การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบคำนวณกระแสลัดวงจรและจัดวางอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย

CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT CALCULATION AND COORDINATION OF PROTECTIVE DEVICES IN DISTRIBUTION SYSTEM

สุชาติ มโนมยางกูร

SUCHART MANOMAYANGOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-506-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบคำนวณกระแสลัดวงจรและจัดวางอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย

CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT CALCULATION AND COORDINATION OF PROTECTIVE DEVICES IN DISTRIBUTION SYSTEM

T033393

สุชาติ มโนมยางกูร
SUCHART MANOMAYANGOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2542

ISBN 974-622-508-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....33393
วัน, เดือน, ปี - 2 ส.ค. 2542

CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT CALCULATION AND COORDINATION OF PROTECTIVE DEVICES IN DISTRIBUTION SYSTEM

SUCHART MANOMAYANGOON

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

1999

ISBN 974-622-508-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบคำนวณกระแสลัดวงจรและจัดวางอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย
นักศึกษา	นายสุชาติ มโนมยางกูร
รหัสประจำตัว	37061129
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศุลี บรรจงจิตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการออกแบบระบบไฟฟ้าทั่วไปในประเทศไทย มีการออกแบบที่หลากหลายมาตรฐาน ยากต่อการเข้าควบคุมให้เป็นไปตามกฎระเบียบขององค์กรผู้รับผิดชอบ ดังนั้นในการออกแบบระบบไฟฟ้าดังกล่าวโดยใช้รูปแบบและมาตรฐานเดียวกันจึงมีความจำเป็นมากในกรณีนี้ จึงได้นำมาตรฐาน IEEE Std. 141-1986 มาเป็นหลักในการอ้างอิงหากระแสลัดวงจร ซึ่งเป็นหัวใจในการคำนวณออกแบบระบบไฟฟ้า แล้วนำขั้นตอนต่าง ๆ ในการออกแบบระบบไฟฟ้าเข้าหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาเดลไฟล์ เพื่อให้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ออกแบบหากระแสโหลด,กระแสลัดวงจร,ขนาดสาย,ขนาดอุปกรณ์ป้องกันและขนาดหม้อแปลง ที่เหมาะสม โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ทำให้การออกแบบทำได้สะดวก รวดเร็ว ถูกต้อง และมีมาตรฐานเดียวกัน ง่ายต่อการตรวจสอบ แก้ไข และโปรแกรมมีการนำระบบฐานข้อมูลมาใช้ในการเก็บข้อมูลของ อุปกรณ์ป้องกัน , สายเคเบิล , หม้อแปลง , มอเตอร์ ทำให้สะดวกต่อการแก้ไข เพิ่มเติมอุปกรณ์ป้องกันชนิดใหม่ ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ออกแบบในการพัฒนาฐานข้อมูลให้ทันสมัยอยู่เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	CAD for Short Circuit Current Calculation and Coordination of Protective Devices in Distribution System
Student	Mr. Suchart Manomayangoon
Student ID.	37061129
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Sulee Banjongjit

ABSTRACT

According to our various electrical system design caused by the different designers which recognized in their standard .This problem effect to the responsive organization which have to take care of all the designers to keep them in the same standard. IEEE Std.141-1986 is one of the famous standard for this matter to be reference for short circuit calculation and all another design method are applied in the Delphi computer program to presence the single line diagram include the easier way to find out the result after input the load-data. The database is provided inside for collect the data of all the equipment which needed for design such as circuitbreaker , cable , motor and transformer .That will make us more convenient in design process and easier to update the new model of the equipments in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานในงานออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังจาก รศ.ศุลี บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ ชาย ชมภูอินไหว ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในด้านข้อมูลโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ในบริษัท เอช.ที.อี. เพาเวอร์ แอนด์ เคเบิล จก. ทุกท่านที่ให้โอกาสและช่วยเหลือด้านเอกสารต่างๆ เรื่อยมา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้คำแนะนำ ขั้นตอน ดำเนินการต่างๆ ให้ด้วยความเรียบร้อยดี

สุดท้าย ขอขอบคุณ คุณพ่อเสถียร , คุณแม่อภิญญา , คุณจุฑาภรณ์ ภรรยา และลูก ๆ ชาติยาภรณ์ และ ภมรชาติ ที่เป็นกำลังใจให้ผู้เขียนเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุชาติ มโนมยางกูร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำโครงงาน.....1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน.....2

1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....2

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา.....3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 การออกแบบระบบไฟฟ้า.....4

2.1 บทนำ.....4

2.2 วงจรย่อยสำหรับวงจรแสงสว่างและเครื่องใช้ไฟฟ้า.....4

2.3 สายป้อนสำหรับวงจรย่อย.....6

2.4 วงจรย่อยสำหรับมอเตอร์.....8

2.5 วงจรสายป้อนมอเตอร์.....10

2.6 สายศูนย์.....12

2.7 ระบบเมน.....13

2.8 การหาขนาดหม้อแปลง.....15

2.9 ตัวอย่างการออกแบบระบบไฟฟ้า.....15

บทที่ 3 การคำนวณขนาดกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std.141-1986.....18

3.1 การคำนวณขนาดกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std.141-1986.....18

3.1.1 การเกิดกระแสลัดวงจร.....18

3.1.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร.....18

3.1.3 กระแสสมมาตรและไม่สมมาตร.....22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2 คำสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาขนาดกระแสลัดวงจรที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....24

3.2.1 แฟกเตอร์ X/R.....24

3.2.2 โมเมนทารีดิวตี้.....25

3.2.3 อินเทอร์รัพติ้งดิวตี้.....26

3.3 การคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่น้อยกว่า 1 kV.....26

3.3.1 ผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า.....26

3.4 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่มากกว่า 1 kV.....29

3.4.1 วิธีอย่างง่ายโดยพิจารณาเฉพาะค่า E/X.....29

3.4.2 วิธีการใช้ค่า E/X ที่มีการชดเชยในส่วนของการลดขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสสลับ.....30

3.4.3 ค่าความต้านทานของระบบและอัตราส่วนรีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์.....32

3.5 ขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std 141-1986....35

3.6 การวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรโดยวิธีคิดโดยตรง.....41

3.6.1 กรรมวิธีการวิเคราะห์.....41

3.6.2 การหาค่ากระแสลัดวงจรในลักษณะต่างๆ.....42

3.6.3 ตัวอย่างแสดงการคำนวณกระแสลัดวงจรวิธีโดยตรง.....51

บทที่ 4 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

4.1 ความหมาย.....54

4.2 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการศึกษาเรื่องการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....55

4.2.1กระแสลัดวงจร.....55

4.2.2 ช่วงห่างของเวลาในการทำงานร่วมกัน.....55

4.3 Load Flow Current.....57

4.4 กระแสพิคอัพ.....57

4.5 หลักการในการสร้างกราฟแสดงการทำงานร่วมกัน.....58

4.6 หลักในการออกแบบเพื่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....59

4.7 กรรมวิธีในการออกแบบ.....60

4.8 ตัวอย่างขั้นตอนการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.9 สรุปหลักการเพื่อให้อุปกรณ์มีการทำงานร่วมกัน.....74
4.10 ข้อมูลที่จำเป็นที่ใช้ในการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน.....74

บทที่ 5 การออกแบบ การใช้งาน และผลการทดสอบโปรแกรม

5.1 การออกแบบ การคำนวณหากระแสลัดวงจรและการโคออดิเนชั่น.....76
5.2 วิธีการใช้โปรแกรม.....77
5.3 ผลการทดสอบโปรแกรม.....88

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป.....94
6.2 วิจารณ์และเสนอแนะ.....96

บรรณานุกรม.....98

ภาคผนวก.....99
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการเรื่อง การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ กระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน ในระบบไฟฟ้า.....100
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลรายละเอียดของสายและขนาดกระแสของมอเตอร์แต่ละ ขนาด.....106
ภาคผนวก ค Single Line Diagram ตัวอย่างจากการออกแบบจริงเพื่อเปรียบเทียบ กับผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม.....109

ประวัติผู้เขียน.....111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงขนาดสายไฟฟ้าที่เดินในท่อโลหะที่ใช้กับวงจรย่อยขนาดต่าง ๆ 6
2.2 แสดงขนาดกระแสของสายสำหรับมอเตอร์ที่ใช้งานไม่ต่อเนื่อง.....9
2.3 พิกัดหรือขนาดปรับตั้งสูงสุดของเครื่องป้องกันการลัดวงจร.....10
2.4 ขนาดต่ำสุดของสายดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า.....12
2.5 พิกัดสูงสุดของเครื่องป้องกันกระแสเกินและโหลดสูงสุดตามขนาดเครื่องวัดไฟฟ้า.....14

3.1 การหาค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรหาได้โดยการใช้ค่าตัวคูณ คูณกับกระแสสมมาตร.....25
3.2 รวมค่าตัวคูณของรีแอกแตนซ์ (หรืออิมพีแดนซ์) ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน.....27
3.3 ค่าตัวคูณรีแอกแตนซ์ (อิมพีแดนซ์) ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน.....31
3.4 ช่วงอัตราส่วน X/R ของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้.....33
3.5 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้.....33
3.6 กรณีที่เป็นคลาสอื่น ให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ในตารางคูณกับค่าพิกัดกำลัง (MVA) 34
3.7 ค่ารีแอกแตนซ์สำหรับเครื่องจักรไฟฟ้าอินดักชั่นและซิงโครนัส เป็นค่าเปอร์ยูนิตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่พิกัด kVA.....38
3.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-IV และPD-THW แบบ 3 เฟสเดิน ในท่อโลหะ.....39
3.9 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-THW ไม่เดินในท่อโลหะ และชนิด PD-NYY แบบ 3 เฟส เดินในอากาศ หรือต่อลงดินโดยตรงแบบ 3 เฟส.....40
3.10 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง 41

4.1 ค่าสำหรับการป้องกัน.....62
4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสที่ระบบต่าง ๆ กัน.....63

5.1 ผลการทดสอบโปรแกรมจากตัวอย่างที่ 1.....89
5.2 ผลการทดสอบโปรแกรมจากตัวอย่างที่ 2.....90
5.3 บันทึกผลการจากตัวอย่างที่ 3 คำนวนเปรียบเทียบขนาดสายระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการออกแบบจริง.....92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.4 บันทึกผลการจากตัวอย่างที่ 3 คำนวนเปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน ค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการออกแบบจริง.....93

5.5 บันทึกผลการจากตัวอย่างที่ 3 คำนวนเปรียบเทียบขนาดของหม้อแปลง ค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการออกแบบจริง.....93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลังจากได้ทำการคำนวณ.....17

3.1 แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร.....18

3.2 ค่ากระแสลัดวงจรชนิดวงจรชนิดสมมาตร จะมีค่าเท่ากับผลบวก
ของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่นทั้งหมด.....19

3.3 รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสไม่สมมาตร.....20

3.4 รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสสมมาตร.....20

3.5 ลักษณะของสมมาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะเกิดการลัดวงจร
นั้นคือค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าสูงสุด.....22

3.6 ลักษณะของการไม่สามาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการ
ลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด.....23

3.7 กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร จะเกิดการรวมของกระแส
สลับที่สมมาตรกับองค์ประกอบกระแสตรง.....23

3.8 การลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าระหว่างสูงสุดและต่ำสุด.....24

3.9 องค์ประกอบกระแสตรง.....24

3.10 การหาค่าตัวคูณในการเปลี่ยนแปลงค่า X/R สัมพันธ์กับเวลา
นับตั้งแต่เริ่มต้นเกิดการผิดปกติ.....26

3.11 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส
โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ.....31

3.12 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟส
ลงดิน โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ.....31

3.13 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสและหนึ่งเฟสลงดิน
โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงเพียงอย่างเดียว.....32

3.14 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับหม้อแปลงกำลัง.....34

3.15 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....34

3.16 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซาเลี่ยนโพลที่มีโซลิต
โรเตอร์ขนาดเล็ก (Small Solid Rotor and Salient Pole Generator) และ
ซิงโครนัสมอเตอร์.....35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.17	กระแสลัดวงจรจากการจำหน่ายของการไฟฟ้า	42
3.18	กระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	42
3.19	กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ที่น้อยกว่า 50 แรงม้า	43
3.20	กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ที่ขนาดใหญ่มากกว่า 50 แรงม้า	43
3.21	การหาค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลจากทางเซคคันดารี่ไปยังทางไพรมารี่ของหม้อแปลง	45
3.22	กระแสลัดวงจรทั้งหมดที่หาจากจุดเริ่มต้นของสายป้อน	46
3.23	การหาค่ากระแสทางเซคคันดารี่ของหม้อแปลง	47
3.24	การคำนวณหากระแสลัดวงจรบนสายป้อน	49
3.25	วันไลน์ไดอะแกรมสำหรับตัวอย่างการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร	51
4.1	คุณลักษณะของกระแสกับเวลาที่เป็นย่าน	58
4.2	วันไลน์ไดอะแกรมสำหรับตัวอย่างในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์	68
4.3	ตำแหน่งที่อยู่คงที่ในกราฟ,กราฟการป้องกันหม้อแปลง,ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเบรคเกอร์ขนาด 100 A	69
4.4	คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่ระดับแรงดันต่ำ	70
4.5	กราฟคุณลักษณะของตัวรีเลย์ป้องกันกระแสเกินและการปรับตั้งค่าของการทำงานแบบฉับพลัน	71
4.6	กราฟแสดงการทำงานร่วมกันของรีเลย์หลักที่มีหน้าที่ป้องกันกระแสเกิน	72
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาสำหรับรีเลย์ที่ค่าปรับตั้งต่าง ๆกัน	73
5.1	รูปแบบของหน้าจอของโปรแกรม	79
5.2	กรอบแสดงข้อมูลของมอเตอร์	81
5.3	กรอบที่ใช้แสดงข้อมูลของเซอร์กิตเบรคเกอร์	82
5.4	กรอบที่ใช้แสดงข้อมูลการโคออดิเนชั่น	83
5.5	โฟลว์ชาร์ตแสดงกรรมวิธีหาค่ากระแสฟอลต์และหาค่าอินเตอร์รัพติ้งคาปาซิตี้ของเซอร์กิตเบรคเกอร์	84
5.6	โฟลว์ชาร์ตแสดงการหาขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของบริภัณฑ์ไฟฟ้า	85
5.7	โฟลว์ชาร์ตแสดงการโคออดิเนชั่นของอุปกรณ์ป้องกันโดยอัตโนมัติ	86

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.8 โฟลว์ชาร์ตแสดงการโคออดิเนชั่นของอุปกรณ์ป้องกันโดยเลือกเอง.....87

5.9 ระบบ Low Voltage System ที่นำมาเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม.....88

5.10 ระบบ Sample System ที่นำมาเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม.....89

5.11 Single Line Diagram ที่วาดได้จากโปรแกรมตามตัวอย่างจากแบบใช้งานจริง.....91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตที่ผ่านมา การออกแบบระบบไฟฟ้าทั่วไป ผู้ออกแบบจะเป็นผู้เลือกมาตรฐาน , ข้อกำหนด หรือ ค่าที่เกี่ยวข้องต่างๆ ตามแต่ที่ผู้ออกแบบในแต่ละสำนักยึดถือปฏิบัติมาโดยตลอด ซึ่งหากมองถึงความถูกต้องของแต่ละวิธีและรูปแบบในการออกแบบแล้วทุกแห่งจะสามารถอ้างอิงถึงมาตรฐานสากลและเหตุผลของตนเองได้ แต่หากมองในภาพรวมถึงองค์กรที่รับผิดชอบ ควบคุมดูแลการออกแบบระบบไฟฟ้า หรือ ความเป็นสากลของการออกแบบและวิธีการคำนวณเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องหรือเพื่อการแก้ไขเปลี่ยนแปลงแบบได้ง่ายมีมาตรฐานเดียวกันและหาข้อสรุปในการชี้ชัดถึงความถูกต้องของการออกแบบระบบ เพื่อหากฎ,ข้อกำหนด,ค่าความปลอดภัยต่างๆ อย่างเป็นมาตรฐาน และเพิ่มความสะดวกรวดเร็วแก่วิศวกรผู้ออกแบบระบบไฟฟ้า โดยเริ่มการคำนวณจากโหลดพื้นฐานในแต่ละวงจรย่อย เพื่อนำเลือกขนาดสายป้อนวงจร, หม้อแปลง,ขนาดกระแสพิกัด,ขนาดกระแสลัดวงจร,การเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกัน รวมถึงช่วยในการจำลองสร้าง Single line Diagram ที่สมบูรณ์ ซึ่งอ้างอิงมาตรฐานและข้อกำหนดเดียวกันคือ IEEE Std.141-1986 แล้วใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการออกแบบระบบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการทำโครงงาน

1. นำเอามาตรฐานของ ANSI/IEEE Std 141-1986 ซึ่งเป็นที่ยอมรับทั่วไปมาเป็นหลักในการหาค่ากระแสลัดวงจร
2. ศึกษาข้อมูลการออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้า ตั้งแต่รูปแบบของโหลด ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน และการคำนวณกระแสพิกัดที่รูปแบบต่างๆ กัน
3. ศึกษาข้อมูลการออกแบบจากมาตรฐาน ANSI/IEEE Std 141-1986 , IEC ,NEC และกฎของการไฟฟ้านครหลวง
4. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น คุณสมบัติของสายตัวนำ , เซอร์กิตเบรคเกอร์ หรืออุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ
5. นำข้อมูลจากการศึกษาและรวบรวม มาประยุกต์โดยใช้คอมพิวเตอร์ภาษาเดลไฟล์ช่วยในการออกแบบระบบไฟฟ้า เริ่มจากการคำนวณกระแสตามพิกัด , กระแสลัดวงจร นำค่านั้นมาช่วยในการเลือกหาขนาด สาย หม้อแปลงไฟฟ้า และเลือกอุปกรณ์ป้องกัน รวมถึงแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการทำโครงงาน

1. เขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาเดลไฟล์ ในการคำนวณหาขนาดของกระแสที่พิกัด และกระแสลัดวงจรที่ตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE Std. 141-1986
2. ให้นำค่าที่คำนวณได้เข้าเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าที่มีอยู่ เพื่อตัดสินใจเลือกโดยผู้ออกแบบเองหรือเลือกตามที่โปรแกรมแนะนำ
3. เลือกอุปกรณ์ป้องกันที่จะทำงานร่วมกัน โดยผู้ออกแบบหรือโปรแกรมช่วยตัดสินใจนำ
4. ทำฐานข้อมูล ชนิด, รุ่นของอุปกรณ์ป้องกันให้ผู้ออกแบบเลือกและให้เพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลได้ตลอดเวลาเพื่อความทันสมัยของอุปกรณ์ที่จะใช้ ซึ่งมีการพัฒนาอยู่เสมอ
5. สามารถเก็บข้อมูลการออกแบบระบบไฟฟ้าไว้ในคอมพิวเตอร์ได้ เพื่อความสะดวกในการเรียกใช้ สามารถทำการแก้ไขเปลี่ยนแปลงการออกแบบ จัดทำโหลดให้สมดุลย์ได้ง่ายขึ้น

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษารูปแบบทั่วไปของการออกแบบระบบไฟฟ้าของผู้ออกแบบ , ผู้มีประสบการณ์หลายๆ แห่งเพื่อประมวลขั้นตอนในการออกแบบ ,การใช้ factor ต่างๆ ในการอ้างอิงถึงทฤษฎีหรือกฎการไฟฟ้านครหลวง
2. นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาข้างต้นเข้าอิงกับมาตรฐาน ANSI/IEEE Std. 141-1986 เพื่อทำการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบ ทั้งแบบทั่วไป และแบบ Per Unit
3. ศึกษาวิธีการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าที่มีในระบบ
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาเดลไฟล์
5. รวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันคือ เซอร์กิตเบรคเกอร์ และ ฟิวส์เพื่อเป็นฐานข้อมูลของโปรแกรม
6. เขียน Flowchart เพื่อเตรียมเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามทฤษฎีที่ทำการศึกษา
7. เขียน Program ตาม Flowchart ที่เตรียมไว้
8. ทดสอบโปรแกรม , เปรียบเทียบผลการทำงานของโปรแกรม และทำการแก้ไขโปรแกรม
9. สรุปผลการทดลอง

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1.Asymmetrical Fault หมายถึงการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

2.Coordination หมายถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

3.Distribution System หมายถึงระบบจำหน่ายไฟฟ้า

4.Interupting Capacity หมายถึงความสามารถในทนต่อขนาดการลัดวงจรของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใด... ...ที่มีการนำไปใช้

5.Momentary Duty หมายถึง กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 1-2 ไซเคิลแรก

6.Protective Devices หมายถึงอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรคเกอร์

7.Short Circuit Current หมายถึงกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบ

8.Symmetrical Fault หมายถึงการลัดวงจรแบบสมมาตรที่เกิดขึ้นในระบบ

9.Symmetrical Component หมายถึงองค์ประกอบสมมาตรของระบบซึ่งช่วยในการคำนวณเพื่อหาภาวะผิดปกติแบบไม่สมมาตร

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งเป็นเครื่องมือในการช่วยออกแบบงานระบบไฟฟ้าให้ผู้ออกแบบทำงานได้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้นทั้งในการตรวจเช็คระบบไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่ระบบใหม่ที่ต้องการทำการออกแบบ
2. ทำให้การออกแบบวันไลน์ไดอะแกรมมีการทำโหลดสมดุลย์ได้เด่นชัดขึ้น
3. ทำให้การออกแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทำได้ง่าย และ ถูกต้องรวดเร็วมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การออกแบบระบบไฟฟ้า

2.1 บทนำ

ระบบไฟฟ้าในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น อาคารที่อยู่อาศัย อาคารพาณิชย์ และโรงงานอุตสาหกรรม จะประกอบไปด้วยวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ มากมายหลายวงจรเพื่อให้สะดวกต่อการออกแบบ และติดตั้งจึงได้แบ่งวงจรไฟฟ้าเหล่านี้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1. วงจรย่อย (Branch Circuit)
2. วงจรสายป้อน (Feeder Circuit)
3. วงจรสายเมน (Main Circuit)

2.2 วงจรย่อยสำหรับวงจรย่อยแสงสว่างและเครื่องใช้ไฟฟ้า

วงจรย่อย คือ ส่วนของวงจรไฟฟ้าที่ต่อมาจากอุปกรณ์ป้องกันตัวสุดท้ายกับจุดต่อโหลด โดยที่อุปกรณ์ป้องกันนี้จะมีหน้าที่ป้องกันวงจรย่อยนั้นเท่านั้น

2.2.1 วงจรย่อยอาจจะแบ่งตามลักษณะการจ่ายโหลดได้ 3 แบบคือ

1.) วงจรย่อยเฉพาะ (Individual Branch Circuit)
หมายถึง วงจรย่อยที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าเพียงหนึ่งอย่างเท่านั้น

2.) วงจรย่อยใช้งานทั่วไป (General Purpose Branch Circuit)
หมายถึง วงจรย่อยที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดแสงสว่าง โหลดเต้ารับ (Receptacle) หรือทั้งโหลดแสงสว่างและโหลดเต้ารับรวมกัน

3.) วงจรย่อยเครื่องใช้ไฟฟ้า (Appliance Branch Circuit)
หมายถึง วงจรย่อยที่จ่ายไฟให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าตั้งแต่หนึ่งจุดขึ้นไป

2.2.2 ขนาดของวงจรย่อย

ขนาดของวงจรย่อยให้กำหนดตามขนาดของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่ใช้ตัดกระแส สำหรับวงจรนั้นแต่บางครั้งอุปกรณ์ป้องกันของบริษัทผู้ผลิตไม่มีค่าตรงตามที่ระบุไว้จะต้องใช้ค่าที่สูงขั้นถัดไป เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB) ตามมาตรฐาน IEC ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 16 A ใช้กับวงจรย่อยขนาด 15 A

เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 32 A ใช้กับวงจรย่อยขนาด 30 A

2.2.3 การคำนวณวงจรย่อย

การคำนวณวงจรย่อย เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน สามารถคิดโหลดเป็นโวลต์ แอมแปร์ (VA) หรือ กระแส (A) ก็ได้ แต่ในที่นี้จะคิดเป็นกระแส เนื่องจากขนาดของวงจรย่อย หรืออุปกรณ์ป้องกันบอกเป็นกระแส และวงจรย่อยมีค่าแรงดันที่แน่นอนอยู่แล้ว การคำนวณโหลด VA เป็นกระแสสามารถทำได้ดังนี้

โหลด 1 เฟส $I_L = \frac{VA}{V}$ .....(2.1)

โหลด 3 เฟส $I_L = \frac{VA}{\sqrt{3}V_L}$ .....(2.2)

โดยที่ I_L = กระแสโหลด (A)

VA = ขนาดโหลดเป็นโวลต์-แอมป์ (VA)

V_L = แรงดันระหว่างเฟส 380 V (กฟน.) หรือ 400V (กฟภ.)

V = แรงดันโหลด 1 เฟส 220 V หรือ 230 V

2.2.4 การคำนวณโหลดของวงจรย่อยมีดังนี้

ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันมีวิธีคิดดังนี้

กรณีอุปกรณ์ป้องกันทั่วไป

$$CB_{BC} = 1.25I_{L1} + 1.00I_{L2} \quad \text{.....(2.3)}$$

กรณีที่อุปกรณ์ป้องกันทำงานที่ 100 % ของขนาดที่ตั้งไว้

$$CB_{BC} = 1.00I_{L1} + 1.00I_{L2} \quad \text{.....(2.4)}$$

โดยที่ CB_{BC} = ขนาดของ CB (AT)

I_{L1} = กระแสโหลดชนิดโหลดต่อเนื่อง (A)

I_{L2} = กระแสโหลดชนิดโหลดไม่ต่อเนื่อง (A)

<u>หมายเหตุ</u> โดยทั่วไปอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในวงจรย่อยจะมีขนาดเล็ก ซึ่งไม่ใช่แบบทำงาน 100%

2.2.5 พิกัดกระแสของสายวงจรย่อยจะต้องไม่น้อยกว่ากระแสโหลดที่คำนวณได้นั้นคือ

$$I_{BC} \geq 1.25I_{L1} + 1.00I_{L2} \quad \text{.....(2.5)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อกำหนดนี้พิกัดกระแสของสายวงจรย่อยอาจจะเล็กกว่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันกับวงจรย่อยได้ เช่น ถ้ากระแสโหลดคำนวณได้ 22 A เซอร์กิตเบรกเกอร์ของวงจรย่อยจะต้องใช้

ค่าถัดไปคือ 30 A สายวงจรย่อยใช้ขนาด 4 Sqmm. (24A)

อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกและเผื่อการขยายโหลดควรใช้ขนาดสายวงจรย่อยให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถป้องกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดสายไฟฟ้าเดี่ยวที่เดินในท่อโลหะที่ใช้กับวงจรย่อยขนาดต่าง ๆ

อุปกรณ์ป้องกัน (A)	ขนาดสาย (Sqmm.)
5,10,15	2.5 (18A)
20	4 (24A)
30	6 (31A)
40	10 (43A)
50	16 (56A)

เอกสารอ้างอิงหมายเลข [1]

หมายเหตุ

1. ตัวเลขในวงเล็บ คือ ค่าพิกัดกระแสเป็นแอมแปร์ของสายขนาดนั้น ๆ
2. อุปกรณ์ป้องกัน 5 . 10 และ 15 A ใช้สายขนาด 2.5 Sqmm. ทั้งหมดเนื่องจาก กฟน. กำหนดให้ขนาดของสายไฟที่เล็กที่สุดสำหรับวงจรย่อยคือ 2.5 Sqmm.

2.3 สายป้อนสำหรับวงจรย่อยแสงสว่าง และเครื่องใช้ไฟฟ้า (Feeder)

สายป้อน หมายถึง กลุ่มวงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากสายเมน (Service Conductor) โดยเริ่มจากแผงสวิตช์เมน (Main Switch Board) ไปจนถึงอุปกรณ์ป้องกันวงจรย่อย

2.3.1 การคำนวณโหลดสายป้อน

โหลดสายป้อนก็คือ ผลรวมของโหลดวงจรย่อย แต่เนื่องจากสายป้อนจ่ายโหลดจำนวนค่อนข้างมากมีโอกาสที่จะใช้ไม่พร้อมกัน จึงสามารถให้ใช้ค่า Demand Factor ที่เหมาะสมได้

$$I_{LF} = \sum BC \times DF \qquad \text{.....(2.6)}$$

โดยที่ I_{LF} = โหลดสายป้อน (A)

BC = โหลดวงจรย่อย (A)

DF = Demand Factor ตามที่การไฟฟ้ากำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 พิกัดกระแสของสายป้อน จะสามารถคำนวณได้ดังนี้คือ

$$I_F \geq 1.25I_{L1} + 1.00I_{L2} \qquad \text{.....(2.7)}$$

โดยที่ I_F = พิกัดกระแสของสายป้อน (A)

I_{L1} = กระแสโหลดชนิดโหลดต่อเนื่อง (A)

I_{L2} = กระแสโหลดชนิดโหลดไม่ต่อเนื่อง (A)

อย่างไรก็ตาม ขนาดของสายป้อนเล็กสุดที่สามารถใช้ได้คือ 4 Sqmm.

2.3.3 การป้องกันสายป้อน

อุปกรณ์ป้องกันสายป้อนที่นิยมใช้ป้องกันวงจรสายป้อนคือ สวิตช์อัตโนมัติ (CB) สวิตช์อัตโนมัติที่นิยมใช้กันส่วนมากผลิตตามมาตรฐาน NEMA และ IEC ซึ่งมีขนาดพิกัดมาตรฐานแอมป์เฟรมต่างกันเล็กน้อย คือ

NEMA	(A)	50	100	225	250	400	600	800
		1000	1200	1600	2000	2500	4000	5000
IEC	(A)	63	100	125	160	200	250	315
		400	500	630	800	1000	1250	1600
		2000	2500	3150	4000	5000	6300	

2.3.4 ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันสายป้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

กรณีอุปกรณ์ป้องกันทั่วไป

$$CB_F = 1.25I_{L1} + 1.00I_{L2} \quad \text{.....(2.8)}$$

กรณีอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานได้ 100% ของขนาดที่ตั้งไว้

$$CB_F = 1.00I_{L1} + 1.00I_{L2} \quad \text{.....(2.9)}$$

โดยที่ CB_F = ขนาดของ CB (AT)

I_{L1} = กระแสโหลดชนิดโหลดต่อเนื่อง (A)

I_{L2} = กระแสโหลดชนิดโหลดไม่ต่อเนื่อง (A)

และเมื่อขนาดอุปกรณ์ป้องกันที่คำนวณได้ไม่ใช่ขนาดมาตรฐานให้พิจารณาดังนี้

กระแสโหลด $\leq$ 800 A ให้ใช้ขนาดสูงขึ้นถัดไป

กระแสโหลด $>$ 800 A ให้ใช้ขนาดต่ำลงขั้นหนึ่ง

2.4 วงจรย่อยสำหรับมอเตอร์ (Motor BranchCircuit)

ขนาดของสายไฟฟ้าสำหรับวงจรย่อยมอเตอร์ จะต้องมีขนาดพิกัดเพียงพอที่จะจ่ายโหลดมอเตอร์ได้ โดยที่ขนาดสายที่เล็กที่สุดคือ 2.5 Sqmm. เนื่องจากโหลดมอเตอร์มีการใช้งานใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ ห้ามนำไปใช้ในเชิงการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้

ลักษณะต่าง ๆ กัน ดังนั้นพิกัดกระแสของสายไฟจึงต้องเลือกใช้ที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของมอเตอร์ด้วย

2.4.1 มอเตอร์ใช้งานทั่วไป

โดยทั่วไปโหลดมอเตอร์จะถือว่าเป็นแบบต่อเนื่อง ดังนั้นสายวงจรมอเตอร์จะต้องมีขนาด ไม่น้อยกว่า 125% ของพิกัดกระแสมอเตอร์

$$I_C \geq 1.25\, I_M \qquad \text{.....(2.10)}$$

โดยที่ I_C = พิกัดกระแสวงจรย่อยมอเตอร์

I_M = พิกัดกระแสของมอเตอร์

2.4.2 มอเตอร์หลายความเร็ว (multispeed Motor)

สำหรับมอเตอร์หลายความเร็วแต่ละความเร็วจะมีพิกัดกระแสต่างกันให้ใช้ค่าพิกัดสูงสุด

2.4.3 มอเตอร์ใช้งานไม่ต่อเนื่อง

สำหรับมอเตอร์ที่ใช้งานเป็นระยะ หรือเป็นคาบ พิกัดกระแสวงจรย่อยต้องไม่ต่ำกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ตามลักษณะการใช้งานของมอเตอร์ในตารางที่ 2.2 คูณพิกัดกระแสมอเตอร์

$$I_C \geq K_1 I_M \qquad \text{.....(2.11)}$$

โดยที่ I_C = พิกัดกระแสวงจรย่อยของมอเตอร์

I_M = พิกัดกระแสของมอเตอร์

K_1 = ค่าเปอร์เซ็นต์ตามตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ขนาดกระแสของสายสำหรับมอเตอร์ที่ใช้งานไม่ต่อเนื่อง

ประเภทการใช้งาน	ร้อยละของพิกัดกระแสบนแผ่นป้ายประจำเครื่อง			
	มอเตอร์พิกัดใช้งาน 5 นาที	มอเตอร์พิกัดใช้งาน 15 นาที	มอเตอร์พิกัดใช้งาน 30 และ 60 นาที	มอเตอร์พิกัดใช้งานต่อเนื่อง
ใช้งานระยะสั้น เช่น มอเตอร์หมุนปิด-เปิดวาล์ว	110	120	150	-
ใช้งานเป็นระยะ เช่น มอเตอร์เครื่องลิฟท์ มอเตอร์ปิด-เปิดสะพาน	85	85	90	140
ใช้งานเป็นคาบ เช่น มอเตอร์หมุนลูกกลิ้ง	85	90	95	140
ใช้งานที่เปลี่ยนแปลง	110	120	150	200

เอกสารอ้างอิงหมายเลข [1]

2.4.4 การป้องกันการลัดวงจรสำหรับวงจรย่อยมอเตอร์

วงจรย่อยมอเตอร์จะต้องมีการป้องกันการลัดวงจรสำหรับสายไฟฟ้า , อุปกรณ์ควบคุมและ ตัวมอเตอร์เอง อุปกรณ์สำหรับการป้องกันการลัดวงจรของวงจรย่อยนี้ จะต้องสามารถนำกระแสเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ได้โดยไม่เปิดวงจร

<u>สวิตซ์อัตโนมัติ</u> (Circuit Breaker)

สวิตซ์อัตโนมัติ ที่ใช้ในวงจรมอเตอร์มี 2 ประเภท คือ

- สวิตซ์อัตโนมัติแบบเวลาผกผัน (Inverse Time Circuit Breaker)
- สวิตซ์อัตโนมัติแบบปลดทันที (Instantaneous Circuit Breaker)

สวิตซ์อัตโนมัติแบบเวลาผกผัน คือ สวิตซ์อัตโนมัติที่ใช้ทั่วไปในวงจรจำหน่าย สวิตซ์อัตโนมัติแบบนี้มีเส้นโค้งลักษณะสมบัติ 2 ช่วง คือ ช่วงกระแสเกินโหลดเป็นแบบเวลาผกผัน (Inverse Time) และช่วงกระแสปลดวงจรทันที (Instantaneous Trip) สวิตซ์อัตโนมัติแบบนี้จะต้องปรับตั้งช่วงกระแสปลดวงจรทันทีให้มากกว่ากระแสเริ่มต้นของมอเตอร์ ส่วนสวิตซ์อัตโนมัติแบบปลดทันที คือ สวิตซ์อัตโนมัติที่มีช่วงปลดวงจรทันทีเพียงอย่างเดียว สวิตซ์อัตโนมัติแบบนี้ถูกออกแบบให้ใช้กับวงจรมอเตอร์โดยเฉพาะ ในการเลือกฟิวส์และสวิตซ์อัตโนมัติจะต้องเลือกใช้ขนาดที่เหมาะสมกับมอเตอร์ โดยการไฟฟ้าได้ให้พิกัดหรือขนาดปรับตั้งสูงสุดไว้ในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 พิกัดหรือขนาดปรับตั้งสูงสุดของเครื่องป้องกันการลัดวงจร

ชนิดของมอเตอร์	ร้อยละของกระแสโหลดเต็มที่			
	ฟิวส์ทำงานไว	ฟิวส์หน่วงเวลา	สวิตช์อัตโนมัติปลดทันที	สวิตช์อัตโนมัติเวลาผกผัน
มอเตอร์กระแสสลับ 1 เฟส และมอเตอร์ 3 เฟส แบบสไควเรลเคจ และแบบซิงโครนัส	300	175	700	250
มอเตอร์แบบวาวล์โรเตอร์	150	150	700	150

เอกสารอ้างอิงหมายเลข [1]

ค่าพิกัดหรือขนาดปรับตั้งของฟิวส์และสวิตซ์อัตโนมัติที่ให้ไว้ตามตารางเป็นค่าสูงสุด ค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตฟิวส์และสวิตซ์อัตโนมัติได้ให้ไว้สำหรับมอเตอร์ขนาดต่าง ๆ จะต่ำกว่าค่าที่แสดงไว้ในตาราง ซึ่งจะทำให้การป้องกันดีขึ้น อย่างไรก็ตามค่าที่ใช้นี้จะต้องไม่ทำให้เปิดวงจรขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง

การเลือกขนาดพิกัดของสวิตซ์อัตโนมัติ จะต้องคำนึงถึงกระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุด ติดตั้งด้วย โดยที่ฟิวส์และสวิตซ์อัตโนมัติที่จะใช้ในการป้องกันวงจรนั้น จะต้องมีค่ากระแสขณะตัดวงจร (Interrupting Capacity ,IC) ไม่น้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุดติดตั้งด้วย

2.5 วงจรสายป้อนมอเตอร์

การออกแบบวงจรสายป้อนที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์หลายตัว หรือมอเตอร์รวมกับโหลดชนิดอื่น เช่น ไฟฟ้าแสงสว่าง จะต้องคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้

- ขนาดสายป้อน
- การป้องกันสายป้อน

2.5.1 ขนาดสายป้อนและการป้องกันสายป้อน

การหาขนาดสายป้อนและขนาดอุปกรณ์ป้องกันสายป้อน จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ มอเตอร์หลายตัวและมอเตอร์รวมกับโหลดชนิดอื่น ดังนี้

- กรณีมอเตอร์หลายตัว

พิกัดกระแสสายป้อน $\geq$ 1.25 พิกัดกระแสมอเตอร์ตัวโตที่สุด
+ ผลรวมพิกัดกระแสมอเตอร์ที่เหลือ

$$I_F \geq 1.25\, I_{M.MAX} + \sum I_R \qquad \text{.....(2.12)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอุปกรณ์ป้องกัน ≥ พิกัดกระแสมอเตอร์ตัวโตที่สุด
+ ผลรวมพิกัดกระแสมอเตอร์ที่เหลือ

$$CB_F \geq CB_{MAX} + \sum I_R \quad \text{.....(2.13)}$$

- กรณีมอเตอร์กับโหลดอื่น ๆ (โหลดอื่น ๆ เป็นโหลดต่อเนื่อง)

พิกัดกระแสสายป้อน ≥ 1.25 พิกัดกระแสมอเตอร์ตัวโตที่สุด
+ ผลรวมพิกัดกระแสมอเตอร์ที่เหลือ
+ 1.25 พิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง

$$I_F \geq 1.25\, I_{M,MAX} + \sum I_R + 1.25\, I_L \quad \text{.....(2.14)}$$

ขนาดอุปกรณ์ป้องกัน ≥ พิกัดกระแสมอเตอร์ตัวโตที่สุด
+ ผลรวมพิกัดกระแสมอเตอร์ที่เหลือ
+ 1.25 พิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง

$$CB_F \geq CB_{MAX} + \sum I_R + 1.25\, I_L \quad \text{.....(2.15)}$$

โดยที่ I_F = พิกัดกระแสสายป้อน
$I_{M,MAX}$ = พิกัดกระแสมอเตอร์ตัวโตที่สุด
$\sum I_R$ = ผลรวมพิกัดกระแสโหลดมอเตอร์ที่เหลือ
I_L = พิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง
CB_F = ขนาดเครื่องป้องกันสายป้อน
CB_{MAX} = ขนาดเครื่องป้องกันมอเตอร์ตัวใหญ่ที่สุด

2.5.2 สายดินสำหรับวงจรมอเตอร์

เพื่อความปลอดภัยวงจรย่อยมอเตอร์จะต้องมีการเดินสายดินเพื่อไปต่อเข้ากับโครงโลหะมอเตอร์ ขนาดของสายดินให้คิดตามขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ตามที่การไฟฟ้า ฯ กำหนดในตารางที่ 2.4 แต่ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้อาจมีขนาดใหญ่เนื่องจากจะต้องให้มอเตอร์สามารถเริ่มเดินเครื่องได้ ดังนั้นสายดินในตารางจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย จนบางครั้งอาจใหญ่กว่าสายเฟสวงจรย่อย ในกรณีนี้อนุญาตให้ใช้ขนาดสายดินเท่ากับสายเฟสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ขนาดต่ำสุดของสายดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า

พิกัดหรือขนาดปรับตั้งของเครื่องป้องกันกระแสเกิน (A)	ขนาดต่ำสุดของสายดินของเครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้า (ตัวนำทองแดง) (Sqmm.)
6-16	1.5
20-25	4
30-63	6
80-100	10
125-200	16
225-400	25
500	35
600-800	50
1000	70
1200-1250	95
1600-2000	120
2500	185
3000-4000	240
5000-6000	400

เอกสารอ้างอิงหมายเลข [1]

เพื่อความสะดวกรวดเร็วสำหรับผู้ออกแบบและคำนวณ จึงได้จัดทำตารางแสดงขนาดสายวงจรย่อยและขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับมอเตอร์ขนาดต่าง ๆ ในตารางสำหรับมอเตอร์ 3 เฟส

2.6 สายศูนย์ (Neutral)

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ซึ่งจ่ายให้กับโหลดชนิด 1 เฟส ขนาดสายศูนย์จะต้องมีขนาดเพียงพอที่จะนำกระแสโหลดไม่สมดุลสูงสุดได้ การคำนวณหาขนาดสายศูนย์สามารถทำได้ดังนี้

- กรณีโหลดชนิด Resistive Load ที่มีกระแสไม่เกิน 200 A

$$I_N = I_{LN} \qquad \text{.....(2.16)}$$

คือใช้ขนาดสายศูนย์เท่ากับสายเฟส (Full Neutral)

โดยที่ I_N = พิกัดกระแสสายศูนย์ (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{LN} = โหลดไม่สมดุลสูงสุดคือ ค่าที่คำนวณได้จากโหลด 1 เฟส ที่ต่อระหว่างสายศูนย์และสายเส้นไฟเส้นใดเส้นหนึ่ง (A)

- กรณีโหลดชนิด Resistive Load ที่มีกระแสเกิน 200 A

$$I_N = 200 + 0.7\,(I_{LN} - 200) \qquad \text{.....(2.17)}$$

- กรณีโหลดชนิด Electric Discharge , Data Processing หรือโหลดชนิดอื่นที่มีกระแสฮาร์โมนิกในสายศูนย์

$$I_N = I_{LN} \qquad \text{.....(2.18)}$$

คือใช้ขนาดสายศูนย์เท่ากับสายเฟส (Full Neutral)

2.7 ระบบเมน (Services)

ระบบเมน หมายถึง ตัวนำและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในส่วนของวงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากการไฟฟ้าไป จนถึงสายป้อน ส่วนประกอบของสายเมนจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนด้วยกัน คือ สายเมน (Service Conductor) และเมนสวิตซ์ (Service Equipment)

2.7.1 การคำนวณหาขนาดสายเมน

สายเมนจะต้องมีขนาดเพียงพอที่จะรับโหลดได้ โดยโหลดของสายเมนก็คือผลรวมของโหลดสายป้อนนั่นเอง ซึ่งสามารถใช้ดีมานท์แฟกเตอร์ (Demand Factor) ที่เหมาะสมได้ การหาพิกัดกระแสของสายเมนจะมีหลักการเช่นเดียวกันกับพิกัดกระแสของสายป้อน

$$I_M \geq 1.25\,I_{L1} + 1.00 I_{L2} \qquad \text{.....(2.19)}$$

โดยที่ I_M = พิกัดกระแสของสายเมน(A)

I_{L1} = กระแสโหลดชนิดโหลดต่อเนื่อง (A)

I_{L2} = กระแสโหลดชนิดโหลดไม่ต่อเนื่อง (A)

2.7.2 การหาขนาดเมนสวิตซ์

การหาขนาดของเครื่องป้องกันกระแสเกินและเครื่องปลดวงจร สามารถทำได้ดังนี้

- เครื่องป้องกันกระแสเกินมีหน้าที่ป้องกันสายเมนดังนี้

$$CB \leq I_M \qquad \text{.....(2.20)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ CB = ขนาดของCB(AT)

I_M = พิกัดกระแสของสายเมน

อย่างไรก็ตามขนาดของเครื่องป้องกันกระแสเกินที่ใช้จะต้องไม่เกินขนาดที่การไฟฟ้าระบุไว้ดังในตาราง 2.6

ตารางที่ 2.5 พิกัดสูงสุดของเครื่องป้องกันกระแสเกินและโหลดสูงสุดตามขนาดเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า

เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า (A)	พิกัดสูงสุดเครื่องป้องกันกระแสเกิน (A)	โหลดสูงสุด (A)
5 (15) 1P	16	10
15 (45) 1P	50	30
30 (100) 1P	100	75
50 (150) 1P	125	100
15 (45) 3P	50	30
30 (100) 3P	100	75
500 (150) 3P	125	100
200 3P	250	200
400 3P	500	400
600 3P	750	600
800 3P	1000	800

เอกสารอ้างอิงหมายเลข [1]

หมายเหตุ

1P หมายถึง เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า ชนิด 1 เฟส 2 สาย

3P หมายถึง เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้า ชนิด 3 เฟส 4 สาย

2.8 การหาขนาดหม้อแปลง

2.8.1 โหลดของหม้อแปลง

การคำนวณโหลดของหม้อแปลงให้ทำเช่นเดียวกับสายป้อนกล่าวคือ ให้หาโหลดทั้งหมด มารวมกัน

2.8.2 ขนาดของหม้อแปลง

โหลดที่คำนวณได้ถือว่าเป็นโหลดแบบต่อเนื่อง

$$I_T = 1.25\, I_L \qquad \text{.....(2.21)}$$

หรือ $$TR = 1.25\, L\ (kVA) \qquad \text{.....(2.22)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_T = กระแสของหม้อแปลง

I_L = กระแสโหลด

2.9 ตัวอย่างสำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าประกอบด้วยแผงสวิตซ์บอร์ดดังรูปจ่ายไฟให้โหลดดังนี้

มอเตอร์ 3.7 kW 380 V 1 ตัว

มอเตอร์ 11 kW 380 V 1 ตัว

มอเตอร์ 22 kW 380 V 1 ตัว

แผงจ่ายไฟโหลดต่อเนื่อง 60 kVA , 380 V , 3 phase , 4 wire

จงหา 1. ขนาดสายวงจรย่อย

2. สายป้อน

3. ขนาดอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรโดยใช้ตารางเดินในท่อโลหะในอากาศ

4. ขนาดของหม้อแปลง

<u>วิธีทำ</u>

จากตารางจะได้ขนาดวงจรย่อยและอุปกรณ์ป้องกันดังนี้

<u>-โหลดมอเตอร์</u>

มอเตอร์ 3.7 kW 380 V CB = 20 AT (ภาคผนวก ข. ตารางที่ 1)

สายวงจรย่อย = 3 x 2.5 Sqmm.

G - 2.5 Sqmm.

มอเตอร์ 11 kW 380 V CB = 30 AT (ภาคผนวก ข. ตารางที่ 1)

สายวงจรย่อย = 3 x 6 Sqmm.

G – 6 Sqmm

มอเตอร์ 22 kW 380 V CB = 80 AT (ภาคผนวก ข. ตารางที่ 1)

สายวงจรย่อย = 3 x 16 Sqmm.

G – 10 Sqmm

- โหลดของแผงจ่ายไฟ จากสมการที่ 2.7

$$I_F \geq \frac{1.25 * 600 * 1000}{\sqrt{3} * 380}$$

= 114 A

CB = 120 AT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายป้อน = 4 x 50 Sqmm.

G – 16 Sqmm.

- สายป้อนรวม จากสมการที่ 2.14 I_F = สายป้อนมอเตอร์ + สายป้อนแผงจ่ายไฟ

= (1.25*44)+(22+8) (1.25*114)

= 227.5 A

- พิกัดกระแสสายศูนย์ จากสมการที่ 2.16 พิจารณาโหลดไม่สมดุลย์ของแผงจ่ายไฟซึ่งมีอยู่เพียงแหล่งเดียวจะได้กระแสโหลด 1 เฟสเป็น $= \frac{1.25*600*1000}{\sqrt{3}*380}$

= 114 A

และจากสมการที่ 2.15 CB_F = (80+22+8)+(1.25*114)

= 252.5 A

= 250 AT

- สายป้อน = 3 x 120 Sqmm.

-สายศูนย์ 1 x 50 Sqmm.

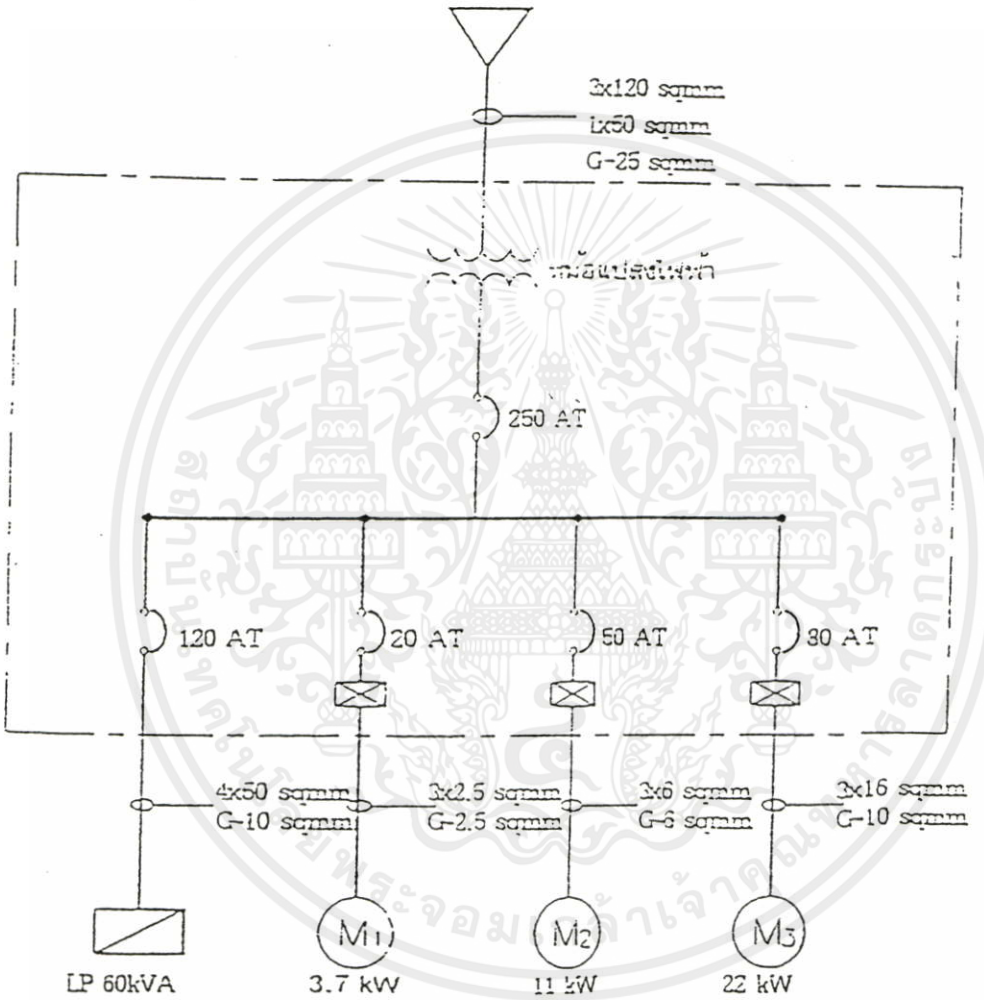
-สายกราวน์ G – 25 Sqmm.

- ขนาดของหม้อแปลง จากสมการที่ 2.21 = $\sqrt{3}$ x 252.5 x 380 x1.25

= 207731.75 VA

∴ เลือกพิกัดของหม้อแปลงเท่ากับ 200 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลังจากที่ได้คำนวณแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3

การคำนวณขนาดกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std. 141-1986

3.1 การคำนวนขนาดกระแสลัดวงจรตามมาตราฐาน ANSI/IEEE Std. 141-1986

3.1.1 การเกิดกระแสลัดวงจร

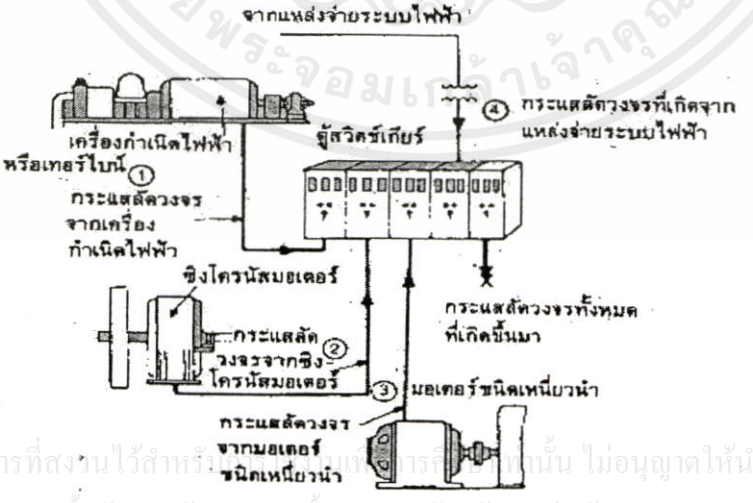
ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดกระแสลัดวงจรนั้น จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (source) ต่างๆ ในระบบ ค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิด ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร อันได้แก่ ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลัง (Utility system) หรือการไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ชนิดซิงโครนัส และ มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เป็นการแสดงถึงแหล่งกำเนิดทั้งหมด ซึ่งแหล่งกำเนิดเหล่านี้มีผลต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดเกิดลัดวงจร

3.1.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร

เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือฟอลท์ขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ การหาขนาดของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้นำมาพิจารณาเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างถูกต้อง การหาขนาดกระแสลัดวงจรจำเป็นต้องทราบถึง แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร และคุณลักษณะรีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรนั้นซึ่งมีอยู่ 4 แหล่ง ที่แสดงดังรูปที่ 3.1

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. มอเตอร์ซิงโครนัสและซิงโครนัสคอนเดนเซอร์
3. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ
4. แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร

33393

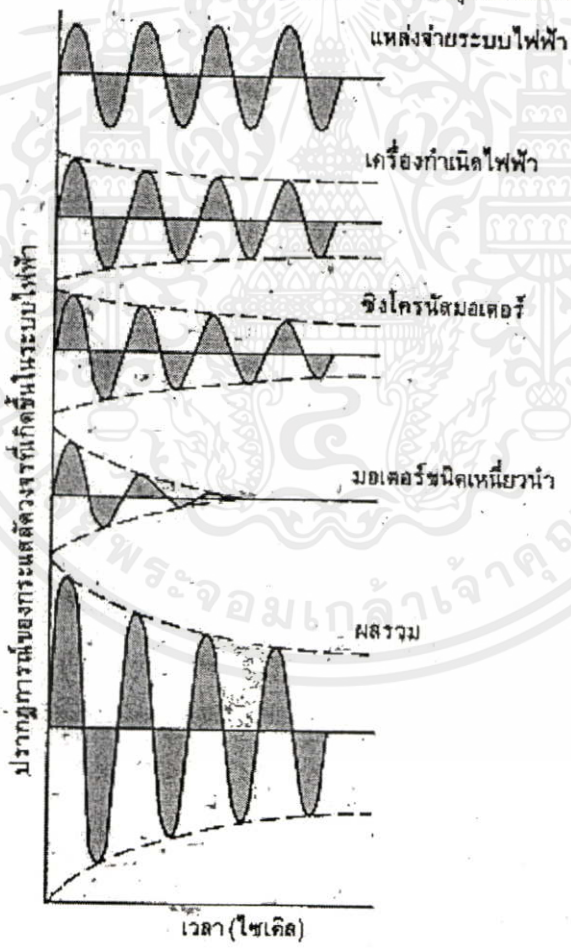
โดยแต่ละแหล่งกำเนิดมีสิ่งที่ต้องพิจารณาดังนี้

1.ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังโดยจะจ่ายพลังงานให้แก่หม้อแปลงเพื่อที่จะได้อาศัยหม้อแปลงในการลดแรงดันไฟฟ้าลงมาแต่หม้อแปลงไม่ใช่แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรเพราะว่าตัวหม้อแปลงเป็นเพียงอุปกรณ์เปลี่ยนขนาดกระแสและแรงดันเท่านั้น ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าทางของด้านทุติยภูมิและเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังนั้นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของตัวกำเนิดกระแสลัดวงจรตัวอื่นๆมากดังนั้นขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังจึงจะมีค่าสม่ำเสมอ ดังแสดงไว้ในรูปที่ (รูปที่ 3.2)

ในกรณีที่พิจารณาถึงกระแสลัดวงจรนั้น จะหมายถึงเป็นกระแสในค่าของ RMS หรือค่าจริงของสัญญาณรูป sine นั่นเอง โดยสัญญาณคลื่นของกระแสจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม

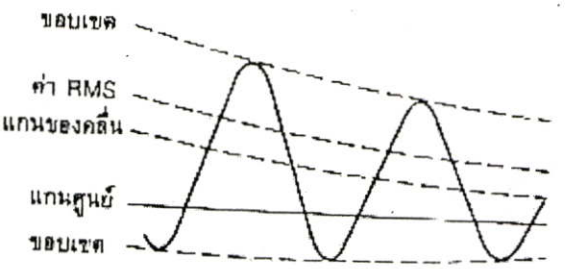
ก. กระแสสมมาตร หมายถึง กระแสสลับที่สมดุลรอบแกนศูนย์ ดังรูปที่ 3.4

ข. กระแสไม่สมมาตร หมายถึง กระแสสลับที่ไม่สมดุลรอบแกนศูนย์ ดังรูปที่ 3.3

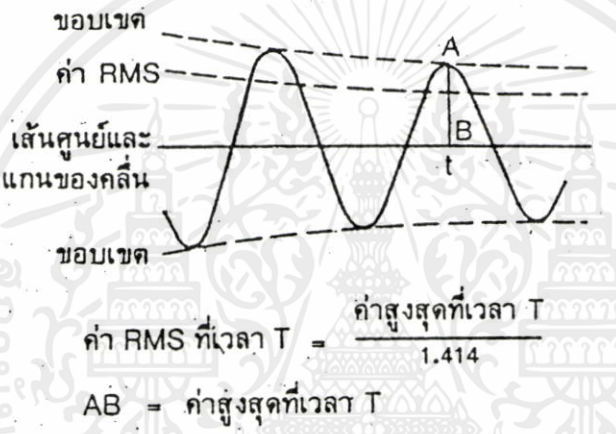


รูปที่ 3.2 ค่ากระแสลัดวงจรชนิดสมมาตร จะมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสลัด วงจรที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่นทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสไม่สมมาตร



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสสมมาตร

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นตัวต้นกำลัง (prime mover) และกระแสกระตุ้น(excitefield)ยังมีอยู่ ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตลอดจนขึ้นอยู่กับ ค่าตัวประกอบในวงจรที่อยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับจุดที่เกิดการลัดวงจร นอกจากนี้ผลของการลัดวงจร ยังจะมีผลต่อเนื่องมาถึงค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยโดยค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแยกพิจารณาได้เป็น

ก.ค่าซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์แกนตรง (Direct axis Subtransient reactance ; X''_d) จะเป็นค่ารีแอกแตนซ์ของขดสเตเตอร์ (stator winding) โดยจะปรากฏขึ้นทันทีที่เกิดการลัดวงจรและเป็นตัวกำหนดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในช่วง 1-2-3 ไซเคิลแรกหลังเกิดการลัดวงจร

ข.ค่าทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง (Direct axis transient reactance ; X'_d) จะเป็นค่าที่กำหนดกระแสลัดวงจร โดยค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะมีผลจนถึง ½ วินาที หรือนานกว่าจนถึง 2 วินาที ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้านั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์แกนตรง (Direct axis synchronous reactance ; X_d) ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดการไหลของกระแสลัดวงจรในช่วงสถานะอยู่ตัว (steady state) และจะไม่มีผลอะไรค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะนำมาพิจารณาหลังจากที่เกิดการลัดวงจรผ่านไปแล้วหลายวินาที ดังนั้นส่วนใหญ่จึงจะไม่นิยมใช้ค่า X_d ในการคำนวณหากระแสลัดวงจร

ค่ารีแอกแตนซ์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ถ้านำมาเขียนถึงผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่ากระแสลัดวงจรจะค่อยๆ ลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล (exponential)จากค่าสูงลงไปสู่ค่าต่ำจนถึงช่วงสถานะอยู่ตัว ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว โดยค่ารีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับเวลาค่า- X''_d และ X'_d จะถูกกำหนดมาโดยโรงงานผู้ผลิตจึงพอจะกล่าวได้ว่าผลของกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าสูงและจะลดลงสู่ค่าปกติค่าหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรีแอกแตนซ์ของระบบวงจรนั่นเอง

3. ซิงโครนัสมอเตอร์ เนื่องจากลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส และซิงโครนัสมอเตอร์ค่อย ๆ หยุดหมุนและยังคงมีแรงเฉื่อย ซึ่งทำตัวคล้ายกับเป็นตัวต้นกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะถือว่า ซิงโครนัสมอเตอร์ ได้กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นก็เกิดกระแสลัดวงจรขึ้นในช่วงหลายไซเคิล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

ค่า X''_d , X'_d , X_dในซิงโครนัสมอเตอร์จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปและผลของกระแสลัดวงจรที่มาจากซิงโครนัสมอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับ ขนาดแรงม้า แรงดันไฟฟ้า และค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ตลอดจนค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงมอเตอร์นั้น

4. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เนื่องจากมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะทำงานได้ ต้องอาศัยการกระตุ้นสนาม (Excited field) ที่ได้จากผลของการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งไม่ใช่จากขดกระแสกระตุ้น (DC field winding) ดังนั้นเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น กระแสจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ก็จะพุ่งไปสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร เพราะฉะนั้นสนามแม่เหล็ก (Flux) ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนภายในช่วง 2-3 ไซเคิล นับจากเกิดการลัดวงจร ซึ่งในกรณีเช่นนี้กระแสลัดวงจร ก็จะลดลงจนเป็นค่าศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 ไซเคิล ดังนั้นค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ ก็จะพิจารณาเฉพาะค่าซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง เท่านั้น โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าของ ล็อคโรเตอร์รีแอกแตนซ์ (Lock rotor reactance)

ค่าของกระแสลัดวงจรชนิดสมมาตรในตอนเริ่มแรกจะมีค่าเกือบเท่ากับกระแสตอนเริ่มแรกสตาร์ตโดยมีแรงดันเต็มที่ของมอเตอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 600% - 900% [14]*ของกระแสโหลดปกติ และค่ากระแสลัดวงจรนี้จะขึ้นอยู่กับ ขนาดแรงม้า พิกัดแรงดันไฟฟ้า ค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ ตลอดจนค่ารีแอกแตนซ์ของจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงตัวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

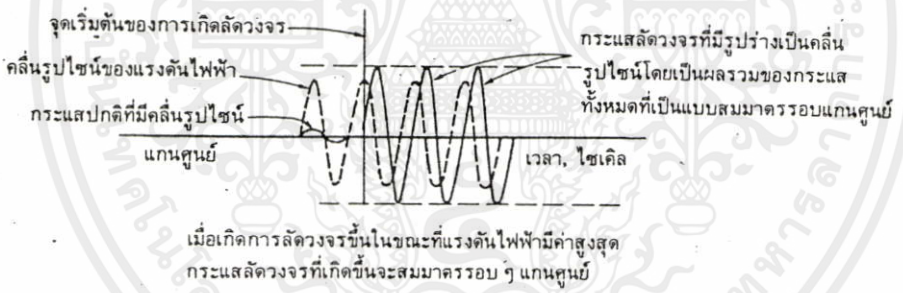
ผลของกระแสลัดวงจรอันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ นั้นจะถูกรวมกันเป็นกระแสลัดวงจรทั้งหมดโดยแสดงในรูปที่ 3.2 และอิทธิพลของเวลาจะมีผลต่อช่วงของการเกิดลัดวงจร ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของคลื่นที่แตกต่างกัน คือ

- กระแสรูปไซน์สมมาตร (Symmetrical sinusoidal current) แสดงในรูปที่ 3.4
- กระแสรูปไซน์ไม่สมมาตร (Asymmetrical sinusoidal current) แสดงในรูปที่ 3.3

3.1.3 กระแสสมมาตรและกระแสไม่สมมาตร

ในกรณีที่ระบบเกิดการลัดวงจรขึ้นจะเป็นกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ในช่วง 1-2 – 3 ไซเคิลแรก หลังจากการเกิดการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรจะมีค่ามากอยู่ในช่วงไซเคิลแรก ๆ และหลังจาก 2 – 3 ไซเคิลต่อ ๆ มาจะเริ่มเข้าสู่กระแสลัดวงจรแบบสมมาตรต่อไป

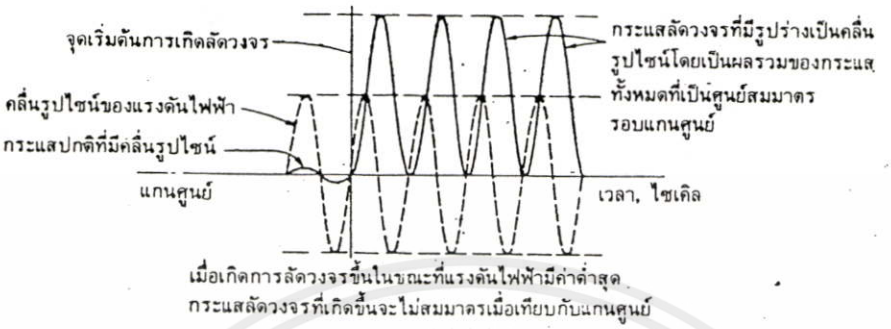
กรณีที่เกิดการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของวงจรมีค่าสูงสุดกระแสลัดวงจรจะเริ่มที่ค่าเกือบเป็นศูนย์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นลักษณะของรูปไซน์ และทำมุม 90 องศา (ต่างเฟส) กับแรงดันไฟฟ้า และผลของการที่เกิดการลัดวงจรในลักษณะนี้ จะเป็นแบบสมมาตรรอบๆ แกนศูนย์ (Symmetrical about zero axis) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของสมมาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะเกิดการลัดวงจรนั้นคือค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าสูงสุด

กรณีที่เกิดการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าศูนย์กระแสลัดวงจรจะเริ่มต้นที่ค่าศูนย์ กระแสจะล้าหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศาและจะเป็นลักษณะของกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

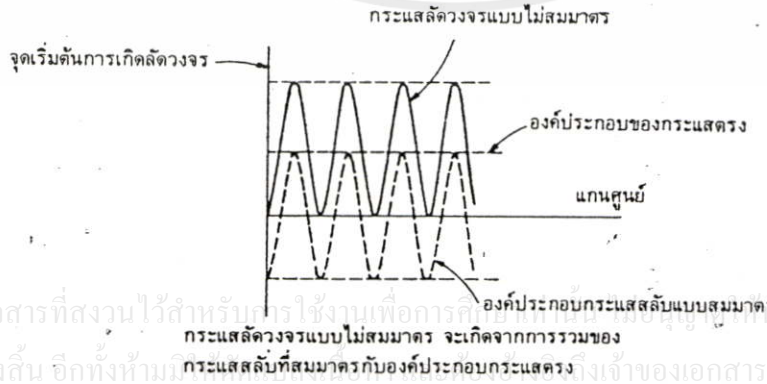


รูปที่ 3.6 ลักษณะของการไม่สามาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด

รูปที่ 3.7 เป็นการแสดงว่าในกรณีของผลรวมของกระแสไม่สมมาตรทั้งหมด จะมาจากกระแสสมมาตรที่มีส่วนของกระแสตรงเข้ามาประกอบนั่นเอง

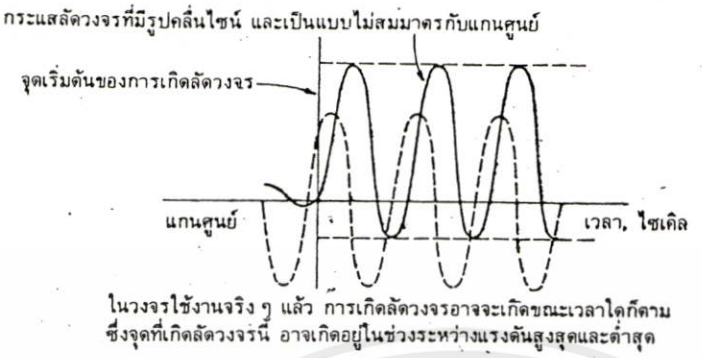
รูปที่ 3.8 เป็นการแสดงถึง กรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในขณะที่แรงดันอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นก็คือกระแสไม่สมมาตรที่มีกระแสตรงมาประกอบเพียงแต่ช่วงของการเปลี่ยนรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรนี้อาจจะขยับได้ ซึ่งคล้าย ๆ กับรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.9 เป็นการแสดงถึงกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นโดยเริ่มต้นจากไม่สมมาตรในช่วงไซเคิลแรก ๆ หลังจากนั้น 2–3 ไซเคิลต่อมาก็จะกลายเป็นสมมาตรทั้งนี้เนื่องจากค่าองค์ประกอบกระแสตรงได้ลดลงไป ค่าองค์ประกอบกระแสตรงนี้ ถือว่าเป็นตัวทำให้เกิดการสูญเสีย (I^2R) ภายในวงจรได้

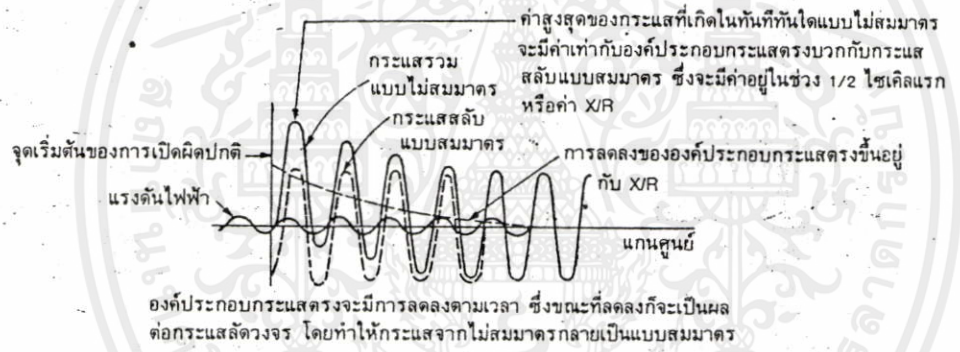


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร จะเกิดการรวมของกระแสสลับที่สมมาตรกับองค์ประกอบกระแสตรง



รูปที่ 3.8 การลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าระหว่างสูงสุดและต่ำสุด



รูปที่ 3.9 องค์ประกอบกระแสตรงที่ลดลงตามเวลาซึ่งมีผลทำให้กระแสไม่สมมาตรกลายเป็นกระแสสมมาตร

3.2 คำสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาขนาดกระแสลัดวงจรที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

3.2.1.แฟกเตอร์ X/R (X/R Ratio)

คืออัตราส่วนของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของวงจรที่จะพิจารณา อัตราส่วนของ X/R จะมีผลต่อการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงอย่างมาก (ค่าX,R นี้ได้จากค่ารีแอกแตนซ์และความต้านทานของวงจร ที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดดันจุดที่เกิดการลัดวงจร)

ถ้า $R = 0$ แล้ว $X/R = \infty$ และองค์ประกอบกระแสตรงนี้จะไม่ลดลง

ถ้า $X = 0$ แล้ว $X/R = 0$ และองค์ประกอบกระแสตรงจะลดลงอย่างรวดเร็ว

สำหรับกรณีของอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรนั้น จะพิจารณาเฉพาะค่าองค์ประกอบรีแอกแตนซ์ของเซอร์กิจเบรกเกอร์และฟิวส์ ทั้งนี้เพราะจะได้แน่ใจได้ว่าอุปกรณ์ป้องกันเหล่านี้สามารถที่จะทนต่อกระแสลัดวงจรสูงสุดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 โมเมนทารีดิวตี้ (Momentary Duty)

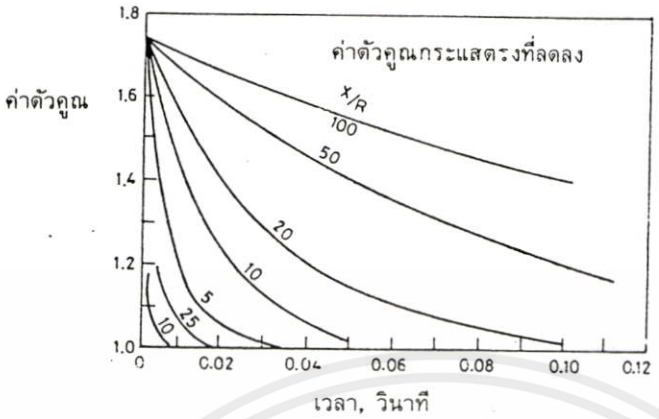
ในการพิจารณากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรซึ่งเกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจรนั้นถ้าในระบบมีแหล่งกำเนิดหลายอย่างจะต้องพิจารณาถึงค่าซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ของทุกแหล่งกำเนิดหลังจากนั้นทำการหารูปคลื่นของกระแสกรณีไม่สมมาตร(เกิดขึ้นในช่วงไซเคิลแรกดูได้จากรูปที่ 3.9) ต้องนำค่าตัวคูณคงที่มาคูณกับรูปคลื่นของกระแสกรณีสมมาตร ดังตารางที่ 3.1 ข้างล่างนี้เป็นค่าตัวคูณที่กำหนดโดย NEMA และรูปที่ 3.10 แสดงค่าตัวคูณที่ค่า X/R ถูกเปลี่ยนแปลงพิจารณาในช่วงที่เกิดการผิดปกติแล้ว 0–6 ไซเคิล

ตารางที่ 3.1 การหาค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรหาได้โดยการใช้ค่าตัวคูณคูณกับกระแสสมมาตร

ค่าประกอบกำลังลัดวงจร %	ค่าอัตราส่วน X/R ลัดวงจร	ค่าอัตราส่วนกระแส RMS แบบสมมาตร		
		ค่าสูงสุดในช่วงขณะของระบบ 1 เฟส	ค่า RMS สูงสุดที่ 1/2ไซเคิลของระบบ 1 เฟส	ค่าเฉลี่ย RMS ที่ 1/2 ไซเคิลของระบบ 3 เฟส
5	19.974	2.625	1.568	1.301
10	9.9301	2.445	1.436	1.229
15	6.5912	2.309	1.330	1.171
20	4.8990	2.183	1.247	1.127
25	3.8730	2.074	1.181	1.093
30	3.1798	1.978	1.130	1.066
35	2.6764	1.894	1.091	1.046
40	2.2913	1.819	1.062	1.031
45	1.9845	1.753	1.041	1.020
50	1.7321	1.694	1.026	1.013
55	1.5185	1.641	1.015	1.008
60	1.3333	1.594	1.009	1.004
65	1.1691	1.553	1.004	1.002
70	1.0202	1.517	1.002	1.001

เอกสารอ้างอิง [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ค่าตัวคูณในการเปลี่ยนแปลงค่า X/R สัมพันธ์กับเวลานับตั้งแต่เริ่มต้นเกิดการผิดปกติ

3.2.3 อินเตอร์รัพติ้งดิวตี้ (Interrupting Duty)

จะพิจารณาจากขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นที่จะทำให้เซอร์กิตเบรคเกอร์เปิดวงจรหรือฟิวส์เริ่มละลาย โดยปกติเซอร์กิตเบรคเกอร์จะเปิดวงจร(Interrupts)ออก หลังจาก 3 , 5 , 8 ไซเคิลแล้วและในโรงงานอุตสาหกรรม จะนิยมตั้งเวลาไว้ 8 ไซเคิลเซอร์กิตเบรคเกอร์หลังจาก 8 ไซเคิลนับจากที่เกิดการผิดปกติผ่านไป มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะไม่เข้ามายุ่งเกี่ยวด้วย และค่ารีแอกแตนซ์ของ มอเตอร์ชนิดซิงโครนัสจะถูกเปลี่ยนจากซับทรานเซียนต์ไปเป็นทรานเซียนต์ ซึ่งจะเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมในระบบแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 600 V อินเตอร์รับติ้งดิวตี้ของเซอร์กิตเบรคเกอร์จึงใช้ค่าตัวคูณเป็น 1 เพราะพิจารณาในกรณีของซับทรานเซียลรีแอกแตนท์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าทรานเซียลรีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึงมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และองค์ประกอบกระแสตรงหลังจาก 8 ไซเคิลแล้วหายไป

3.3 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่น้อยกว่า 1 kV

3.3.1 ผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า

1. เครื่องจักรไฟฟ้าหมุน (Rotating Machine) ชนิดและรายละเอียดของ ซิงโครนัสมอเตอร์และอินดักชั่นมอเตอร์ได้กล่าวแล้วข้างต้น มาตรฐานของการคำนวณอุปกรณ์อินเตอร์รับติ้งทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำนั้นจะพิจารณากลุ่มค่าซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์แรงดันไฟฟ้าต่ำของอินดักชั่นมอเตอร์และซิงโครนัสมอเตอร์ถ้าแรงม้า (Horse power) ทั้งหมดของมอเตอร์ที่พิกัดแรงดัน480โวลต์หรือ600โวลตเท่ากับพิกัดกำลัง(RatedPowerVA)หรือเปอร์ยูนิตของรีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.25 ของหม้อแปลงแบบระบายความร้อนด้วยตัวเองอาจพิจารณาเพียงตัวเดียวได้

ในกรณีไม่ทราบค่า X/R สามารถนำ 1.25 มาคูณกับกระแสลัดวงจรได้เพราะเมื่อพิจาร

ณาจากกราฟทั้งหมดแล้วค่าสูงสุดจะมีค่าประมาณ 1.25 และจะไม่เกินค่าอินเตอร์รัพติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ด้วย (เอกสารอ้างอิง [14])

2. ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน (Rotating Machine Reactance)

ค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้น (Initial Short - circuit Current) ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุน จะถูกกำหนดโดยค่าของซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์แกนตรง ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร จะใช้ค่ารีแอกแตนซ์ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รวมค่าตัวคูณของรีแอกแตนซ์ (หรืออิมพีแดนซ์) ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน

TYPE OF ROTATING MACHINE	FIRST-CYCLE NETWORK	INTERRUPPTING NETWORK
Induction Motors		
All others 50 hp and above	1.2 X_d'' *	3.0 X_d'' +
All smaller than 50 hp	1.67 X_d'' **	Neglect

* or estimate the first-cycle network X = 0.20 per unit based on motor rating

\+ or estimate the first-cycle network X = 0.28 per unit based on motor rating

** or estimate the interrupting network X = 0.50 per unit based on motor rating

จาก ANSI/IEEE C37.010-1979 และ C 37.5-1979 (เอกสารอ้างอิง [14])

การพิจารณากลุ่มของอินดักชั่นมอเตอร์ที่มีค่ากำลังรวม 50 แรงม้า และมากกว่าจะคูณด้วย 1.0 หรือ 1.2 ที่ ซับทรานเซียลอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่ ในกลุ่มของมอเตอร์ ดังในตารางที่ 3.3

ในการหาขนาดของเซอร์กิจเบรกเกอร์ทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำของมอเตอร์จะอยู่ในมา-ตรฐาน ANSI/IEEE C37.13-1981 โดยจะกำหนดให้ขนาดของกระแสลัดวงจรที่บัสเท่ากับ 4 เท่าของกระแสพิกัด (หรือประมาณ 0.25 เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์)

ค่า 4 เท่านี้เป็นเพียงแค่ค่าประมาณ กรณีที่มีอินดักชั่นมอเตอร์75%ของมอเตอร์ทั้งหมดจะคูณด้วย 3.6 เท่าของพิกัดกระแส และซิงโครนัสมอเตอร์ 25 % จะคูณด้วย 4.8 เท่าของพิกัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวคูณรีแอกแตนซ์ (อิมพีแดนซ์) ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน*

TYPE OF ROTATION MACHINE	FIRST-CYCLE NETWORK	INTERRUPTING NETWORK
All turbine generators; all hydrogenerators with Amorthisseur windings; all condensors	1.0 X_d''	1.0 X_d''
Hydrogenerators without amortisseur windings	0.75 X_d''	0.75 X_d''
All synchronouses motors	1.0 X_d''	1.5 X_d''
Induction motors		
Above 1000 hp at 1800 rpm	1.0 X_d''	1.5 X_d''
or less	1.0 X_d''	1.5 X_d''
Above 250 hp at 3600 rpm	1.2 X_d''	3.0 X_d''
All others, 50 hp and above	Neglect	Neglect
All smaller than 50 hp		

จาก ANSI/IEEE C37.010-1979 และ C 37.5-1979 (เอกสารอ้างอิง [14])

สำหรับอินดักชั่นมอเตอร์ขนาดเล็กน้อยกว่า 50 แรงม้าจะคูณด้วย 3.6 กับพิกัดกระแส (หรือประมาณ 0.28 ของค่าอิมพีแดนซ์เป็นเปอร์ยูนิต) หรือนำค่าตัวคูณ 1.67 คูณกับค่าซับทรานเซียลอิมพีแดนซ์

สำหรับอินดักชั่นมอเตอร์ที่ขนาด 50 แรงม้าและมากกว่าจะคูณด้วย 1.2 กับค่าซับทรานเซียลอิมพีแดนซ์ หรือที่ 0.2 ของค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต

โดยจากหลักการข้างต้นสามารถที่จะหากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรในช่วงไซเคิลแรกที่มอเตอร์ได้โดยพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่ารีแอกแตนซ์เปอร์ยูนิตไม่คิดค่าของความต้านทาน

$$I_{sc(sym)} = (E_{pu} * I_{base}) / Z_{pu} \quad \text{.....(3.1)}$$

ในกรณีที่คิดกระแสไม่สมมาตร (Closeing and Latching Capabilites) จะคูณด้วย 1.6 เท่าของกระแสสมมาตรในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_{sc(tot)} = (E_{pu} / X_{pu}) * 1.6 * I_{base} \quad \text{.....(3.2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่มากกว่า 1 kV

วิธีคำนวณกระแสลัดวงจร มีหลายวิธีและกลไกในการคำนวณเพื่อหากระแสลัดวงจร วิธีที่ดีวิธีหนึ่งคือคำนวณเป็นขั้นตอน (Step by Step) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสสลับ (AC) และ กระแสตรง (DC) ในกราฟของฟังก์ชันลด เมื่อเกิดการลัดวงจร การคำนวณจะแบ่งเป็น 2 วิธี คือ

3.4.1 วิธีอย่างง่ายโดยพิจารณาเฉพาะค่า E/X (E/X Simplifier Method)

- การคิดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส

$$I_{(3\phi)} = E / X_1 \quad \text{.....(3.3)}$$

- การคิดกระแสลัดวงจรแบบซิงเกิลเฟส

$$I_{(1\phi)} = 3E / (2X_1 + X_o) \text{..... .....(3.4)}$$

โดยที่ : X_1 = ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence Reactance)

X_o = ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Reactance)

E = ระดับแรงดันไฟฟ้า

I_{base} = ค่าเบสกระแส

E_{pu} = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นเปอร์ยูนิต

I_{pu} = ค่ากระแสที่เป็นเปอร์ยูนิต

Z_{pu} = ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นเปอร์ยูนิต

$I_{sc(tot)}$ = ค่ากระแสลัดวงจรรวม

$I_{(3\phi)}$ ที่หาได้จะเป็นค่าอาร์เอ็มเอสแบบสมมาตร (Symmetrical rms) และสำหรับโมเมนทารีดิวตี้ของเซอร์กิจเบรกเกอร์กำลัง จะได้ค่าอาร์เอ็มเอสแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical rms) = $1.6 * I_{(3\phi)}$ และค่าสูงสุดแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Peak) = $2.7 * I_{(3\phi)}$

วิธีนี้ เป็นวิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจรอย่างง่าย โดยจะพิจารณาเฉพาะค่า X ของระบบ ส่วนค่า R ไม่พิจารณา และผลที่ได้จะถูกต้องเพียงพอก็ต่อเมื่อ X/R ของระบบมีค่า ≥ 15

ค่าที่คำนวณได้จากวิธีนี้จะถือเป็น 80% ของอินเตอร์รับติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กกิตเบรคเกอร์ในกรณีความผิดพลาดปกติแบบสามเฟสและถือเป็น 70% ของอินเตอร์รับติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิตเบรคเกอร์ ในกรณีความผิดพลาดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 วิธีใช้ค่า E/X ที่มีการชดเชยในส่วนของการลดขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสสลับ (E/X Method With Adjustment for AC and DC Decrements)

วิธีนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องกว่ากรณีแรก และจะใช้วิธีนี้ก็ต่อเมื่อ

1. อัตราส่วน X/R ≥ 15

2. $I_{sc(3\phi)}$>80%ของค่าอินเตอร์รัพติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ในกรณีความผิดปกติแบบ 3 เฟสสมมาตร

3. $I_{sc(1\phi)}$>70%ของค่าอินเตอร์รัพติ้งแบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ ในกรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน

วิธีนี้จะเริ่มต้นด้วยการหาค่ากระแสตามวิธีอย่างง่ายโดยพิจารณา E/X ก่อนจากนั้นจะใช้แฟคเตอร์ตัวคูณ (Multiplying Factor) ที่มีความสัมพันธ์กับค่า อัตราส่วน X/R คูณเพื่อแก้ค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอย่างง่ายซึ่งพิจารณาE/X เพียงอย่างเดียว

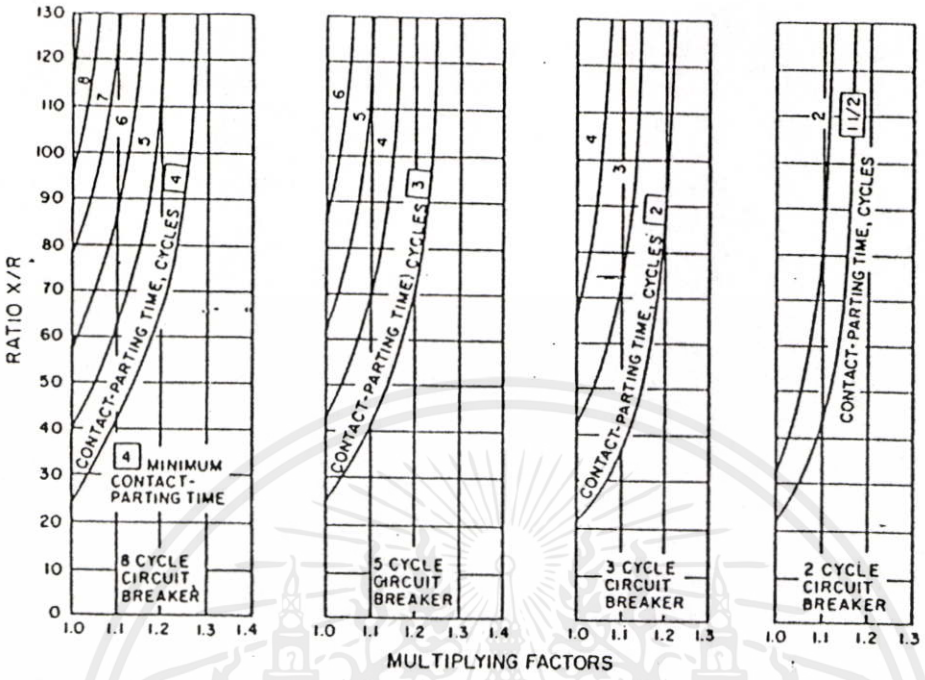
ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณที่ใช้สามารถหาได้ดังนี้

(1) กรณีคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ (AC and DC Decrement) ทั้งสองค่าซึ่งกรณีนี้จะใช้เมื่อกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลงหนึ่งตัว (One Transformer) หรือจ่ายผ่านรีแอกแตนท์ภายนอก (External Reactance) ที่มีค่าน้อยกว่า $1.5*X_d''_{(gen)}$ ที่พิกัดกำลังเบสของระบบ และเป็นไปดังกราฟรูปที่ 3.12

(2) กรณีคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง(DC Decrement) อย่างเดียว ซึ่งกรณีนี้จะใช้เมื่อกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลง2 ตัวขึ้นไป (Two or More Transformer) หรือจ่ายผ่านรีแอกแตนท์ภายนอกมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $1.5*X_d''_{(gen)}$ ที่พิกัดกำลังเบสของระบบกราฟที่ใช้จะเป็นดังกราฟรูปที่ 3.13

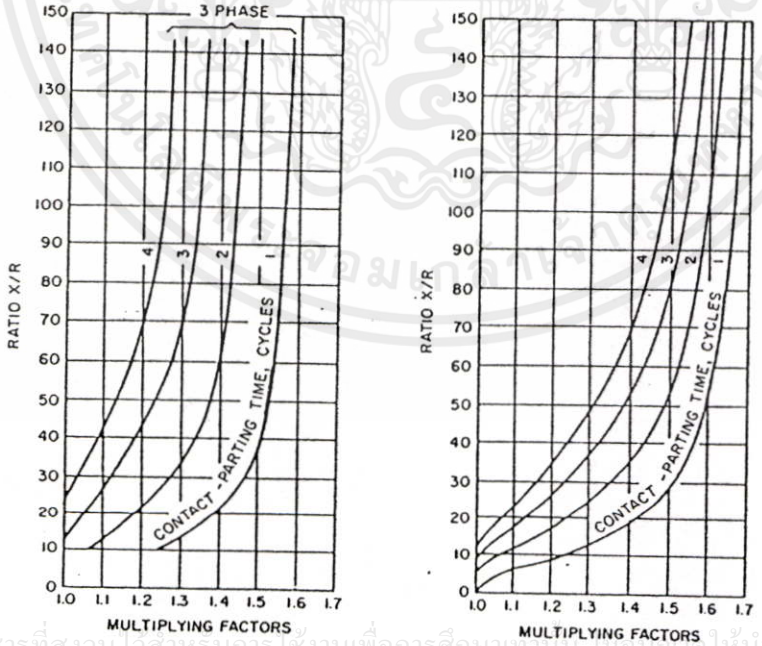
ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จากวิธีนี้ไม่ควรเกินค่าอินเตอร์รัพติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ที่เลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับ E/X แอมแปร์ (Amperes)

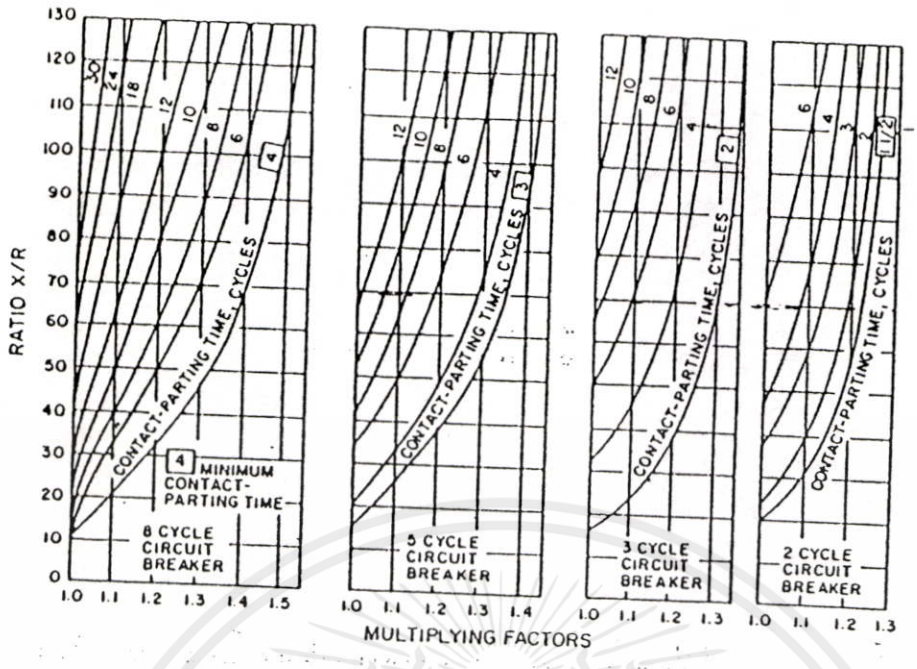
รูปที่ 3.11 ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ



ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับ E/X แอมแปร์ (Amperes)

รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส และ ความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน โดยคิดของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับ E/X แอมแปร์ (Amperes)

รูปที่ 3.13 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส และหนึ่งเฟสลงดินโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงเพียงอย่างเดียว

3.4.3 ค่าความต้านทานของระบบและอัตราส่วน X/R (Resistance of System and Typical X/R Ratio)

จุดประสงค์ของการคำนวณ X/R มาให้ก็เพื่อใช้ในการหาค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตัวนั้น ๆและเป็นการแสดงว่าค่าความต้านทานของระบบมีผลต่อค่าของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องนำค่าความต้านทานที่หาได้มาพิจารณาประกอบในการหากระแสลัดวงจรสำหรับพวกเครื่องจักรไฟฟ้า (Machines) ค่าอัตราส่วนX/Rจะเป็นค่าที่ใช้ในการวัดค่าไทม์คอนสแตนท์ของการลดทอนขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสผิดปกติจากเครื่องจักร (Time Constant of Exponential Delay of DC Component of Machine Fault Current)

โดยปกติแล้วค่าความต้านทาน และอัตราส่วน X/R จะดูได้จากคู่มือของอุปกรณ์จากโรงงาน หรืออาจจะใช้ตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ช่วงอัตราส่วน X/R ของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้

อุปกรณ์ในระบบ	ช่วง	ค่าที่เลือก
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่และซิงโครนัสคอนแดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	40-120	80
หม้อแปลงกำลัง	ดูรูปที่ 3.15	--
มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	ดูรูปที่ 3.16	--
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่และซิงโคนัสมอเตอร์	ดูรูปที่ 3.17	--
รีแอกเตอร์	40-120	80
สายส่งแบบเปลือย(Open Wire Lines)	2-13	5
สายเคเบิลใต้ดิน(Underground Cables)	1-3	2

เอกสารอ้างอิง [14]

ตารางที่ 3.5 ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้

อุปกรณ์ในระบบ	ความต้านทานโดยประมาณ
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์ไบน์และคอนเดนเซอร์	ความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซาเลี่ยนโพล (Salient Pole Generator) และมอเตอร์	ความต้านทานประสิทธิผล
3. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	1.2 เท่าของความต้านทานอาร์มาเจอร์กระแสตรง (DC Armature Resistance)
4. หม้อแปลงกำลัง (Power Transformers)	ความต้านทานสูญเสียแบบโหลดกระแสสลับ (AC Load Loss Resistance) (ไม่รวมความสูญเสียในขณะไม่มีโหลด หรือความสูญเสียช่วย (No-load Losses or Auxiliary Losses))
5. รีแอกเตอร์	ความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance)
6. สายส่งและสายเคเบิล	ความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance)

เอกสารอ้างอิง [14]

หมายเหตุ : ความต้านทานประสิทธิผล = $\dfrac{X_{2v}}{2\pi f T_{a3}}$

เมื่อ X_{2v} คือ รีแอกแตนซ์ลำดับลบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า

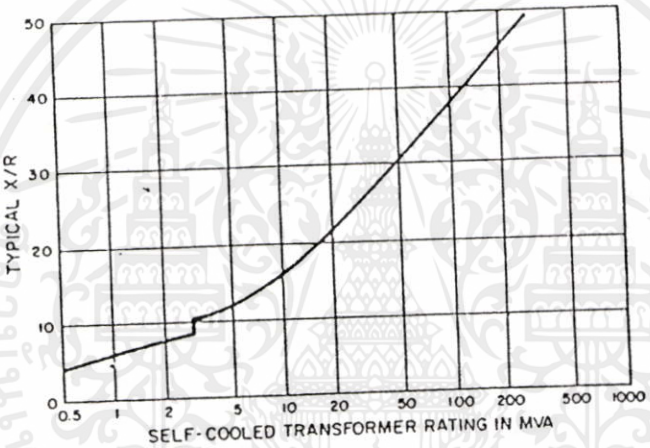
T_{a3} คือ ค่าไทม์คอนสแตนต์อาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า

โดยปกติแล้วค่าความต้านทานประสิทธิผล จะเท่ากับ 1.2 เท่าของความต้านทานกระแสตรง

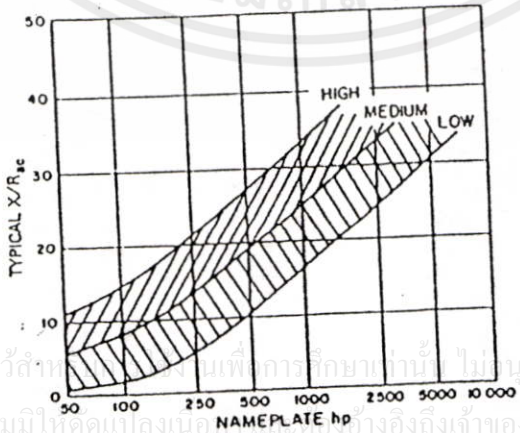
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 กรณีที่เป็นคลาสอื่น ให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ในตารางคูณกับค่าพิกัดกำลัง (MVA) ก่อนที่จะใช้รูปที่ 3.14

คลาส	พิกัดกำลัง	แฟกเตอร์
OA	ทุกพิกัด	1.67
FA	มากกว่า 14.9	1.33
FA	16และมากว่า	1.25
FOA	ทุกพิกัด	1.00

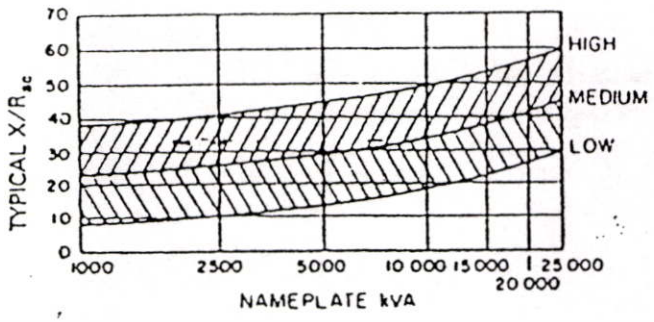


รูปที่ 3.14 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับหม้อแปลงกำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 3.16 ช่วงของอัตราส่วนX/Rสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซาเลี่ยนโพลที่มีโซลิดโรเตอร์ขนาดเล็ก (Small Solid Rotor and Salient Pole Generator) และ ซิงโครนัสมอเตอร์

3.5 ขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตราฐานของ ANSI/IEEE

1. พิจารณาแบบ Single line Diagram ที่มีโดยพิจารณาคิดเฉพาะโหลดหลัก ๆ เท่านั้น (ไม่คิดโหลดย่อย)
2. กำหนดค่า Base Power , Base Voltage นำมาหาค่าของ Base current และ Base impedance โดย :

$$I_{base} = \frac{VA_{base}}{3V_{\text{base per phase}}} \quad \text{.....(3.5)}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{\text{base per phase}}}{I_{\text{base per phase}}} \quad \text{.....(3.6)}$$

3. พิจารณาขนาด ความยาวสาย ชนิดของสาย และค่ารีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์ (X/R)
4. หาขนาดของ อิมพีแดนซ์ ของโหลดต่างๆ

4.1 ในกรณีของโหลดของระบบไฟฟ้าจะทราบค่าโวลต์แอมป์ (VA) ของโหลด สามารถหาอิมพีแดนซ์ ของโหลดได้โดย

$$Z_{\text{จริง}} = \frac{VA}{3V^2_{\text{phase}}} \quad \text{.....(3.7)}$$

$$Z_{p.u.} = \frac{Z_{\text{จริง}}}{Z_{base}} \quad \text{.....(3.8)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากบอกค่าของเพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power factor) ของโหลดระบบไฟมาก็สามารถหาค่าของรีแอกแตนซ์และรีซิสแตนซ์ได้จาก

$$R_{p.u.} = \frac{V^2}{VA * (pf.)} \quad \text{.....(3.9)}$$

$$X_{p.u.} = \sqrt{(Z^2_{p.u.} - R^2_{p.u.})} \quad \text{.....(3.10)}$$

4.2 กรณีที่โหลดเป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้พิจารณาค่าซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์ (X_d'') และค่ารีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์ (X/R) ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิต

- ในกรณีไม่ทราบค่า (X_d'')ให้ประมาณได้จากตารางที่ 3.8 ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้านั้น ๆ
- เมื่อทราบค่า (X_d'') แล้วให้นำมาพิจารณาในตารางที่ 3.3 เพื่อนำตัวประกอบมาคูณ

5. ขนาดและความยาวสาย

สามารถหา X และ R ในกรณีที่บอกขนาดสายเป็นตารางมิลลิเมตร , ชนิด และความยาวของสาย หรือพิจารณาจากตารางที่ 3.9 หรือ 3.10 แล้วแต่ชนิดและการเดินสาย

6. เปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตของ อิมพีแดนซ์ , รีแอกแตนซ์ , รีซีสแตนซ์ให้อยู่ในเบสกำลังเดียวกัน โดยส่วนมากเบสกำลังจะกำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่จ่ายเป็นเบส
7. พิจารณาค่าที่คำนวณได้ไปในซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม แล้วทำการยุบวงจรอย่างง่าย โดยค่าของอิมพีแดนซ์ (โดยแยกพิจารณา รีซีสแตนซ์ กับ รีแอกแตนซ์)
8. เมื่อหาค่าของ รีซีสแตนซ์รวม และ รีแอกแตนซ์รวม ได้แล้ว นำค่าของรีซีสแตนซ์ และ รีแอกแตนซ์มาหาค่า อิมพีแดนซ์

$$Z_{p.u.} = \sqrt{(X^2_{total\ p.u.} + R^2_{total\ p.u.})} \quad \text{.....(3.11)}$$

9. คำนวณหากระแสลัดวงจรได้จาก

$$I_{sc\ sym} = \frac{kVA_{base} * 1000}{Z_{p.u.} * V_{Low\ volt}} \quad \text{.....(3.12)}$$

$$I_{sc(sym)} = (E_{pu} * I_{base}) / Z_{pu} \quad \text{.....(3.13)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ในกรณีหาขนาดของกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงจะพิจารณาด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Secondary Voltage) โดยที่ต้องทราบค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า (Rated Current) จากสมการที่ (3.14)

$$I_{Rated} = \frac{VA}{3\,V_{phase\ (Secondary\ Voltage)}} \quad \text{..... (3.14)}$$

11. เมื่อได้ค่าของกระแสที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า นำค่าของอิมพีแดนซ์ที่เป็นเปอร์ยูนิตหรือเปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ (%Z or $Z_{p.u.}$) ของหม้อแปลงมาหารดังสมการที่ (3.14) หรือถ้าไม่ทราบอาจจะพิจารณาจากตารางที่ 3.11

$$I_{sc\ sym} = \frac{I_{rated}}{Z_{p.u.}} \quad \text{.....(3.15)}$$

โดยที่ : $I_{sc(sym)}$ = กระแสผิดปกติแบบสามเฟสสมมาตร

pf. = เพาว์เวอร์แฟกเตอร์ของโหลดหรือระบบนั้น ๆ

$X_{total\ p.u.}$ = ค่ารีแอกแตนซ์รวมที่เป็นเปอร์ยูนิต

$R_{total\ p.u.}$ = ค่ารีซีสแตนซ์รวมที่เป็นเปอร์ยูนิต

$Z_{จริง}$ = ค่าอิมพีแดนซ์จริง

kVA_{base} = ค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นเบส

I_{Rated} = กระแสที่พิกัด

$V_{Low\ volt}$ = แรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ

VA = พิกัดกำลังของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

วิธีการยุบวงจรให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

1. ในการพิจารณาให้เราพิจารณาหม้อแปลงเพียงตัวเดียวเท่านั้น แม้ว่าระบบนั้นจะใช้หม้อแปลงสองตัวโดยใช้เซอร์กิจเบรกเกอร์เชื่อมกัน (Tie Circuit Breaker) เราจะคิดหม้อแปลงเพียงตัวเดียว ที่ใช้จ่ายโหลดทั้งหมด
2. ในการคิดให้ยึดบรานซ์เป็นหลักโดยพิจารณาว่าไลน์ใดที่ติดกับบรานซ์ให้คิดทีหลัง แยกพิจารณาต่างหาก
3. ให้คิด รีแอกแตนซ์ รวมกันแบบขนานในแต่ละบรานซ และอนุกรมกันในแต่ละไลน์
4. ให้คิด รีซิสแตนซ์ รวมกันแบบขนานในแต่ละบรานซ และอนุกรมกันในแต่ละไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ค่ารีแอกแตนซ์สำหรับเครื่องจักรไฟฟ้าอินดักชั่นและซิงโครนัสเป็นค่าเปอร์ยูนิตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่พิกัด kVA

	X_d''	X_d'
Turbine generator **		
2 poles	0.09	0.15
4 poles	0.15	0.23
Salient-pole generators with damper windings **		
12 poles or less	0.16	0.33
14 poles or more	0.21	0.33
Synchronous motors		
6 poles	0.15	0.23
8 – 14 poles	0.20	0.30
16 poles or more	0.28	0.40
Synchronous condensor**	0.24	0.37
Synchronous convertor**		
600 V direct current	0.20	
250 V direct current	0.33	
Individual large induction motors usually above 600 V	0.17	
Smaller motors, usually 600 V and below *** ดูจากตารางที่ 3.2 และ 3.3		

เอกสารอ้างอิง [14]

หมายเหตุ ซิงโครนัสมอเตอร์จะสามารถหาค่าพิกัด kVA (โดยประมาณ)ได้จากแรงม้า

- มอเตอร์ที่มีค่า Pf. = 0.8 จะได้ค่า kVA เบส = พิกัดแรงม้า
- มอเตอร์ที่มีค่า Pf. = 1 จะได้ค่า kVA เบส = 0.8 * พิกัดแรงม้า

* ในกรณีที่ทราบค่าจากโรงงานผู้ผลิตให้ใช้ค่าที่มาจากโรงงานนั้น

** X_d' จะไม่ใช้ในการคำนวณหาเกี่ยวกับกระแสลัดวงจร

*** ในกรณีที่เป็นกลุ่มมอเตอร์ ค่า X_d'' ต่ำสุดที่ใช้ในการพิจารณาจากมอเตอร์ตัวใหญ่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-IV และ PD-THW แบบ 3 เฟส เดินในท่อโลหะ*

CONDUTOR CROSS SECTION SQ.MM.	AC(r) RESISTANCE AT 70° C IN METALLIC CONDUIT Ω/KM.	INDUCTIVE REACTANCE X IN METALLIC CONDUIT Ω/KM.	Three phase effective resistance per unit length $\sqrt{3}(r\cos\theta + X\sin\theta)$ at 70°C various power factor Ω/KM.				
			1.00 Ω/KM.	0.95 Ω/KM.	0.90 Ω/KM.	0.85 Ω/KM.	0.80 Ω/KM.
2.5	8.8658	0.1949	15.33560	14.6936	13.9676	13.2304	12.4874
4	5.5157	0.1811	9.5535	9.1737	8.7349	8.2857	7.8310
6	3.6851	0.1735	6.3825	6.1575	5.8755	5.5837	5.2865
10	2.1895	0.1768	3.7923	3.6983	3.5466	3.3848	3.2176
16	1.3759	0.1712	2.3831	2.3566	2.2741	2.1819	2.0844
25	0.8698	0.1621	1.5065	1.5189	1.4783	1.4285	1.3737
35	0.6332	0.1558	1.0967	1.1262	1.1047	1.0744	1.0393
50	0.4723	0.1533	0.8180	0.8601	0.8520	0.8352	0.8138
70	0.3303	0.1468	0.5721	0.6229	0.6257	0.6202	0.6102
95	0.2425	0.1409	0.4200	0.4751	0.4842	0.4854	0.4822
120	0.1940	0.1412	0.3360	0.3956	0.4090	0.4144	0.4156
150	0.1587	0.1397	0.2749	0.3367	0.3529	0.3611	0.3651
185	0.1281	0.1359	0.2219	0.2843	0.3023	0.3126	0.3187
240	0.1019	0.1319	0.1765	0.2390	0.2584	0.2704	0.2783
300	0.0834	0.1312	0.1445	0.2082	0.2291	0.2425	0.2519

เอกสารอ้างอิง [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-THW ไม่เดินในท่อโลหะ และชนิดPD-NYY แบบ 3 เฟส เดินในอากาศ หรือต่อลงดินโดยตรงแบบ 3 เฟส

CONDUTOR CROSS SECTION SQ.MM.	AC(r) RESISTANCE AT 70° C IN METALLIC CONDUIT Ω/KM.	INDUCTIVE REACTANCE X IN METALLIC CONDUIT Ω/KM.	Three phase effective resistance per unit length $\sqrt{3}(r\cos\theta + X\sin\theta)$ at 70°C various power factor Ω/KM.				
			1.00 Ω/KM.	0.95 Ω/KM.	0.90 Ω/KM.	0.85 Ω/KM.	0.80 Ω/KM.
2.5	8.8658	0.1548	15.3560	14.6719	13.9373	13.1939	12.4457
4	5.5157	0.1438	9.5535	9.1536	8.7067	8.2517	7.7922
6	3.6851	0.1380	6.3825	6.1575	5.8755	5.5837	5.2865
10	2.1895	0.1413	3.7923	3.6983	3.5466	3.3848	3.2176
16	1.3759	0.1366	2.3831	2.3379	2.2479	2.1503	2.0485
25	0.8698	0.1293	1.5065	1.5011	1.4535	1.3985	1.3396
35	0.6369	0.1235	1.0858	1.0983	1.0705	1.0356	0.9970
50	0.4630	0.1233	0.8019	0.885	0.8148	0.7941	0.7697
70	0.3207	0.1468	0.5721	0.6229	0.6257	0.6202	0.6102
95	0.2309	0.1136	0.3999	0.4414	0.4457	0.4436	0.4380
120	0.1840	0.1121	0.3187	0.3634	0.3715	0.3732	0.3751
150	0.1493	0.1121	0.2586	0.3063	0.3174	0.3211	0.3234
185	0.1196	0.1094	0.2072	0.2560	0.2690	0.2759	0.2794
240	0.0918	0.1073	0.1590	0.2091	0.2241	0.2331	0.2387
300	0.0737	0.1066	0.1277	0.1789	0.1954	0.2058	0.2129

เอกสารอ้างอิง [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

Transformer Bank Load (kVA)	Transformer Bank Impedance (percent)
10-50	3.0
75-150	4.0
200-500	5.0
750-2000	5.5
3000-10000	6.0

เอกสารอ้างอิงที่ [15]

3.6 การวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรโดยวิธีคิดโดยตรง (by the Direct Method)

ก่อนอื่นจะต้องได้รับวันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีข้อมูลครบถ้วน ดังแสดงในรูปที่ 3.25 จากรูปจะแสดงให้เห็นข้อมูลที่จำเป็นที่จะใช้ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ การคำนวณโดยวิธีนี้จะอยู่บนพื้นฐานการคำนวณทางไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป โดยจะเปรียบการไหลของกระแสลัดวงจรเป็นเสมือนการไหลของกระแสน้ำจากต้นกำเนิดไปยังตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ กฎของโอห์มจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณมากที่สุด แต่ก็จะคงหลักการของเปอร์เซ็นอิมพีแดนซ์เพื่อใช้ในการคำนวณด้วย โดยค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์นี้จะแสดงถึง เปอร์เซ็นต์ของแรงดันปกติ ที่จ่ายให้กับขดลวดทางไพรมารี่ของหม้อแปลงหรือจ่ายให้กับที่อื่น ๆ แล้วจะก่อให้เกิดกระแสโหลดสูงสุด ไหลเข้าสู่วงจรทางเซคคันดารี่ ซึ่งถูกลัดวงจรเอาไว้ สำหรับค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดนั้นจะหาได้จากการจ่ายแรงดันที่พิกัด โดยจะเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสโหลดสูงสุดกับอัตราส่วนระหว่าง 100% กับค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ทั้งหมด ด้วยกระบวนการเช่นนี้การรวมค่าของรีแอกแตนซ์และค่าความต้านทานนั้นต้องแยกคิด แล้วนำค่ารวมของทั้งสองค่ามาทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์รวมต่อไป

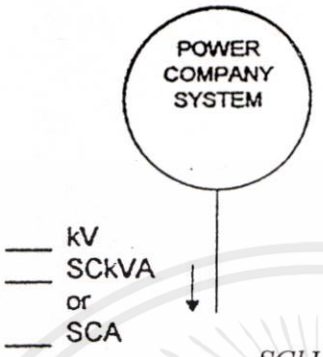
3.6.1 กรรมวิธีการวิเคราะห์

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบจะถูกทำเครื่องหมายไว้ในวันไลน์ไดอะแกรม ถัดมาก็จะทำการวิเคราะห์ที่ต้นกำเนิดกระแสลัดวงจรต่าง ๆ เพื่อทำการหาค่ากระแสลัดวงจรจากต้นกำเนิดนั้น ๆ ที่บัสต่าง ๆ ในระบบ โดยทำการวิเคราะห์ในแต่ละส่วนจากบัสหนึ่งไปยังอีกบัสหนึ่ง ดังตัวอย่างที่จะแสดงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 การหาค่ากระแสลัดวงจรในลักษณะต่าง ๆ (ค่า SCA = short circuit amperes หรือค่ากระแสลัดวงจร)

3.6.2.1 กระแสลัดวงจรจากการจำหน่ายไฟของการไฟฟ้า



$$SCA = \frac{SCkVA}{\sqrt{3}kV_{L-L}} \qquad \text{.....(3.16)}$$

รูปที่ 3.17 กระแสลัดวงจรจากการจำหน่ายไฟของการไฟฟ้า

การไฟฟ้าจะบอกให้ผู้ใช้ไฟได้ทราบถึงค่ากำลังการลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical Short-circuit kVA) ซึ่งสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ ณ ตำแหน่งที่ต่อเข้ากับการจ่ายไฟของการไฟฟ้า ค่าฟอลต์มากสุดนี้จะเป็นค่าที่เป็นไปได้ในสภาวะที่แรงดันไฟปกติ และค่ากระแสลัดวงจรที่สภาวะอยู่ตัว (steady-state) และจะเป็นค่าที่จะส่งผลต่อการจำหน่ายไฟโดยตรง

3.6.2.2 กระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$SCAG = \frac{GenRatedAmpere * 100}{Xd^{"}(inpercent)} \qquad \text{.....(3.17)}$$

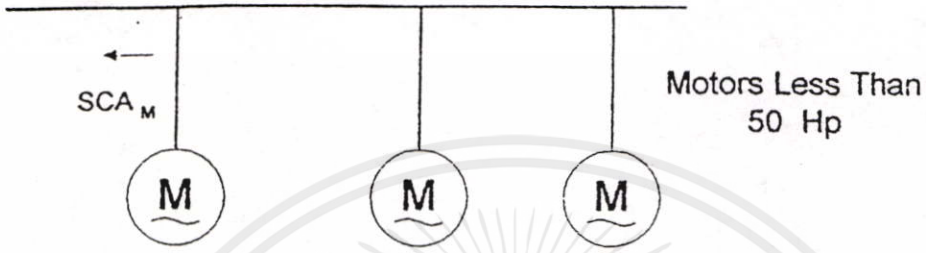
$$GenRatedAmpere = \frac{GenRatedkVA}{\sqrt{3} * GenRatedkV} \qquad \text{.....(3.18)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 กระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ค่าต่าง ๆ จะมีค่าหลากหลายพอควรขึ้นกับการออกแบบ ค่า X"d นั้นจะทราบได้จากข้อมูลของผู้ผลิตโดยส่วนมาก และหากค่าที่ได้เป็นค่า "per-unit" ก็ให้คูณด้วยค่า 100 เพื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

3.6.2.3 กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ที่น้อยกว่า 50 hp

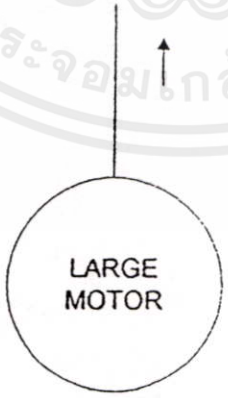


$$SCA\ M = 4 \text{ sum of Motor Full-Load Ampere} \qquad \text{.....(3.19)}$$

รูปที่ 3.19 กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ที่น้อยกว่า 50 hp

โดยทั่วไปสำหรับโหลดมอเตอร์ขนาดเล็กมักจะนิยมคิดค่าการลัดวงจรรวมกันเลยที่แต่ละตำแหน่ง และมักจะพิจารณาว่าเป็นโหลดที่ทำงานอย่างไม่ต่อเนื่อง ตัวคูณ 4 ข้างต้นนั้นถูกใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม และค่าตัวคูณนี้ก็จะมีค่ามากยิ่งขึ้นหากว่าเราพิจารณามอเตอร์ที่ตัวใหญ่กว่านี้ดังรูป 3.20

3.6.2.4 กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ขนาดใหญ่มากกว่า 50 hp



$$SCAM = \frac{Motor Full - Load Ampere * 100}{\%Xd''} \qquad \text{.....(3.20)}$$

รูปที่ 3.20 กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ขนาดใหญ่มากกว่า 50 hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Motor Rated kVA = Motor Rated hp (for 80 % power factor).....(3.21)

Motor Rated kVA = 0.8 Motor Rated hp(for 100 % power factor)...(3.22)

$$\text{Motor Full-Load Amperes} = \frac{\text{Motor Rated kVA}}{\sqrt{3} \times \text{Motor Rated kV}} \quad \text{.....(3.23)}$$

ในการคำนวณจะต้องแยกคิดค่ากระแสลัดวงจรของมอเตอร์แต่ละตัวออกจากกัน โดยค่ากระแสลัดวงจรนั้นจะสามารถหาได้หากทราบค่า Sub transient reactance โดยถ้าอยู่ในหน่วยของ per-unit ก็ให้คูณด้วย 100 เพื่อทำเป็นเปอร์เซ็นต์ แต่ว่าถ้าหากว่าไม่ทราบค่าของ Sub transient reactance แล้วละก็เราก็สามารถที่จะทำการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร โดยวิธีการประมาณค่าได้ดังนี้

ค่ากระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ขนาดใหญ่โดยประมาณ

1. อินดักชันมอเตอร์ (Large Induction Motors)

SCA_M = Locked-Rotor Amperes .....(3.24)

หรือ $= \frac{\text{Code Letter Multiple x hp}}{\sqrt{3} \times \text{Motor Rated kV}}$ .....(3.25)

หรือ = 5 x Full-Load Amperes .....(3.26)

โดยตามมาตรฐานของ NEC และ NEMA นั้นระบุ Code Letter ดังนี้

Letter	Multiple	Letter	Multiple	Letter	Multiple
A	3.15	H	7.1	R	16.0
B	3.55	J	8.0	S	18.0
C	4.0	K	9.0	T	20.0
D	4.5	L	10.0	U	22.4
E	5.0	M	11.2	V	OVER22.4
F	5.6	N	12.5		
G	6.3	P	14.0		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ซิงโครนัสมอเตอร์ขนาดใหญ่ (Large Synchronous Motor)

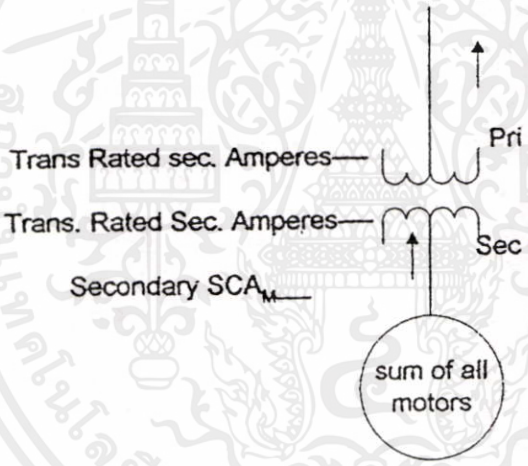
SCA_M = 6.7 x Motor Full-Load Amperes for 1200 rpm .....(3.27)

SCA_M = 5 x Motor Full-Load Amperes for 514-900 rpm .....(3.28)

SCA_M = 3.6 x Motor Full-Load Amperes for 450 rpm or less .....(3.29)

โดยถ้าหากว่าไม่ทราบความเร็วซิงโครนัสก็จะถือว่าอยู่ในย่าน 514-900 rpm

3.6.2.5 การหาค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลจากทางเซคคันดารี่ไปยังทางไพรมารี่ของหม้อแปลง



รูปที่ 3.21 การหาค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลจากทางเซคคันดารี่ไปยังทางไพรมารี่ของหม้อแปลง

<u>การคำนวณแบ่งได้เป็นค่าโดยประมาณกับค่าแท้จริง</u>

<u>1. ค่าโดยประมาณ</u>

$$\text{Primary } SCA_m = \left(\frac{\text{Primary Rated Current}}{\text{Secondary Rated Current}}\right) * \text{Secondary } SCA_m \quad \text{.....(3.30)}$$

เมื่อ L.V. เท่ากับ 240 V หรือมากกว่า Pri. SCA_M = 3.5 x Primary Rated Current

เมื่อ L.V. เท่ากับ 208 V หรือต่ำกว่า Pri. SCA_M = 2 x Primary Rated Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

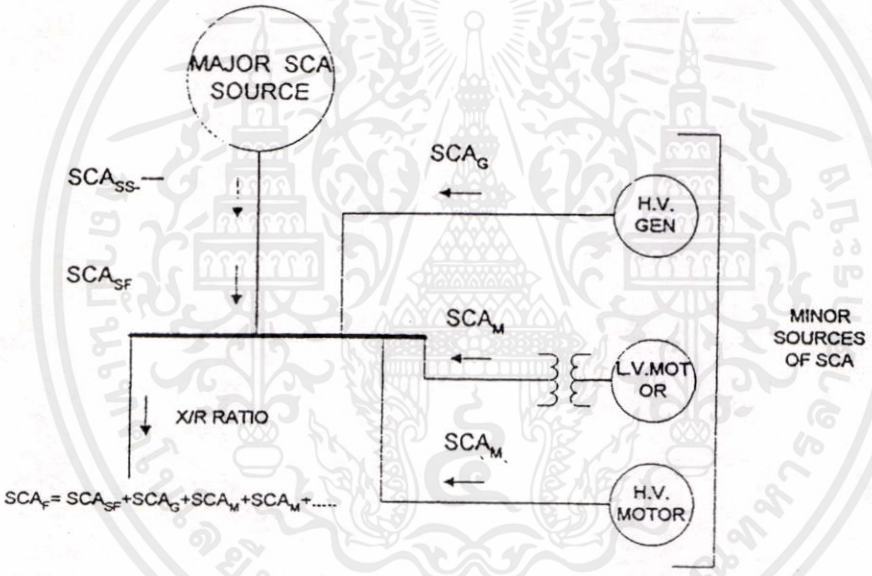
2. ค่าแท้จริง

$$\text{Primary } SCA_m = \left(\frac{\text{Primary Rated Current}}{\text{Transformer \%Z}}\right) \qquad \text{.....(3.31)}$$

หมายเหตุ

1. มอเตอร์จะก่อให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรซึ่งจะสามารถไหลไปยังทางด้านไพรมารีของหม้อแปลง
2. การคำนวณจะง่ายขึ้นหากว่าเราไม่คิดถึงค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. จะใช้ได้เฉพาะกับหม้อแปลงที่มีโหลดเป็นหม้อแปลงตัวเล็ก ๆ เท่านั้น

3.6.2.6 กระแสลัดวงจรทั้งหมดที่หาจากจุดเริ่มต้นของสายป้อน



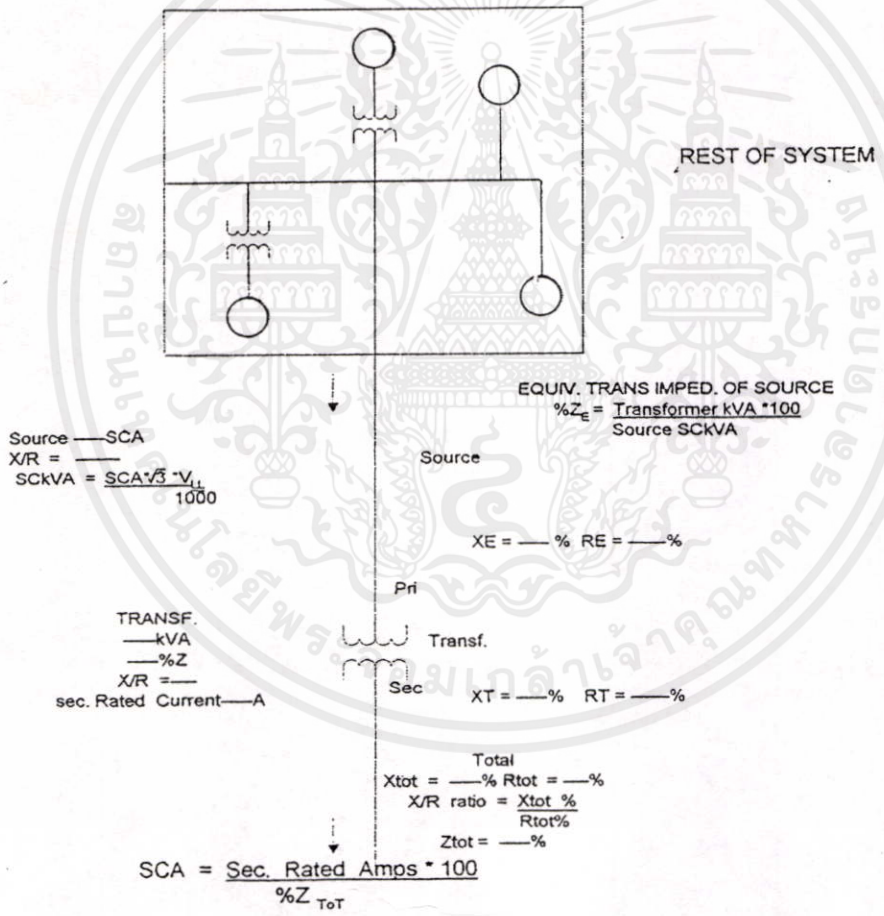
รูปที่ 3.22 กระแสลัดวงจรทั้งหมดที่หาจากจุดเริ่มต้นของสายป้อน

1. ค่า SCA_M ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละสายป้อนคือการรวมค่าของ SCA จากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรต่าง ๆที่ต่อเข้าถึงกันอยู่
2. ค่า SCA_M ที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรต่าง ๆ จะถูกลดค่าลงด้วยค่าอิมพิแดนซ์ของตัวนำที่มันไหลผ่าน แต่ว่าบางทีเราก็สามารถละสิ่งนี้ทิ้งได้เพื่อความสะดวก ในการคำนวณ โดยค่า SCA ที่คำนวณได้จะมีค่ามากกว่าค่าที่แท้จริง ซึ่งก็นับว่าปลอดภัยดีอยู่ แต่ก็ส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันก็จะใหญ่โตเกินความจำเป็น
3. การบวกค่า SCA นั้นก็บวกตามหลักคณิตศาสตร์
4. ค่า X/R ที่ต้นสายป้อนนั้นสามารถที่จะใช้ค่า ของต้นกำเนิดกระแสลัดวงจรที่มีค่ามากที่สุดได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตามหลักการแล้วค่า SCA นั้นจะต้องบวกกันด้วยหลักการของ เวคเตอร์ แต่ด้วยว่าเนื่องจากค่าอิมพิแดนซ์ส่วนใหญ่นั้นจะมีค่ารีแอกแตนซ์มากกว่าค่าความต้านทานมากจึงถือว่าเวกเตอร์นั้นมีทิศเดียวกันก็ย่อมได้ ส่งผลให้เราสามารถที่จะบวกตามหลักคณิตศาสตร์ได้เลย ซึ่งมันก็จะให้ค่าที่ปลอดภัยเนื่องจากผลการคำนวณตามหลักคณิตศาสตร์จะไม่ทำให้ค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าการบวกกันด้วยหลักการของเวกเตอร์เลย

3.6.2.7 การหาค่ากระแสทางเซคคันดารี่ของหม้อแปลง



รูปที่ 3.23 การหาค่ากระแสทางเซคคันดารี่ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่า SCA ที่ไหลไปยัง เซคคันดารีของหม้อแปลงนั้นจะต้องหาค่า อิมพีแดนซ์สมมูลของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรเพื่อนำไปบวกเข้ากับค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงโดยสามารถคำนวณได้ดังนี้โดยทำการหาค่า X/R ของระบบก่อน

- หาค่ารีแอกแตนซ์สมมูล และค่าความต้านทานสมมูลได้ดังนี้

$$\%X_E = \frac{\sin^{-1}\left(X/R\right) * 100 * Transformer kVA}{SCkVA} \quad \text{.....(3.32)}$$

$$\%R_E = \frac{\%X_E}{(X/R)Ratio} \quad \text{.....(3.33)}$$

- คำนวณค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทานของหม้อแปลง

$$\%X_T = \sin^{-1}(X/R) * \%Z_T \quad \text{.....(3.34)}$$

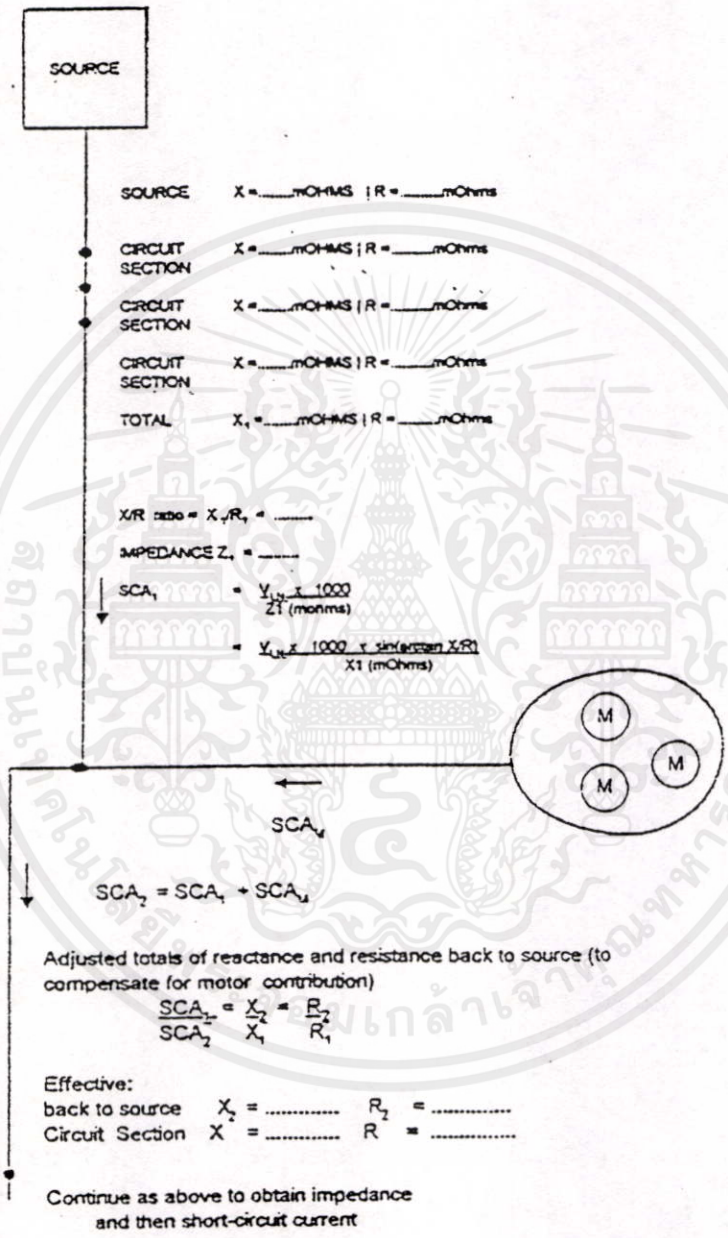
$$\%R_T = \frac{\%X_T}{(X/R)Ratio} \quad \text{.....(3.35)}$$

- นำค่ารีแอกแตนซ์ และค่าความต้านทานที่ได้มารวมกันและหาค่าอิมพิแดนซ์รวม

$$\%Z_{Total} = \frac{\%X_{T\,otal}}{\sin^{-1}(X/R)} \quad \text{.....(3.36)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.8 การคำนวณหากระแสลัดวงจรบนสายป้อน



รูปที่ 3.24 การคำนวณหากระแสลัดวงจรบนสายป้อน

สำหรับค่าอิมพิแดนซ์ของเคเบิลในระดับแรงดันขนาดกลางนั้นโดยทั่วไปจะไม่นิยมเอามาคิดคำนวณเพราะจะส่งผลต่อการคำนวณเพียงน้อยนิดเท่านั้นแต่ถ้าหากว่าสายนั้นมีขนาดยาวมากก็ควรจะนำมาพิจารณาคำนวณด้วย ส่วนค่าอิมพิแดนซ์ของเคเบิลแรงดันต่ำนั้นจะถือว่ามีความสำคัญยิ่ง และควรจะนำมาคิดด้วยถ้าสายนั้นไม่มีขนาดสั้นมากจริง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

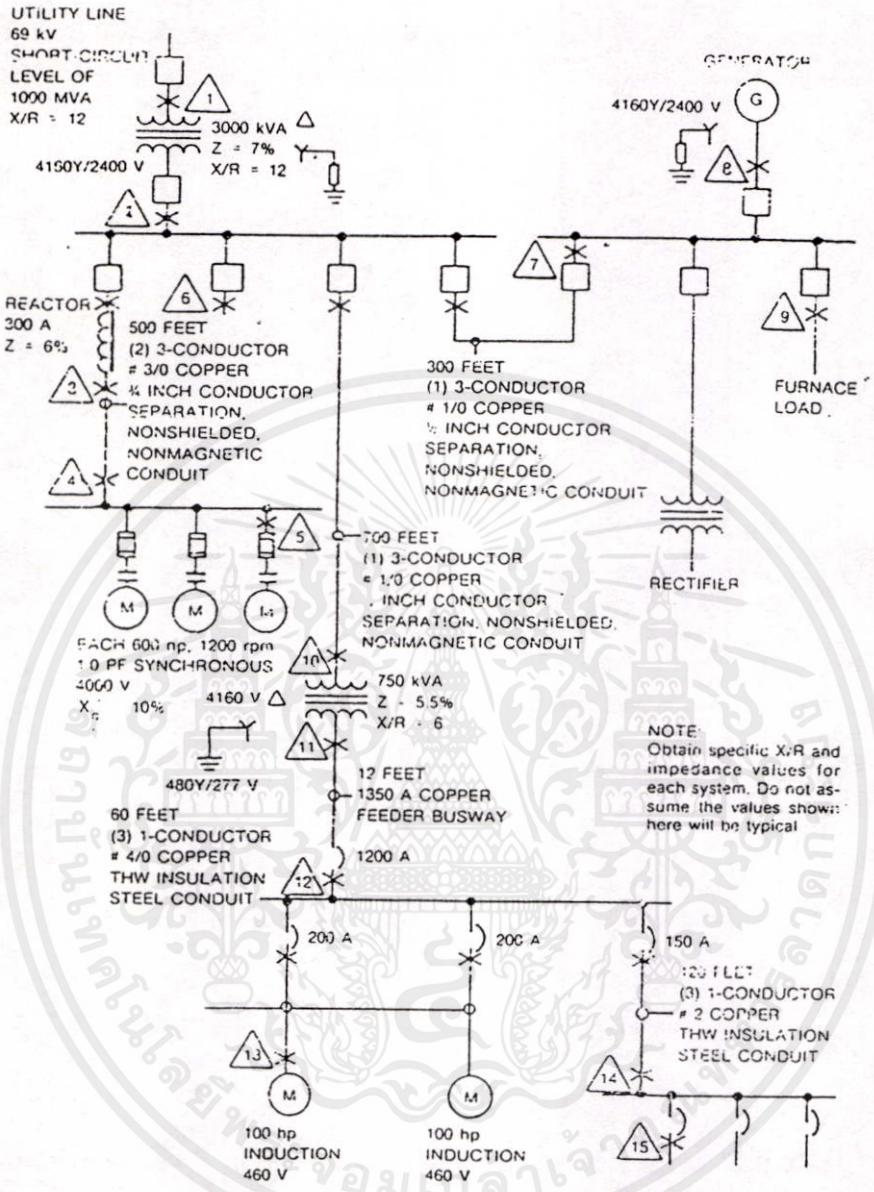
ในการรวมค่าทางคณิตศาสตร์นั้นจะแยกกันระหว่างค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทาน แล้วก็จะนำค่ารวมนั้นมาหาค่า X/R แล้วค่อยนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าอิมพิแดนซ์รวมอีกที

$$Z = \frac{X}{\sin^{-1}(X/R)} \qquad \text{.....(3.37)}$$

และในการคำนวณก็จะใช้กฎของโอห์มโดยกระแสก็จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับอิมพิแดนซ์ในแต่ละเฟส ค่าที่ได้ก็จะนำมาบวกกันตามหลักคณิตศาสตร์ และด้วยอาศัยหลักการของโอห์มเช่นกันเมื่อ พิจารณาให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ก็จะได้ว่ากระแสจะแปรผกผันกับค่าอิมพิแดนซ์ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปข้างต้น ซึ่งจะช่วยในการหาค่าตัวแปรที่เหลือได้

เรายังสามารถที่จะคำนวณหาค่า รีแอกแตนซ์ และค่าความต้านทานที่วัดจากสายป้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรได้อีกด้วยนั่นเอง (ดังในรูปคือค่า X2 และ R2) เพื่อที่จะนำเอาไปใช้ในการคำนวณหาที่วงจรต่อ ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 วันไลน์ไดอะแกรมสำหรับตัวอย่างการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร

3.6.3 ตัวอย่างแสดงการคำนวณกระแสลัดวงจรวิธีโดยตรง (by the Direct Method)

วิธีการนี้ถือเป็นการศึกษาในเรื่องกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าโดยย่อ จากรูป 3.25 ซึ่งเป็นวันไลน์ไดอะแกรมที่ประกอบไปด้วยระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันขนาดกลาง ข้อมูลที่อยู่ในรูปเหล่านั้นจะถูกนำมาใช้สำหรับการอธิบาย ตัวอย่างการคำนวณนี้ ตำแหน่งที่เกิดฟอลท์ขึ้นในระบบจะถูกระบุด้วยตัวเลขของบัส (Bus Number) ซึ่งในรูปนั้นประกอบไปด้วยตำแหน่งที่เกิดฟอลท์ทั้งหมด 14 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาผลรวมของกระแสลัดวงจรในไซเคิลแรกที่ไหลจากมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังบัสที่โหลดนั้นต่ออยู่ โดยคำนวณจากโหลดขึ้นไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจร ซึ่งมีการคำนวณในแต่ละบัสดังนี้

1) บัส 14 และ 15 ไม่มีมอเตอร์

2) บัส 13 อินดักชั่นมอเตอร์ 100 kVA , 100 hp , Power Factor 80 %

จากสมการที่ 3.22 และ 3.26

$$SCA_M = 5 * I_{FL} = \frac{5 * 100kVA}{\sqrt{3} * 0.46kV}$$

$$= 628 \ A.$$

3) บัส 11 และ 12

จากข้อ 2) สามารถรวมกระแสตามจำนวนตัวของมอเตอร์

$$SCA_M = 2 * 628 \ A. = 1256 \ A.$$

4) บัส 10

Transformer Primary Amperes $= \frac{750kVA}{\sqrt{3} * 4.16}$

$= 104.09 \ A.$

Transformer Rated Secondary Amperes $= \frac{750kVA}{\sqrt{3} * 0.48}$

$= 902.01 \ A.$

จากสมการที่ 3.31 $SCA_M = \frac{104.09}{\frac{5.5}{100} + \frac{902.01}{1256}} \ A.$

$= 135 \ A.$

5) บัสที่ 9 ไม่มีมอเตอร์ต่ออยู่

6) บัสที่ 7 และ 8 มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่คำนวณได้ดังนี้

Generator Rated Amperes จากสมการ 3.18 $= \frac{625kVA}{\sqrt{3} * 4.16kV}$

$= 86.74 \ A.$

จากสมการที่ 3.17 $SCA_G = \frac{86.74 * 100}{9}$

$= 964 \ A.$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7)บัสที่ 6 ไม่มีมอเตอร์หรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

8) บัสที่ 5 มีซิงโครนัสมอเตอร์ขนาด 480 kVA (0.8 x 600 hp) โดยมีค่า

จากสมการที่ 3.20 และ 3.22 $$SCA_M = \frac{100 * I_{FL}}{10} = 10 * \frac{480kVA}{\sqrt{3} * 4000V}$$

$$= 693 \ A.$$

9) บัสที่ 3 และ 4 จะมีขนาดกระแสลัดวงจรเท่ากับ 3 x 693 A = 2079 A

10) บัสที่ 2 เป็นค่ากระแสลัดวงจรที่สายป้อนที่ไหลมาจากมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากบัสที่ 3 ไหลผ่าน ตัวรีแอกเตอร์

- หาค่าอิมพีแดนซ์ของบัส 3 โดยใช้กฎของโอมห์

$$Z_M = \frac{4000V.}{\sqrt{3} * 2079} = 1.111 \ ohms$$

- หาค่าอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์

$$Z_R = \frac{6 * 2400V.}{100 * 300A.} = 0.48 \ ohms$$

- จากกฎการแบ่งกระแส

$$SCA_M \text{ (ที่ไหลผ่านตัวรีแอคเตอร์)} = \frac{1.111}{1.111 + 0.48} * 2079A.$$

$$= 1452 \ A.$$

- จากค่าที่ได้ในข้อ 1) ถึง 10)

$$Total \ SCA_M = 1452 + 135 + 964 = 2551 \ A.$$

11) บัสที่ 1 ไม่จำเป็นต้องคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

4.1 ความหมาย

การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (overcurrent coordination) คือ รูปแบบการประยุกต์การจัดระเบียบให้แก่อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นระเบียบแบบแผนที่จะทำให้อุปกรณ์ที่ถูกตัดออกจากระบบมีจำนวนน้อยที่สุด แต่จุดประสงค์นั้นก็ไม่ใช่เพียงแค่ป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นต่ออุปกรณ์และค่าใช้จ่ายเท่านั้น ยังรวมไปถึงการป้องกันบุคคลจากผลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วย การศึกษาในเรื่อง โคออดิเนชั่น จะประกอบไปด้วยการจัดการศึกษาในเรื่องความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสของอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ที่ต่อกันอยู่เป็นชุด ๆ ไล่มาจากตั้งแต่อุปกรณ์ที่ใช้งานไปจนถึงแหล่งที่จ่ายกำลังไฟ โดยจะเปรียบเทียบลักษณะที่ใช้ในการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัวทั้งสภาวะปกติและไม่ปกติที่กระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์เหล่านั้น

จุดประสงค์ในการศึกษาเรื่องของการโคออดิเนชั่น คือ เพื่อที่จะตัดสินหรือรู้ถึงข้อมูลคุณลักษณะค่าพิกัดและการตั้งค่าของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เพื่อที่จะได้มั่นใจได้ว่าจะเกิดการอินเตอร์รัพตัวอุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับฟอลต์ให้น้อยที่สุดเพื่ออุปกรณ์ป้องกันจะทำการแยกฟอลต์ออกจากระบบ ในขณะเดียวกันอุปกรณ์และการตั้งค่าต่าง ๆ ควรจะก่อให้เกิดความพึงพอใจถึงจุดหนึ่งในการป้องกันการเกิดกระแสเกินที่ตำแหน่งต่าง ๆ และทำการอินเตอรัพท์ การลัดวงจรให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้

ข้อมูลที่จะได้รับจากการศึกษาในเรื่องนี้ก็คือการเลือกอุปกรณ์ต่างๆ เช่น อัตราส่วนของหม้อแปลงของตัวอุปกรณ์ คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันและค่าที่ตั้งให้ พิกัดของฟิวส์หรือเบรกเกอร์ และยังช่วยให้ทราบถึงข้อมูลอื่น ๆ ที่จะส่งผลให้เกิด การป้องกันอย่างสมบูรณ์ที่สุด

ปัจจุบันการติดตั้งทางไฟฟ้า ค่าพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ มักจะต้องมีการปรับค่าก่อนการใช้งานแต่การปรับค่าย่อมเกิดหลังจากอุปกรณ์ป้องกันถูกสั่งมาใช้แล้ว ดังนั้นค่าปรับตั้งเหล่านี้ควรที่จะได้รับการคาดการณ์เอาไว้ก่อน ในตอนเลือกอุปกรณ์ป้องกัน ชนิดและย่านการทำงานของมันจะต้องยืดหยุ่นได้เพื่อที่จะป้องกันโหลด หรือ วงจรย่อยเฉพาะจุดได้ การทำการพิจารณาเรื่องโคออดิเนชั่นจะต้องเกิดในระหว่างการออกแบบในตอนแรกเพื่อที่จะนำไปพิจารณาเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันต่อไป ค่าปรับตั้งที่แท้จริงของอุปกรณ์ป้องกันจะตัดสินหลังจากการออกแบบได้เสร็จสิ้นลงไปแล้ว เมื่อค่ากระแสโหลดและค่าฟอลต์ได้ถูกคำนวณเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ป้องกันที่เป็นตัวช่วยหรือสำรอง (back up) การตั้งค่าจะถูกเลือกให้ทำงานโดยให้มีช่วงเวลาทำงานหลังจากที่อุปกรณ์ตัวแรกทำงานแล้ว ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันสำรองนี้จะต้องทนต่อ

สภาวะฟอลต์ได้เป็นเวลานานกว่าอุปกรณ์ป้องกันหลักซึ่งสำหรับการใช้งานที่นิยมกันมากก็คือจะใช้เป็นตัวแยกวงจรอื่น ถ้าหากฟอลต์หรือกระแสที่เกินมาไม่สามารถที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงานได้ แต่ในการใช้งานอุปกรณ์ป้องกันบางทีก็มีการอนุโลมระหว่างเรื่องการป้องกันและการโคออดิเนชั่นได้โดยที่ผู้มีประสบการณ์ส่วนใหญ่มักจะเลือกเอาเรื่องของการป้องกันเป็นสิ่งสำคัญมาก่อนการพิจารณาเรื่องของการโคออดิเนชั่น แต่ว่าการคำนึงถึงเรื่องของการทำโคออดิเนชั่น ควรจะทำอย่างยิ่งเมื่อมีสาเหตุใดก็ตามที่ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรในระบบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

การศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์นั้นจะมีความจำเป็นหากว่ามีการเพิ่มเติมโหลดใหม่เข้าไปในระบบ หรืออุปกรณ์ที่มีอยู่ถูกแทนด้วยอุปกรณ์ตัวใหม่ที่มีค่าพิกัดมากขึ้น และจะสำคัญอย่างยิ่งหากว่าการเกิดฟอลต์ในส่วนประกอบย่อย ๆ ของระบบจะทำให้ส่วนสำคัญของระบบต้องกระทบกระเทือนจนเสียหายได้

4.2 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการศึกษาเรื่องการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

4.2.1 กระแสลัดวงจร

เพื่อที่จะได้นำหลักการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันมาใช้ได้อย่างสมบูรณ์ควรที่จะต้องทราบถึงข้อมูลเหล่านี้ ซึ่งเกี่ยวกับกระแสลัดวงจรในแต่ละบัส

(1) ค่ากระแสลัดวงจรแบบโมเมนทารี ทั้งค่ามากสุดและน้อยสุด (พิจารณาจากไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจร)

(2) ค่ากระแสลัดวงจรแบบอินเตอร์รัพติ้งดิวตี้ ทั้งค่ามากสุดและน้อยสุด (พิจารณาที่ตั้งแต่ 5 ไซเคิลไปจนถึง 2 วินาที)

(3) ค่ากระแสลัดวงจรลงกราวนด์ มากสุดและน้อยสุด

<u>หมายเหตุ</u> ค่ากระแสอินเตอร์รัพติ้งดิวตี้ค่ามากสุดจะเป็นค่ากระแสที่เป็นย่านที่มีการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ ส่วนค่าอินเตอร์รัพติ้งที่น้อยสุดจะใช้ในการดูว่าความไวในการป้องกันของวงจรย่อยนี้มีค่าเพียงพอหรือไม่

4.2.2 ช่วงห่างของเวลาในการทำงานร่วมกัน (coordination time interval)

ในการพล็อตกราฟแสดงการทำงานร่วมกันมักจะต้องมีการรักษาช่วงห่างของเวลาของเส้นกราฟแต่ละเส้นของอุปกรณ์ป้องกันอยู่เสมอเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าลำดับการทำงานของอุปกรณ์เป็นไปอย่างถูกต้อง ซึ่งช่วงห่างของเวลาที่จะต้องรักษาเอาไว้นี้ก็เพราะว่าการทำงานของรีเลย์นั้นจะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า overtraval หรือฟิวส์บางตัวก็อาจมีคุณลักษณะที่เสียหายจากการทำงานได้ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็มีความเร็วในการทำงานอยู่พอควร ในบางทีก็อาจจะเรียกช่วงห่างของเวลาของแต่ละกราฟนี้ว่า มาร์จิน "margin"

การพิจารณาถึงการทำงานร่วมกันสำหรับฟิวส์จำกัดกระแสที่ใช้กับแรงดันต่ำซึ่งมีอัตราการตอบสนองต่อเวลาที่ดี จะง่ายเมื่อพิจารณารวมกับข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องคำนวณหาช่วงห่างของเวลาการทำงานร่วมกันเลย แต่เมื่อเป็นการทำงานร่วมกันของรีเลย์ที่ทำงานแบบผกผันกับเวลาจะต้องมีช่วงห่างของเวลาอยู่ที่ 0.3-0.4 วินาที ช่วงห่างนี้จะถูกวัดที่ตำแหน่งที่มีการตั้งค่าการทำงานแบบฉับพลัน (instantaneous setting) หรืออาจจะเป็นตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรมากที่สุดก็ได้ช่วงห่างของเวลานี้จะประกอบไปด้วย

ช่วงเวลาเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์	0.08 วินาที
ค่า overtraval ของรีเลย์ (relay overtravel)	0.10 วินาที
ค่าความปลอดภัย (safety factor) สำหรับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส รวมถึงค่าความคลาดเคลื่อน	0.22 วินาที

ค่า safety factor นี้อาจจะลดลงได้ด้วยการทำการทดสอบระบบของรีเลย์ (field testing) หรือทำการปรับแต่งกราฟการทำงานร่วมกันของรีเลย์เพื่อกำจัดค่าที่คลาดเคลื่อน

ค่ามาร์จินขนาด 0.355 วินาที เป็นค่าที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการทำการทดสอบระบบที่ใช้รีเลย์แบบทำงานผกผันอย่างมากจนถึงผกผันแบบยิ่งยวด

เมื่อระบบมีการใช้รีเลย์แบบสารกึ่งตัวนำ (solid - state relay) ปรากฏการณ์ overtraval นั้นจะหายไปทำให้ช่วงห่างของเวลาจะลดลงได้ ส่วนระบบที่มีการใช้รีเลย์ที่อาศัยคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำ (induction disk relay) ค่าช่วงห่างของเวลาการทำงานจะลดลงได้ด้วยการใช้อุปกรณ์พิเศษที่จะช่วยกำจัดการเกิด overtraval ได้อุปกรณ์นั้นคือ high-dropout instantaneous element โดยหากมีการปรับแต่งให้ดีแล้วละก็จะทำให้ช่วงห่างเวลาของการทำงานร่วมกัน (time interval) จะเหลือเพียงแค่ 0.25 วินาทีเท่านั้น การทำงานร่วมกันของรีเลย์กับฟิวส์เนื่องจากเวลาการเปิดวงจรของฟิวส์นั้นไม่ได้ส่งผลให้ช่วงห่างของเวลานั้นจะลดลง ค่ามาร์จินระหว่างกราฟอาจจะต่ำถึงขนาด 0.1 วินาทีก็เป็นได้

เมื่อนำเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับแรงดันไฟต่ำที่ติดตั้งอุปกรณ์ direct-acting trip มาทำงานร่วมกันกับรีเลย์ ช่วงห่างของเวลาที่ใช้กันโดยปกติก็คือ 0.3 วินาที ช่วงห่างนี้ดูเหมือนว่าจะน้อยกว่าการพิจารณาถึงการทำงานร่วมกันของรีเลย์ดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว แต่ถ้าหากพิจารณาระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ติดตั้ง direct acting trip แล้วกราฟคุณลักษณะที่ได้นั้นไม่ควรจะให้เกิดการทับ (overlap) กัน ในการใช้งานจะไม่นิยมกำหนดค่ามาร์จินของช่วงห่างเวลามาแน่นอนเนื่องจากมันจะต้องอาศัยตัวแปรต่าง ๆ รวมถึงเวลาการทำงานของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้คุณลักษณะของกราฟที่มีรูปแบบเป็นย่าน (band of device characteristic curve)

4.3 Load Flow Current

ในการศึกษาถึงเรื่องกระแสลัดวงจรและแรงดันตกคร่อมนั้นมักจะต้องมีการศึกษาถึงการไหลของโหลด (load flow) เพื่อที่จะหาค่ากระแสโหลดในสภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉินที่ตำแหน่งต่าง ๆ ข้อมูลของกระแสโหลดนั้นจะถูกใช้เพื่อหาขนาดสาย อุปกรณ์และอุปกรณ์ป้องกันรวมทั้งยังใช้ในการปรับตั้งค่าของอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงสายเคเบิล

ฉนวนของตัวนำจะต้องสามารถที่จะทนต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นได้อันเนื่องมาจากการไหลของกระแสที่ผิดปกติตามข้อเสนอแนะในการป้องกันความเสียหายของฉนวนก็คือ พิจารณากราฟระหว่างขนาดของสายกับค่าของกระแสลัดวงจรซึ่งสัมพันธ์กันกับอุณหภูมิที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนซึ่งจะหาได้จากผู้ผลิตสายไฟในระบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้านั้น สายเคเบิลนั้นจะต้องมีความสามารถที่จะทนต่อค่ากระแสลัดวงจรมากสุดได้เป็นเวลาเท่ากันกับเวลาที่ใช้ในการเปิดวงจรของรีเลย์ป้องกันหลักหรือเวลาที่ใช้ในการขจัดฟอลต์ของฟิวส์ การพิจารณาด้วยหลักการเช่นนี้จะช่วยให้เราสามารถหาขนาดของสายเคเบิลที่เล็กที่สุดที่สามารถใช้งานกับระบบที่ออกแบบได้

4.4 Pickup current

ความหมายของพิคอัพ (pickup) มีอยู่หลายความหมาย สำหรับอุปกรณ์หลาย ๆ ชนิดนั้นจะมีความหมายว่า เป็นค่ากระแสน้อยที่สุดที่จะก่อให้เกิดการทำงานได้ ซึ่งดูจะเห็นได้ชัดจากคุณลักษณะของรีเลย์ นอกจากนี้ยังจะใช้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทริป (trip device) ของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันไฟต่ำ แต่จะไม่ได้ใช้อธิบายถึงการทำงานในลักษณะที่ตัดวงจรอันเนื่องจากความร้อนของตัวโมลเคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งจะอาศัยหลักการการสะสมความร้อน

กระแสพิคอัพ (pickuup current) ของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินหมายถึง ค่ากระแสที่น้อยที่สุดที่จะทำให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ปิดได้ ส่วนรีเลย์ที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจะหมายถึงค่ากระแสน้อยที่สุดที่จะทำให้จานแม่เหล็กเคลื่อนตัวจนปิดวงจรอย่างสมบูรณ์ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้โซลีนอยด์ค่าปรับตั้งของกระแสสำหรับรีเลย์นี้จะหมายถึงกระแสพิคอัพนั่นเอง

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำนั้นค่าพิคอัพหมายถึง ค่าที่ปรับตั้ง (calibrated value) ได้ที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะทำให้อุปกรณ์ที่มีหน้าที่ตัดวงจรทำการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าพิคอัพสามค่า แบ่งตามคุณลักษณะของการทริปดังนี้ short-time delay , long-time delay และ instantaneous ซึ่งค่าของมันจะระบุมาอยู่ในรูปของเปอร์เซนต์ของค่าพิกัดของอุปกรณ์ทริปหรือค่าของ long-time delay ก็ได้

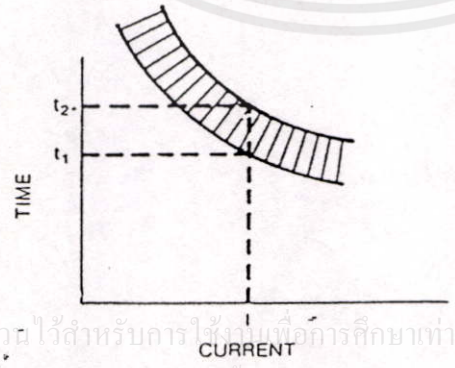
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโมลเคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่มีตัวทริปด้วยความร้อน (thermal trip) ค่าพิกัดกระแสแบบต่อเนื่องจะไม่ใช่ค่าพิคอัพ แต่ว่าค่าการปรับตั้งสำหรับการทำงานแบบฉับพลันโดยอาศัยแม่เหล็กนั้นจะเป็นค่าของกระแสพิคอัพ

ในส่วนของการใช้ฟิวส์นั้นจะใช้ค่าของพิกัดกระแสต่อเนื่องแทนค่ากระแสพิคอัพ เนื่องจากว่าสามารถทนค่ากระแสต่อเนื่องได้ถึง 110 % ของค่าพิกัดต่อเนื่อง โดยในตัวฟิวส์เองอาจมีองค์ประกอบเดียวหรือสององค์ประกอบก็ได้ตามลักษณะการทำงานของมันโดยองค์ประกอบหนึ่งสำหรับกระแสเกินและอีกองค์ประกอบหนึ่งสำหรับการป้องกันการลัดวงจร

4.5 หลักการในการสร้างกราฟแสดงการทำงานร่วมกัน

ก่อนอื่นต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะพื้นฐานของเวลากับกระแสก่อนโดยทั่วไปแล้วที่ตำแหน่งเวลาเท่ากับศูนย์นั้นจะหมายถึง ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ขึ้น และเวลาก็จะแสดงค่าไปตามกราฟหลังจากตำแหน่งนั้น กราฟที่แสดงถึงการทำงานร่วมกันจะแสดงให้เห็นว่าย่านที่อยู่ทางใต้โดยเฉียงไปทางซ้ายถือว่าเป็นย่านที่ไม่เกิดการทำงาน เส้นโค้งดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงคู่ลำดับของกระแสกับเวลาที่จะแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์นั้นจะต้องใช้เวลาเท่าไหร่ในการทำงานที่ค่ากระแสนั้น สำหรับตัวรีเลย์ป้องกันจะอยู่ในรูปของเส้นโค้งเพียงเส้นเดียวแต่สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นกราฟจะแสดงอยู่ในรูปของแถบของเส้นโค้ง(band) ซึ่งแถบนี้จะแสดงให้เห็นค่าเวลาในการทำงานที่ค่ากระแสค่าหนึ่งนับตั้งแต่เวลาน้อยที่สุดไปจนถึงมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 ให้เห็นถึงคุณลักษณะของกระแสกับเวลาที่เป็นย่าน

รูปที่4.1 แสดงให้เห็นถึงแถบของกราฟโดยเวลา T_2 นั้นจะเป็นเวลามากที่สุดนับตั้งแต่กระแสที่มีค่า I เริ่มไหลเข้าสู่อุปกรณ์ป้องกันแล้วตัวอุปกรณ์จะต้องทำงานอย่างแน่นอน ส่วนเวลา T_1 นั้นจะหมายถึงค่าเวลามากที่สุดที่หลังจากมีกระแส I ไหลผ่านแล้วการทำงานของตัวอุปกรณ์ทริปยังคงไม่ทำงาน

โดยปกติแล้วกราฟของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเริ่ม ณ ตำแหน่งที่ค่ากระแสมีค่าต่ำกว่าค่าพิกัดของตัวอุปกรณ์นั้นและที่เวลาทำงานที่ 1000 วินาที กราฟของรีเลย์นั้นมักจะเริ่มต้นที่ตำแหน่งที่เวลาประมาณ 1.5 เท่าของเวลา pickup time และโดยปกติจะสิ้นสุดที่ตำแหน่งของค่ากระแสลัดวงจรมากที่สุดที่ตัวอุปกรณ์นั้นทนได้ โดยส่วนใหญ่แล้วกราฟของตัวอุปกรณ์มักจะห่อหุ้มตำแหน่งที่จะเกิดการทำงานของอุปกรณ์ เส้นที่ล้อมรอบนี้จะเกิดจากตัวแปรบางตัวที่จะส่งผลกระทบต่อการทำงาน เช่น อุณหภูมิรอบข้าง, ค่า tolerancesของทางผู้ผลิต และค่า time delay ที่สามารถปรับตั้งได้

คุณลักษณะในการปิดหน้าคอนแทคสำหรับตัวรีเลย์ป้องกันกระแสเกินนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดที่ทำงานแบบเวลาผกผันและชนิดที่ทำงานแบบสัมพันธ์กับเวลาแบบแน่นอน โดยอย่างหลังนี้เวลาที่ผ่านไปจะไม่ขึ้นกับขนาดของกระแส แต่แบบเวลาผกผันนั้นเวลาในการทำงานของรีเลย์นั้นจะผกผันกับขนาดของกระแสหมายความว่า หากค่ากระแสมีขนาดมากขึ้นจะทำให้การทำงานของรีเลย์ใช้เวลาสั้นลง แต่จะใช้เวลามากขึ้นหากค่ากระแสมีค่าน้อย และต้องมีค่ามากกว่าค่าพิคอัพ โดยรีเลย์อาจจะทำงานแบบผกผันธรรมดา , ผกผันมาก หรือผกผันอย่างยิ่งยวด (extremely inverse) รีเลย์ที่มีคุณลักษณะเช่นนี้นิยมนำมาใช้อย่างกว้างขวางในระบบ ซึ่งโดยทั่วไปรีเลย์ที่มีคุณลักษณะผกผันคล้ายกันจะใช้ร่วมกันได้อย่างเหมาะสม หรืออาจจะใช้รีเลย์ที่มีความผกผันมาก ๆ กับตำแหน่งที่ใกล้กับโหลดแล้วใช้แบบผกผันน้อยลงเป็นตัวสำรองในการป้องกันระบบก็ได้ เช่นการใช้รีเลย์ทำงานร่วมกับฟิวส์ซึ่งตัวฟิวส์นี้จะมีคุณลักษณะที่ผกผันอย่างยิ่งยวดส่วนของรีเลย์ที่ทำงานด้วยเวลาที่แน่นอนนั้น (definite time relay) นิยมใช้กับวงจรป้องกันมอเตอร์ในระดับแรงดันขนาดกลางหรือป้องกันการเกิดกราวนด์ฟอลต์ ซึ่งพวกนี้จะมีย่านของกระแสฟอลต์ค่อนข้างกว้าง โดยการเลือกลักษณะของกราฟนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของความชอบและก็มาตรฐาน

4.6 หลักในการออกแบบเพื่อการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

4.6.1 หลักในการออกแบบมีอยู่ 6 ขั้นตอนด้วยกันดังนี้

1. รวบรวมแบบวันไลน์ไดอะแกรมรวมถึงข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบ
2. คำนวณหาการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ (load flow)
3. รวบรวมข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นในการประเมินการลัดวงจร
4. คำนวณหาระดับการเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าที่แต่ละตำแหน่งของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการเลือกคุณลักษณะและอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ป้องกันและรวบรวมเอากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลามาอยู่บนกระดาษกราฟ log อันเดียวกัน

6. รวบรวมค่าพิกัดของอุปกรณ์อื่น ๆ รวมทั้งค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน

4.6.2 ข้อมูลที่จำเป็นในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกัน

1. วันไลน์ไดอะแกรมที่มีข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

1.1 ค่าพิกัดกำลังและแรงดันรวมถึงค่าอิมพิแดนซ์และรูปแบบการต่อของตัวหม้อแปลงทุกตัวในระบบ

1.2 เงื่อนไขในการสวิตชิ่งในสภาวะปกติและฉุกเฉิน

1.3 ข้อมูลการลัดวงจร เช่น ค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า , ค่าซับทรานเซี้ยนรีแอกแตนซ์ของตัวมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ , ค่าทรานเซี้ยนรีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ , ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ของเจนเนอเรเตอร์ รวมถึงข้อมูลของตัวนำ ขนาด , ชนิด , ค่าพิกัดทางความร้อน (อุณหภูมิ)

1.4 ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส

1.5 ค่าพิกัดและคุณลักษณะรวมถึงย่านการทำงานของตัวรีเลย์และอุปกรณ์ตัดตอนโดยตรง (direct acting trip) และฟิวส์

2. ข้อมูลเกี่ยวกับกระแสลัดวงจรต่าง ๆ ทั้งแบบโมเมนทารี่และแบบอินเตอรัพติ้งของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้งานกับแรงดันปานกลาง โดยจะต้องคำนึงถึงการทำงานของโหลดตั้งแต่มากสุดจนถึงน้อยที่สุดของทุกองค์ประกอบของระบบทุกระดับแรงดัน รวมถึงค่ากระแสฟอลต์ที่ไหลผ่านตัวหม้อแปลง

3. ค่าพิกัดทางความร้อนของตัวอุปกรณ์ที่ถูกป้องกัน โดยจะพิจารณาในเทอมของพิกัด I^2t หรืออาจกล่าวได้ว่าหมายถึงค่าเวลาช่วงหนึ่งที่อุปกรณ์จะทนค่ากระแสค่าหนึ่งได้โดยไม่เกิดความเสียหายอันเกิดจากความร้อน

4. ค่าโหลดที่ประเมินว่ามากสุดของวงจรที่พิจารณา

4.7 กรรมวิธีในการออกแบบ (procedure)

4.7.1 กรรมวิธีในการออกแบบ

1. เลือกสเกลของกระแสที่เหมาะสม (ดูจากหัวข้อถัดไป)

2. บนกระดาษกราฟ log - log จะต้องมีสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้

(a) ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในหน่วยแอมแปร์ (A)

(b) ค่าความจุของกระแสอันเกิดจากการไหลของโหลด (load flow)

(c) ค่าพิกัด I^2t ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายบนกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เริ่มการพล็อตกราฟโดยพิจารณาที่โหลดมากสุดและที่ระดับแรงดันต่ำสุด เพื่อขจัดความยุ่งยากและความน่ารำคาญในการศึกษาเรื่องของการทำงานร่วมกัน จะใช้หลักการของการวางทับซ้อนของกราฟต่าง ๆ เพื่อการทำโคออดิเนชั่น โดยเริ่มจากการเลือกค่าสเกลของกระแสที่ต้องการก่อน แล้วทำการคำนวณหาค่าตัวคูณที่เหมาะสมของแต่ละระดับของแรงดัน แล้วก็จะนำกราฟคุณลักษณะของตัวอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ มาวางทับกันบนพื้นผิวที่สว่างโดยอาจจะเป็นกระดาษสีขาว หรืออาจจะเป็นกล่องที่มีไฟส่องอยู่ใต้ล่าง นำกระดาษกราฟ log-log ที่ทำการเลือกเอาไว้เพื่อศึกษาการโคออดิเนชั่นมาวางทับอยู่บนสุดโดยค่าสเกลของกระแสจะต้องตรงกันหลังจากนั้นก็จะทำการตรวจสอบค่าปรับตั้งรวมถึงค่าพิกัดต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์ป้องกัน

4.7.2 การเลือกค่าสเกลของกระแสที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาระบบที่มีขนาดใหญ่หรือมีระดับแรงดันหลายระดับแล้ว กราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ตัวที่เล็กสุดจะต้องถูกวางอยู่ทางซ้ายสุดเท่าที่จะเป็นได้บนกระดาษกราฟล็อก เพื่อลดความแออัดของกราฟที่จะไปกองรวมกันอยู่ทางขวา ค่ามากสุดหรือลิมิตทางขวามือโดยส่วนใหญ่จะเป็นค่ากระแสลัดวงจรที่มากที่สุดในระบบ ถ้าหากไม่พิจารณาถึงผลของพฤติกรรมของอุปกรณ์ภายใต้สภาวะที่มีกระแสเกินค่ากระแสลัดวงจรมากสุด กราฟคุณลักษณะของตัวอุปกรณ์ตัดตอนไม่ควรจะมีมากนักเพราะจะทำให้เกิดความยุ่งยากมาก

กราฟคุณลักษณะของรีเลย์ทุกตัวจะต้องถูกพล็อตบนสเกลเดียวกันถึงแม้จะทำงานที่ระดับแรงดันต่าง ๆ กันก็ตามดังตัวอย่าง ในรูปถัดไปที่ระบบมีหม้อแปลงขนาด 750 kVA ขนาดแรงดัน 4160 V delta ทางด้านไพรมารีและ 480 V wye ทางด้านเซ็คคันดารี โดยหม้อแปลงถูกติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันทั้งทางด้านไพรมารีและเซ็คคันดารีโดยสมมุติ จะพบว่าในระบบค่าโหลดกระแสมากสุดที่ด้าน 480 V = 750*1000/480*$\sqrt{3}$ = 902 A โดยเป็นค่ากระแสที่ไหลทางด้านเซ็คคันดารี ส่วนค่ากระแสทางด้านไพรมารีจะเท่ากับ 480/4160*902 = 104 A ซึ่งหากเราเทียบเป็นหน่วยเพอร์ยูนิต (per unit) แล้วจะพบว่าจะมีค่าเท่ากันคือ 1 เพอร์ยูนิต ดังนั้นในกราฟที่เราพิจารณาถึงการโคออดิเนชั่นค่า 104 A ของระดับแรงดัน 4160 V จะต้องเป็นค่าเดียวกับ 902 A ที่ระดับแรงดัน 480 V วิธีจัดการเช่นนี้จะช่วยในการศึกษาระบบที่มีหลายระดับแรงดันได้อย่างสะดวกในการเลือกสเกลเหมาะสม

4.8 ตัวอย่างขั้นตอนการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

1. เขียนวันไลน์ไดอะแกรมในส่วนของวงจรที่ต้องการศึกษาพร้อมทั้งค่าพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาค่ากระแสลัดวงจร คำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่หาได้ในแต่ละจุดของระบบดังนี้

34.5 kV system	500 MVA จากการไฟฟ้าหรือระบบ
4160 V bus	55.5 MVA จากระบบอย่างเดียวโดยไม่คิดถึงการลัดวงจรที่เกิดจากตัวของมอเตอร์เพื่อความง่ายในการคำนวณ
480 V bus	12800 A กระแสลัดวงจรแบบสมมาตรผ่านตัวหม้อแปลง 750 kVA
480 V substation feeder	12800 A กระแสลัดวงจรแบบสมมาตรผ่านตัวหม้อแปลง 750 kVA รวมถึงค่ากระแสจากมอเตอร์ที่ระบบ 480 V อีก 3600 A
480 V 100 A panel board	11000 A เป็นค่ากระแสสมมาตร

3. ค่าสำหรับการป้องกัน (protection points) คำนวณหาค่าสำหรับการป้องกันที่ต้องการที่องค์ประกอบของระบบที่มีขนาดใหญ่ โดยดูที่ตารางที่ 4.1 จุดป้องกันที่แสดงในตารางนั้นเป็นลักษณะของการทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งค่าฟอลต์ของอุปกรณ์ป้องกันซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.7 นั้นจะเป็นไปตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE C57.109-1985 หากว่าในระบบมีการใช้ตัวหม้อแปลง delta-wye ค่าฟอลต์ของไลน์ทูกราวนด์ซึ่งเกิดจากกระแสฟอลต์ทางด้านเซ็คคันดารี 100% จะลดลงเหลือเพียง 58% ($1/\sqrt{3}$) ซึ่งจะเป็นค่าของฟอลต์ระหว่าง 2 เฟสทางด้านไพรมารีของหม้อแปลง นั่นหมายความว่าค่ากระแสที่ตำแหน่งป้องกันของ ANSI นั้นจะมีค่าเป็น 0.58 ของค่ากระแสที่เกิดจาก 3 เฟสฟอลต์

ตารางที่ 4.1 ค่าสำหรับการป้องกัน

3750 kVA Transformer	750 kVA Transformer
(a) ANSI Point*	
$16.6 \cdot I_n \cdot 0.58 = I_{ANSI}$ for 4 s	$17.6 \cdot I_n \cdot 0.58 = I_{ANSI}$ for 3.75 s
$16.6 \cdot 520 \cdot 0.58 = 5000$ A at 4160 V	$17.6 \cdot 902 \cdot 0.58 = 9300$ A at 480 V
$16.6 \cdot 63 \cdot 0.58 = 606$ A at 34.5 kV	$17.6 \cdot 104 \cdot 0.58 = 1060$ A at 4160 V
(b) Inrush Point	
$12 \cdot I_n = I_{inrush}$ for 0.1s	$8 \cdot I_n = I_{inrush}$ for 0.1 s
$12 \cdot 520 = 6250$ A at 4160 V	$8 \cdot 902 = 7216$ A at 480 V
$12 \cdot 63 = 755$ A at 34.5 kV	$8 \cdot 104 = 832$ A at 4160 V
(c) 6 Times Full Load (NEC [7] Rule)	
$6 \cdot 520 = 3120$ A at 4160 V	$6 \cdot 902 = 5412$ A at 480 V
$6 \cdot 63 = 378$ A at 34.5 kV	$6 \cdot 104 = 624$ A at 4160 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเลือกสเกล

4.1 ตรวจสอบย่านของกระแสที่จำเป็นต้องวาดที่ระดับแรงดันต่าง ๆ โดยพิจารณาจากค่าของกระแสฟอลต์ต่าง ๆ ในตารางที่ 4.2 พบว่าจะต้องใช้ ค่าของกราฟล็อกถึง 4 cycle (10000) จึงจะเหมาะสมกับทุกอุปกรณ์ภายใต้การพิจารณา

4.2 เลือกค่าสเกลที่จะทำให้มีค่าตัวคูณและเกิดการเข้าไปยุ่งเกี่ยวกับปริมาณของตัวอุปกรณ์ให้น้อยที่สุดจะได้ว่าค่าตัวคูณที่เหมาะคือค่า 10 สำหรับกระแสของตัวอุปกรณ์ที่ระดับแรงดัน 4160 V และ 87 ที่แรงดัน 480 V ส่วนที่แรงดัน 34500 V คือ1.21 ตามลำดับ

5. คุณลักษณะการตัดตอนเบื้องต้น(Basic Tripping Characteristics) ทำการพล็อตค่าเหล่านี้ลงบนกระดาษล็อก

5.1 กราฟกระแสฟอลต์ทะลุผ่านตัวอุปกรณ์ป้องกัน (Through fault protective curve) ค่ากระแสเฉียบพลัน (inrush point) ค่ากระแสโหลดสูงสุด 6 เท่าของหม้อแปลง (OA หรือ AA)

5.2 ค่ากระแสลัดวงจร

5.3 ค่าพิกัดกระแสต่อเนื่องมากที่สุดของฟิวส์หรือตัวโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์ตัวใหญ่ที่สุดที่ระดับแรงดันต่ำจะถูกพล็อตก่อนในที่นี้คือตัวโมลเคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ 100 A ซึ่งกราฟคุณลักษณะจะถูกวางลงบนกล่องที่มีไฟส่องใต้ล่างเพื่อที่จะนำกระดาษกราฟมาวางทับเพื่อประโยชน์ในการทำการโดออดิเนตต่อไป

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสที่ระบบต่าง ๆกัน

	34.5 kV Scale		4160 V Scale	480 V Scale	
System	Full-Load Current for 3750 kVA Transformer	500 MVA Short-Circuit Capacity	55.5 MVA Short-Circuit Capacity	100 A Load	16 400 A Short-Circuit Current
34.5 kV	63 A	8400 A	930 A	1.4 A	229 A
4160 V	520 A	69 200 A	7700 A	11.5 A	1890 A
480 V	4500 A	600 200 A	66 500 A	100.0 A	16 400 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

6.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันสายป้อนที่ 480 V ค่าความจุกระแสของตัวสายเคเบิล 750 kcmil มีค่าประมาณ 500 A อุปกรณ์ตัดตอนที่ดูจะเหมาะกับโมลเคสเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเป็นอุปกรณ์แบบหน่วงเวลาเร็ว มากกว่าจะเป็นแบบฉับพลัน ในที่นี้เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 600 A โดยปรับตั้งค่าการทำงานแบบหน่วงเวลาช้าไว้ที่ 80% คือ 480 A ส่วนหน่วงแบบเร็วตั้งไว้ที่ 4 เท่าคือ 2400 A ที่ตำแหน่งที่มีค่าเวลาน้อยที่สุดดังรูป 4.4

6.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์หลักที่ทำหน้าที่ป้องกันวงจรเซ็คคันดารีของหม้อแปลงขนาด 750 kVA มีค่ากระแสโหลดสูงสุด 902 A ค่าที่ปรับตั้งสำหรับตัดตอนคือ 1200 A โดยเลือกเอาที่มีย่านเวลามากสุดทั้งที่การทำงานแบบหน่วงเร็วและหน่วงช้า โดยค่าที่ปรับตั้งสำหรับการทำงานแบบหน่วงเวลาเร็วคือ 3600 A

7. รีเลย์ป้องกันสายป้อนที่แรงดันระดับกลาง ขีดจำกัดของกราฟของอุปกรณ์ป้องกันวงจรทางไพรมารีของหม้อแปลงขนาด 750 kVA จะหาจากการตรวจสอบกราฟของค่ากระแสทะลุผ่าน(through fault protection curve) และค่ากระแสเฉียบพลัน (inrush point) โดยปกติจะพยายามให้กราฟของคุณลักษณะนั้นห่าง จากทางซ้ายให้มากที่สุดเพื่อที่การทำงานจะได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับกระแสฟอลต์ เลือกค่าพิคอัพของตัวรีเลย์ป้องกันกระแสเกินโดยพิจารณาให้มีค่ามาร์จิน(margin)16%จากค่าปรับตั้งของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันวงจรทางด้านเซ็คคันดารี (3600 A) ค่าที่ได้ไม่ควรจะเกิน 624 A ที่ 4160 V และมากกว่าค่า 3600*(480/4160)*1.16 = 480 A เนื่องจากค่า 624 A เป็นค่ากระแสขนาด 6 เท่าของกระแสโหลดมากสุดของตัวหม้อแปลง 750 kVA ที่ 4160 V เป็นค่าที่กำหนดไว้มากที่สุดตามข้อกำหนดของ NEC ส่วนที่ 450-3 เพราะว่าค่านี้จะป้องกันสายเคเบิลซึ่งจ่ายให้แก่สับสเตชัน (substation) ค่าที่ต่ำกว่าจึงเหมาะกว่า

ในตัวอย่างนี้ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสที่ถูกเลือกเท่ากับ 300/5 หรือ 60:1 ค่าปรับตั้งตามอัตราส่วนนี้จะทำให้เกิดค่ากระแสทางด้านไพรมารีที่เป็นค่ากระแสพิคอัพ น้อยสุดของรีเลย์เท่ากับ 60*8 = 480 A ค่า tap ขนาด 8 A จะช่วยเป็นการสำรองค่าโหลดเผื่อไว้ในอนาคตถึงแม้ว่าเพียงแค่ 5 A ก็ถือว่าเพียงพอ

ในการเลือกคุณลักษณะของรีเลย์นั้นควรจะต้องมีการทดลองเลือกดูก่อน หรืออาจจะป้องกันได้อย่างน้อยด้วยการเลือกเอารีเลย์ที่มีลักษณะแบบผกผันมาก ๆ ดังในรูปที่ 4.7 เป็นกราฟคุณลักษณะของรีเลย์ที่มีลักษณะผกผันอย่างมาก โดยแสดงตามค่าปรับตั้งของเวลาที่ตัวอุปกรณ์หน่วง (time dial setting) ตั้งแต่ ½ ไปจนถึง 11 โดยในแกนของกระแสจะแสดงให้เห็นค่าตัวคูณของ tap ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 40 ซึ่งสำหรับ tap 8 A ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสพิคอัพ ทางด้านไพรมารีเท่ากับ 480 A หากค่าตัวคูณของ tap เท่ากับ 2 ก็จะได้ค่ากระแสไพรมารีเท่ากับ 960 A เป็นต้น

ในการวางกราฟคุณลักษณะของกระแสและเวลานี้ลงบนพื้นที่ทำการโคออดิเนททำได้โดยวางตำแหน่งที่ตัวคูณของ tap เท่ากับ 1 ลงบนเส้นแนวตั้งที่ 480 A ทำตามขั้นตอนนี้ค่าอื่น ๆ ก็จะจัดวางตัวโดยอัตโนมัติ แต่ในแกนนอนของเวลาจะต้องวางให้ทับกันพอดีด้วยเช่นกัน หลังจากเราวางทาบดูก็จะพบว่ากราฟของรีเลย์ที่ค่าปรับตั้งของเวลาเท่ากับ 1 นั้นจะให้ค่ามาร์จินตามต้องการคือมากกว่า 16 % เหนือค่ากระแส 3600 A ของค่าการปรับตั้งการทำงานแบบหน่วงเวลาเร็วของตัวเบรกเกอร์และจะสังเกตได้ว่าค่า 12800 A นั้นเป็นค่ากระแสฟอลต์ทะลุผ่าน (through fault current) มากสุดของตัวหม้อแปลง ดังนั้นจะเห็นว่ารูปกราฟของตัวอุปกรณ์หน่วงเวลาสั้นที่ 3600 A ไม่ยืดมาจนเลยค่า 12800 A นี้ และค่าปรับตั้งเวลาที่มากกว่านี้จะไม่เหมาะสมเพราะว่ามันจะทำให้ค่ามาร์จินระหว่างกราฟของรีเลย์กับกราฟการป้องกันกระแสทะลุผ่าน (through-fault protection curve) น้อยลงไปรวมถึงค่ามาร์จินเมื่อเทียบกับกราฟของรีเลย์ของตัวหม้อแปลงขนาด 3750 kVA อีกด้วย

หมายเหตุ ถ้าหากว่าค่าปรับตั้งเวลาที่ 1 นั้นไม่ได้ให้กราฟที่เหมาะสมกับระบบแล้วละก็ ควรจะทำดังนี้

1. เลือกค่า tap ค่าอื่น (จะทำให้กราฟเกิดการเลื่อนไปทางขวาหรือทางซ้าย)
2. ทำการปรับแต่งค่ากระแส pickup ที่น้อยที่สุด ระหว่าง tap หรือปรับแต่งค่าเวลาก็ได้การทำการปรับแต่งค่าเช่นนี้จะช่วยให้การปรับตั้งละเอียดยิ่งขึ้น
3. เลือกกราฟคุณลักษณะของตัวรีเลย์ที่ต่างออกไป เช่น แบบผกผันธรรมดา หรือแบบผกผันยิ่งยวด ดังในรูปที่ 4.7
4. ใช้อัตราส่วนของหม้อแปลงที่ต่างไปหรือใช้หม้อแปลงกระแสช่วย
5. เปลี่ยนตัวอุปกรณ์หรือค่าปรับตั้งของตัวอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียงโดยจะต้องจำไว้ว่าค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสที่สายป้อนขนาด 4160 V และค่าปรับตั้งของตัวรีเลย์ป้องกันกระแสเกินนั้นถูกเลือกเพื่อป้องกันสายเคเบิลที่ต่อไปยังสับสเตชั่น (substation) ดังนั้นค่ากระแสพิคอัพ ของรีเลย์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าความจุกระแสของสายเคเบิล (ความจุของสายเคเบิลน้อยกว่า 480 A) ส่วนค่าของการปรับตั้งให้ทำงานอย่างฉับพลัน (instantaneous element) จะต้องถูกปรับค่าให้มีค่าสูงกว่าค่ากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่ผ่านหม้อแปลงซึ่งค่านั้นเท่ากับ(2800*480/4160)*(5/300)*1.6 เท่ากับ 39.4 A แต่ตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE C37.91-1985 นั้นค่าตัวคูณจะมีค่าเป็น 1.25 เท่าของค่ากระแสฟอลต์แบบสมมาตรมากสุดแทนที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 1.6 โดยค่าตัวคูณนี้จะขึ้นกับค่าอัตราส่วนของ X/R ของวงจรทางเซ็คคันดารีของหม้อแปลง

8. เมนรีเลย์ที่แรงดันระดับกลาง

จะต้องเลือกค่ากระแสพิคอัพ สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ รีเลย์ที่ป้องกันวงจรทางเซ็คคันดารีของหม้อแปลงขนาด 3750 kVA ให้มีค่าไม่ต่ำกว่า125% ของกระแสโหลดสูงสุด 520*1.25 เท่ากับ 650 A แต่จะต้องไม่เกิน 300% คือ 520*3.00 ซึ่งเท่ากับ 1560 A ค่าที่ดีที่สุดคือ 800 A โดยมีอัตราส่วนของตัวหม้อแปลงกระแสเท่ากับ 800/5 และไม่จำเป็นต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำงานแบบฉับพลันบนตัวรีเลย์นี้เพราะว่าไม่สามารถจะนำไปเลือกกับองค์ประกอบที่ทำงานแบบฉับพลันบนสายป้อน เลือกค่าปรับตั้งหน่วงเวลา (time dial setting) ที่ 0.3-0.4 วินาที จะเป็นค่าที่ได้มาตามทฤษฎีที่ตำแหน่งของกระแสฟอลต์เท่ากับ 100 % ค่ามาร์จินค่านี้จะเป็นตัวยืนยันว่าการโคออดิเนทระหว่างตัวเบรกเกอร์หลักทางเซ็คคันดารีของหม้อแปลงกับตัวเบรกเกอร์ป้องกันสายป้อนที่แรงดัน 4160 V

9. ฟิวส์แรงดันสูง

ตามตารางมาตรฐานสำหรับฟิวส์จะพบว่าฟิวส์ที่มีความเร็วมาตรฐาน 100 E จะใช้สำหรับป้องกันตัวหม้อแปลงขนาด 3750 kVA ได้อย่างไรก็ดีฟิวส์ที่มีคุณลักษณะความเร็วต่ำกว่านั้นก็อาจถูกเลือกมาใช้ได้เนื่องจากมันก็มีความสามารถป้องกันหม้อแปลงได้ตามกฎเกณฑ์ได้เช่นกัน แล้วยังช่วยประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้งได้อย่างมากอีกด้วยหมายความว่าฟิวส์ที่มีขนาดเล็กกว่าก็ควรจะนำมาทดลองดูได้เช่นกัน วิศวกรบางคนได้เลือกเอาค่ามาร์จินเท่ากับ 0.2-0.4 วินาทีระหว่างกราฟการหลอมเหลวของฟิวส์ต่ำสุดทางไพรมารี (primary fuse minimum melting time curve) กับกราฟของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์รีเลย์ทางเซ็คคันดารีที่แรงดัน 4160 V ที่ตำแหน่งค่ากระแสลัดวงจรโดยค่านั้นเท่ากับ 55.5 MVA หรือ 7708 A จากตัวอย่างนี้ได้เลือก 100 E 34.5 kV fuse ดังแสดงในรูปที่ 4.6

10. หลักการใช้ศิลปะการยอมประนีประนอม

สามารถทำได้ดังนี้ เลือกการเริ่มต้นโคออดิเนทจากตำแหน่งแรงดันต่ำที่สุดแล้วเลื่อนไปยังแรงดันสูงสุด กราฟคุณลักษณะกระแสกับเวลาของตัวอุปกรณ์ป้องกันหลักที่แรงดันต่ำ ๆ ควรที่จะถูกจัดไว้ให้อยู่ทางซ้ายของกราฟของตัวอุปกรณ์ป้องกันที่คอยสำรองนั้น แต่หากว่ากราฟของมันไม่สามารถจัดให้ได้ดังกล่าวแล้วคงต้องมีการพิจารณาเปลี่ยนตัวอุปกรณ์ป้องกันสำรองให้สูงขึ้นหรือยอมพิจารณายอมประนีประนอม เมื่อใดที่เกิดเหตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การณ์เช่นนี้ขึ้นจะต้องจำไว้ว่าควรจะยอมที่ตำแหน่งที่เกิดความกระทบกระเทือนต่อค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดซึ่งตำแหน่งควรจะเป็นดังต่อไปนี้

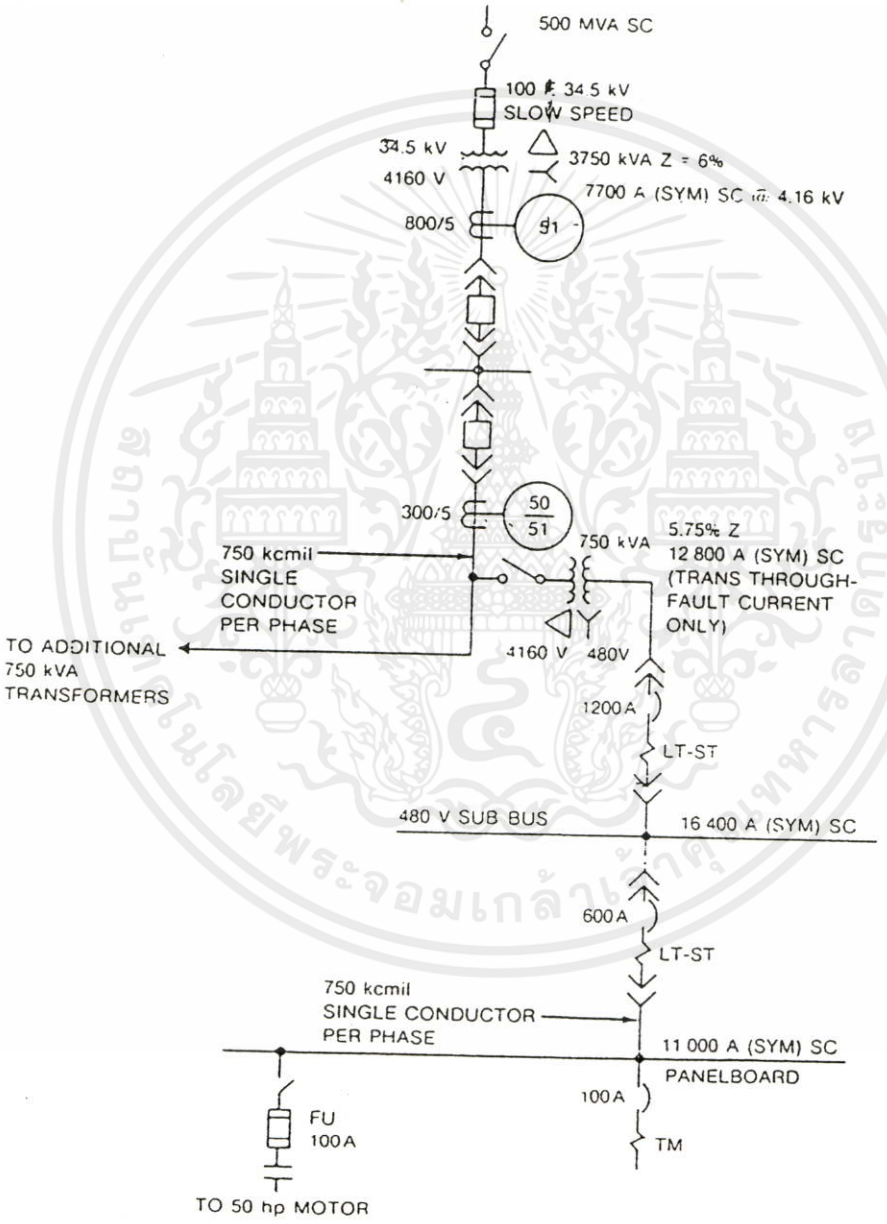
10.1 ระหว่างตัวอุปกรณ์ป้องกันทางไพรมารีของตัวหม้อแปลงกับตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักทางเซ็คคันดารี

10.2 ระหว่างตัวอุปกรณ์ป้องกันโหลด กับตัวอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่เหนือขึ้นไป โดยทั่วไปก็จะเป็นเบรกเกอร์ป้องกันสายป้อน หรือตัวอุปกรณ์ป้องกันหลักที่ห้องควบคุมมอเตอร์

10.3 เทคนิคในการโคออดิเนทให้เกิดความใกล้กันของกราฟคุณลักษณะก็คือ การใช้ตัวรีเลย์ที่มีลักษณะทำงานแบบผกผันยิ่งยวดเป็นตัวอุปกรณ์ป้องกันหลักแล้วเลือกใช้ตัวสำรองเป็นตัวรีเลย์ที่ทำงานแบบผกผันมากๆ

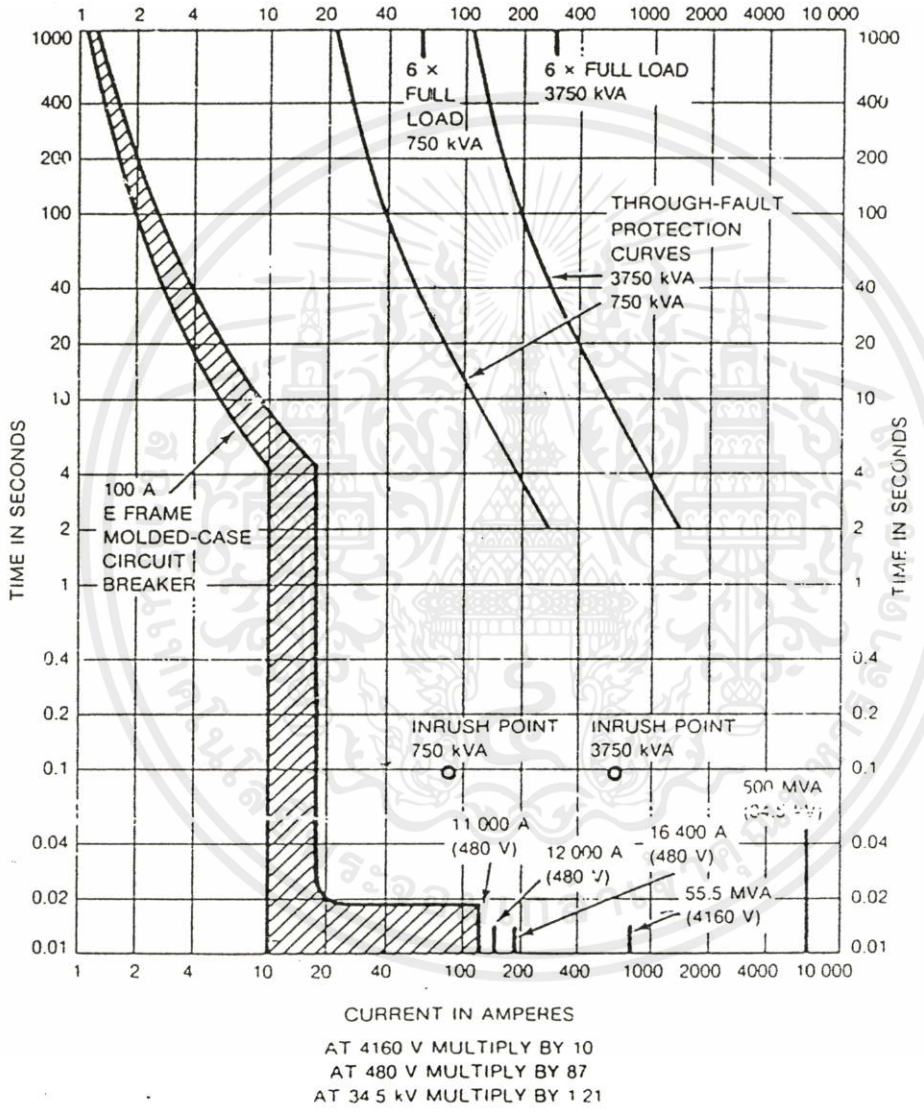
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



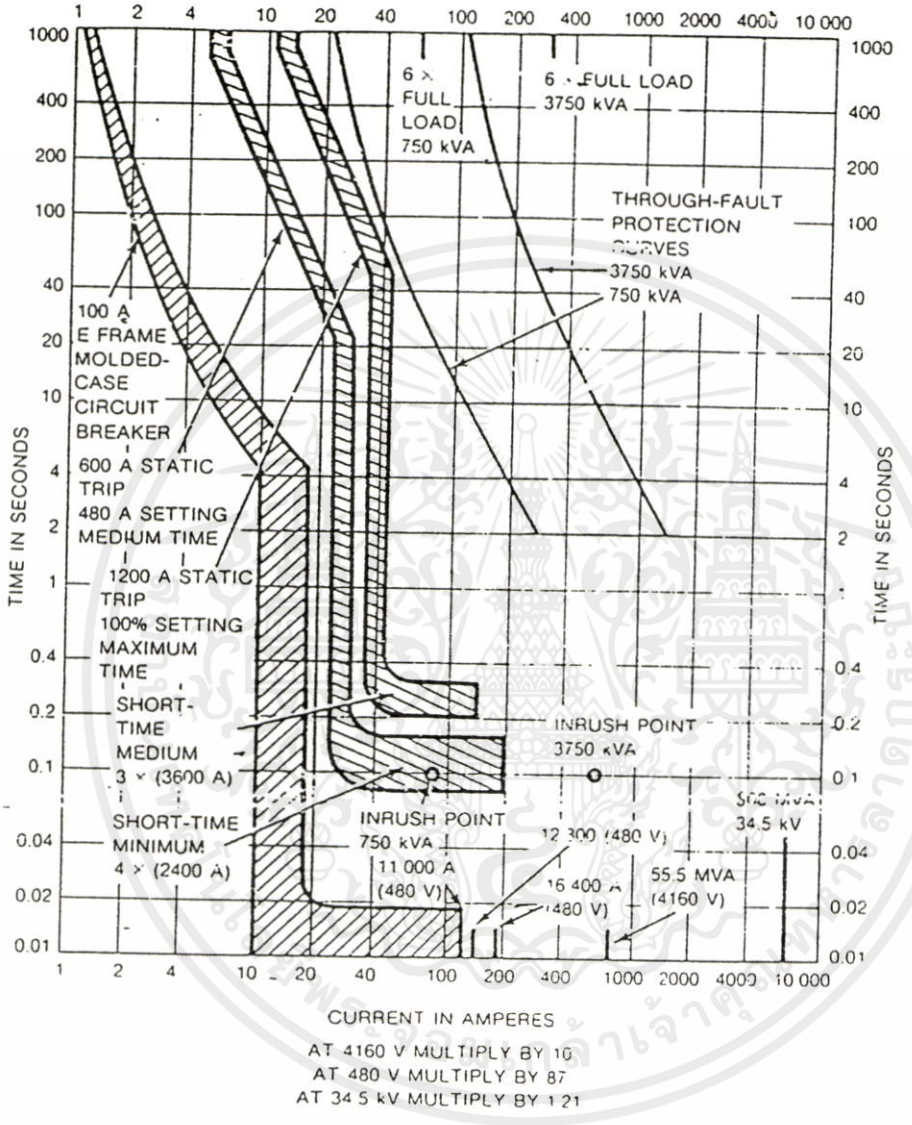
รูปที่ 4.2 วันไลน์ไดอะแกรมสำหรับตัวอย่างในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

เอกสารนี้มีไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



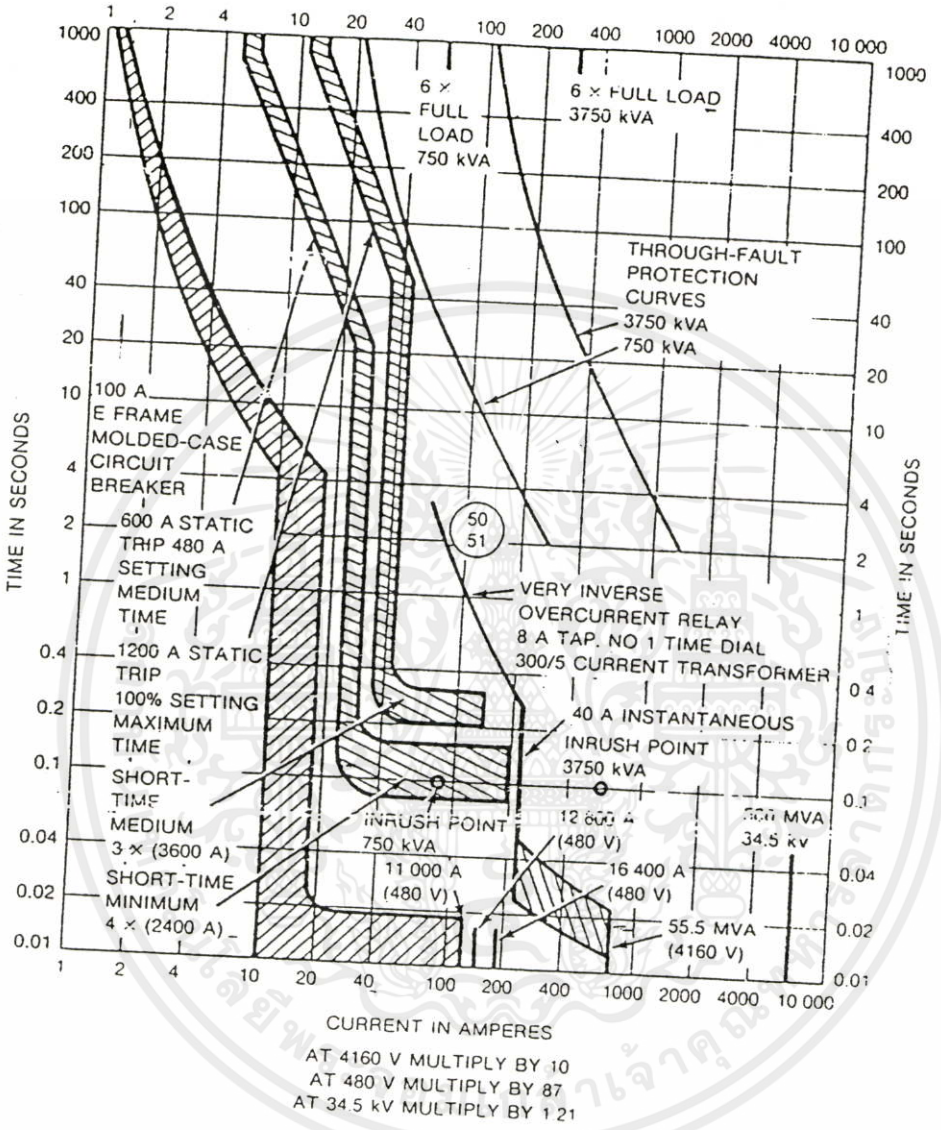
รูปที่ 4.3 ให้เห็นตำแหน่งที่อยู่คงที่ในกราฟ , กราฟการป้องกันหม้อแปลง , ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเบรกเกอร์ขนาด 100 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



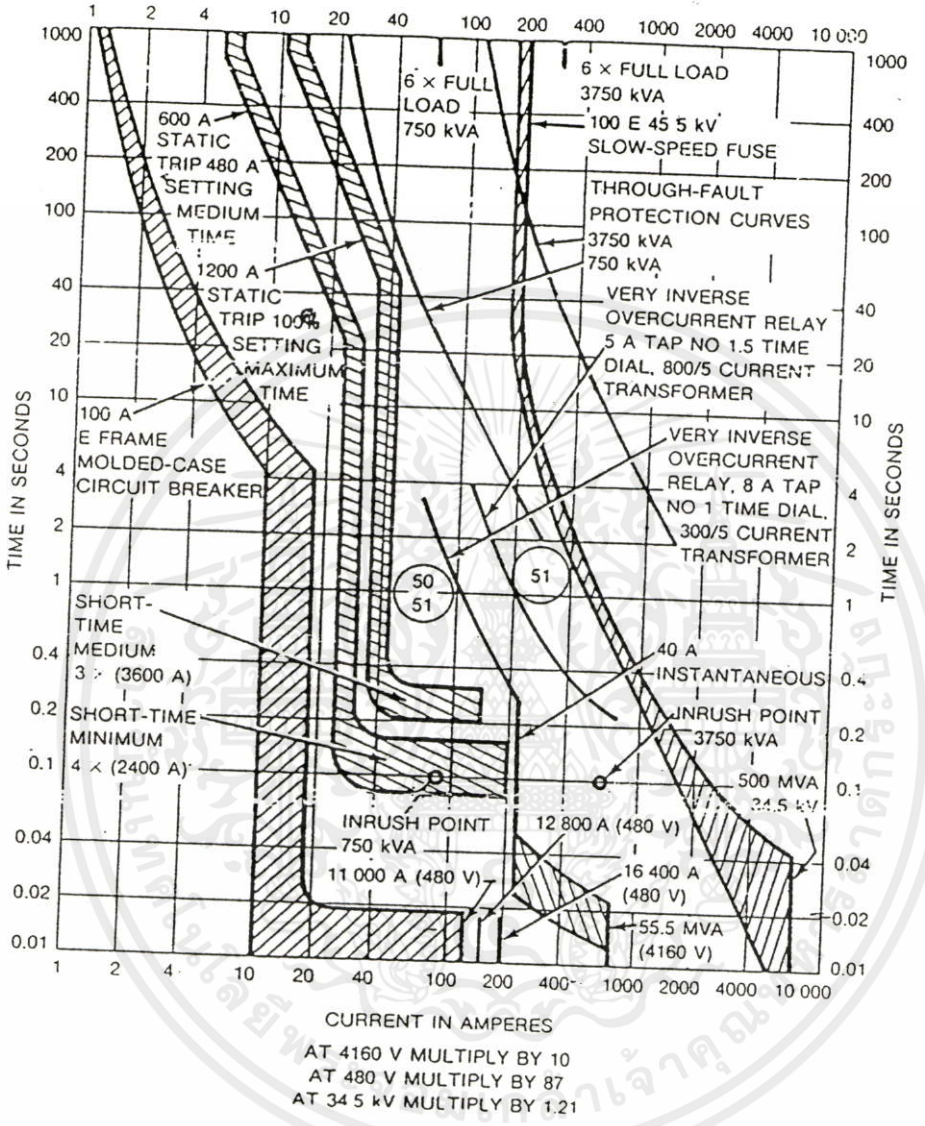
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงคุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ระดับแรงดันต่ำที่เหมาะสมกับการป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



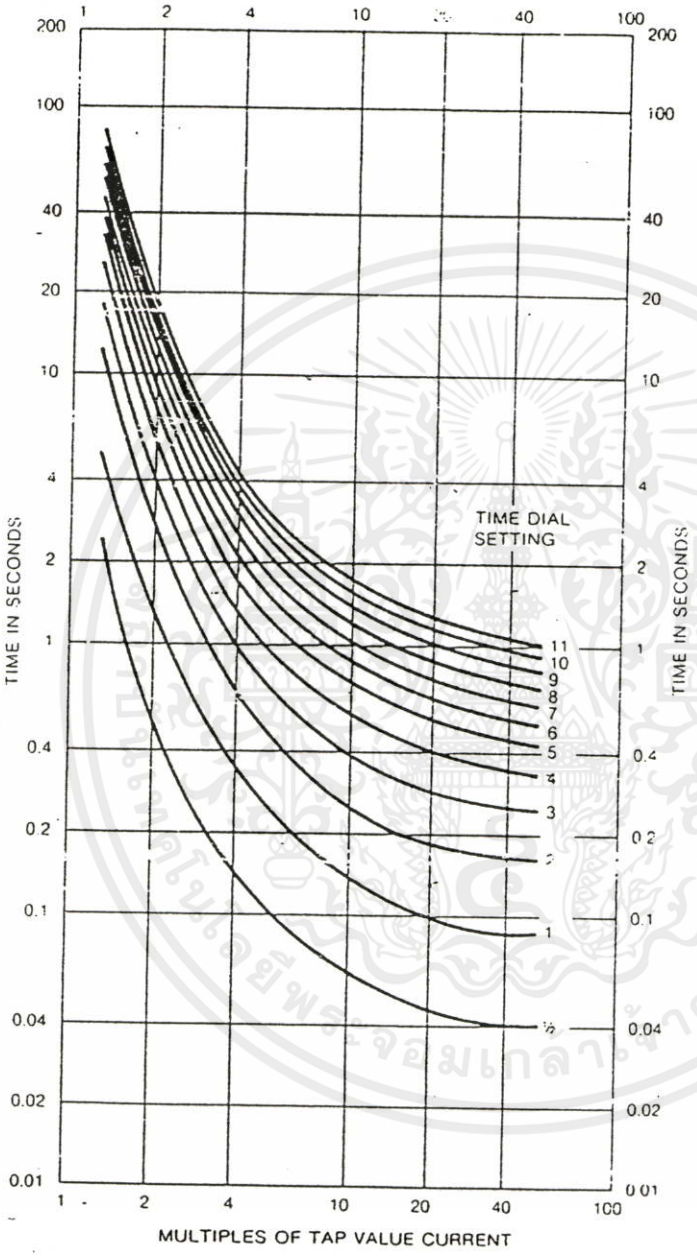
รูปที่ 4.5 กราฟคุณลักษณะของตัวรีเลย์ป้องกันกระแสเกินและการปรับตั้งค่าของการทำงานแบบฉับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการทำงานร่วมกันของตัวรีเลย์หลักที่มีหน้าที่ป้องกันกระแสเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาสำหรับรีเลย์ที่ค่าปรับตั้งต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานร่วมกัน

สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้าจะต้องประกอบไปด้วย

1. วันไลน์ไดอะแกรม จะระบุถึงชนิดและพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทุกชนิดที่ใช้ในระบบไฟฟ้า , ข้อมูลโหลด , ข้อมูลหม้อแปลง , ข้อมูลสายตัวนำ , และค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น
2. อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าชนิดพิเศษ โดยในแต่ละวงจรไฟฟ้าอาจจะมีการหาอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มเติมชนิดพิเศษอื่นๆ แต่อุปกรณ์ชนิดพิเศษที่เพิ่มเติมขึ้นจะต้องเป็นไปตามกฎข้อบังคับของ NEC, ANSI ตัวอย่างเช่น ในกรณีของหม้อแปลงอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งจะต้องพิจารณาถึงมาตรฐานของ ANSI ของหม้อแปลง เช่น กระแสแมกเนติกอินรัช (magnetic inrush)หรือกระแสสตาร์ทของมอเตอร์ เป็นต้น
3. การเลือกสเกล ในการเลือกสเกลเพื่อเป็นประโยชน์ในการเขียนคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์ป้องกันลงในแผ่นสเกลนั้น โดยปกติทางด้านซ้ายมือของกระดาษสเกลของอุปกรณ์ป้องกัน ณ ตำแหน่งนี้จะมีขนาดเล็กแต่ถ้าอยู่ทางด้านขวามือของกระดาษสเกลอุปกรณ์ป้องกันจะมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้สเกลของกระแสยังจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย
4. จุดคงที่โดยในกระดาษสเกลซึ่งเป็น log-log นั้นอุปกรณ์ป้องกันจะมีคุณสมบัติประจำตัวที่แสดงด้วยจุดที่คงที่ได้
5. การเริ่มทำการออกแบบ โดยทั่วๆ ไปจะเริ่มต้นจากอุปกรณ์ป้องกันของวงจรย่อยไล่เรื่อย ๆ ไปจนถึงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
6. คุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกัน จะต้องหาความสัมพันธ์ของระดับแรงดันไฟฟ้าเหล่านั้น เช่น หม้อแปลง 75 kVA , 480 V / 240V กระแสทางด้านแรงต่ำมีค่า 225 A ดังนั้นกระแสทางด้านแรงสูงจะมีค่า 225 x (240/480) = 112.5 A เป็นต้น
7. เลือกพิกัดและการปรับของอุปกรณ์ป้องกัน ปกติจะเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าต่ำสุดก่อน โดยอุปกรณ์ป้องกันที่มีขนาดต่ำสุดนี้ยอมให้กระแสปกติไหลผ่านแต่จะต้องทำงานเปิดวงจรเมื่อกรณีกระแสผิดปกติไหลผ่านตัวมัน

4.10 ข้อมูลที่จำเป็นที่จะใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกัน ของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ข้อมูลโหลด เช่น กระแสโหลดสูงสุดไหลในวงจร , กระแสกรณีที่เกิดขึ้นขณะสับโหลดทันที , หรือกระแสเฉียบพลัน ซึ่งกระแสนี้เป็นกรณีพิเศษที่อาจจำเป็นต้องนำมาพิจารณา
2. หม้อแปลง ข้อมูลประกอบไปด้วยพิกัด kVA , แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ , การต่อวงจรว่าเป็นแบบใด เช่น Δ-Y , Δ-Δ หรืออื่น ๆ เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ กระแสแมกนีติกอินรัช , ชนิดของหม้อแปลงว่าเป็นแบบแห้ง , น้ำมันท่วม หรือขนาดของการจ่ายโหลดเกิน
3. มอเตอร์ มีข้อมูลประกอบไปด้วย แรงม้า , กระแสพิกัด , กระแสล็อกโรเตอร์ , ค่าเซอร์วิสแฟกเตอร์(service factor) , เวลาในการสตาร์ท , ชนิดของการสตาร์ด
4. บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น พิกัด , ชนิด , การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน , การปรับแต่งพิเศษในตัวอุปกรณ์บางตัว
5. กระแสลัดวงจร ซึ่งส่วนมากจะพิจารณาถึงกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีลัดวงจรแบบ 3 เฟสและกระแสลัดวงจรควรจะทราบค่า ณ ทุก ๆ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน
6. คุณสมบัติของกระแส-เวลาของอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวจะต้องมีและสามารถเขียนลงในกระดาษกราฟชนิด log-log ได้
7. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ประกอบด้วยชนิด , บริษัทผู้ผลิต , ขนาดเฟรม , พิกัดกระแสหรือพิกัดกระแสของอุปกรณ์ตรวจสอบ , ค่าการปรับแต่งแบบหน่วงเวลานาน , เวลาช้าและแบบทันทีทันใดเป็นต้น
8. รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ประกอบด้วยชนิด , บริษัทผู้ผลิต , ค่าการปรับกระแสเปิดวงจร , ค่าหน่วงเวลา , ค่าการปรับแต่งให้ทำงานทันทีทันใด , อัตราส่วนของหม้อแปลงที่ใช้ร่วมกับรีเลย์
9. ฟิวส์ ประกอบด้วย ชนิด , บริษัทผู้ผลิต , พิกัดกระแสต่อเนื่อง
10. สายเคเบิลหรือสายตัวนำ ประกอบด้วย จำนวนตัวนำต่อเฟส , เดินในท่อหรือเดินลอยในอากาศ , ชนิดของตัวนำ (ทองแดง หรือ อะลูมิเนียม) ชนิดของฉนวน , ขนาดกระแสสูงสุด , การทนต่อกระแสลัดวงจร
11. บัสเวย์ ประกอบด้วยขนาดกระแสสูงสุด
12. แผงย่อย สวิตซ์บอร์ด ประกอบด้วย ขนาดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การออกแบบ การใช้งาน และผลการทดสอบโปรแกรม

5.1 การออกแบบ การคำนวณหากระแสลัดวงจรและการโคออดิเนชั่น

1. วาดรูปของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ (One line diagram)

2. ในวันไลน์ไดอแกรมจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ระบบไฟฟ้า (Utility System)

2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) สามารถมีหม้อแปลงเปลี่ยนแรงดันได้ 1 ระดับเท่านั้น

2.3 มอเตอร์ (Motor)

2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

2.5 ชุดสตาร์ทมอเตอร์

2.6 โหลดของระบบไฟฟ้า (Load)

2.7 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)

2.8 สาย (Line)

2.9 คาปาซิเตอร์ (Capacitor)

3. เมื่อผู้ใช้งานวาดวันไลน์ไดอแกรมเสร็จแล้ว ถ้ามีอุปกรณ์เหล่านี้คือ มอเตอร์ , เครื่องกำเนิดไฟฟ้า , ระบบไฟฟ้าและโหลดจะต้องป้อนข้อมูลลงไปให้ครบถ้วน

4. ขั้นตอนต่อไปนี้จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 กรณี

4.1 ผู้ใช้งานออกแบบเอง กรณีนี้ผู้ใช้งานต้องใส่ข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ , สาย และหม้อแปลงที่ผู้ใช้งานได้ออกแบบไว้หรือได้เลือกจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรม

4.2 ผู้ใช้งานให้โปรแกรมออกแบบให้ กรณีนี้ผู้ใช้งานไม่ต้องใส่ข้อมูลของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ , สายและหม้อแปลง เพราะเมื่อโปรแกรมรับข้อมูลของ มอเตอร์ , เครื่องกำเนิดไฟฟ้า , โหลด และระบบไฟฟ้า ที่ผู้ใช้งานป้อนเข้าไปในขั้นตอนที่ 3 โปรแกรมจะทำการคำนวณหากระแสโหลดที่พิกัด (I rate) ตามทฤษฎี เพื่อนำไปเลือกขนาดของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ สาย และหม้อแปลง จากฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรมโดยอัตโนมัติ โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ได้จะรู้เฉพาะค่าแอมป์ทริปและแอมป์เฟรม แต่ค่าอินเตอร์รัพติ้งคาปาซิตี้ (IC) ยังไม่รู้เนื่องจากต้องใช้ค่ากระแสลัดวงจรในการเลือกซึ่งอยู่ในขั้นตอนที่ 5 , สาย และหม้อแปลงจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรมโดยอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การคำนวณหากระแสลัดวงจร

โปรแกรมจะนำข้อมูลของอุปกรณ์ที่ผู้ใช้งานป้อนเข้าไปมาคำนวณตามมาตรฐาน ANSI – IEEE 242/1986 โดยวิธี Direct Method ซึ่งวิธีนี้ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 แล้ว โปรแกรมจะนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้ไปเลือกค่าอินเตอร์รัพติ้งคาปาซิตี้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งก็จะได้ข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ครบสมบูรณ์

6. การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันแบ่งเป็น 2 กรณีเช่นกัน

6.1 ผู้ใช้งานออกแบบเอง กรณีนี้ผู้ใช้งานจะต้องเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์จากที่ผู้ใช้งานได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ 4.1 ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละตัวจะมี tripping curve แสดงให้ดูเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้

6.2 ผู้ใช้งานให้โปรแกรมออกแบบให้ กรณีนี้โปรแกรมจะเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้จากฐานข้อมูลโดยอัตโนมัติ (กำหนดให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละตัวในวันไลน์ไดอแกรมเป็นของบริษัทเดียวกันเพื่อง่ายในการโคออดิเนชั่น)

5.2 วิธีการใช้โปรแกรม

1.เข้าโปรแกรม

2.หน้าจอคอมพิวเตอร์จะแสดงขึ้นมาดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วย

2.1 แถบชื่อเรื่อง (title bar) เป็นส่วนที่แสดงชื่อโปรแกรม และชื่อของไฟล์

2.2 แถบเมนู (menu bar) เป็นส่วนคำสั่งทั้งหมดมี hot key ระบุไว้ด้วย

2.3 แถบเครื่องมือ (tool bar) เป็นส่วนที่แสดงคำสั่งที่ใช้

Short circuit current เพื่อคำนวณหากระแสลัดวงจร

Coordination เพื่อแสดงการ โคออดิเนชั่น

Find equipmant ใช้ในการหากระแสโหลดที่พิกัด หาเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดสาย ,ขนาดหม้อแปลง ในกรณีที่ให้โปรแกรมออกแบบให้

Power monitor แสดงข้อมูลของกำลังในระบบทั้ง กำลังงานที่เกิดขึ้นจริง (real power) ,กำลังงานเสมือน (reactive power) , กำลังงานปรากฏ (active power) และค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แถบของอุปกรณ์ (parts bin) เป็นส่วนที่แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวาดวันไลน์ไดอะแกรม มีดังนี้

System เป็นระบบทางไฟฟ้าถูกกำหนดให้มีเพียง 1 ระบบต่อวงจร

Busbar

Generator เป็นการออกแบบเพื่อจ่ายไฟสำรอง

Motor เป็นทั้งอินดักชั่นและซิงโครนัสมอเตอร์

Circuit Breaker

Load เช่น อุปกรณ์แสงสว่าง

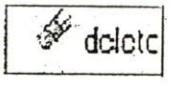
Transformer ถูกกำหนดให้มี 1 ตัว ต่อวงจร

Cable สายไฟฟ้า

Capacitor เป็นตัวที่ใช้ปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ (power factor)

Star-Delta start อุปกรณ์ที่ช่วยในการสตาร์ทมอเตอร์

Direct online start อุปกรณ์ที่ช่วยในการสตาร์ทมอเตอร์

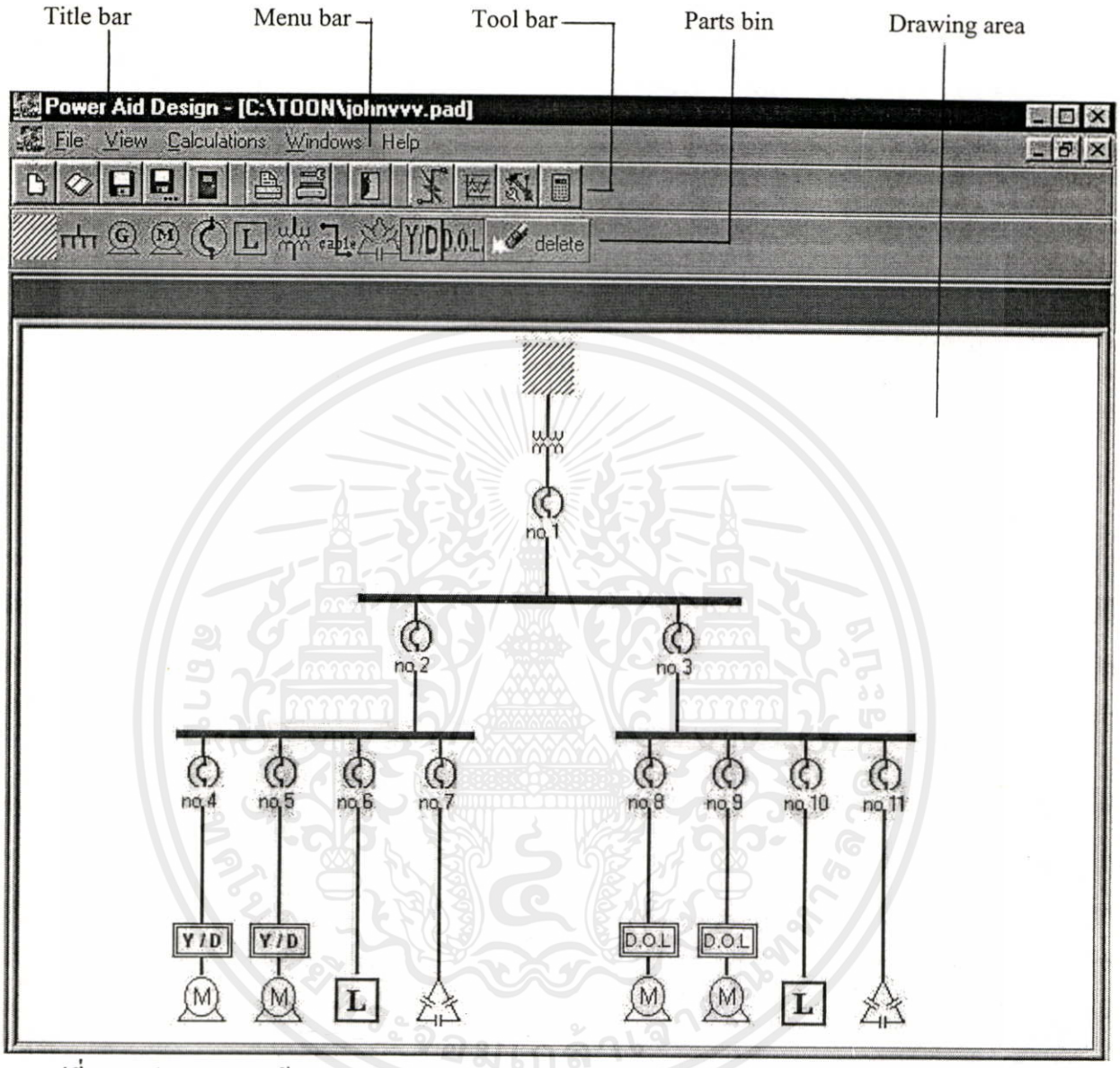


Delete ใช้ในการลบอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการ

แสดงวันที่ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อความเสนอแนะในการใช้โปรแกรม



รูปที่ 5.1 รูปแบบของหน้าจอของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นแรกต้องวาดวันไลน์ไดอะแกรมซึ่งรูปของอุปกรณ์ต่าง ๆ จะอยู่ในส่วนของ Parts bin ได้แก่

3.1 การวาดรูปทำได้โดยคลิ๊กที่ปุ่มของอุปกรณ์ที่เราต้องการจะวาดแล้วนำไปคลิ๊กในบริเวณที่ใช้วาดรูป (drawing area) ตามตำแหน่งที่เราต้องการ

3.2 จะมีอุปกรณ์ที่แตกต่างออกไปคือ สายเคเบิล โดยการวาดสายเคเบิลจะคลิ๊กที่ปุ่มเคเบิล(Cable) ในส่วนของ Parts bin แล้วคลิ๊กที่อุปกรณ์ตัวแรกในบริเวณที่ใช้วาดรูป แล้วนำไปคลิ๊กที่อุปกรณ์อีกตัวที่ต้องการเชื่อมต่อโดยเคเบิล จะได้สายเคเบิลเชื่อมต่ออุปกรณ์ 2 ชนิดที่เราต้องการ

4. ในการลบอุปกรณ์จะต้องคลิ๊กที่ปุ่ม Delete แล้วนำไปคลิ๊กที่อุปกรณ์ที่ต้องการจะลบ เมื่อทำการลบเสร็จเรียบร้อยแล้วก็ต้องคลิ๊กที่ปุ่ม Delete อีกที (เนื่องจากปุ่มนี้เป็นการทำงานแบบคลิ๊กดาวน์ คลิ๊กอัพ (Click down Click up))

5. เมื่อวาดรูปเสร็จแล้วถ้ามี มอเตอร์ , เครื่องกำเนิดไฟฟ้า , ระบบไฟฟ้า และโหลด ต้องใส่ข้อมูลของอุปกรณ์เหล่านี้ลงไปให้ครบเพื่อใช้ในการคำนวณ การใส่ข้อมูลทำได้โดยดับเบิ้ลคลิ๊กที่อุปกรณ์นั้น ๆ จะมีกรอบที่ใช้แสดงข้อมูล (Dialog box) ขึ้นมาดังตัวอย่าง เช่น กรอบที่ใช้แสดงข้อมูลของมอเตอร์ดังรูป 5.2

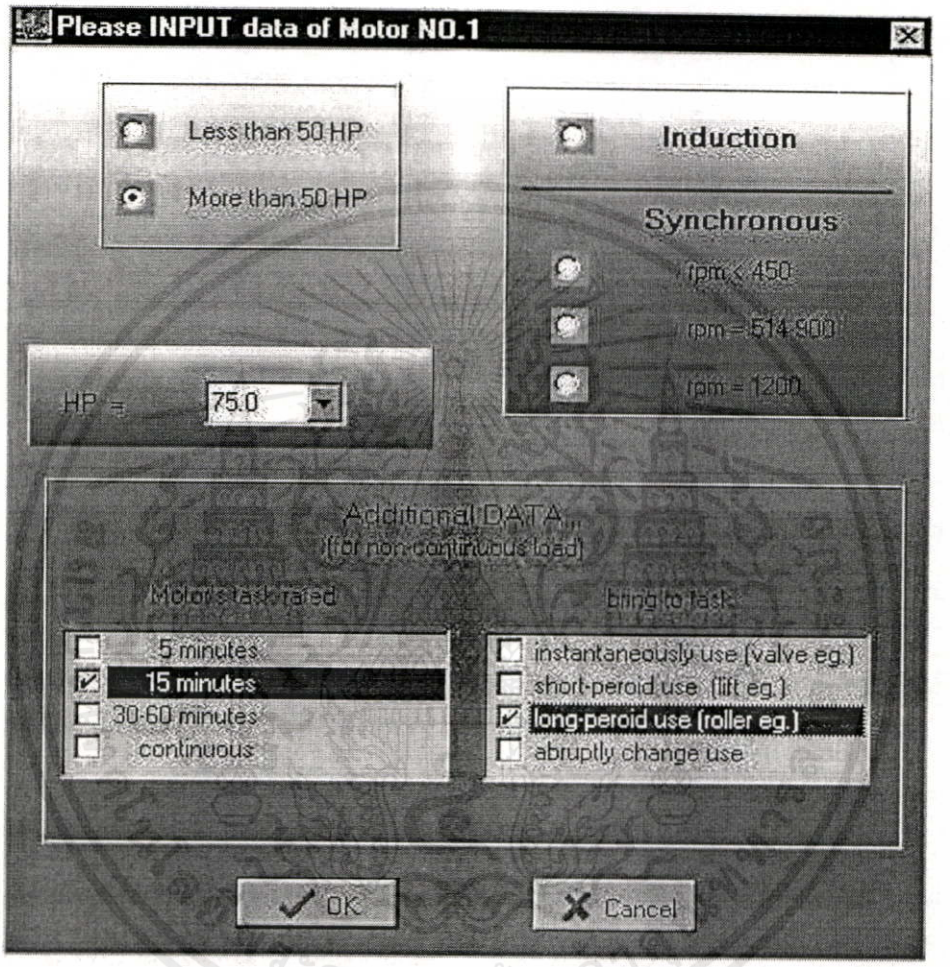
6. ในส่วนของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ , สายและหม้อแปลงจะแบ่งเป็น 2 กรณี

6.1 ผู้ใช้งานออกแบบเอง กรณีนี้ผู้ออกแบบจะต้องใส่ข้อมูลของทั้ง 3 อุปกรณ์ โดยดับเบิ้ลคลิ๊กที่ตัวอุปกรณ์ก็จะมีกรอบที่ใช้แสดงข้อมูลแสดงขึ้นมาเช่นเดียวกับมอเตอร์ , เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น มีลักษณะดังต่อไปนี้ เช่น กรอบแสดงข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังรูปที่ 5.3 ในส่วนของการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์จะแตกต่างจากอุปกรณ์อื่น ๆ คือ

1. ขั้นแรกต้องเลือกบริษัทที่ผลิตเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งในโปรแกรมมีอยู่ 2 บริษัทคือ Square D และ ABB โดยคลิ๊กไปที่ปุ่มที่ใช้เลือก
2. เมื่อคลิ๊กแล้วข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามบริษัทที่เลือกจะแสดงขึ้นมาในตารางดังรูป 5.3
3. ในการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องเลื่อนลูกศรที่อยู่หน้าเรคคอร์ดไปยังเซอร์กิจเบรกเกอร์ที่ต้องการ นอกจากนั้นยังสามารถให้โปรแกรมแสดง Triping curve ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เลือก โดยกดที่ปุ่ม View curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ผู้ใช้งานให้โปรแกรมออกแบบ กรณีนี้ผู้ใช้งานไม่ต้องใส่ข้อมูลของ เซอร์กิตเบรกเกอร์ , สายและหม้อแปลง เพราะเมื่อโปรแกรมคำนวณหาค่ากระแสโหลดที่พิกัด (กระแสโหลที่พิกัดดูได้โดยนำเคอเซอร์ไปชี้เคเบิล ณ ตำแหน่งที่ต้องการ) แล้วก็จะเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมแสดงไว้ในกรอบที่ใช้แสดงข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละชนิด ซึ่งสามารถดูพิกัดต่าง ๆ ของอุปกรณ์โดยดับเบิ้ลคลิ๊กที่ตัวอุปกรณ์นั้น ๆ

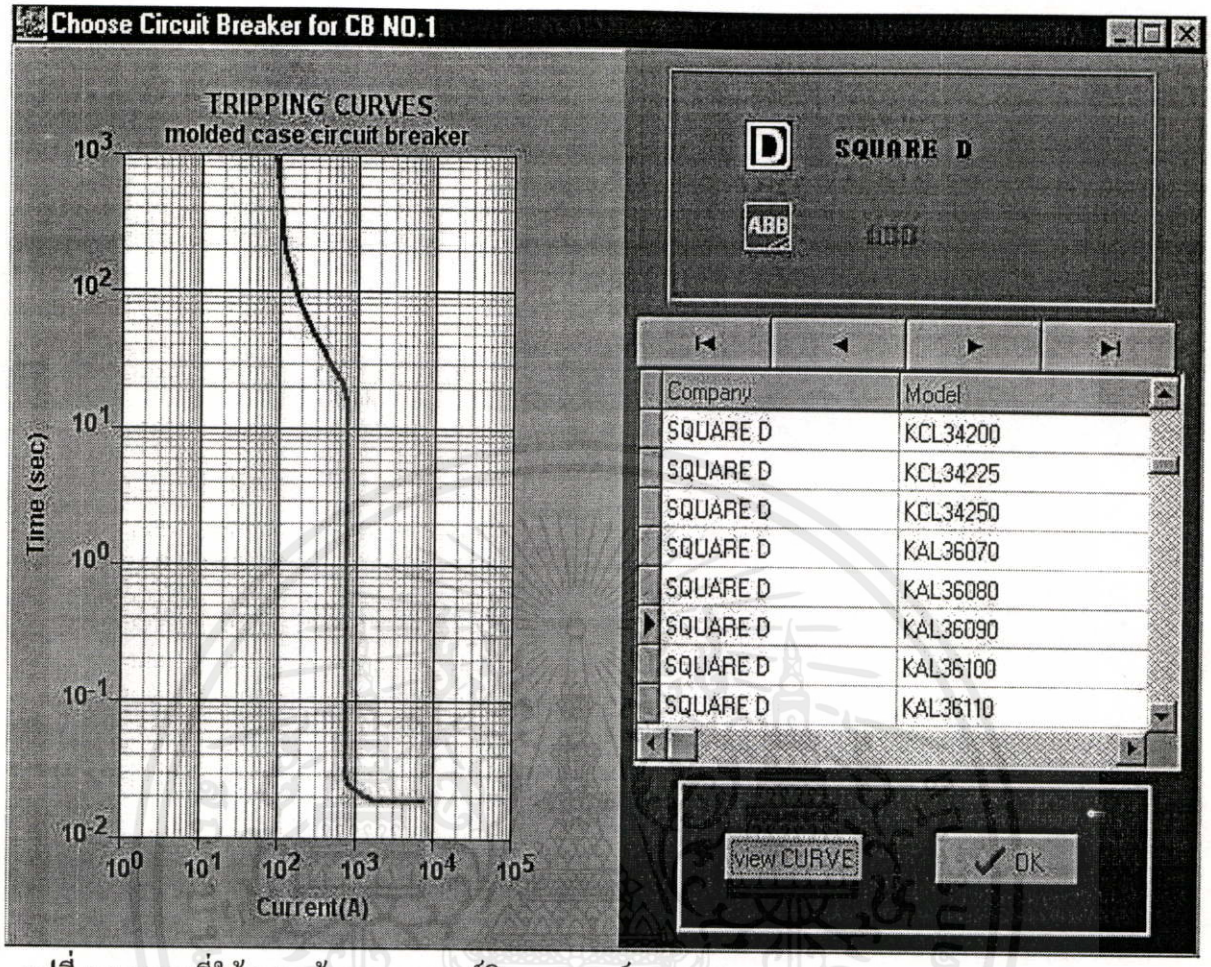


รูปที่ 5.2 กรอบแสดงข้อมูลของมอเตอร์

7. การคำนวณกระแสลัดวงจร

จะต้องคลิ๊กที่ปุ่ม short circuit calculation โดยสามารถดูได้โดยนำเคอเซอร์ไปชี้ที่เคเบิล ณ ตำแหน่งที่ต้องการรู้กระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



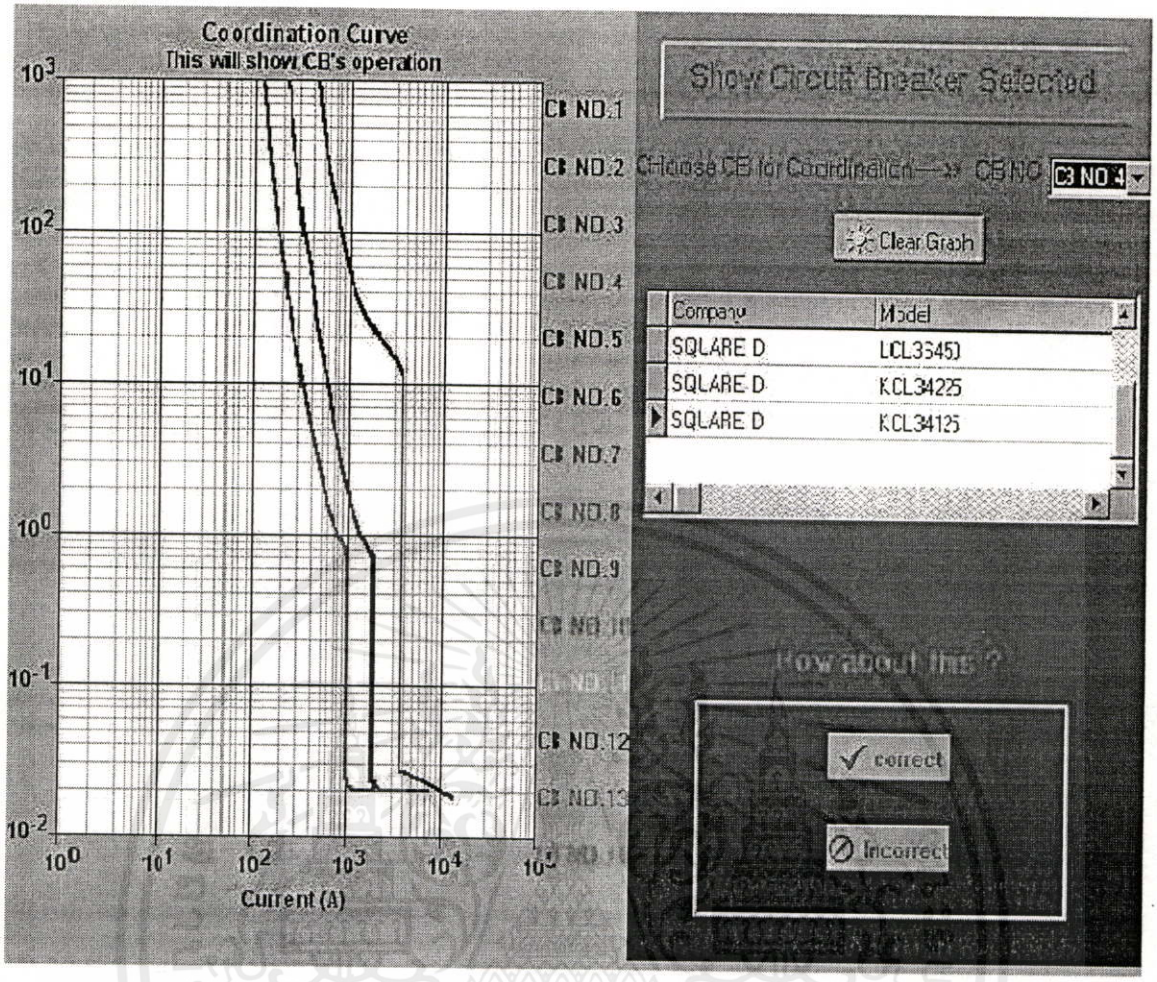
รูปที่ 5.3 กรอบที่ใช้แสดงข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์

8. การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination) แบ่งเป็น 2 กรณีเช่นกัน

8.1 กรณีที่ผู้ใช้งานออกแบบเอง ต้องกดที่ปุ่มโคออดิเนทจะขึ้นหน้าจอที่แสดงกราฟและตารางข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยต้องเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์จากที่ผู้ใช้งานได้ออกแบบไว้เป็น เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่ 1 , ตัวที่ 2 เป็นต้น ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละตัวจะมี tripping curve แสดงให้ดูเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้ ดังรูปที่ 5.4

8.2 ผู้ใช้งานให้โปรแกรมออกแบบให้ กรณีนี้โปรแกรมจะเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้จากฐานข้อมูลโดยอัตโนมัติ (กำหนดให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละตัวในวันไลน์ไดอแกรมเป็นของบริษัทเดียวกันเพื่อง่ายในการโคออดิเนชั่น) มีวิธีการเช่นเดียวกับข้อ 8.1 ในการดูการทำงานร่วมกัน

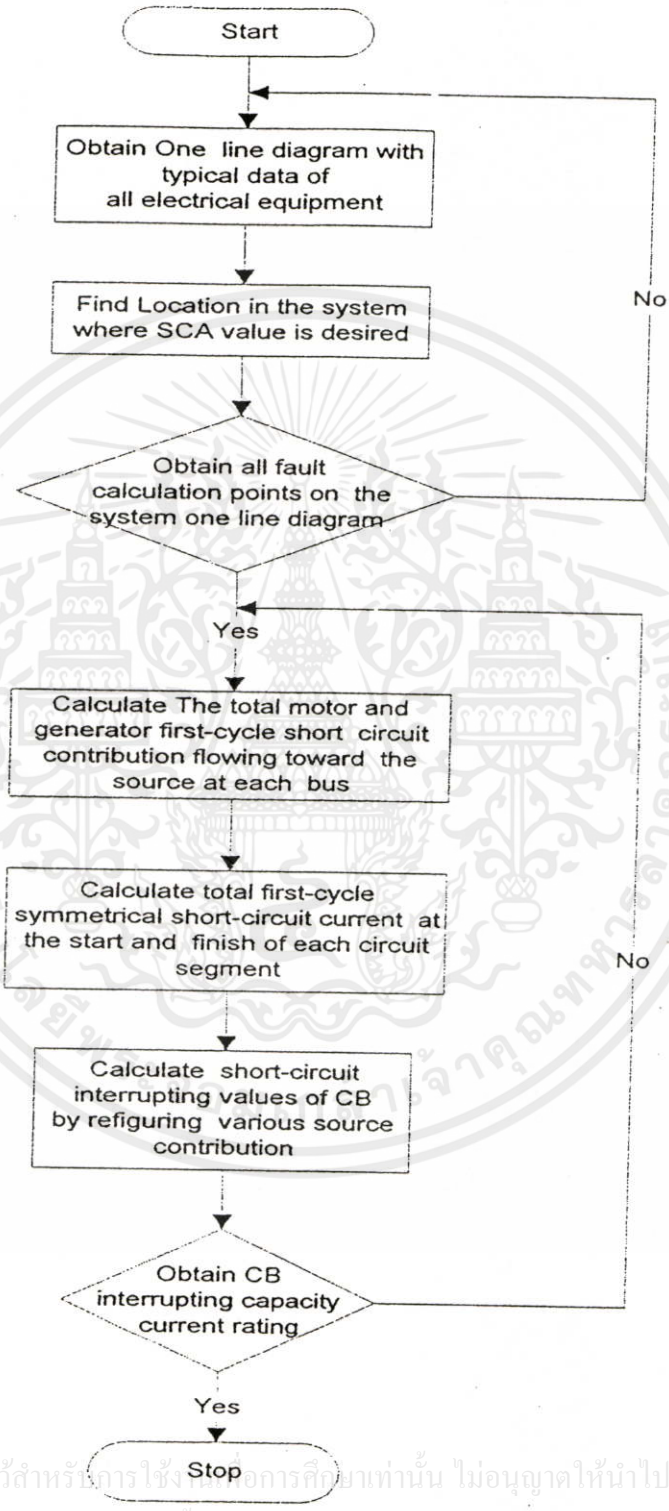
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กรอบที่ใช้แสดงข้อมูลของการโคออดิเนชั่น

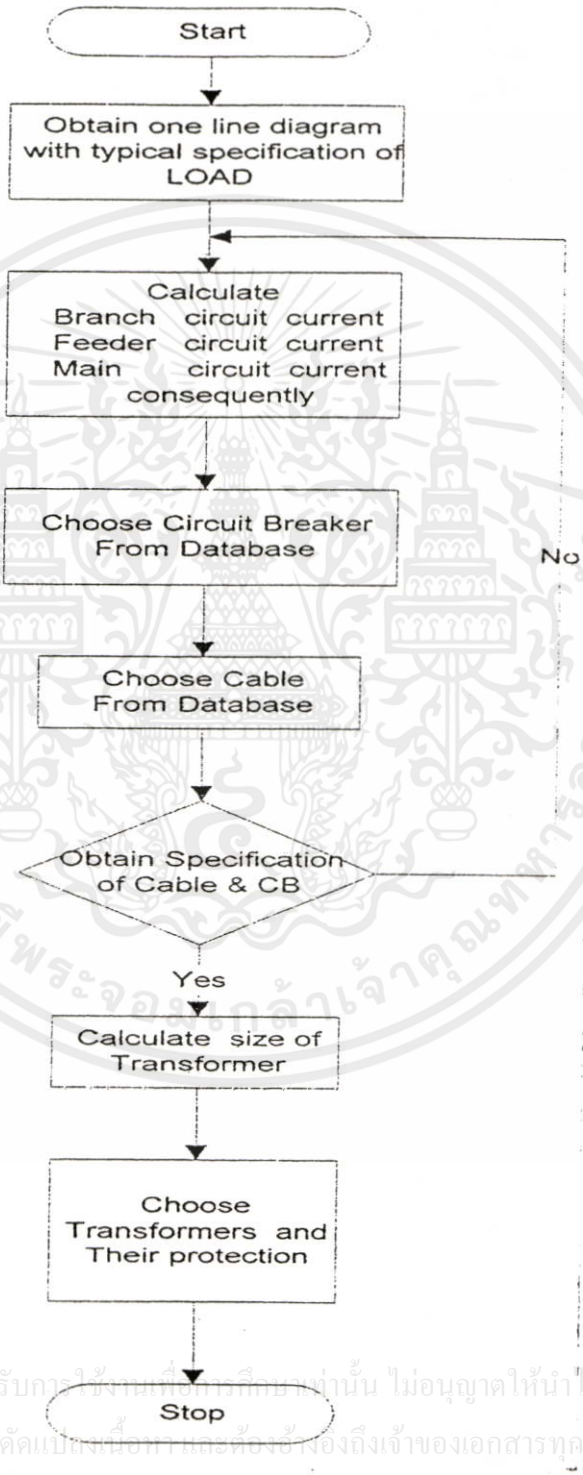
เมื่อเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์แล้วข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่เลือกจะแสดงอยู่ในตาราง โดยกราฟของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละตัวก็จะแสดงอยู่ทางด้านซ้าย (กราฟแต่ละเส้นจะมีสีกำหนดไว้ว่าเป็นของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวไหน) หลังจากนั้นก็สามารถพิจารณาการทำงานร่วมกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



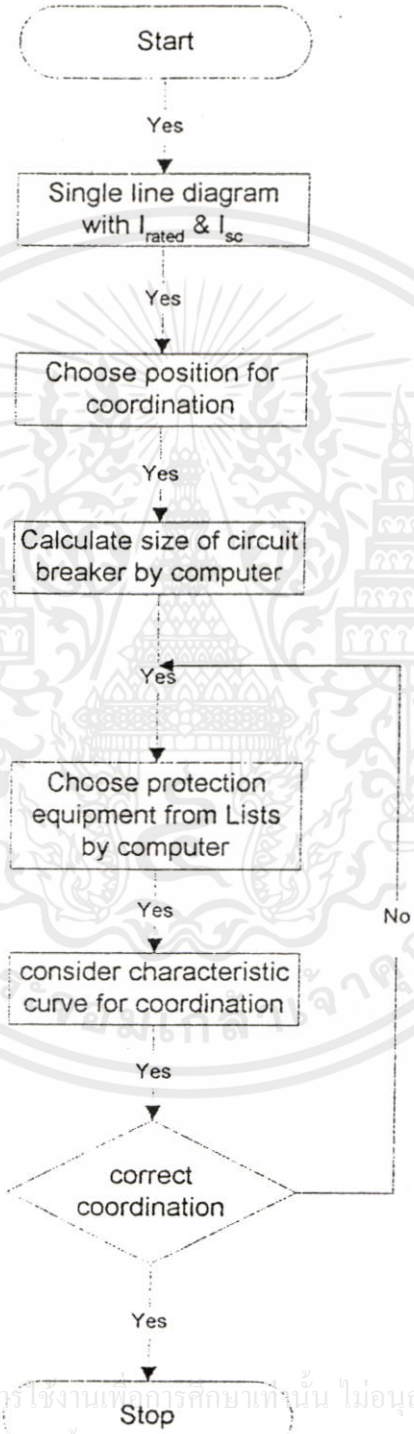
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 โฟลว์ชาร์ตแสดงกรรมวิธีหาค่ากระแสฟอลต์และหาค่าอินเตอร์รัพติ้งคาปาซิตี้ของเซอร์กิตเบรคเกอร์



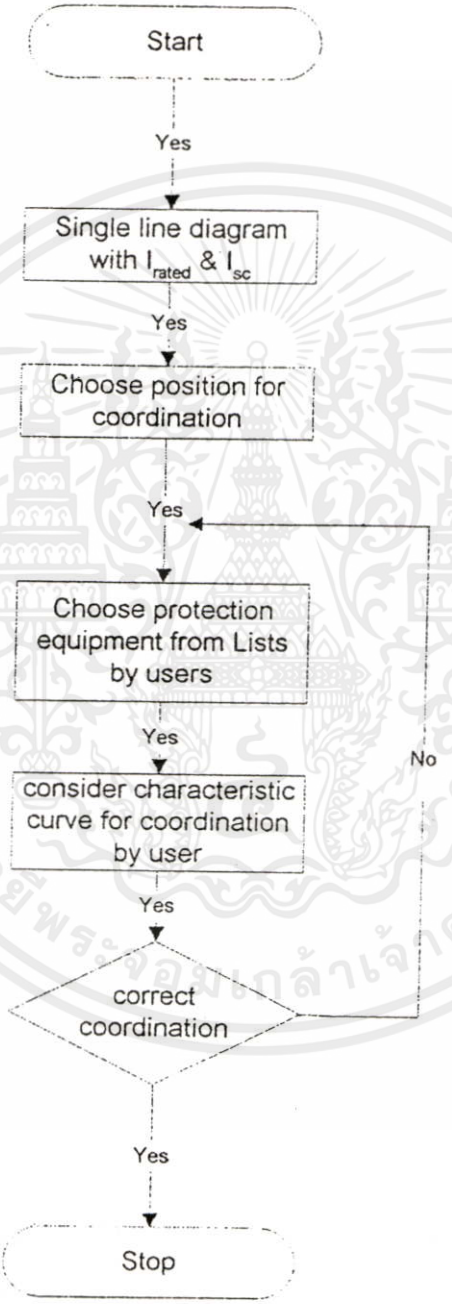
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.6 โฟลว์ชาร์ตแสดงการหาขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของบริภัณฑ์ไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7 โฟลว์ชาร์ตแสดงการโคออดิเนชั่นของอุปกรณ์ป้องกันโดยอัตโนมัติ

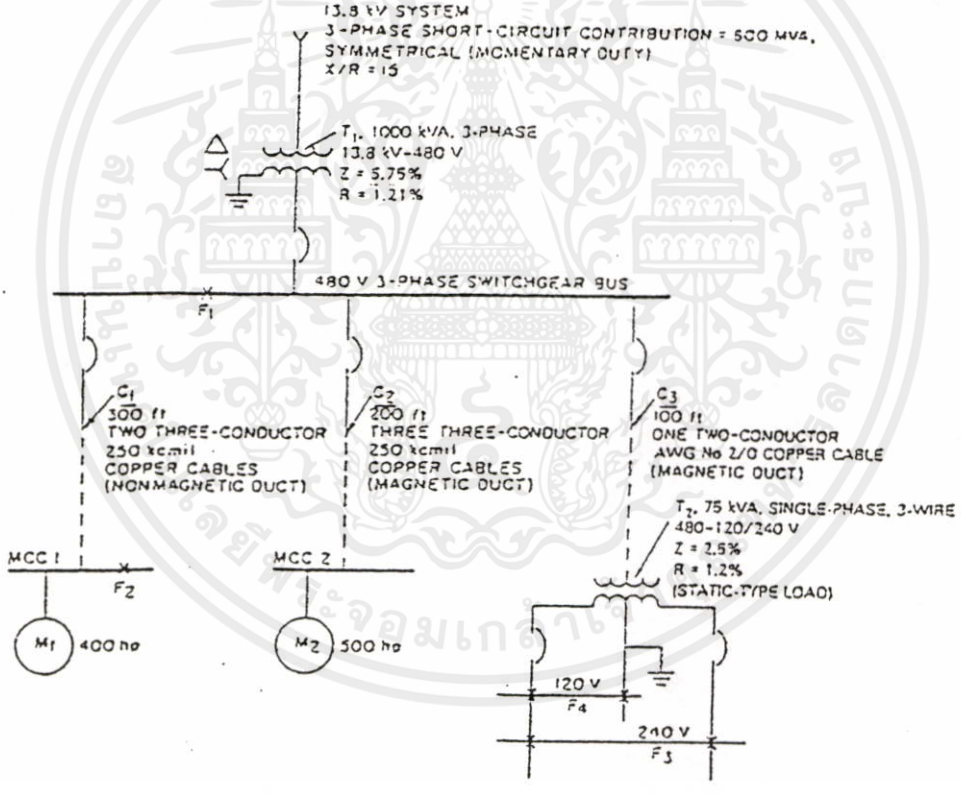


รูปที่ 5.8 โฟลว์ชาร์ตแสดงการโคออดิเนชั่นของอุปกรณ์ป้องกันผู้ใช้เลือกเอง

เอกสารนี้มีเนื้อหาที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดสอบโปรแกรม (Program Result)

หลังจากเขียนโปรแกรมเสร็จแล้วได้นำตัวอย่างการออกแบบงานในระบบไฟฟ้ากำลังมาเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยได้นำตัวอย่างมา 3 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ 1 จากเอกสารอ้างอิง IEEE std. 141-1986 (เอกสารอ้างอิงหมายเลข 14) ซึ่งมีผลการทดสอบเพื่อหาขนาดกระแสลัดวงจรตามตารางบันทึกผลที่ 5.1



NOTE: The motor horsepower indicated at MCC 1 and 2 represents a lumpted total of small induction three-phase machines ranging in size from 10-150 hp.

รูปที่ 5.9 ระบบ Low Voltage System ที่นำมาเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม

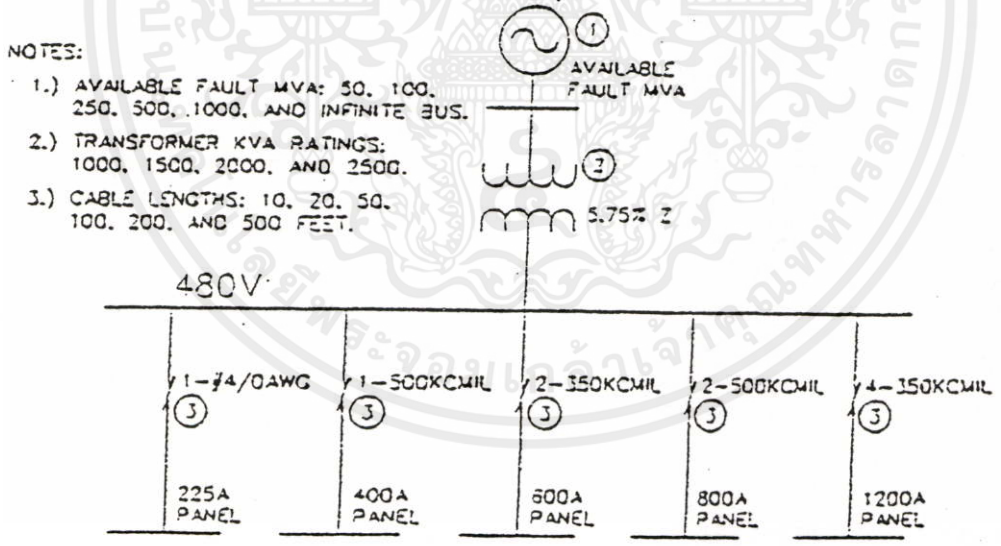
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 1

คำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

ตำแหน่งที่เกิด fault	ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตร (kA)		% ความแตกต่าง
	จาก IEEE	จากโปรแกรม	
1.ขั้วหม้อแปลง	-	20.2	-
2.F1	24.470	25.2	4.2
3.F2	16.480	16.7	1.3

ตัวอย่างที่ 2 จากเอกสารอ้างอิง IEEE Transactions on Industry Applications vol.32 No.2 ,March /April 1996 (ซึ่งเป็นตัวอย่าง Single Line Diagram ที่ใช้ในงานระบบจริง)



รูปที่ 5.10 ระบบ Sample System ที่นำมาเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

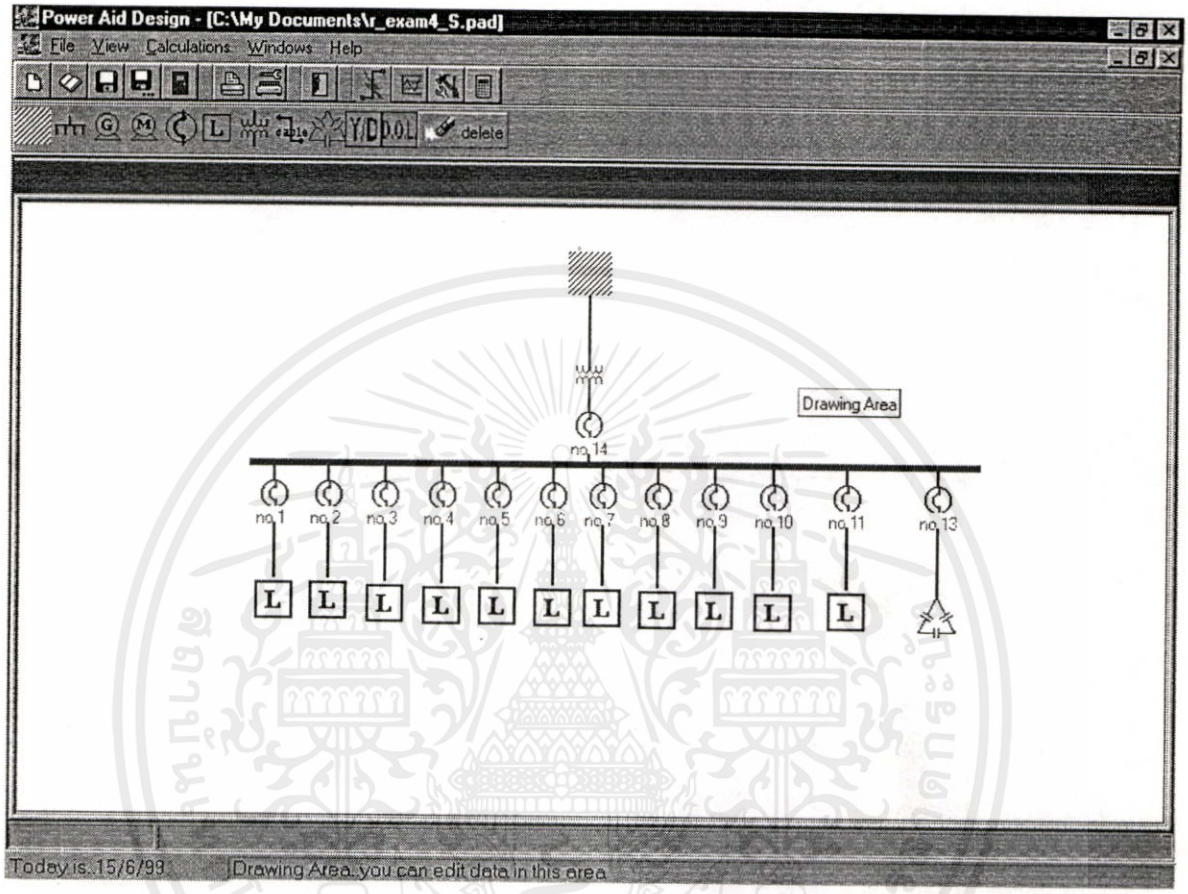
ตารางที่ 5.2 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 2

คำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

2000 kVA Transformer High Side with Infinite Bus				
บัสต่าง ๆ ที่เกิดฟอลต์	ระยะห่างของจุดฟอลต์กับหม้อแปลง	ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตร (kA)		
		จากเอกสาร	โปรแกรม	% ความแตกต่าง
Transformer Secondary	-	41.8	41.85	-
225 A.Panel (1-#4/0 AWG)	100 ft.	22.3	22.98	3.5
	200 ft.	14.7	15.0	2
400 A.Panel (1-500 kcmil)	100 ft.	26.5	27.3	3.0
	200 ft.	19.1	19.7	3.1
600 A.Panel (2-350 kcmil)	100 ft.	31.8	30.77	3.4
	200 ft.	25.2	24.2	3.9
800 A.Panel (2-500 kcmil)	100 ft.	32.6	33.43	2.4
	200 ft.	26.5	27.1	2.2
1200 A.Panel (4-350 kcmil)	100 ft.	36.3	34.93	3.8
	200 ft.	31.8	30.8	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3 จากแบบใช้งานจริงในมาตราระบบ SI ที่ออกแบบโดยผู้ออกแบบในประเทศ ซึ่งมีผลการทดสอบเปรียบเทียบขนาดอุปกรณ์ป้องกัน , ขนาดสาย , ขนาดหม้อแปลง และขนาดกระแสลัดวงจรตามตารางบันทึกผลที่ 5.3



รูปที่ 5.11 Single Line Diagram ที่วาดได้จากโปรแกรมตามตัวอย่างจากแบบใช้งานจริง ในภาคผนวก ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 3 คำนวณเปรียบเทียบขนาดสายระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการออกแบบจริง

ตำแหน่งสายป้อน	ขนาดสายของ ผู้ออกแบบจริง	ขนาดสายที่ได้จาก โปรแกรม
F1	3(3-185/95/50) SQ.MM.THW	3-500/240/120 SQ.MM.THW
F2	2(3-120/70/35) SQ.MM.THW	(3-240/120/70) SQ.MM.THW
F3	3-240/120/70 SQ.MM.THW	3-240/120/70 SQ.MM.THW
F4	2(3-185/95/50) SQ.MM.THW	(3-300/150/95) SQ.MM.THW
F5	3-240/120/70 SQ.MM.THW	3-240/120/70 SQ.MM.THW
F6	3-120/70/35 SQ.MM.THW	3-120/70/35 SQ.MM.THW
F7	3-240/120/70) SQ.MM.THW	3-240/120/70) SQ.MM.THW
F8	4-70/10 SQ.MM.THW	4-70/10 SQ.MM.THW
F9	4-95/10 SQ.MM.THW	4-95/10 SQ.MM.THW
F10	1*4-50 SQ.MM.NYY	1*4-50 SQ.MM.NYY
F11	3-50 SQ.MM.THW (EACH)	3-50 SQ.MM.THW (EACH)
F12 (SPARE)	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 3 คำนวณเปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน ค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการออกแบบจริง

ตำแหน่งสายป้อน	ขนาดอุปกรณ์ป้องกัน (CB) ผู้ออกแบบจริง	ขนาดอุปกรณ์ป้องกัน (CB) ที่ได้จากโปรแกรม
F1	3P 600AT , ≥50 kA. At 415 Volt	3P 600AT , ≥50 kA. At 415 Volt
F2	3P 300AT , ≥40 kA. At 415 Volt	3P 300AT , ≥ 35 kA. At 415 Volt
F3	3P 250AT , ≥40 kA. At 415 Volt	3P 250AT , ≥35 kA. At 415 Volt
F4	3P 400AT , ≥40 kA. At 415 Volt	3P 400AT , ≥35 kA. At 415 Volt
F5	3P 225AT , ≥25 kA. At 415 Volt	3P 225AT , ≥25 kA. At 415 Volt
F6	3P 150AT , ≥25 kA. At 415 Volt	3P 150AT , ≥25 kA. At 415 Volt
F7	3P 250AT , ≥40 kA. At 415 Volt	3P 250AT , ≥35 kA. At 415 Volt
F8	3P 100AT , ≥25 kA. At 415 Volt	3P 110AT , ≥25 kA. At 415 Volt
F9	3P 125AT , ≥25 kA. At 415 Volt	3P 125AT , ≥25 kA. At 415 Volt
F10	3P 70AT , ≥25 kA. At 415 Volt	3P 60AT , ≥25 kA. At 415 Volt
F11	3P 600AT , ≥50 kA. At 415 Volt	3P 600AT , ≥50 kA. At 415 Volt
F12 (SPARE)	3P 60AT , ≥25 kA. At 415 Volt	3P 60AT , ≥25 kA. At 415 Volt
Main CB	3P 2000AT , ≥50 kA. At 415 Volt	3P 2000AT , ≥50 kA. At 415 Volt

ตารางที่ 5.5 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 3คำนวณเปรียบเทียบขนาดของหม้อแปลงค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากการออกแบบจริง

ขนาดหม้อแปลง ผู้ออกแบบจริง	ขนาดหม้อแปลง จากโปรแกรม
800 kVA	1000 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
บทสรุปและวิจารณ์

6.1 บทสรุป

โปรแกรมที่ใช้เข้าช่วยในการออกแบบระบบไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ มีลักษณะเด่นในการให้ใช้งานได้ง่าย โดยได้ศึกษาและสอบถามจากพฤติกรรมของผู้ออกแบบหลายท่าน ซึ่งส่วนใหญ่จะเริ่มต้นจากขนาดของโหลด ในแต่ละส่วนของอาคารหรือโรงงานนั้นๆ แล้วจึงหาขนาดกระแส , ขนาดสายวงจรย่อย , อุปกรณ์ป้องกันในวงจรย่อยนั้น แล้วจึงรวมโหลดของวงจรย่อยนั้นๆเพื่อหาขนาดสายป้อน โดยส่วนใหญ่ในการออกแบบจริงการแบ่งสายป้อนมักจะแบ่งตามพื้นที่ที่โหลดนั้นอยู่ ไม่ว่าจะเป็นห้องเดียวกันหรือชั้นเดียวกัน ในแต่ละประเภทของอาคาร หลังจากได้สายป้อนในแต่ละเส้นแล้ว จึงนำค่าทั้งหมดมารวมเพื่อหาสายป้อนหลักและหาขนาดของหม้อแปลง โดยการใช้อุปกรณ์ป้องกันหลัก(MAIN CIRCUIT BREAKER) มักจะให้มีขนาดพิกัดกระแสไม่เกินจากที่พิกัดหม้อแปลงลูกนั้นๆ แต่ในบางกรณีที่ผู้ออกแบบในบ้านเรามักจะให้เผื่อขนาดกระแสเพื่อรองรับการใช้หม้อแปลงเกินพิกัดในอนาคต ซึ่งมักจะปรากฏให้เห็นในโรงงานเก่าๆในเขตปริมณฑล

การวิเคราะห์หากระแสลัดวงจรนั้น จะพิจารณาจากกระแสผิดปกติแบบ 3 เฟสสมมาตร (THREEPHASE SYMMETRICAL FAULT) โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ANSI/IEEE 141-1986 ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป หลังจากได้ขนาดของกระแสลัดวงจรแล้ว การนำค่าดังกล่าวกลับไปเทียบกับค่า INTERRUPTING CAPACITY (IC) ของ เซอร์กิตเบรคเกอร์ ที่ได้เลือกตามขนาดพิกัดกระแสมาแล้วนั้น ส่วนใหญ่จะได้รุ่นที่พอเหมาะ เนื่องจากการพัฒนาและวิจัยของโรงงานผู้ผลิต ซึ่งมีการผลิตมายาวนานและทราบถึงปัญหาในการเลือกอุปกรณ์ ให้ได้ทั้งขนาดพิกัดกระแสและค่า IC ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับโหลดขนาดเล็กซึ่งไปต่ออยู่กับ บัสหลัก ทำให้ต้องมีค่า IC ที่สูง แต่กลับมีพิกัดกระแสต่ำ ซึ่งปัจจุบันทางผู้ผลิตได้ผลิตอุปกรณ์ดังกล่าวมารองรับความต้องการของผู้ใช้เกือบทุกยี่ห้อ

ส่วนการวิเคราะห์ CHARACTERISTIC CURVE ของอุปกรณ์ป้องกันเพื่อให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น โปรแกรมมีทางเลือกให้ 2 วิธี คือกรณีผู้ใช้เลือกอุปกรณ์ ป้องกันทางไฟฟ้าเองและทำการพิจารณา กราฟของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าและกรณีที่ 2 โปรแกรมทำการเลือกขนาดอุปกรณ์ให้โดยโปรแกรมจะพิจารณาไม่ให้กราฟทับกัน เพื่อให้เกิดการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันนทางไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ความสะดวกที่ได้เพิ่มขึ้นจากการพัฒนาการจัดทำรูปกราฟของโรงงานผู้ผลิตที่ทำให้อัตราส่วน SCALE ในกราฟทุกอันเป็นค่าเดียวกันทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถทำงานง่ายขึ้นไม่สับสนและพะวงตัวประกอบการคูณค่าที่ได้เพื่อให้ได้อัตราส่วนเดียวกันในตาราง

หลังจากการออกแบบเรียบร้อย การบันทึกข้อมูลไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้หรือแก้ไขภายหลังทำได้อย่างสะดวกมาก และยังได้เตรียมฐานข้อมูลของอุปกรณ์ซึ่งในโปรแกรมนี้ได้เตรียมไว้เพียง 2 ยี่ห้อ และหากมีการใช้งานจริงข้อมูลที่จะทำเพิ่มขึ้นย่อมเป็นไปได้ที่จะเพิ่มความหลากหลายของชนิดและยี่ห้อ

จากการทดลองใช้จริงของโปรแกรมในการนำค่าโหลดในแบบเก่าที่ได้ออกแบบไปแล้วค่าของพิกัดกระแสของโหลดเป็นเรื่องที่ง่ายในการเปรียบเทียบ และได้เท่ากันทุกครั้ง ในส่วนการเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานในวารสาร IEEE 141-1986 ทุกค่ามีค่าใกล้เคียง โดยมีความแตกต่างไม่เกิน 5% ซึ่งสาเหตุเกิดจากการแปลงค่าพื้นที่หน้าตัดสายที่อยู่ในหน่วย kcmil ในวารสารเป็น sqmm. ตามระบบที่บ้านเรานิยมใช้กันอยู่ และความยาวสายที่ในตัวอย่างเป็นฟุต ซึ่งต้องแปลงเป็นเมตรอีกเช่นกัน โดยตัวประกอบ 2 ตัวดังกล่าวกับค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงค่า IMPEDANCE และREACTANCE ของสายซึ่งใช้ตารางของ PHELDODGE ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับตัวอย่างในวารสาร

ส่วนการเปรียบเทียบกับตัวอย่างจริงที่ใช้ค่าในมาตรฐาน SI ที่นิยมใช้ในบ้านเรา โดยได้รับแบบระบบไฟฟ้าจากบริษัทผู้ออกแบบแห่งหนึ่ง มาเป็นต้นแบบ การคำนวณค่าที่ได้ออกมาใกล้เคียงมากกว่าที่ต้องแปลงค่าหน่วยต่างๆ ตั้งแต่การเลือกขนาดสายป้อนซึ่งขนาดที่ได้ในสายป้อนที่ใช้สายเพียงชุดเดียวจะตรงกันตลอด ส่วนสายป้อนที่ใช้ขนาดสายป้อนใหญ่ผู้ออกแบบจริงใช้วิธีการแบ่งชุดสายโดยใช้ขนาดสายที่เล็กลงตามอัตราส่วนกระแส ส่วนโปรแกรมใช้ขนาดสายที่ใหญ่ตามขนาดกระแสเพียงชุดเดียว ซึ่งหากมองถึงความสะดวกในการทำงานจริงต้องยอมรับว่าการใช้ประสพการณ์เข้าช่วยออกแบบมีผลอย่างมาก โดยมองได้จากเหตุดังกล่าว หากใช้ขนาดสายที่ใหญ่เกินเพียงเส้นเดียวจะเกิดปัญหาการเข้าสายไปยังอุปกรณ์ป้องกันที่มีขนาดช่องรับสายที่จำกัด ในส่วนขนาดอุปกรณ์ป้องกันที่หาได้จากโปรแกรมมีเพียงสายป้อนที่ 8 และ 10 เท่านั้นที่มีขนาดแตกต่างแต่ก็เพียงเล็กน้อยซึ่งสามารถอนุโลมให้อยู่ในพิกัดเดียวกันได้ จากการวิเคราะห์สาเหตุที่ได้ค่าดังกล่าวเนื่องจากการคำนวณค่ากระแสตามพิกัดไม่ซับซ้อน ทำให้ค่าที่ได้ออกมาในลักษณะเดียวกัน การหาค่ากระแสลัดวงจรของโปรแกรมสามารถหาค่าได้ใกล้เคียงกับในแบบจริง ถึงแม้ว่าจะต้องประมาณความยาวของสายป้อนเองเนื่องจากไม่มีระบุในแบบ แต่จากค่ากระแสลัดวงจรที่นำมาเลือกขนาด IC ของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดอยู่ในพิกัดเดียวกัน แต่ที่แตกต่างเนื่องจากฐานข้อมูลในโปรแกรมมีรุ่นและขนาดไม่ตรงกับที่ผู้ออกแบบใช้จึงมีความแตกต่างบ้างในบางส่วนซึ่งยอมรับได้

หลังจากได้อุปกรณ์ป้องกันครบได้ตรวจสอบขนาดหม้อแปลงที่ได้จากโปรแกรมใหญ่กว่าของผู้ออกแบบจริงอยู่ประมาณ 20% แต่สังเกตุจากค่า DUTY FACTOR = 0.78 ซึ่งหากใช้ค่าดังกล่าวคูณเข้ากับขนาดที่ได้จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ 800 kVA จะเห็นได้ว่าค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีความใกล้เคียงกับการออกแบบจริงเพียงแต่ยังขาดรายละเอียดที่เป็นการนำประสพการณ์ของผู้ออกแบบเข้าผสมผสานเพิ่มเติม ซึ่งจะเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจทำการค้นคว้าเพิ่มเติมต่อไปได้ในอนาคต

6.2 วิจารณ์และเสนอแนะ

6.2.1 โปรแกรมวิเคราะห์เฉพาะระบบที่มีหม้อแปลงเพียงตัวเดียว โดยสามารถบอกระดับแรงดันด้านเซ็คคันดารีได้หลายค่า

6.2.2 การออกแบบควรมีการแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ ซึ่งพิจารณาได้ง่ายโดยดู CHARACTERISTIC CURVE ไม่ให้ทับกัน

6.2.3 การทราบพิกัดโหลดแต่ละชนิดสมควรรู้ค่า POWER FACTOR , DUTY FACTOR เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการออกแบบ หากไม่ทราบมักจะอยู่ในวิจารณญาณของผู้ออกแบบ

6.2.4 เนื่องจากการเขียนโปรแกรมเป็นการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานนั้นๆ โปรแกรมดังกล่าวยังคงเป็นไปได้ที่จะขาดส่วนต่างๆตามแต่ผู้ใช้จริงหรือผู้ศึกษาจะมีความคิดเห็น การเพิ่มเติมหรือเปลี่ยนแปลงสามารถทำได้ง่ายโดยการเพิ่มหรือลด หน้าต่างการทำงาน รวมถึงฐานข้อมูล สูตรการคำนวณลงไปในโปรแกรม แต่ด้วยขอบเขตของโครงงานผู้เขียนจึงขอจำกัดขอบเขตของงานไว้ในระดับนี้ โดยโปรแกรมดังกล่าวจะเป็นแนวทางให้แก่ผู้สนใจในการศึกษาและพัฒนาให้มีการใช้งานที่หลากหลายสมบูรณ์ยิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] การไฟฟ้านครหลวง , **คู่มือการติดตั้งสายเคเบิล** , กฟน. 2538

[2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค , **คู่มืออบรมหลักสูตรสวิตย์เกียร์ 1** , กฟภ. 2524

[3] ชำนาญ ห่อเกียรติ , **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง** , กรุงเทพ , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2532

[4] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์,การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าแรงต่ำ,**สมาคมช่างเหมาไฟฟ้าไทย** , กรกฎาคม 2537

[5] สมาคมช่างเหมาไฟฟ้าและเครื่องกลไทย,**การออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าตามกฎการเดินสายของการไฟฟ้านครหลวง**,กรกฎาคม 2537

[6] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมป์ , **มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย** , พฤศจิกายน 2540

[7] ศุลี บรรจงจิตร,**หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง**, บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด ,2540.

[8] ศุลี บรรจงจิตร ,**อุปกรณ์และการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้า** , บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2539

[9] Alberto Berizzi,Stefano Massucco,Andrea Silvestri, and DarIo Zaninelli . 1994 "Short Circuit current Calculation : A Comparison of IEC and ANSI standard Using Dynamic Simulation as Reference" : **IEEE Transactions on Industry Application.** Vol 30 , No.4 ,July/August 1994.

[10] EGAT , **Protective relay and practice.**

[11] FUJI 1992 , **Characteristic Curve of Switchgear**

[12] IEC 1988, IEC Technical Committee , **IEC 909-1**

[13] IEC 1988, IEC Technical Committee , **IEC 909-2**

[14] IEEE 1986 , **IEEE Recommended practice for electric power distribution for Industrial plants**, (IEEE Std 141-1986) **IEEE Red book**

[15] IEEE 1986 ,**IEEE Recommended practice for protection and coordination of Industrial and commercial power system** , (IEEE Std 242-1986) **IEEE Buff book**

[16] IRWIN LAZAR 1980, **Electrical systems analysis and design for Industrial plants** , Mcgraw-Hill book company

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] Merlin Gerlin 1995 , **Characteristic curve of circuit breaker**

[18] NEC 1996 , **National Electric Code reference book**

[19] Phelps dodge 1992 , **Phelps Dodge's Design Manual on Electrical Conductor for Interior Wiring** , first edItion

[20] Siemens 1979 , **Electrical Installation handbook** ,

[21] Siemens 1984 , **Low-Voltage handbook**

[22] Siemens , **Overload-and Short-circuit protection in low-voltage installation**

[23] Square D 1985 , **All about trip curve** .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

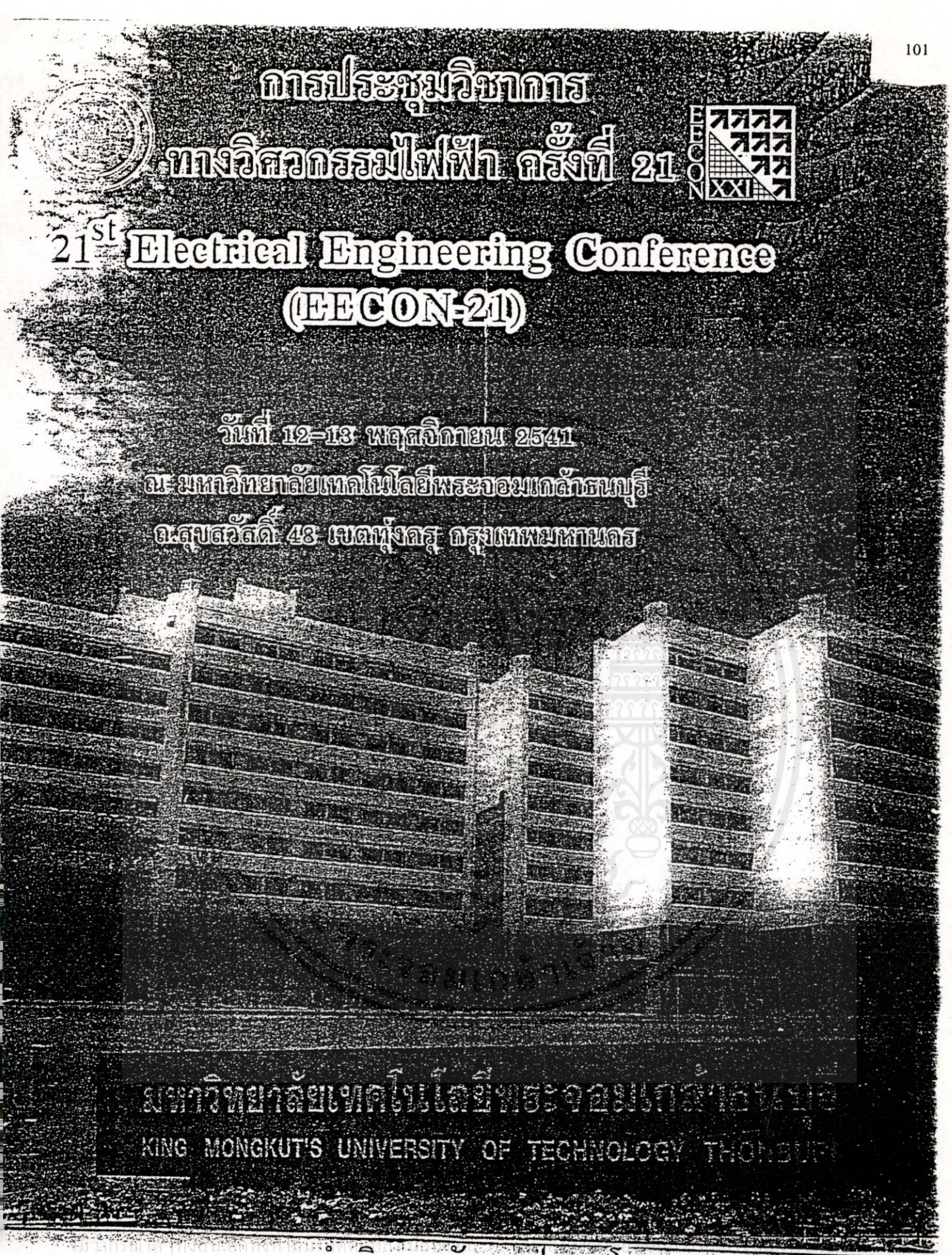
บทความทางวิชาการ เรื่อง

" การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า"

"CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT CALCULATION AND COORDINATE OF PROTECTIVE DEVICES IN DISTRIBUTION SYSTEM"

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21
ณ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

Short Circuit Current Calculation and Coordination of Protective Devices in Distribution System By Computer Program

ชาย ชมภูอินไหว สุชาติ มโนมยางกูล ศุลี บรรจงจิตร
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ 10520
โทร (02) 7372500-47 ต่อ 3057 , 2619 โทรสาร (02) 3267985 Email : kcchai@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยในงานออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังในระดับจำหน่าย โดยทำการวิเคราะห์กระแสโหลดและกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในบัสบาร์และสายป้อนในตำแหน่งต่าง ๆ ในวันไลน์ไดอะแกรม แล้วนำข้อมูลการลัดวงจรที่ได้เป็นอุปกรณ์ในการตัดสินใจเลือกชนิด และ ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า โดยสามารถแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันแบบที่เป็นผู้ใช้เลือกเอง และทำงานแบบอัตโนมัติ เพื่อให้การออกแบบงานระบบทำได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องและ มีความปลอดภัย

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองสร้างวันไลน์ไดอะแกรมแล้วคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้ IEEE Std.141-1986 เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการหาค่าการลัดวงจร ผลที่ได้จึง มีความน่าเชื่อถือ โปรแกรมมีเครื่องมือนำเสนอรายงานเป็นระบบรูปภาพที่ชัดเจนเข้าใจง่าย และนำระบบฐานข้อมูลมาใช้ในการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน ทำให้สะดวกต่อการเพิ่มเติม แก้ไข ชนิดอุปกรณ์ไฟฟ้ารุ่นใหม่ โปรแกรมนี้จึงเป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้ออกแบบงานระบบไฟฟ้า

Abstract

This article presents about the developement of the computer program that use to analyze short circuit current and provide the designer more convenient to design , plan , and select the suitable size of protective devices and also show their coordination. So the designed system will have more safety and more reliaability. The program can simulate the one line diagram of power system and use IEEE Std. 141-1986 for reference to calculate the short circuit current , so the result quite reasonable . There is also the tool for generate the report from the result . By working on windows system it can show graphics that easy to understand and learn . With the database of program , user can both add , edit the new model of the protective devices . So it can say that this software quite useful for the designer.

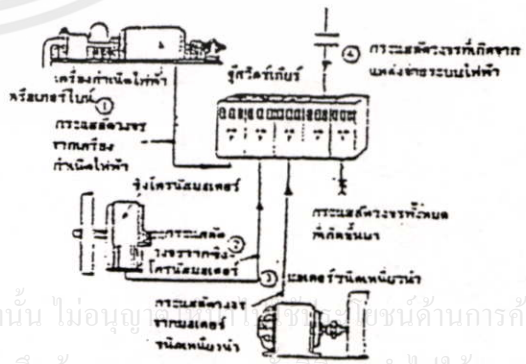
1.บทนำ

ในการวางแผนออกแบบระบบไฟฟ้า สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงคือความปลอดภัยของผู้ใช้ ทั้งในภาวะงานปกติ และ ภาวะเกิดการ เกิดการลัดวงจร เพราะเมื่อเกิดการลัดวงจรจะเกิดกระแสขนาดสูงมาก ซึ่งอาจมีผลของแรงทางกลทำให้บัสบาร์หลุดจากจุดจับยึด หรืออาจเกิดอันตรายทางความร้อนในรูปของ (I^2R) ดังนั้นผู้ออกแบบควรต้องทราบค่าการลัดวงจรที่อาจจะเกิดขึ้นในตำแหน่ง ต่าง ๆ ของระบบเพื่อจะได้พิจารณานำข้อมูลการลัดวงจรดังกล่าวไปใช้ในการเลือกพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าได้เหมาะสม ระบบที่ออกแบบได้ ก็จะมีความปลอดภัย และคุ้มค่า กับค่าใช้จ่ายมากที่สุด

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การคำนวณกระแสลัดวงจร

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า ความรุนแรงของกระแสลัดวงจร จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Source) ต่าง ๆ ในระบบ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรในระบบจะประกอบด้วย 1.เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2.มอเตอร์ซิงโครนัส 3.มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 4.แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้า



รูปที่ 1 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรในระบบ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE Std.141-1986 จะเป็นไปตามสมการ

- กรณีลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุลย์

$$I_{(3\phi)} = E / X_1 \quad \ldots\ldots(1)$$

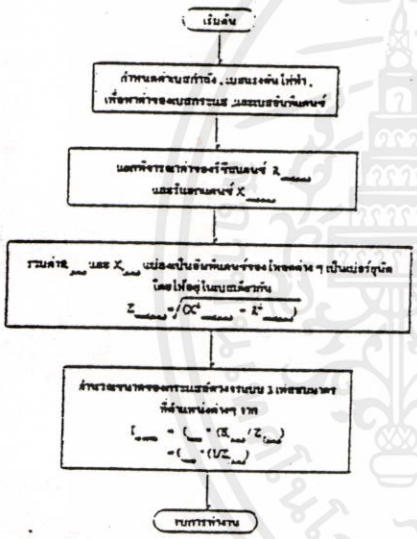
- กรณีลัดวงจรแบบ 1 เฟสลงดิน

$$I_{(\phi-g)} = 3E / (2X_1 + X_0) \quad \ldots\ldots(2)$$

โดยที่ X_1 = ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก

X_0 = ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์

$I_{(3\phi)}$ ที่หาได้จะเป็นค่าอาร์เอ็มเอสแบบสมมาตร (Symmetrical rms) และสำหรับค่าโมเมนทารีคิวตี้ของเซอร์กิตเบรคเกอร์กำลัง. จะได้ค่าอาร์เอ็มเอสแบบไม่สมมาตร (Asymetrical rms) = 1.6 * $I_{(3\phi)}$ และค่าสูงสุดแบบไม่สมมาตร (Asymetrical Peak) = 2.7 * $I_{(3\phi)}$



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของการคำนวณกระแสลัดวงจร

2.2 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

คือเมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดผิดปกติมากที่สุดจะต้องทำงานก่อนและมีประสิทธิภาพ โดยมีหลักการทั่วไปคือ

1.อุปกรณ์ป้องกันตัวใกล้จุดผิดปกติมากที่สุดทำงานก่อน

2.ให้ระบบมีความต่อเนื่อง คือไม่ตัดบ่อยจนเกินจำเป็นและไม่ให้โหลดขาดเป็นบริเวณกว้าง

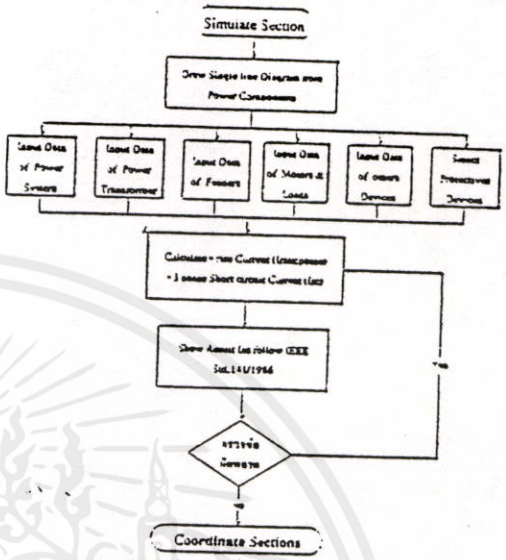
3.เมื่อนำอุปกรณ์มาทำงานร่วมกันแล้ว กราฟต้องไม่ตัดกัน

4.เมื่ออุปกรณ์ตัวที่ใกล้จุดผิดปกติมากที่สุดไม่ทำงาน อุปกรณ์ตัวถัดไปต้องทำหน้าที่แทน (Back up)

5.การทำงานอุวรเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

3.การออกแบบพัฒนาโปรแกรม

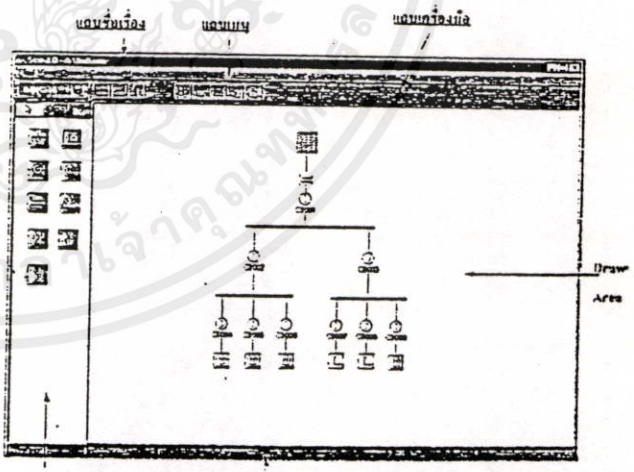
โปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ซึ่งแต่ละส่วนเน้นความสะดวกและถูกต้องในการใช้งานจริง ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

3.1 ส่วนการป้อนค่าเข้าโปรแกรม (Program Input Section)

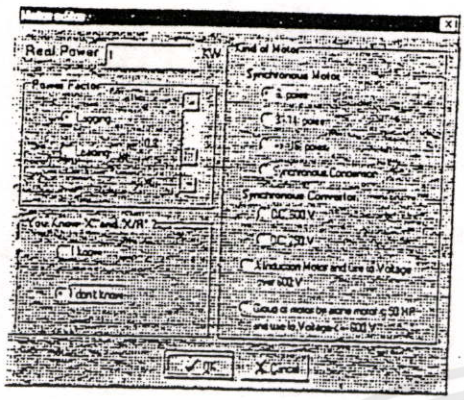
ขั้นตอนที่ 1 การจำลองระบบ โดยสร้างวันไลน์ไดอะแกรมจากเพาเวอร์คอมโพเนนท์ (Power Components) ที่โปรแกรมเตรียมไว้แล้ว เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้า,หม้อแปลง,สายส่ง,มอเตอร์ และโหลดอื่น ๆ



รูปที่ 4 ส่วนการสร้างวันไลน์ไดอะแกรมของโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากจำลองวันไลน์ไดอะแกรมในขั้นตอนที่ 1 เสร็จแล้ว ก็ทำการป้อนพารามิเตอร์ให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า โดยต้องบอกโปรแกรม ว่าเป็นมอเตอร์ชนิดใด กี่ขั้ว พิกัดกำลังเท่าใด ทั้งนี้เพื่อให้โปรแกรมนำพารามิเตอร์เหล่านั้นไปหาค่ารีแอก-

แคนซ์ของอุปกรณ์ซึ่งอยู่ในระบบฐานข้อมูลของโปรแกรม



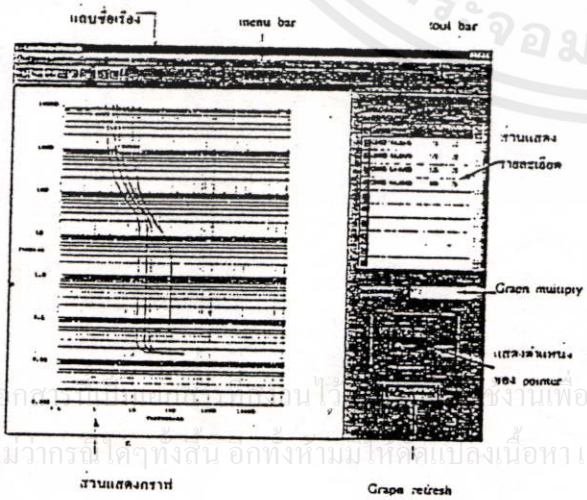
รูปที่ 5 การป้อนค่าพารามิเตอร์ให้โปรแกรม

3.2 ส่วนการประมวลผล (Program Process Section)

เมื่อป้อนข้อมูลครบถ้วน ถูกต้องแล้วจึงให้โปรแกรมทำการประมวลผล โปรแกรมจะเริ่มคำนวณ โดยแปลงอุปกรณ์ย่อย ๆ ที่มีในวันไลน์ไดอะแกรมให้อยู่ในรูปรีแอกแตนซ์ไดอะแกรม แล้วคำนวณหากระแสลัดวงจรที่ทุก ๆ ตำแหน่งจากสายป้อนหลักของระบบที่ทำการจำลองขึ้น โดยการคำนวณจะหากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุลย์ เพราะเป็นการลัดวงจรที่ให้กระแสฟอลต์รุนแรงที่สุด

3.3 ส่วนทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน(CoordinationSection)

จากผลการคำนวณในข้อ 3.2 โปรแกรมจะมีข้อมูลการลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในวันไลน์ไดอะแกรม ซึ่ง ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งผ่านมายังส่วนการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section) ผู้ออกแบบสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาตัดสินใช้ตัดสินใจเลือกชนิด พิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน ได้ด้วยตัวเอง (Manual Coordinte) หรือให้โปรแกรมช่วยตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ป้องกันก็ได้ (Automatic Coordinate)

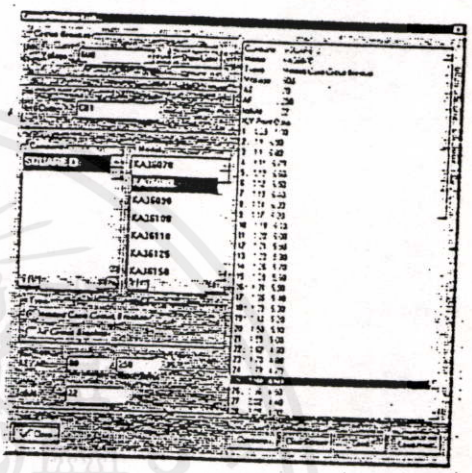


รูปที่ 6 ส่วนการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

3.4 ส่วนเครื่องมือช่วยของโปรแกรม (Program Toolbox)

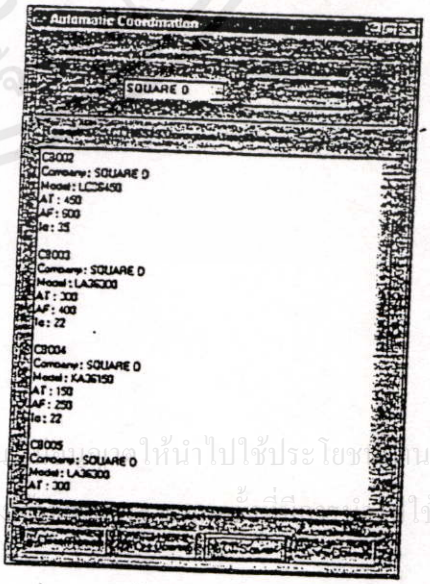
ในตัวโปรแกรมได้สร้างกล่องเครื่องมือ (Tool Box) ไว้อำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้หลายส่วน ที่มีความสำคัญหลัก ๆ คือ

ก.เครื่องมือช่วยในการเพิ่มเติม แก้ไข ระบบฐานข้อมูล เนื่องจากในปัจจุบันมีผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกันออกมาใช้ตลาดหลายยี่ห้อหลายรุ่นดังนั้นเมื่อผู้ผลิตสร้างอุปกรณ์รุ่นใหม่ออกสู่ตลาด เราสามารถทำการแก้ไขหรือเพิ่มเติมชนิด หรือ รุ่นของอุปกรณ์ใหม่ ๆ ได้



รูปที่ 7 เครื่องมือช่วยในการแก้ไขระบบฐานข้อมูล

ข.เครื่องมือช่วยในการนำเสนอรายงาน เมื่อผู้ออกแบบพอใจกับงานออกแบบทั้งในส่วนของการสร้างจำลองวันไลน์ไดอะแกรม และในส่วนการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันแล้ว สามารถเรียกใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Report Generator เพื่อช่วยในการสร้างเอกสารเพื่อนำเสนองานได้ ซึ่งจะสามารถสร้างได้ทั้งส่วนวันไลน์ไดอะแกรม และส่วนการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

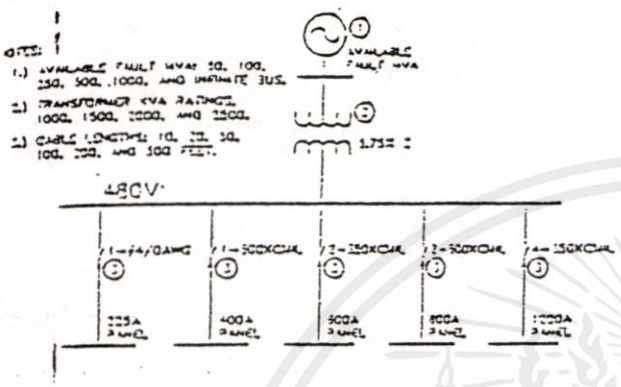


รูปที่ 8 รายงานที่นำเสนอ (Coordinate Section)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.ผลการทดสอบโปรแกรม

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ได้นำระบบที่ทำการออกแบบไว้แล้วจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข [7] ซึ่งระบบดังกล่าวประกอบด้วย



รูปที่ 9 วันไลน์ไดอะแกรมที่นำมาทดสอบความถูกต้องโปรแกรม

ตารางที่ 1 บันทึกผลการทดสอบโปรแกรม

2000 kVA Transformer High Side with Infinite Bus with 1000 hp. Motor Contribute Locate at 100 ft. from 1200 A. Panel				
บัสต่าง ๆ ที่เกิดฟอลต์	ระยะห่างจุดฟอลต์กับหม้อแปลง	ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตร (kA)		
		ผลคำนวณจากเอกสารอ้างอิง [7]	ผลคำนวณจากโปรแกรม	% แตกต่าง
Transformer	-	41.8	41.85	-
225 A. Panel	100 ft.	24.0	23.758	1
1-#4/0 AWG	200 ft.	15.2	14.686	3.3
	500 ft.	7.1	6.885	3
400 A.Panel	100 ft.	28.6	28.519	0.3
1-500 kcmil	200 ft.	20.1	19.493	3
	500 ft.	10.5	10.134	3.4
600 A.Panel	100 ft.	35.0	35.886	2.5
2-350 kcmil	200 ft.	27.1	26.988	0.4
	500 ft.	15.8	15.321	3
800 A.Panel	100 ft.	36.0	36.920	2.5
2-500 kcmil	200 ft.	28.6	28.501	0.3
	500 ft.	17.5	16.875	3.5
1200 Apanel	100 ft.	42.2	47.505	12
4-350 kcmil	200 ft.	N/A	42.098	-
with 1000 hp. Motor	500 ft.	N/A	32.424	-

5.บทสรุป

การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรจากโปรแกรมช่วยออกแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าได้ดี อาจเห็นว่ามีเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนกันอยู่บ้าง(เมื่อเทียบกันเอกสารอ้างอิง) ซึ่งเป็นเพราะว่ามีค่ารีแอกแตนซ์บางค่าซึ่งระบุไม่ชัดเจน ในโปรแกรมจึงเลือกค่าจากฐานข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมาแทน แต่ค่าทั้งหมดก็อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานได้สะดวก ทำให้ผู้ออกแบบสามารถมองเห็นภาพรวมของวันไลน์ไดอะแกรมที่สร้างขึ้น ว่าสายป้อนใดรับภาระโหลดมาก น้อย เกินไปหรือไม่ จึงเป็นประโยชน์ในการทำโหลดให้สมดุลย์ (Balance Load) ได้เด่นชัดขึ้น และด้วยฐานข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันที่โปรแกรมมีรวมถึงข้อมูลการลัดวงจรที่วิเคราะห์ได้จึงเป็นสิ่งที่ช่วยให้ผู้ออกแบบงานระบบสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ระบบมีความน่าเชื่อถือ ประหยัด และปลอดภัยสูงสุด

6.เอกสารอ้างอิง

1.การไฟฟ้านครหลวง , คู่มือการติดตั้งสายเคเบิล , กพ่น.2538

2.สุลี บรรจงจิตร , หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง , บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2540

3.Anthony J. , Rodolakis , Comparison of North America (ANSI) and European (IEC) Fault Calculation Guideline , IEEE Tran on Industrial app. Vol 29 , May/June 1993

4.IEC , IEC Technic Committee No.73 , IEC 909-1 , 1988

5.IEEE , IEEE Recommand practice for electric power distribution for Industrial plants , (IEEE Std 141-1986) IEEE Red Book , 1986

6.IEEE , IEEE Recommand practice for protection and Coordination of Industrial and commercial power system , (IEEE Std. 242-1986) IEEE Buff Book , 1986

7.James J. , Toth III , The Importance of Knowing Available Fault Currents when Specifying Interrupting Rating For Low-Voltage Equipment , IEEE Tran on Industrial app. Vol 32 , March/April 1996

ลิขสิทธิ์เป็นของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูลรายละเอียดของสายและขนาดกระแสของมอเตอร์แต่ละขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข้อมูลรายละเอียดของสายและขนาดกระแสของมอเตอร์ขนาดต่าง ๆ

Motor Rating		Rated Current In (A) (1.25In)	Power (kVA)	Size of Conductors					Protective Devices
KW	Hp			In air	In metallic Concuit		In under ground conduit		CB (AT)
				Wire T-4	Wire T-4	Conduit IMC	Wire T-6	Conduit IMC	
0.37	0.5	1.03 (1.3)	0.68	3x2.5 G-1.5	3x2.5 G-1.5	½"	3x2.5 G-1.5	1 ¼"	10
0.55	0.75	1.6 (2)	1.06	3x2.5 G-1.5	3x2.5 G-1.5	½"	3x2.5 G-1.5	1 ¼"	10
0.75	1.0	2.0 (2.5)	1.32	3x2.5 G-1.5	3x2.5 G-1.5	½"	3x2.5 G-1.5	1 ¼"	10
1.1	1.5	2.6 (3.3)	1.71	3x2.5 G-1.5	3x2.5 G-1.5	½"	3x2.5 G-1.5	1 ¼"	10
1.5	2.0	3.5 (4.4)	2.30	3x2.5 G-1.5	3x2.5 G-1.5	½"	3x2.5 G-1.5	1 ¼"	10
2.2	3.0	5 (6.3)	3.29	3x2.5 G-1.5	3x2.5 G-1.5	½"	3x2.5 G-1.5	1 ¼"	10
3.7	5.0	7.7 (9.6)	5.07	3x2.5 G-2.5	3x2.5 G-2.5	½"	3x2.5 G-2.5	1 ¼"	20
5.5	7.5	11.5 (14.4)	7.57	3x2.5 G-2.5	3x2.5 G-2.5	½"	3x2.5 G-2.5	1 ¼"	25
7.5	10	15.5 (19.4)	10.20	3x2.5 G-2.5	3x4 G-4	¾"	3x2.5 G-2.5	1 ¼"	30
11	15	22 (27.5)	14.48	3x4 G-4	3x6 G-6	¾"	3x4 G-4	1 ¼"	30
15	20	30 (37.5)	19.74	3x4 G-6	3x10 G-6	1"	3x6 G-6	1 ¼"	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข้อมูลรายละเอียดของสายและขนาดกระแสของมอเตอร์ขนาดต่าง ๆ (ต่อ)

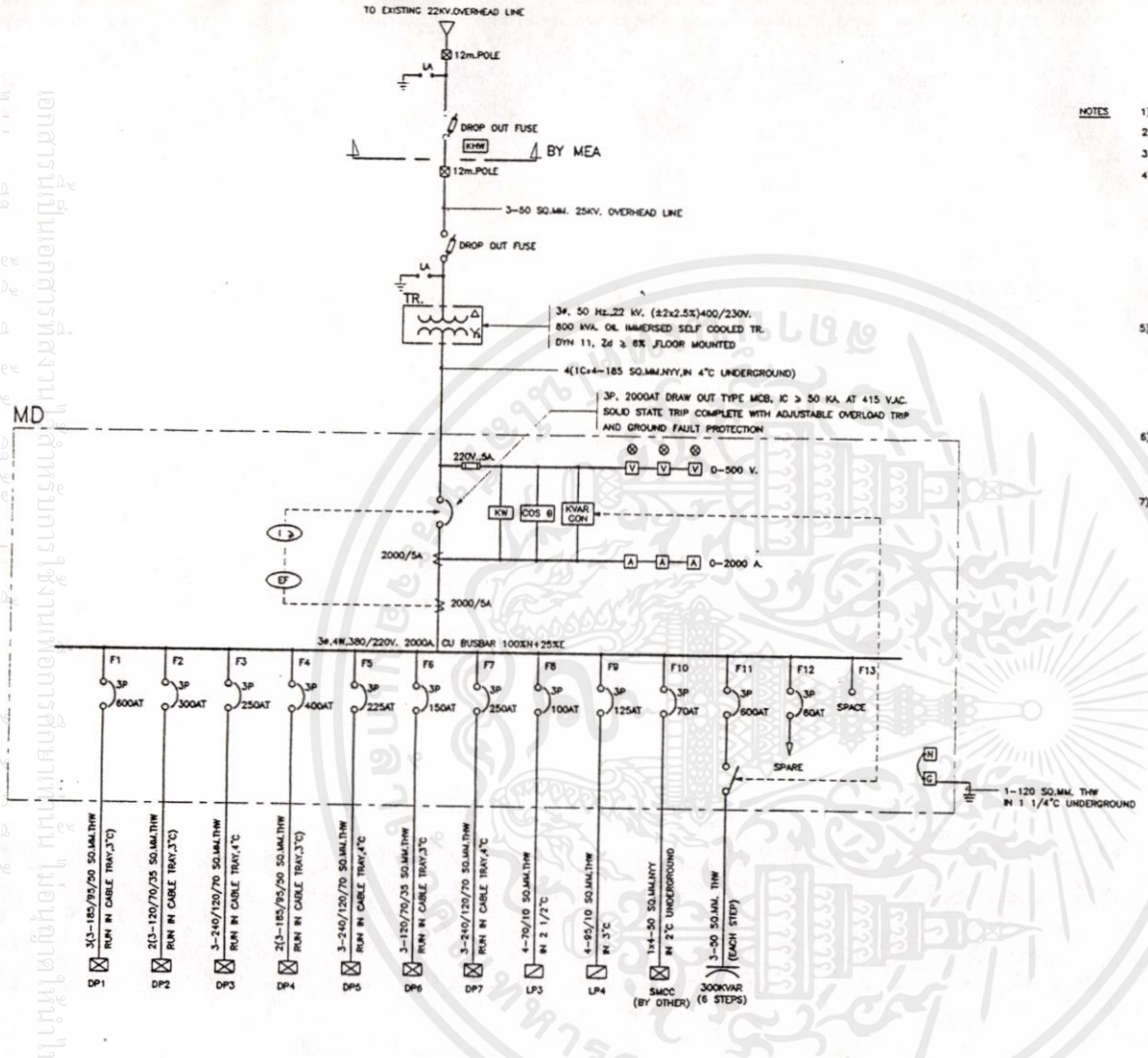
Motor Rating		Rated Current In (A) (1.25In)	Power (kVA)	Size of Conductors					Protective Devices
				In air	In metallic Concuit		In under ground conduit		
KW	Hp			Wire T-4	Wire T-4	Conduit IMC	Wire T-6	Conduit IMC	CB (AT)
18.5	25	37 (45.3)	24.35	3x10 G-10	3x16 G-10	1"	3x10 G-10	1 ½"	80
22	30	44 (55)	28.96	3x10 G-10	3x16 G-10	1"	3x10 G-10	1 ½"	80
30	40	60 (75)	39.49	3x16 G-10	3x25 G-10	1 ¼"	3x16 G-10	1 ½"	90
37	50	72 (90)	47.39	3x25 G-16	3x35 G-16	1 ¼"	3x25 G-16	2"	110
45	60	85 (106.3)	55.94	3x25 G-16	3x50 G-16	1 ½"	3x35 G-16	2"	125
55	75	105 (131.3)	69.11	3x35 G-16	3x70 G-16	2"	3x50 G-16	2"	150
75	100	138 (172.5)	90.83	3x70 G-25	3x95 G-25	2"	3x70 G-25	2 ½"	225
90	125	170 (212.5)	111.89	3x70 G-25	3x120 G-25	2 ½"	3x95 G-25	3"	250
110	150	205 (256.3)	134.93	3x95 G-25	3x185 G-25	3"	3x120 G-25	3"	300
132	175	245 (306.3)	161.25	3x120 G-25	3x240 G-25	3"	3x150 G-25	3"	400
160	220	300 (375)	197.45	3x185 G-25	3x300 G-25	3 ½"	3x240 G-25	3 ½"	400
					2(3x95) G-25	2x2"	2(3x70) G-25	2x2 ½"	
200	270	370 (462.5)	243.53	3x240 G-50	3x400 G-50	4"	3x300 G-50	4"	600
					2(3x150) G-50	2x2 ½"	2(3x95) G-50	2x3"	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

Single Line Diagram ตัวอย่างจากการออกแบบจริง เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NOTES

1) INTERRUPTING CAPACITY (I.C.) FOR FEEDER CB. OF MD1&MD2 SHALL BE ≥ 22 KA. AT 415 V.AC.
2) PANEL SMCC SHALL BE SUPPLIED AND INSTALLED BY SANITARY CONTRACTOR
3) INSTALLATION DETAIL FOR TRANSFORMER SEE DWG.NO. E-12
4) RATING OF 3P.CB SHALL BE AS FOLLOW (OTHERWISE SPECIFIED)
   - 4.1 VOLTAGE RATING ≥ 415 V.
   - 4.2 INTERRUPTING CAPACITY (I.C.) RATING
     - 4.2.1. FOR 100 AT., I.C. ≥ 18 KA. AT. 415 V.AC.
     - 4.2.2. FOR 225 AT., I.C. ≥ 25 KA. AT. 415 V.AC.
     - 4.2.3. FOR 400 AT., I.C. ≥ 40 KA. AT. 415 V.AC.
     - 4.2.4. FOR 600 AT., OR ABOVE I.C. ≥ 50 KA.AT. 415 V.AC.
5) RATING OF 3P SAFETY SW. SHALL BE AS FOLLOW (OTHERWISE SPECIFIED)
   - 5.1 ENCLOSURE SHALL BE NEMA 1.
   - 5.2 VOLTAGE RATING
     - 5.2.1. FOR SWITH RATING ≤ 100 A. VOLTAGE RATING SHALL BE 480 V.
     - 5.2.2. FOR SWITH RATING > 100 A. VOLTAGE RATING SHALL BE 600 V.
6) RATING OF 3 x 1# CT. SHALL BE AS FOLLOW (OTHERWISE SPECIFIED)
   - 6.1 PRIMARY CURRENT RATING ≥ AMPERE TRIP OF FEEDER CB.
   - 6.2 SECONDARY CURRENT RATING 5 A.
7) RANGE OF 3 x 1# AMMETER ≥ AMPEERE TRIP OF FEEDER CB. (OTHERWISE SPECIFIED)

MD FEEDER SCHEDULE

FEEDER NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
LOAD IN KVA.	300	155	130	200	115	75	130	55	65	30	-	30	-	CONNECTED LOAD 1,285 KVA. ESTIMATED LOAD 1000 KVA. % DEMAND 0.78

SINGLE LINE DIAGRAM

ประวัติผู้เขียน

นายสุชาติ มโนมยางกูร เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 5 มีนาคม พ.ศ.2508 , ปีมะเส็ง จบการศึกษาระดับปริญญาตรีได้วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.ไฟฟ้ากำลัง) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อ พ.ศ.2529 เริ่มเข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาเมื่อปี พ.ศ.2539 โดยมีผลงานวิชาการเรื่อง " การใช้คอมพิวเตอร์ออกแบบคำนวณหาขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า " โดยเข้าร่วมการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 ซึ่งจัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมหาบัณฑิตจาก บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าได้รับวุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.วิศวกรรมไฟฟ้า) เมื่อ ปี พ.ศ.2542

มีประสบการณ์ทำงานเป็นวิศวกรไฟฟ้า ที่บริษัทไทยสงวนวานิช 2489 จำกัด , บริษัท ABB (THAILAND) จำกัด , ผู้จัดการโครงการ บริษัท วรจักรอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และปัจจุบันเป็นกรรมการ บริษัท เอช.ที.อี. เพาเวอร์แอนด์เคเบิล จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้