื่อมีการกระทำ (Interaction) ระหว่างกระแสฮาร์มอนิกกับสนามแม่เหล็กที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency Magnetic field) ทำให้เกิดแรงบิดออสซิลเลตเป็นผลให้เกิดเรโซแนนซ์ทางกล ตัวอย่างเช่น ฮาร์มอนิกอันดับ 5 และ 7 จะทำให้เกิดแรงบิดหมุนกระตุ้น (Torsional Stimulus) ในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 6 คือ 300 Hz ถ้าความถี่ของการสั่นสะเทือนทางกลใกล้กับความถี่ของการกระตุ้นทางไฟฟ้าแล้ว จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ทางกลขึ้น

ยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกสำหรับมอเตอร์อย่างไรก็ได้มีผู้แนะนำชื่อว่า GOLDBERG กำหนดขีดจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกในมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่เกิน 5% โดยคำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

3.2.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเบงก์คาปาซิเตอร์

ผลกระทบของฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับคาปาซิเตอร์อย่างมาก การเพิ่มขึ้นของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad [3.6]$$

โดยที่ P_L = กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์

$$\tan \delta = R/(1/\omega C) = \text{Loss Factor}$$

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรนำมาใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_n = \text{แรงดันอาร์เอ็มเอสฮาร์โมนิกอันดับ } n$$

กรณีที่มีฮาร์โมนิก การหาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของคาปาซิเตอร์ ต้องคิดที่ความถี่หลักมูล และที่ความถี่ฮาร์โมนิก ค่ากำลังไฟฟ้ารวมนี้ต้องไม่เกินค่ากำลังไฟฟ้าพิคคของคาปาซิเตอร์ มิฉะนั้นจะทำให้คาปาซิเตอร์เสียหาย ตามมาตรฐานนานาชาติ IEC 70-1967 Power Capacitor และ IEC 70-1968 Self-Heating Metallised-Paper Power Capacitor กำหนดไว้ว่าคาปาซิเตอร์ต้องสามารถทำงานในภาวะโหลดเกิน (Overload) ได้ดังนี้

- กระแส (A) ได้ถึง 130%
- แรงดัน (V) ได้ถึง 110%
- กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAR) ได้ถึง 135%

3.2.4 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อฟิวส์

การที่ฟิวส์ขาดอาจเป็นผลอย่างหนึ่งของการมีฮาร์โมนิกในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกทำให้เกิดความร้อนอย่างมากในตัวฟิวส์ ทำให้ลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากกรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำ (Low Magnitude Fault) เกิดขึ้น และฮาร์โมนิกทำให้เวลาในการหลอมละลายของฟิวส์ลดลง

3.2.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนการเริ่มใช้ต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสไฟสลับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมาใช้กับระบบที่มีฮาร์โมนิกค่าที่วัดได้จะผิดพลาดหรือกรณีที่เกิดเรโซแนนซ์ในระบบมีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกค่าสูงในวงจร เป็นผลให้มิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) เช่นมิเตอร์วัดค-ชั่วโมง (Watt-hour Meters) ทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์โมนิก โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์โมนิกมากกว่า 20% จึงจะมีผลกับมิเตอร์

3.2.6 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

ฮาร์โมนิกส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าหลายประการ เช่น

1. เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์โมนิกจึงจะมีผลต่อแรงดันยอด (Peak Voltage) ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป
2. หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอร์คิวรีอาร์ค การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย จึงอาจเกิดเรโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์และวงจร ทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหายแก่หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คอมพิวเตอร์ จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิกอย่างมาก โดยเฉพาะถ้ารูปคลื่นแรงดันเพี้ยนจนมียอดแบนราบ (Flat Topping) และกระแสฮาร์มอนิกในสูงจนทำให้เกิดแรงดันที่คร่อมระหว่าง Neutral-ground สูง ดังนั้นทุกบริษัทที่มีขีดจำกัดฮาร์มอนิกค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ซึ่งขึ้นกับการออกแบบของแต่ละบริษัท ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกมากกว่าขีดจำกัดนี้ จะทำให้คอมพิวเตอร์เสียหายได้

4. อุปกรณ์ควบคุมความเร็วที่ใช้ทริสเตอร์ควบคุม ฮาร์มอนิกจะมีผลต่ออุปกรณ์ชนิดนี้ดังต่อไปนี้

4.1 แรงดันที่มีนอคซ์ทำให้มุมยิงของทริสเตอร์ผิดพลาด เป็นผลให้การควบคุมอุปกรณ์ผิดพลาดไป

4.2 ผลของเรโซแนนซ์ระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดแรงดันเกิน(Overvoltage) และเกิดการแกว่ง (Hunting) ของโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

3.2.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ(Low Level Noise) ก่อให้เกิดความรำคาญ เช่น ในระบบโทรศัพท์ ฮาร์มอนิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้เสียงที่พูดกันได้ยินเบากว่าปกติหรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูง(High Level) ทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจทำให้เกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือทำให้ระบบสื่อสารใช้การไม่ได้

3.2.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสายเคเบิลกำลัง

ถ้ามีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิล จะทำให้เกิดผลกระทบ [14,15] ดังนี้

1. ทำให้เกิดความสูญเสียในสายเคเบิล(Ohmic loss)เพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับจะมีค่าสูงขึ้นอันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ทางผิว, ปรากฏการณ์ความใกล้ชิดเชิง, ตัวประกอบความสูญเสียของเปลือกสายโลหะ, ตัวประกอบความสูญเสียของเกราะป้องกันสายและท่อร้อยสาย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายเคเบิล ขนาดของตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ ลักษณะการเชื่อมต่อสายเคเบิลและการจัดเรียงสายเคเบิล ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลลดลงด้วย ซึ่งรายละเอียดต่างๆในการคำนวณขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านจะกล่าวในบทที่ 3

2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของวงจร โดยเป็นผลจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านในวงจร ส่งผลให้ปลายทางมีความเพี้ยนของแรงดัน(Voltage distortion) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในระบบแรงดันสูงนั้น แรงดันตกคร่อมจะทำให้ความเครียดไดอิเล็กทริก(Dielectric stress)ของฉนวนสูงขึ้นกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลงและยังเกิดฟอลท์ง่ายขึ้น

3. ทำให้กระแสในสายนิวทรัลมีขนาดมากขึ้นในกรณีที่เกิด Triple Harmonics ไหลในสายนิวทรัล เมื่อพิจารณาในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย กระแสจะไหลจากสายเฟสไปยังสายนิวทรัลเพื่อให้

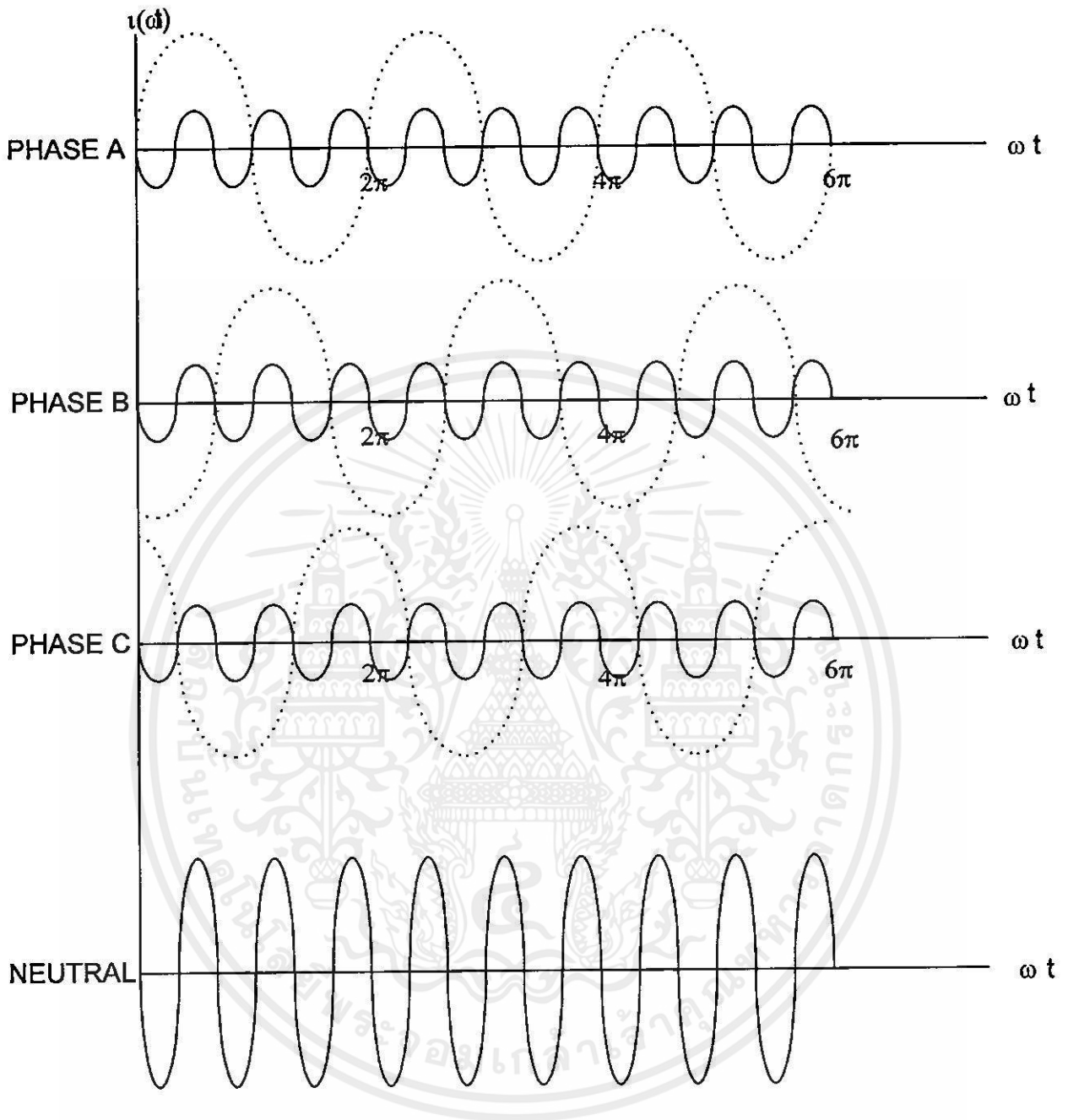
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครบวงจร ในระบบสามเฟสสมดุล มุมทางไฟฟ้าจะแตกต่างกัน 120 องศา ดังนั้นทำให้เกิดการหักล้างของกระแสให้เป็นศูนย์ ทำให้ในระบบสามเฟสสมดุลจึงไม่มีกระแสนิวทรัล

สำหรับฮาร์มอนิกที่ 2 กระแสเฟสมีมุมต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าเช่นกัน เมื่อกระแสนิวทรัลได้จากการรวมกันของกระแสในแต่ละเฟส ซึ่งรวมกันจะเป็นศูนย์หรือกล่าวได้ว่าสำหรับฮาร์มอนิกที่เป็นเลขคู่กระแสนิวทรัลจะเป็นศูนย์

สำหรับฮาร์มอนิกที่ 3 กระแสนิวทรัลจะมีลำดับเฟสเป็นศูนย์ซึ่งเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ในแต่ละเฟสเสริมกันในนิวทรัล ซึ่งทำให้ผลรวมของกระแสนิวทรัลของฮาร์มอนิกที่ 3 จะเป็นผลรวมของเลขคณิตของกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ในแต่ละเฟสและจะเป็นจริงสำหรับลำดับฮาร์มอนิกเลขคี่ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3 เช่น ฮาร์มอนิกที่ 3, 9, 15, 21 ... ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องคำนึงถึงขนาดสายนิวทรัลที่เหมาะสมกับประเภทของโหลดหรืออุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบและสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านได้โดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3 ซึ่งมีลำดับเฟสเป็นศูนย์ ในภาคผนวกจะแสดงตัวอย่างการพิสูจน์ว่าระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายนั้น สายนิวทรัลจะมีกระแสไหลเนื่องมาจากโหลดฮาร์มอนิก แม้ว่าโหลดทั้ง 3 เฟสจะสมดุลก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ในสายนิวทรัลของระบบ 3 เฟส 4 สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีการคำนวณขนาดกระแส ของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก

ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ก็คือความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิล จะปรากฏอยู่ในรูปของความร้อนภายในตัวนำ ฉนวน และส่วนประกอบต่างๆที่เป็นโลหะของสายเคเบิลได้แก่ เปลือกสายโลหะ เกราะป้องกันสายและท่อร้อยสายเป็นต้น ค่าพิกัดกระแสจะขึ้นอยู่กับเส้นทางที่ความร้อนถูกส่งผ่านไปตามผิวของส่วนต่างๆของสายเคเบิล และกระจายไปรอบๆ อุณหภูมิ ณ ส่วนต่างๆที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนนี้จะเป็ปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) และมีความสัมพันธ์กับผลรวมของความสูญเสียในรูปความร้อนที่เพิ่มขึ้น กฎของการไหลของความร้อนจะคล้ายกับกฎของโอห์ม โดยที่การไหลของความร้อน (Heat flow) จะสอดคล้องกับการไหลของกระแสไฟฟ้า ผลต่างของอุณหภูมิจะสอดคล้องกับความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้า และความต้านทานของความร้อน (Thermal resistance) จะสอดคล้องกับความต้านทานทางไฟฟ้า จากความสัมพันธ์ระหว่าง Heat losses และ Ohmic losses ดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาพิกัดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิล

การคำนวณขนาดพิกัดกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกนั้น จะต้องรวมกระแสฮาร์มอนิกทุกลำดับที่ไหลผ่านตัวนำ ผลรวมของกระแสทั้งหมดที่เวลา t เท่ากับ

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) \quad [4.1]$$

โดยที่

$i(t)$ = ผลรวมของกระแสซึ่งประกอบด้วยฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

$i_n(t)$ = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

ความสูญเสียในรูปของความร้อนของสายเคเบิลเส้นที่ i เนื่องมาจากฮาร์มอนิกลำดับที่ n นั้นหาได้จาก

$$Q_{i(n)} = \sum_{i=1}^{\infty} n_i I_n^2 r_{ac}(n) \quad [4.2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$Q_{i(n)}$ = ความร้อนที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลเส้นที่ i ต่อหน่วยความยาว

n_i = จำนวนตัวนำของสายเคเบิลเส้นที่ i

$r_{\infty}(n)$ = ความต้านทานรวมของตัวนำเนื่องมาจากฮาร์มอนิกลำดับที่ n
ต่อหน่วยความยาว

I_n = ค่าประสิทธิผลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

4.1 การคำนวณอุณหภูมิของตัวนำเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปของความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในตัวนำ ฉนวน และส่วนประกอบต่างๆที่เป็นโลหะของสายเคเบิลอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกส์จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ ส่วนต่างๆของสายเคเบิลจากการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว(Steady state) สำหรับอุณหภูมิของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n หาได้จาก [5]

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1(n) \\ \Delta T_2(n) \\ \vdots \\ \Delta T_m(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_{11} \dots 1/R_{12} \dots 1/R_{1m} \\ 1/R_{21} \dots 1/R_{22} \dots 1/R_{2m} \\ \vdots \\ 1/R_{m1} \dots 1/R_{m2} \dots 1/R_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -(\Delta Q_1(n) + T_a/R_{1a}) \\ -(\Delta Q_2(n) + T_a/R_{2a}) \\ \vdots \\ -(\Delta Q_m(n) + T_a/R_{ma}) \end{bmatrix} \quad [4.3]$$

เช่น อุณหภูมิของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 จะเท่ากับ

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1(2) \\ \Delta T_2(2) \\ \vdots \\ \Delta T_m(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_{11} \dots 1/R_{12} \dots 1/R_{1m} \\ 1/R_{21} \dots 1/R_{22} \dots 1/R_{2m} \\ \vdots \\ 1/R_{m1} \dots 1/R_{m2} \dots 1/R_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -(\Delta Q_1(2) + T_a/R_{1a}) \\ -(\Delta Q_2(2) + T_a/R_{2a}) \\ \vdots \\ -(\Delta Q_m(2) + T_a/R_{ma}) \end{bmatrix} \quad [4.4]$$

ดังนั้นอุณหภูมิการทำงานของตัวนำในสายเคเบิลเมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n ไหลผ่านจะเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} T_{1n} \\ T_{2n} \\ \vdots \\ T_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R_{11} \dots 1/R_{12} \dots 1/R_{1m} \\ 1/R_{21} \dots 1/R_{22} \dots 1/R_{2m} \\ \vdots \\ 1/R_{m1} \dots 1/R_{m2} \dots 1/R_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -(Q_1(1) + \Delta Q_1(2) + \dots + \Delta Q_1(n) + T_a/R_{1a}) \\ -(Q_2(1) + \Delta Q_{21}(2) + \dots + \Delta Q_2(n) + T_a/R_{2a}) \\ \vdots \\ -(Q_m(1) + \Delta Q_{m1}(2) + \dots + \Delta Q_m(n) + T_a/R_{ma}) \end{bmatrix} \quad [4.5]$$

และ

$$\begin{bmatrix} T_{1n} \\ T_{2n} \\ \vdots \\ T_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1(1) + \Delta T_1(2) + \dots + \Delta T_1(n) \\ T_2(1) + \Delta T_2(2) + \dots + \Delta T_2(n) \\ \vdots \\ T_m(1) + \Delta T_m(2) + \dots + \Delta T_m(n) \end{bmatrix} \quad [4.6]$$

โดยที่

$\Delta T_1(n), \Delta T_2(n), \dots, \Delta T_m(n)$ = อุณหภูมิของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากฮาร์มอนิก
ลำดับที่ 1 ถึง ลำดับที่ n

$T_{1n}, T_{2n}, \dots, T_{mn}$ = อุณหภูมิของตัวนำที่ 1 ถึง m เนื่องมาจากฮาร์มอนิก

4.2 การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก

กำหนดให้

$$[A] = \begin{bmatrix} 1/R_{11} \dots 1/R_{12} \dots 1/R_{1m} \\ 1/R_{21} \dots 1/R_{22} \dots 1/R_{2m} \\ \vdots \\ 1/R_{m1} \dots 1/R_{m2} \dots 1/R_{mm} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L_{11} \dots L_{12} \dots L_{1m} \\ L_{21} \dots L_{22} \dots L_{2m} \\ \vdots \\ L_{m1} \dots L_{m2} \dots L_{mm} \end{bmatrix} \quad [4.7]$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในตัวนำ ฉนวน และส่วนประกอบต่างๆที่เป็นโลหะของสายเคเบิลอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิก เราสามารถคำนวณหาอุณหภูมิที่พิกัดของตัวนำที่ m เมื่อมีกระแสที่พิกัด ฉ ความถี่มูลฐานไหลผ่าน (T_{mr}) ได้จากสมการ

$$T_{mr} = L_{m1}(Q_1(I) + T_d/R_{1d}) + L_{m2}(Q_2(I) + T_d/R_{2d}) + \dots + L_{mm}(Q_m(I) + T_d/R_{md}) \quad [4.8]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอุณหภูมิที่พิกัดของตัวนำที่ m เมื่อมีกระแสที่พิกัด n ไหลผ่าน (T_{mn}) จะเท่ากับ

$$T_{mn} = L_{m1}(\sum Q_1(n) + T_d/R_{1d}) + L_{m2}(\sum Q_2(n) + T_d/R_{2d}) + \dots + L_{mn}(\sum Q_m(n) + T_d/R_{md}) \quad [4.9]$$

กำหนดให้

T_R คืออุณหภูมิที่พิกัดของตัวนำที่ทำมาจากวัสดุหนึ่งๆ

ดังนั้น n เงื่อนไขที่พิกัดอุณหภูมิจะได้ว่า

$$T_R = T_{mr} = T_{mn}$$

สำหรับตัวนำที่ m จะได้รับความสัมพันธ์ n พิกัดอุณหภูมิดังนี้

$$L_{mn}(Q_m(1) + T_d/R_{md}) = L_{mn}(\sum Q_m(n) + T_d/R_{md}) \quad [4.10]$$

$$I_{mf}^2 R_{ac} = I_{mr}^2(1) R_{ac}(1) + I_{mr}^2(2) R_{ac}(2) + \dots + I_{mr}^2(n) R_{ac}(n) \quad [4.11]$$

โดยที่ $R_{ac} = R_{ac}(1)$ n ความถี่มูลฐาน

$$I_{mf}^2 = I_{mr}^2(1) + I_{mr}^2(2) R_{ac}(2)/R_{ac} + \dots + I_{mr}^2(n) R_{ac}(n)/R_{ac} \quad [4.12]$$

กำหนดให้

$$\beta(n) = \frac{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}}\right)_n}{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}}\right)_{fund}} \quad [4.13]$$

โดยที่

β_n คือ อัตราส่วนระหว่างความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับต่อความต้านทานกระแสไฟฟ้าตรงที่ความถี่ n เทียบกับอัตราส่วนดังกล่าวที่ความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสาร α , คือ Harmonics distribution factor ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระหว่างกระแส ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์มอนิกลำดับที่ n เมื่อเทียบกับกระแสที่ความถี่มูลฐาน (I_b : Base Current)

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้ว่า

$$\beta_2 = R_{xc}(2)/R_{xc}, \beta_3 = R_c(3)/R_c, \dots, \beta_n = R_c(n)/R_c \quad [4.14]$$

และ

$$\alpha_1 = I_{mr}(1)/I_{mr} \dots \alpha_n = I_{mr}(n)/I_{mr} \quad [4.15]$$

ดังนั้น

$$I_{mrf}^2 = I_{mr}^2 + \alpha_2^2 I_{mr}^2 \beta_2 + \alpha_3^2 I_{mr}^2 \beta_3 + \dots + \alpha_n^2 I_{mr}^2 \beta_n \quad [4.16]$$

$$I_{mrf}^2 = I_{mr}^2 (\alpha_2^2 \beta_2 + \alpha_3^2 \beta_3 + \dots + \alpha_n^2 \beta_n) \quad [4.17]$$

$$\frac{I_{mr}^2}{I_{mrf}^2} = \frac{1}{1 + \alpha_2^2 \beta_2 + \alpha_3^2 \beta_3 + \dots + \alpha_n^2 \beta_n} \quad [4.18]$$

$$\frac{I_{mr}}{I_{mrf}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \alpha_2^2 \beta_2 + \alpha_3^2 \beta_3 + \dots + \alpha_n^2 \beta_n}} \quad [4.19]$$

โดยที่

$\frac{I_{mr}}{I_{mrf}}$ คือ ตัวคูณลดขนาดกระแสเมื่อคำนึงถึงฮาร์มอนิก (Harmonic Derating Factor)

I_{mr} คือ กระแส โหลด (rms) ที่ความถี่ของฮาร์มอนิก

I_{mrf} คือ กระแสพิกัด (rms) ที่ความถี่มูลฐาน

ดังนั้น

Harmonic Derating Factor สำหรับกระแสเฟส

$$HDF = \sqrt{\frac{1}{1 + \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_n^2 \beta_n}} \quad [4.20]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Harmonic Derating Factor for Neutral สำหรับกระแสไฟฟ้า

$$\text{NHDF} = \sqrt{\frac{1}{1 + \sum_{n=3k}^{\infty} \alpha_n^2 \beta_n}} \quad [4.21]$$

เมื่อ k เป็นเลขคี่

กระแสที่พิกัดที่สายเคเบิลสามารถรับได้เท่ากับ $I_{nrf} \times \text{HDF}$ (A)

4.3 แผนผังการทำงาน (Flow Chart)

ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ในงานศึกษานี้ ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยมีลำดับขั้นตอนเริ่มจากการป้อนข้อมูลต่างๆ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณโดยอาศัยข้อมูลที่ใช้ป้อนรวมทั้งข้อมูลพื้นฐานที่เก็บเอาไว้ในหน่วยความจำ และแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นค่า Derating Factor กระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้เมื่อคำนวณผลกระทบจากกระแสฮาร์โมนิก ขนาดและชนิดของสายเคเบิล วิธีการติดตั้งสายเคเบิล นอกจากนี้ผู้ใช้สามารถเลือกให้โปรแกรมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรัลในรูปต่อหน่วย หรือ Derating Factor กับเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกที่ 3 ได้ สรุปขั้นตอนการคำนวณเริ่มจาก

1. กำหนดกระแสโหลด(A)
2. เลือกลักษณะการวางสายเคเบิล

-แบบราบ

-แบบสามเหลี่ยม วางในรางเคเบิล

-แบบสามเหลี่ยม วางในท่อร้อยสาย

เลือกชนิดสายเคเบิล

THW 1 แกน

NYN 1 แกน

NYN 2 แกน

NYN 3 แกน

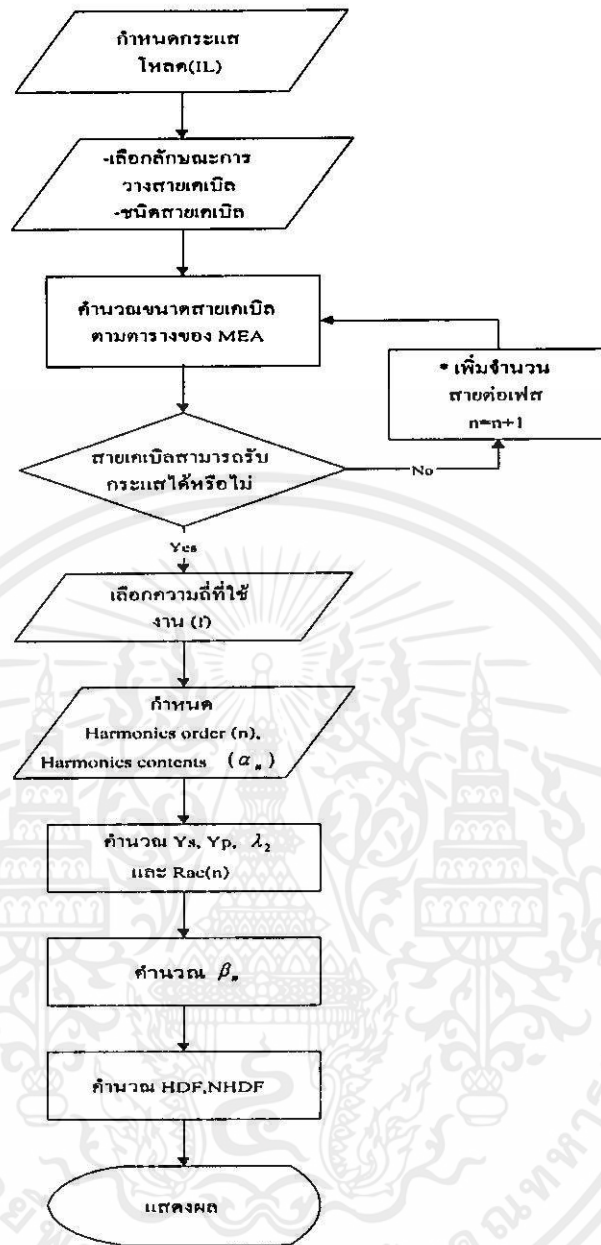
NYN 4 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรมทำการคำนวณขนาดสายเคเบิลและขนาดท่อร้อยสายที่เหมาะสมตามขนาดกระแสโหลดและชนิดสายเคเบิล และลักษณะการวางสายสอดคล้องกับตารางของการไฟฟ้านครหลวง ปีพ.ศ.2538
กรณีถ้ากระแสโหลดมีขนาดมากกว่าขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้นั้น โปรแกรมจะแสดงข้อความถามผู้ใช้งานว่าจะเพิ่มจำนวนสายต่อเฟสหรือไม่ ผู้ใช้สามารถกำหนดจำนวนสายเคเบิลต่อเฟสได้ โดยโปรแกรมจะคำนวณขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสม
4. เลือกความถี่ที่ใช้งาน 50 Hz หรือ 60 Hz
5. กำหนดลำดับของกระแสฮาร์โมนิก (n) และอัตราส่วนของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n ต่อกระแสมูลฐาน โดยผู้ใช้สามารถเลือกคำนวณ Derating Factor ที่กระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ได้ไม่เกิน 6 ลำดับ
6. โปรแกรมทำการคำนวณว่า Derating Factor ของสายไฟ (HDF) หรือสายนิวทรอล (NHDF)
7. แสดงผลการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงแผนผังการทำงาน

*หมายเหตุ ถ้ากระแสไหลคมีขนาดมากกว่าขนาดกระแสที่สายเคเบิลในภาคผนวก ข สามารถรับได้นั้น โปรแกรมจะทำการเพิ่มจำนวนสายเคเบิลต่อเฟส โดยเพิ่มจำนวนสายเคเบิลต่อเฟสอีกครั้งละ 1 เส้น จนกว่าจะมีสายเคเบิลที่สามารถรับกระแสที่คำนวณใหม่ได้ (ขนาดกระแสใหม่ที่ไหลผ่านสายเคเบิลจะคำนวณได้จากขนาดกระแสเดิมหารด้วยจำนวนสายเคเบิลต่อเฟส) และโปรแกรมจะทำการเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมให้อัต โนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ตัวอย่างการคำนวณและการวิเคราะห์ผลจากการศึกษา

ในบทนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำและสูง และวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดค่า Derating Factor รวมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากงานศึกษานี้กับมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันและงานศึกษาของผู้อื่นที่ได้นำเสนอใน IEEE

5.1 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1 เป็นการหาขนาดกระแสของสายนิวทรอลของหม้อแปลงกำลังพิกัด 250 kVA (ระบบ 3 เฟส, 4 สาย) โดยคำนวณออกมาในรูปตัวคูณลดกระแส (Neutral Harmonics Derating Factor) ใช้สาย NYY 1 แกนขนาด 300 mm² จำนวน 4 เส้น วางในท่อร้อยสายขนาด 5 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการจัดเรียงและติดตั้งสายเคเบิล

สายนิวทรอลมีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 เท่ากับ 56% ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

ขั้นตอนการคำนวณ

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิวที่ความถี่มูลฐาน $f = 50$ Hz

$$\beta = 1 - \frac{d_i}{d_c} = 1$$
$$m^2 = \frac{2\pi\mu_r\mu_0 f}{\rho}$$

$$= \frac{8\pi^2 \times 50 \times 10^{-7}}{1.7241 \times 10^{-8} [1 + 0.00393 (70 - 20)]} = 19153$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 1.7241 x 10⁻⁸ [1 + 0.00393 (70 - 20)] ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = 0.25 m^2 K_s (d_c - d)^2$$

$$= 0.25 \times 19153 \times 1(22.68 \times 10^{-3})^2 = 2.463$$

$$0 < z \leq 5,$$

$$a(z) = \frac{7z^2}{315 + 3z^2} = 0.127$$

$$b(z) = \frac{56}{211 + z^2} = 0.258$$

$$Y_s = a(z) \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] = 0.03$$

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ความถี่ที่ความถี่มูลฐาน $f = 50 \text{ Hz}$

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi \cdot f}{R_{dc}} \cdot 10^{-7} K_p}$$

$$= \sqrt{\frac{8\pi \times 50 \times 10^{-7} \times 0.8}{6.01 \times 10^{-5} (1 + 0.00393 \times 50)}} = 1.1826$$

$$y = \frac{dc}{S} = \frac{22.68}{35} = 0.648$$

$$0 < x_p \leq 2.8,$$

$$G(x) = \frac{11x_p^4}{704 + 20x_p^4} = 0.029$$

$$H(x_p) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 0.0283x_p^4}{1 + 0.0042x_p^4} = 0.349$$

$$Y_p = \frac{3y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} = 0.019$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่มูลฐาน $f = 50 \text{ Hz}$

$$\begin{aligned} R_{ac} &= R_{dc}(1+Y_s+Y_p) = 0.0601 \times 10^{-3}(1+0.00393(50))(1+0.03+0.019) \\ &= 0.754 \times 10^{-4} \Omega/\text{m} \end{aligned}$$

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิวที่ความถี่ $f = 150 \text{ Hz}$

$$\begin{aligned} m^2 &= \frac{2\pi\mu_r\mu_0 f}{\rho} \\ &= \frac{8\pi^2 \times 150 \times 10^{-7}}{1.7241 \times 10^{-8} [1 + 0.00393 (50 - 20)]} = 57459 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= 0.25 m^2 K_s (d_c - d)^2 \\ &= 0.25 \times 57459 \times (22.68 \times 10^{-3})^2 = 7.389 \end{aligned}$$

$5 < z \leq 30$,

$$\begin{aligned} a(z) &= 0.19701 - 0.1546295z + 0.073796z^2 - 9.02854 \cdot 10^{-3} z^3 + 6.27032 \cdot 10^{-4} z^4 \\ &\quad - 2.69028 \cdot 10^{-5} z^5 + 7.0647 \cdot 10^{-7} z^6 - 1.4301 \cdot 10^{-8} z^7 + 6.62315 \cdot 10^{-11} z^8 \\ &= 0.8165 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(z) &= 0.5356 - 0.21030734z + 6.495563 \cdot 10^{-2} z^2 - 1.089373 \cdot 10^{-2} z^3 + 1.03728739 \cdot 10^{-3} z^4 \\ &\quad - 5.8238557 \cdot 10^{-5} z^5 + 1.91099645 \cdot 10^{-6} z^6 - 3.38936767 \cdot 10^{-8} z^7 + 2.509622 \cdot 10^{-10} z^8 \\ &= 0.2148 \end{aligned}$$

$$Y_s = a(z) \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] = 0.2329$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ความถี่ที่ความถี่ $f = 150 \text{ Hz}$

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi \cdot f}{R_{dc}} \cdot 10^{-7} K_p}$$

$$= \sqrt{\frac{8\pi \times 150 \times 10^{-7} \times 0.8}{6.01 \times 10^{-5} (1 + (0.00393 \times 50))}} = 2.0483$$

$0 < x_p \leq 2.8$,

$$G(x_p) = \frac{11x_p^4}{704 + 20x_p^4} = 0.183$$

$$H(x_p) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 0.0283x_p^4}{1 + 0.0042x_p^4} = 0.465$$

$$Y_p = \frac{3y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} = 0.12$$

คำนวณตัวประกอบความสูญเสียของท่อร้อยสายที่ความถี่ $f = 150 \text{ Hz}$

$$\lambda_2 = \left(\frac{f}{60}\right)^{1.5} \left(\frac{0.00794 \cdot s + 0.00039 \cdot d_d}{R}\right) 10^{-5}$$

$$= \left(\frac{150}{60}\right)^{1.5} \left(\frac{0.00794 \times 35 + 0.00039 \times 128.19}{0.754 \times 10^{-4}}\right) 10^{-5} = 0.172$$

ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่มูลฐาน $f = 150 \text{ Hz}$

$$R_{ac(3)} = R_{dc} (1 + Y_{S(3)} + Y_{P(3)}) (1 + \lambda_{1(3)} + \lambda_{2(3)})$$

$$= 0.0601 \times 10^{-3} (1 + 0.00393(50)) (1 + 0.233 + 0.12) (1 + 0.172)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $= 1.13 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta(n) = \frac{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}}\right)_n}{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}}\right)_{fund}}$$

$$\beta(3) = \frac{1.13 \times 10^{-4}}{0.754 \times 10^{-4}} = 1.49$$

$$\alpha(3) = 0.56$$

$$\begin{aligned} NHDF &= \sqrt{\frac{1}{1 + \alpha^2(3) \cdot \beta(3)}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{1 + (0.56)^2 \times 1.49}} = 0.83 \end{aligned}$$

กระแสที่พิกัดที่หม้อแปลงกำลังสามารถจ่ายได้เท่ากับ

$$= \frac{250 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 380 \text{ A}$$

สาย NYY 1 แกนขนาด 300 mm²วางในท่อร้อยสายจะรับกระแสได้ 400 A ตามตารางที่ 5-12 กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ. 2538 ของการไฟฟ้านครหลวง ดังนั้นเมื่อรวมผลกระทบจากฮาร์มอนิกที่ 3 แล้วสายเคเบิลจะรับกระแสได้เพียง 400 x 0.83 = 332 A

ดังนั้นจะเห็นถ้าเกิดมีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 โหลดในสายนิวทอลประมาณ 56 เปอร์เซ็นต์ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน สายนิวทอลจะไม่สามารถรับกระแสโหลดจำนวน 380 A ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2 คำนวณหา Derating factor ของสายเคเบิล ชนิด 10 kV Single XLPE Cable เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ผ่านสายเคเบิล 20 % ของกระแสมาตรฐาน ติดตั้งสายเคเบิลแบบราบฝังดิน โดยตรงและมีระยะห่างระหว่างสายเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของสายเคเบิล และเปลือกโลหะถูกเชื่อมแบบโดยตรง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 287 (1982) ดังนี้

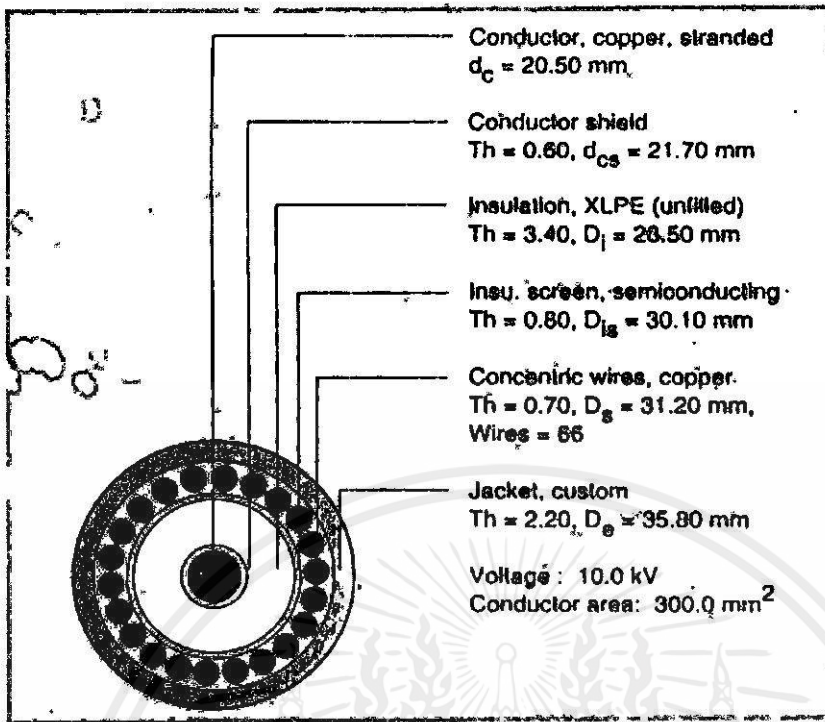
Conductor	Cu Stranded
S (mm ²)	300
d_c (mm)	20.5
d_{cs} (mm)	21.7

Insulation	XLPE
D_i (mm)	28.5
D_{is} (mm)	30.1

Screen/Sheath	Cu Wires
D_s (mm)	31.4

Jacket/Bedding	PVC
----------------	-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิด 10 kV Single XLPE Cable

กำหนดให้อุณหภูมิใช้งานของตัวนำ เท่ากับ 90°C , $k_r = 1$ และ $R_{s0} = 0.759 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$
 วางสายเคเบิลแบบราบ โดยมีระยะห่างระหว่างสาย = 71.6 mm

ขั้นตอนการคำนวณ

$$\text{คำนวณหา } R_{dc} = 6.01 \times 10^{-5} [1 + (0.00393 \times 70)] = 7.663 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิวที่ความถี่มูลฐาน $f = 50 \text{ Hz}$

$$\beta = 1 - \frac{d_i}{d_c} = 1$$

$$m^2 = \frac{2\pi\mu_r\mu_0 f}{\rho}$$

$$= \frac{8\pi^2 \times 50 \times 10^{-7}}{1.7241 \times 10^{-8} [1 + 0.00393 (90 - 20)]} = 17958$$

$$Z = 0.25 \cdot m^2 K_g (d_c - d)^2$$

$$= 0.25 \times 17958 \times 1 (0.0205)^2 = 1.887$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 < z \leq 5,$$

$$a(z) = \frac{7z^2}{315 + 3z^2} = 0.0765$$

$$b(z) = \frac{56}{211 + z^2} = 0.26$$

$$Y_s = a(z) \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] = 0.0138$$

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ความถี่เชิงที่ความถี่มูลฐาน $f = 50$ Hz

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi \cdot f}{R_{dc}} \cdot 10^{-7} K_p}$$

$$= \sqrt{\frac{8\pi \times 50 \times 10^{-7} \times 0.8}{7.663 \times 10^{-5}}} = 1.14$$

$$y = \frac{dc}{S} = \frac{20.5}{71.6} = 0.286$$

$$0 < x_p \leq 2.8,$$

$$G(x_p) = \frac{11x_p^4}{704 + 20x_p^4} = 0.04$$

$$H(x_p) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 0.0283x_p^4}{1 + 0.0042x_p^4} = 0.35$$

$$Y_p = \frac{3y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} = 0.0048$$

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ทางผิวที่ความถี่ $f = 150$ Hz

$$Y_{s(3)} = 0.11$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณตัวประกอบปรากฏการณ์ความถี่เสียงที่ความถี่ $f = 150 \text{ Hz}$

$$Y_{p(3)} = 0.023$$

คำนวณความต้านทานของ screen โดยกำหนดให้อุณหภูมิของ concentric neutral wires มีค่าเท่ากับ $83 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิใช้งานของตัวนำถึง $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$R_s = 0.759 \times 10^{-3} (1 + 0.00393 \times 63) = 0.947 \times 10^{-3} \ \Omega/\text{m}$$

คำนวณตัวประกอบความสูญเสียใน screen เนื่องจาก circulating current ที่ความถี่ 50 Hz

$$X = \omega \cdot 2 \times 10^{-7} \ln(2s/d) = 4 \pi \cdot 50 \times 10^{-7} \ln[2 \times (71.6/31.2)] = 0.957 \times 10^{-4} \ \Omega/\text{m}$$

$$X_m = 4 \pi \cdot 50 \times 10^{-7} \ln(2) = 0.436 \times 10^{-4} \ \Omega/\text{m}$$

$$P = X_m + X = 0.957 \times 10^{-4} + 0.436 \times 10^{-4} = 0.139 \times 10^{-4} \ \Omega/\text{m}$$

$$Q = X - X_m/3 = 0.957 \times 10^{-4} - (0.436 \times 10^{-4})/3 = 0.812 \times 10^{-4} \ \Omega/\text{m}$$

สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งด้านนอกสุดที่มีเฟสตาม

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] = 0.206$$

สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งด้านนอกสุดที่มีเฟสนำ

$$\lambda_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] = 0.222$$

สายเคเบิลที่อยู่ตำแหน่งตรงกลาง

$$\lambda_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} = 0.088$$

คำนวณตัวประกอบความสูญเสียใน screen เนื่องจาก circulating current ที่ความถี่ 150 Hz

$$X_{(3)} = 4 \pi \cdot 150 \times 10^{-7} \ln[2 \times (71.6/31.2)] = 0.287 \times 10^{-3} \ \Omega/\text{m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทขึ้นไป ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{m(3)} = 4 \pi \cdot 150 \times 10^{-7} \ln(2) = 0.131 \times 10^{-3} \Omega/m$$

$$P = 0.418 \times 10^{-3} \Omega/m$$

$$Q = 0.243 \times 10^{-3} \Omega/m$$

$$\lambda_{1(3)} = 1.48, \lambda_{2(3)} = 1.82 \quad \text{และ} \quad \lambda_{3(3)} = 0.195$$

ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่มูลฐาน $f = 50 \text{ Hz}$

$$\begin{aligned} R_{ac(1)} &= R_{dc} (1 + Y_{S(1)} + Y_{P(1)}) (1 + \lambda_{1(1)} + \lambda_{2(1)}) \\ &= 7.633 \times 10^{-3} [1 + 0.0138 + 0.0048] [1 + (0.206 + 0.222 + 0.195)/3] \\ &= 9.11 \times 10^{-5} \Omega/m \end{aligned}$$

ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่มูลฐาน $f = 150 \text{ Hz}$

$$\begin{aligned} R_{ac(3)} &= R_{dc} (1 + Y_{S(3)} + Y_{P(3)}) (1 + \lambda_{1(3)} + \lambda_{2(3)}) \\ &= 0.07663 \times 10^{-3} (1 + 0.11 + 0.023) [1 + (1.48 + 1.82 + 0.195)/3] \\ &= 18.72 \times 10^{-5} \Omega/m \end{aligned}$$

$$\beta(n) = \frac{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_n}{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{fund}}$$

$$\beta(3) = 18.72 \times 10^{-5} / 9.11 \times 10^{-5} = 2.054$$

$$\alpha(3) = 0.2$$

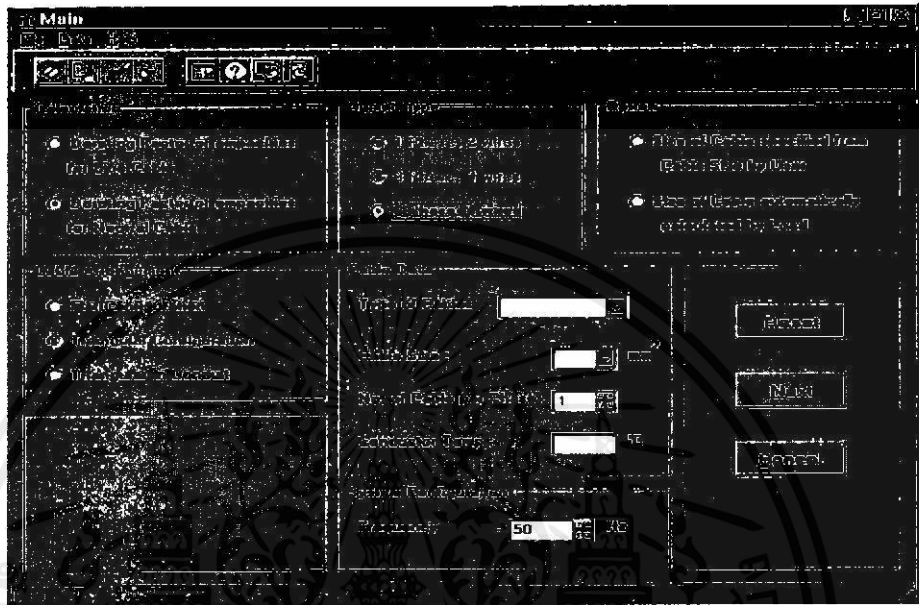
$$HDF = \sqrt{\frac{1}{1 + \alpha^2(3) \cdot \beta(3)}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{1 + (0.2)^2 \times 2.054}} = 0.96$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การคำนวณโดยโปรแกรม

เราสามารถคำนวณหาขนาดกระแสของสายนิวทรัลตามตัวอย่างที่ 1 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ขั้นตอนการใช้โปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก) จากเมนูหลักดังรูปที่ 5.3 ให้เลือกเมนูดังนี้



รูปที่ 5.3 แสดงหน้าต่างเมนูหลัก

หน้าต่าง Calculation

เลือก Derating Factor of ampacities for Neutral Cable เพื่อคำนวณขนาดกระแสในสายนิวทรัล

หน้าต่าง Circuit Type

เลือกระบบ 3 เฟส 4 สาย

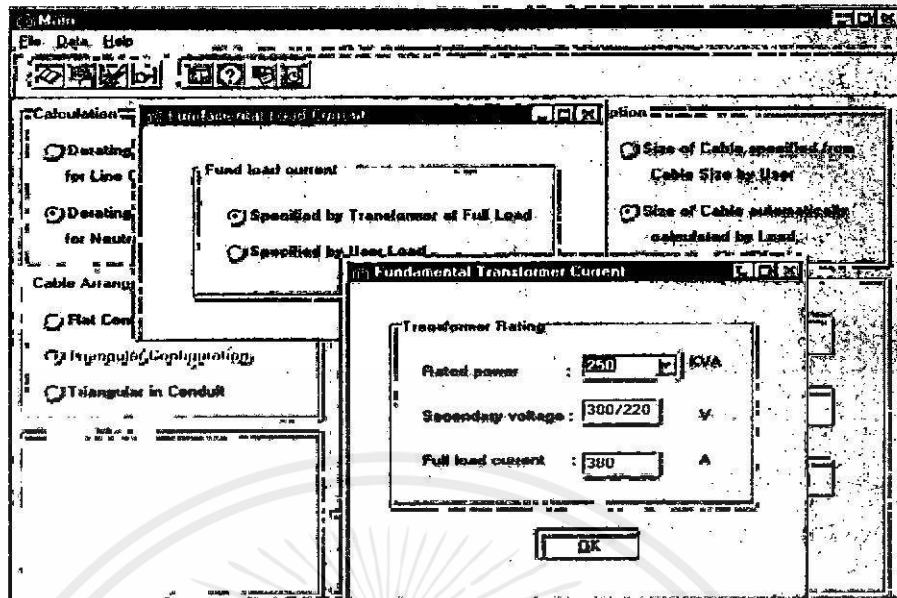
หน้าต่าง Option

เลือก Size of Cable automatically calculated by Load จะปรากฏหน้าต่าง Fundamental Load Current ดังแสดงในรูปที่ 5.3

หน้าต่าง Fundamental Load Current

เลือก Specified by Transformer at Full Load เพื่อที่จะกำหนดขนาดกระแสจากหม้อแปลงซึ่งจ่ายโหลดเต็มพิกัด จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Fundamental Transformer Current ดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

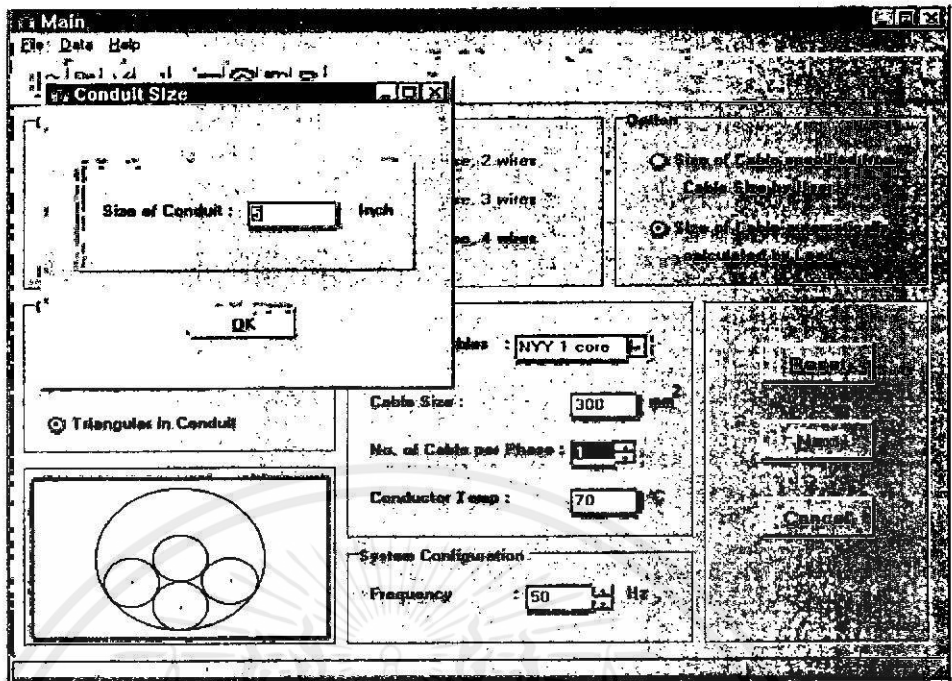


รูปที่ 5.4 แสดงหน้าต่าง Fundamental Load current และ หน้าต่าง Fundamental Transformer Current

หน้าต่าง Fundamental Transformer Current

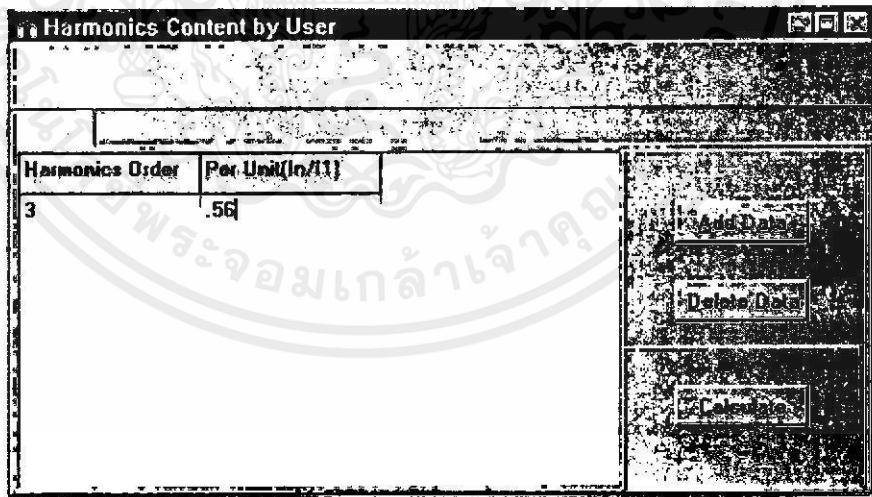
เลือก Rated power ที่ 250 kVA จะ ได้ขนาดกระแสที่จ่ายโหลดเต็มพิกัดเท่ากับ 380 A กดปุ่ม OK หน้าต่างนี้จะปิดลง จากนั้นให้ Click ที่ช่องของ No. of Cable per Phase จะปรากฏรูปภาพ แสดงการติดตั้งสายเคเบิลพร้อมกับหน้าต่าง Conduit Size ซึ่งจะแสดงขนาดท่อร้อยสายที่เหมาะสมกับขนาดสายเคเบิลที่วางอยู่ในท่อร้อยสายดังรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 5-3 กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ. 2538 ของการไฟฟ้านครหลวง จากนั้น กดปุ่ม OK หน้าต่างนี้จะปิดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงหน้าต่าง Conduit Size

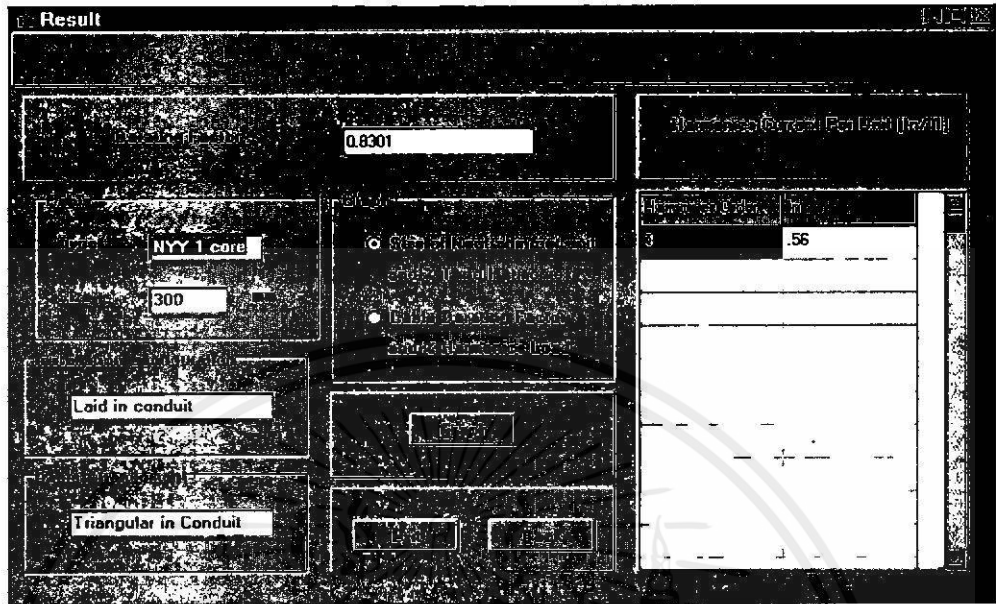
เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลต่างๆครบถ้วนแล้ว กดปุ่ม Next จะปรากฏหน้าต่าง Harmonic Contents by User ป้อนข้อมูลของ Harmonics Order เท่ากับ 3 และ Per Unit (I_n/I_1) เท่ากับ 0.56 ดังแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงการป้อนข้อมูลในหน้าต่าง Harmonic Contents by User

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กดปุ่ม Calculate เพื่อคำนวณค่า NHDF จะปรากฏหน้าต่าง Result ซึ่งเป็นส่วนแสดงผล ดังรูปที่ 5.7

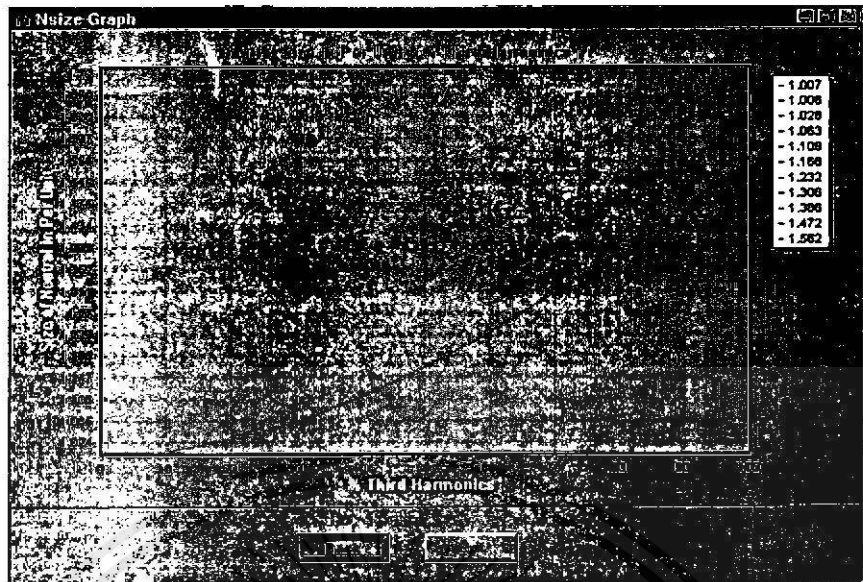


รูปที่ 5.7 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณค่า Derating Factor

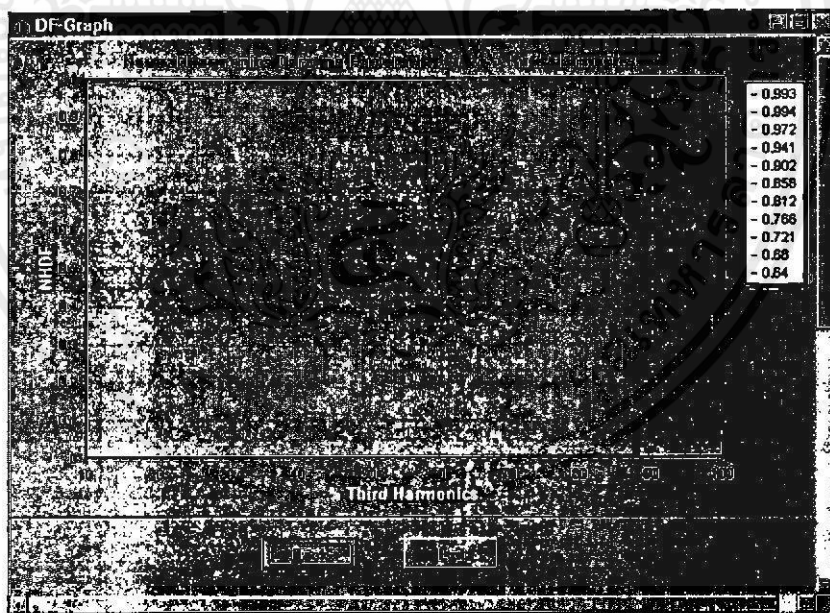
ค่า NHDF ที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมเท่ากับ 0.8301

เมื่อกดปุ่ม Graph จะปรากฏหน้าต่างของกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรอลซึ่งคิดในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของกระแสอาร์มอนิกที่ 3 หรือกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Derating Factor และเปอร์เซ็นต์ของกระแสอาร์มอนิกที่ 3 ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 หน้าต่างแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรอนซึ่งคิดในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3



รูปที่ 5.9 หน้าต่างแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Derating Factor และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การวิเคราะห์ผลจากการศึกษา

5.3.1 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ของตัวแปรที่มีต่อ Derating Factor

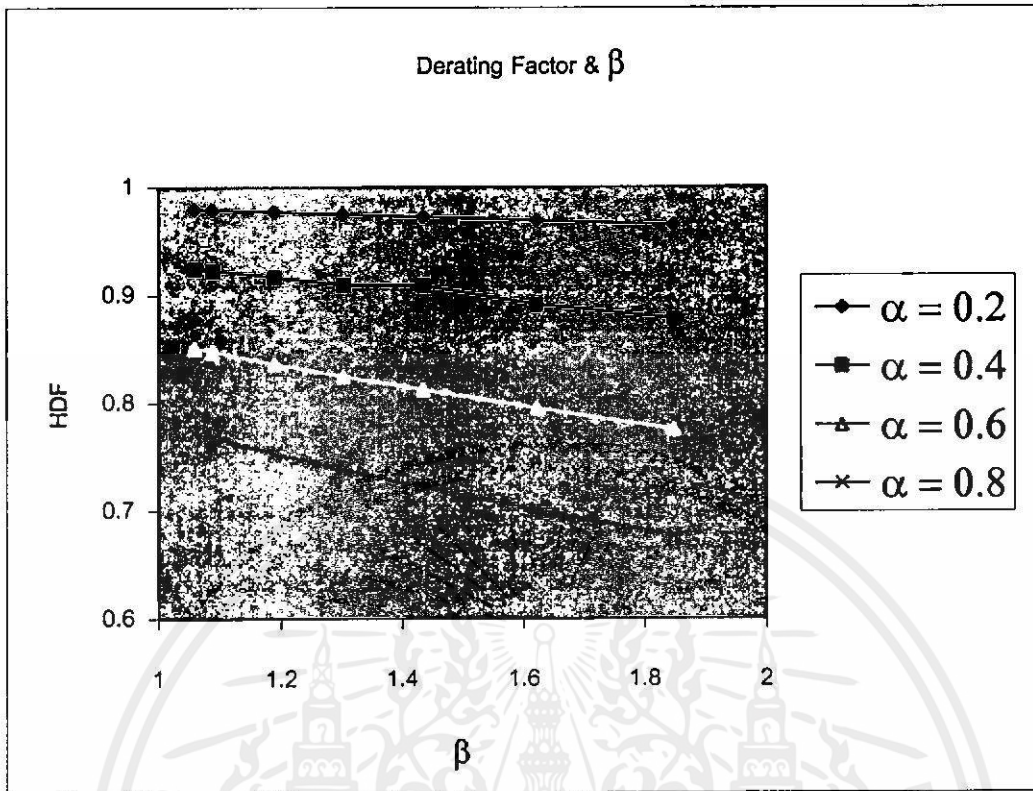
ตัวแปรที่มีผลต่อการคำนวณค่า Derating factor โดยตรงคือ α และ β การวิเคราะห์ความไวของตัวแปรทั้งสองว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่า Derating Factor ของสายเคเบิลมากกว่า สามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ α, β ตามลำดับ

ค่า HDF ในตารางที่ 5.1 คำนวณมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร β อันเนื่องมาจากกระแสความร้อนที่ 3 ไหลผ่านสายเคเบิล 3 เส้นซึ่งวางในท่อร้อยสาย รูปที่ 5.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ β โดยกำหนดให้ α มีค่าคงที่ ส่วนค่า β จะเปลี่ยนแปลงไปและขึ้นกับขนาดของตัวนำ ดังข้อมูลในตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า HDF ที่คำนวณจากค่า β ต่างๆ

Size of Cable (mm ²)	Size of Conduit (inch)	β	HDF			
			$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.4$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.8$
95	3	1.0586	0.9795	0.9247	0.8509	0.7721
120	3	1.0889	0.9789	0.9228	0.8476	0.7677
185	3 1/2	1.19	0.977	0.9165	0.8367	0.7534
240	4	1.3031	0.9749	0.9097	0.825	0.7384
300	4	1.4343	0.9725	0.9091	0.8121	0.7221
400	5	1.622	0.9691	0.891	0.7946	0.7005
500	6	1.8476	0.965	0.8785	0.775	0.6769

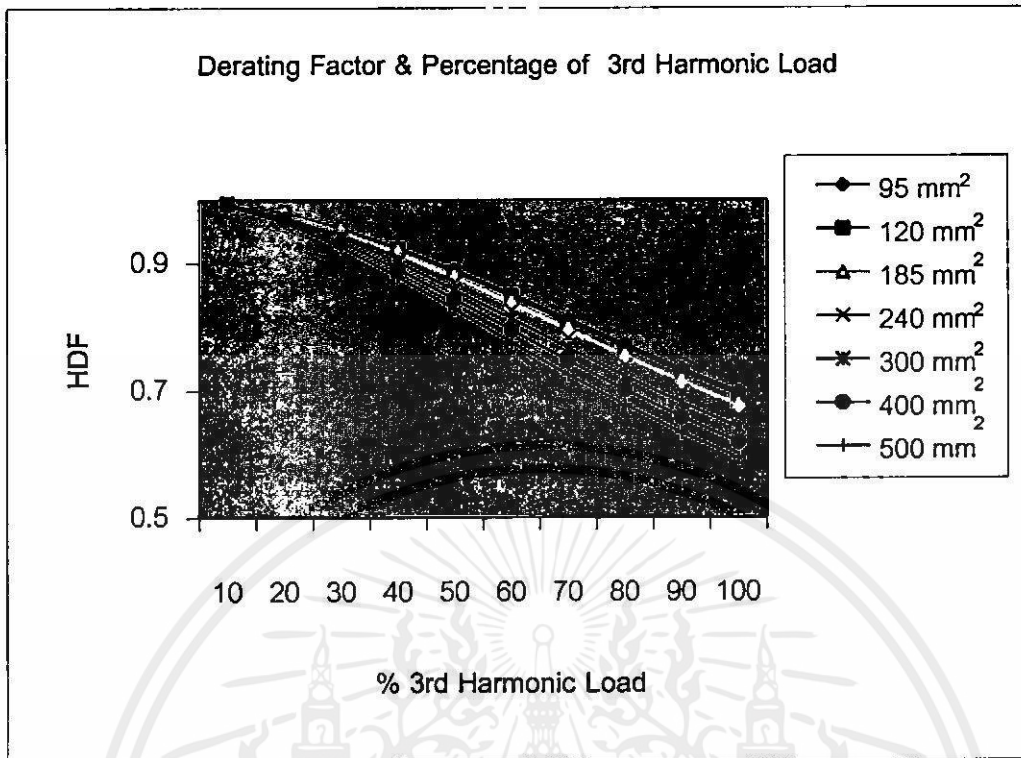
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ β

สำหรับรูปที่ 5.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ α โดยกำหนดให้ β มีค่าคงที่ ซึ่งค่า α จะเปลี่ยนแปลงไปตามเปอร์เซ็นต์ของกระแสโหลดฮาร์มอนิกที่ 3 ดังข้อมูลในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ α (% 3rd Harmonic Load)

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และตัวแปร β , α ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ เมื่อค่า β และ α เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วยที่เท่ากัน จะพบว่า ค่า HDF ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร α จะมีค่ามากกว่าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร β หรือ

$$\Delta \text{HDF} / \Delta \beta < \Delta \text{HDF} / \Delta \alpha$$

ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าตัวแปร α จะมีความไวต่อค่า HDF มากกว่าตัวแปร β สอดคล้องกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง HDF, α และ β สำหรับปัจจัยที่กำหนดค่า α คือ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิล และปัจจัยที่กำหนดค่า β คือ ขนาดของตัวนำ และความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกไฟฟ้า

5.3.2 การวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating Factor และขนาดของตัวนำ

สำหรับตารางที่ 5.2 ได้แสดงค่า HDF ของสายเคเบิลซึ่งวางแบบ Trefoil ในทอร้อยสายและวางเคเบิล เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5, 7, 11 และ 13 ไหลผ่านตัวนำ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ หาได้จาก $I_n = I_1/n$ (โหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ ในอุดมคติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลซ์ในอุดมคติ

Size of Cable (mm ²)	HDF		
	$\alpha_5 = 0.2$	$\alpha_5 = 0.2, \alpha_7 = 0.143$	$\alpha_5 = 0.2, \alpha_7 = 0.143,$ $\alpha_{11} = 0.09, \alpha_{13} = 0.077$
95 (ท่อ 2 ½")	0.9774	0.9653	0.9541
95 (รางเคเบิล)	0.9788	0.9676	0.9586
120 (ท่อ 2 ½")	0.9758	0.9624	0.9491
120 (รางเคเบิล)	0.9777	0.9657	0.9556
185 (ท่อ 3")	0.9706	0.9534	0.9345
185 (รางเคเบิล)	0.9746	0.9604	0.9483
240 (ท่อ 3 ½")	0.9651	0.9444	0.9203
240 (รางเคเบิล)	0.9717	0.9558	0.9424
300 (ท่อ 4")	0.9592	0.9349	0.9032
300 (รางเคเบิล)	0.9690	0.9518	0.9364
400 (ท่อ 4")	0.9517	0.9228	0.8807
400 (รางเคเบิล)	0.9661	0.9473	0.9294
500 (ท่อ 5")	0.9422	0.9083	0.8561
500 (รางเคเบิล)	0.9635	0.9348	0.9251

ในตารางที่ 5.3 แสดงค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11,13,25 และ 27 ไหลผ่านตัวนำ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ หาได้จาก $I_n = I_1/h$ (โหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 12 พัลซ์ในอุดมคติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 12 พัลส์ในอุดมคติ

Size of Cable (mm ²)	HDF		
	$\alpha_{11} = 0.0909$	$\alpha_{11} = 0.0909,$ $\alpha_{13} = 0.07692$	$\alpha_{11} = 0.0909, \alpha_{13} = 0.07692,$ $\alpha_{25} = 0.04, \alpha_{27} = 0.0370$
95 (ท่อ 2 ½")	0.9930	0.9876	0.9823
95 (รางเคเบิล)	0.9943	0.99	0.9870
120 (ท่อ 2 ½")	0.9917	0.9852	0.9784
120 (รางเคเบิล)	0.9936	0.9887	0.9854
185 (ท่อ 3")	0.9879	0.9782	0.9650
185 (รางเคเบิล)	0.9922	0.9863	0.9817
240 (ท่อ 3 ½")	0.9841	0.9715	0.9527
240 (รางเคเบิล)	0.9912	0.9846	0.9795
300 (ท่อ 4")	0.98	0.9615	0.9364
300 (รางเคเบิล)	0.9905	0.9822	0.9767
400 (ท่อ 4")	0.9702	0.9470	0.9140
400 (รางเคเบิล)	0.9879	0.9790	0.9731
500 (ท่อ 5")	0.9613	0.9315	0.8875
500 (รางเคเบิล)	0.9872	0.9777	0.9715

จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 เมื่อกำหนดให้ α มีค่าคงที่ ค่า HDF ของสายเคเบิลจะมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดของตัวนำในสายเคเบิลมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากผลของปรากฏการณ์ทางผิวและปรากฏการณ์ความใกล้เคียงซึ่งจะมีค่ามากขึ้นตามขนาดของตัวนำ และทำให้ความต้านทานกระแสกลับของตัวนำมีค่ามากขึ้น ดังนั้นก่อให้เกิดความสูญเสียในรูปความร้อนมากขึ้น สำหรับค่า HDF ของสายเคเบิลที่มีขนาดตัวนำเท่ากัน เมื่อวางในท่อร้อยสายจะมีค่ามากกว่าค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อวางในรางเคเบิล เนื่องมาจากผลจากความสูญเสียในท่อร้อยสายโลหะที่เพิ่มขึ้นมา ทำให้ความต้านทานกระแสกลับของตัวนำมีค่ามากขึ้นจากกรณีที่วางสายเคเบิลในรางเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating Factor และลักษณะการวางสายเคเบิล

ลักษณะการวางสายเคเบิลจะมีผลต่อการคำนวณค่า Derating Factor โดยพิจารณาลักษณะของการวางสายเคเบิลใน 3 รูปแบบคือ Trefoil in Cable Tray, Trefoil in และ Conduit Cradle in Conduit

ตารางที่ 5.4 แสดงค่า HDF ของสายเคเบิล เมื่อมีการวางสายเคเบิลในลักษณะต่างๆ เมื่อโหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ในอุดมคติ ($\alpha_5=0.2$, $\alpha_7=0.143$, $\alpha_{11}=0.09$, $\alpha_{13}=0.077$, $\alpha_{17}=0.0588$, $\alpha_{19}=0.0526$)

Size of cable (m ²)	HDF due to Cable Configuration		
	Trefoil in cable tray	Trefoil in conduit	Cradle in conduit
95	0.9538	0.9473(2 ½")	0.9406(2 ½")
120	0.9503	0.9408(2 ½")	0.9392(2 ½")
185	0.9421	0.9218(3")	0.9183(3")
240	0.9345	0.9008(3 ½")	0.8946(3 ½")
300	0.9279	0.8788(4")	0.8694(4")
400	0.9204	0.8503(4")	0.8407(4")
500	0.9157	0.818(5")	0.8003(5")

เมื่อพิจารณาผลจากลักษณะการวางสายของเคเบิลในตารางที่ 5.4 จะพบว่าค่า HDF จะขึ้นกับลักษณะการวางสายของเคเบิล ดังนี้

$$HDF_{\text{cradle in conduit}} < HDF_{\text{trefoil in conduit}} < HDF_{\text{trefoil in cable tray}}$$

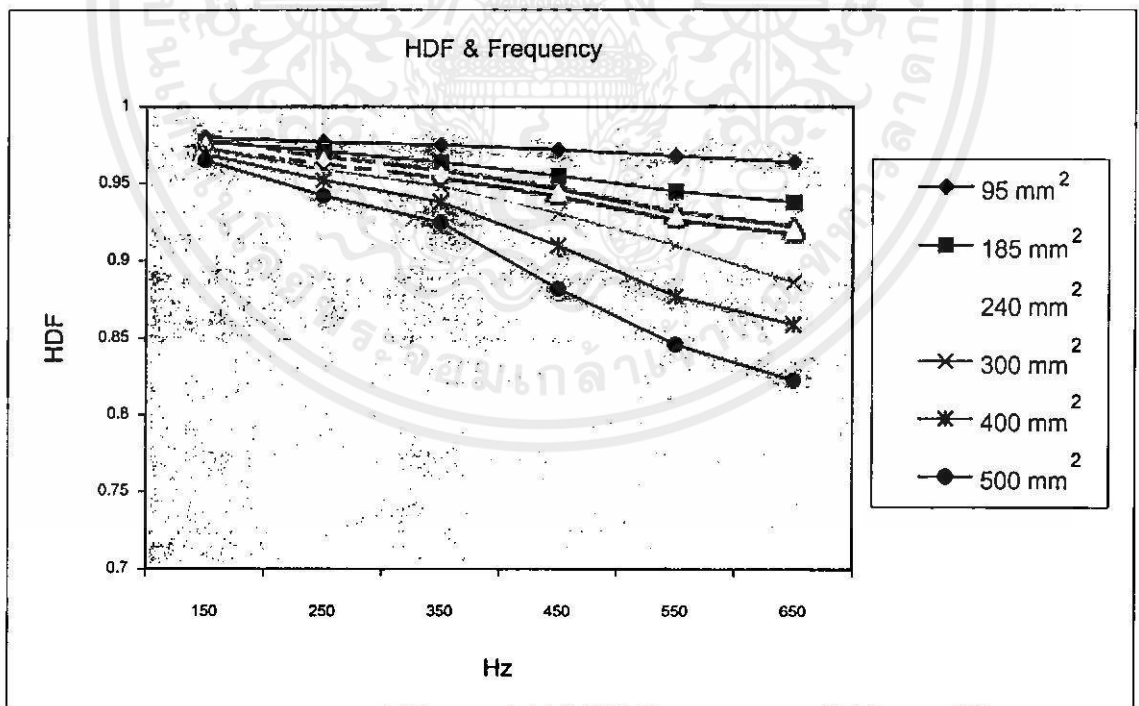
ค่า HDF ในกรณีวางสายเคเบิลแบบ Trefoil in Conduit มีค่าน้อยกว่า ค่า HDF ในกรณีวางสายเคเบิลแบบ Cradle in Conduit เนื่องจากผลของเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำของทั้ง 3 เฟสจะหักล้างกัน ทำให้ความต้านทานกระแสสลับมีค่าลดลงด้วย ส่งผลให้ความสูญเสียในรูปความร้อนของตัวนำลดลง ดังนั้นสายเคเบิลที่วางแบบ Trefoil in Conduit จึงสามารถนำกระแสได้สูงกว่าสายเคเบิลที่วางแบบ Cradle in Conduit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่า HDF ในกรณีวางสายเคเบิลแบบ Trefoil in Conduit มีค่าน้อยกว่าค่า HDF ในกรณีวางสายเคเบิลแบบ Trefoil in Cable Tray เนื่องจากมีความสูญเสียที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในท่อร้อยสายโลหะนั่นเอง จึงทำให้สายเคเบิลมีความสามารถในการรับกระแสได้น้อยลง

5.3.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating Factor และความถี่ไฟฟ้า

ความถี่ของกระแสอาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวนำจะมีผลต่อปรากฏการณ์ทางผิวและปรากฏการณ์ความใกล้เคียงของสายเคเบิล ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานกระแสกลับของตัวนำ ดังนั้นเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ ความถี่ ในรูปที่ 5.12 เมื่อกำหนดให้ α มีค่าคงที่ เท่ากับ 0.2 จะพบว่าในสายเคเบิลขนาดต่างๆนั้น ค่า HDF ที่ความถี่สูงกว่าจะมีค่าต่ำกว่าค่า HDF ที่ความถี่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกระแสอาร์มอนิกที่มีความถี่สูงไหลผ่านตัวนำ จะส่งผลให้ปรากฏการณ์ทางผิวและปรากฏการณ์ความใกล้เคียงมีค่ามากขึ้น ค่าความต้านทานกระแสกลับของตัวนำจึงเพิ่มขึ้นตาม และความถี่จะมีผลกระทบต่อสายเคเบิลที่มีขนาดใหญ่กว่าสายขนาดเล็กเนื่องมาจากปรากฏการณ์ทางผิวและปรากฏการณ์ความใกล้เคียงจะขึ้นอยู่กับขนาดตัวนำและความถี่ ดังนั้นเมื่อความถี่สูงขึ้น สายเคเบิลขนาดใหญ่จะมีความชันของเส้นกราฟมากกว่าสายขนาดเล็กกว่า ด้วยเหตุผลดังกล่าวความสูญเสียในรูปความร้อนของตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น เป็นผลให้สายเคเบิลสามารถนำกระแสได้ลดลง

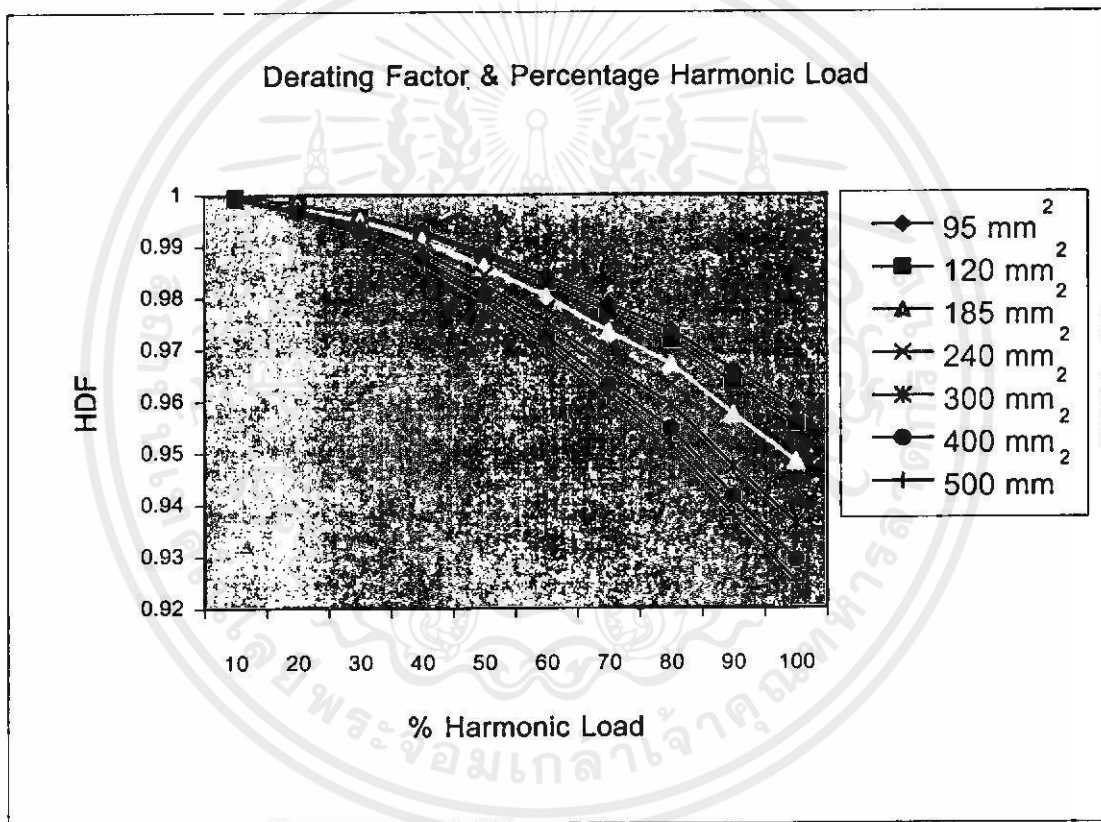


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการตีพิมพ์หรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันที่ถือลิขสิทธิ์

รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ ความถี่ของกระแสอาร์มอนิก

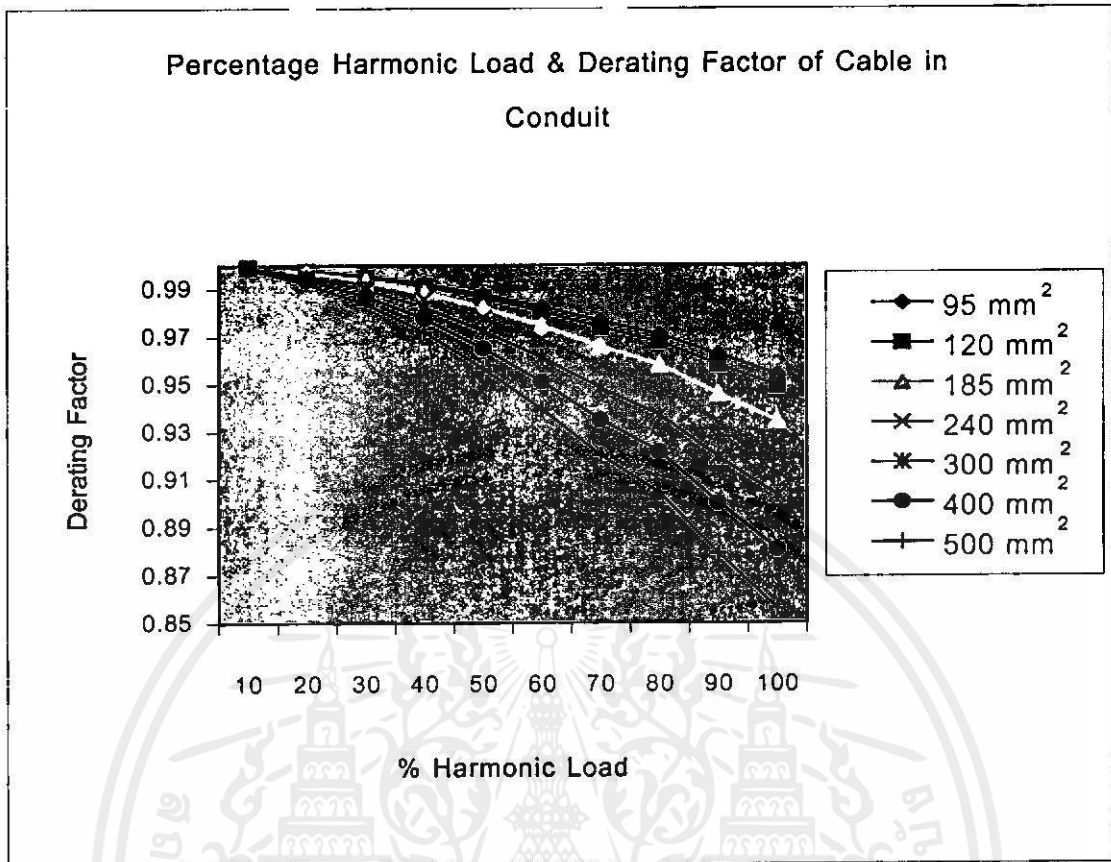
5.3.5 การวิเคราะห์ขนาดของสายเคเบิลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

ในการประยุกต์ใช้งานเพื่อหาค่า Derating Factor ที่เหมาะสมกับขนาดของสายเคเบิล เมื่อกำหนดถึงโหลดที่ก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก หรือกำหนดขนาดของสายเคเบิลในรูปต่อหน่วย (Per Unit) ที่เหมาะสมกับเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก โดยกำหนดให้โหลดเป็นเรกติฟายเออร์ชนิด 6 พัลส์ในอุดมคติ ($\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.143, \alpha_3 = 0.09, \alpha_4 = 0.077$) และลักษณะของการวางสายเป็นแบบ trefoil ในรางเคเบิล และในท่อร้อยสาย ได้แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก ได้แสดงดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ Trefoil ในรางเคเบิล

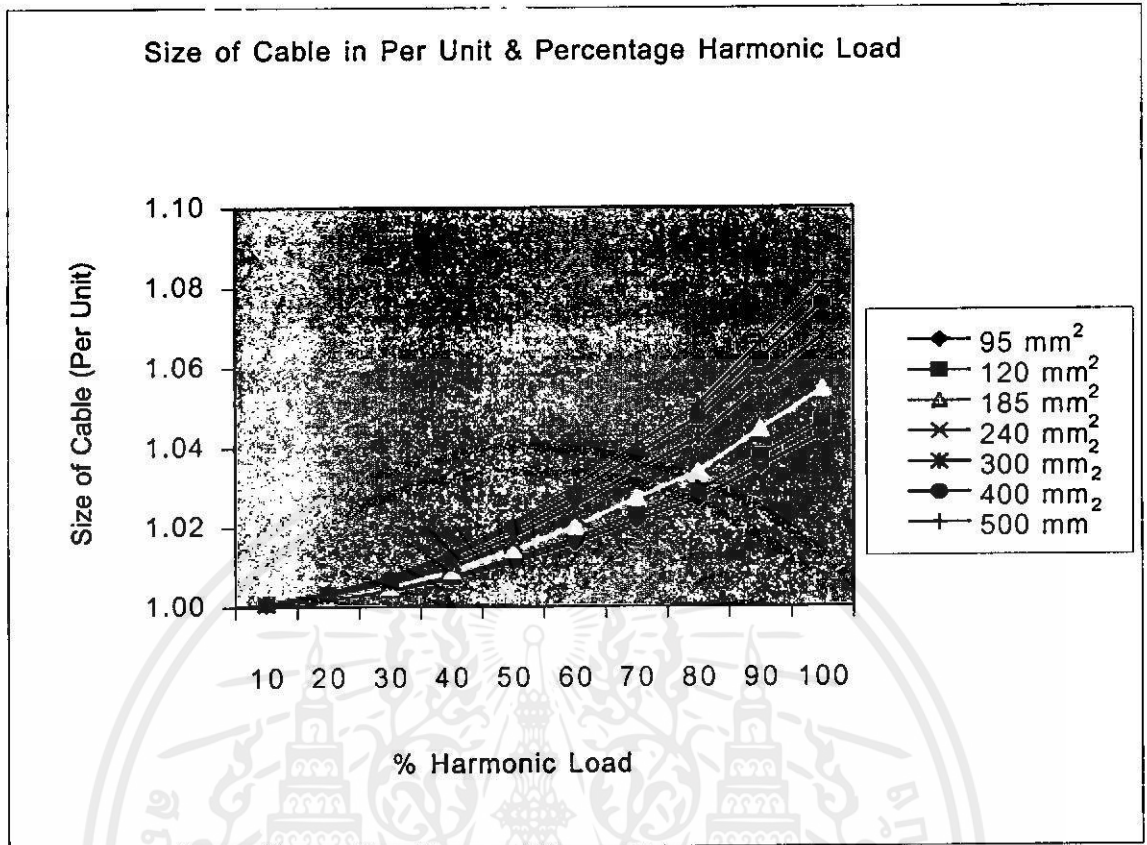
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ Trefoil ในท่อร้อยสาย

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HDF และ เปอร์เซนต์ของโหลดฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 จะพบว่าค่า HDF จะมีค่าลดลง เมื่อโหลดฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น และค่า HDF ของสายเคเบิลที่วางแบบ Trefoil ในท่อร้อยสายจะมีค่าต่ำกว่า ค่า HDF ของสายเคเบิลที่วางแบบ Trefoil ในรางเคเบิล เนื่องจากจะมีผลจากความสูญเสียในท่อร้อยสายเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากความสูญเสียที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางผิว และปรากฏการณ์ความใกล้เคียง ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานกระแสสลับมีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวความสูญเสียในรูปความร้อนจึงเพิ่มขึ้น ทำให้สายเคเบิลสามารถนำกระแสได้ลดลง

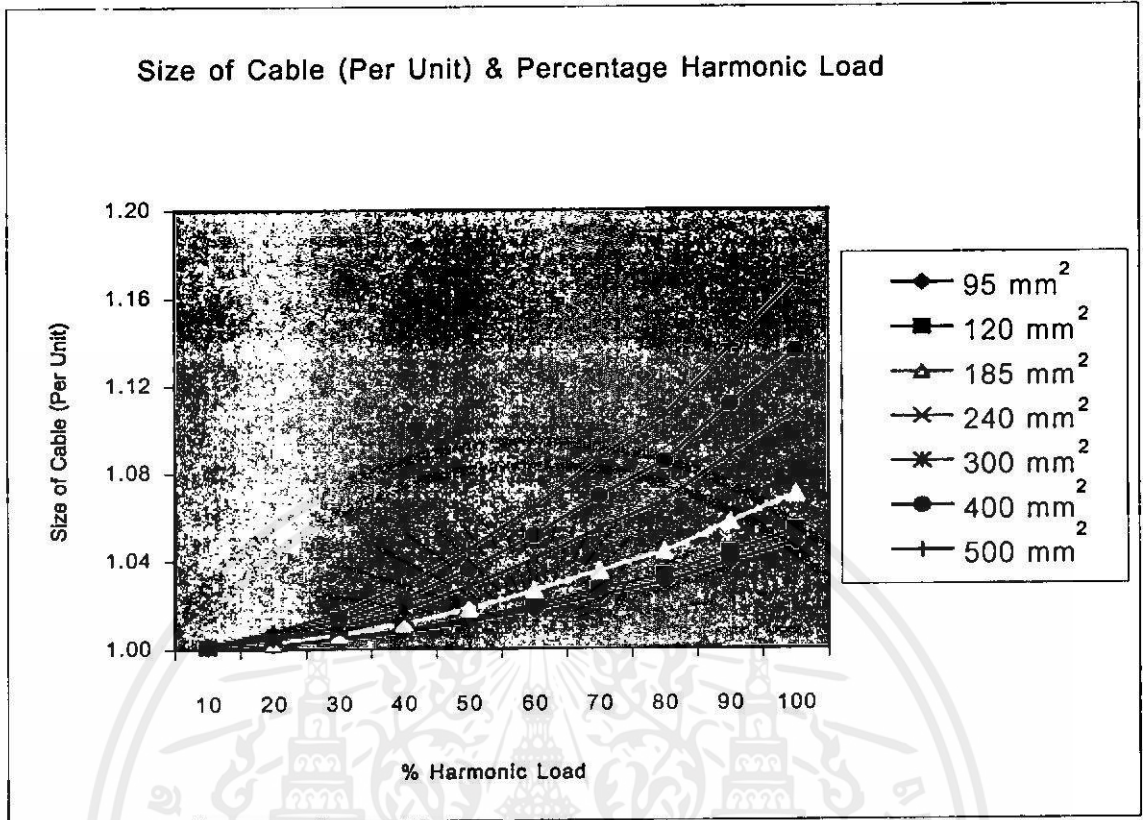
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลในรูปคิดต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ trefoil ในรางเคเบิล

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลในรูปต่อหน่วย และ เปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 จะพบว่าขนาดของสายเคเบิลจะต้องเผื่อมากขึ้น เมื่อโหลดฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น และขนาดของสายเคเบิลในรูปต่อหน่วยที่วางแบบ Trefoil ในท่อร้อยสายจะต้องเผื่อขนาดมากกว่าขนาดของสายเคเบิลในรูปต่อหน่วยที่วางแบบ Trefoil ในรางเคเบิล เนื่องจากจะมีผลจากความสูญเสียในท่อร้อยสายเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากความสูญเสียที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางผิว และปรากฏการณ์ความใกล้เคียง ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านทานกระแสสลับมีค่าสูงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวความสูญเสียในรูปความร้อนจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นอีกนัยหนึ่งจึงต้องใช้สายเคเบิลที่มีขนาดตัวนำใหญ่ขึ้น นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายเคเบิลในรูปคิดต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ Trefoil ในที่ร้อยสาย

ดังนั้น การเลือกขนาดสายเคเบิลที่เหมาะสมกับโหลดประเภทเรกติฟายเออร์ ชนิด 6 พัลส์ ในอุดมคติ ($\alpha = 0.2$, $\alpha_{\text{I}} = 0.143$, $\alpha_{\text{II}} = 0.09$, $\alpha_{\text{III}} = 0.077$) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.5 โดยขนาดของสายเคเบิลมีขนาดตั้งแต่ 1 เท่า ถึง 1.081 เท่า สำหรับกรณีวางสายแบบ Trefoil ในรางเคเบิล และมีขนาดตั้งแต่ 1 เท่า ถึง 1.168 เท่า สำหรับกรณีวางสายแบบ Trefoil ในที่ร้อยสาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของโหลดฮาร์มอนิก

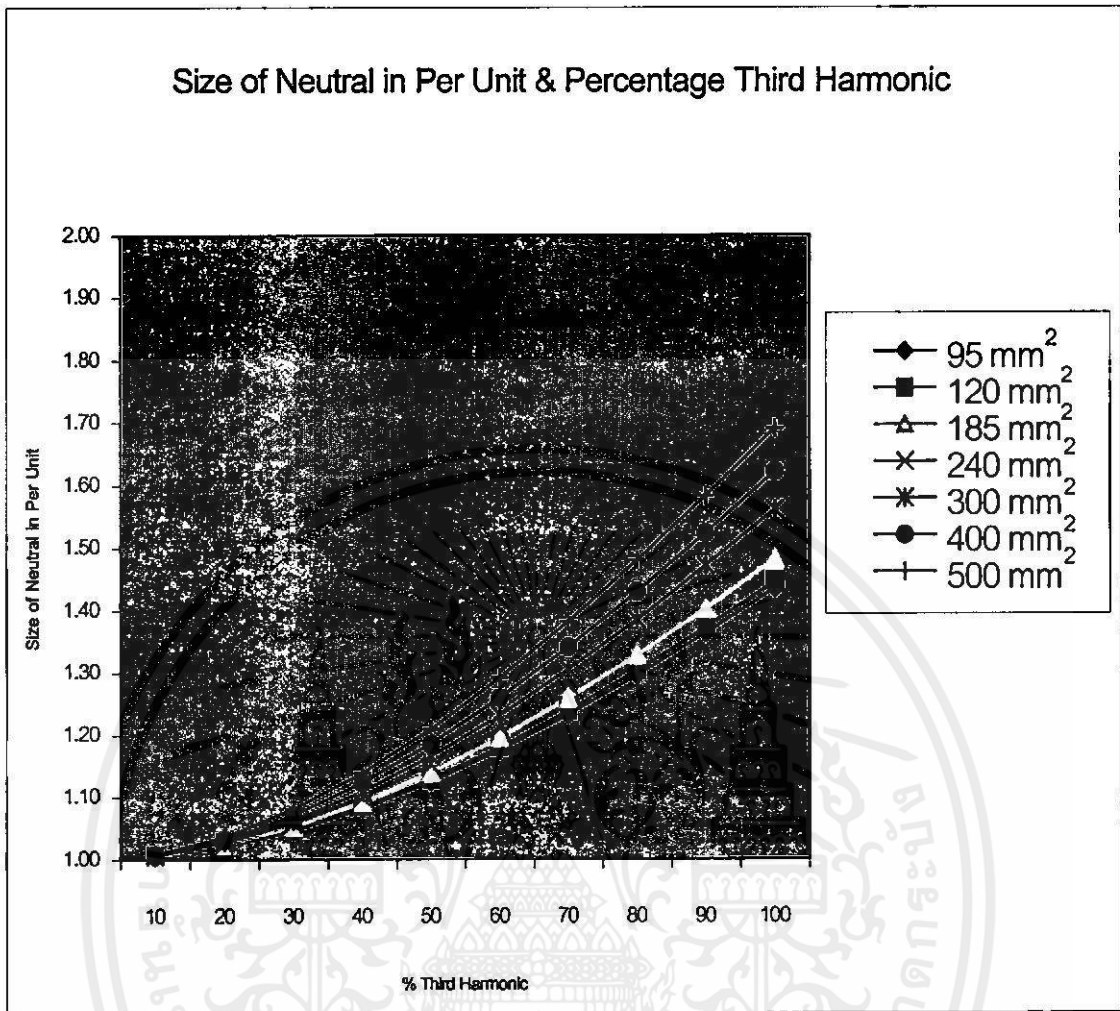
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ขนาดสายเคเบิลในรูปต่อหน่วยที่เหมาะสมกับโหลดประเภทเรกติไฟายเออร์ชนิด 6 พัดขึ้น
อุณหภูมิตามมีกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5, 7, 11 และ 13

Size of Cable(mm ²)	Size of Cable in Per Unit	
	Trefoil in Cable Tray	Trefoil in Conduit
95	1.0 – 1.043	1.0 – 1.048
120	1.0 – 1.046	1.0 – 1.054
185	1.0 – 1.055	1.0 – 1.070
240	1.0 – 1.061	1.0 – 1.087
300	1.0 – 1.068	1.0 – 1.107
400	1.0 – 1.076	1.0 – 1.135
500	1.0 – 1.081	1.0 – 1.168

สำหรับการประยุกต์ใช้งาน โดยการกำหนดขนาดของสายนิวทรอลในรูปต่อหน่วย (Per Unit) ที่เหมาะสมเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 โหลดในสายนิวทรอล และมีลักษณะการวางสายเป็นแบบ trefoil ในท่อร้อยสาย ได้แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรอลในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ดังรูปที่ 5.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรัลในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 เมื่อสายเคเบิลถูกวางแบบ Trefoil ในที่ร้อยสาย

5.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับผลการศึกษาอื่นๆ

5.4.1 เปรียบเทียบค่า Derating Factor กับมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

เมื่อเปรียบเทียบค่า Derating Factor ที่ได้จากการคำนวณในงานศึกษานี้ กับค่า Derating Factor ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ดังแสดงในตารางที่ 5.6 จะพบว่าเมื่อสายเคเบิลมีกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 เพิ่มขึ้น ค่า Derating Factor ของขนาดกระแสที่สายนิวทรัลสามารถรับได้ (NHDF) จากการคำนวณ จะมีค่าลดลงหรือกล่าวได้ว่าสายนิวทรัลจะรับกระแสได้น้อยลง ส่วนค่า Derating Factor ของขนาดกระแสที่สายนิวทรัลสามารถรับได้ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเท่ากับ 1 และตามข้อกำหนดของสายนิวทรอลตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงหัวข้อที่ 5.17.1.8 เราจะนับสายนิวทรอลตามหัวข้อที่ 5.17.1.7 ด้วยในระบบ 3 เฟส ซึ่งโหลดส่วนใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในสายนิวทรอล ดังนั้นถ้ามีสายในท่อร้อยสายเดียวกันมากกว่า 3 เส้น จะต้องใช้ตัวคูณเพื่อลดค่าขนาดกระแสสำหรับตารางที่ 5-12, 5-14 และ 5-15 ตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงหัวข้อที่ 5.17.1.7 ถ้ามีสายเคเบิลในท่อร้อยสายจำนวน 4 – 6 เส้น จะใช้ตัวคูณลดเท่ากับ 0.82

ตารางที่ 5.6 แสดงค่า Derating Factor ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

%Third Harmonics	Derating factor due to effect of zero sequence current in neutral		Derating factor for 4 cables in conduit
	MEA	NHDF	MEA
20	1	0.9724	0.82
40	1	0.9016	0.82
60	1	0.8116	0.82
80	1	0.7215	0.82
100	1	0.6403	0.82

สำหรับตารางที่ 5.7 ช่อง MEA และ MEA* แสดงขนาดกระแสในสายนิวทรอลระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย (ตามกฎหมายของการไฟฟ้านครหลวงเมื่อโหลดก่อให้เกิดฮาร์มอนิกและไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกตามลำดับ ขนาดกระแสของสายนิวทรอลต้องไม่น้อยกว่า 200 A บวกด้วยร้อยละ 70 ของส่วนที่เกิน 200 A เมื่อสายเส้นไฟมีกระแสโหลดไม่สมดุลสูงสุดมากกว่า 200A (สำหรับโหลดที่ไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิก) และต้องมีขนาดเพียงพอที่จะรับกระแสไม่สมดุลสูงสุดในสายนิวทรอล(สำหรับโหลดที่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิก) เปรียบเทียบกับค่า NHDF ของสายนิวทรอลที่หม้อแปลงขนาดพิคัดต่างๆ เมื่อโหลดกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่ 100 % โดยสายเคเบิลที่ใช้เป็น สาย NYY 1 แกนร้อยในท่อร้อยสาย นอกจากนี้ยังแสดงค่า Derating Factor ของสายเส้นไฟ (HDF) กรณีที่มีเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7 เท่ากับ 0.32, 0.06 และ 0.05 ของกระแสโหลดที่ความถี่มาตรฐานตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดงขนาดกระแสของสายนิวทรัล (I_N) ของหม้อแปลงที่ขนาดพิกัดต่างๆ เปรียบเทียบกับมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง

Tr (KVA)	$I_N(A)$		Calculated Results				
	MEA	MEA*	Size of Neutral (mm ²)	HDF	$I_L(A)$	NHDF	$I_N(A)$
250	380	326	1(300)	0.9278	410	0.6403	593
315	479	395	2(150)	0.9848	486	0.8831	541
400	608	486	2(240)	0.9822	619	0.8683	700
500	759	591	3(185)	0.9923	765	0.9408	807
630	957	730	3(240)	0.9915	965	0.9357	1023
800	1216	911	4(240)	0.9955	1221	0.9616	1265
1000	1519	1123	5(240)	0.9971	1523	0.9749	1558
1250	1899	1389	6(240)	0.9980	1903	0.9823	1933
1600	2431	1762	7(300)	0.9983	2435	0.9856	2466
2000	3039	2187	8(300)	0.9987	3043	0.9889	3073
2500	3798	2719	10(300)	0.9992	3801	0.9929	3825

เมื่อพิจารณาขนาดกระแสของสายนิวทรัล ของหม้อแปลงพิกัด 400 kVA ตามกฎการไฟฟ้านครหลวงจะพบว่ากรณีโหลดที่ไม่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกนั้นขนาดกระแสของสายนิวทรัลเท่ากับ 486 A กรณีโหลดที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกนั้นขนาดกระแสของสายนิวทรัลเท่ากับ 608 A ส่วนขนาดกระแสของสายนิวทรัลซึ่งคำนวณจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ 100% และขนาดกระแสของสายเส้นไฟซึ่งคำนวณจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7 โดยมีขนาดเท่ากับ 32, 6 และ 5 % ของกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐานในงานศึกษานี้เท่ากับ 700 A และ 619 A ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 เปรียบเทียบค่า Derating Factor ที่ได้จากการศึกษานี้และวิธีของ Ajit Hiranandani [5]

พิจารณาสายเคเบิลระบบ 3 เฟส 4 สาย เมื่อใช้สาย NYY 1แกน ขนาด 240 mm² จำนวน 4 เส้น วางในท่อร้อยสายขนาด 4 นิ้ว คำนวณค่า Derating Factor ของสายเส้นไฟ (HDF) เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7 ไหลผ่านสายเคเบิล และค่า Derating Factor ของสายนิวทรอล (NHDF) เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลผ่าน โดยเปรียบเทียบกับค่า Derating Factor ที่คำนวณจากการนำเสนอตามวิธีของ Ajit Hiranandani ในวารสาร IEEE ดังข้อมูลในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบค่า Derating Factor ที่ได้จากการศึกษาและวิธีของ Ajit Hiranandani

% Harmonic in Line	HDF		% 3 rd Harmonic in Neutral	NHDF	
	*Proposed	Ajit		*Proposed	Ajit
	Model	Model		Model	Model
$\alpha_3=0.1, \alpha_5=0.03, \alpha_7=0.01$	0.993	0.998	0.2	0.975	0.981
$\alpha_3=0.15, \alpha_5=0.07, \alpha_7=0.05$	0.979	0.99	0.4	0.91	0.917
$\alpha_3=0.23, \alpha_5=0.09, \alpha_7=0.06$	0.957	0.965	0.6	0.825	0.832
$\alpha_3=0.28, \alpha_5=0.1, \alpha_7=0.07$	0.94	0.946	0.8	0.738	0.747

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า Derating Factor จากวิธีทั้งสอง จะพบว่าค่า Derating Factor ที่ได้จากการศึกษานี้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับ ค่า Derating Factor ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการนำเสนอโดย Ajit Hiranandani

*หมายเหตุ Proposed Model หมายถึง Model ที่ได้จากการศึกษานี้ โดยได้พัฒนามาจากวิธีตามมาตรฐาน IEC 287

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในการวิเคราะห์หลักเกณฑ์ในการเลือกขนาดของสายเคเบิล ตัวแปรที่มีผลต่อการกำหนดขนาดของสายเคเบิลที่เหมาะสมนั้นมีหลายประการ เช่น อุณหภูมิรอบข้าง ค่าความต้านทานความร้อน การสูญเสียที่ตัวนำและส่วนประกอบที่เป็นโลหะเนื่องจากกระแสไฟฟ้า การสูญเสียที่ฉนวนไฟฟ้าเนื่องจาก การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนไฟฟ้า แรงดันตก และพิกัดการทนต่อกระแสลัดวงจร เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล ในอดีตที่ผ่านมา การคำนวณหาขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสายเคเบิลหรือระบบจะกำหนดจากปัจจัยต่างๆดังกล่าว แต่ในปัจจุบันนี้มีการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้นในงานอุตสาหกรรมมากมาย อุปกรณ์เหล่านี้จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้น ปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่เกิดจากผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสายเคเบิลได้แก่ ความสูญเสียในรูปความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดผลตามมาคือการเพิ่มอุณหภูมิของตัวนำ เปลือกโลหะ กระจกป้องกันสายและส่วนประกอบโลหะอื่นๆในระบบของสายเคเบิลนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขีดความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลลดลง

งานศึกษานี้ ได้นำเสนอถึงขั้นตอน รายละเอียดและวิธีการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลซึ่งได้พัฒนามาจากวิธีตามมาตรฐาน IEC 287 ผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในตัวนำ จะปรากฏในรูปความสูญเสียจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลลดลงโดยสามารถมองในรูปของ Derating Factor ได้ ในการนี้จะมุ่งศึกษาเฉพาะกรณีของสายเคเบิลที่ใช้ในงานระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (ไม่เกิน 1 กิโลโวลต์) โดยพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิล ผลการคำนวณค่า Derating Factor ที่ได้จากการศึกษามีค่าที่ใกล้เคียงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยวิธีของ Ajit Hiranandani ที่นำเสนอในวารสาร IEEE (1998) ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จากงานศึกษานี้จึงสามารถนำมาใช้อ้างอิงและช่วยในการออกแบบสายเคเบิลให้เหมาะสมกับลักษณะของโหลดที่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ สำหรับปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่า Derating Factor ของขนาดกระแสในสายเคเบิลเมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวนำได้แก่ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ และค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับ (R_{ac}) ของตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับผลของปรากฏการณ์ทางผิวปรากฏการณ์ความถี่สูงและความถี่ต่ำ

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อการนำไฟฟ้าของสายเคเบิลด้วย การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับ (R_{ac}) ของตัวนำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่า Derating Factor ลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อการนำไฟฟ้าของสายเคเบิลด้วย การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับ (R_{ac}) ของตัวนำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่า Derating Factor ลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อการนำไฟฟ้าของสายเคเบิลด้วย การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับ (R_{ac}) ของตัวนำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่า Derating Factor ลดลง

ความสูญเสียจากท่อร้อยสายโลหะ หลักเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้นที่ได้นำเสนอในงานศึกษานี้ สามารถนำมาใช้เป็นหลักการเบื้องต้นในการคัดเลือกขนาดของสายเคเบิลที่จะนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกว่าวิธีการเดิมซึ่งไม่ได้คำนึงในเรื่องผลของกระแสฮาร์มอนิกในสายเคเบิล ซึ่งจะนำมาสู่ความปลอดภัยของผู้ที่เกี่ยวข้องและอุปกรณ์ต่างๆที่ค่ออยู่ในระบบรวมทั้งเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและความมั่นคงของระบบมากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิเคราะห์หลักเกณฑ์ในการกำหนดขนาดของสายเคเบิลในอดีตที่ผ่านมา ไม่มีการคำนึงถึงผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการกำหนดขนาดกระแสของสายเคเบิล แต่ในปัจจุบันมีการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้นในงานอาคารสูงและอุตสาหกรรมมากขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดฮาร์มอนิกและส่งผลกระทบต่อระบบและอุปกรณ์ที่ค่ออยู่มากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบและกำหนดขนาดกระแสที่เหมาะสมของสายเคเบิลจึงควรพิจารณาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่กำเนิดจากโหลดที่ค่ออยู่ในระบบ และปัจจัยอื่นที่กำหนดขนาดกระแสในสายเคเบิล โดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อขนาดกระแสของสายเคเบิลทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกันในรูปของตัวคูณลดขนาดกระแส

2. การคำนวณขนาดกระแสของสายเคเบิลแรงสูงจะต้องพิจารณาถึงผลความสูญเสียของเปลือกโลหะ (Sheath) และเกราะป้องกันสาย(Armor) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายเคเบิล, ลักษณะการต่อเชื่อมเปลือกโลหะ, การจัดเรียงสายเคเบิล, ขนาดของตัวนำและ ความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ เป็นต้น จึงมีความซับซ้อนในรายละเอียดการคำนวณค่อนข้างมาก ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่า Derating Factor สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในงานระบบไฟฟ้าแรงดันสูงไว้ เพื่อเป็นแนวทางและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานต่อไป

3. ในระบบ 3 เฟส 4 สาย แม้ว่าจะมีโหลดทั้ง 3 เฟสสมดุลก็ตาม สายนิวทรัลจะมีกระแสไหลเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่โดยเฉพาะที่เป็นพหุคูณของ 3 (Triplen Harmonics) ซึ่งมีลำดับเฟสเป็นศูนย์ (Zero sequence) จะมีผลกระทบค่อนข้างมาก เนื่องจากกระแสของทั้ง 3 เฟสจะมีขนาดและมุมเฟสเหมือนกัน ดังนั้นผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟสในสายนิวทรัลจะเสริมกันโดยมีขนาดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ ใช้งาน หรือ ใช้งานซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 เท่าของกระแสลำดับศูนย์ในสายเฟส โดยได้แสดงตัวอย่างการพิสูจน์หากระแสในนิวทรอล ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย เมื่อกระแสมีรูปสัญญาณเป็นสแควร์ ในภาคผนวก ก (สำหรับกระแสที่มีสัญญาณรายคาบ (Periodic) ที่มีลักษณะสมมาตรกันนั้น จะไม่ปรากฏกระแสฮาร์โมนิกเลขคู่) กรณีถ้ามีกระแสฮาร์โมนิกเลขคู่เกิดขึ้นในสายเฟส กระแสฮาร์โมนิกเลขคู่จะหักล้างกันเป็นศูนย์ในนิวทรอล สำหรับกระแสฮาร์โมนิกเลขที่ลำดับอื่นๆจะมีบางส่วนเสริมและหักล้างกันทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและมุมเฟสของแต่ละฮาร์โมนิก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องคำนึงถึงขนาดสายนิวทรอลที่เหมาะสมกับประเภทของโหลดหรืออุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบและสามารถรับกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลผ่านได้โดยไม่ทำให้สายเคเบิลเกิดความเสียหาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Freund A., "Nonlinear Loads Mean Trouble" *Electrical Construction and Maintenance*, March, 1988, pp.83-90.
- [2] IEC-287-1-1, "Calculation of the Current Rating Part 1 : Current Rating Equation and Calculation of Losses".
- [3] Anders G. J., *Rating of Electric Power Cables, Ampacity Computations for Transmission, Distribution and Industrial Applications*. IEEE Press Power Engineering Series. 1997.
- [4] กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ. 2538, การไฟฟ้านครหลวง.
- [5] Hiranandani A, "Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics," *IEEE Industry Application Mag*, March/April 1998. pp.42-51.
- [6] Neher J.H. and McGrath M.H., "The Calculation of Temperature Rise and Load Capability of Cables System," *AIEE Trans.*, Vol.76, October 1957, pp.752-772.
- [7] *Electrical Design – A Good Practice Guide*, Copper Development Association ,Publication 123.
- [8] Ferkal K., Poloujadoff M. and Dorison E, "Proximity Effect and Eddy Current Losses in Insulated Cables," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.11, No.3, July 1996, pp.1171-1178.
- [9] ANSI/IEEE std 575-1988, "IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths"
- [10] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems".
- [11] ลือชัย ทองนิล, "ฮาร์โมนิกและการป้องกัน", ข่าวการไฟฟ้านครหลวง ฉบับที่ 271 กรกฎาคม-สิงหาคม 2534.
- [12] ลือชัย ทองนิล, "ฮาร์โมนิกและการป้องกัน", ข่าวการไฟฟ้านครหลวง ฉบับที่ 272 กันยายน-ตุลาคม 2534.
- [13] Balda J.C, Barnes T.M and Emmanuel A.E, "Effect of Power System Harmonics on Equipment," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.8, No.2, 1992, pp.672-680.
- [14] Meliopoulos A.P.S., and Martin M.A,Jr , "Calculation of Secondary Cable Losses and Ampacity in the Presence of Harmonics," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.7, No.2, April 1992 , pp.451-459.
- [15] Gruz T.M., "A survey of Neutral Currents in Three Phase Computer Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.26, No.4, July 1990, pp.719-725.

[16] Palmer J.A., Dejeneff R.C, Mckerman T.M. and Halleran T.M., "Pipe-Type Cable Ampacities in the Presence of Harmonics," IEEE Trans on Power Delivery, Vol.8, No.4, October 1993.

[17] สุทธิ บรรจงจิตร นิต์สน์ กฤษณจินดา และสมชาย จิรรุ่งโรจน์กุล. "การคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบฮาร์โมนิก". วิศวกรรมลาดกระบัง ,ปีที่ 16 ,ฉบับที่ 3 ,กันยายน 2542, หน้า 7 – 12.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้โปรแกรม

การคำนวณหาพิคกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์โมนิก

The Calculation of Cable Ampacities Including the Effect of Harmonics

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการใช้โปรแกรมการคำนวณหาพิคกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์โมนิก ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม C++Builder ของบริษัท Borland เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดกระแสที่สายเคเบิลสามารถรับได้โดยไม่ทำให้เกิดความร้อนหรืออุณหภูมิส่วนเกินที่เกินพิกัด เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกไหลผ่านตัวนำในสายเคเบิลซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อสายเคเบิลและอุปกรณ์ต่างๆที่ต่ออยู่ในระบบ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มความมั่นคงและความน่าเชื่อถือให้กับระบบไฟฟ้าอีกด้วย

เริ่มต้นด้วยการรันไฟล์ชื่อ Calharmo จากโปรแกรม C++Builder หลังจากนั้น โปรแกรมจะเริ่มทำงานโดยแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หน้าต่างแนะนำโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

click เมาส์ขวาเพื่อเข้าสู่เมนูหลักดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 หน้าต่างเมนูหลัก

ส่วนรับข้อมูล

จากหน้าต่างของเมนูหลักประกอบด้วย หน้าต่างย่อยและปุ่มต่างๆ ดังนี้

หน้าต่าง Calculation ประกอบด้วยเมนู

- *Derating Factor of ampacities for Line Cable*

เป็นการคำนวณ Derating Factor ของกระแสในสายเฟส

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูนี้ เมนู 1 Phase, 2 wires และ 3 Phase, 3 wires ในหน้าต่าง Circuit Type จะ Active

- *Derating Factor of ampacities for Neutral Cable*

เป็นการคำนวณ Derating Factor ของกระแสในสายนิวทรัล

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูนี้ เมนู 3 Phase, 4 wires ในหน้าต่าง Circuit Type จะ Active

หน้าต่าง Circuit Type ประกอบด้วยเมนู

- *1 Phase, 2 wires*

ระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย

- *3 Phase, 3 wires*

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3 Phase, 4 wires

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

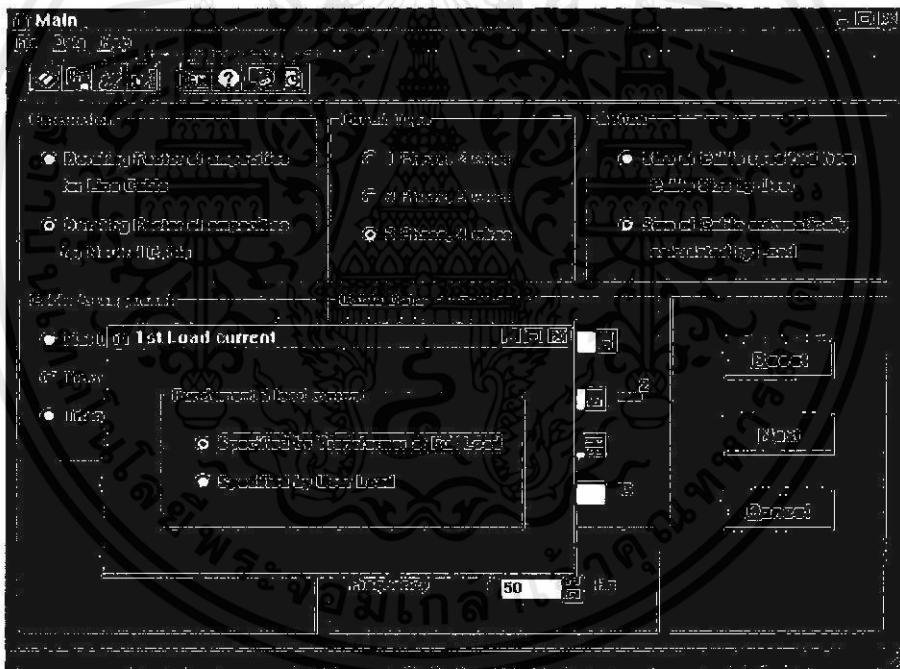
เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูจากหน้าต่างนี้แล้ว จะทำให้เมนูในหน้าต่าง Option เกิดการ Active หน้าต่าง Option ประกอบด้วยเมนู

- Size of Cable specified from Cable Size by User

ผู้ใช้สามารถเลือกขนาดสายเคเบิลได้เอง จากเมนู Cable Size ในหน้าต่าง Cable Data

- Size of Cable automatically calculated by Load

ขนาดสายเคเบิลถูกกำหนดจากขนาดกระแสของโหลด ซึ่ง โปรแกรมจะทำการคำนวณขนาดของสายเคเบิลให้โดยอ้างอิงจากตารางที่ 5-12 และ 5-13 ของกฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ. 2538 การไฟฟ้านครหลวง เมื่อ click เมนูนี้ จะปรากฏหน้าต่าง 1 st Load current ดังแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดขนาดกระแสของโหลดได้จากเมนูในหน้าต่าง 1 st Load current



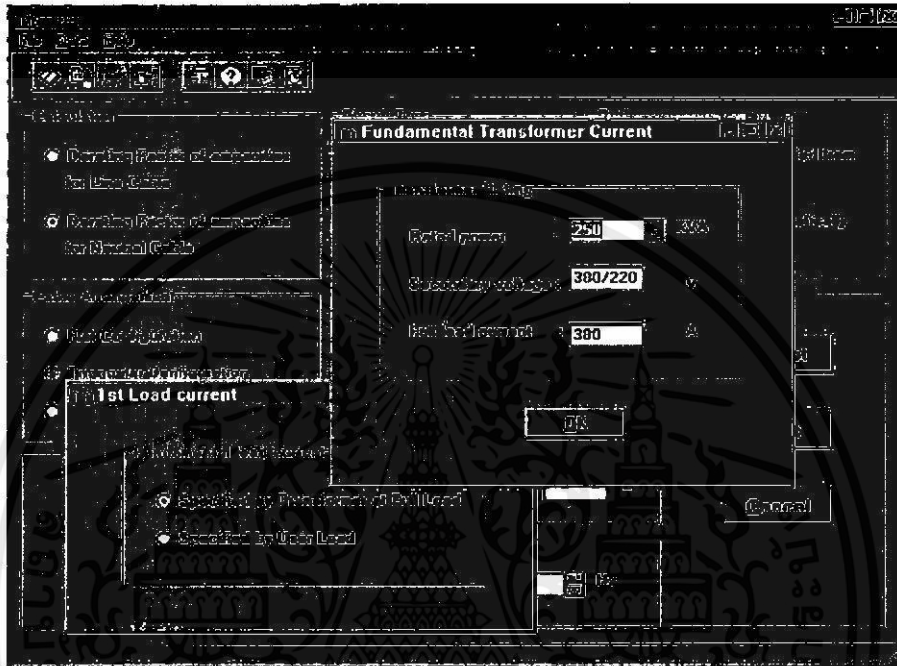
รูปที่ 3 หน้าต่าง 1" Load Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าต่าง 1 st Load current ประกอบด้วยเมนู

- *Specified by transformer at Full Load*

กระแสไหลจะถูกกำหนดจากขนาดพิกัดของหม้อแปลงกำลัง (kVA) โดยคำนวณขณะที่จ่ายโหลดเต็มพิกัด เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูนี้จะปรากฏหน้าต่างต่างจากหน้าต่าง Fundamental Transformer Current ดังรูปที่ 4



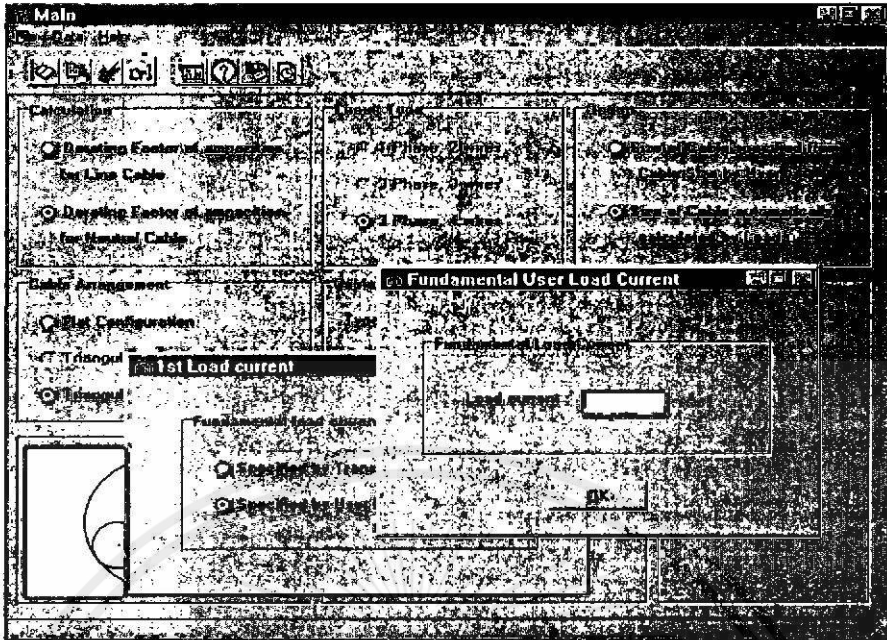
รูปที่ 4 หน้าต่าง Fundamental Transformer Current

ผู้ใช้สามารถเลือกขนาดพิกัดของหม้อแปลงกำลัง (kVA) ได้จากเมนู Rated Power โปรแกรมจะคำนวณกระแสที่พิกัดและแสดงในเมนู Full Load Current เมื่อป้อนข้อมูลครบแล้ว กดปุ่ม OK หน้าต่างนี้จะหายไป ถ้ายังไม่เลือกขนาดพิกัดของหม้อแปลงกำลัง (kVA) จากเมนู Rated Power แม้จะกดปุ่ม OK หน้าต่างก็ยังคงปรากฏอยู่นกว่าจะเลือกขนาดพิกัดของหม้อแปลง

- *Specified by User Load*

กระแสไหลจะถูกกำหนดจากการที่ผู้ใช้ป้อนโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 หน้าต่าง Fundamental User Load current

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูจากหน้าต่าง Option แล้ว จะทำให้เมนูในหน้าต่าง Cable Arrangement เกิดการ Active หน้าต่าง Cable Arrangement ประกอบด้วยเมนู

- Flat Configuration

เป็นการจัดวางสายเคเบิลแบบราบในรางเคเบิลตามตารางที่ 5-13 ช่อง ก สำหรับสายเคเบิล 1 แกน และ ช่อง จ สำหรับสายเคเบิลหลายแกน

- Triangular Configuration

เป็นการจัดวางสายเคเบิลแบบสามเหลี่ยมในรางเคเบิลตามตารางที่ 5-13 ช่อง ค

- Triangular in Conduit

เป็นการจัดวางสายเคเบิลในท่อร้อยสายที่เป็นโลหะตามตารางที่ 5-12 ช่อง ค

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูจากหน้าต่างนี้แล้ว จะทำให้เมนูในหน้าต่าง Cable Data เกิดการ Active หน้าต่าง Cable Data ประกอบด้วยเมนู

- Type of Cable

ชนิดของสายเคเบิล ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบไฟฟ้าและลักษณะการจัดวางสายเคเบิล ดังนี้ ระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดสายเคเบิลซึ่งประกอบด้วย

เอกสาร THW 1 แกน ที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NYY 1 แกน

NYY 2 แกน

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดสายเคเบิลซึ่งประกอบด้วย

THW 1 แกน

NYY 1 แกน

NYY 3 แกน

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดสายเคเบิลซึ่งประกอบด้วย

THW 1 แกน

NYY 1 แกน

NYY 4 แกน

เมื่อผู้ใช้เลือกชนิดสายเคเบิลจากเมนูแล้ว จะทำให้เมนู Cable Size เกิดการ Active พร้อมกับการปรากฏภาพของการจัดวางสายเคเบิลตามที่คุณเลือกไว้

- Cable Size

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนู Size of Cable specified from Cable Size by User ในหน้าต่าง Option ผู้ใช้จะสามารถเลือกขนาดสายเคเบิลได้จากเมนู Cable Size ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เมนู Cable Size

เอกสารนี้เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสายเคเบิลชนิด THW และ NYY 1 แกน จะมีขนาดของสายเคเบิลให้เลือกดังนี้

95 mm²

120 mm²

185 mm²

240 mm²

300 mm²

400 mm²

500 mm²

สำหรับสายเคเบิลชนิด NYY 2 แกน, NYY 3 แกน, NYY 4 แกน จะมีขนาดของสายเคเบิลให้เลือกดังนี้

95 mm²

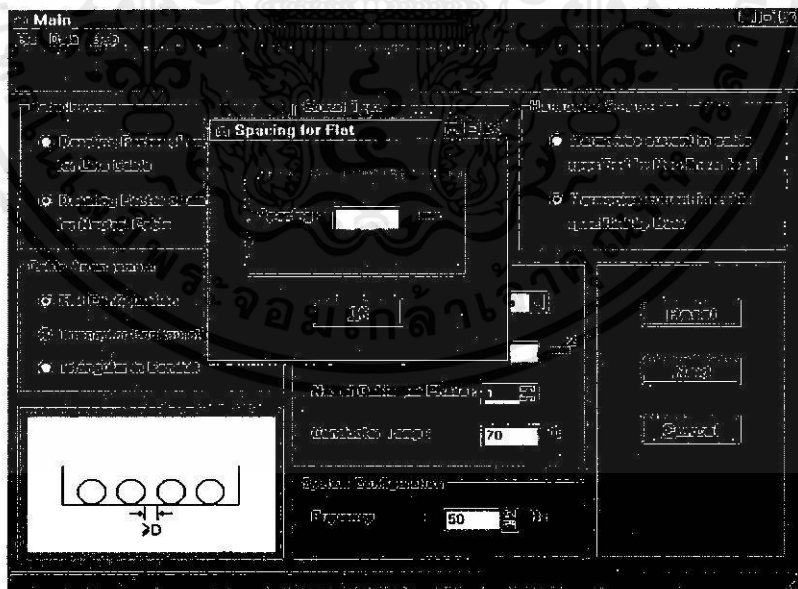
120 mm²

185 mm²

240 mm²

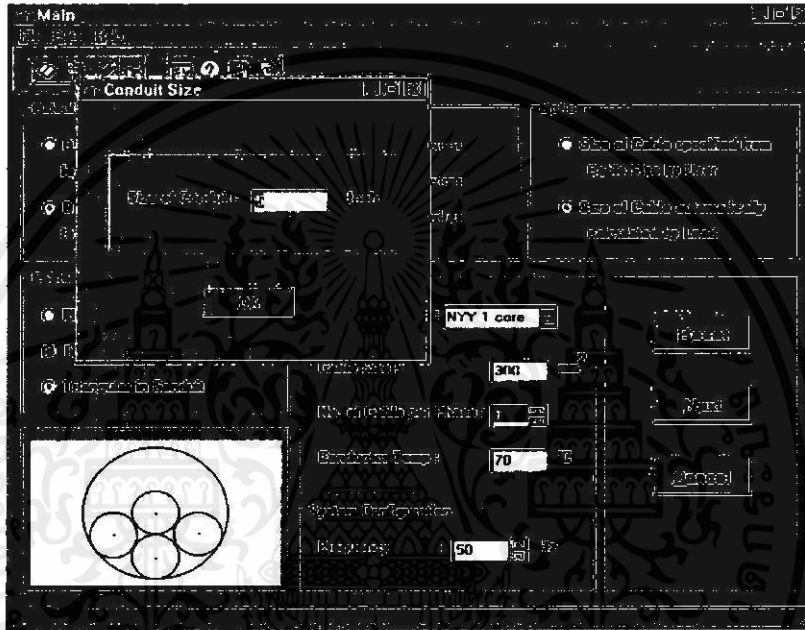
300 mm²

เมื่อกำหนดขนาดสายเคเบิลแล้ว ถ้าผู้ใช้เลือกจัดวางสายเคเบิลแบบราบสำหรับสาย THW หรือ NYY 1 แกน และติดตั้งในรางเคเบิล จะปรากฏหน้าต่าง Spacing for Flat ดังรูปที่ 7



เอกสาร **รูปที่ 7 หน้าต่าง Spacing for Flat** ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ใช้จะต้องป้อนระยะห่างระหว่างสายเคเบิล เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จแล้ว กดปุ่ม OK หน้าต่างนี้จะปิด
 หมายเหตุ ถ้าผู้ใช้เลือกสายเคเบิล NYY ชนิด 2, 3 และ 4 แกน หน้าต่าง Spacing for Flat จะไม่ปรากฏ
 เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำจะเป็นไปตามมาตรฐานของสายเคเบิล
 หรือถ้าผู้ใช้เลือกจัดวางสายเคเบิลและติดตั้งในท่อร้อยสาย จะปรากฏหน้าต่าง Conduit Size ดังแสดงใน
 รูปที่ 8 ซึ่งจะแสดงขนาดของท่อร้อยสายสอดคล้องกับกฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ.
 2538 ของการไฟฟ้านครหลวง เมื่อกดปุ่ม OK หน้าต่างนี้จะปิด



รูปที่ 8 หน้าต่าง Conduit Size

- *No. of Cable per Phase*

จำนวนสายเคเบิลต่อเฟส สามารถเลือกได้ตั้งแต่ 1 ถึง 12 สายต่อเฟส

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนู *Size of Cable specified from Cable Size by User* ในหน้าต่าง Option แล้ว ค่าปกติ
 ของเมนูนี้จะเป็น 1 ผู้ใช้สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนสายเคเบิลต่อเฟสได้จากเมนู

- *Conductor Temp*

อุณหภูมิตัวนำของสายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวน พีวีซี ตาม มอก. 11-2531 เท่ากับ 70 °C

หน้าต่าง *System Configuration* ประกอบด้วยเมนู

- *Frequency*

เอกสาร ความถี่ของกระแสมาตรฐาน ผู้ใช้สามารถเลือกที่ 50 และ 60 Hz ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ่ม *Reset* เมื่อต้องการเซตค่าทั้งหมดใหม่ สามารถทำได้โดยกดปุ่มนี้

ปุ่ม *Next* เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูและป้อนข้อมูลต่างๆในหน้าต่าง Main ครบถ้วนแล้ว สามารถกดปุ่ม *Next* เพื่อเข้าสู่หน้าต่างถัดไป

ปุ่ม *Cancel* เมื่อต้องการยกเลิกหรือปิดหน้าต่างนี้ สามารถทำได้โดยกดปุ่มนี้

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูและป้อนข้อมูลต่างๆครบถ้วนตามขั้นตอนแล้ว กดปุ่ม *Next* จะปรากฏหน้าต่าง *Harmonics Content by User* (โดยที่ผู้ใช้เลือกเมนู *Size of Cable automatically by Load* ในหน้าต่าง *Option*) ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 หน้าต่าง *Harmonics Content by User*

ส่วนป้อนข้อมูล

หน้าต่างนี้ประกอบด้วยเมนู *Harmonics Order* และ *Harmonics Content*

- *Harmonics Order*

กระแสมอนิกลำดับที่ n ที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิล ผู้ใช้สามารถป้อนได้เฉพาะตัวเลขที่เป็นจำนวนเต็มบวกเท่านั้น

- *Harmonics Content*

อัตราส่วนของกระแสมอนิกลำดับที่ n ที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลต่อกระแสที่ความถี่มูลฐาน ผู้ใช้สามารถป้อนได้เฉพาะตัวเลขที่เป็นจำนวนบวกเท่านั้น

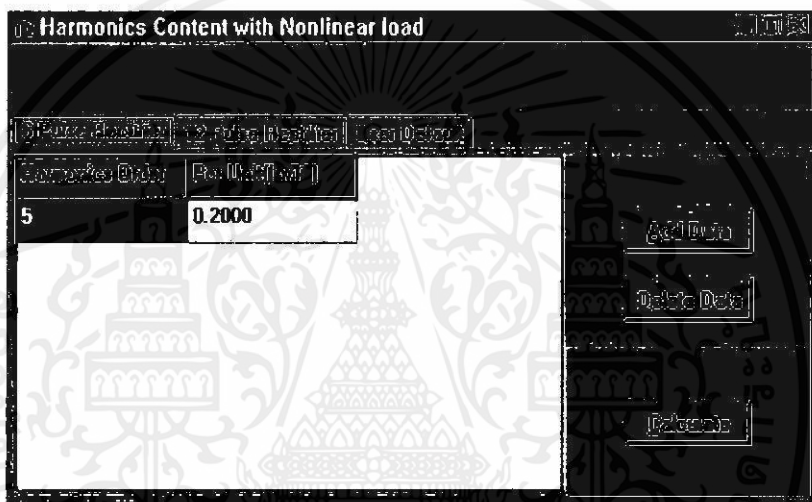
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ่ม *Add* เมื่อกดปุ่มนี้จะเพิ่มแถวของข้อมูลของ Harmonics Order และ Harmonics Content อีก 1 แถว เพื่อให้ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูลเพิ่มเติม

ปุ่ม *Delete* เมื่อกดปุ่มนี้จะลบข้อมูลของ Harmonics Order และ Harmonics Content จำนวน 1 แถว

ปุ่ม *Calculate* เมื่อกดปุ่มนี้ โปรแกรมจะคำนวณค่า Derating Factor และปรากฏหน้าต่าง Result ขึ้น

หรือถ้าผู้ใช้เลือกเมนูและป้อนข้อมูลต่างๆครบถ้วนแล้ว (โดยเลือกเมนู Size of Cable automatically by Load ในหน้าต่าง Option) เมื่อกดปุ่ม Next จะปรากฏหน้าต่าง Harmonics Content by Non-Linear Load ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 หน้าต่าง Harmonics Content with Nonlinear load

หน้าต่างนี้ประกอบด้วย Tap sheet ย่อยต่างๆดังนี้

- 6 Pulse Rectifier

เป็นวงจรแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง 3 เฟส ชนิด 6 พัลส์ โดยลำดับของกระแสฮาร์มอนิก (n) ที่เกิดขึ้นซึ่งจ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ เท่ากับ $6K+1$ และ $6K-1$

โดยที่ $K = 1, 2, 3, \dots$

อัตราส่วนกระแสฮาร์มอนิก เท่ากับ $1/n$

- 12 Pulse Rectifier

เป็นวงจรแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง 3 เฟส ชนิด 12 พัลส์ โดยลำดับของกระแสฮาร์มอนิก (n) ที่เกิดขึ้นซึ่งจ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ เท่ากับ $12K+1$ และ $12K-1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

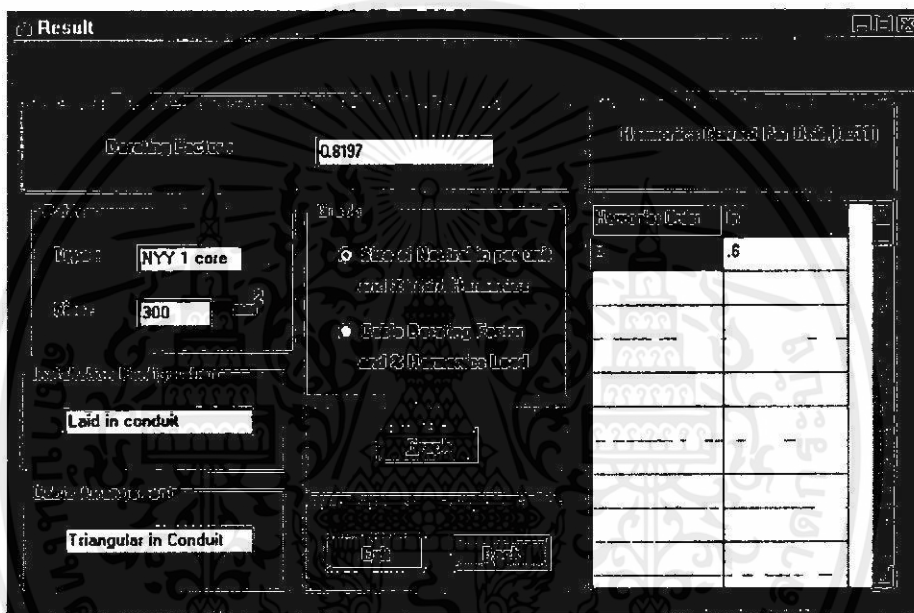
โดยที่ $K = 1, 2, 3, \dots$

อัตราส่วนกระแสฮาร์มอนิก เท่ากับ $1/n$

- *User Default*

ผู้ใช้สามารถกำหนดข้อมูลของลำดับกระแสฮาร์มอนิก (n) และอัตราส่วนกระแสฮาร์มอนิก (I_n/I_1) ได้โดยตรงจาก Tap sheet นี้

หลังจากที่ป้อนข้อมูลของลำดับกระแสฮาร์มอนิก (n) และอัตราส่วนกระแสฮาร์มอนิก (I_n/I_1) แล้วกดปุ่ม *Calculate* จะปรากฏหน้าต่าง Result ดังแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 หน้าต่าง Result แสดงผลลัพธ์การคำนวณค่า Derating Factor

ส่วนแสดงผล

หน้าต่างนี้ประกอบด้วยเมนู

- *Derating Factor*

แสดงค่า ตัวคูณลดของกระแสเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิก

- หน้าต่าง Cable ประกอบด้วย

Type แสดงชนิดของสายเคเบิลที่ใช้ในการคำนวณ

Size แสดงขนาดของสายเคเบิลที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หน้าต่าง **Installation Configuration**

แสดงลักษณะการติดตั้งสายเคเบิล

- หน้าต่าง **Cable Arrangement**

แสดงลักษณะการจัดวางสายเคเบิล

- หน้าต่าง **Graph**

ผู้ใช้สามารถเลือกที่ Size of Neutral in per unit and % Third Harmonics เพื่อแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรัลซึ่งคิดในรูปต่อหน่วย และเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกที่ 3 หรือเลือกที่ Cable Derating Factor and % Third Harmonics เพื่อแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวคูณลดกระแสสำหรับสายนิวทรัล และเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกที่ 3

หมายเหตุ หน้าต่าง Graph และ ปุ่ม Graph จะ Active ก็ต่อเมื่อผู้ใช้เลือกเมนู Derating Factor of ampacities for Neutral Cable ในหน้าต่าง Calculation ของเมนูหลักและจะคำนวณค่าตัวคูณลดขนาดกระแสในสายนิวทรัลอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เท่านั้น แต่ถ้าผู้ใช้เลือกเมนู Derating Factor of ampacities for Line Cable แล้ว หน้าต่าง Graph และ ปุ่ม Graph จะ ไม่Active

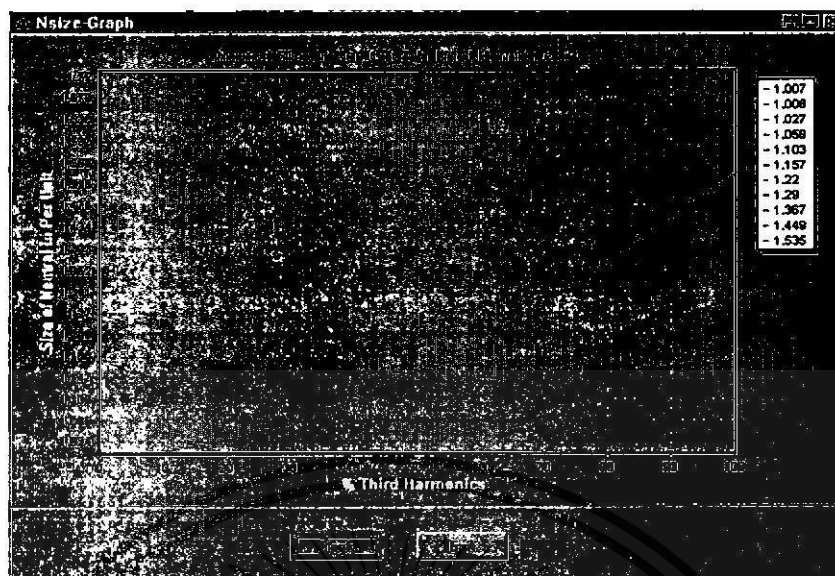
- หน้าต่าง **Harmonics Current Per Unit**

แสดงลำดับกระแสฮาร์โมนิก และอัตราส่วนกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n ต่อกระแสที่ความถี่มูลฐานที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิล

ปุ่ม Graph เมื่อกดปุ่มนี้ จะปรากฏหน้าต่าง Nsize-Graph หรือ DF-Graph ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรัลซึ่งคิดในรูปต่อหน่วย หรือค่าตัวคูณลดกระแสสำหรับสายนิวทรัล และเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ

ปุ่ม Exit เมื่อกดปุ่มนี้จะออกจาก โปรแกรม

ปุ่ม Back เมื่อกดปุ่มนี้จะกลับไปสู่หน้าต่างก่อนหน้า พร้อมกับปิดหน้าต่างปัจจุบัน



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสายนิวทรัล (Per unit) และเปอร์เซ็นต์ ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Derating factor และเปอร์เซ็นต์ ของกระแสฮาร์โมนิกที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสาย THW

Nominal cross sectional area	Number and diameter of wire (No/mm)	Insulation Thickness (mm)	Overall Diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70 °C	Conductor Diameter (mm)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
0.5	1/0.80	0.8	3	0.0175	3.0	11 -	100/C
1	1/1.13	0.8	3.3	0.0141	3.3	17 -	100/C
1	7/0.40	0.8	3.5	0.0135	3.5	17 -	100/C
1.5	1/1.38	0.8	3.6	0.0123	3.6	22 -	100/C
1.5	7/0.50	0.8	3.8	0.0116	3.8	22 -	100/C
2.5	1/1.78	0.8	4	0.0102	4.0	31 -	100/C
2.5	7/0.67	0.8	4.3	0.0093	4.3	31 -	100/C
4	1/2.25	0.9	4.8	0.0094	4.8	50 -	100/C
4	7/0.85	0.9	5.2	0.0085	5.2	50 -	100/C
6	7/1.04	0.9	5.8	0.0073	5.8	75 -	100/C
10	7/1.35	1.1	7.2	0.0069	7.2	120 -	100/C
16	7/1.70	1.1	8.4	0.0057	8.4	180 -	100/C
25	7/2.14	1.3	10.5	0.0054	10.5	290 -	100/C
35	19/1.53	1.3	11.5	0.0047	11.5	380 -	100/C
50	19/1.78	1.5	13.5	0.0046	13.5	540 -	500/D
70	19/2.14	1.5	15.5	0.0039	15.5	720 -	500/D
95	19/2.52	1.7	18	0.0038	18	1,000 -	500/D
120	37/2.03	1.7	19.5	0.0034	19.5	1,240 -	500/D
150	37/2.25	1.9	21.5	0.0034	21.5	1,520 -	500/D
185	37/2.52	2.1	24	0.0034	24	1,900 -	500/D
240	61/2.25	2.3	27	0.0033	27	2,480 -	500/D
300	61/2.52	2.5	30	0.0032	30	3,100 -	500/D
400	61/2.85	2.7	33.5	0.003	33.5	3,950 -	500/D
500	61/3.20	3.1	38	0.0031	38	5,150 -	500/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสาย NYY Type C ชนิด 1 แกน

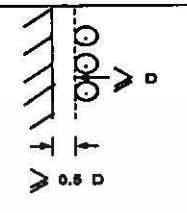
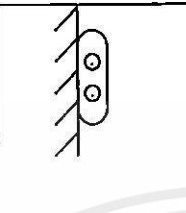
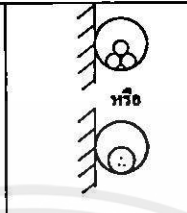
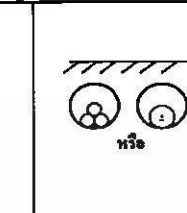
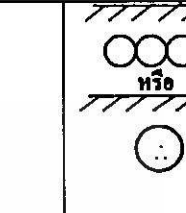
Nominal cross sectional area	Number and diameter of wire (No/mm)	Insulation thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Overall diameter (mm)	Conductor Diameter (mm)	Minimum Insulation Resistance at 70 ° C	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
1	1/1.13	1.5	1.8	8.6	1.13	0.0207	80-	100/C
1	7/0.40	1.5	1.8	8.8	1.2	0.02	80-	100/C
1.5	1/1.38	1.5	1.8	9	1.38	0.0184	90-	100/C
1.5	7/0.50	1.5	1.8	9.2	1.50	0.0175	90-	100/C
2.5	1/1.78	1.5	1.8	9.4	1.78	0.0157	100-	100/C
2.5	7/0.67	1.5	1.8	9.8	2.01	0.0146	100-	100/C
4	1/2.25	1.5	1.8	10	2.25	0.0135	130-	100/C
4	7/0.85	1.5	1.8	10.5	2.55	0.0124	130-	100/C
6	7/1.04	1.5	1.8	11	3.12	0.0107	160-	100/C
10	7/1.35	1.5	1.8	12	4.05	0.0088	210-	500/D
16	7/1.70	1.5	1.8	13	5.10	0.0074	280-	500/D
25	7/2.14	1.5	1.8	14.5	6.42	0.0061	390-	500/D
35	19/1.53	1.5	1.8	16	7.65	0.0053	500-	500/D
50	19/1.78	1.5	1.8	17	8.90	0.0046	660-	500/D
70	19/2.14	1.5	1.8	19	10.70	0.0039	850-	500/D
95	19/2.52	1.7	1.8	21.5	12.60	0.0038	1,150	500/D
120	37/2.03	1.7	1.8	23	14.21	0.0034	1,400-	500/D
150	37/2.25	1.9	2	26	15.75	0.0034	1,720-	500/D
185	37/2.52	2.1	2	28	17.64	0.0034	2,130	500/D
240	61/2.25	2.3	2.2	31.5	20.25	0.0033	2,760-	500/D
300	61/2.52	2.5	2.2	35	22.68	0.0032	3,400-	500/D
400	61/2.85	2.7	2.2	38.5	25.65	0.003	4,290-	500/D
500	61/3.20	3.1	2.4	43	28.80	0.0031	5,570-	500/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสาย NYV Type C ชนิดหลายแกน

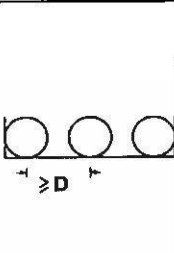
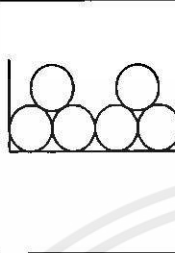
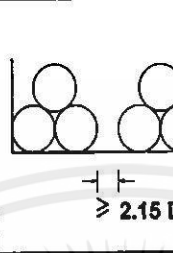
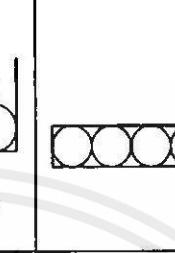
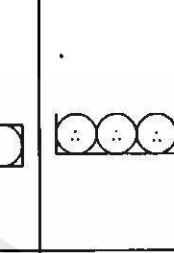
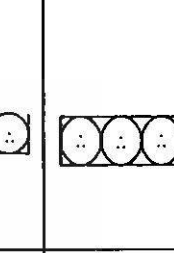
Nominal cross sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Conductor Diameter (mm)	Insulation Thickness (mm)	Internal Sheath Thickness(mm)				External Sheath Thickness(mm)				Overall Diameter (mm)			Minimum Insulation Resistance at 70° C (MΩ-km)	Cable Weight(approx) Kg/Km		
				2 cores	3 cores	4 cores	2 cores	3 cores	4 cores	2 cores	3 cores	4 cores	2 cores	3 cores		4 cores		
1	1/1.13	1.13	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	12	12.5	13.5	0.0141	160	180	200	
1	7/0.40	1.2	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	12.5	13	14	0.0135	160	180	200	
1.5	1/1.38	1.38	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	12.5	13	14	0.0123	180	200	230	
1.5	7/0.50	1.5	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	13	13.5	14.5	0.0116	180	200	230	
2.5	1/1.78	1.78	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	13.5	14	15	0.0102	210	250	290	
2.5	7/0.67	2.01	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	14	15	16	0.0093	210	250	290	
4	1/2.25	2.25	0.9	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	15	15.5	17	0.0094	280	330	390	
4	7/0.85	2.55	0.9	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	15.5	16.5	17.5	0.0085	280	330	390	
6	7/1.04	3.12	0.9	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	17	18	19	0.0073	370	440	530	
10	7/1.35	4.05	1.1	0.8	0.8	0.8	1.8	1.8	1.8	1.8	19.5	20.5	23	0.0069	530	640	810	
16	7/1.70	5.1	1.1	0.8	1.2	1.2	2	2	2	2	22.5	24.5	26.5	0.0057	720	930	1160	
25	7/2.14	6.42	1.3	1.2	1.2	1.2	2	2	2	2	27	28.5	31	0.0054	1090	1360	1700	
35	19/1.53	7.65	1.3	1.2	1.5	1.5	2	2	2	2	29.5	31.5	35	0.0047	1360	1730	2240	
50	19/1.78	8.9	1.5	1.2	1.5	1.5	2.2	2.2	2.2	2.2	33.5	36	39.5	0.0046	1880	2440	3070	
70	19/2.14	10.7	1.5	1.5	1.5	1.5	2.2	2.2	2.2	2.4	38	40.5	44.5	0.0039	2430	3110	3970	
95	19/2.52	12.6	1.7	1.5	1.8	1.8	2.2	2.4	2.6	2.6	42.5	46	51.5	0.0038	3220	4180	5410	
120	37/2.03	14.21	1.7	1.5	1.8	1.8	2.4	2.6	2.8	2.8	46.5	50.5	56	0.0034	3940	5190	6640	
150	37/2.25	15.75	1.9	1.8	1.8	1.8	2.6	2.8	3	3	52	56	62	0.0034	4840	6300	8130	
185	37/2.52	17.64	2.1	1.8	2	2	2.8	3	3.2	3.2	57	61.5	68	0.0034	5970	7840	10050	
240	61/2.25	20.25	2.3	2	2	2	3	3.2	3.4	3.4	64	69	76.5	0.0033	7700	10060	12960	
300	61/2.52	22.68	2.5	2	2	2	3.2	3.4	3.8	3.8	70.5	76	85	0.0032	9450	12450	16040	

ตารางที่ 4 ขนาดกระแสของสายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวน ที่วิธี ตาม มอก. 11-2531 อุณหภูมิตัวนำ 70 องศาเซลเซียส ขนาดแรงดัน 300 หรือ 750 โวลต์ อุณหภูมิโดยรอบ 40 องศาเซลเซียส (สำหรับวิธีการเดินสาย ก-ค) และ 30 องศาเซลเซียส (สำหรับวิธีการเดินสาย ง และ จ)

ขนาดสาย (ตร.มม.)	ขนาดกระแส (แอมแปร์)						
	วิธีการเดินสาย (หมายเหตุ 1)						
							
	ก	ข	ค		ง		จ
		ท่อโลหะ	ท่ออลูมิเนียม	ท่อโลหะ	ท่ออลูมิเนียม		
0.5	9	8	8	7	10	9	-
1	14	11	11	10	15	13	21
1.5	17	15	14	13	18	16	26
2.5	23	20	18	17	24	21	34
4	31	27	24	23	32	28	45
6	42	35	31	30	42	36	56
10	60	50	43	42	58	50	75
16	81	66	56	54	77	65	97
25	111	89	77	74	103	87	125
35	137	110	95	91	126	105	150
50	169	-	119	114	156	129	177
70	217	-	148	141	195	160	216
95	271	-	187	180	242	200	259
120	316	-	214	205	279	228	294
150	364	-	251	236	322	259	330
185	424	-	287	269	370	296	372
240	509	-	344	329	440	352	431
300	592	-	400	373	508	400	487
400	696	-	474	416	599	455	552
500	818	-	541	469	684	516	623

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ขนาดกระแสของสายไฟฟ้าทองแดงหุ้มฉนวน พีวีซี ตาม มอก. 11-2531 อุณหภูมิตัวนำ
70 องศาเซลเซียส ขนาดแรงดัน 300 หรือ 750 โวลต์ อุณหภูมิโดยรอบ 40 องศาเซลเซียส
(สำหรับวิธีการเดินสาย ก-ค) และ 30 องศาเซลเซียส วางบนรางเคเบิล(Cable tray)

ขนาดสาย (ตร.มม.)	ขนาดกระแส(แอมแปร์)					
	วิธีการเดินสาย (หมายเหตุ 1)					
						
ก	ข	ค	ง	จ	ฉ	
1	-	-	-	-	11	10
1.5	-	-	-	-	14	13
2.5	-	-	-	-	18	17
4	-	-	-	-	24	23
6	-	-	-	-	31	29
10	-	-	-	-	43	41
16	-	-	-	-	56	53
25	-	-	-	-	77	73
35	-	-	-	-	95	90
50	169	110	143	101	119	113
70	217	141	183	130	148	140
95	271	176	230	163	187	178
120	316	205	267	190	214	203
150	364	237	308	218	251	238
185	424	276	360	254	287	273
240	509	331	432	305	344	327
300	592	444	504	414	400	393
400	696	522	593	487	-	-
500	818	613	699	572	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
D = เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการพิสูจน์หากระแสในนิเวทรอระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย
เมื่อกระแสเป็น Square Wave

กระแสไหลเป็น Square Wave มีสมการดังนี้

$$F(x) = \begin{cases} -K & \text{ถ้า } -\pi < x < 0 \quad \text{และ } f(x + 2\pi) = f(x) \\ K & \text{ถ้า } 0 < x < \pi \end{cases}$$

ใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการหากระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ในแต่ละเฟส

เฟส A

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 (-k) \cos nx dx + \int_0^{\pi} k \cos nx dx \\ &= \frac{1}{\pi} \left[-k \frac{(\sin nx)}{n} \Big|_{-\pi}^0 + k \frac{(\sin nx)}{n} \Big|_0^{\pi} \right] = 0 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $\sin nx = 0$ ที่ $n = -\pi, 0$ และ π สำหรับค่า $n = 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 (-k) \sin nx dx + \int_0^{\pi} k \sin nx dx \\ &= \frac{1}{\pi} \left[k \frac{(\cos nx)}{n} \Big|_{-\pi}^0 + k \frac{(\cos nx)}{n} \Big|_0^{\pi} \right] = 0 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$ และ $\cos 0 = 1$ ดังนั้น

$$b_n = \left(\frac{k}{n} \right) \pi [\cos 0 - \cos(-n\pi) - \cos n\pi + \cos 0] = \left(\frac{2k}{n} \right) \pi (1 - \cos n\pi)$$

และ $\cos \pi = -1, \cos 2\pi = 1, \cos 3\pi = -1$ โดยทั่วไป

$$\cos n\pi = \begin{cases} -1 & \text{สำหรับ } n \text{ เป็นเลขคี่, และ } 1 - \cos n\pi = 2 \\ 1 & \text{สำหรับ } n \text{ เป็นเลขคู่} \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ b_n สามารถหาได้ดังนี้

$$b_1 = \frac{4k}{\pi}, b_0 = 0, b_3 = \frac{4k}{3}\pi, b_4 = 0, b_5 = \frac{4k}{5\pi}, \dots$$

เนื่องจาก $a_n = 0$ ดังนั้นอนุกรมฟูเรียร์ของกระแสในเฟส A เท่ากับ

$$\frac{4k}{\pi} \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right)$$

เฟส B

$$F_b(x) = \begin{cases} -K & \text{ถ้า } -\pi + \frac{2\pi}{3} \langle x \langle \frac{2\pi}{3} = \frac{-\pi}{3} \langle x \langle \frac{2\pi}{3} \\ K & \text{ถ้า } \frac{2\pi}{3} \langle x \langle \pi + \frac{2\pi}{3} = \frac{2\pi}{3} \langle x \langle \frac{5\pi}{3} \end{cases}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{5\pi/3} f(x) dx = 0$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi/3}^{2\pi/3} (-k) \cos nx dx + \int_{2\pi/3}^{5\pi/3} k \cos nx dx \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[-k \frac{(\sin nx)}{n} \Big|_{-\pi/3}^{2\pi/3} + k \frac{(\sin nx)}{n} \Big|_{2\pi/3}^{5\pi/3} \right]$$

$$n = 1, a_1 = \frac{1}{\pi} [(-k(0.866 + 0.866)) + (k(-0.866 - 0.866))]]$$

$$= \frac{1}{\pi} [-k(1.732) - k(1.732)]$$

$$a_1 = \left(\frac{-3.464}{\pi} \right) k$$

$$n = 2, a_2 = \frac{1}{\pi} [(-k(0.433 + 0.433)) + (k(-0.433 + 0.433))] = 0$$

$$n = 3, a_3 = \frac{1}{\pi} [(-k(0 - 0)) + (k(0 - 0))] = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เ้าวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = 4, a_4 = \frac{1}{\pi} [(-k(0.217 - 0.217)) + (k(-0.217 + 0.217))] = 0$$

$$\begin{aligned} n = 5, a_5 &= \frac{1}{\pi} [(-k(-0.173 - 0.173)) + (k(0.173 + 0.173))] \\ &= \left(\frac{0.692}{\pi}\right)k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int f(x) \sin nx dx = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi/3}^{2\pi/3} (-k) \sin nx dx + \int_{2\pi/3}^{5\pi/3} k \sin nx dx \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \left[-k \frac{(-\cos nx)}{n} \Big|_{-\pi/3}^{2\pi/3} + k \frac{(-\cos nx)}{n} \Big|_{2\pi/3}^{5\pi/3} \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \left[k \left(\frac{\cos 2n\pi/3}{n} - \frac{\cos -n\pi/3}{n} \right) - k \left(\frac{\cos 5n\pi/3}{n} - \frac{\cos 2n\pi/3}{n} \right) \right] \end{aligned}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[k \left(\frac{\cos 2n\pi/3}{n} - \frac{\cos n\pi/3}{n} \right) - k \left(\frac{\cos 5n\pi/3}{n} - \frac{\cos 2n\pi/3}{n} \right) \right]$$

$$n = 1, b_1 = \frac{1}{\pi} [(k(-0.5 - 0.5)) - (k(0.5 - (-0.5)))] = \frac{1}{\pi} (-k - k) = \frac{-2k}{\pi}$$

$$n = 2, b_2 = \frac{1}{\pi} [(k(-0.25 - (-0.25))) - (k(-0.25 - (-0.25)))] = 0$$

$$n = 3, b_3 = \frac{1}{\pi} [(k(0.333 - (0.333))) - (k(-0.333 - 0.333))] = \frac{1.333k}{\pi}$$

$$n = 4, b_4 = 0$$

$$n = 5, b_5 = \frac{-0.4k}{\pi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น อนุกรมฟูเรียร์ของกระแสในเฟส b เท่ากับ

$$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

$$f_b(x) = 0 + \left[\left(\frac{-3.464 k}{\pi} \right) \cos x + \left(\frac{0.692 k}{\pi} \right) \cos 5x + \dots \right]$$

$$= \left(\frac{-2k}{\pi} \right) \sin x + \left(\frac{1.333 k}{\pi} \right) \sin 3x - \left(\frac{-0.4k}{\pi} \right) \sin 5x \dots]$$

เฟส C

$$F_c(x) = \begin{cases} -K & -\pi + \frac{2\pi}{3} < x < \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{3} = \frac{\pi}{3} < x < \frac{4\pi}{3} \\ K & \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{3} < x < \frac{5\pi}{3} + \frac{2\pi}{3} = \frac{4\pi}{3} < x < \frac{7\pi}{3} \end{cases}$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} (-k) dx + \int_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{7\pi}{3}} (k) dx = 0$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[-k \left(\frac{\sin(nx)}{n} \right) \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} + k \left(\frac{\sin(nx)}{n} \right) \Big|_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{7\pi}{3}} \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[-k \left(\frac{\sin 4n\pi/3}{n} - \frac{\sin n\pi/3}{n} \right) + k \left(\frac{\sin 7n\pi/3}{n} - \frac{\sin 4n\pi/3}{n} \right) \right]$$

$$n = 1, a_1 = \frac{1}{\pi} [(-k(-0.866 - 0.866)) + (k(0.866 - (-0.866)))] = 3.464 \left(\frac{k}{\pi} \right)$$

$$n = 2, a_2 = 0$$

$$n = 3, a_3 = 0$$

$$n = 4, a_4 = 0$$

$$n = 5, a_5 = \frac{-0.692k}{\pi}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} (-k) \sin nx dx + \int_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{7\pi}{3}} (k) \sin nx dx \right]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[-k \left(\frac{-\cos nx}{n} \right) \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3}} + k \left(\frac{-\cos nx}{n} \right) \Big|_{\frac{4\pi}{3}}^{\frac{7\pi}{3}} \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[-k \left(\frac{\cos 4n\pi/3}{n} - \frac{\cos n\pi/3}{n} \right) - k \left(\frac{\cos 7n\pi/3}{n} - \frac{\cos 4n\pi/3}{n} \right) \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = 1, b_1 = \frac{-2k}{\pi}$$

$$n = 2, b_2 = 0$$

$$n = 3, b_3 = \frac{1.333k}{\pi}$$

$$n = 4, b_4 = 0$$

$$n = 5, b_5 = \frac{-0.4k}{\pi}$$

ดังนั้นอนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสในเฟส C เท่ากับ

$$0 + \left(\frac{3.464k}{\pi}\right) \cos x + \left(\frac{-0.692k}{\pi}\right) \cos 5x + \dots$$

$$+ \left(\frac{-2k}{\pi}\right) \sin x + \left(\frac{1.333k}{\pi}\right) \sin 3x + \left(\frac{-0.4k}{\pi}\right) \sin 5x + \dots$$

เมื่อรวม กระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ในแต่ละเฟส จะพบว่าเทอม a_n จะไม่มีทั้ง 3 เฟส ส่วนเทอม \cos ที่คู่กับ a_n ของเฟส b และ c จะหักล้างกัน ดังนั้นกระแสรวมทั้ง 3 เฟส เท่ากับ

$$\frac{4k}{\pi} \left[\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right] + 2 \left[\left(\frac{-2k}{\pi}\right) \sin x + \left(\frac{1.333k}{\pi}\right) \sin 3x + \left(\frac{-0.4k}{\pi}\right) \sin 5x + \dots \right]$$

$$= \frac{4k}{\pi} (\sin 3x + \frac{1}{3} \sin 9x + \dots)$$

จะเห็นว่าเมื่อรวมกันแล้ว เทอม $\sin x, \sin 5x$ หายไป ดังนั้นเหลือเทอม $\sin 3x, \sin 9x, \sin 15x, \sin 21x$ หรือฮาร์มอนิกที่ 3, 9, 15, 21..... ซึ่งมีขนาดเป็น 3 เท่าของฮาร์มอนิกแต่ละลำดับในเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสมชัย จิรรุ่งโรจน์กุล เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2515 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 และพัฒนบริหารศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรเศรษฐศาสตร์ธุรกิจ สาขาวิเคราะห์และประเมินโครงการ จากสถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ ปีการศึกษา 2540

ปี พ.ศ. 2537 เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า บริษัทศรีอุทอง จำกัด และได้เคยทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทยและ วิศวกรโครงการ บริษัทซีเมนต์จำกัด ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้จัดการแผนกส่งเสริมอุตสาหกรรมสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้