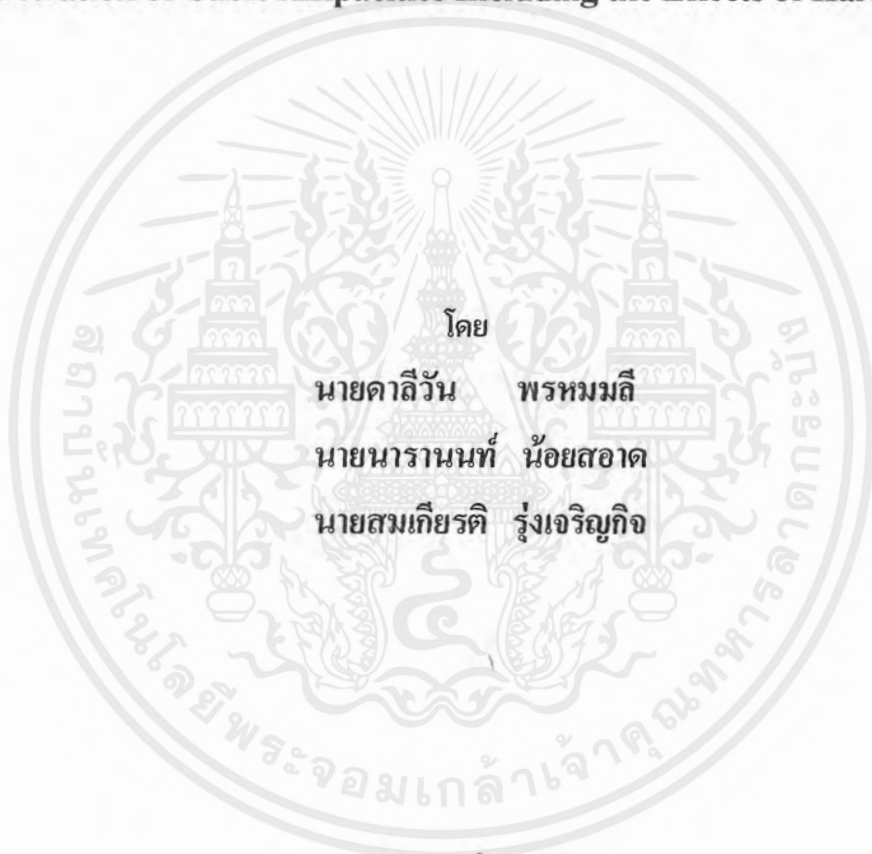


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ปีการศึกษา 2542

การคำนวณค่ากระแสพิภักต์ในสายเคเบิลโดยคำนึงผลของฮาร์โมนิกส์
Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics



โดย
นายดาลีวัน พรหมมณี
นายนารานนท์ น้อยสอาด
นายสมเกียรติ รุ่งเจริญกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์สุดี บรรจงจิตร

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว

อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 36982
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

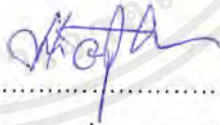
เรื่อง การคำนวณค่ากระแสพิงค์ในสายเคเบิลโดยคำนึงผลของฮาร์มอนิกส์

ผู้จัดทำ

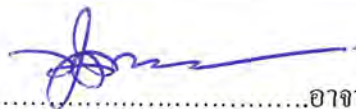
1. นายคาสีวัน พรหมมณี
2. นายนารานนท์ น้อยสอาด
3. นายสมเกียรติ รุ่งเจริญกิจ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ศุติ บรรจงจิตร)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่ากระแสพิภักต์ในสายเคเบิลเนื่องจากผลของฮาร์มอนิกส์

นายคาลีนัน พรหมมณี
นายนารานนท์ น้อยสอาด
นายสมเกียรติ รุ่งเจริญกิจ
รองศาสตราจารย์สุติ บรรจงจิตร
อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว
อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว
ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการคำนวณกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ส่งผลตอบสนองต่อระบบอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งที่เกิดจากผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ได้แก่ความสูญเสียอันเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งก่อให้เกิดผลตามมาคือ การเพิ่มอุณหภูมิของตัวนำในสายเคเบิล ถ้ามีค่าเกินอุณหภูมิที่พิภักต์ของสายเคเบิล ที่สามารถรองรับได้ จะส่งผลให้ขีดความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลลดลง จากประเด็นดังกล่าว ได้นำมาสู่การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณกระแสของสายเคเบิล ในรูปของตัวคูณลดฮาร์มอนิกส์ วิธีการดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เป็นหลักเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกขนาดของสายเคเบิลที่จะนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง

Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics

Dalyvan Phommaly

Naranon Noisa-ard

Somkiet Rungcharoenkit

Assc.Prof. Suree Bunjongjit Advisor

Lecture Chai Chompoinvai Advisor

Lecture Chow Chompoinvai Advisor

1999

ABSTRACT

This project presents a study of a calculation method for cable ampacity in the harmonic presence for a cable 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 and 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. Finally, the size or cable can be suitably and accurately selected in electrical power system.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง.....	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงาน.....	2
บทที่ 2 ความรู้เกี่ยวกับสายเคเบิลและการติดตั้งสายเคเบิล	3
2.1 ส่วนประกอบของสายเคเบิล.....	3
2.2 ตัวนำ.....	5
2.3 ฉนวน (INSULATION).....	6
2.4 CABLE SHIELDING	10
2.5 JACKETING, SHEATING และ ARMORING.....	11
2.6 ตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ในระดับแรงดันสูงและระดับแรงดันต่ำ	12
2.7 การพิจารณาเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสม	14
บทที่ 3 การติดตั้งสายเคเบิล	16
3.1 การติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้ง.....	16
3.2 การติดตั้งสายเคเบิล โดยการร้อยท่อสายไฟ (DUCT หรือ CONDUIT).....	16
3.3 การเดินสายบนรางเดินสาย(RACE WAY).....	18
3.4 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน(UNDERGROUND CABLES)	20
บทที่ 4 ฮาร์โมนิก: สาเหตุ ผลกระทบ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 สาเหตุของฮาร์โมนิก.....	24
4.2 อินเตอร์ฮาร์โมนิก(INTER HARMONICS)	24
4.3 ฮาร์โมนิกคุณลักษณะ(CHARACTERISTIC HARMONIC).....	25
4.4 ฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ(NON CHARACTERISTIC HARMONICS).....	25
4.5 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก(FERROMAGNETIC DEVICE).....	25
4.6 ประเภทของฮาร์โมนิก	25
4.7 ลำดับฮาร์โมนิก(HARMONIC ORDER)	26
4.8 ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิก	29
บทที่ 5 ทฤษฎีและหลักการ	36
5.1 สัญลักษณ์ต่างๆ.....	36
5.2 หลักการคำนวณตามทฤษฎีของ J.H NEHER และ M.H.MC GRATH	38
5.3 การคำนวณพิกัดกระแสเนื่องจากผลของฮาร์โมนิก.....	44
5.4 ตัวอย่างการคำนวณที่พิกัดแรงดันต่ำ.....	49
บทที่ 6 การออกแบบโปรแกรมและผลการทดสอบโปรแกรม	53
6.1 วิธีการใช้โปรแกรม.....	53
6.2 โพลีซาร์ทของโปรแกรม	59
6.3 ผลการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	67
6.4 การคำนวณ หา HDF จาก NONLINEAR LOAD ประเภทต่างๆ	80
6.5 การคำนวณหา HDF จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อผ่านวงจรกรองฮาร์โมนิก.....	85
บทที่ 7 ผลการทดลองและสรุปผลวิจารณ์	88
7.1 สรุปผล	88
7.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ.....	88
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันต่ำ	4
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันปานกลาง	4
รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE	13
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันต่ำ THW	14
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันต่ำ NYY	14
รูปที่ 3.1 การเดินสายเคเบิล ในที่แจ้ง	16
รูปที่ 3.2 แสดงการต่อท่อ EMT	18
รูปที่ 3.3 แสดงการต่อท่อ RMC	18
รูปที่ 3.4 รางเคเบิลแบบบันได	19
รูปที่ 3.5 รางเคเบิลแบบมีช่องระบายอากาศ	19
รูปที่ 3.6 รางเคเบิลแบบด้านล่างที่บ	19
รูปที่ 3.7 รางเคเบิล	20
รูปที่ 3.8 ความลึกในการติดตั้ง ใต้ดิน	23
รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ากระแสในสายนิวทรอลเป็นศูนย์เมื่อ โหลดสมดุล	28
รูปที่ 4.2 กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในระบบกำลังไฟฟ้า 3 เฟส	29
รูปที่ 6.1 หน้าจอป้อนค่าก่อนการคำนวณ	53
รูปที่ 6.2 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ	54
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3	55
รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 5	55
รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 7	56
รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3,5,7	56
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่สูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3	57
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่สูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 5	57
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่สูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 7	58

รูปที่ 6.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่สูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3,5,7.....	58
รูปที่ 6.11	โพลีชาร์ทของการคำนวณค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิล.....	59
รูปที่ 6.12	โพลีชาร์ทของการคำนวณค่า HDF	61
รูปที่ 6.13	โพลีชาร์ทของการคำนวณ ขนาดกระแส ที่สายเคเบิลต้องรองรับ ได้เมื่อมีฮาร์โมนิก....	65
รูปที่ 6.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสายนิวทรอลและเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3	76
รูปที่ 6.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสในรูปต่อหน่วย กับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3,5,7.....	78
รูปที่ 6.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูญเสีย กับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกที่ 3,5,7.....	78
รูปที่ 6.17	กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC PHASE CONTROL ก่อนการกรอง	85
รูปที่ 6.18	กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC PHASE CONTROL เมื่อกรองฮาร์โมนิกที่ 3	85
รูปที่ 6.19	กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC PHASE CONTROL เมื่อกรองฮาร์โมนิกที่ 5	86
รูปที่ 6.20	กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC PHASE CONTROL เมื่อกรองฮาร์โมนิกที่ 7	86

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าความนำของโลหะชนิดต่างๆ.....	6
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงกับอลูมิเนียม	6
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิขณะทำงานของ CABLE DIELECTRIC ชนิดต่างๆ	8
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของ CABLE DIELECTRIC ชนิดต่างๆ	9
ตารางที่ 4.1 แสดงฮาร์โมนิกชนิดต่างๆ.....	27
ตารางที่ 6.1 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย THW ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินลอยในอากาศ.....	67
ตารางที่ 6.2 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย THW ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินร้อยท่อในอากาศ.....	68
ตารางที่ 6.3 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย THW ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินร้อยท่อใต้ดิน	69
ตารางที่ 6.4 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย NYY ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินลอยในอากาศ	70
ตารางที่ 6.5 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย NYY ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินร้อยท่อในอากาศ	71
ตารางที่ 6.6 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย NYY ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินร้อยท่อใต้ดิน	72
ตารางที่ 6.7 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย XLPE ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินลอยในอากาศ.....	73
ตารางที่ 6.8 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย XLPE ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินร้อยท่อในอากาศ.....	74
ตารางที่ 6.9 แสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสาย XLPE ที่ HDF ค่าต่างๆ ที่เดินร้อยท่อใต้ดิน	75
ตารางที่ 6.10 แสดงค่า DERATING FACTOR ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับ กฟน.	76
ตารางที่ 6.11 แสดงค่าความสัมพันธ์ของกระแสในรูปต่อหน่วยและกำลังงานที่สูญเสียที่ฮาร์โมนิกส์ ลำดับต่างๆ	77
ตารางที่ 6.12 แสดงขนาดกระแสของสายนิวทรอลและสายเส้นไฟของหม้อแปลงที่ขนาดพิกัดต่างๆ เปรียบกับมาตรฐานของ กฟน.	79
ตารางที่ 6.13 แสดงฮาร์โมนิกส์ของเร็คติไฟเออร์ควมเฟส.....	80
ตารางที่ 6.14 แสดงฮาร์โมนิกส์ของพีดับบิวเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบสตัทฟ.....	80
ตารางที่ 6.15 แสดงฮาร์โมนิกส์ของพีดับบิวเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบซ็อฟ.....	81
ตารางที่ 6.16 แสดงฮาร์โมนิกส์ของพีดับบิวเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบ สวิทซ์จิ่ง	81
ตารางที่ 6.17 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ของ STATIC VAR.....	82

ตารางที่ 6.18 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ของเตาหลอมอาร์คขณะเริ่มต้น.....	82
ตารางที่ 6.19 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ของเตาหลอมอาร์คขณะคงที่.....	83
ตารางที่ 6.20 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์.....	83
ตารางที่ 6.21 แสดงผลการคำนวณ HDF สำหรับบนอนลิเนียร์ โหลดประเภทต่างๆ.....	84
ตารางที่ 6.22 แสดงผลการคำนวณ HDF จากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ในการออกแบบระบบกำลังไฟฟ้า นับเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่จะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบเพื่อให้มีความปลอดภัย และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงนับเป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้ออกแบบจะต้องมีความพิถีพิถันต่อการออกแบบ และ สิ่งหนึ่งที่นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณา ก็คือค่ากระแสในสายเคเบิล

การคำนวณขนาดสายเคเบิลในงานระบบไฟฟ้าในปัจจุบันนี้ มักจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะในระบบ 3 เฟส 4 สาย แม้ว่าจะมีโหลดทั้ง 3 เฟส สมดุลย์ก็ตามสายนิวทรัลจะมีกระแสไหลเนื่องมาจากกระแสฮาร์โมนิกส์เลขคี่ที่เป็นพหุคูณของ 3 (Triple Harmonic) จะมีลำดับเฟสเป็นศูนย์ (Zero sequence) กระแสของทั้ง 3 เฟสจะมีขนาดและมุมเฟสเหมือนกัน ดังนั้นผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟสในสายนิวทรัลจะเสริมกันโดยมีขนาดเป็น 3 เท่าของแต่ละเฟส เมื่อรวมกับกระแสฮาร์โมนิกส์เลขคี่ลำดับอื่นๆ จะมีบางส่วนเสริมและหักล้างกัน กระแสในสายนิวทรัลจากอาจมีขนาดตั้งแต่ 1.73 – 3 เท่าของกระแสเฟสทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของมุมเฟสแต่ละฮาร์โมนิกส์กระแสที่ไหลผ่านตัวนำของสายเคเบิลจะก่อให้เกิดความร้อนในตัวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มของอุณหภูมิตามมาถ้าสายเคเบิลมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไม่ดีพอ จิตความสามารถในการรับปริมาณกระแสของสายเคเบิลจะลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากในการคำนวณขนาดสายเคเบิลเพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของโหลด ซึ่งจะนำมาสู่ความปลอดภัยของผู้ที่เกี่ยวข้องและอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบรวมทั้งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการดูแลซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.1.1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่ากระแสพิกัดในสายเคเบิล โดยคำนึงถึง ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์
- 1.1.2. คำนวณหาค่า Harmonic Derating Factor (HDF) และขนาดกระแสพิกัดของสายเคเบิลเมื่อมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นได้
- 1.1.3. สามารถประยุกต์โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณไปช่วยในการเลือกขนาดสายเคเบิลที่จะนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมกว่าวิธีการเดิมซึ่งไม่ได้คำนึงในเรื่องกระแสฮาร์โมนิกส์ในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงาน

ในเรื่องการคำนวณหาค่าพิกัดกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงถึงผลกระทบของฮาร์โมนิก (Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics) เราจะ ศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่า Harmonic Derating Factor โดยจะพิจารณาสาย THW NYY และ XLPE ในระบบแรงดันต่ำ (ไม่เกิน 1 kV) โดยวางรูปแบบการติดตั้งออกเป็น เดินลอยในอากาศ เดินร้อยท่อในอากาศ เดินร้อยท่อใต้ดิน และ เดินใน Cable tray การคำนวณจะเป็นการคำนวณเพื่อหาพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านตัวนำ และเป็น การคำนวณหาขนาดของสายเคเบิลที่ต้องเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะสามารถรองรับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นได้



บทที่ 2

ความรู้เกี่ยวกับสายเคเบิล

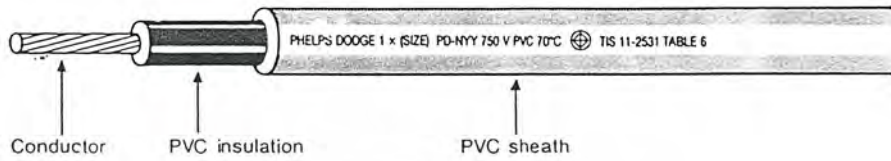
สายไฟฟ้ามีหน้าที่สำหรับนำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในปัจจุบัน ได้มีผู้ผลิตสายไฟฟ้าขึ้นมากมายหลายชนิด ตามความต้องการสำหรับการติดตั้งในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสายชนิดหนึ่งๆ อาจจะเหมาะกับลักษณะการติดตั้งแบบหนึ่งๆ โดยเฉพาะหรือใช้ ได้ทั่วไป ทั้งนี้ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงสร้างส่วนประกอบของสายไฟชนิดนั้นๆ เป็นสำคัญ ดังนั้นการเลือกใช้สายไฟฟ้าเพื่อให้มีความเหมาะสม ปลอดภัย ประหยัดและเชื่อถือได้ จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลายประการด้วยกัน ได้แก่ ความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง ความสามารถในการนำกระแสของตัวนำ ขนาดแรงดันตกที่เกิดขึ้น ความสามารถในการทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งในขณะที่ใช้งานปกติและขนาดเกิดการลัดวงจร

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างส่วนประกอบของสายในระดับแรงดันต่ำรวมถึงคุณสมบัติ และหน้าที่ของส่วนประกอบเหล่านั้นไว้เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาค้นคว้าสำหรับผู้สนใจต่อไป

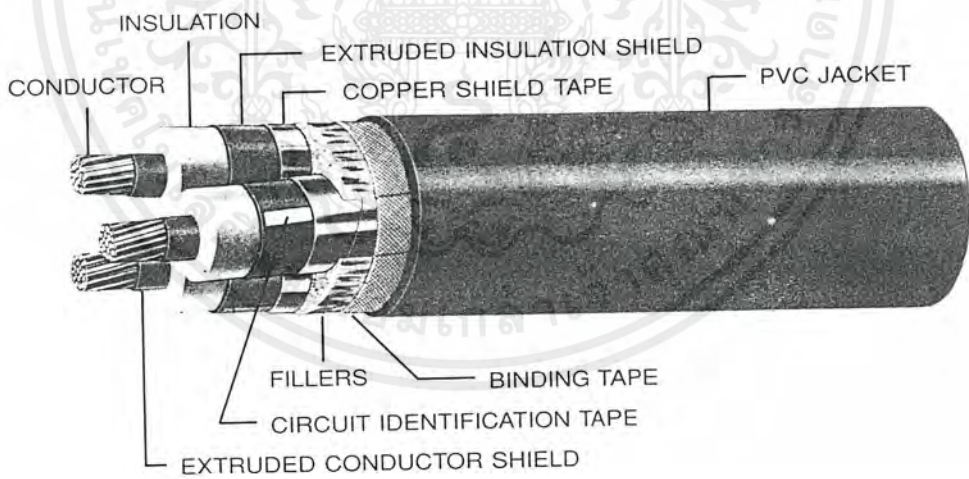
2.1 ส่วนประกอบหลักของสายเคเบิล

โดยทั่วไป สายเคเบิลจะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. ตัวนำ (Conductor) ทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี
2. ฉนวน (Insulation) มีมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันกระแสรั่วไหล
3. Shield ใช้เพื่อป้องกันการรบกวนของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก และ คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายตัวนำเอง เมื่อมีค่ากระแสสูงๆ ไหลผ่าน ดังนั้นถ้ามีกระแสน้อยเช่น ในสายระดับแรงดันต่ำ อาจจะไม่จำเป็นต้องมี Shield ก็ได้ เพราะมีผลจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มากนัก และยังทำให้ประหยัดได้อีกด้วย
4. Jacketing Sheating และ Armoring ทั้งสามชนิดนี้มีความใกล้เคียงกันมาก มีไว้เพื่อป้องกันสายจากสภาพการณ์ภายนอกต่างเช่น ด้าน Mechanical Thermal และ Chemical ตัวอย่างโครงสร้างส่วนประกอบของสายในระดับแรงดันต่ำและแรงดันปานกลางแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงต่ำ



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ตัวนำ (Conductors)

ตัวนำมีหน้าที่เป็นสื่อกลางเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยสะดวกที่สุด ดังนั้นตัวนำจึงต้องทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี (High Conductivity) ซึ่งโลหะที่สามารถนำมาใช้ได้มีหลาย ชนิด แต่ปัจจุบันที่ได้รับความนิยมมี 2 ชนิดคือ

ทองแดง

เป็นโลหะที่มี การนำไฟฟ้าที่ดีกว่าอลูมิเนียม ดังนั้นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมจะมีค่าน้อยกว่า มีความแข็งแรง เหนียวทนต่อการกัดกร่อน ได้ดี แต่มีข้อเสียอยู่คือเป็นโลหะที่มีน้ำหนักมาก และมีราคาสูง จึงไม่เหมาะสำหรับงานด้านแรงดันสูง แต่จะเหมาะกับการใช้งานทั่วไปโดยเฉพาะในอาคาร

อลูมิเนียม

เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีค่าความต้านทานเท่ากันแล้ว ตัวนำที่ทำมาจากอลูมิเนียมจะมีน้ำหนัก เบาและถูกกว่า จึงเหมาะกับการใช้งานเดินสายไฟนอกอาคารและแรงดันสูง ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำที่ทำมาจากอลูมิเนียมจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวนำที่ทำมาจากทองแดงมาก ซึ่งผลดีที่เห็นได้ชัดคือจะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) รอบผิวตัวนำจะน้อยลงที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน ดังนั้นจึงลดผลจากการเกิดโคโรน่า ซึ่งเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบ และยังก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร โทรคมนาคมอีกด้วย อลูมิเนียมถ้าทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดออกไซด์ของอลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนฟิล์มบาง ๆ เกาะตามผิวช่วยป้องกันการสึกกร่อนแต่จะมีข้อเสียคือ ทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

ตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความนำของโลหะชนิดต่าง ๆ และ แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงกับอลูมิเนียม ตามลำดับ

Metal	Relative electrical
	Conductivity (Copper = 100)
Silver	106.3
Copper	100
Gold	73.8
Aluminum	61.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sodium	35.4
Zinc	29
Iron	17.2
Tin	15
Lead	7.9

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่าความนำของโลหะชนิดต่าง ๆ

คุณสมบัติเชิงเปรียบเทียบ	ทองแดง	อลูมิเนียม
อัตราส่วนความนำไฟฟ้า(พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1.0	0.60
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด(ความต้านทานเท่ากัน)	1.0	1.66
อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง(ความต้านทานเท่ากัน)	1.0	1.29
อัตราส่วนน้ำหนัก(พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน)	1.0	0.30
อัตราส่วนน้ำหนัก(ความต้านทานเท่ากัน)	1.0	0.60

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของทองแดงกับอลูมิเนียม

2.3 ฉนวน (Insulation)

ฉนวนมีหน้าที่หลักคือ ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่ว (Leakage Current) โดยฉนวนที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) สูง
2. มีค่าความต้านทานจำเพาะ (Insulation Resistance) สูง
3. มีค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) ต่ำ
4. มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ต่ำ
5. มีค่าคงตัวประกอบการสูญเสีย ($\tan \delta$) ต่ำ

ฉนวนทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำ เพื่อเป็นการป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวนำ หรือระหว่างตัวนำกับพื้นดินและเพื่อป้องกันตัวนำจากผลกระทบทางกลและทางเคมีต่าง ๆ ในระหว่างที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้าจะเกิดพลังงานสูญเสียในรูปของความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อฉนวน ความสามารถในการทนต่อความร้อนของฉนวน จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนต่อความร้อนของสายไฟนั่นเอง การเลือกใช้ฉนวนจะขึ้นกับความร้อนที่ใช้งาน ระดับแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง วัสดุที่นิยมใช้เป็นฉนวนมากที่สุดในขณะนี้คือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE)

ฉนวนที่ใช้ในสายเคเบิล แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ของแข็ง ได้แก่ สารโพลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ
2. ของเหลว ได้แก่ Oil base มีลักษณะเช่นเดียวกันกับน้ำมันของหม้อแปลง
3. ก๊าซ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) SF_6 เป็นต้น

2.3.1 ฉนวนที่เป็นของแข็ง

(ในที่นี้คือ สารโพลิเมอร์) โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติก (Plastic) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) หรือ ยาง (Rubber) พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. Thermo Plastic

หมายถึง พลาสติกที่สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อน เมื่อเย็นจะ แข็งตัวและสามารถนำกลับมาหลอมเหลวใช้ใหม่ได้อีก ได้แก่ Polyvinyl Chloride (PVC) Polyethylene (PE)

1.1 Polyvinyl Chloride (PVC)

เป็นวัสดุที่ได้มาจากการสังเคราะห์ Vinyl Acetate และกลุ่ม Copolymer ของ Polyvinyl Chloride มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่นมีความทนทานต่อความชื้น, ความเย็น ความร้อน เปลวไฟ สารละลาย น้ำมัน สารเคมี ก๊าซโอโซน เหมาะสำหรับระบบส่งจ่ายด้วยระดับแรงดันต่ำ (น้อยกว่า 1kV) และ แรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส ลักษณะงานที่เหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ได้ เช่น สายไฟสำหรับไฟแสงสว่าง, สายที่ใช้ในงานควบคุม

1.2 Polyethylene(PE)

เป็นสารสังเคราะห์ที่ได้จากขบวนการผลิต แบบ Polymerization โดยมี Ethylene เป็น Monomer ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ ชนิด LDPE (Low Density Polyethylene) และ HDPE (High Density Polyethylene) Polyethylene มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ มีค่าคงตัว ประกอบการสูญเสีย ($\tan\delta$) ต่ำ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ต่ำ ขณะที่ค่าความนำความร้อน (Thermal Conductivity) มีค่าสูงมาก นอกจากนี้ยังมีความทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทานต่อความชื้น การขูดขีด แสงแดด สารเคมี เปลวไฟ และมีความยืดหยุ่นสูง สามารถโค้งงอได้แม้ที่อุณหภูมิปกติการที่เราใช้งานคือ 70-80 องศาเซลเซียส ลักษณะงานที่นำไปใช้มีหลายประเภท เช่น ใช้เป็นฉนวนในสายโทรศัพท์ สายสัญญาณ สายควบคุม สายเคเบิลที่ระดับแรงดันปานกลาง(ปัจจุบันมีขีดจำกัดการใช้งานอยู่ที่ระดับ 5 kV)

2. Thermosetting Plastics

เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก จึงไม่สามารถนำ กลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ มีข้อดีคือ ทนความร้อนสูงๆ ได้ มีความอยู่ตัวสูงไม่เสีย รูป มีรูปร่างแน่นอน น้ำหนักเบา เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี สารที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลได้แก่ Cross-Link Poly Ethylene(XLPE) และ Ethylene Propylene Rubber(EPR)

2.1 cross-link polyethylene (XLPE)

เป็นเทอร์โมเซตชนิดหนึ่ง มีขบวนการผลิต 2 วิธีคือ วิธีแรกเรียกว่า " Electron Irradiation " โดยจะทำการฉายรังสีที่มี High Energy Electron Beam ไปยัง Ethylene วิธีที่สองเรียกว่า " Chemical Cross Linking Process " เป็นการผลิตโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง Polyethylene กับ Organic Peroxide ภายใต้อุณหภูมิเมื่อเดิมสารบางอย่างลงไป ซึ่งจะทำให้ Cross - Link Polyethylene มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น ระดับอุณหภูมิที่สภาวะปกติในการทำงานคือ 90 องศาเซลเซียส และในกรณีัดดวงจรสามารถทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น ระดับอุณหภูมิที่สภาวะปกติในการทำงานคือ 90 องศาเซลเซียส และ ในกรณีัดดวงจรสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.3

Cable Dielectric	Max $\theta^{\circ}\text{c}$ Continuous operation	Max $\theta^{\circ}\text{c}$ Short-circuit operation
Impregnate paper	65-80	160-250
P.V.C	70	150-160
P.E(low density)	70	120
P.E(high density)	80	160
X.L.P.E	90	250

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิขณะทำงานของ Cable Dielectric ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Ethylene Propylene Rubber(EPR)

ได้จากการผสมระหว่าง Ethylene กับ Propylene ซึ่งคล้ายกับวิธีของ XLPE มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อก๊าซโอโซน ลักษณะสภาพอากาศแบบต่างๆ มีความต้านทานความร้อนต่ำ อีกทั้งมีคุณสมบัติที่ดีในเรื่องความยืดหยุ่น จึงถูกนำไปใช้ในระดับแรงดันปานกลาง (น้อยกว่า 35 kV) ส่วนอุณหภูมิทำงานในสภาวะปกติเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส และ ในกรณีลัดวงจรสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 250 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับ XLPE

ส่วนคุณสมบัติที่สำคัญของฉนวนพลาสติกทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมา แสดงดังตารางที่ 2.4

Insulation	P.V.C	P.E		X.L.P.E	E.P.R	Impregnated Paper
		HDPE	LDPE			
Density (kg.m ⁻³)	1400	900	900	900	1200	1250
Thermal resistivity (°Cm W ⁻¹)	6.0	3.0	3.5	3.5	5.0	5.0 – 6.0
Relative permittivity (εr)	8.0	2.3	2.3	2.5	3.3	3.5
Tangent of dielectric Loss angle, tan δ	100 x10 ⁻³	4 x10 ⁻⁴	4 x10 ⁻⁴	4 x10 ⁻⁴	4 x10 ⁻³	2 x10 ⁻³

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของ cable dielectric ชนิดต่าง ๆ

Elastomer หรือ Rubber เป็น โพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดได้เมื่อมีแรงมากระทำ และจะกลับคืนสภาพเดิมเมื่อปลอดจากแรงที่กระทำ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ยางธรรมชาติ เมื่อทำให้เกิด Cross-Linked ขึ้นเป็นโมเลกุล ทำให้ยางแข็งตัวด้วยการเติมกำมะถัน หรือตะกั่วคาร์บอนเตตแล้วให้ความร้อนเรียกว่า Vulcanizing Rubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ยางสังเคราะห์ เช่น Syrene – Butadiene rubber (SBR) จะมีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ ดูดน้ำมัน

อย่างไรก็ตามพลาสติกชนิด Elastomer หรือ Rubber นี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิล

2.3.2 ฉนวนที่เป็นของเหลว

Oil base เป็นฉนวนที่รู้จักใช้กันมานานแล้ว มีส่วนผสมพื้นฐานเป็นน้ำมันพืชผสมกับกำมะถัน และยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ฉนวนประเภทนี้มีความคงทนต่อก๊าซโอโซน และไม่เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) มีเสถียรภาพทางไฟฟ้าสูง, มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) สูงด้วยคุณสมบัติที่ดีเช่นนี้ทำให้สามารถใช้ได้กับระดับแรงดันสูง ๆ และถ้าหากนำไปใช้ประกอบกับฉนวนอื่นๆ เช่นกระดาษ (Oil Impregnated Paper) จะสามารถใช้ได้กับแรงดันที่สูงเป็นพิเศษได้ ปัจจุบันฉนวนชนิดนี้ได้พัฒนามาใช้กับอุปกรณ์ใหม่ๆ ในระบบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า Circuit Breaker(CB)

2.3.3 ฉนวนที่เป็นก๊าซ

ฉนวนชนิดนี้ถูกนำมาใช้กับระบบส่งใต้ดิน (Underground Power Lines) ก๊าซที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ ไนโตรเจน (N_2) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีมากมายเป็นต้นว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนดี เป็นต้น จึงสามารถใช้ได้กับระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นพิเศษ (Extra High Voltage)

2.4 Cable Shielding

การ Shield สายเคเบิล มีวัตถุประสงค์เพื่อจำกัดหรือควบคุมสนามไฟฟ้าของฉนวนหรือตัวนำโดยจะใช้ตัวกลางที่ต่อการต่อลงดินและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี การ Shield โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทาบโลหะหรือ drain wire โดยมักทำมาจากโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Non-magnetic metallic)

การ Shield สายเคเบิลจะ Shield ทั้งรอบตัวนำ (Conductor Shield) และรอบฉนวน (Insulation Shield) โดยมีพื้นฐานคือ

1. เพื่อรักษารูปร่างการกระจายของสนามไฟฟ้า ในเนื้อฉนวนให้เป็นรูปการกระจายทางรัศมีที่สมมาตร (symmetrical radial stress distribution)
2. เพื่อปกป้องสารแรงดันเหนี่ยวนำ หรือจำกัดสนามแม่เหล็ก, การแทรกสอดของสนามไฟฟ้าสถิตย์
3. ลดความรุนแรงของอันตรายที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรหรือรั่วลง ground และจำกัดความถี่สูงที่แพร่กระจายออกไป
4. ควบคุมค่าความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวยาวและผิวสัมผัสให้อยู่ในค่าที่ปลอดภัย เพื่อป้องกันการ discharge บนผิวฉนวน

2.5 Jacketing, Sheating และ Armoring

Jacketing Sheating และ Armoring ทำหน้าที่คล้ายๆ กันคือ ป้องกันอันตรายต่างๆ ที่จะเกิดกับสายไม่ว่าจะเป็นด้าน Mechanical Thermal หรือ Chemical

Jacketing

โดยทั่วไปทำมาจากพลาสติก ได้แก่ Polyvinyl chloride (PVC) Polyethylene (PE) Nylon Hypalon (CSPE) โดย PVC PE Nylon จะเป็นเทอร์โมพลาสติก ส่วน CSPE จะเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต

Sheating

ตะกั่ว คือวัสดุชนิดแรกที่น่ามาใช้ทำ Sheating มีประสิทธิภาพดีมากในการป้องกันความชื้น ตลอดจนความยาวของสายเคเบิล แต่มีข้อเสียคือ มีน้ำหนักมาก ปัจจุบันได้มาใช้อลูมิเนียมแทนเพราะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีกว่า สามารถทำให้มีความหนาตามที่ต้องการได้ง่าย และมีการเชื่อมต่อที่ดี

Armoring

ที่เรานิยมใช้มี 3 ชนิดคือ Interlocked Flat Tape และ Round Wire ชนิดแรกคือ Interlocked มีลักษณะเป็นแถบโลหะบางขดเป็นเกลียวคล้ายกับตัว “S” ใช้พันรอบ ๆ สายเคเบิล โดยโลหะที่ใช้ทำคือ Galvanized และอลูมิเนียม ชนิดที่สองคือ Flat tape จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะคล้ายกับชนิดแรกโดยใช้พันทับ (Over Lap) กันไปเรื่อย ๆ รอบสายเคเบิลชนิดนี้มีความยืดหยุ่นกว่าชนิดแรก ชนิดที่สาม Round Wire มีลักษณะคล้ายเอาตัวนำเส้นเดี่ยวเล็กๆ (Wire) มาจับเรียงกันรอบๆ สายเคเบิลโลหะที่ใช้ทำคือ Galvanized Steel

2.6 ตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ในระดับแรงดันสูงและระดับแรงดันต่ำ

2.6.1 สายไฟแรงสูง

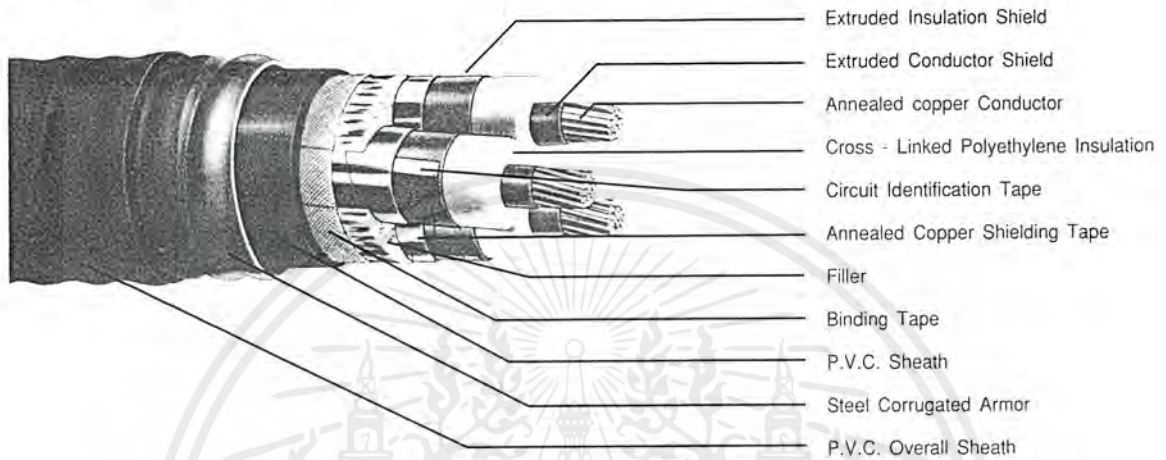
สาย Cross Linked Polyethylene (XLPE)

สาย XLPE จัดเป็นสาย Fully Insulated โดยมีโครงสร้างและส่วนประกอบดังแสดงในรูป 2.3

- ตัวนำ (Conductor) ส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงในลักษณะตีเกลียว (Strand) ซึ่งอาจจะจัดอยู่ในรูปแบบของ Copper Concentric Strand
- ชีลด์ของตัวนำ (Conductor Shield) ทำด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semi-Conducting Material) มีหน้าที่ช่วยให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนกระจายอย่างสม่ำเสมอในแนวรัศมี เป็นการช่วยลดการเกิด Breakdown ได้
- ฉนวน (Insulation) เป็นชั้นที่หุ้มห่อชั้นชีลด์ของตัวนำอีกทีหนึ่ง ทำด้วยฉนวน XLPE สายเคเบิลที่ดี นั้นผิวด้านนอกของชั้นฉนวนจะต้องเรียบ
- ชีลด์ของฉนวน (Insulation shield) เป็นชั้นของ Semi-Conducting Tape พันทับชั้นของฉนวนจาก นั้นจะหุ้มด้วยชั้นของ Copper Tape ชีลด์ของฉนวนจะทำหน้าที่จำกัดสนามไฟฟ้าให้อยู่เฉพาะภายใน สายเคเบิลเป็นการป้องกันการรบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อชีลด์ลงดินจะช่วยลดอันตราย จากการสัมผัสถูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายของแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน
- เปลือกนอก (Jacket) ชั้นของเปลือกนอกนี้อาจจะเป็น Polyvinyl Chloride หรือ Polyethylene ก็ได้แล้วแต่ว่าลักษณะของงานเป็นอย่างไร ถ้าเป็นงานกลางแจ้งก็มักจะใช้ Polyvinyl Chloride เพราะค่อนข้างเฉื่อยต่อการติดไฟขณะที่ Polyethylene มักใช้งานแบบเดินลอย เนื่องจากความทนทานต่อสภาพ ดินฟ้าอากาศ ส่วนในกรณีที่วางเคเบิลใต้ดินอาจมีชั้นของ Service Tape ซึ่งอาจจะทำด้วยชิ้นผ้า (Fabric Tape) คั่นระหว่างชีลด์และ เปลือกนอก ช่วยป้องกันการเสียดสีและการกระทบกระแทก

สายชนิดนี้สามารถเดินลอยในอากาศ หรือฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้ดี

18/30(36) KV-CV-YC



รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของสายแรงดันสูง XLPE

2.6.2 สายไฟแรงต่ำ

สายไฟฟ้าแรงต่ำเป็นสายไฟฟ้าที่ใช้ได้กับแรงดันไม่เกิน 750 Volt มีลักษณะเป็นสายไฟฟ้าหุ้มด้วยฉนวน โดยที่ตัวนำสำหรับสายไฟฟ้าชนิดนี้ อาจจะใช้ทองแดงหรืออลูมิเนียมเป็นตัวนำ แต่ที่นิยมใช้สำหรับสายไฟฟ้าแรงดันต่ำจะเป็นสายทองแดง สายไฟฟ้าขนาดใหญ่จะมีลักษณะตัวนำเป็นตัวนำตีเกลียว แต่ถ้าเป็นสายไฟฟ้าขนาดเล็ก ตัวนำก็จะเป็นตัวนำเดี่ยว วัสดุฉนวนที่นิยมใช้กับสายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ได้แก่ Polvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene(XLPE)

สาย THW

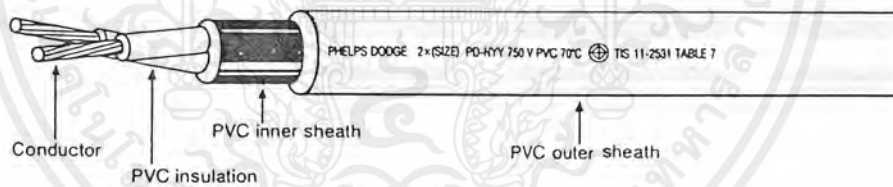
มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นสายกลมเดี่ยวตัวนำเป็นทองแดงหุ้มฉนวน PVC สามารถใช้ได้ทั้งในสถานที่แห้งและสถานที่เปียก โดยทั่วไปนิยมใช้สายชนิดนี้เป็นสายวงจรรย่อย สายป้อนและสายเมน ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของสายได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของสายแรงดันต่ำ THW

สาย NYY

เป็นสายที่มีฉนวน 2 ชั้น โดยฉนวน PVC ชั้นในทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มตัวนำเอาไว้ แล้วจะมีฉนวน PVC ชั้นนอกอีกชั้นหนึ่งทำหน้าที่เป็นเปลือก (Sheath) ซึ่งสามารถทนความชื้นได้สูง สายชนิดนี้จึงสามารถฝังดินได้โดยตรง ส่วนประกอบของสายแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของสายแรงดันต่ำ NYY

2.7 การพิจารณาเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการพิจารณาเลือกสายไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นมีหลายเรื่องด้วยกันที่เราต้องพิจารณาซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพความเชื่อถือได้และมีความปลอดภัยในการเลือกสายไฟฟ้าได้แก่

1. พิกัดแรงดัน (Voltage Rating)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พิกัดกระแส (Current Rating) คือ ความสามารถของสายไฟฟ้าในการที่จะนำกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งอย่างต่อเนื่องในภาวะการใช้งาน โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายมีค่าเกินอุณหภูมิที่กำหนดไว้
3. แรงดันตก (Voltage Drop)
4. สายควบ (Multiple Conductor)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

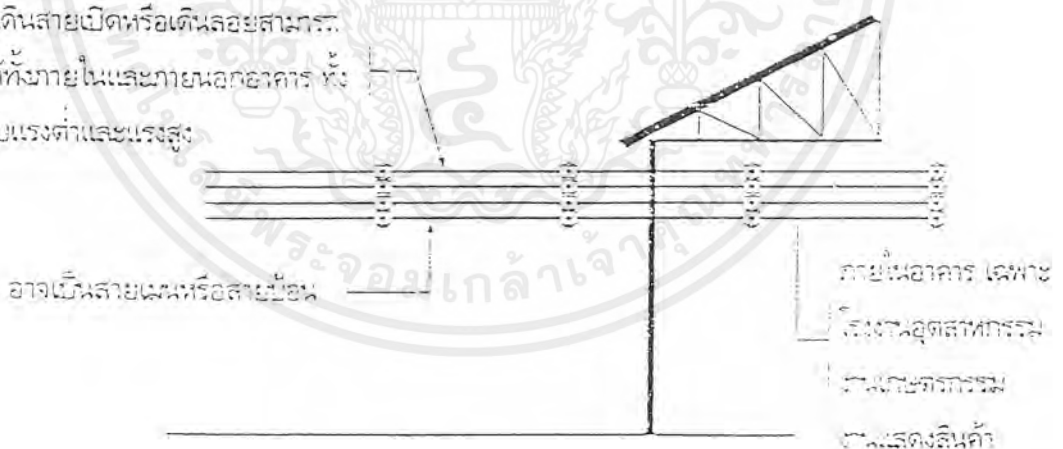
การติดตั้งสายเคเบิล

การเดินทางสายเคเบิลเพื่อไปยังโหลดต่าง ๆ นั้น จะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ จำเป็นจะต้องมีวิธีการเดินสายที่เหมาะสม คือ มีการป้องกันไม่ให้ฉนวนและตัวนำของสายเคเบิลเสียหายจากแรงกระแทกทางกลหรือจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ซึ่งรูปแบบของการติดตั้งสายเคเบิลนั้น สามารถจำแนกได้เป็น 4 รูปแบบดังนี้

3.1 การติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้ง

การติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้ง หมายถึง การติดตั้งสายเคเบิลนอกตัวอาคารหรือภายในตัวอาคารอาจเป็นติดตั้งพาดบนเสาไฟฟ้า เช่นเดียวกับการติดตั้งสายเปลือย หรือติดตั้งให้ยึดติดกับผนังอาคารวางบนพื้นหรือติดตั้งบนรางสายเคเบิล เป็นต้น ดังนั้นการติดตั้งสายเคเบิลในที่แจ้งจึงมีอากาศเป็นตัวกลางปกคลุมอยู่รอบนอกสายเคเบิล

การเดินทางสายเคเบิลหรือเดินลอยสามารถใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ทั้งระบบแรงต่ำและแรงสูง



รูปที่ 3.1 การเดินสายเคเบิลในที่แจ้ง(เดินสายเปิดหรือเดินลอย)

3.2 การติดตั้งสายเคเบิลโดยการร้อยท่อสายไฟ (Duct หรือ Conduit)

การติดตั้งสายเคเบิลวิธีนี้จะต้องเลือกขนาดของ duct หรือ conduit โดยการพิจารณาจากหลักการพื้นฐานเปอร์เซ็นต์ในการแก้ปัญหาที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการลากดึงสายเคเบิล ซึ่งทำให้ต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาถึงจำนวนเนื้อค้ำน้ำหนักทั้งหมดที่มีอยู่ในท่อ นอกจากนั้นรัศมีของท่อร้อยสายไฟมาตรฐานและความโค้งงอของทางเดินสายก็เป็นสิ่งจำเป็นหรือรัศมีในการโค้งงอด้านในต่ำสุด ก็จะมีผลซึ่งต้องพิจารณาด้วย โดยท่อที่ใช้จะแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ท่อโลหะและท่อโลหะ ดังนี้

3.2.1 ท่อโลหะ(nonmetallic conduit)

ท่อชนิดนี้จะทำมาจากวัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนและการกระแทกได้ ลักษณะของท่อชนิดนี้อาจจะฝังดินหรือเดินลอยในอากาศก็ได้ โดยปกติท่อชนิดนี้จะมียูด้วยกันดังนี้คือ

1. ไฟเบอร์(fiber)
2. ท่อซีเมนต์แอสเบสตอส(asbestos cement) มีความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อนไม่เป็นสนิมและไม่ติดไฟ โดยมากจะใช้เป็นท่อเดินสายไฟใต้ดิน
3. ท่อพีวีซี (Rigid polyvinyl chloride (PVC))
4. High density polyethylene
5. Rigid polyvinyl (PV)

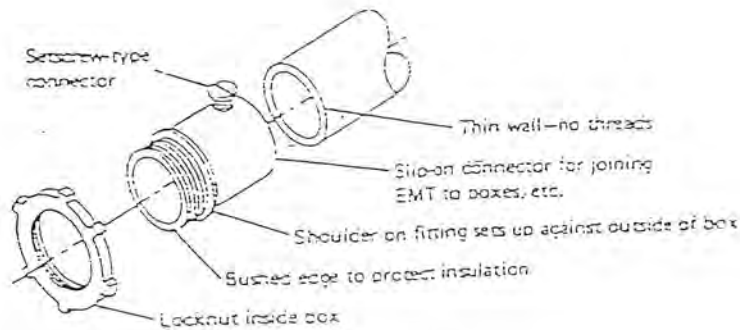
ส่วนใหญ่นิยมใช้ท่อ PVC และ fiber เพราะการโค้งงอหรือการหักมุมทำได้ง่าย

3.2.2 ท่อโลหะ(Metal conduit)

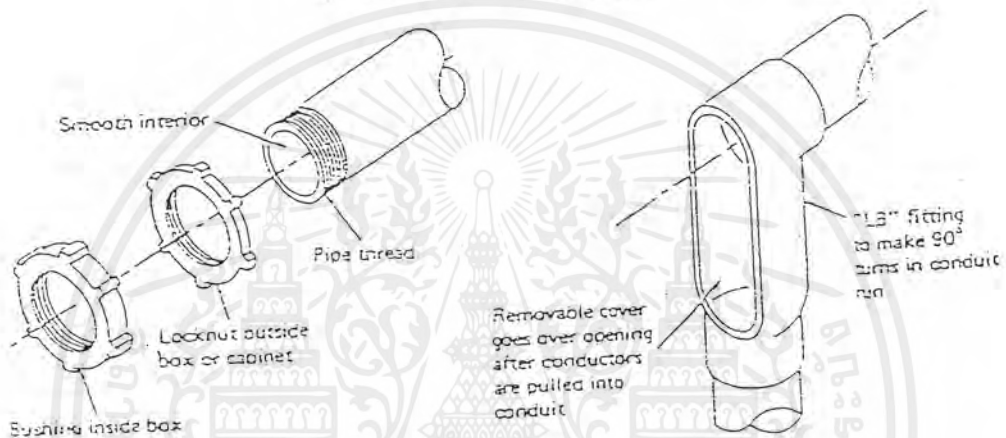
เป็นท่อทำมาจากโลหะผสมบางครั้งจะเคลือบสังกะสีเอาไว้ด้วยเพื่อป้องกันสนิม แบ่งออกเป็น

1. ท่อโลหะหนา (Rigid Metal Conduit)
2. ท่อโลหะหนานปานกลาง (Intermediate Metal Conduit)
3. ท่อโลหะบาง (Electrical Metallic Tubing)
4. ท่อโลหะอ่อน (Flexible Metal Conduit)

สำหรับชนิดที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ ชนิดท่อโลหะหนานปานกลาง (IMC) และชนิดท่อโลหะบาง (EMT) โดยการต่อท่อ EMT และท่อ RMC จะแสดงดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แสดงการต่อท่อ EMT

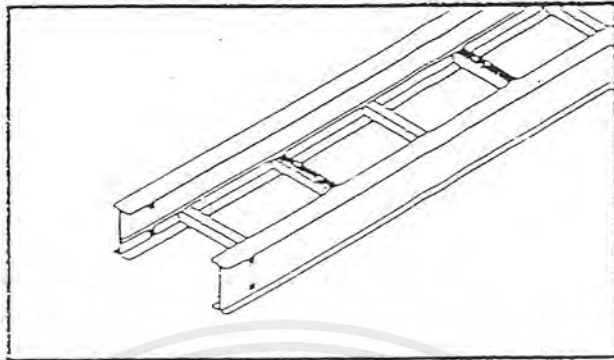


รูปที่ 3.3 แสดงการต่อท่อ RMC

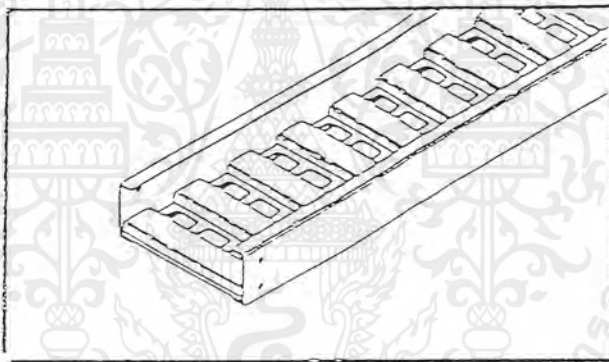
3.3 การเดินสายบนรางเดินสาย (Race Way)

รางเดินสายที่ใช้จะเป็น cable trays หรือ cable ladders เป็นลักษณะ ของสิ่งทีรองรับ หรือห่อหุ้มสายเคเบิลเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับสายเคเบิลดังกล่าว โดย cable trays และ cable ladders ทำมาจาก โลหะหรือพลาสติก สามารถแขวนหรือวางก็ได้ ในกรณีที่ทำกรติดตั้ง cable trays หรือ cable ladders ถูกต้องแล้วก็สามารถร้อยสายเคเบิลลงไปได้เลย นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานได้ ทุกสถานที่ ดังนั้น สายเคเบิลที่มีจำนวนมากจะต้องทำการจัดวางให้เหมาะสมตามสถานที่ นอกจากนี้ในกรณีที่มีการโค้งตรงมุมหรือต่อ cable trays จะมีอุปกรณ์ที่ช่วยทำงานในลักษณะดังกล่าว โดยทำเป็นชิ้นสำเร็จรูปขึ้นมา ตัวอย่างของ cable trays ชนิดต่างๆ นั้นแสดงดังรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ

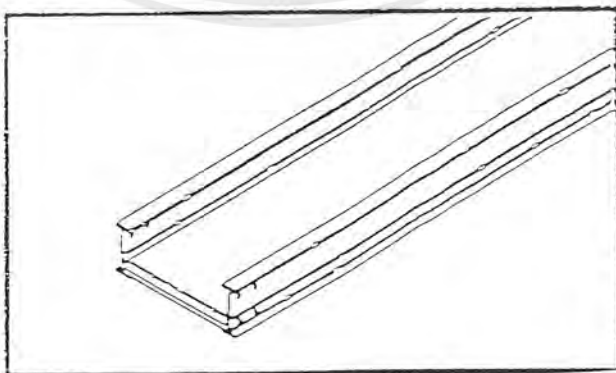
ข้อดีประการหนึ่งของการใช้รางเคเบิลก็คือ สามารถเพิ่ม เคลื่อนย้าย เปลี่ยนแปลงสายไฟฟ้า ได้โดยสะดวก ในการวางสายมักจะเผื่อที่ไว้สำหรับการขยายในอนาคตด้วย รูปที่ 3.7 จะแสดงถึงการติดตั้งรางวางสายชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังแสดงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้



รูปที่ 3.4 รางเคเบิลแบบบันได (Ladder Type)

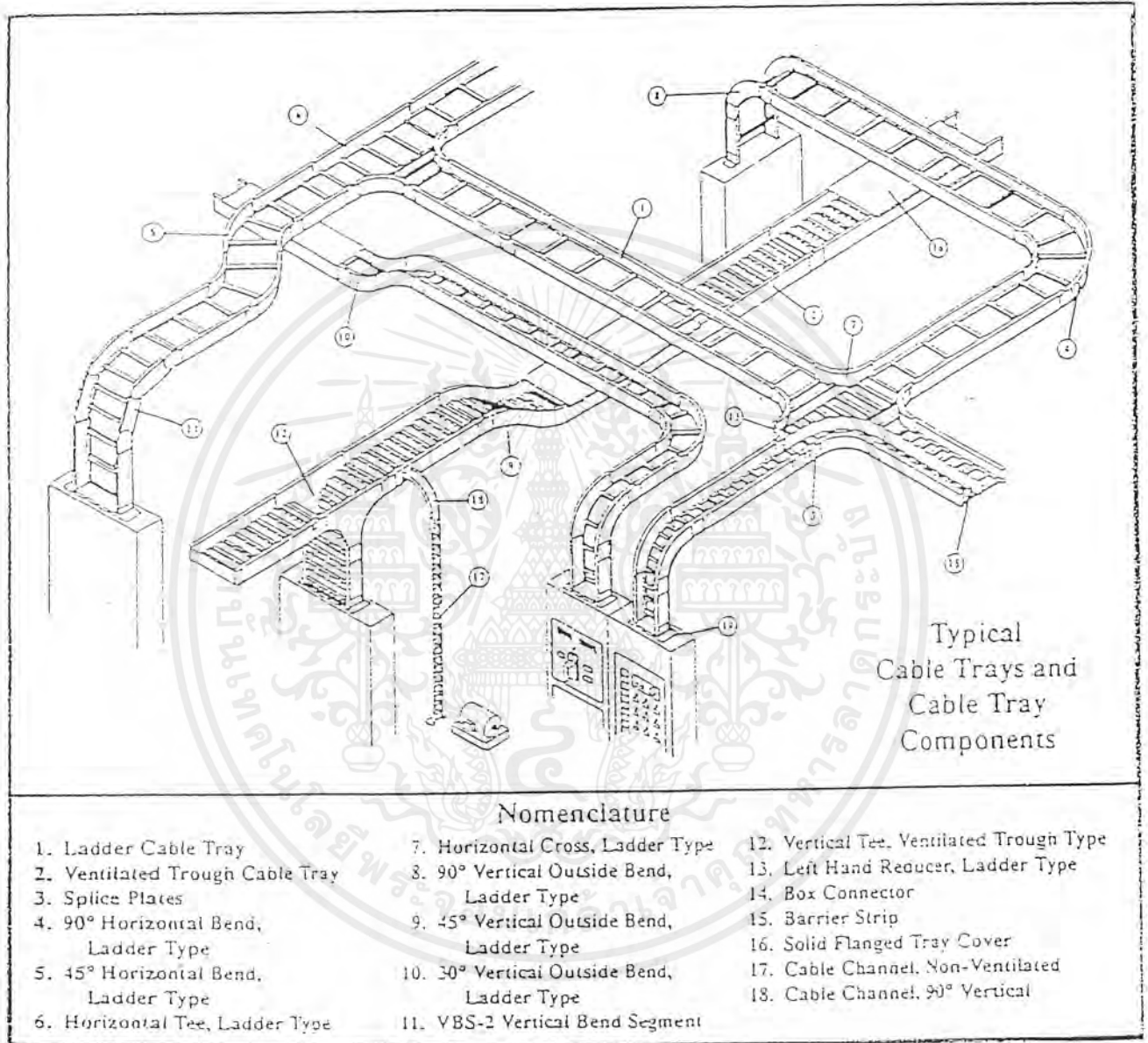


รูปที่ 3.5 รางเคเบิลแบบมีช่องระบายอากาศ (Channel Type)



รูปที่ 3.6 รางเคเบิลแบบค้ำด้านล่างทึบ (Solid – Bottom Type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รางเคเบิล

3.4 การติดตั้งสายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cables)

ในปัจจุบันการเดินสายโดยติดตั้งใต้ดินเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยเฉพาะการจ่ายไฟให้กับอาคารขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งใต้ดินใช้พื้นที่น้อย มีความเชื่อถือได้สูง และมีความสวยงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาม โดยสายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการติดตั้งใต้ดินจะเป็นชนิดมีเปลือก (Jacket) มีความแข็งแรง สามารถป้องกันแรงทางกลและ กันความชื้นได้ การเดินสายเคเบิล ใต้ดินที่นิยมใช้มี 2 วิธีดังนี้

3.4.1 การเดินสายฝังดินโดยตรง (Direct burial)

วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการเดินในท่อคือ มีการลงทุนที่ต่ำกว่าและยังสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่า เพราะว่าสายสัมผัสกับดินโดยตรงจึงสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่า แต่โดยทั่วไปไม่ค่อยนิยมเพราะว่าการบำรุงรักษาเคเบิลทำได้ยากหากเกิดลัดวงจรขึ้นดังนั้น จะใช้ในบางกรณีเท่านั้น เช่น การเดินสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine cable) เป็นต้น

3.4.2 การเดินสายในแผงท่อใต้ดิน (Duck Bank)

การเดินสายด้วยวิธีนี้จะต้องใช้ท่อร้อยสายและบ่อพักสาย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ชนิดของท่อร้อยสายท่อร้อยสายในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน คือ

1. ท่อใยหิน (Asbestos Cement Conduct)

มีคุณสมบัติเปราะและแตกง่าย การก่อสร้างจึงต้องหุ้มด้วยคอนกรีตอีกชั้นหนึ่ง แต่ท่อชนิดนี้มีราคาถูกและระบายความร้อนได้ดีจึงได้รับความนิยมมากที่สุด

2. ท่อเหล็กหนา (Rigid Steel Conduit)

เป็นท่อออบสังกะสี ที่มีคุณสมบัติทนต่อแรงกดและแรงกระแทกได้ดี นอกจากนี้ยังระบายความร้อนได้ดีด้วย แต่มีราคาแพง ถ้าใช้ฝังใต้ดินจะมีอายุการใช้งานสั้นกว่าท่อใยหินดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นท่อต่อเหนือดินสำหรับทำสายขึ้น (Riser) เท่านั้น แต่ท่อเหล็กก็มีข้อเสียคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในท่อและมีกระแสเอ็ดดี้ (Eddy Current) ไหลผ่านทำให้เกิดความร้อนขึ้น

3. ท่อโพลีเอทิลีน (High Density Polyethylene)

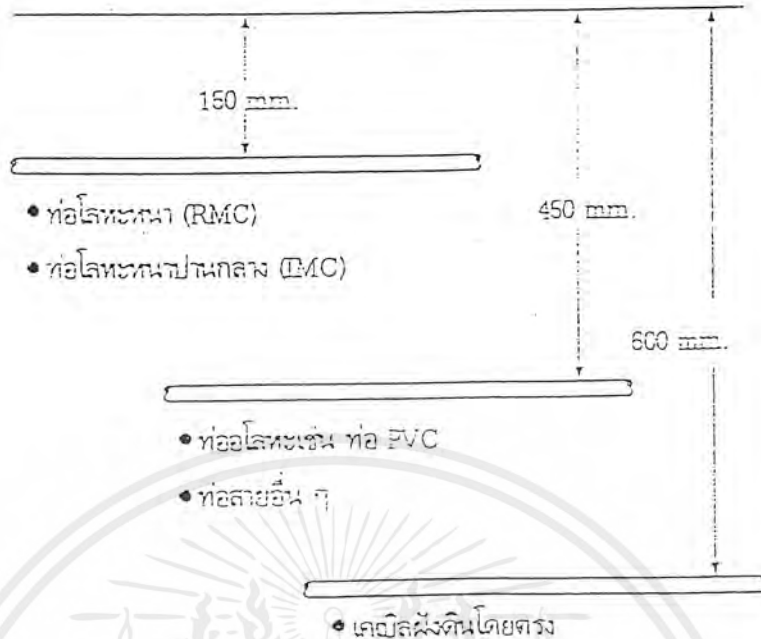
เป็นท่อที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดีแต่ทนต่อแรงดันกระแทกได้จำกัด ดังนั้นเหมาะที่จะเป็นท่อนำสายขึ้น ถ้าใช้เป็นท่อฝังดินจะต้องหุ้มด้วยคอนกรีตก่อน เนื่องจากโพลีเอทิลีนนั้นมีคุณสมบัติฉนวนไฟฟ้าทำให้ไม่เกิดกระแสเอ็ดดี้ จึงได้รับความนิยมมากที่สุดต่อท่อเหล็ก

ท่อร้อยสายใต้ดินที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ท่อไยหิน เพราะมีราคาถูกกว่าชนิดท่ออื่น ๆ และยังสามารถระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย การวางท่อร้อยสายจะวางเป็นเส้นตรง โดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดและมีอุปสรรคน้อยที่สุดเป็นเส้นทางการติดตั้ง ท่อทุกเส้นจะวางลาดไปยังบ่อพักสาย ความลาดประมาณ 5-10 องศา เพื่อป้องกันน้ำขังในท่อ การติดตั้งปกติจะมีมากกว่า 1 วงจร ดังนั้นจึงมีท่อใต้ดินอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อความเป็นระเบียบและสวยงามจึงนิยมเดินเป็นแผง ปกติแล้วในแผงวางท่อสำรองเดินเพื่อไว้สำหรับการขยายในอนาคต

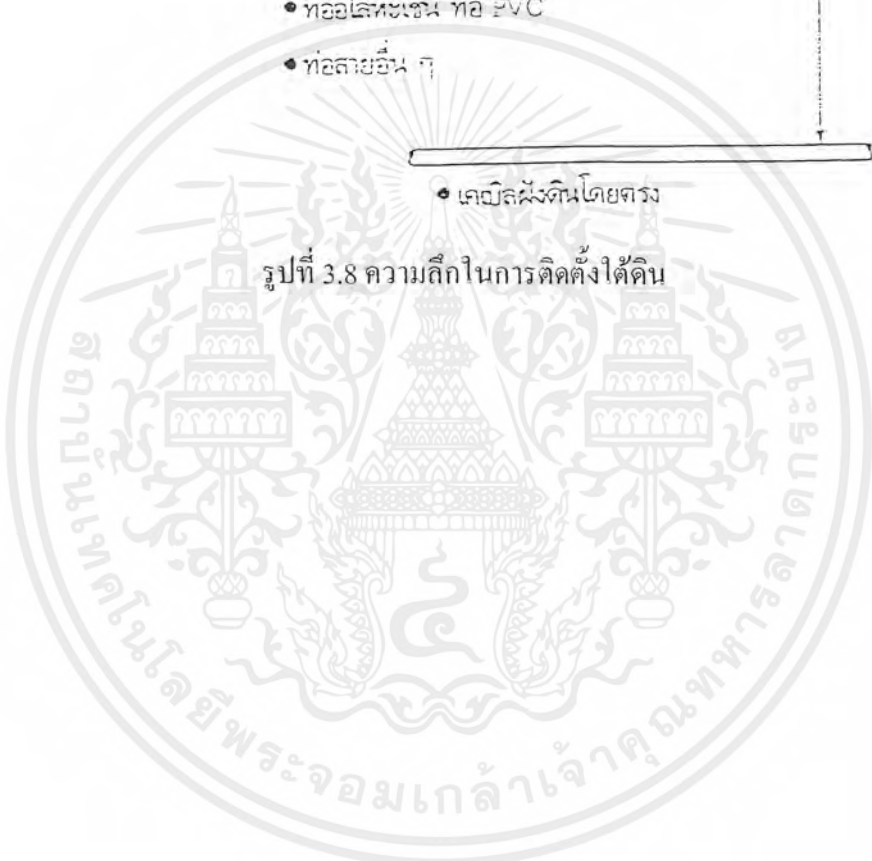
4. บ่อพักสาย

โดยทั่วไปแล้วบ่อพักสายนั้นจะมีทั้งบ่อขนาดใหญ่ (ManHold) และบ่อขนาดเล็ก (Hand hold) บ่อขนาดใหญ่บางครั้งเรียกว่าอุโมงค์พักสาย อย่างไรก็ตามบ่อทั้งสองชนิดสร้างเพื่อวัตถุประสงค์เดียวกันคือ อำนวยความสะดวกในการลากสายและหักเลี้ยว บ่อพักสายทั่ว ๆ ไป สร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กมีฝาปิดมิดชิด เนื่องจากอุโมงค์พักสายมีขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องสร้างขึ้น ในสถานที่ใช้งานเพราะมีน้ำหนักมาก แต่ถ้าเป็นบ่อขนาดเล็กนิยมหล่อสำเร็จรูปแล้วยกมาวางยังสถานที่ติดตั้งในภายหลัง ที่ก้นบ่อจะมีอ่าง (Samp) ซึ่งเป็นที่รวมของน้ำภายในบ่อและจะสูบออกเมื่อต้องการลงไปปฏิบัติงานในบ่อเท่านั้น ที่ผนังของบ่อพักสายจะมีอุปกรณ์จับยึดสายติดอยู่เป็นแผงและที่ก้นบ่อจะมีหลักดิน (Ground rod) ปักอยู่โดยใช้เป็นกราวด์ของระบบ ตามปกติท่อพักสายจะวางห่างกันประมาณ 150 ถึง 240 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้ระยะทางเป็นอุปสรรคในการลากสาย แต่ในพื้นที่บางแห่งที่เป็นจุดหักเลี้ยวก็อาจตั้งบ่อพักสายให้ชัดเจนได้ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการลากสาย

ในการติดตั้งใต้ดินสายเคเบิลหรือท่อสายที่ใช้จะต้องฝังลึกจากพื้น เพื่อเป็นการป้องกันการทำอันตรายต่อสายเคเบิลหรือท่อสายโดยบังเอิญ เช่น การขุดถนนเพื่อซ่อมแซมต่าง ๆ เพื่อเป็นการป้องกันยิ่งขึ้นสามารถสามารถใช้แผ่นคอนกรีตปิดทับอีกชั้นหนึ่งได้ โดยระยะความลึกต่ำที่สุดในการฝังดินตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านั้นแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความลึกในการติดตั้งใต้ดิน



บทที่ 4

ฮาร์โมนิกส์ สาเหตุ ผลกระทบ

4.1 สาเหตุของฮาร์โมนิกส์

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส 50 Hz ที่ผลิตจากโรงไฟฟ้า แรงดันและกระแสที่ได้ในสภาวะปกติเกือบจะเป็นคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz บริสุทธิ์ อะไรก็ตามที่เปลี่ยนรูปคลื่นนี้ไปจากเดิมจะก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์(ผลรวมของรูปคลื่นไซน์ของกระแสหรือแรงดันต่างๆ ที่มีความถี่เป็นผลคูณของค่าความถี่หลัก) ขึ้นนอนลิเนียร์โหลด (Nonlinear Load) จะกินกระแสไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดันซึ่งทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสขึ้นในระบบไฟฟ้า ความผิดเพี้ยนนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของนอนลิเนียร์โหลดเทียบกับขนาดของระบบไฟฟ้า ณสถานทีนั้น ค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำจะทำให้กระแสหรือแรงดันมีเฟสไม่ตรงกันแต่คลื่นไซน์ยังคงบริสุทธิ์อยู่ トラบใดที่ไม่มีฮาร์โมนิกส์อยู่ในระบบ แหล่งที่มาที่สำคัญคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและนอนลิเนียร์โหลด นอนลิเนียร์โหลดรวมไปถึงอุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid State) หรืออุปกรณ์ที่มีการเปิดปิดจังหวะในการให้กระแสไหลผ่านตลอดเวลาหรืออีกในหนึ่งคือ Harmonics คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลเช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 Hz คือ 100 , 150 , 200 Hz เป็นต้นความถี่มูลฐานเรียกว่า Harmonic ที่ 1 ส่วน Harmonic ลำดับอื่นๆก็ได้จากการเอาจำนวนเต็มคูณกับความถี่มูลฐาน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ถูกป้อนด้วยแรงดันหลักบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่ายซึ่งไม่มีอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยน ของกระแสนี้จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย

4.2 อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Inter Harmonics)

หมายถึงส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์นี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะช่วงเริ่มต้นการหลอมกระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอนกล่าวคือความถี่ 50 Hz คาบจะกินเวลา 20มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบไม่เป็น 20 มิลลิวินาที ทุกคาบทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ขึ้น

4.3 ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือ กลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอด SCR เป็นสวิตซ์ตัดต่อกระแส) ในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$n = kp \pm 1$$

n = ลำดับฮาร์โมนิกส์

k = เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ

p = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

4.4 ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non Characteristic Harmonics)

หมายถึงฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่นเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ชนิด 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะที่มีลำดับ 11 13 23 25 35 37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเป็น 5 7 17 19 ป็นมาด้วยเรียกฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ว่าเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

4.5 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Ferromagnetic Device)

อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ หม้อแปลง เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเกินพิกัด จะทำให้กระแสแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กหม้อแปลง จึงกำเนิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น

4.6 ประเภทของฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.6.1 กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Current)

ฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non - Linear Device) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกส์อย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่อง

แปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากซึ่งก็เป็นผลทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์อย่างมากมาตามมาด้วยเช่นกัน

4.6.2 แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบรีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงค่าของตัวประกอบกำลัง (Power Factor) และแรงดันให้ดีขึ้น ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดันอันเนื่องมาจากค่ารีแอกแตนซ์ เปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์(Harmonics Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n * I_n$$

$$V_n = \text{แรงดันฮาร์โมนิกส์}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์โมนิกส์}$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ}$$

4.7 ลำดับฮาร์โมนิกส์(Harmonic Order)

ลำดับฮาร์โมนิกส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้รับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่เป็น 3 เป็น 150 Hz

4.7.1 ฮาร์โมนิกส์อันดับคี่

สำหรับระบบไฟฟ้า 50 Hz พบว่าฮาร์โมนิกส์อันดับคี่เกิดน้อยมาก เนื่องจากอนติเนียร์ โหลดผลิตฮาร์โมนิกส์อันดับคี่ซึ่งจะรวมกับความถี่หลักทั้งช่วงไฟบวกและช่วงไฟลบ ฮาร์โมนิกส์อันดับคี่มีสามชนิดในระบบสามเฟสดังนี้ โพลีทีฟซีควอนซ์ (Positive Sequence) เนกาทีฟซีควอนซ์(Negative Sequence) และซีโร่ซีควอนซ์(Zero Sequence)

1. โพลีทีฟซีควอนซ์ ฮาร์โมนิกส์ ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและห่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสในทิศทางเดียวกันกับความถี่หลัก

2. เนกาทีฟซีแควนซ์ ฮาร์โมนิกส์ ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและห่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับความถี่หลัก
3. ซีโรซีแควนซ์ ฮาร์โมนิกส์ ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันแต่แต่ละเฟสมีมุมห่างกัน เป็น 0 องศา

ดังนั้นจึงก่อให้เกิดกระแส ฮาร์โมนิกส์ ที่มีขนาดเป็นสามเท่าของแต่ละเฟสเซอร์ขึ้นในสายนิวทรอลของระบบไฟฟ้า ฮาร์โมนิกส์ชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า ทริปเปิลฮาร์โมนิกส์ (Triple harmonics) ฮาร์โมนิกส์ นี้แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของอุปกรณ์เฟสเดียวที่เป็นนอนลินีเออร์ เช่นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

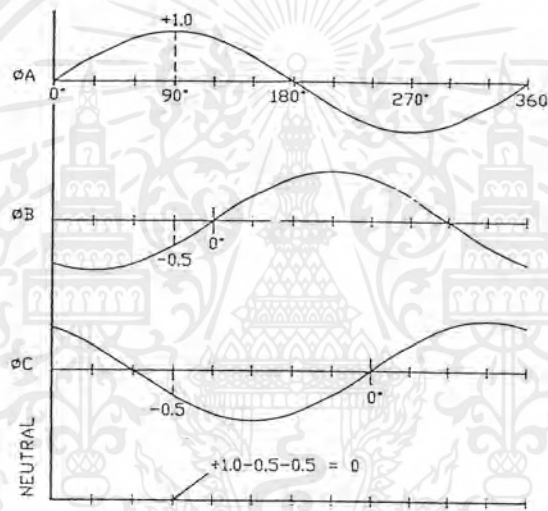
อันดับของฮาร์โมนิกส์	ชนิด	อันดับของฮาร์โมนิกส์	ชนิด
1	โพลีทีฟซีแควนซ์	19	โพลีทีฟซีแควนซ์
3	ซีโรซีแควนซ์	21	ซีโรซีแควนซ์
5	เนกาทีฟซีแควนซ์	23	เนกาทีฟซีแควนซ์
7	โพลีทีฟซีแควนซ์	25	โพลีทีฟซีแควนซ์
9	ซีโรซีแควนซ์	27	ซีโรซีแควนซ์
11	เนกาทีฟซีแควนซ์	29	เนกาทีฟซีแควนซ์
13	โพลีทีฟซีแควนซ์	31	โพลีทีฟซีแควนซ์
15	ซีโรซีแควนซ์	33	ซีโรซีแควนซ์
17	เนกาทีฟซีแควนซ์	อื่นๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงฮาร์โมนิกส์ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงฮาร์โมนิกส์ลำดับคี่ต่างๆพร้อมชนิดซีแควนซ์ของมัน ดังกล่าวฮาร์โมนิกส์อันดับหนึ่งก็คือความถี่หลักของระบบไฟฟ้านั่นเอง โพลีทีฟซีแควนซ์ จากโพลีชนิด เฟส-เฟส จะเป็นเหตุให้มอเตอร์สามเฟสทั้งสองชนิดหมุนไปข้างหน้า ในขณะที่ เนกาทีฟซีแควนซ์ จะพยายามให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ถอยกลับ การหมุนลักษณะนี้จะรุนแรงแค่ไหนยังขึ้นอยู่กับลำดับ (ที่ 5 7 9 ฯลฯ) และขนาดของฮาร์โมนิกส์ เมื่อเทียบกับขนาดของความถี่หลักอีกด้วยแรงบิดจากฮาร์โมนิกส์นี้จะทำให้เกิดการสั่นครางขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาใหญ่ขึ้นได้ภายหลัง

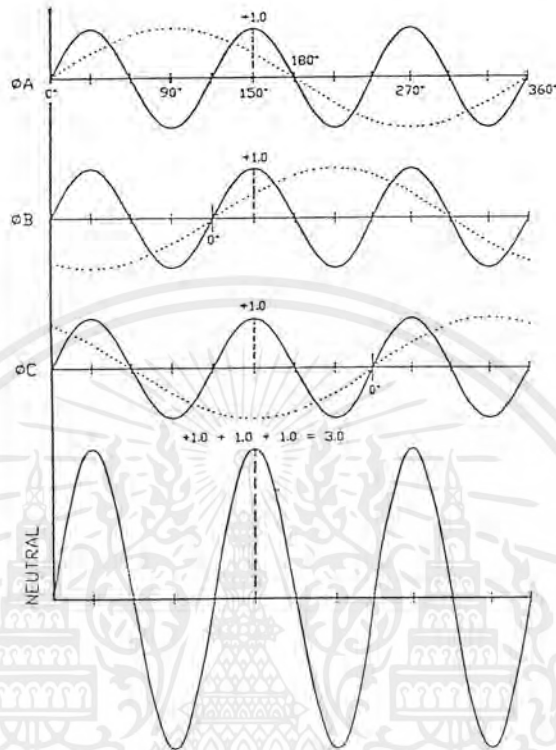
4.7.2 ทริปเปิลฮาร์โมนิกส์

ในระบบกำลังไฟฟ้าสามเฟส กระแสในสายนิวทรอล คือผลรวมทางเวกเตอร์ของกระแสเฟสซึ่งในสภาวะโหลดสมดุลกระแสในรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา ทางไฟฟ้าในแต่ละเฟส ผลรวมจะเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ากระแสในสายนิวทรอล เป็นศูนย์เมื่อโหลดแต่ละเฟสสมดุล

แต่ในกรณีที่เกิดกระแสฮาร์โมนิกนั้นทริปเปิลฮาร์โมนิกส์(3,9,15 ฯลฯ) จะไปรวมกันที่สายนิวทรอล ดังนั้นที่สายนิวทรอล ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.2 อย่างไรก็ตามก็ดีกว่าไม่มีการต่อสายนิวทรอลไว้ มันจะหักล้างกันหมดเอง แต่ถ้าต่อสายนิวทรอลเช่นที่ ขดทุติยภูมิของหม้อแปลงต่อเป็นแบบ สตาร์ ทริปเปิลฮาร์โมนิกส์จะไหลผ่านขดลวดแรงดันต่ำและรวมกันกับกระแสจากโหลดที่ไม่สมดุลในสายนิวทรอล และยังสามารถส่งต่อไปและไหลวนอยู่ในขดปฐมภูมิทางด้านแรงดันสูงได้อีกด้วย



รูป 4.2 กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในระบบกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

4.8 ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์

1. กระแสสูงผิดปกติในสายนิวทรัล

บางทีปัญหาที่สำคัญที่สุดที่เกิดต่อหน่วยงานก็คือเกิดความร้อนสูงกว่าปกติในสายนิวทรัลของระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่โหลดสมดุลกระแสในสายนิวทรัลจะเป็นศูนย์แม้กระทั่งในกรณีที่ไม่สมดุลอย่างมาก กระแสในสายนิวทรัลก็จะไม่สูงไปกว่ากระแสสูงสุดในสายเฟส อย่างไรก็ตามระบบเดียวกันที่มีเฟส - นิวทรัลนอนลิเนียร์โหลดจะผลิตทริปเบิ้ลฮาร์โมนิกส์ออกมา (3 9 15 ฯลฯ) ซึ่งจะไปรวมกันในสายนิวทรัลผลก็คือจะเกิดกระแส rms. ในสายเฟส 200%-300% ถึงแม้จะเป็นระบบที่ไม่สมดุลซึ่งจะทำให้เกิดความล้มเหลวของสายนิวทรัลที่ตู้ไฟฟ้าและหม้อแปลงได้ ฮาร์โมนิกส์ที่ก่อให้เกิดปัญหานี้มาจากภาคจ่ายไฟของเครื่องคอมพิวเตอร์ และ เฟส - นิวทรัลนอนลิเนียร์โหลด อุปกรณ์เหล่านี้ผลิตฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ออกมาในปริมาณมาก รวมทั้งทริปเบิ้ลฮาร์โมนิกส์อื่นเนื่องจากพวกมันต้องการกระแสเฉพาะที่จุดที่แรงดันของตู้กลั่นมีค่าสูงสุดเท่านั้น ถ้าไม่มี

การกรองออกตั้งแต่ตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ กระแสฮาร์โมนิกส์จะหาเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นก็คือผ่านสายนิวทรอลไปยังหม้อแปลงด้วยกระแสที่สูงผิดปกติ และสายนิวทรอลที่เล็กเกินไป เราอาจพบกับสายนิวทรอลที่ร้อนจัดส่งผลให้เกิดไฟไหม้ ไฟฟ้าลัดวงจร หรือระบบส่งจ่ายล้มเหลว

2. ตัวนำ

การไหลของกระแสฮาร์โมนิกส์ในตัวนำไฟฟ้าจะเป็นสาเหตุ ให้เกิดความร้อนในตัวนำเพิ่มขึ้น ซึ่งความร้อนนี้จะมากกว่าผลจากกระแสประสิทธิผล โดยทั่วไปกระแสฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดผลทางกลที่กระทบต่อตัวนำสองชนิดคือ

- ก. ผลทางกลเนื่องจากกระแสที่กระจายอยู่ในตัวนำร่วมกับกระแสจากปรากฏการณ์ทางผิวและกระแสจากผลกระทบบ้างเคียง (Proximity Effect) ดังต่อไปนี้
 - ปรากฏการณ์ทางผิว เป็นปรากฏการณ์ของกระแสลับที่ไหล ในบริเวณพื้นผิวด้านนอกมากกว่าพื้นที่ด้านในตัวนำ เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านตัวนำที่ความหนาแน่นไม่คงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายไม่เท่ากันของรูปคลื่นไฟฟ้าสลับ จึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้ากระแสลับ (*Rac*) มีค่ามากกว่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (*Rdc*) จึงทำให้ความสามารถในการนำกระแสของตัวนำลดลง
 - ผลกระทบบ้างเคียง มีสาเหตุมาจากมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสของตัวนำใกล้เคียงมาเคลื่อนผ่านตัวนำ กระแสนี้อาจเป็นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำที่อยู่ในท่อร้อยสายเดียวกันหรือกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในท่อโลหะ เช่น ปลอกโลหะ ท่อร้อยสายไฟฟ้ารองรับสายไฟฟ้า เป็นต้น
- ข. ผลทางกลเนื่องจากกระแสที่สูงผิดปกติในสายนิวทรอลของระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด 1 เฟส โดยทั่วไปที่ความถี่หลักมูลถ้ากระแสทั้ง 3 เฟส มีความสมดุลกันก็จะไม่มีกระแสไหลในสายนิวทรอล แต่มีโหลดบางชนิด เช่น แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง (Switching Power Supply) ซึ่งเป็นแหล่งผลิตกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้น โดยกระแสเหล่านี้จะมีส่วนทำให้เกิดความไม่สมดุลและมีกระแสไหลในสายนิวทรอลมากและ อาจทำให้เกิดสถานะ โหลดเกินได้ ปัญหานี้จะเกิดมากกับอาคารประกอบการธุรกิจที่ใช้ไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 4สาย และจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดขนาดใหญ่ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นอุปกรณ์สำนักงานและ โหลดที่ศูนย์ประมวลผลข้อมูล ซึ่งอาจจะต้องใช้สายนิวทรอลมีขนาดอย่างน้อย 2 เท่าของขนาดการนำกระแสของสายเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสูญเสียเป็นความร้อน

การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ ซึ่งพลังงานนี้จะดูมาจากโรงจักรไฟฟ้าทำให้เราเสียค่าไฟมากขึ้นอีกเนื่องจากฮาร์โมนิกส์

4. สกินเอฟเฟ็ค

ฮาร์โมนิกส์สามารถทำให้สายไฟและเนื้องานร้อนจัดอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าสกินเอฟเฟ็ค มันสัมพันธ์กับความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นความหนาแน่นกระแสที่ผิวมากขึ้นถ้าเกิดที่หม้อแปลง จะทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นที่ขดลวดของหม้อแปลง

5. เซอร์คิตเบรกเกอร์และฟิวส์

- ก. เซอร์คิตเบรกเกอร์ ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแสของเซอร์คิตเบรกเกอร์ เมื่อฮาร์โมนิกส์มีความถี่สูงมากกว่าความถี่หลักมูลมีผลทำให้เกิดความร้อน เนื่องจากการสูญเสียในขดลวด โซลินอยด์รวมทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวซึ่งความร้อนนี้จะทำให้อุปกรณ์ตัดวงจรด้วยความร้อน(Thermal device) มีอุณหภูมิสูงขึ้น และจะทำให้จุดตัดวงจร(Trip point) มีค่าลดลง
- ข. ฟิวส์ การทำงานของฟิวส์นำมาใช้สำหรับป้องกันกระแสเกิน โดยจะตัดวงจรด้วยความร้อน ซึ่งกระแสฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางผิว(Skin effect) ขึ้นที่ใส่ฟิวส์ จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมมากขึ้นจนใส่ฟิวส์หลอมละลาย

6. ปัญหาที่หม้อแปลง

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นจะก่อให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในหม้อแปลงทุกชนิด ความร้อนนี้เกิดจาก เอ็ดดี เคอเรนท์ ลอส และ ฮิสเทเรซิส ลอส ซึ่งแปรผันตรงกับความถี่ และความร้อนที่เพิ่มขึ้นในหม้อแปลงยังเกิดจากสกินเอฟเฟ็คที่ขดลวดด้วย

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าที่มีต่อหม้อแปลงคือ มีการเพิ่มความร้อนในรูปแบบของกำลังสูญเสียมากขึ้น ซึ่งกำลังสูญเสียเหล่านี้ได้แก่

- ก. กำลังสูญเสีย I^2R ของขดลวด กำลังสูญเสียส่วนนี้จะเกิดจากความร้อนในตัวนำและปรากฏการณ์ทางผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข. กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด กำลังสูญเสียส่วนนี้จะเกิดจากความร้อนในตัวนำและปรากฏการณ์ทางผิว
- ค. กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด กำลังสูญเสียส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแสไหลวนและกำลังสองของความถี่

เมื่อหม้อแปลงมีความร้อนสูงขึ้นกว่าค่าที่กำหนดจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง

7. ปัญหาที่ตัวเก็บประจุ

เนื่องจากความต้านทานของตัวเก็บประจุจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ตัวเก็บประจุจึงได้รับผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์ ดังนั้นตัวเก็บประจุสำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจะเป็นเส้นทางที่มีความต้านทานต่ำมากสำหรับฮาร์โมนิกส์ ผลคือจากมีฟิวส์ขาดหรือตัวเก็บประจุระเบิด ซึ่งเป็นผลลัพท์ที่เกิดจากการที่ตัวเก็บประจุเกิดการเรโซแนนซ์ที่ค่าฮาร์โมนิกส์ ค่าใดค่าหนึ่ง

การใช้คาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์และแรงดันให้ดีขึ้นนั้น จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า ในความเป็นจริงคาปาซิเตอร์ไม่ได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์ แต่การต่อคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบจะมีความเป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ของระบบ

8. ปัญหาเครื่องป้องกันกระแสเกิน

เครื่องป้องกันกระแสเกินแบบตรวจอุณหภูมิ เช่น ฟิวส์ และ เซอร์คิตเบรกเกอร์แบบอินเวอร์สไทม์ จะได้ผลกระทบความร้อนจากสกินเอฟเฟกต์เมื่อกระแสจากฮาร์โมนิกส์สูงขึ้น ความร้อนที่สูงเกินไปจะมีผลให้ช่วงการทำงานของอุปกรณ์นี้เปลี่ยนไป ทำให้เกิดการตัดไฟโดยปราศจากเหตุผลอันสมควร(กระแสเกิน) สำหรับเซอร์คิตเบรกเกอร์รุ่นเก่าที่ใช้ระบบแม่เหล็กในการทริปซึ่งทำงานโดยอาศัยแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสสูงสุดขึ้นทำให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ทริปก่อนกำหนด ปัจจุบันเซอร์คิตเบรกเกอร์รุ่นใหม่ๆ ได้ออกแบบมาให้ทำงานตามค่า rms แล้ว

9. เครื่องจักรกลชนิดหมุน (Rotating Machine)

เมื่อจ่ายแรงดันที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะเป็นเหตุให้เกิดความร้อนสูงมากเกินไป (Over heating) การสั่นของทอร์ก (Pulsating torque) หรือคลื่นรบกวนขึ้น และกำลังสูญเสียในเครื่องจักรกลจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของความถี่แรงดันที่จ่ายความเพี้ยนของแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดันทำให้โรเตอร์เกิดความร้อนสูงมากเกินไป ซึ่งเป็นปัญหาหลักของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์มีอุณหภูมิสูงเกินไปจะเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลง

การสั้นของทอร์คเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กของความถี่หลักมูลในช่องอากาศและ ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากกระแสฮาร์โมนิกส์ในโรเตอร์ มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำที่ความเร็วสูงที่จะออกแบบทำให้การทำงานที่สูงกว่าความเร็วที่ตั้งไว้ครั้งแรกประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับมอเตอร์ที่ปรับความเร็วได้มีความจำเป็นที่ต้องวิเคราะห์ความเร็วโรซเนนซ์ของมอเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายใดๆ ที่จะเกิดขึ้นตามมาเนื่องจากการขยายการสั้นของทอร์ค

10. ปัญหาต่อเครื่องวัด

ฮาร์โมนิกส์ จะทำให้เครื่องวัดการใช้ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแสดงค่าผิดพลาด เนื่องจากงานที่หมุนอยู่ในมอเตอร์ออกแบบมาให้ทำงานกับคลื่นไซน์ ถ้าคลื่นไม่เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ จะทำให้งานหมุนเร็วเกินความจริง ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่ายค่าไฟฟ้ามากเกินไปกว่าที่ผู้ใช้ไปจริง

11. ปัญหาต่อรีเลย์ป้องกัน

รูปคลื่นที่มีความเพี้ยนจะมีผลต่อสมรรถนะของรีเลย์ป้องกัน โดยอาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์การทำงานไม่ถูกต้องหรือไม่ทำงานเมื่อต้องการให้ทำ หม้อแปลงแรงดันและโดยเฉพาะหม้อแปลงกระแสจะเป็นตัวส่งสัญญาณความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบรีเลย์ โดยปกติหม้อแปลงกระแสจะทำงานที่ระดับของกระแสไหล แต่เมื่อเกิดกระแสฟอลต์สูงๆ จะทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสอิ่มตัวซึ่งทำให้เกิดสัญญาณความเพี้ยนเข้าไปในระบบรีเลย์ ดังนั้นความเพี้ยนนี้อาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์สั่งตัดวงจรไม่ถูกต้องในกรณีที่มีฟอลต์เกิดขึ้นหรืออาจสร้างความเดือดร้อนให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า โดยการสั่งตัดวงจรในขณะที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้า

12. หลอดไฟฟ้าแสงสว่าง

เมื่อใช้งานหลอดไฟแบบเผาไส้ (Incandescent lamp) ด้วยแรงดันที่มีความเพี้ยนจะทำให้อายุการใช้งานของหลอดไฟนี้สั้นลง เพราะหลอดไฟมีความไวต่อระดับแรงดันที่ใช้หากแรงดันขณะใช้งานมีค่าสูงกว่าแรงดันพิกัดจากความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์จะทำให้มีผลต่ออุณหภูมิของไส้หลอด และจะลดอายุการใช้งานของหลอดไฟ สำหรับการดำเนินงานต่อเนื่องของหลอดไฟที่ 105% ของพิกัดแรงดันประสิทธิภาพจะมีผลทำให้อายุการใช้งานของหลอดไฟลดลง 47%

13. อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์(Power Electronic devices)

อุปกรณ์ ประเภทนี้ได้แก่ เครื่องแปลงผันที่สามารถใช้งาน ได้หลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ เช่นตัวเรียงกระแส (Rectifiers) ระบบขับเคลื่อนปรับความเร็วได้(Adjustable Speed Drive:ASD) แหล่งจ่ายกำลังไม่หยุดชะงัก (Uninterruptible Power Supplies:UPS) และอินเวอร์เตอร์ (Inverters)

14. อุปกรณ์ประเภทอาร์ก (Arcing Device)

อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เต้าหอลอม จะกำเนิดฮาร์โมนิกส์เป็นจำนวนมากเพราะสาเหตุจากคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นในการอาร์ก นอกจากนี้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) ก็มีคุณลักษณะพื้นฐานของการอาร์กเช่นเดียวกัน และมีการใช้งานกันอย่างมากมาย

ปัจจุบัน โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีใช้กันในระบบ ไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้จะทำให้รูปคลื่น ไซน์บริสุทธิ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนเกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าที่มีคุณภาพกำลังไฟฟ้าลดต่ำลง

15. ปัญหาต่อเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์

เมื่อรูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไป การทำงาน ของอุปกรณ์ ไฟฟ้าอาจผิดพลาดได้ เช่น นาฬิกาอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำงานโดยการนับจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ แต่รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนอาจทำให้มีจุดที่แรงดันเป็นศูนย์มากกว่าคลื่น ไซน์ นาฬิกาจึงเดินเร็วขึ้น ทำให้อุปกรณ์ที่ทำงานตามนาฬิกาเหล่านี้ทำงานผิดพลาดไปด้วย

ความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายอย่างตัวอย่างเช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้การตรวจสอบแรงดันผ่านศูนย์ (Zero Crossing) ของความถี่หลักมูล เมื่อเกิดฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่มากกว่าความถี่หลักมูลจึงทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์นี้ทำงานผิดพลาด เช่น นาฬิกาจิจิตอลจะมีเวลาเร็วขึ้น

นอกจากนี้อุปกรณ์โซลิตสเตทที่ทำหน้าเป็นสวิตซ์ที่ตำแหน่งแรงดันผ่านศูนย์ เพื่อลดการรบกวนของสนามแม่เหล็ก และกระแสพุ่งเข้า การที่มีจุดผ่านศูนย์มากขึ้นเนื่องจากฮาร์โมนิกส์จะทำให้เวลาของการสวิตซ์เปลี่ยนไป ดังนั้นอุปกรณ์ที่ต่อกับสวิตซ์นี้ก็จะทำงานผิดพลาดไปด้วย

เศษส่วนของฮาร์โมนิกส์และฮาร์โมนิกส์ย่อย (Fraction and sub-harmonics) สามารถมีผลกระทบต่อวีดีโอหรือโทรทัศน์ ซึ่งส่วนของฮาร์โมนิกส์คือ ฮาร์โมนิกส์ที่มีจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม และฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่หลักมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ปัญหาการรบกวนต่อเครื่องโทรศัพท์ (Telephone interference)

เมื่อติดตั้งสายโทรศัพท์บนเสาใกล้กับสายไฟฟ้าจะมีโอกาสที่สัญญาณรบกวนจากสายไฟฟ้าเข้าไปรบกวนการสื่อสารทางโทรศัพท์ได้ และถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกส์รวมอยู่ด้วยซึ่งความถี่ของฮาร์โมนิกส์สามารถที่จะสร้างปัญหาได้มากกว่าความถี่หลักมูล เมื่อผู้ใช้โทรศัพท์ที่มีความไวต่อการได้ยินและโทรศัพท์ตอบสนองได้ไกล 1kHz สำหรับการรบกวนนี้สามารถวัดได้หลายวิธีที่แตกต่างกัน แต่มีการวัดวิธีหนึ่งคือ TIF (Telephone influence factor) เป็นแฟกเตอร์ที่รวมเอาความถี่ขนาด และน้ำหนักของความถี่ ซึ่งในทางปฏิบัติการวัดการรบกวนโทรศัพท์จะใช้ผลคูณ

IT ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างกระแสประสิทธิผลเป็นแอมแปร์ และ TIF ถ้าผลคูณ IT มีค่าน้อยกว่า 10,000 จะไม่มีผลกระทบต่อกรรบกวน แต่ถ้าผลคูณ IT มีค่าเกิน 25,500 จะสร้างปัญหาในการรบกวนการสื่อสารทางโทรศัพท์

17. ปัญหาอื่นๆ

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางแบบจะวัดที่แรงดันสูงสุดเพื่อควบคุมแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจะทำให้ค่าสูงสุดของแรงดันสูงขึ้น ทำให้เครื่องวัดมองเห็นค่าสูงสุดอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกส์แทนทำให้การทำงานผิดพลาด

ในระบบสื่อสาร ฮาร์โมนิกส์ อาจทำให้เกิดการรบกวนข้ามแชนแนล (Crosswalk) ขึ้นซึ่งทำให้ข้อมูลผิดเพี้ยนไปในระหว่างการเดินทางผ่านสายสัญญาณได้

บทที่ 5

ทฤษฎีและหลักการ

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายเคเบิล จะปรากฏอยู่ในรูปของความร้อนภายในตัวนำ ฉนวน และส่วนประกอบต่างๆ ที่เป็นโลหะของสายเคเบิล ค่าพิกัดกระแสจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนต่างๆ ของสายเคเบิล อุณหภูมิ ณ ส่วนต่างๆ ที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนนี้จะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดค่าความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลภายใต้สภาวะคงที่ และมีความสัมพันธ์กับผลรวมของความสูญเสียในรูปความร้อนที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปสามารถจะเลยผลจากความสูญเสียของสายเคเบิลอื่นเนื่องจากแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ความสูญเสียไดอิเล็กตริกและความสูญเสียที่เกิดจากกระแสอาร์จจึงในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำ

5.1 สัญลักษณ์ต่างๆ (Symbols)

ก่อนอื่นจะกล่าวถึงสัญลักษณ์ที่ใช้เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น

d	คือ	ระยะห่างหน่วยเป็นนิ้ว
D_c	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตัวนำ
D_i	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของ <i>Insulation</i>
D_s	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของ <i>Sheath</i>
D_{sm}	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเฉลี่ยของ <i>Sheath</i>
D'_s	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของสายเคเบิลที่วางใกล้กันเป็นรูปสามเหลี่ยม
D_p	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของ <i>Duct Wall Pipe</i> หรือ <i>Conduit</i>
\mathcal{E}	คือ	สัมประสิทธิ์ของการแผ่กระจายตามผิว
\mathcal{E}_r	คือ	ตามแต่ชนิดของความเหนียวนำหรือความจุของ <i>Insulation</i>
f	คือ	ความถี่ (Hz)
$f(x)$	คือ	ค่าที่ได้จากฟังก์ชัน Bessel ของ x
G_b	คือ	ค่ากระแสของตัวนำมีหน่วยเป็น <i>Kiloamperes</i>
I	คือ	แฟคเตอร์ความถูกต้องของ <i>Skin Effect</i>
K_s	คือ	แฟคเตอร์ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L	คือ	ความลึกของการฝังสายเคเบิล นับจากพื้นดินมีหน่วยเป็นนิ้ว
L_b	คือ	ความจากพื้นดินถึงจุดศูนย์กลางของ <i>Duct Bank</i>
(LF)	คือ	<i>Loss Factor Per Unit</i>
n'	คือ	จำนวนตัวนำในหนึ่งสายเคเบิล
N	คือ	จำนวนของกลุ่มสายเคเบิลในระบบ
$\cos(\phi)$	คือ	<i>Power Factor</i> ของ <i>Insulation</i>
q_s	คือ	อัตราส่วนผลรวมของความสูญเสียใน <i>Conductor Sheath</i> ต่อความสูญเสียใน <i>Conductor</i>
q_e	คือ	อัตราส่วนผลรวมของความสูญเสียใน <i>Conductor Sheath Conduit</i> ต่อความสูญเสียใน <i>Conductor</i>
R_{dc}	คือ	ความต้านทานกระแสตรงของตัวนำ
R_s	คือ	ความต้านทานกระแสตรงของ <i>Sheath</i> หรือใน <i>Shield-Skid Wire</i>
\overline{R}	คือ	ความต้านทานทางอุณหภูมิ (ต่อความสูญเสียของตัวนำ)
\overline{R}_i	คือ	ของ <i>Insulation</i>
\overline{R}_j	คือ	ของ <i>Jacket</i>
\overline{R}_{sd}	คือ	ระหว่างผิวของสายเคเบิลกับบริเวณรอบข้าง
\overline{R}_d	คือ	ของ <i>Duct Wall</i> หรือวัสดุที่ใช้หุ้มสายเคเบิล
\overline{R}_{se}	คือ	ระหว่าง <i>Sheath</i> กับเส้นผ่าศูนย์กลาง <i>De</i>
\overline{R}_e	คือ	ระหว่าง <i>Conduit</i> กับ <i>Ambient</i>
\overline{R}'_e	คือ	ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลาง <i>De</i> กับ <i>Ambient Earth</i>
\overline{R}'_{ca}	คือ	ระหว่าง <i>Conductor</i> กับ <i>Ambient</i> สำหรับ <i>Conductor Loss</i>
\overline{R}'_{da}	คือ	ระหว่าง <i>Conductor</i> กับ <i>Ambient</i> สำหรับ <i>Dielectric Loss</i>
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า <i>Circular mil ohms per foot</i>
ρ	คือ	ความต้านทานจำเพาะทางความร้อน <i>Degree centigrade centimeter per watt</i>
S	คือ	ระยะห่างของสายเคเบิลที่อยู่ติดกันนับจากแกนเคเบิล
t, T	คือ	ความต้านทานจำเพาะความหนา มีหน่วยเป็นนิ้ว
T	คือ	อุณหภูมิ <i>Degrees Centigrade</i>
T_a	คือ	อุณหภูมิรอบข้างเป็น <i>Air</i> หรือ <i>Earth</i>
T_c	คือ	อุณหภูมิของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_m	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยของ <i>Medium</i>
ΔT_d	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิของตัวนำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก <i>Dielectric Loss</i> มีหน่วยเป็น <i>Degree Centigrade</i>
\mathcal{T}	คือ	อุณหภูมิที่ความต้านทานศูนย์ <i>Degree Centigrade</i>
W_d	คือ	ความสูญเสียใน <i>Dielectric</i>
X_m	คือ	<i>Mutual Reactance</i> ของ <i>Conductor</i> ถึง <i>Sheath</i> หรือ <i>Shield</i> <i>Microohms</i>
Y_c	คือ	ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน <i>Conductor</i>
Y_s	คือ	ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน <i>Sheath</i> หรือ <i>Shield</i>
Y_p	คือ	ส่วนที่เพิ่มขึ้นของความสูญเสียใน <i>Pipe</i> หรือ <i>Conduct</i>

5.2 หลักการคำนวณตามทฤษฎีของ J.H Neher และ M.H.Mc Grath

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากตัวนำถึงบริเวณรอบ ๆ ของตัวนำจะเป็นตัวทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่งสามารถแยกออกเป็นสองส่วนดังนี้

$$T_c - T_a = \Delta T_c + \Delta T_d \quad (1)$$

1. ΔT_c คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกระแสมีค่าเป็น $I^2 R$ ใน *Conductor Sheath* หรือ *Conduit*

$$\Delta T_c = I^2 R_{dc} (1 + Y_c) \bar{R}'_{ca} \quad (2)$$

\bar{R}'_{ca} คือ ค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างตัวนำ (*Conductor*) ไปถึงอุณหภูมิสถานะแวดล้อม (*Ambient*)

2. ΔT_d คือ อุณหภูมิที่เพิ่มจาก *Dielectric Loss* แต่ในระบบแรงดันต่ำจะไม่ค่อยมีผลต่อกระแสมากนักทำให้เราสามารถละทิ้งได้แต่ในระบบแรงสูงมีผลมาก ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\Delta T_d = W_d \bar{R}'_{da} \quad (3)$$

โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ละส่วนเกิดจากความร้อน Heat Flow ไหลผ่านความต้านทานทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจากทฤษฎีนี้เราสามารถคำนวณหาขนาดของกระแสในสายเคเบิลได้ดังนี้

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)R_{ca}}} \quad \text{Kiloampere} \quad (4)$$

พิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ดังนี้

1. T_c Temperature of conductor อุณหภูมิของตัวนำ มาตรฐานการไฟฟ้ากำหนด อุณหภูมิสูงสุดที่ตัวนำต้องทนได้ในการใช้งาน คือ

Low Voltage (750 V)

XLPE 90 °C

THW 70 °C

NYY 70 °C

High Voltage (24 KV)

XLPE 90 °C

2. T_a Temperature of Ambient อุณหภูมิสถานะแวดล้อมในการใช้งาน โดยทั่วไปการไฟฟ้านครหลวงได้กำหนดไว้ดังนี้

Low Voltage (750V)

เดินลอยในอากาศ 40 °C

เดินร้อยท่อในอากาศ 40 °C

เดินร้อยท่อฝังดิน 40 °C

เดินในเคเบิลเทรย์ 40 °C

High Voltage (24KV)

เดินลอยในอากาศ 40 °C

เดินร้อยท่อในอากาศ 30 °C

เดินร้อยท่อฝังดิน 40 °C

เดินใน Duct bank 30 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ΔT_d Temperature rise of conductor due to dielectric อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของ Dielectric Loss ซึ่งจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะมีผลน้อยมากใน Low Voltage ดังนั้นเราพิจารณาเฉพาะใน High Voltage ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

Low Voltage

$$\Delta T_d = 0$$

High Voltage

$$\Delta T_d = w_d R'_{da}$$

สามารถหาค่า W_d ได้ดังสมการ

$$W_d = \frac{0.00276 E^2 \mathcal{E}_r \cos \phi}{\log[(2T + D_c) / D_c]} \quad (4)$$

$$E = \frac{KV}{\sqrt{3}}$$

$$\mathcal{E}_r = 2.5$$

ซึ่ง \mathcal{E}_r หาได้จากตารางภาคผนวก

$$\cos \phi = 0.005$$

T คือ Thickness of Insulation

D_c คือ Diameter of Conductor

สามารถหาค่า R'_{da} ได้ดังสมการ

$$\bar{R}_{da} = \bar{R}_i + \bar{R}_{sc} + \bar{R}_e \quad (5)$$

$$\bar{R}_i = 0.012 \bar{\rho}_i \text{Log} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) \quad (6)$$

$\bar{\rho}_i$ คือ Thermal resistivity of insulation

ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางของภาคผนวกได้ค่าดังนี้

XLPE 385 °C Cm/Watt

THW 357 °C Cm/Watt

NYN 357 °C Cm/Watt

$$D_i = D_c + 2T$$

3. R_{dc} ค่าความต้านทานกระแสตรง ซึ่งการคำนวณจะอิงจากค่ามาตรฐานที่ 20°C ซึ่งค่าจะแปรตามอุณหภูมิของตัวนำที่เปลี่ยนไป ดังนี้

$$R_{dc} = R_{dc 20^\circ} (304.8) \left(\frac{234.5 + T_c}{254.5} \right) \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Y_c ค่าความสูญเสียต่างๆซึ่งมีผลจาก Skin Effect (Y_{cs}) และที่เกิดจาก Proximity effect (Y_{cp})

$$Y_c = Y_{cs} + Y_{cp} \quad (8)$$

ซึ่งการคิดผลของ Skin Effect หาได้จาก Skin effect function ดังแสดงในตารางของภาคผนวก

$$Y_{cs} = F(X_s) \quad (9)$$

โดย

$$X_s = 0.875 \sqrt{\frac{fk_s}{R_{dc}}} \quad (10)$$

และ

$$f = 50$$

$$k_s = 1.0$$

ผลของ Proximity Effect ซึ่งเกิดจากตัวนำเป็นชนิดตีเกลียว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Y_{cp} = 4F(X_p) \left[\frac{0.295 \left(\frac{D_{dc}}{s} \right)}{F(X_p) + 0.27} \right] \quad (11)$$

โดย

$$X_p = 0.875 \sqrt{\frac{fk_p}{R_{dc}}} \quad (12)$$

และ

$$f = 50$$

$$k_p = 0.8$$

ค่าของ $F(X_s), F(X_p)$ สามารถหาได้จากตารางของภาคผนวก

ค่าของ k_s, k_p หาได้จากตารางของภาคผนวก

D_c คือ Diameter of conductor

$$S = D_c + 2(T + Y_{cs}) \quad (13)$$

T คือ Thickness of insulation

5. R'_{ca} ค่าความต้านทานทางความร้อน ซึ่งขึ้นกับรูปแบบการติดตั้งและ ชนิดของสายเคเบิลที่ใช้เนื่องจาก แต่ละชั้นฉนวน หรือ Conduit จะเกิดค่าความต้านทานทางความร้อนเกิดขึ้น โดยจะได้ว่า ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมมีค่าดังนี้

$$\overline{R'_{ca}} = \overline{R}_i + q_s \overline{R'_{sc}} + q_e \overline{R}_e \quad (14)$$

$$\overline{R}_i = 0.012 \overline{\rho}_i \text{Log} \left(\frac{D_i}{D_c} \right) \quad (15)$$

$\overline{\rho}_i$ คือ Thermal Resistivity of insulation

XLPE 385 °C Cm/Watt

THW 357 °C Cm/Watt

NYY 357 °C Cm/Watt

$$D_i = D_c + 2T \quad (16)$$

ค่าของ q_s หาได้จาก

$$q_s = 1 + \left(\frac{Y_s}{1 + Y_c} \right) \quad (17)$$

โดย

$$Y_s = Y_{sc} + Y_{se} \quad (18)$$

$$X_m = 0.882f \text{log} \frac{2S}{D_{sm}} \quad (19)$$

$$D_{sm} = D_s - t \quad (20)$$

เมื่อค่า t คือ Thickness of sheath

$$R_s = \frac{\rho_s}{4D_{sm}t} \quad (21)$$

ρ_s คือ Resistance of sheath

$$Y_{se} = \left(\frac{396}{R_s R_{dc}} \right) \times \left(\frac{2s}{D_{sm}} \right)^2 \quad (22)$$

s คือ $1.155T + 0.58D_c$

\overline{R}_{se} คือ ค่าความต้านทานทางความร้อนส่วนที่ถัดจากตัวนำออกมาจากสิ่งแวดล้อม (Ambient) หรืออากาศภายนอก ซึ่งจะประกอบด้วย

$$\overline{R}_{se} = \overline{R}_j + \overline{R}_{sd} + \overline{R}_d \quad (23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า jacket, duct watt, and somastic coating คำนวณได้จาก

$$\bar{R}_j = 0.0140 \rho n' \left(\frac{t}{D-t} \right) \quad (25)$$

เมื่อ

n' number of conductors

D outside diameter

ค่า Cable surface and surrounding pipe, conduit or duct wall คำนวณได้จาก

$$\bar{R}_{sd} = \frac{n'}{[1 + (B + CT_m)D'_s]} \quad (26)$$

เมื่อ

A คือ 17

B คือ 3.6

C คือ 0.029

ซึ่งค่า A, B, C สามารถหาได้จากตารางของภาคผนวก

$$T_m = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (27)$$

$D'_s = 100 * \text{diameter of cable for one cable}$

$D'_s = 100 * \text{diameter of cable for two cable}$

$D'_s = 100 * \text{diameter of cable for tree cable}$

$D'_s = 100 * \text{diameter of cable for four cable}$

สำหรับค่าของ ρ'_n สามารถหาได้จากตาราง ของภาคผนวก

$$q_e = 1 + \left(\frac{Y_s + Y_p}{1 + Y_c} \right) \quad (28)$$

โดย

$$Y_p = \frac{1.45s - 0.115D_p}{R_{dc}} \quad 3 \text{ conductor} \quad (29)$$

$$Y_p = \frac{0.895s - 0.115D_p}{R_{dc}} \quad 1 \text{ conductor} \quad (30)$$

$$Y_p = \frac{0.345s - 0.175D_p}{R_{dc}} \quad 1 \text{ conductor} \quad (31)$$

ค่า Cable conduit or duct suspended in air คำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\bar{R}_e คือค่าความต้านทานทางความร้อนของ Ambient ซึ่งในการติดตั้งโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นดินลอยอากาศ (\bar{R}_e) และฝังดิน (\bar{R}'_e)

$$\bar{R}_e = \frac{15.6n'}{D'_s \left[\left(\frac{\Delta T}{D_s} \right)^{\frac{1}{4}} + 1.6\varepsilon(1 + 0.0167T_m) \right]} \quad (32)$$

$$\Delta T = T_s - T_a \quad (33)$$

$$\varepsilon = 0.95 \quad (\text{Pip conduit duct})$$

$$\varepsilon = 0.2 - 0.5 \quad (\text{Lead and aluminum sheaths})$$

กรณี Between cable, ducts or pipes and ambient earth

$$\bar{R}'_e = 0.012\rho n' \times \left[\log\left(\frac{D_s}{D_e}\right) + (LF) \log\left[\left(\frac{4L}{D_x}\right)F\right] \right] \quad (34)$$

D_x คือ Diameter the effect of loss factor commences

D_e คือ Diameter at start of earth portion of thermal circuit

LF คือ Loss factor มีค่าเท่ากับ 0.8

L คือ Depth of reference below earth's surface

F คือ Product of ratio distance

ส่วนค่าแฟคเตอร์ F เกิดจากผลต่างความร้อนของสายเคเบิลหาได้จาก

$$F = \left(\frac{d_{12'}}{d_{12}} \right) \left(\frac{d_{13'}}{d_{13}} \right) \dots \dots \dots \left(\frac{d_{1N'}}{d_{1N}} \right) \quad (35)$$

5.3 การคำนวณพิกัดกระแสเนื่องจากผลของฮาร์โมนิกส์

5.3.1 ความสูญเสียในตัวนำ

ความสูญเสียในตัวนำของสายเคเบิลเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_{ac} ของตัวนำ มีค่าเท่ากับ $\sum I^2 R_{ac}$ เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดความสูญเสียในตัวนำ (P) เท่ากับ

$$P = I_1^2 R_{ac(1)} + I_3^2 R_{ac(3)} + I_5^2 R_{ac(5)} + \dots + I_n^2 R_{ac(n)} \quad (36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_n คือ กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n

$R_{ac}(n)$ คือ ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ n เท่าของความถี่มูลฐาน

5.3.2 ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Resistance)

$$R_{ac}(n) = R_{dc} (1 + Y_s + Y_p) (1 + \lambda_2) \quad (37)$$

เมื่อ R_{dc} คือ ความต้านทาน dc ของตัวนำที่ $t \text{ } ^\circ c$

Y_s คือ ตัวประกอบของปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect)

Y_p คือ ตัวประกอบของปรากฏการณ์ความใกล้ชิด (Proximity effect)

λ_2 คือ ตัวประกอบของความสูญเสียจากท่อร้อยสาย

โดยที่

R_{20} คือ ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ $20 \text{ } ^\circ c$

α_{20} คือ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของตัวนำ (สำหรับทองแดงเท่ากับ $3.93 * 10^{-3}$)

t คือ อุณหภูมิของตัวนำ $^\circ c$

และ

$$Y_s = a(z) \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] \quad (38)$$

$a(z), b(z)$ เป็น Bessel Function สามารถคำนวณได้ดังนี้

ถ้า $0 < z \leq 5$

$$a(z) = \frac{7z^2}{315 + 3z^2} \quad (39)$$

$$b(z) = \frac{56}{211 + z^2} \quad (40)$$

ถ้า $5 < z \leq 30$

$$a(z) = 0.19701 - 0.1546295z + 0.073796z^2 - 9.02854 * 10^{-3} * z^3 + 6.27032 * 10^{-4} z^4 - 2.69028 * 10^{-5} z^5 + 7.0647 * 10^{-7} z^6 - 1.4301 * 10^{-8} z^7 + 6.62315 * 10^{-11} z^8 \quad (41)$$

$$b(z) = 0.5356 - 0.21030734 z + 6.495563 * 10^{-2} z^2 - 1.089373 * 10^{-2} z^3 + 1.03728739 * 10^{-3} z^4 - 5.8238557 * 10^{-5} z^5 + 1.91099645 * 10^{-6} z^6 - 3.38936767 * 10^{-8} z^7 + 2.509622 * 10^{-10} z^8 \quad (42)$$

ถ้า $z > 30$

$$a(z) = \sqrt{\frac{z}{2} - 1} \quad (43)$$

$$b(z) = \frac{2}{4\sqrt{2z-5}} \quad (44)$$

$$\beta = 1 - \frac{di}{dc} \quad (45)$$

$$z = 0.25m^2 K_s (dc - di)^2 \quad (46)$$

$$m^2 = \frac{2\pi\mu_r\mu_0 f}{\rho} \quad (47)$$

โดยที่ d_i คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายในของตัวนำ (mm)

d_c คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกของตัวนำ (mm)

K_s คือ Factor ของตัวนำ

μ_r คือ ความซึมซาบทางแม่เหล็ก(สำหรับทองแดงมีค่าเท่า 1)

μ_0 คือ ความซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

ρ คือ ความต้านทานเฉพาะของตัวนำ (Ωm)

ในกรณีสายเคเบิล 2 แกนและแกนเดียว 2 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_p = \frac{y^2 G(x_p)}{1 - y^2 A(x_p) - y^4 B(x_p)} \quad (48)$$

ในกรณีสายเคเบิล 3 แกนและแกนเดี่ยว 3 เส้น

$$Y_p = \frac{y^2 G(x_p)}{2 - \frac{5}{12} y^2 H(x_p)} \quad (49)$$

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

ถ้า $0 < x_p \leq 2.8$

$$A(x_p) = \frac{0.042 + 0.012x_p^4}{1 + 0.0236x_p^4} \quad (50)$$

$$B(x_p) = 0 \quad (51)$$

$$G(x_p) = \frac{11 * x_p^4}{704 + 20x_p^4} \quad (52)$$

$$H(x_p) = \frac{1 + 0.0283x_p^4}{3(1 + 0.0042x_p^4)} \quad (53)$$

ถ้า $2.8 < x_p \leq 3.8$

$$A(x_p) = -0.223 + 0.237x_p - 0.0154x_p^2 \quad (54)$$

$$B(x_p) = 0 \quad (55)$$

$$G(x_p) = -1.04 + 0.72x_p - 0.08x_p^2 \quad (56)$$

$$H(x_p) = 0.095 + 0.119x_p + 0.0384x_p^2 \quad (57)$$

ถ้า $3.8 < x_p$

$$A(x_p) = 0.75 - 1.128x_p^{-1} \quad (58)$$

$$B(x_p) = 0.094 - 0.376x_p^{-1} \quad (59)$$

$$G(x_p) = \frac{x_p}{4\sqrt{2}} + \frac{1}{8} \quad (60)$$

$$H(x_p) = \frac{2x_p - 4.69}{x_p - 1.16} \quad (61)$$

และ

$$x_p^2 = \frac{8\pi f * 10^{-7} k_p}{R_{dc}} \quad (62)$$

$$y = \frac{d_c}{S} \quad (63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ k_p คือ Factor ของตัวนำ

S คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวนำ (mm)

$$\lambda_2 = \left(\frac{f}{60} \right)^{1.5} \left(\frac{0.0079S + 0.00039d_d}{R} \right) 10^{-5} \quad (64)$$

โดยที่

d_d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางในของท่อร้อยสาย (mm)

S คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำ (mm)

R ความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับของตัวนำ (Ω / m)

5.3.3 ความสูญเสียในเปลือกโลหะ (Sheath) (λ_1)

ประกอบด้วยความสูญเสียจาก Circulating Current (λ_1') และ Eddy current (λ_1'') ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสูญเสียในเปลือกโลหะได้แก่ การจัดเรียงสายเคเบิล โครงสร้างของสายเคเบิล ขนาดของตัวนำ และความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

5.3.4 ความสูญเสียในเกราะป้องกันสาย (Armor) และท่อร้อยสาย (λ_2)

ประกอบด้วยความสูญเสียจาก Hysteresis (λ_2') และ Eddy current (λ_2'') ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสูญเสียในเกราะป้องกันและความสูญเสียจากท่อร้อยสาย ได้แก่ การจัดเรียงสายเคเบิล โครงสร้างของสายเคเบิล ขนาดของตัวนำ และของความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

5.3.5 การคำนวณตัวคูณลดฮาร์โมนิก (Harmonic Derating Factor, HDF)

$$HDF = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_n^2 \beta_n}} \quad (65)$$

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (66)$$

$$\beta_n = \frac{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_n \dots}{\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_{fund}} \quad (67)$$

โดยที่ I_n กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n

$\left(\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \right)_n$ อัตราส่วนของความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ n เท่าของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานต่อความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง

การคำนวณหาพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลเนื่องจาก Harmonic คำนวณได้จาก

$$I = I_R \times HDF \quad (68)$$

I_R คือ กระแสพิกัดที่ความถี่มูลฐาน

HDF คือ Harmonic derating factor

การคำนวณหาพิกัดกระแสที่ต้องเพิ่มขึ้นของสายเคเบิลเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกไหลผ่านตัวนำคำนวณได้จาก

$$I = \frac{I_1}{HDF} \quad (49)$$

I_1 คือ กระแสไหลที่ความถี่มูลฐาน

HDF คือ Harmonic derating factor

5.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิลที่ระดับแรงดันต่ำ (Low Volt)

ตัวอย่างที่ 5.1 สาย THW ขนาด 2.5 mm^2 เดินลอยในอากาศ

ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20°C (R'_{dc}) = $7.41 \Omega / \text{Km}$

$$D_c = 1.78 \text{ mm} = 0.07$$

$$D_i = 4 \text{ mm} = 0.157$$

$$T_c = 70^\circ\text{C}$$

$$T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$\bar{\rho}_{PVC} = 357^\circ\text{CCm} / \text{watt}$$

จาก
$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a - \Delta T_d)}{R'_{dc} (1 + Y_c) R'_{ca}}}$$

ค่า ΔT_d มีค่าประมาณ 0 ในระบบแรงดัน Low Volt

1. หา R'_{dc} จาก

$$\begin{aligned} R'_{dc} &= R'_{dc} (304.8) \frac{\tau + T_c}{\tau + 20} \\ &= 7.41(304.8) \frac{[234.5 + 70]}{[234.5 + 20]} \\ &= 2702.3 \mu\Omega / \text{foot} \end{aligned}$$

2. หาค่า \bar{R}'_{ca} จาก

$$\bar{R}'_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \bar{R}_i &= 0.012 \rho_i \log \frac{D_i}{D_c} \\ &= 0.012(357) \log \frac{4}{1.78} \\ &= 1.51 \text{ Thermal Ohm-foot} \end{aligned}$$

$$\bar{R}_e = \frac{15.6n'}{D_s \{(\Delta T / D_s')^{\frac{1}{4}} + 1.6\varepsilon(1 + 0.0167T_m)\}}$$

$$\bar{R}_e = \frac{1.56}{1.157\{(30/0.157)^{1/4} + 1.6(0.95)(1 + 0.0167(55))\}}$$

$$\bar{R}_e = 15 \text{ Thermal Ohm-foot}$$

$$\therefore \bar{R}'_{ca} = 15 + 1.51 \text{ Thermal Ohm-foot}$$

3. หาค่า I จากสมการ

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c)R'_{ca}}} \\ &= \sqrt{\frac{70 - 40}{(2702.3)(16.51)}} \\ &= 26A \end{aligned}$$

จากมาตรฐานจากการไฟฟ้านครหลวงมีพิกัดกระแส 23A

ตัวอย่างที่ 5.2 สาย XLPE เกินเดี่ยวดินลอยในอากาศ

สาย XLPE ขนาด 25 mm^2

ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20°C $R'_{dc} = 0.727 \Omega / \text{Km}$

$$D_c = 6 \text{ mm} = 0.236 \text{ in}$$

$$D_i = (D_c + 2T) = (6 + 2 \cdot 0.7) = 7.4 \text{ mm} = 0.291 \text{ in}$$

$$t = 1.4 \text{ mm} = 0.055 \text{ in}$$

$$D_j = 11.5 \text{ mm} = 0.453 \text{ in}$$

$$T_c = 90^\circ\text{C}$$

$$T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$f = 50\text{Hz}$$

$$\bar{\rho} \text{ PVC} = 357^\circ\text{CCm/Watt}$$

$$\bar{\rho} \text{ XLPE} = 385^\circ\text{CCm/Watt}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า ΔT_d มีค่าประมาณ 0 ในระบบแรงดัน Low Volt

$$\begin{aligned} 1. \quad R_{dc} &= (\bar{R}'_{dc})(304.8) \left(\frac{234.5 + 90}{234.5 + 20} \right) \\ &= (0.727)(304.8) \left(\frac{234.5 + 90}{234.5 + 20} \right) \\ &= 282.537 \mu\Omega / \text{foot} \end{aligned}$$

$$2. \quad \bar{R}'_{ca} = \bar{R}_i + \bar{R}_j + \bar{R}_e$$

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

$$= 0.012(385) \log \left(\frac{0.291}{0.236} \right)$$

$$= 0.42 \text{ Thermal Ohm-foot}$$

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

$$= 0.0104(357)(1) \frac{0.055}{0.453 - 0.055}$$

$$= 0.513 \text{ Thermal Ohm-foot}$$

$$\bar{R}_e = \frac{15.6n'}{D_s'[(\Delta T / D_s')^{1/4} + 1.6(0.95)(1 + 0.0167T_m)]}$$

$$= \frac{15.6}{(0.453)[((90 - 40) / 0.453)^{1/4} + 1.6(0.95)(1 + 0.0167(90 + 40) / 2)]}$$

$$= 5.371 \text{ Thermal Ohm-foot}$$

$$\bar{R}'_{ca} = 0.421 + 0.513 + 5.371$$

$$\bar{R}'_{ca} = 6.305 \text{ Thermal Ohm-foot}$$

$$3. \quad Y_c = Y_{cs} + Y_{cp}$$

$$X_s = 0.857 \sqrt{\frac{fk_s}{R_{dc}}} = 0.857 \sqrt{\frac{50 * 1}{282.537}} = 0.368$$

$$Y_{cs} = F(x_s) = 0.0001$$

$$Y_c = Y_{cs}$$

$$= 0.0001$$

$$4. \quad I = \sqrt{\frac{(90 - 40)}{282.537 * (1 + 0.0001)(6.305)}}$$

$$= 0.167 \text{ KA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 167A

จากมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงมีพิถั้ดกระแส 148A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การออกแบบโปรแกรมและผลการทดสอบโปรแกรม

6.1 วิธีการใช้โปรแกรม

The screenshot shows the 'โปรแกรมการคำนวณกระแสโดยคำนึงถึงผลกระทบฮาร์โมนิกส์' (Amp program) interface. It includes a menu bar (File, Edit data, Help), navigation buttons (Back, Next, Print Setup, Print, Help), and a main area divided into two sections: 'ป้อนข้อมูลการใช้งาน' (Input data) and 'ค่า Harmonics Order และ Harmonics Content %' (Harmonics Order and Content %).

ป้อนข้อมูลการใช้งาน (Input data):

- กำหนดกระแสไหล: A
- หรือเลือกพิกัดของหม้อแปลง: 250 KVA
- เลือกขนาดสาย: 300 มม²
- เลือกความถี่ที่ใช้งาน: 50
- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม: 40
- ชนิดของสายเคเบิล: THW
- NYY
- XLPE
- รูปแบบการติดตั้ง:
 - เดินลอยในอากาศ
 - เดินร้อยท่อในอากาศ
 - เดินร้อยท่อใต้ดิน
 - เดินใน Cable Tray

ค่า Harmonics Order และ Harmonics Content %:

สายเฟส		สายนิวทรัล	
Harmonic Order	Harmonic Content	Harmonic Order	Harmonic Content
30	0.49	3	100
31	0.43	6	0
32	0	9	0
33	0	12	0
34	0	15	0
35	0	18	0
36	0		
37	0		
38	0		
39	0		
40	0		

รูปที่ 6.1 หน้าจอป้อนค่าก่อนการคำนวณ

1. เปิดโปรแกรม Amp จะแสดงหน้าจอเพื่อให้ผู้ใช้ป้อนค่าดังรูปที่ 6.1
2. ป้อนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณดังนี้
 - กระแสไหลหรือเลือกขนาดพิกัดของหม้อแปลง
 - ขนาดสายเคเบิล
 - ชนิดของสายเคเบิล
 - รูปแบบการติดตั้ง
 - ความถี่ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุณหภูมิสถานะแวดล้อม
- Harmonic order และ Harmonic content

3. ป้อนข้อมูลจนครบแล้วคลิกปุ่ม Next จะปรากฏหน้าจอแสดงผลการคำนวณดังรูปที่ 6.2

Phase	กระแส		HDF หรือ NHDF		กระแสเมื่อมีฮาร์โมนิกส์		กำลังที่สูญเสีย
	สาย	โหลด			สาย	โหลด	
A,B,C	400 A	379.84 A	0.8824		352.94 A	430.48 A	12.701 W
N	400 A	379.84 A	0.6623		264.91 A	573.54 A	12.657 W
ขนาดสาย		300 mm ²		จำนวนสายต่อเฟส เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกส์			
ชนิดสายเคเบิล		THW		สายเส้นไฟ		2	เส้น
รูปแบบการติดตั้ง		เดินร้อยท่อในอากาศ		สายนิวทรอล		2	เส้น

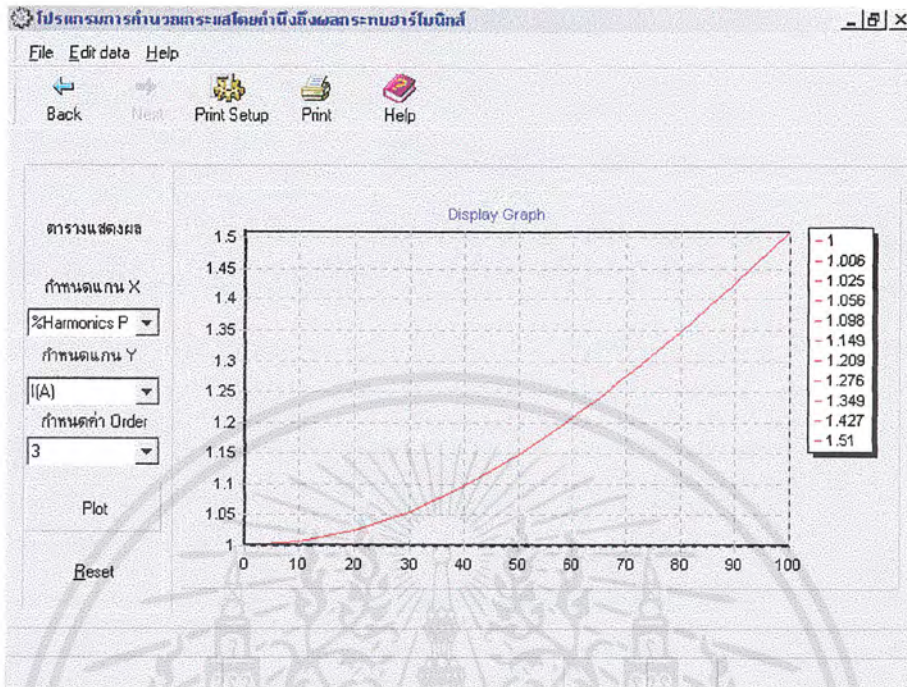
รูปที่ 6.2 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ

โดยที่ตารางจะแสดงผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

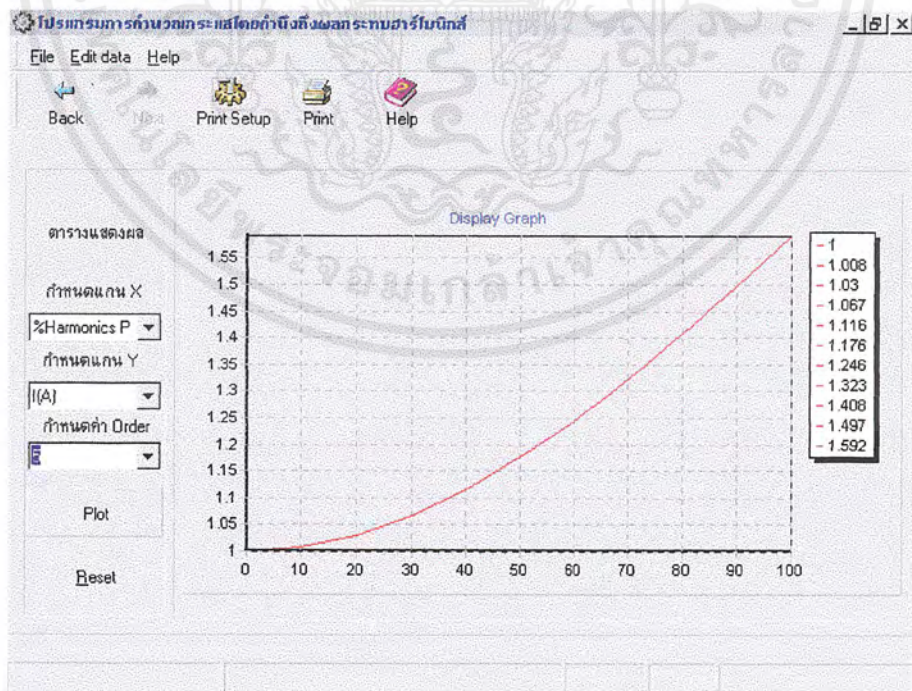
- ค่า HDF ของสายเฟส และค่า NHDF ของสายนิวทรอล
- ขนาดพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิล
- ขนาดกระแส โหลดที่สายเคเบิลต้องรองรับได้เมื่อมีฮาร์โมนิก
- ขนาดของสายเคเบิล
- ชนิดของสายเคเบิล
- รูปแบบการติดตั้ง
- จำนวนสายที่ใช้
- กำลังงานที่สูญเสีย

นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกกับขนาดกระแสในรูปต่อหน่วย (SIZE IN PER UNIT) และกำลังงานสูญเสียได้ดังรูปต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



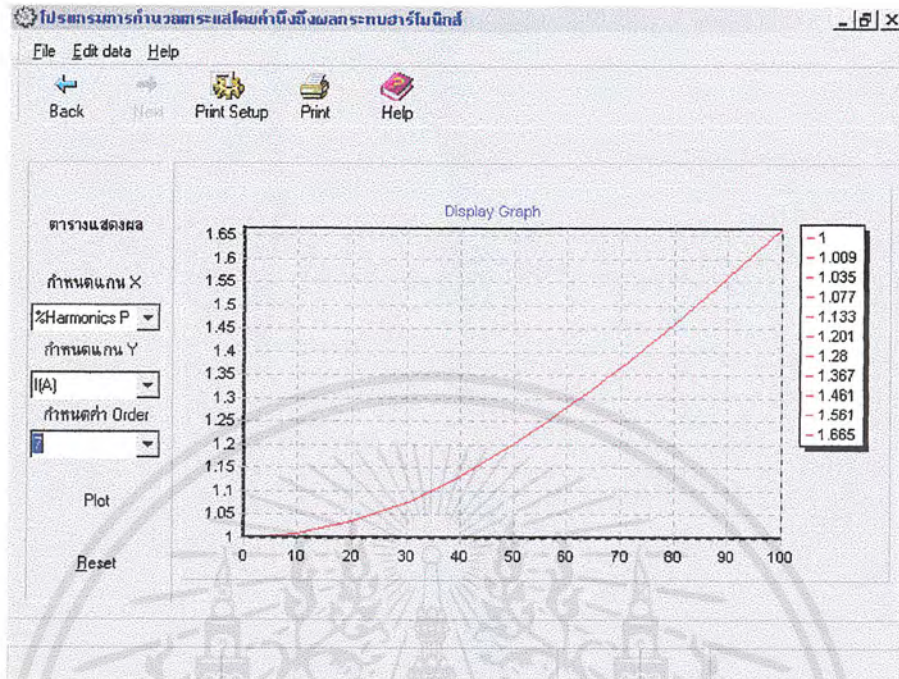
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแส
ในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกลำดับที่ 3



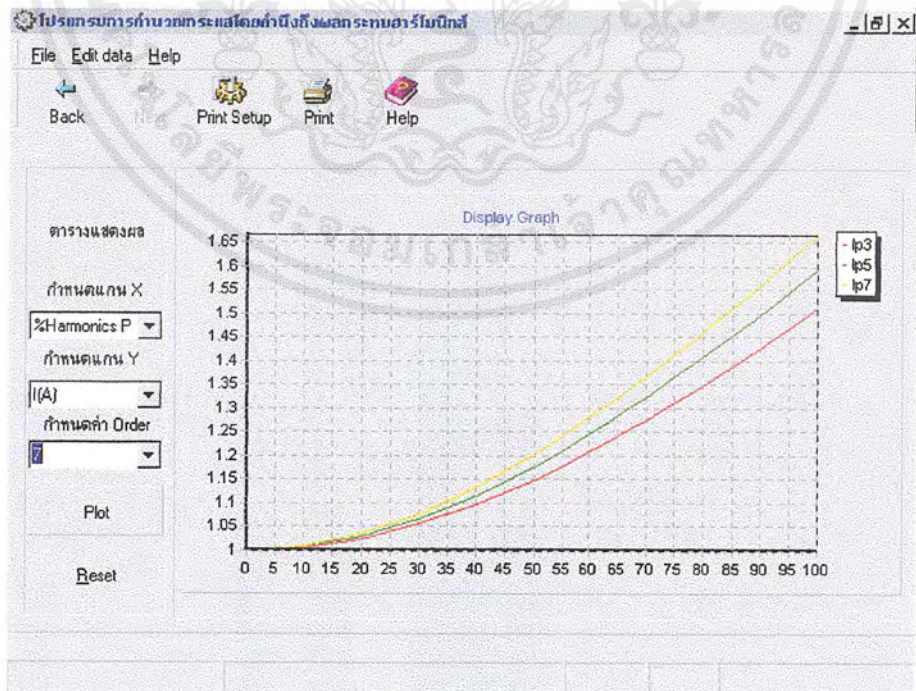
รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแส

ในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกลำดับที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



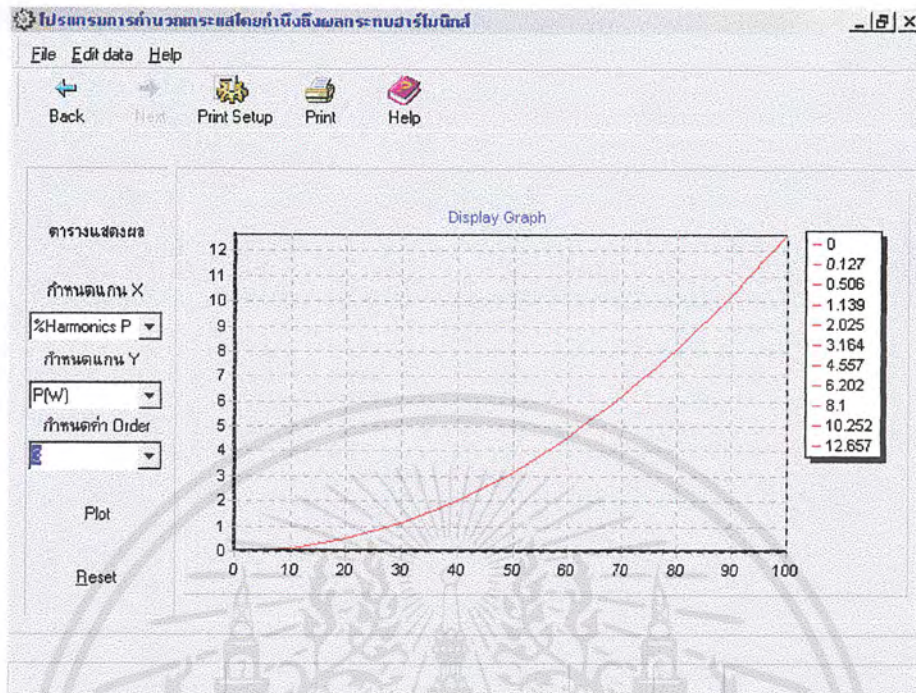
รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแส
ในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 7
ในกรณีต้องการแสดงขนาดกระแสในรูปต่อหน่วยเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกลำดับ
ต่างๆบนแกนเดียวกันแสดงดังรูปที่ 6.6



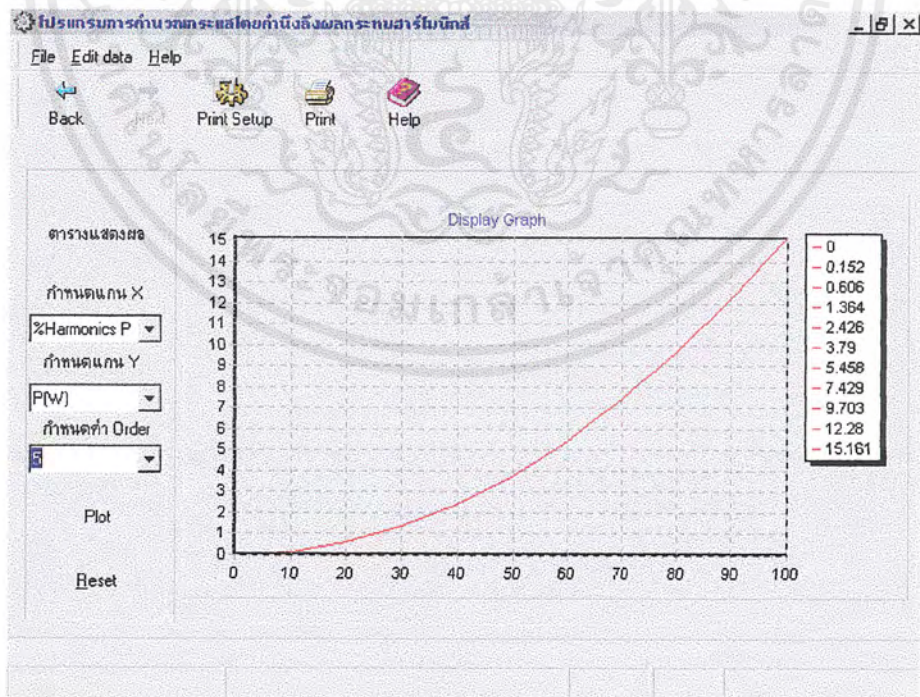
รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสใน

รูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



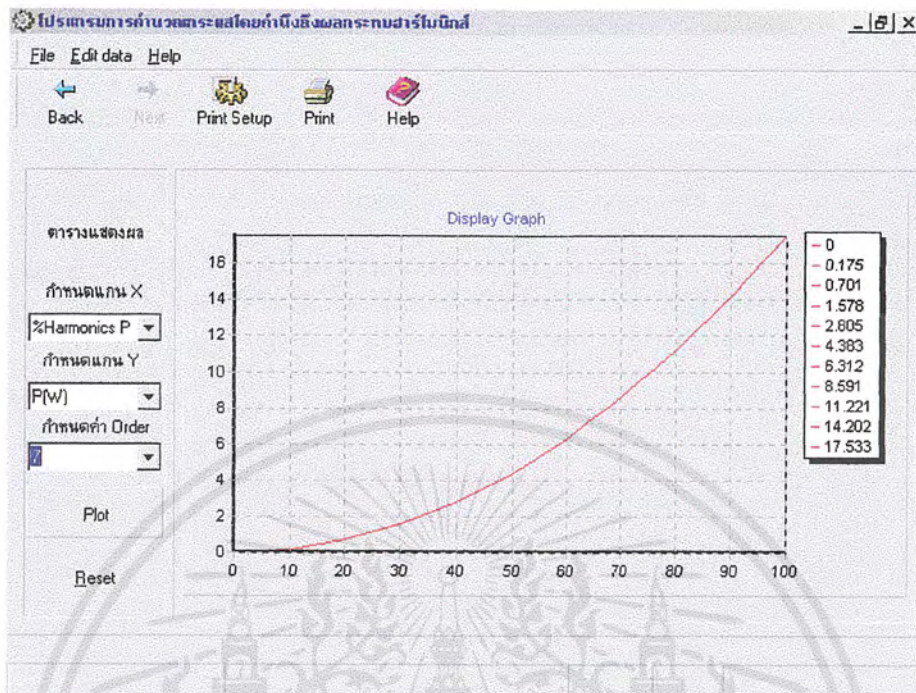
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3



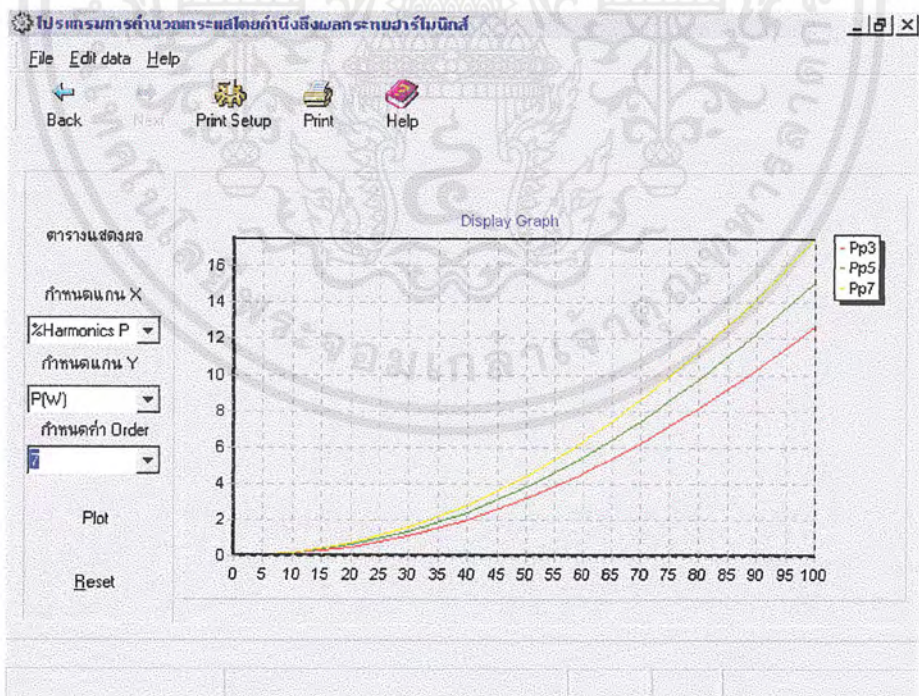
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

กำลังงานสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



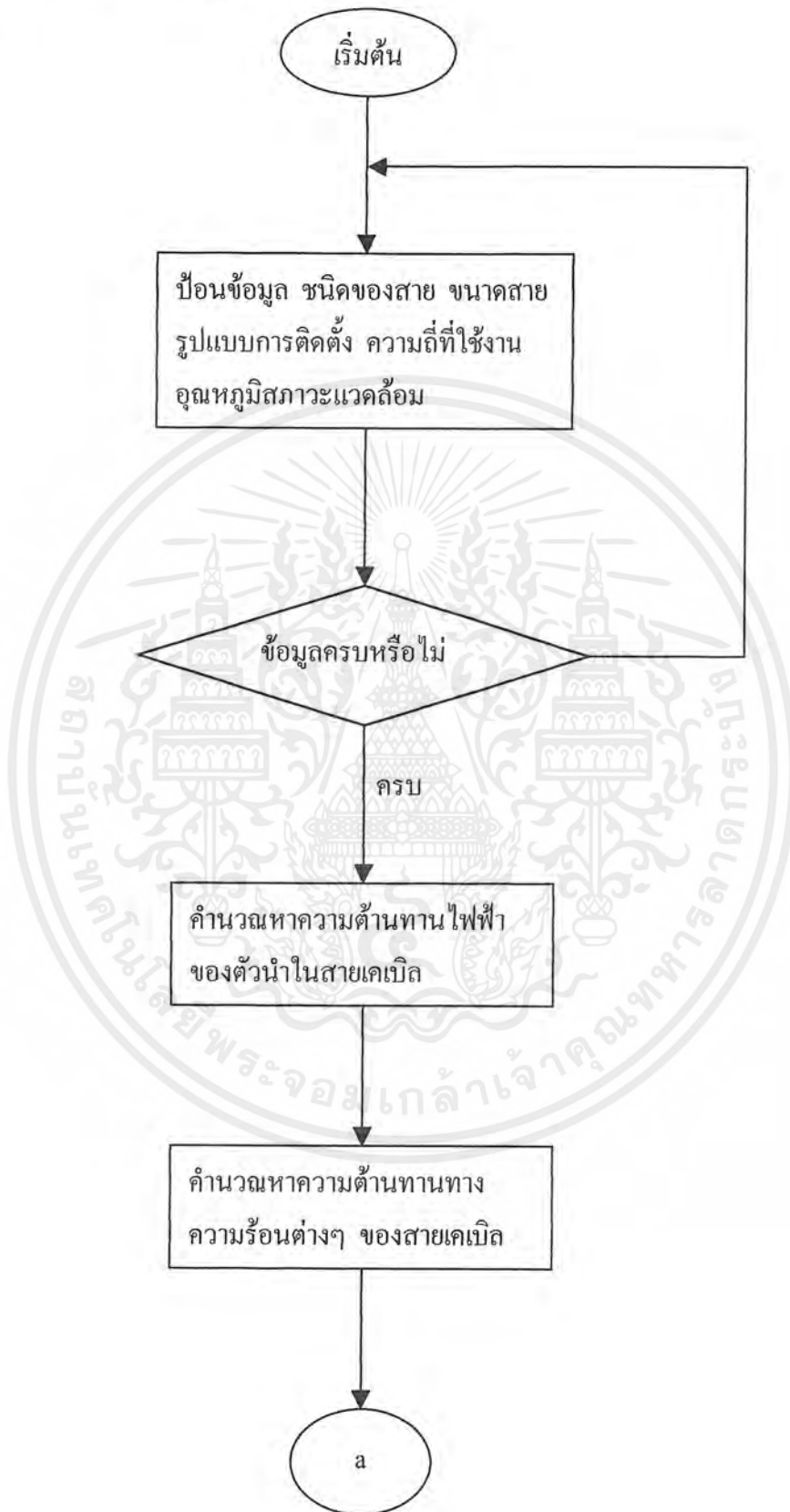
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 7



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,5 และ 7

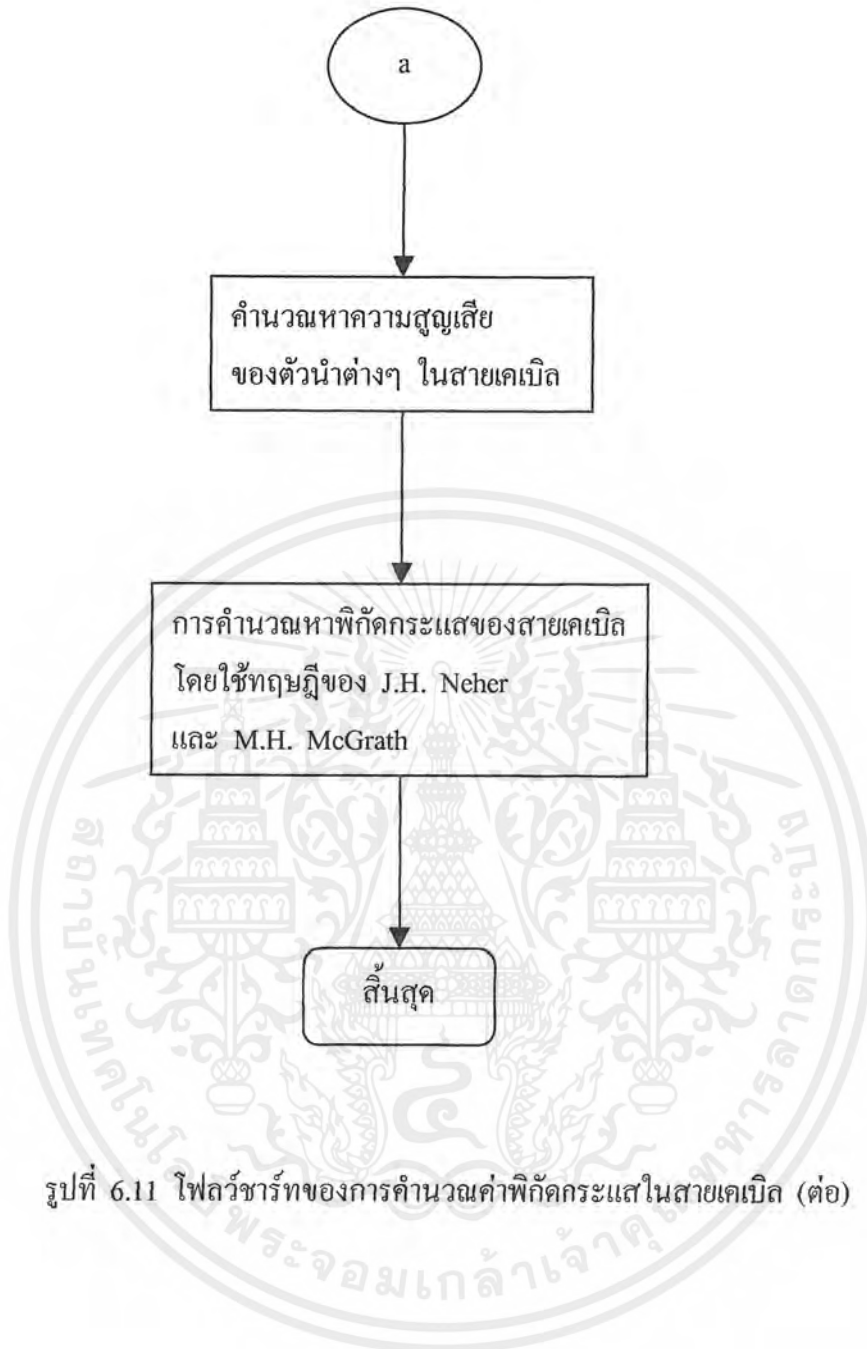
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 โฟลว์ชาร์ท ของการคำนวณ

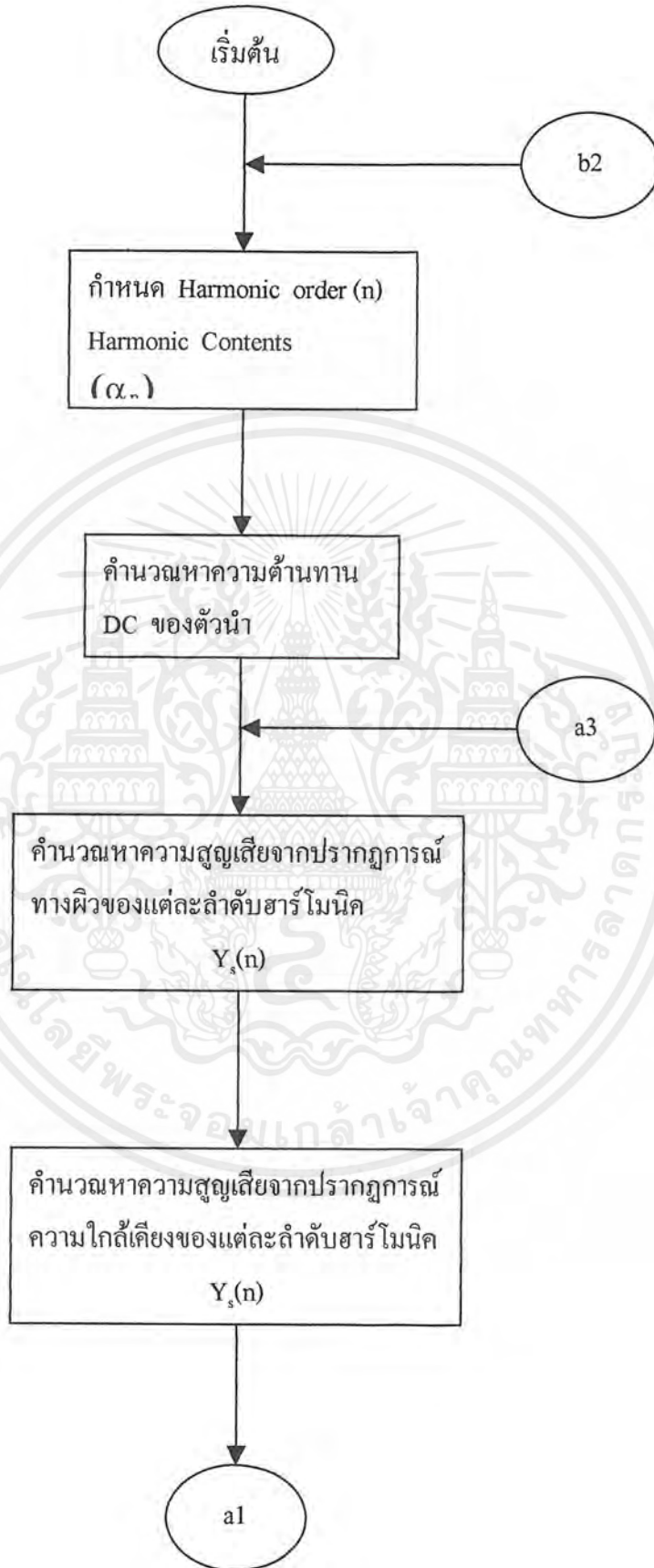


รูปที่ 6.11 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

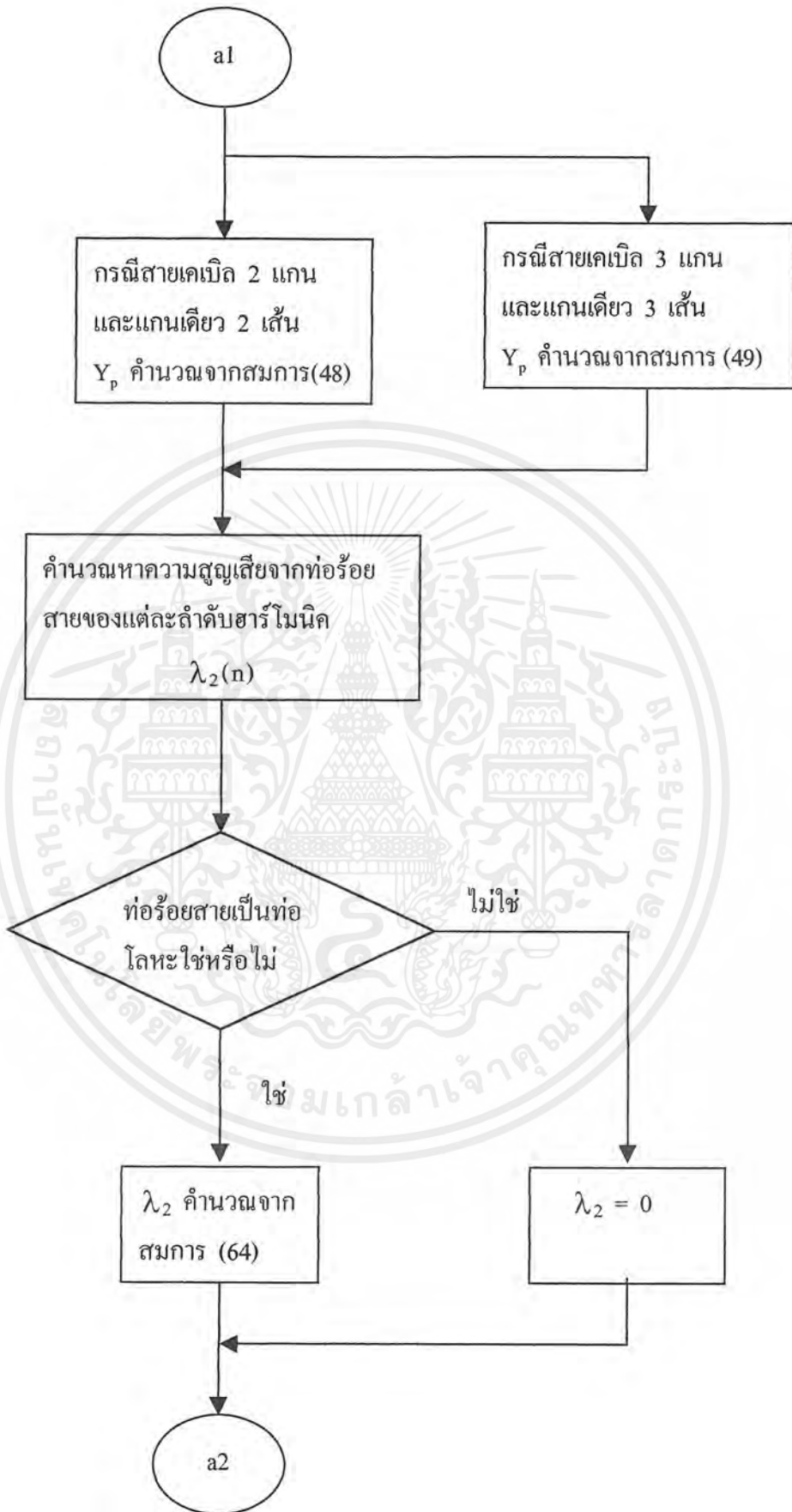


รูปที่ 6.11 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณค่าพิกัดกระแสในสายเคเบิล (ต่อ)



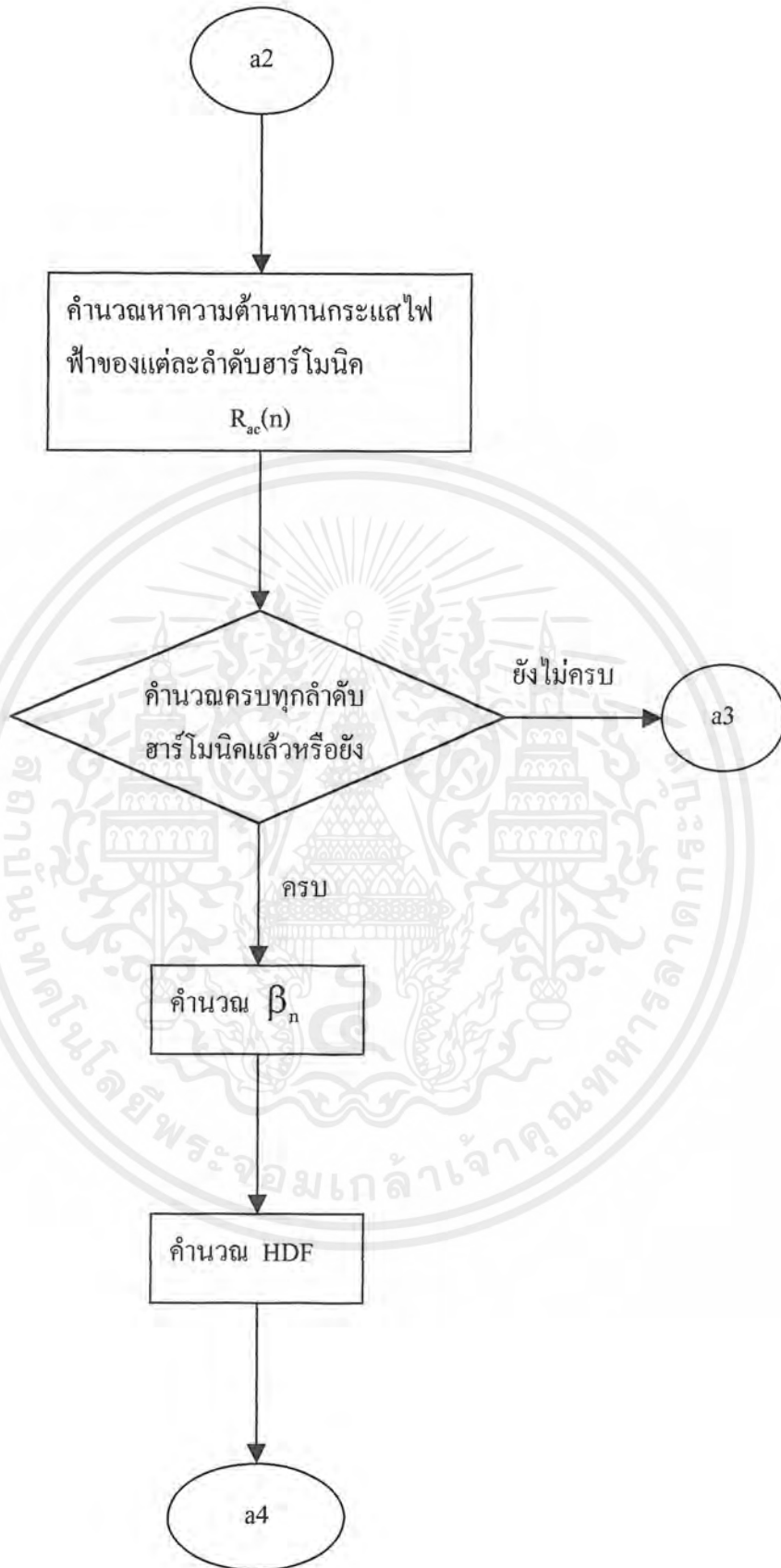
รูปที่ 6.12 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณค่า HDF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



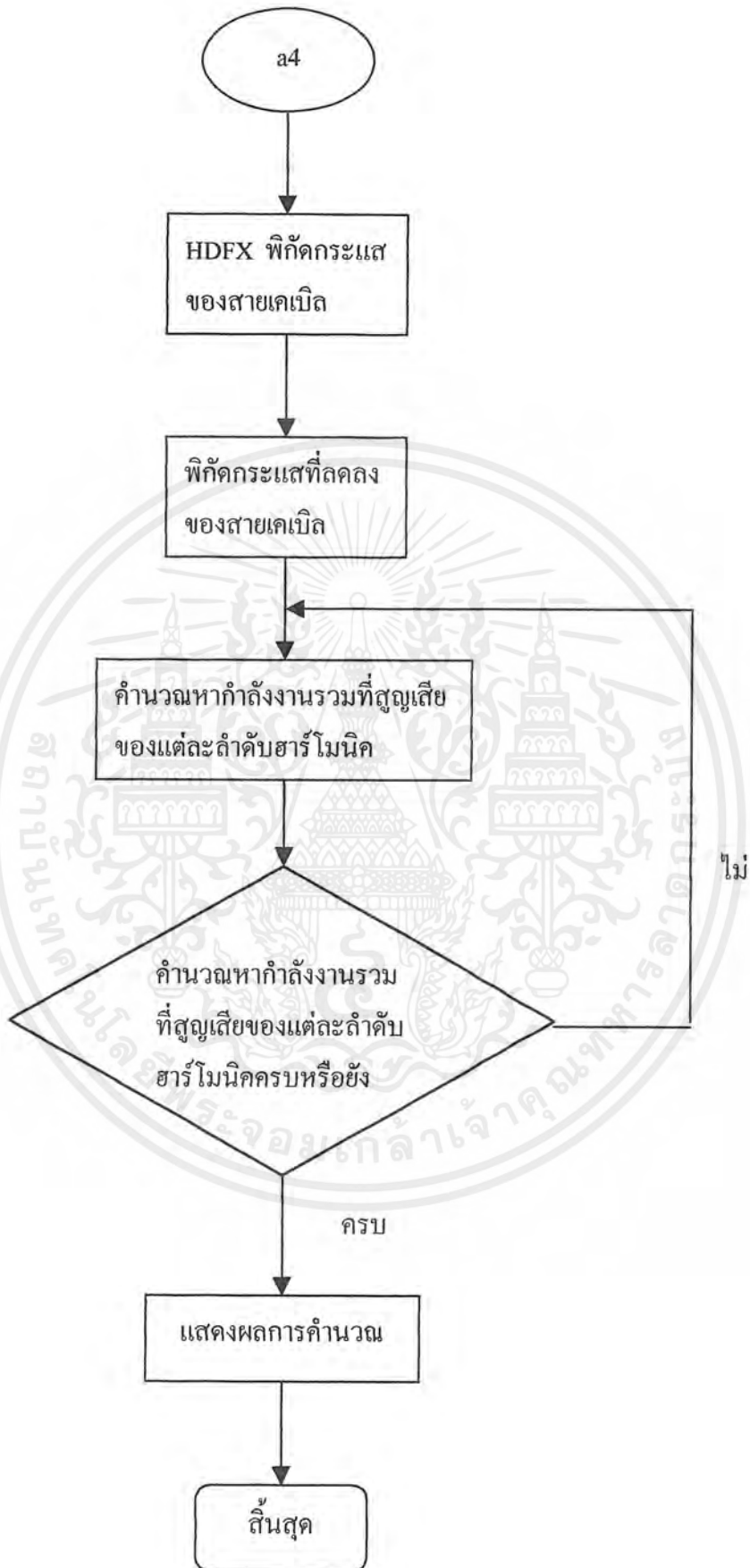
รูปที่ 6.12 โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณค่า HDE (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



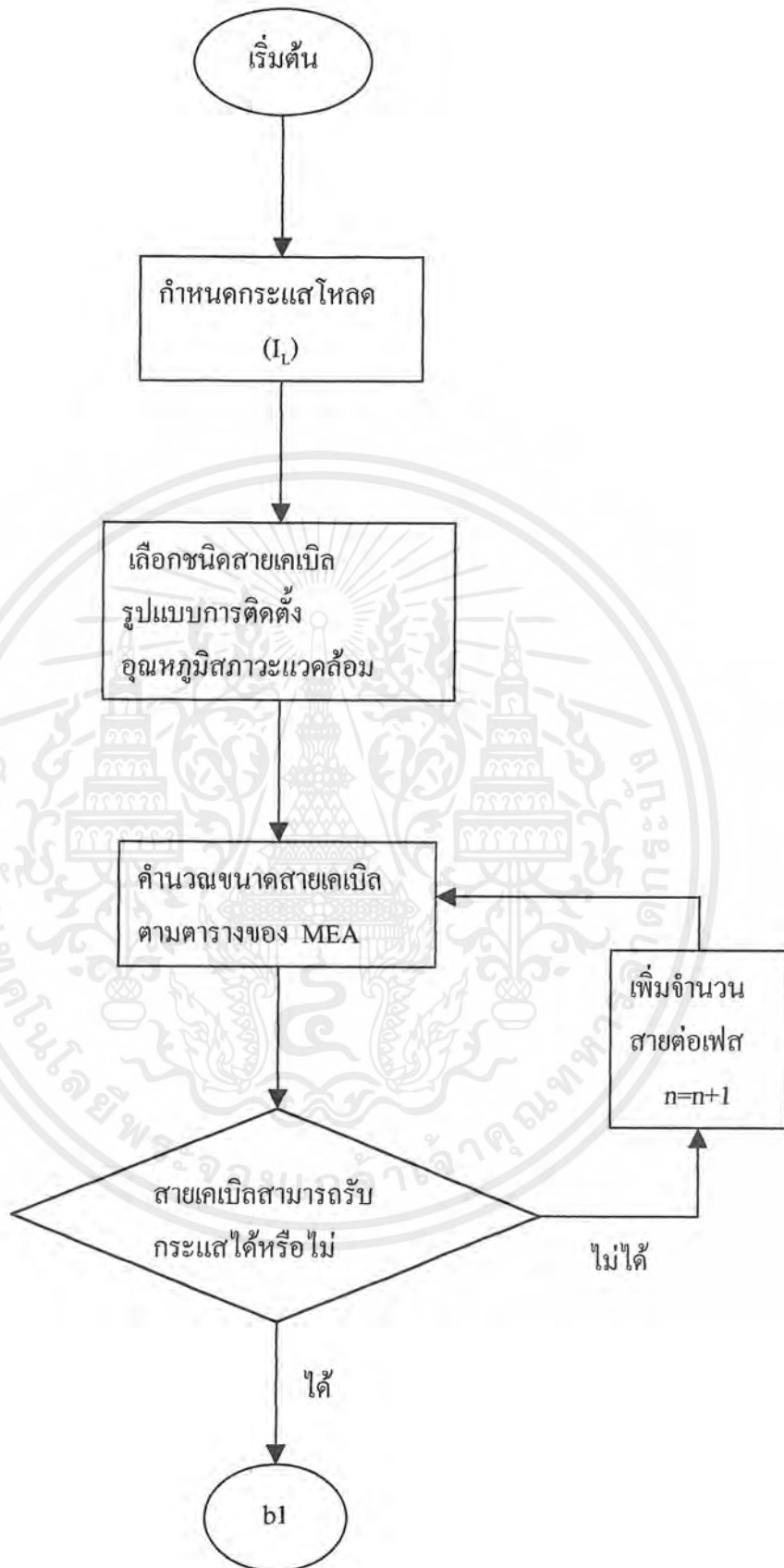
รูปที่ 6.12. โฟลว์ชาร์ทของการคำนวณค่า HDF (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 ไฟล์ชาร์ทของการคำนวณค่า HDF (ต่อ)

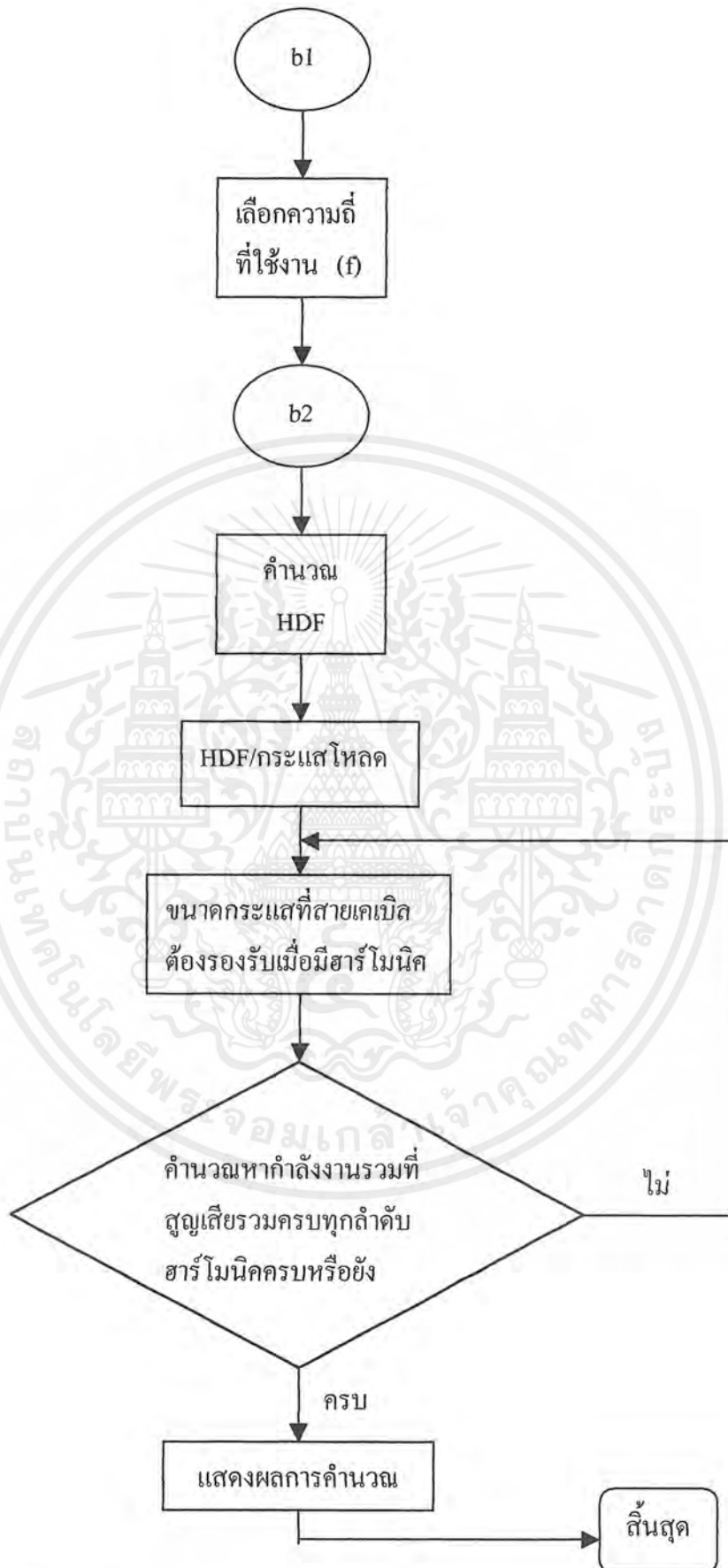
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนลิขสิทธิ์อื่นใดในชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 โพลีชาร์ทการคำนวณขนาดกระแสที่สายเคเบิลต้องรองรับได้

เมื่อมีฮาร์โมนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 โฟลว์ชาร์ทการคำนวณขนาดกระแสที่สายเคเบิลต้องรองรับได้เมื่อมีฮาร์โมนิก (ต่อ)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

6.3.1 การคำนวณหาพิคัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลเนื่องจากผลของฮาร์โมนิก

สาย THW เดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิคัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
0.5	8.95	8.05	7.16	6.27	5.37	4.48
1.0	13.20	11.88	10.56	9.24	7.92	6.60
1.5	16.90	15.21	13.52	11.83	10.14	8.45
2.5	22.60	20.34	18.08	15.82	13.56	11.30
4	30.87	27.78	24.69	21.61	18.52	15.44
6	41.98	37.78	33.58	29.38	25.18	20.99
10	59.45	53.50	47.56	41.61	35.67	29.72
16	80.29	72.26	64.23	56.20	48.17	40.14
25	110.86	99.77	88.68	77.60	66.51	55.43
35	136.10	122.49	108.88	95.27	81.66	68.05
50	168.36	151.52	134.68	117.85	101.01	84.18
70	215.61	194.05	172.48	150.92	129.36	107.80
95	268.73	241.85	214.98	188.11	161.24	134.36
120	314.17	282.75	251.33	219.91	188.50	157.08
150	362.26	326.03	289.80	253.58	217.35	181.13
185	422.34	380.106	337.87	295.64	253.40	211.17
240	504.76	454.28	403.80	353.33	302.86	252.38
300	587.66	528.89	470.13	411.36	352.59	293.83
400	653.43	588.08	522.74	457.40	392.06	326.71
500	816.61	734.95	653.28	571.62	489.96	408.30

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงพิคัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย THW

เดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย THW เดินร้อยท่อในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
0.5	7.62	6.68	6.09	5.33	4.57	3.81
1.0	11.10	9.99	8.88	7.77	6.66	5.55
1.5	14.02	12.61	11.21	9.81	8.41	7.01
2.5	18.55	16.69	14.84	12.98	11.31	9.27
4	24.86	22.37	19.88	17.40	14.91	12.43
6	32.20	28.98	25.76	22.54	19.32	16.10
10	44.90	40.41	35.92	31.43	26.94	22.45
16	58.66	52.79	46.92	41.06	35.19	29.33
25	77.25	69.52	61.8	54.07	46.35	38.63
35	93.22	83.89	74.57	65.25	55.93	46.61
50	118.36	106.52	94.68	82.85	71.01	59.18
70	164.96	132.26	117.56	102.87	88.17	73.48
95	185.94	167.34	148.75	130.16	111.56	92.97
120	212.85	191.56	170.28	148.99	127.71	106.42
150	249.48	224.53	199.58	174.63	149.68	124.74
185	287.39	258.65	229.91	201.17	172.43	134.69
240	343.6	309.24	274.88	240.52	206.16	171.8
300	399.48	359.52	319.58	279.63	239.68	199.74
400	473.98	426.58	379.18	331.78	284.3	236.99
500	540.62	486.56	432.49	378.43	324.37	270.31

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย THW

เดินร้อยท่อในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย THW เดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
0.5	8.53	7.67	6.82	5.97	5.11	4.26
1.0	12.58	113.2	10.06	8.80	7.54	6.29
1.5	15.53	13.97	12.42	10.87	9.32	7.76
2.5	20.65	18.58	16.52	14.45	12.39	10.32
4	27.90	25.11	22.32	19.53	16.74	13.95
6	36.55	32.89	29.24	25.58	21.93	18.27
10	49.9	44.91	39.92	34.93	29.94	24.95
16	66.18	59.56	52.94	46.32	39.70	33.09
25	89.14	80.22	71.31	62.39	53.48	49.52
35	109.42	98.48	87.53	76.59	65.65	54.71
50	135.03	121.52	108.02	94.52	81.01	67.51
70	169.24	152.31	135.39	118.46	101.54	84.62
95	209.99	188.99	167.99	146.99	125.99	104.99
120	242.8	218.52	194.24	169.96	145.68	121.4
150	280.64	252.58	224.51	196.44	168.38	140.32
185	323.46	290.93	258.60	226.28	193.95	161.63
240	383.46	345.1	306.76	268.42	230.07	191.73
300	444.40	399.96	355.52	311.08	266.64	222.20
400	523.30	470.94	418.64	366.31	313.98	261.65
500	600.20	540.18	480.16	420.14	360.12	300.10

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย THW
เดินร้อย ท่อใต้ดินที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย NYY เดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
1.0	17.61	15.85	14.08	12.32	10.56	8.80
1.5	22.15	19.93	17.72	15.50	13.29	11.08
2.5	29.21	26.29	23.36	20.44	17.52	14.60
4	38.41	34.57	30.73	26.88	23.04	19.20
6	50.82	45.73	40.65	35.57	30.49	25.41
10	69.14	62.22	55.31	48.39	41.48	34.57
16	91.14	82.02	72.91	63.79	54.68	45.57
25	121.87	109.68	97.49	85.30	73.12	60.93
35	149.83	134.84	119.86	104.88	89.89	74.91
50	178.13	160.31	142.50	124.69	106.87	89.06
70	229	206.1	183.2	160.3	137.4	114.5
95	280.45	252.40	224.36	196.31	168.27	140.22
120	329.81	296.83	263.84	230.86	197.88	164.90
150	381.82	343.64	305.45	267.27	229.09	190.91
185	439.78	395.80	351.82	307.84	263.86	219.89
240	523.65	471.28	418.92	366.55	314.19	261.82
300	610.9	549.81	488.72	427.63	366.54	305.45
400	717.72	645.94	574.17	502.40	430.63	358.86
500	814.26	732.83	651.40	569.98	488.55	407.123

ตารางที่ 6.4 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย NYY
เดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย NYY เดินร้อยท่อในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
1.0	9.98	8.98	7.98	6.98	5.98	4.98
1.5	12.44	11.19	9.95	8.70	7.46	6.22
2.5	16.65	14.98	13.32	11.65	9.99	8.32
4	22.19	19.97	17.75	15.53	13.31	11.09
6	29.61	26.65	23.68	20.72	17.76	14.80
10	41.08	36.97	32.86	28.75	24.64	20.54
16	55.23	49.70	44.18	38.66	33.13	27.61
25	75.14	67.62	60.11	52.59	45.08	37.57
35	93.9	84.51	75.12	65.73	56.34	46.95
50	115.74	104.16	92.59	81.01	69.44	57.87
70	146.03	131.42	116.82	102.22	87.61	73.01
95	184.71	166.24	147.76	129.29	110.82	92.35
120	216.42	194.77	137.13	151.49	129.85	108.21
150	256.8	231.12	205.44	179.76	154.08	128.4
185	296.44	266.79	237.15	207.50	177.86	148.22
240	356.63	320.96	285.30	249.64	213.97	178.31
300	414.6	373.14	331.68	290.22	248.76	207.3
400	486.88	438.19	389.50	340.81	292.12	243.44
500	556.21	500.59	444.96	389.34	333.72	278.16

ตารางที่ 6.5 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย NYY
เดินร้อย ท่อในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย NYY เดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 40 °C

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
1.0	12.16	10.94	9.73	8.51	7.29	6.08
1.5	15.10	13.59	12.08	10.57	9.06	7.55
2.5	20.32	18.28	16.26	14.22	12.19	10.16
4	26.93	24.23	21.54	18.85	16.15	13.46
6	35.58	32.02	28.46	24.90	21.34	17.79
10	49.26	44.33	39.40	34.48	29.55	24.63
16	65.63	59.06	52.50	45.94	39.37	32.81
25	89.18	80.26	71.34	62.42	53.50	44.59
35	110.18	99.16	88.14	77.12	66.10	55.09
50	134.91	121.42	107.92	94.43	80.94	67.45
70	169.6	152.64	135.68	118.72	101.76	84.8
95	212	190.8	169.6	148.4	127.2	106
120	245.86	221.27	196.68	172.10	147.51	122.93
150	289.53	260.57	231.62	202.67	173.71	144.76
185	333.72	300.34	266.97	233.60	200.23	166.86
240	396.16	356.54	316.92	277.31	237.69	198.08
300	458.2	412.38	366.56	320.74	274.92	229.1
400	535.67	482.10	428.53	374.96	321.40	267.83
500	607.47	546.72	485.97	425.23	364.48	303.73

ตารางที่ 6.6 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย NYY
เดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย XLPE เดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
2.5	35.18	31.66	28.14	24.62	21.10	17.59
4	46.7	42.03	37.36	32.69	28.02	23.35
6	59.88	53.89	47.90	41.91	35.92	29.94
10	80.6	72.54	64.48	56.42	48.36	40.3
16	107.19	96.47	85.75	75.03	64.31	53.59
25	147.25	132.52	117.8	103.07	88.35	73.62
35	178.38	160.54	142.70	124.86	107.02	89.19
50	216.87	195.18	173.49	151.80	130.12	108.43
70	276.25	248.62	221	193.38	165.75	138.13
95	248.74	223.86	198.99	174.11	149.24	124.37
120	407.96	367.16	326.36	285.57	244.77	203.98
150	470.39	423.35	376.31	329.27	282.23	235.19
185	552.28	497.05	441.82	386.59	331.36	276.14
240	664.37	597.93	531.49	465.06	398.62	332.18
300	765.95	689.35	612.76	536.16	459.51	382.97
400	910.8	819.72	728.64	637.56	546.48	405.4

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย XLPE
เดินลอยในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย XLPE เดินร้อยท่อในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
2.5	26.31	23.68	21.04	18.41	15.78	13.15
4	34.51	31.06	27.60	24.15	20.70	17.25
6	42.78	38.50	34.22	29.94	25.66	21.39
10	56.89	51.20	45.51	39.82	34.13	28.44
16	74.36	66.92	59.48	52.05	44.61	37.18
25	97.28	87.55	77.82	68.09	58.36	48.64
35	116.97	105.27	93.57	81.88	70.18	58.48
50	148.60	133.74	118.88	104.02	89.16	74.30
70	181.44	163.29	145.15	127.01	108.86	90.72
95	231.40	208.26	185.12	161.98	138.84	115.70
120	266.20	239.58	212.96	186.34	159.72	133.10
150	313.37	282.03	250.69	219.36	188.02	156.68
185	361.63	325.46	289.30	253.14	216.97	180.81
240	437.36	393.62	349.88	306.15	262.41	218.68
300	504.42	453.97	403.53	353.09	302.65	252.21
400	603.18	542.86	482.54	422.22	361.90	301.59

ตารางที่ 6.8 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่าง ๆ ของสาย XLPE
เดินร้อย ท่อในอากาศที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย XLPE เดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 40 °c

ขนาดของสาย (mm ²)	ขนาดพิกัดกระแสที่ ความถี่มูลฐาน (A)	Harmonic Derating Factor (HDF)				
		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
2.5	28.99	26.09	23.19	20.29	17.39	14.49
4	38.60	34.74	30.88	27.02	23.16	19.30
6	49.08	44.17	39.26	34.35	29.44	24.54
10	66.07	59.46	52.85	46.25	39.64	33.03
16	85.86	77.27	68.68	60.10	51.51	42.93
25	112.84	101.55	90.27	78.98	67.70	56.42
35	193.12	125.20	111.29	97.38	83.47	69.56
50	170.5	153.45	136.4	119.35	102.3	85.25
70	212.31	191.08	169.84	148.61	127.38	106.15
95	263.59	237.23	210.87	184.51	158.15	131.79
120	305.4	274.86	244.32	213.78	183.24	152.7
150	349.04	314.14	279.23	244.33	209.42	174.52
185	404.26	363.83	323.40	282.98	242.55	202.13
240	482.11	433.89	385.68	337.47	289.26	241.55
300	572.67	515.40	458.13	400.87	343.60	286.38
400	681.09	612.98	544.87	476.76	408.65	340.54

ตารางที่ 6.9 ตารางแสดงพิกัดกระแสที่ลดลงของสายเคเบิลที่ HDF ค่าต่างๆ ของสาย XLPE
เดินร้อย ท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 40 °c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

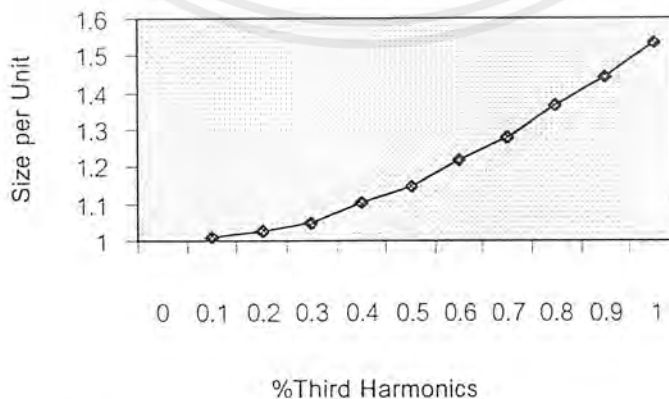
6.3.2 การคำนวณหาขนาดกระแสที่สายเคเบิลต้องรองรับได้เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกไหลผ่านตัวนำ ผลการคำนวณ Harmonic Derating Factor ของสายนิวทรอล (NHDF) ของหม้อแปลงกำลังพิกัด 250 kVA (ระบบ 3 เฟส 4 สาย) วางในตู้ร้อยสายขนาด 5 นิ้ว สายเคเบิลมีกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ที่เปอร์เซ็นต์ต่าง เมื่อเทียบกับกระแสที่ความถี่มูลฐานแสดงดังตารางที่ 6.10

%Third Harmonic	Derating factor due to effect of zero sequence current in neutral	
	NHDF	MEA
20	0.9748	1
40	0.9005	1
60	0.8099	1
80	0.7193	1
100	0.6379	1

ตารางที่ 6.10 แสดงค่า Derating Factor ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง (MEA)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายนิวทรอลคิดในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 แสดงในกราฟรูปที่ 6.14

Size per Unit & Third Harmonics



รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสายนิวทรอล (Per Unit) และเปอร์เซ็นต์

ของฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

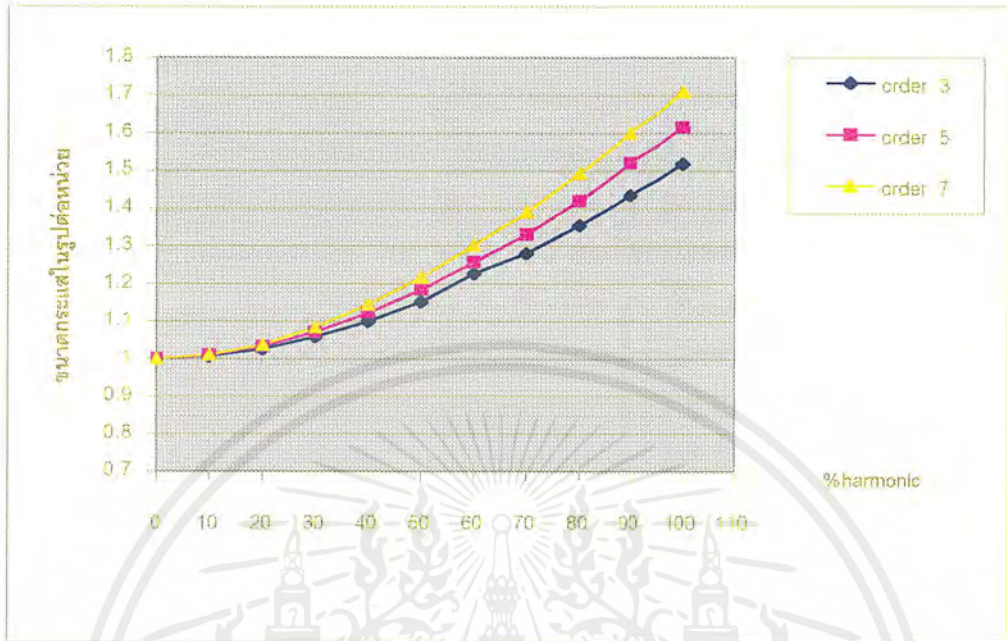
จากกราฟจะพบว่าถ้าไม่มีกระแสฮาร์โมนิกไหลผ่าน (เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิก 0%) ขนาดของสายนิวทรอลจะมีขนาดเท่ากับขนาดตามที่ การไฟฟ้านครหลวงกำหนดแต่ถ้าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกมากยิ่งขึ้น 10, 20, ..., 100% ขนาดกระแสที่สายนิวทรอลต้องรองรับได้เนื่องจากผลของฮาร์โมนิก จะมีขนาดมากขึ้น เช่นที่ เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่3 ที่ 100% ขนาดกระแสของสายนิวทรอลจะมีขนาดประมาณ 1.5 เท่าของสายนิวทรอลเดิมตามกฎของการ ไฟฟ้านครหลวง

นอกจากนี้ยังแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3, 5 และ 7 และกำลังงานสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3, 5 และ 7 ของสายเฟส ดังแสดงในรูป 6.15 และรูปที่ 6.16

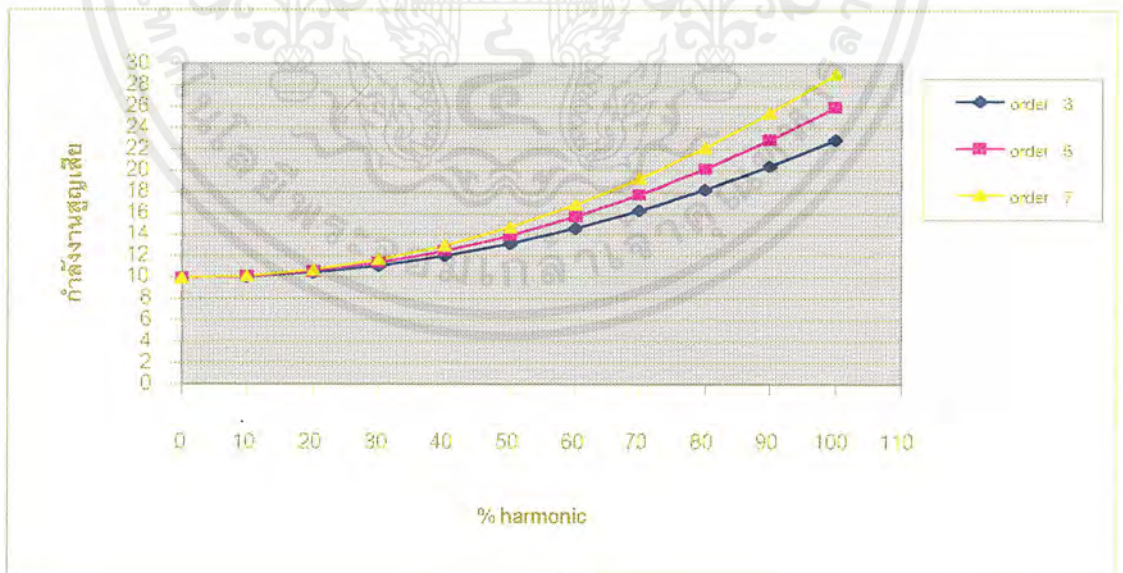
ขนาด กระแสใน รูปต่อหน่วย	ลำดับ ฮาร์โมนิก	%Harmonic										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
3		1	1.0065	1.0259	1.0572	1.0996	1.1518	1.226	1.28	1.355	1.435	1.518
5		1	1.008	1.0317	1.07	1.1216	1.1845	1.257	1.33	1.42	1.52	1.616
7		1	1.0096	1.037	1.083	1.144	1.217	1.301	1.39	1.494	1.6	1.71

กำลังงานที่ สูญเสีย (W)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		3	9.9237	10.053	10.443	11.091	11.999	13.166	14.593	16.28	18.224	20.428
5	9.9237	10.084	10.564	11.364	12.483	13.923	15.683	17.76	20.162	22.88	25.92	
7	9.9237	10.115	10.688	11.642	12.98	14.697	16.79	19.28	22.14	25.38	29.01	

ตารางที่ 6.11 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของขนาดกระแสในรูปต่อหน่วยและกำลังงานสูญเสีย กับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสในรูปต่อหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3, 5 และ 7



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูญเสียหน่วยกับเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกเดียวกันทั้งขนาดกระแสในรูปต่อหน่วยและกำลังงานสูญเสียที่ฮาร์โมนิกลำดับมากขึ้นจะมีค่ามากกว่าฮาร์โมนิกลำดับต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากค่าความสูญเสียจากปรากฏการณ์ทางผิว , ปรากฏการณ์ความใกล้เคียงและความสูญเสียจากท่อร้อยสายจะขึ้นอยู่กับความถี่นั่นเอง เมื่อลำดับฮาร์โมนิกมีค่ามากขึ้น ค่าความสูญเสียต่างๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับตารางที่ 6.12 เป็นตารางแสดงขนาดกระแสของสายนิวทรอลและสายเส้นไฟของหม้อแปลงที่ขนาดพิกัดต่าง ๆ

ช่อง MEA และ MEA* แสดงขนาดกระแสในสายนิวทรอลของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย (ตามกฎของการไฟฟ้านครหลวง เมื่อโหลดก่อให้เกิดฮาร์โมนิกและไม่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกตามลำดับ) ขนาดกระแสของสายนิวทรอลต้องไม่น้อยกว่า 200A บวกด้วยร้อยละ 70 ของส่วนที่เกิน 200A (สำหรับโหลดที่ไม่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกและต้องมีขนาดเพียงพอที่จะรับกระแสไม่สมดุลสูงสุดในสายนิวทรอล (สำหรับโหลดที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิก) เปรียบเทียบกับค่า NHDF ของสายนิวทรอลที่หม้อแปลงขนาดพิกัดต่าง ๆ เมื่อโหลดกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ 100% โดยสายเคเบิลที่ใช้เป็นสาย NYY 1 แกน ร้อยในท่อร้อยสาย นอกจากนี้ยังแสดงค่า Harmonic Derating Factor ของสายเส้นไฟ (HDF) กรณีที่มีเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 , 5 และ 7 เท่ากับ 0.4 , 0.06 และ 0.05 ของกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐานตามลำดับ

TR(KVA)	$I_N(A)$		Research				
	MEA	MEA*	Size Of N(mm ²)	HDF	NHDF	$I_p(A)$	$I_N(A)$
250	380	326	1(300)	0.902	0.652	421.286	582.8221
315	479	395	2(150)	0.978	0.888	489.7751	539.4144
400	608	486	2(240)	0.975	0.873	623.5897	696.449
500	759	591	3(185)	0.989	0.943	767.4419	804.878
630	957	730	3(240)	0.988	0.938	968.6235	1020.256
800	1216	911	4(240)	0.993	0.963	1224.572	1262.721
1000	1519	1123	5(240)	0.995	0.976	1526.633	1556.352
1250	1899	1389	6(240)	0.996	0.983	1906.627	1931.841
1600	2431	1726	7(300)	0.997	0.986	2438.315	2465.517
2000	3039	2187	8(300)	0.998	0.989	3045.09	3072.801
2500	3798	2719	10(300)	0.999	0.993	3801.802	3824.773

ตารางที่ 6.12 แสดงขนาดกระแสของสายนิวทรอล (I_N) และสายเส้นไฟ (I_p)

ของหม้อแปลงที่ขนาดพิกัดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับมาตรฐานการไฟฟ้านครหลวง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาขนาดกระแสของสายนิวทรอลของหม้อแปลงพิกัด 400 kVA ตามกฎการไฟฟ้านครหลวงจะพบว่ากรณีโหลดที่ไม่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกนั้นขนาดกระแสของสายนิวทรอลเท่ากับ 486 A กรณีโหลดที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกนั้นขนาดกระแสของสายนิวทรอลเท่ากับ 608 A ส่วนขนาดกระแสของสายนิวทรอลซึ่งคำนวณจากกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ 100% และขนาดกระแสของสายเส้นไฟซึ่งคำนวณจากกระแสฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3, 5 และ 7 ที่ 40,6 และ 5% ของกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐานในโครงการนี้ เท่ากับ 696 A และ 624 A ตามลำดับ

6.4 การคำนวณหา HDF จาก Nonlinear Load ประเภทต่างๆ

1. รีคตีไฟเออร์ควบคุมเฟส (Phase controlled Rectifiers)

ลำดับฮาร์โมนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
5-TH	20
7-TH	14
11-TH	9
13-TH	8

ตารางที่ 6.13 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของรีคตีไฟเออร์ควบคุมเฟส

2. พัดดับบีวเอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบสตีฟ (PWM Inverters with Stiff sources)

ลำดับฮาร์โมนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
5-TH	85
7-TH	71
11-TH	40
13-TH	26

ตารางที่ 6.14 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของพัดดับบีวเอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบสตีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พี ดับเบิลวี เอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบ ซ็อฟท์ (PWM Inverters with soft sources)


ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
5-TH	29
7-TH	8
11-TH	6
13-TH	3

ตารางที่ 6.15 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของ พี ดับเบิลวี เอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบซ็อฟท์

4. แหล่งจ่ายไฟแบบ ซิงเกิล เฟส สวิตช์ ซิ่ง (Single - phases switching mode power supply)

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-TH	88
5-TH	66
7-TH	42
9-TH	22
11-TH	10
13-TH	8

ตารางที่ 6.16 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายไฟแบบ ซิงเกิล เฟส สวิตช์ ซิ่ง

5. ตัวชดเชย วาร์ สถิต แบบใช้ไทรสเตอร์ควบคุมค่ารีแอกเตอร์ (Static var compensator) thyristor controlled reactor (TCR) 

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	14
5-TH	5
7-TH	3
9-TH	2
11-TH	1
13-TH	1

ตารางที่ 6.17 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของตัวชดเชยวาร์สถิตย์แบบใช้ไทรสเตอร์ ควบคุมค่ารีแอกเตอร์

6. เตาหลอมอาร์ค

6.1 ขณะเริ่มต้น (Arcfurnaces initial Melting)

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
2-ND	8
3-RD	6
4-TH	3
5-TH	4
7-TH	3

ตารางที่ 6.18 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของเตาหลอมอาร์คขณะเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 เตาหลอม อาร์ค ขณะคงที่ (Arc Furnaces Stable Arc)

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	2
5-TH	2

ตารางที่ 6.19 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของเตาหลอมอาร์ค ขณะคงที่

7. หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 15 วัตต์ 220 โวลต์ (Fluorescent 15w,220v) ใช้บัลลาสต์ อิเล็กทรอนิกส์

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	82
5-TH	54.8
7-TH	32
9-TH	23.5
11-TH	19.9
13-TH	13.9
15-TH	11.6
17-TH	13.2

ตารางที่ 6.20 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 15 วัตต์ 220
โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณค่า HDF ของ Nonlinear Load ประเภทต่างๆ

ประเภทของโหลด	HDF		
	เดินลอยในอากาศ	เดินร้อยท่อนในอากาศ	เดินร้อยท่อนฝังดิน
Phase controlled	0.9592	0.9415	0.9490
PWM Stiff sources	0.6082	0.5347	0.5960
PWM soft sources	0.9499	0.9325	0.9412
Single phase switching	0.6192	0.5678	0.5935
Static Var (TCR)	0.9874	0.9845	0.9863
เตาหลอมอาร์ค ขณะเริ่มต้น	0.9929	0.9915	0.9921
เตาหลอมอาร์ค ขณะคงที่	0.9995	0.9994	0.99942
หลอดฟลูออโร เรสเซนซ์	0.8577	0.7348	0.8024

ตารางที่ 6.21 ตารางแสดงผลการคำนวณ HDF สำหรับ โหลดประเภทต่างๆ

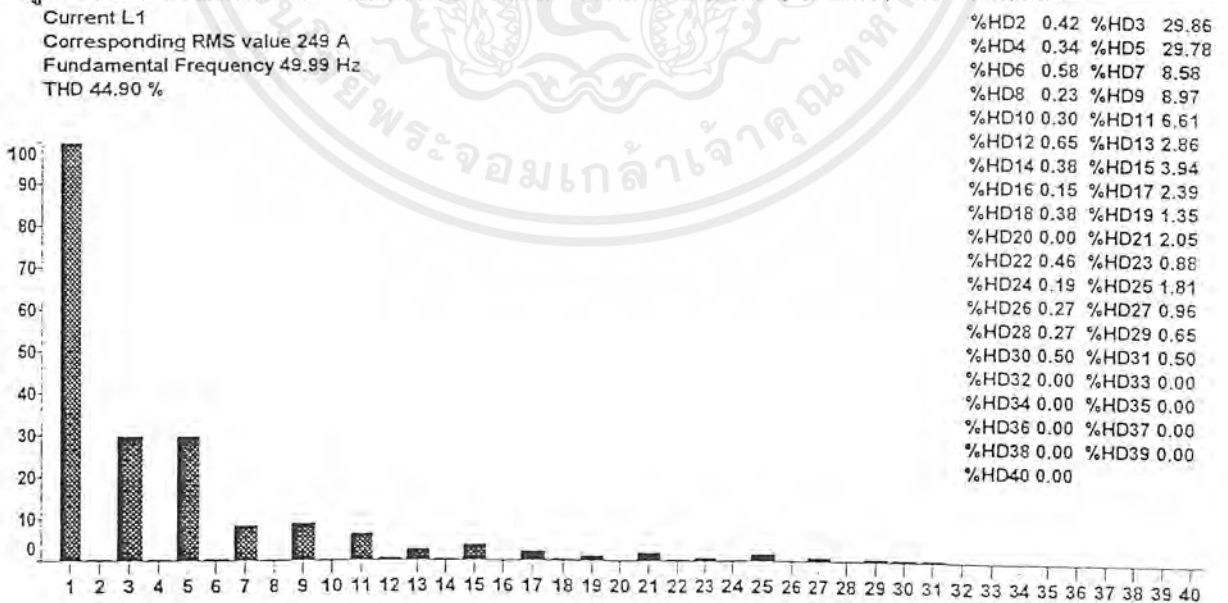
จากตารางพบว่า ค่า HDF จะขึ้นกับประเภทของ Nonlinear load โดย Nonlinear load แต่ละชนิดจะกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก ลำดับต่างๆ แตกต่างกันไป แต่พอจะสรุปได้ว่า โหลดที่ก่อกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ในปริมาณที่มากจะทำให้ค่า HDF มีค่าต่ำลง นอกจากนี้ยังขึ้นกับ ลักษณะการติดตั้งสายด้วย

6.5 การคำนวณ HDF จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อผ่านวงจรกรองฮาร์โมนิก

การคำนวณ HDF ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาว่า กระแสฮาร์โมนิกที่ผ่านการกรองจากวงจรกรองฮาร์โมนิกแล้วทำให้ค่า HDF เปลี่ยนแปลงอย่างไรจากกระแสฮาร์โมนิกเดิมที่ไม่ได้ผ่านการกรอง รูปที่ 6.17 เป็นตัวอย่างกระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC Phase Control (Dimmer) ก่อนการกรอง



รูปที่ 6.17 กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC Phase Control (Dimmer) ก่อนการกรอง



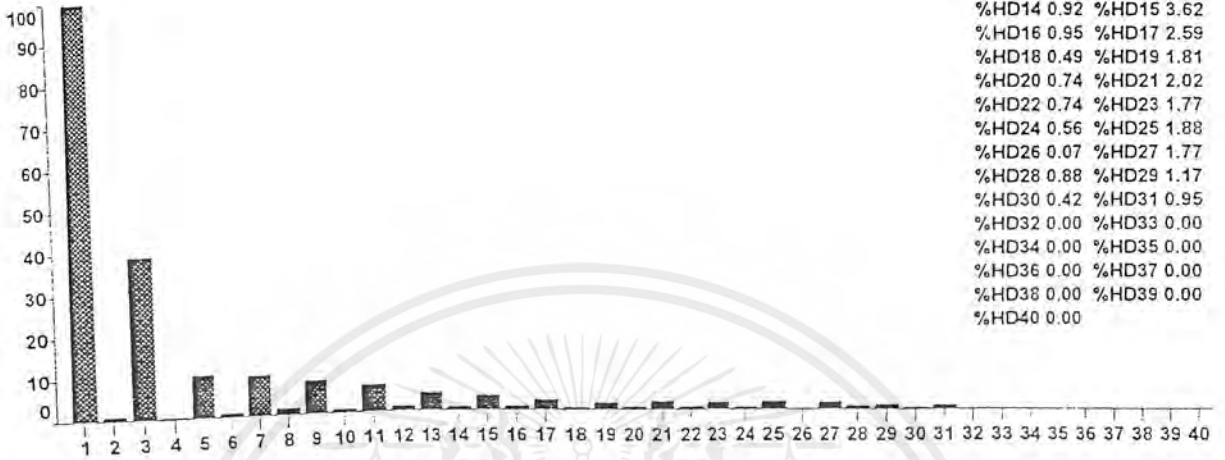
รูปที่ 6.18 กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC Phase Control (Dimmer)

เมื่อกรองฮาร์โมนิกที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current L1
 Corresponding RMS value 207 A
 Fundamental Frequency 49.94 Hz
 THD 43.30 %

%HD2	1.06	%HD3	39.04
%HD4	0.39	%HD5	10.33
%HD6	1.03	%HD7	9.84
%HD8	1.66	%HD9	8.06
%HD10	0.92	%HD11	6.50
%HD12	1.20	%HD13	4.44
%HD14	0.92	%HD15	3.62
%HD16	0.95	%HD17	2.59
%HD18	0.49	%HD19	1.81
%HD20	0.74	%HD21	2.02
%HD22	0.74	%HD23	1.77
%HD24	0.56	%HD25	1.88
%HD26	0.07	%HD27	1.77
%HD28	0.88	%HD29	1.17
%HD30	0.42	%HD31	0.95
%HD32	0.00	%HD33	0.00
%HD34	0.00	%HD35	0.00
%HD36	0.00	%HD37	0.00
%HD38	0.00	%HD39	0.00
%HD40	0.00		



รูปที่ 6.19 กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC Phase Control (Dimmer)
 เมื่อกรองฮาร์โมนิกที่ 5

Current L1
 Corresponding RMS value 202 A
 Fundamental Frequency 49.97 Hz
 THD 45.80 %

%HD2	0.92	%HD3	43.42
%HD4	0.43	%HD5	10.73
%HD6	0.92	%HD7	2.47
%HD8	0.83	%HD9	6.37
%HD10	0.34	%HD11	5.07
%HD12	0.18	%HD13	3.00
%HD14	0.21	%HD15	3.03
%HD16	0.55	%HD17	2.81
%HD18	0.71	%HD19	1.94
%HD20	0.43	%HD21	1.94
%HD22	0.34	%HD23	1.51
%HD24	0.21	%HD25	1.17
%HD26	0.43	%HD27	1.05
%HD28	0.21	%HD29	0.24
%HD30	0.49	%HD31	0.43
%HD32	0.00	%HD33	0.00
%HD34	0.00	%HD35	0.00
%HD36	0.00	%HD37	0.00
%HD38	0.00	%HD39	0.00
%HD40	0.00		



รูปที่ 6.20 กระแสฮาร์โมนิกที่จ่ายโดย AC/AC Phase Control (Dimmer)
 เมื่อกรองฮาร์โมนิกที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	HDF		
	เดินลอยในอากาศ	เดินร้อยท่อในอากาศ	เดินร้อยท่อฝังดิน
ไม่ผ่านการกรอง	0.8346	0.8298	0.8324
ผ่านการกรอง ฮาร์โมนิกที่ 3	0.9091	0.9053	0.9074
ผ่านการกรอง ฮาร์โมนิกที่ 5	0.9141	0.9111	0.9132
ผ่านการกรอง ฮาร์โมนิกที่ 7	0.9065	0.9036	0.9052

ตารางที่ 6.22 ตารางแสดงผลการคำนวณ HDF จากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ผ่านการกรองจากฮาร์โมนิก

จากตารางผลการคำนวณพบว่า กระแสฮาร์โมนิกที่ผ่านการกรองจากวงจรกรองฮาร์โมนิกจะมีเปอร์เซ็นต์ของลำดับฮาร์โมนิกที่ถูกกรองลดลงทำให้ HDF ของระบบที่ได้มีค่าสูงขึ้นมากเท่าไรก็ขึ้นอยู่กับการกรองกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ให้น้อยลงที่สุด ถ้ากระแสฮาร์โมนิกถูกกรองให้น้อยลงเท่าไร ค่า HDF จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เท่านั้น ซึ่งหมายความว่า ขนาดของสายเคเบิลที่จะให้รองรับกระแสโหลดก็จะมีขนาดน้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ พิกัดความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลจะสามารถรับกระแสได้เต็มที่ตามขนาดและชนิดของสายนั้นๆ นั่นเอง นอกจากนี้ ค่า HDF ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการติดตั้งของสายเคเบิลอีกด้วย

บทที่ 7

บทสรุป

7.1สรุปผล

โครงการนี้ ได้ศึกษาการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลโดยคำนึงผลกระทบจากฮาร์โมนิก เฉพาะกรณีของสายเคเบิลที่ใช้ในงานระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (ไม่เกิน 1 กิโลโวลต์) โดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลดังกล่าว โดยทำการประมวลผลจากพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่เราป้อนเข้าไป ซึ่งเกี่ยวข้องกับการติดตั้ง เช่น ชนิดและขนาดของสายเคเบิล, รูปแบบการติดตั้ง ความถี่ของระบบไฟฟ้า, ลำดับฮาร์โมนิกและเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ เป็นต้น ซึ่งสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้ถูกต้องมากกว่ารูปแบบการคำนวณหาพิกัดกระแสของสายเคเบิลแบบเดิม ซึ่งละเลยผลกระทบจากฮาร์โมนิก

จากการที่ เราเขียนโปรแกรมและวิเคราะห์ผลมา ทำให้เราทราบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่า Harmonic Deriting Factor (HDF) ของกระแสในสายเคเบิล เมื่อกระแสฮาร์โมนิก ได้แก่

- ขนาดกระแสฮาร์โมนิก ลำดับต่างๆ
ถ้าขนาดกระแสฮาร์โมนิก ยิ่งมาก HDF ลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายถึงขนาดพิกัดกระแสของสายเคเบิลจะยิ่งน้อยลงด้วย ถ้าขนาดกระแสฮาร์โมนิกเท่ากับศูนย์นั่นคือ ไม่มีกระแสฮาร์โมนิก HDF จะเท่ากับ 1 หมายความว่า สายเคเบิลสามารถรับกระแสได้ตามพิกัดที่คำนวณได้ ในสถานะไม่มีฮาร์โมนิก นั่นคือ $(0 < HDF \leq 1)$
- ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าสลับของตัวนำ Rac ซึ่งขึ้นอยู่กับผลของการปรากฏการณ์ทางผิว ปรากฏการณ์ความถี่และความถี่และความถี่ของความถี่จากท่อร้อยสาย ถ้า Rac มีค่าสูงทำให้ ค่าความสูญเสียของกำลังงานมากขึ้นส่งผลให้ HDF มีค่าต่ำทำให้ จิตความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิลลดลง

7.2 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

- 1) สำหรับการใช้โปรแกรม ผู้ใช้ควรมีความรู้ทางด้านวิศวกรรมและความรู้เกี่ยวกับฮาร์โมนิกอยู่บ้าง
- 2) งานข้อมูลเกี่ยวกับข้อมูลสายอ้างอิงจากข้อมูลสายของ บริษัท THAI YAZAKI และมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งไม่ได้อ้างอิงจาก IEC โดยตรง ทำให้

ผลที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนดังนั้นก็ควรพัฒนาพัฒนาโปรแกรมให้มีฐานข้อมูลที่มากขึ้นเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณ

- 3) เป็นสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงดันต่ำเท่านั้น (ไม่เกิน 1 กิโลโวลต์) ดังนั้น จึงควรพัฒนาให้สามารถคำนวณในระดับของสายเคเบิลแรงดันสูงต่อไป
- 4) โปรแกรมการคำนวณไม่ได้กล่าวถึง ระบบของสายเคเบิลให้ดินจึงอาจได้รับการพัฒนาต่อไป สำหรับผู้สนใจในเรื่องนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material	Resistivity (ρ_{20}) · 10 ⁻⁸ Ω · m at 20°C	Temperature Coefficient (α_{20}) · 10 ⁻³ per K at 20°C
<i>Conductors</i>		
Copper	1.7241	3.93
Aluminum	2.8264	4.03
<i>Sheaths and armor</i>		
Lead or lead alloy	21.4	4.0
Steel	13.8	4.5
Bronze	3.5	3.0
Stainless steel	70	Negligible
Aluminum	2.84	4.03*

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานทางไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้
(Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used)

Type of Conductor	Whether Dried and Impregnated or Not	k_s	k_p
<i>Copper</i>			
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	eq. (7.12)	0.8
Sector-shaped	Yes	1	0.8
Sector-shaped	No	1	1
<i>Aluminum</i>			
Round, stranded	Either	1	*
Round, 4 segment	Either	0.28	
Round, 5 segment	Either	0.19	
Round, 6 segment	Either	0.12	
Segmental with peripheral strands	Either	eq. (7.17)	

*Since there are no accepted experimental results dealing specifically with aluminum stranded conductors, IEC 287 recommends that the values of k_p given in the above table for copper conductors also be applied to aluminum stranded conductor of similar design as the copper ones.

ตารางที่ 2 สกิน และพรีอกซิมีตี เอฟเฟค (Skin and Proximity effects)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material	Thermal Resistivity (ρ) ($tK \cdot m/W$)	Thermal Capacity ($c \cdot 10^{-6}$) ($J/(m^2 \cdot K)$)
<i>Insulating materials*</i>		
Paper insulation in solid type cables	6.0	2.0
Paper insulation in oil-filled cables	5.0	2.0
Paper insulation in cables with external gas pressure	5.5	2.0
Paper insulation in cables with internal gas pressure		
preimpregnated	6.5	2.0
mass-impregnated	6.0	2.0
PE	3.5	2.4
XLPE	3.5	2.4
Polyvinyl chloride		
up to and including 3 kV cables	5.0	1.7
greater than 3 kV cables	6.0	1.7
EPR		
up to and including 3 kV cables	3.5	2.0
greater than 3 kV cables	5.0	2.0
Butyl rubber	5.0	2.0
Rubber	5.0	2.0
Paper-polypropylene-paper (PPL)	6.5	2.0
<i>Protective coverings</i>		
Compounded jute and fibrous materials	6.0	2.0
Rubber sandwich protection	6.0	2.0
Polychloroprene	5.5	2.0
PVC		
up to and including 35 kV cables	5.0	1.7
greater than 35 kV cables	6.0	1.7
PVC/bitumen on corrugated aluminum sheaths	6.0	1.7
PE	3.5	2.4
<i>Materials for duct installations</i>		
Concrete	1.0	2.3
Fiber	4.8	2.0
Asbestos	2.0	2.0
Earthenware	1.2	1.8
PVC	6.0	1.7
PE	3.5	2.4

*For the purpose of current rating computations, the semiconducting screening materials are assumed to have the same thermal properties as the adjacent dielectric materials

ตารางที่ 3 คัมประสิทธิภาพความต้านทานทางความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ
(Thermal resistivities of materials)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Copper Conductor Resistance

Nominal Direct Current Resistance, Ohms/1,000 Meter At 20°C

TABLE 1

TIS 11-2531

The number of wires in the conductors of cables for fixed wiring.

A

Nominal cross-sectional area (mm ²)	Number of wires in conductor	Diameter of wires in conductor (mm)	Maximum resistance of conductor at 20°C (Ohms/km)
			Single core & Multi core
0.5	1	0.80	36.0
1	1	1.13	18.1
1	7	0.40	18.1
1.5	1	1.38	12.1
1.5	7	0.50	12.1
2.5	1	1.78	7.41
2.5	7	0.67	7.41
4	1	2.25	4.61
4	7	0.85	4.61
6	7	1.04	3.08
10	7	1.35	1.83
16	7	1.70	1.15
25	7	2.14	0.727
35	19	1.53	0.524
50	19	1.78	0.387
70	19	2.14	0.268
95	19	2.52	0.193
120	37	2.03	0.153
150	37	2.25	0.124
185	37	2.52	0.0991
240	61	2.25	0.0754
300	61	2.52	0.0601
400	61	2.85	0.0470
500	61	3.20	0.0366

750 V 70° C PVC INSULATED, SINGLE CORE

B



CABLE STRUCTURE

CONDUCTOR	:	Solid and stranded annealed copper, sizes 0.5 mm ² up to 500 mm ²
INSULATION	:	PVC - Any colour
CLASSIFICATION	:	Maximum conductor temperature 70°C Circuit voltage not exceeding 750 volts
TESTING VOLTAGE	:	2,500 volts
REFERENCE	:	TIS 11-2531, Table 4

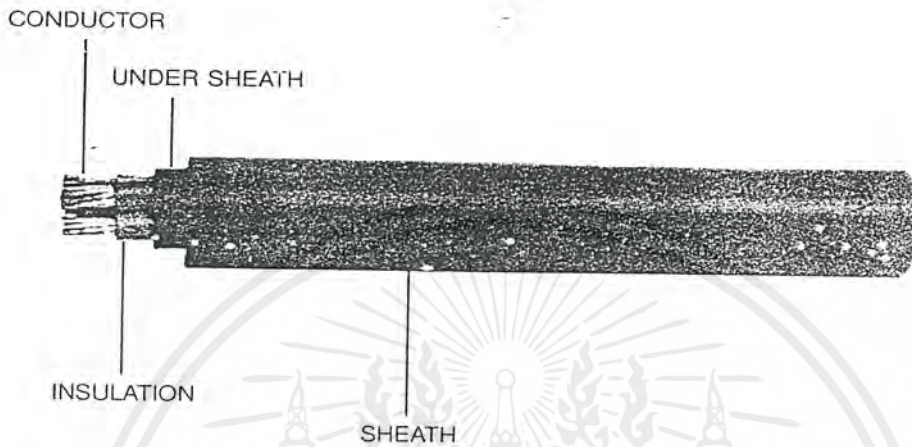
Nominal cross sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Overall diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70°C (MΩ.-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
0.5	1/0.80	0.8	3.0	0.0175	9	11	100/C
1	1/1.13	0.8	3.3	0.0141	13	17	100/C
1	7/0.40	0.8	3.5	0.0135	13	17	100/C
1.5	1/1.38	0.8	3.6	0.0123	17	22	100/C
1.5	7/0.50	0.8	3.8	0.0116	17	22	100/C
2.5	1/1.78	0.8	4.0	0.0102	23	31	100/C
2.5	7/0.67	0.8	4.3	0.0093	23	31	100/C
4	1/2.25	0.9	4.8	0.0094	32	50	100/C
4	7/0.85	0.9	5.2	0.0085	32	50	100/C
6	7/1.04	0.9	5.8	0.0073	43	75	100/C
10	7/1.35	1.1	7.2	0.0069	60	120	100/C
16	7/1.70	1.1	8.4	0.0057	83	180	100/C
25	7/2.14	1.3	10.5	0.0054	114	290	100/C
35	19/1.53	1.3	11.5	0.0047	141	380	100/C
50	19/1.78	1.5	13.5	0.0046	175	540	500/D
70	19/2.14	1.5	15.5	0.0039	221	720	500/D
95	19/2.52	1.7	18.0	0.0038	275	1,000	500/D
120	37/2.03	1.7	19.5	0.0034	321	1,240	500/D
150	37/2.25	1.9	21.5	0.0034	367	1,520	500/D
185	37/2.52	2.1	24.0	0.0034	424	1,900	500/D
240	61/2.25	2.3	27.0	0.0033	505	2,480	500/D
300	61/2.52	2.5	30.0	0.0032	581	3,100	500/D
400	61/2.85	2.7	33.5	0.0030	675	3,950	500/D
500	61/3.20	3.1	38.0	0.0031	781	5,150	500/D

B

C : Packing in coil.

D : Packing in drum.

750 V 70°C PVC INSULATED AND DOUBLE SHEATHED ROUND TYPE



CABLE STRUCTURE

NUMBER OF CORE	:	Up to 4 cores
CONDUCTOR	:	Solid and stranded annealed copper sizes, Single core-1 mm ² up to 500 mm ² Multi core-1 mm ² up to 300 mm ²
INSULATION	:	PVC Colour : Single core-Black 2 core-Light grey, Black 3 core-Light grey, Black, Red 4 core-Light grey, Black, Red, Blue
SHEATH AND UNDER SHEATH	:	PVC Colour : Black
CLASSIFICATION	:	Maximum conductor temperature 70°C Circuit voltage not exceeding 750 volts
TESTING VOLTAGE	:	2,500 volts
REFERENCE	:	TIS 11-2531,Single core-Table 6 TIS 11-2531,Multi core-Table 7

NYY, MEA TYPE C (SINGLE CORE)

TIS 11-2531
TABLE 6

Nominal cross sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Overall diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70°C (MΩ·Km)	Maximum continuous current rating (Ampere)		Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
						Free air	Under ground		
1	1/1.13	1.5	1.8	8.6	0.0207	17	22	80	100/C
1	7/0.40	1.5	1.8	8.8	0.0200	17	22	80	100/C
1.5	1/1.38	1.5	1.8	9.0	0.0184	21	27	90	100/C
1.5	7/0.50	1.5	1.8	9.2	0.0175	21	27	90	100/C
2.5	1/1.78	1.5	1.8	9.4	0.0157	28	36	100	100/C
2.5	7/0.67	1.5	1.8	9.8	0.0146	28	36	100	100/C
4	1/2.25	1.5	1.8	10.0	0.0135	38	47	130	100/C
4	7/0.85	1.5	1.8	10.5	0.0124	38	47	130	100/C
6	7/1.04	1.5	1.8	11.0	0.0107	49	60	160	100/C
10	7/1.35	1.5	1.8	12.0	0.0088	67	81	210	500/D
16	7/1.70	1.5	1.8	13.0	0.0074	89	105	280	500/D
25	7/2.14	1.5	1.8	14.5	0.0061	118	136	390	500/D
35	19/1.53	1.5	1.8	16.0	0.0053	146	165	500	500/D
50	19/1.78	1.5	1.8	17.0	0.0046	177	196	660	500/D
70	19/2.14	1.5	1.8	19.0	0.0039	222	241	850	500/D
95	19/2.52	1.7	1.8	21.5	0.0038	274	289	1,150	500/D
120	37/2.03	1.7	1.8	23.0	0.0034	318	330	1,400	500/D
150	37/2.25	1.9	2.0	26.0	0.0034	362	370	1,720	500/D
185	37/2.52	2.1	2.0	28.0	0.0034	416	419	2,130	500/D
240	61/2.25	2.3	2.2	31.5	0.0033	492	486	2,760	500/D
300	61/2.52	2.5	2.2	35.0	0.0032	565	551	3,400	500/D
400	61/2.85	2.7	2.2	38.5	0.0030	655	629	4,290	500/D
500	61/3.20	3.1	2.4	43.0	0.0031	757	717	5,570	500/D

B

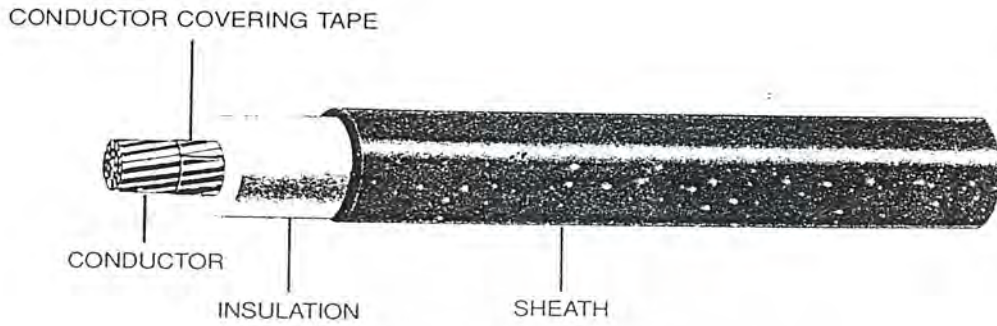
Remark : SPECIAL PROTECTION CAN BE PRODUCED, SEE DETAILS AT PART D, PAGE 132

C : Packing in coil.

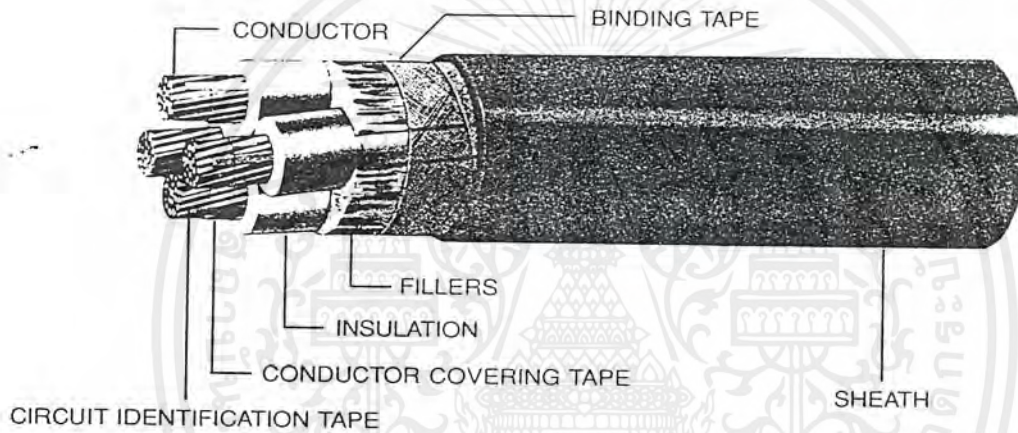
D : Packing in drum.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600V/1000 V 90°C CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED, PVC SHEATHED POWER CABLE



B



CABLE STRUCTURE

NUMBER OF CORE	:	Up to 4 cores
CONDUCTOR	:	Concentric stranded and compact round stranded annealed copper, sizes 1.5 mm ² up to 1000 mm ²
INSULATION	:	Cross-linked PE Colour : Natural (Translucent) Core identification : Compound color Black, White, Red, Green or color tape
SHEATH	:	PVC Colour : Black
CLASSIFICATION	:	Maximum conductor temperature 90°C Circuit voltage not exceeding 1,000 volts
TESTING VOLTAGE	:	3,500 volts
REFERENCE STANDARD	:	IEC 502

0.6/1 KV - CV

Number of core	Nominal cross sectional area (mm ²)	Number of stranded	Mean value of insulation thickness (mm)	Mean value of sheath thickness (mm)	Approximate overall diameter (mm)	Maximum conductor resistance at 20°C (Ω-Km)	Minimum insulation resistance at 20°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
1	1.5	7/0.53	0.7	1.4	6.3	12.1	2500	27	50	500/D
	2.5	7/0.67	0.7	1.4	6.5	7.41	2100	36	65	500/D
	4	7/0.85	0.7	1.4	7.0	4.61	1700	48	80	500/D
	6	7/1.04	0.7	1.4	7.5	3.08	1450	61	100	500/D
	10	7	0.7	1.4	8.1	1.83	1250	82	140	500/D
	16	7	0.7	1.4	9.1	1.15	1000	110	200	500/D
	25	7	0.9	1.4	11.0	0.727	1050	145	300	500/D
	35	7	0.9	1.4	12.0	0.524	900	180	400	500/D
	50	19	1.0	1.4	13.5	0.387	850	220	500	500/D
	70	19	1.1	1.4	15.0	0.268	800	280	750	500/D
	95	19	1.1	1.5	17.5	0.193	650	345	1,000	500/D
	120	37	1.2	1.5	19.0	0.153	650	400	1,200	500/D
	150	37	1.4	1.6	21	0.124	700	460	1,500	500/D
	185	37	1.6	1.6	23	0.0991	700	530	1,900	500/D
	240	61	1.7	1.7	26	0.0754	650	630	2,500	500/D
	300	61	1.8	1.8	29	0.0601	600	725	3,100	500/D
	400	61	2.0	1.9	32	0.0470	600	840	3,900	500/D
	500	61	2.2	2.0	36	0.0366	600	975	5,000	500/D
	630	61	2.4	2.2	40	0.0283	550	1125	6,500	500/D
800	91	2.6	2.3	46	0.0221	550	1320	8,500	300/D	
1000	127	2.8	2.4	51	0.0176	500	1510	10,500	300/D	
2	1.5	7/0.53	0.7	1.8	11.0	12.1	2500	25	130	500/D
	2.5	7/0.67	0.7	1.8	11.5	7.41	2100	34	160	500/D
	4	7/0.85	0.7	1.8	12.5	4.61	1700	44	200	500/D
	6	7/1.04	0.7	1.8	14.0	3.08	1450	57	250	500/D
	10	7	0.7	1.8	15.0	1.83	1250	77	340	500/D
	16	7	0.7	1.8	17.0	1.15	1000	100	480	500/D
	25	7	0.9	1.8	21	0.727	1050	135	700	500/D
	35	7	0.9	1.8	23	0.524	900	165	900	500/D
	50	19	1.0	1.8	26	0.387	850	205	1,200	500/D
	70	19	1.1	1.8	29	0.268	800	255	1,700	500/D
	95	19	1.1	2.0	33	0.193	650	315	2,300	500/D
	120	37	1.2	2.1	37	0.153	650	365	2,800	500/D
	150	37	1.4	2.2	41	0.124	700	415	3,500	500/D
	185	37	1.6	2.3	45	0.0991	700	485	4,300	500/D
	240	61	1.7	2.5	51	0.0754	650	580	5,500	500/D
	300	61	1.8	2.7	56	0.0601	600	675	7,000	300/D
400	61	2.0	2.9	63	0.0470	600	790	9,000	300/D	

B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น **THAI-YAZAKI TECHNICAL DATA 1998**

ตัวอย่างการคำนวณ เมื่อมีฮาร์โมนิก

หม้อแปลงกำลังพิกัด 250 KVA (ระบบ 3 เฟส 4 สาย) โหลดก่อให้เกิดฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ 100% สำหรับสายนิวทรัลและ เปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,5 และ 7 เท่ากับ 0.4, 0.06 และ 0.05 ของกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน จงคำนวณหา HDF, NHDF และขนาดกระแสของสายเส้นไฟและสายนิวทรัลเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกไหลผ่านตัวนำ เมื่อใช้สาย NYY 1 แกน ขนาด 300 mm^2 จำนวน 4 เส้น วางในท่อร้อยสายขนาด 5 นิ้ว

Sol.

ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Resistance)

$$R_{ac} = R_{dc} (1+Y_s+Y_p) (1+\lambda_2)$$

หา R_{ac} ของแต่ละลำดับฮาร์โมนิก

$$R_{ac}(1) = R_{de} (1+Y_s(1)+Y_p(1)) (1+\lambda_2(1))$$

$$R_{de} = R_{20} (1+\alpha_{20} (T-20))$$

$$\text{โดยที่ } R_{20} = 0.601 \times 10^{-3}$$

$$\alpha_{20} = 3.93 \times 10^{-3}$$

$$T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

เพราะฉะนั้น

$$R_{de} = 0.601 \times 10^{-3} (1+0.00393 (70-20))$$

$$= 7.19 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/\text{m}$$

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

$$\text{โดยที่ } d_i = 25.6 \text{ mm}$$

$$d_c = 35.0 \text{ mm}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \beta = 1 - \frac{25.6}{35.0}$$

$$\text{จาก } m^2 = \frac{2\pi\mu_r\mu_o f}{\rho}$$

$$\text{โดยที่ } \mu_r = 1$$

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha_{20}(t - 20)]$$

เพราะฉะนั้น

$$m^2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 4 \pi \times 10^{-7} \times 50}{1.7241 \times 10^{-8} [1 + 0.00393(70 - 20)]}$$

$$= 19098.4$$

จาก $Z = 0.25 \text{ m}^2 k_s (d_c - d_i)^2$

โดยที่ $k_s = 1$

เพราะฉะนั้น

$$Z = 0.25 \times 19098.4 \times 1 (0.35 - 0.0256)^2$$

$$= 0.422$$

จาก $0 \leq Z \leq 5$

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

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

เพราะฉะนั้น

$$a(z) = \frac{7(0.422)^2}{315 + 3(0.422)^2}$$

$$= 3.95 \times 10^{-3}$$

$$b(z) = \frac{56}{211 + (0.422)^2}$$

ความสูญเสียจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect) $Y_s(1)$

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

เพราะฉะนั้น

$$Y_s(1) = 3.93 \times 10^{-3} \left[1 - \frac{0.218}{2} - (0.218)^2 (0.265) \right]$$

$$= 3.345 \times 10^{-3}$$

จาก $X_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} \times 10^{-7} \times k_p$

โดยที่ $k_p^2 = 0.8$

$f = 50 \text{ Hz}$

เพราะฉะนั้น

$$X_p^2 = \frac{8\pi \times 50}{7.19 \times 10^{-5}} \times 10^{-7} \times 0.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.398$$

$$\text{ดังนั้น } X_p = 1.18245$$

$$\text{จาก } y = \frac{d_c}{s}$$

$$\text{โดยที่ } d_c = 35 \text{ mm}$$

$$s = 37 \text{ mm}$$

$$\text{ดังนั้น } y = \frac{35}{37}$$

$$= 0.946$$

$$\text{เมื่อ } 0 < x_p \leq 2.8$$

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

$$= \frac{11(1.18245)^4}{704 + 20(1.18245)^4}$$

$$= 0.02894$$

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

$$= \frac{1 + 0.0283(1.18245)^4}{3 + 0.0042(1.18245)^4}$$

$$= 0.34891$$

ค่าความสูญเสียจาก ปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Prerimity effect) $Y_p(1)$

กรณีสายเคเบิล 3 แกน และ แกน เดียว 3 เส้น

$$Y_p(1) = \frac{3y^2 \sigma(r_p)}{2 - \frac{5}{2} y^2 H(r_p)}$$

$$= \frac{3(0.946)^2 (0.02894)}{2 - \frac{5}{2} (0.946)^2 (0.34811)}$$

$$= 0.0415513$$

เพราะฉะนั้น $Y_p(1) = 0.0415513$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสูญเสียจากท่อร้อยสาย $\lambda_2(1)$

$$\lambda_2(1) = \left[\frac{f}{60} \right]^{1.5} \left(\frac{0.00794s + 0.00039dd}{R} \right) 10^{-5}$$

โดยที่ dd = 128.9 mm

S = 37 mm

f = 50 Hz

$$R = \frac{1.02 \times 10^6 \rho_{20}}{S} [1 + \alpha_{20}(t - 20)]$$

$$= \frac{1.02 \times 10^6 \times 1.7241 \times 10^{-8}}{37 \times 10^{-3}} [1 + 0.00393(50)]$$

$$= 0.05686274 \text{ } \Omega/\text{m}$$

เพราะฉะนั้น $\lambda_2(1) = \left[\frac{50}{60} \right]^{1.5} \left[\frac{0.00794(0.037) + 0.00039(0.1289)}{0.05686274} \right] 10^{-5}$

$$= 4.6023257 \times 10^{-9}$$

เพราะฉะนั้น ความต้านทานไฟฟ้าสลับที่ความถี่มูลฐาน $R_{ac}(1)$

$$R_{ac}(1) = 7.19 \times 10^{-5} (1 + (3.345 \times 10^{-3}) + 0.0415513)(1 + (4.6023257 \times 10^{-9}))$$

$$= 7.5128 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/\text{m}$$

หา $R_{ac}(3)$

$$R_{ac}(1) = R_{dc} (1 + Y_s(3) + Y_p(3))(1 + \lambda_2(3))$$

$$\beta = 0.268$$

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

โดยที่

$$\mu_r = 1$$

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$f = 3 \times 50 = 150 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้น

$$m^2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 150}{1.7241 \times 10^{-8} [1 + 0.00393(50)]}$$

$$= 57295.2$$

จาก

$$z = 0.25 \text{ m}^2 k_s (d_c - d_l)^2$$

$$= 0.25 \times 57295.2 \times 1 (0.035 - 0.0256)^2$$

$$= 1.266$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $0 < z \leq 5$

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

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

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} a(z) &= \frac{7(1.266)^2}{315 + 3(1.266)^2} \\ &= 0.0350813 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(z) &= \frac{56}{211 + (1.266)^2} \\ &= 0.02971671 \end{aligned}$$

ความสูญเสียจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin effect) $Y_s(3)$

$$\begin{aligned} Y_s(3) &= a(z) \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] \\ &= 0.0350813 \left[1 - \frac{0.268}{2} - (0.268)^2 (0.02971671) \right] \\ &= 0.02971671 \end{aligned}$$

จาก $x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} \times 10^{-7} k_p$

โดยที่ $k_p = 0.8$

$f = 150 \text{ Hz}$

เพราะฉะนั้น $x_p^2 = \frac{8\pi \times 150}{7.19 \times 10^{-5}} \times 10^{-7} \times 0.8$

$$= 4.194304$$

ดังนั้น $x_p = 2.048$

เมื่อ $0 < x_p \leq 2.8$

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

$$H(x_p) = \frac{11 + 0.0283x_p^4}{31 + 0.0042x_p^4}$$

เพราะฉะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(x_p) = \frac{11(2.048)^4}{704 + 20(2.048)^4}$$

$$H(x_p) = \frac{11 + 0.0283(2.048)^4}{31 + 0.0042(2.048)^4}$$

$$= 0.154535$$

ค่าความสูญเสียจากปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (Proximity effect) $Y_p(3)$

กรณีสายเคเบิล 3 แกน และ แกนเดี่ยว 3 เส้น

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

$$= \frac{3(0.946)^2 (0.18328)}{2 - \frac{5}{12} (0.946)(0.154535)}$$

$$= 0.25333$$

ค่าความสูญเสีย จากทอรัอยสาย $\lambda_2(3)$

$$\lambda_2(3) = \left[\frac{f}{60} \right]^{1.5} \left[\frac{0.00794s + 0.00039dd}{R} \right] 10^{-5}$$

โดยที่ $f = 150 \text{ Hz}$

เพราะฉะนั้น $\lambda_2(3) = \left[\frac{150}{60} \right]^{1.5} \left[\frac{0.00794(0.037) + 0.00039(0.1289)}{0.5686874} \right] 10^{-5}$

$$= 2.39144 \times 10^{-8}$$

เพราะฉะนั้นความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $R_{ac}(3)$

$$R_{ac}(3) = 7.19 \times 10^{-5} (1 + 0.02971671 + 0.25333)(1 + (2.39144 \times 10^{-8}))$$

$$= 9.225106 \times 10^{-5} \Omega/m$$

โดยการคำนวณในทำนองเดียวกันจะได้ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

$$R_{ac}(5) = 1.1286 \times 10^{-4} \Omega/m$$

$$R_{ac}(7) = 1.31993 \times 10^{-4} \Omega/m$$

การคำนวณ HDF สำหรับสายเส้นไฟ

$$\alpha_3 = 0.4$$

$$\alpha_5 = 0.06$$

$$\alpha_7 = 0.05$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_3 = \frac{R_{ac}(3)}{R_{ac}(5)} = \frac{9.22506 \times 10^{-5}}{7.5128 \times 10^{-5}} = 1.22796$$

$$\beta_5 = \frac{R_{ac}(5)}{R_{ac}(1)} = \frac{1.1286 \times 10^{-4}}{7.5128 \times 10^{-4}} = 1.50224$$

$$\beta_7 = \frac{R_{ac}(7)}{R_{ac}(1)} = \frac{1.31993 \times 10^{-4}}{7.5128 \times 10^{-5}} = 1.75687$$

จาก HDF =
$$\frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=2}^n \alpha_i^2 \beta_i}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + (0.4)^2 (1.22792) + (0.06)^2 (1.50224) + (0.05)^2 (1.7567)}}$$

$$= 0.910496$$

การคำนวณ NHDF สำหรับ สายนิวทรอล

$$\alpha_3 = 1$$

$$\beta_3 = \frac{R_{ac}(3)}{R_{ac}(5)} = \frac{9.22506 \times 10^{-5}}{7.5128 \times 10^{-5}} = 1.22796$$

เพราะฉะนั้น NHDF =
$$\frac{1}{\sqrt{1 + (1)^2 (1.22792)}}$$

$$= 0.6697$$

กระแสที่หม้อแปลง 250 kVA จ่ายโหลดเต็มพิกัด =
$$\frac{250 \times 1000}{\sqrt{3} \times 380}$$

$$= 380 \text{ A}$$

เพราะฉะนั้นขนาดกระแสของสายไฟเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3, 5 และ 7 ขนาด 0.40, 0.06 และ 0.05 ของกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน เท่ากับ
$$\frac{I_L}{\text{HDF}}$$

โดยที่
$$I_L = \text{กระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน}$$

$$\text{HDF} = \text{Harmonic Derating Factor}$$

$$= \frac{380}{0.910496}$$

$$= 417.35 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดกระแสของสายนิวทรอลตามกฎการไฟฟ้าครหลวงกำหนดว่า ขนาดกระแสของสายนิวทรอลต้องไม่น้อยกว่า 200A บวกด้วยร้อยละ 70 ของส่วนที่เกิน 200A เมื่อสายเส้นไฟมีกระแสไหลไม่สมดุลสูงสุดมากกว่า 200A (สำหรับโหลดที่ไม่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิก) และต้องมีขนาดเพียงพอที่จะรับกระแสไม่สมดุลสูงสุดในสายนิวทรอล (สำหรับโหลดที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิก) เพราะฉะนั้นตามกฎของ กฟน. เมื่อโหลดก่อให้เกิดฮาร์โมนิก

$$\text{ขนาดสายนิวทรอล} = 380 \text{ A}$$

เมื่อโหลดกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก ลำดับที่ 3 ที่ 100%

$$\begin{aligned} \text{ขนาดกระแสของสายนิวทรอล} &= \frac{380}{0.6697} \\ &= 568 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สุดี บรรจงจิตร อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องตลอดจนเป็นกำลังใจให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับโครงการนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ ที่คอยเป็นกำลังใจช่วยพิมพ์งาน ช่วยซ่อมเครื่องคอมพิวเตอร์ และบุคคลอื่นๆ อีกมาก ที่ไม่อาจจะกล่าวนามได้ทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] A. Hiranandani, "Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics," IEEE Industry Application Mag., pp. 42-45, March /April 1998.
- [2] A.P. Sakis Meliopolis and M.A. Martin, " Calculation of Secondary Cable Losses and Ampacities In the presesce of Harmonics,"presented IEEE/PES winter meeting 1990 , New York.
- [3] J.S. Subjah and J.S. McQuilkin , "Harmonics Cause , Effects , Measurements and Analysis An Update," IEEE Transcations on Industry Applications , vol.26, no.6, Nov./Dec.1990.
- [4] Thai Yazaki , Technical Data For Electric wive And Cables Publication 1998 (Revised)
- [5] G.J.Anders,"Rating of Electric Power Cables,Ampacity Computation For Transmission,Distribution And Industrial Applications," 1997,IEEE Press Power Engineering Series
- [6] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems"
- [7] กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า พ.ศ 2538,การไฟฟ้านครหลวง
- [8] ปริญญาทิพนธ์เรื่อง " การวิเคราะห์และแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์ "

คณะผู้จัดทำ



นายดาตีวัน พรหมมณี
ที่อยู่: บ้านเลขที่ 235/2 หน่วย 22
บ้านดงโคก P.O. BOX 7322
เวียงจันทน์



นายนารานนท์ น้อยสอาด
ที่อยู่: 183 ต. บางพูน อ.เมือง
จ.ปทุมธานี 12000
โทร. 5673569



นายสมเกียรติ รุ่งเจริญกิจ
ที่อยู่: 83/487 ม.5 ซ.7
ม.ทิพวัล 1 ถ.เทพารักษ์
ต.บางเมืองใหม่ อ.เมือง
จ.สมุทรปราการ 10270
โทร.3942747

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้