ปีการศึกษา 2540

การใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์กระแสผิดปกติและแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

Short-Circuit Current Calculation and Coordination of Protection Devices by Using Computer Program

โดย

นาย จิรชัย ว่องวิบูลย์พร

นาย บดินทร์ เฉลิมวุฒิศักดิ์

นาย ภณพล ภู่ตระกูล

นาย วุฒิชัย รัญเสวะ

วัน เดือน ปี -5 ต.ค. 2541

เลขทะเบียน 038478

เลขเรียกหนังสือ T 400.14 จ515 ก

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศุลี บรรจงจิตร

อ. ชาย ชมภูอินไหว

ปพ. ต515ก 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038478

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์กระแสผิดปกติและแสดงการทำงานร่วมกัน
ของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

Short-Circuit Current Calculation and Coordination of Protection Devices by Using Computer Program

ผู้จัดทำ

นาย จิรชัย ว่องวินูลย์พร

นาย บดินทร์ เฉลิมวุฒิศักดิ์

นาย ภณพล ภู่ตระกูล

นาย วุฒิชัย รัญเสวะ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ศุลี บรรจงจิตร)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์กระแสผิดปกติและแสดงการทำงานร่วมกัน ของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

นาย จิรชัย ว่องวิบูลย์พร
นาย บดินทร์ เฉลิมวุฒิศักดิ์
นาย ภณพล ภู่ตระกูล
นาย วุฒิชัย รัญเสวะ
อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ศุลี บรรจงจิตร
อ. ชาย ชมภูอินไหว
ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาหากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยการอ้างอิงมาตรฐาน ANSI/IEEE Std 141-1986 และการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า โดยใช้ภาษาเดลไฟล์ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยวิเคราะห์หากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นระบบไฟฟ้า และเลือกอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) และฟิวส์ (Fuse) ให้มาทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสม และสะดวกรวดเร็วแก่ผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Short-Circuit Current Calculation and Coordination of Protection Devices by Computer Program

Mr. Jirachai Wongviboonporn
Mr. Badin Charlermwuttisuk
Mr. Panapol Phutrakoon
Mr. Wuttichai Ransewa
Advisors
Assc.Prof. Sulee Banjongjit
Lecturer Chai Chompoo-inwai
1997

Abstract

This project is studied about a short-circuit current calculate by reference ANSI/IEEE Standard 141-1986 and Coordination of protection devices which uses computer analysis. This program is write by delphi language. It can find a short-circuit current in system. Then choose a protection devices such as Circuit Breaker and Fuse which can coordination effectively for users.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	**I**
ABSTARCT	**II**
สารบัญรูป	**III**
สารบัญตาราง	**VI**
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการในการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE	3
2.1 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1.1 ชนิดของการเกิดลัดวงจร	3
2.1.2 ผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น	3
2.1.2.1 ผลของการเคลื่อนที่	4
2.1.2.2 ผลจากความร้อน	4
2.2 พื้นฐานเบื้องต้นที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อการคำนวณหากระแสลัดวงจร	4
2.2.1 การเกิดกระแสลัดวงจร	5
2.2.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร	6
2.2.2.1 กระแสสมมาตรและไม่สมมาตร	10
2.2.2.2 แฟกเตอร์ X/R	12
2.2.2.3 โมเมนทารีดิวตี้ไซเคิล	12
2.2.2.4 อินเตอร์รัพติ้งดิวตี้	13
2.3 การคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่น้อยกว่า 1 kV	14
2.3.1 ผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า	14
2.3.1.1 เครื่องจักรไฟฟ้าหมุน	14
2.3.1.2 ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน	15
2.4 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่มากกว่า 1 kV	17
2.4.1 วิธีอย่างง่ายโดยพิจารณาเฉพาะค่า E/X	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญต่อ

	หน้า
2.4.2 วิธีการใช้ค่า E/X ที่มีการชดเชยในส่วนของการลดขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสสลับ	18
2.4.3 ค่าความต้านทานของระบบและอัตราส่วนรีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์	21
2.5 ขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE	24
2.6 วิธียุบวงจรให้อยู่ในรูปอย่างง่าย	29
บทที่ 3 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ ป้องกันทางไฟฟ้า	
3.1 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า	31
3.2 การทำงานร่วมกัน	32
3.2.1 หลักการทั่วไปของการทำงานร่วมกัน	32
3.3 อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าที่สำคัญและจะนำมาใช้ในโปรแกรมมีดังนี้	33
3.3.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์	33
3.3.2 ฟิวส์	36
3.4 สรุปหลักการทั่วไปของการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า	40
3.5 ข้อมูลที่จำเป็นที่จะใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า	42
3.6 หลักการของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการโคออดิเนทเมื่ออยู่ในซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม	43
3.6.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์	43
3.6.2 ฟิวส์	45
3.6.3 หม้อแปลง	46
3.6.4 มอเตอร์	47
บทที่ 4 วิธีการออกแบบและการใช้โปรแกรม	
4.1 บทนำ	51
4.2 ขั้นตอนการออกแบบหาขนาดของกระแสลัดวงจรโดยการอ้างอิงมาตรฐาน ANSI/IEEE Std 141-1986 ของโปรแกรม	51
4.3 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญต่อ

หน้า

4.4 วิธีการใช้โปรแกรม

4.4.1 ส่วนในการวาดวงจรซิงเกิลไลน์

4.4.1.1 เงื่อนไขการใช้โปรแกรม 58

4.4.1.2 เงื่อนไขในการใช้โปรแกรม 59

4.4.2 ส่วนของการแสดงการโคออดิเนท อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

4.4.2.1 วิธีการใช้ 61

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์ 67

เอกสารอ้างอิง

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการในการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของการเกิดความผิดปกติชนิดต่างๆ 3

รูปที่ 2.2 แสดงผลของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหล 4

รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร 6

รูปที่ 2.4 ค่ากระแสลัดวงจรชนิดวงจรชนิดสมมาตร จะมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่นทั้งหมด 7

รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสสมมาตร 7

รูปที่ 2.6 แสดงรูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสไม่สมมาตร 8

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของสมมาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะเกิดการลัดวงจรนั้นคือค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าสูงสุด 10

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของการไม่สามาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด 10

รูปที่ 2.9 แสดงกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร จะเกิดการรวมของกระแสสลับที่สมมาตรกับองค์ประกอบกระแสตรง 11

รูปที่ 2.10 แสดงการลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าระหว่างสูงสุดและต่ำสุด 11

รูปที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบกระแสตรง 12

รูปที่ 2.12 แสดงการหาค่าตัวคูณในการเปลี่ยนแปลงค่า X/R สัมพันธ์กับเวลานับตั้งแต่เริ่มต้นเกิดการผิดปกติ 14

รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ 19

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดินโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ 20

รูปที่ 2.15 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟสและหนึ่งเฟสลงดินโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงเพียงอย่างเดียว 21

รูปที่ 2.16 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับหม้อแปลงกำลัง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปต่อ

หน้า

รูปที่ 2.17 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส 23

รูปที่ 2.18 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซาเลี่ยนโพลที่มีโซลิตโรเตอร์ขนาดเล็ก (Small Solid Rotor and Salient Pole Generator) และซิงโครนัสมอเตอร์ 23

รูปที่ 2.19 โฟลว์ชาร์ทแสดงการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตราฐาน ANSI/IEEE 30

บทที่ 3 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดการผิดปกติ 33

รูปที่ 3.2 แสดงกราฟกระแส-เวลาของเซอร์กิจเบรกเกอร์ 35

รูปที่ 3.3 แสดงคุณลักษณะการทำงานของเซอร์กิจเบรกเกอร์แบบโซลิดสเตททริป 35

รูปที่ 3.4 แสดงการทำงานของเซอร์กิจเบรกเกอร์แบบโซลิดสเตททริป 36

รูปที่ 3.5 แสดงเวลาในการหลอมต่ำสำหรับฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแส 38

รูปที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติของเวลาในการเปิดวงจรสูงสุดสำหรับฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแส 39

รูปที่ 3.7 แสดงการทำงานร่วมกันของฟิวส์และเซอร์กิจเบรกเกอร์ 41

รูปที่ 3.8 โฟลว์ชาร์ทแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า 50

บทที่ 4 วิธีการออกแบบและการใช้โปรแกรม

รูปที่ 4.1 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรของโปรแกรม 53

รูปที่ 4.2 แสดงหน้าจอของโปรแกรมการคำนวณหากระแสลัดวงจร 55

รูปที่ 4.3 แสดงการป้อนค่าของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า 58

รูปที่ 4.4 แสดงหน้าจอการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน 60

รูปที่ 4.5 แสดงการเลือกชนิดและรุ่นของอุปกรณ์ป้องกัน 61

รูปที่ 4.6 แสดงชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่มีการทำงานร่วมกัน 63

รูปที่ 4.7 โฟลว์ชาร์ทการใช้โปรแกรมเพื่อการคำนวณกระแสลัดวงจรและกระแสที่พิกัดของโหลด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปต่อ

		หน้า
รูปที่ 4.8	โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการโคออดิเนทของอุปกรณ์ป้องกันแบบผู้ใช้เลือกเอง (Manual)	65
รูปที่ 4.9	โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการโคออดิเนทของอุปกรณ์ป้องกันแบบอัตโนมัติ (Automatic)	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการในการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEEE

ตารางที่ 2.1 การหาค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรหาได้โดยการใช้ค่าตัวคูณ คูณกับกระแสสมมาตร 13

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกที่ใช้ในการคำนวณของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน 15

ตารางที่ 2.3 รวมค่าตัวคูณของรีแอกแตนซ์ (หรืออิมพีแดนซ์) ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน 16

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าตัวคูณรีแอกแตนซ์ (อิมพีแดนซ์) ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน 17

ตารางที่ 2.5 แสดงช่วงอัตราส่วน X/R ของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้ 21

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้ 22

ตารางที่ 2.7 กรณีที่เป็นคลาสอื่น ให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ในตารางคูณกับค่าพิกัดกำลัง (MVA) 22

ตารางที่ 2.8 ค่ารีแอกแตนซ์สำหรับเครื่องจักรไฟฟ้าอินดักชั่นและซิงโครนัสเป็นค่าเปอร์ยูนิตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่พิกัด kVA 27

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-IV และ PD-THW แบบ 3 เฟสเดินในท่อโลหะ 28

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-THW ไม่เดินในท่อโลหะ และชนิด PD-NYY แบบ 3 เฟส เดินในอากาศ หรือต่อลงดินโดยตรงแบบ 3 เฟส 29

ตารางที่ 2.11 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง 29

บทที่ 3 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะทำการโคออดิเนท 43

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีที่ทางด้านปฐมภูมิมีอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินติดมาด้วย 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าตัวคูณของฟิวส์ที่ใช้ในการโคออดิเนท	45
ตารางที่ 3.4 ค่าตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีที่ทางด้านปฐมภูมิมีอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินติดมาด้วย	46
ตารางที่ 3.5 Maximum Rating or Setting of Motor Branch-Circuit , Short-Circuit , Ground-Fault Protective Device	48
ตารางที่ 3.6 ผลของการผิดปกติที่เกิดขึ้น ในลักษณะต่างๆซึ่งจะมีผลต่อการป้องกันหม้อแปลงและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าสิ่งที่จำเป็นที่ต้องคำนึงถึงก็คือ เมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ นั้นสามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรได้หรือไม่ เพื่อนำขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ไปพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันต่อไป แต่เดิมการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า การเลือกอุปกรณ์ป้องกัน และการพิจารณาการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน จะใช้วิศวกรหรือผู้เชี่ยวชาญในการคำนวณ ซึ่งมีความยุ่งยากมาก โครงงานนี้จึงเห็นความสำคัญในการออกแบบระบบไฟฟ้า จึงได้คิดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยการหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆ การเลือกอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า และการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า เพื่อความสะดวกและรวดเร็วแก่ผู้ออกแบบ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 600 โวลต์

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงงาน

1. สามารถเข้าใจการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรโดยใช้มาตรฐานของ ANSI/IEEE และนำมาใช้ในการหาขนาดของกระแสลัดวงจรได้ ที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 600 โวลต์
2. สามารถนำขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นไปเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันได้ โดยที่ยังมีการทำงานที่ต่อเนื่องของระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ป้องกันไม่เสียหาย
3. การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง ต้องทราบว่าโหลดที่ใช้เป็นโหลดชนิดใด มีขนาดเท่าใด สามารถคำนวณหาขนาดของกระแสที่พิกัดของโหลดต่าง ๆ ได้
4. เมื่อได้ขนาดของกระแสที่พิกัด จะนำไปเลือกขนาดของเซอร์กิจเบรกเกอร์ หรือฟิวส์ โดยใช้ มาตรฐานของ NEC 1996 ในการอ้างอิง
5. สามารถนำขนาดอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้ามาทำงานร่วมกัน (Coordination)
6. สามารถใช้ภาษาเดลไฟ ช่วยในการออกแบบระบบไฟฟ้า และคำนวณค่าต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
7. เมื่อออกแบบระบบไฟฟ้าในโปรแกรมสามารถที่จะเก็บข้อมูลต่างๆ ไว้ในไฟล์ได้ โดยไม่มีการสูญหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการทำโครงงาน

1. เขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาเดลไฟ ในการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 600 โวลต์ ตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE
2. คำนวณกระแสที่พิกัดของโหลดต่างๆ และนำไปเลือกขนาดของเซอร์กิจเบรกเกอร์หรือฟิวส์ให้ผู้ออกแบบหรือให้ผู้ออกแบบเลือกเองได้
3. นำอุปกรณ์ป้องกันที่ทำการเลือกมาทำงานร่วมกัน (Coordination) โดยผู้ออกแบบหรือโปรแกรมทำให้
4. มีฐานข้อมูลที่เก็บชนิดและรุ่นของอุปกรณ์ป้องกันให้ผู้ออกแบบเลือก หากมีอุปกรณ์ป้องกันรุ่นใหม่เพิ่ม สามารถเพิ่มเข้าไปในโปรแกรมได้
5. เมื่อมีการออกแบบระบบไฟฟ้าแล้วสามารถจะเก็บเป็นไฟล์ไว้ในคอมพิวเตอร์ได้โดยไม่มีการสูญหายและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

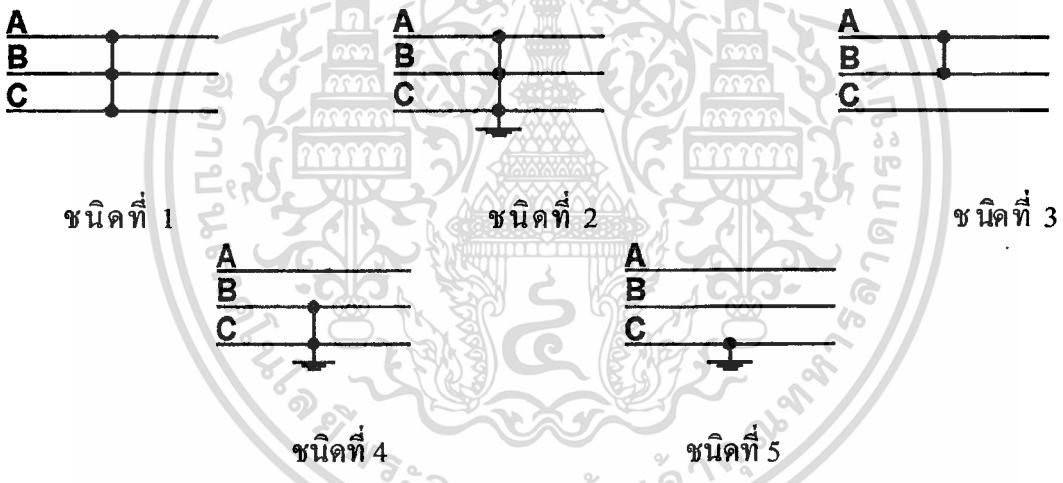
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการในการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/IEEE

2.1 ทฤษฎีและหลักการ

2.1.1 ชนิดของการเกิดลัดวงจร

1. ทรีเฟสอันกราวด์ฟอลท์ (Three phase ungrounded fault)
2. ทรีเฟสกราวด์ฟอลท์ (Three phase to grouneded fault)
3. เฟสทูเฟสอันกราวด์ฟอลท์ (Phase to phase ungrounded fault)
4. เฟสทูเฟสกราวด์ฟอลท์ (Phase to phase grounded fault)
5. เฟสทูกราวด์ฟอลท์ (Phaes to ground fault)



รูปที่ 2.1 แสดง ลักษณะของการเกิดความผิดปกติชนิดต่าง ๆ

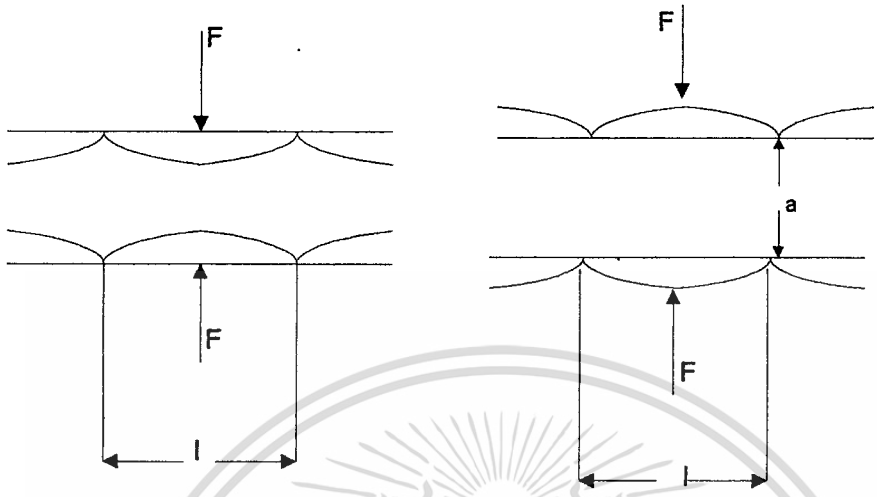
โดยในทางทฤษฎีแล้วค่ากระแสลัดวงจรของชนิดทรีเฟสฟอลท์จะมีความรุนแรงมากกว่าความผิดปกติของชนิดอื่น (ยกเว้นในบางกรณีค่ากระแสลัดวงจรแบบไลน์ทูกราวด์ฟอลท์จะสูงกว่าขึ้นอยู่กับการต่อ , การติดตั้ง) ดังนั้นการพิจารณาคำนวนหาค่ากระแสลัดวงจรนี้จะพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรแบบทรีเฟสฟอลท์ซึ่งมีโอกาสเกิดมากที่สุด

2.1.2 ผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

เนื่องจากเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้นกระแสนี้จะมีขนาดสูง อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆจึงต้องพิจารณาข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 ผลจากการเคลื่อนที่ จะพิจารณาได้จากตัวนำ 2 ชุดที่มาขนานกันเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำนี้ต้องมีแรงมากระทำต่อตัวนำในลักษณะดูดและผลัก



การดูด การผลัก

รูปที่ 2.2 แสดงผลของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหล

โดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$F = 0.2I_s^2[l/a] \quad \text{.....(2.1)}$$

โดยค่า l : ความยาวสาย

a : ระยะห่าง

I_s : กระแสลัดวงจร

F : แรงกระทำ

2.1.2.1 ผลจากความร้อน จะสามารถพิจารณาได้เมื่อตัวนำได้รับกระแสลัดวงจร(I_s) ไหลผ่านโดยกระแสที่เกิดขึ้นนี้เกิดอย่างทันทีทันใดและมีขนาดสูงมาก โดยความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากค่า I_s^2R ซึ่งเป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้น

2.2 พื้นฐานเบื้องต้นที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร

การเลือกอุปกรณ์ป้องกันต่างๆควรเลือกให้อยู่ในพื้นฐานของการเกิดการผิดปกติและเกิดกระแสลัดวงจร โดยอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) และ ฟิวส์ (Fuse) โดยอาจจะมีรีเลย์ (Relay) เป็นตัวจับกระแสที่ผิดปกติเพื่อให้ Breaker เปิดวงจรต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ระบบป้องกันทำงานไม่ดี ไม่น่าเชื่อถือย่อมทำให้เกิดความเสียหายอย่างใหญ่หลวงเป็นผลทำให้ระบบไม่สามารถทำงานต่อไปได้ หรือสูญเสียมูลค่าทางการค้าหรือความเสียหายทางอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าจะมีสิ่งต่อไปนี้ตามมาเกิดการอาร์คซึ่ง (arcing) และลุกไหม้ ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

1. กระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าหรือโหลดต่างๆจะไหลเข้าสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร
2. ส่วนประกอบต่างๆที่จะรองรับกระแสลัดวงจรจะต้องทนต่อความร้อนและแรงทางกลที่เกิดขึ้นได้
3. แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงของระบบจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นโดยจุดที่เกิดลัดวงจรจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ส่วนอื่นๆของระบบขึ้นอยู่กับเปอร์เซนต์แรงดันไฟฟ้าที่ลดลง

จากความเสียหายที่เกิดขึ้นย่อมทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ดั้งนั้นเพื่อป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากผลของกระแสลัดวงจร ในการออกแบบย่อมต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ต้องหาขนาดกระแสลัดวงจรโดยละเอียดเพื่อที่จะเลือกอุปกรณ์
2. การขยายโหลดในอนาคตควรหาสิ่งที่ควรรู้เพื่อการใช้วานของอุปกรณ์ป้องกันที่เลือกใช้
3. ตรวจสอบบรานช่วามีความสามารถในการรับ แรงกด - ดึง เชิงกล อันเนื่องมาจากกระแสลัดวงจร รวมทั้งจุดยึดและจุดรองรับ
4. ตรวจสอบ สายตัวนำต่างๆ ว่ามีขนาดเพียงพอที่จะทนความร้อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากกระแสลัดวงจร
5. ตรวจสอบทั้งระบบ และทุกอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย

2.2.1 การเกิดกระแสลัดวงจร

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

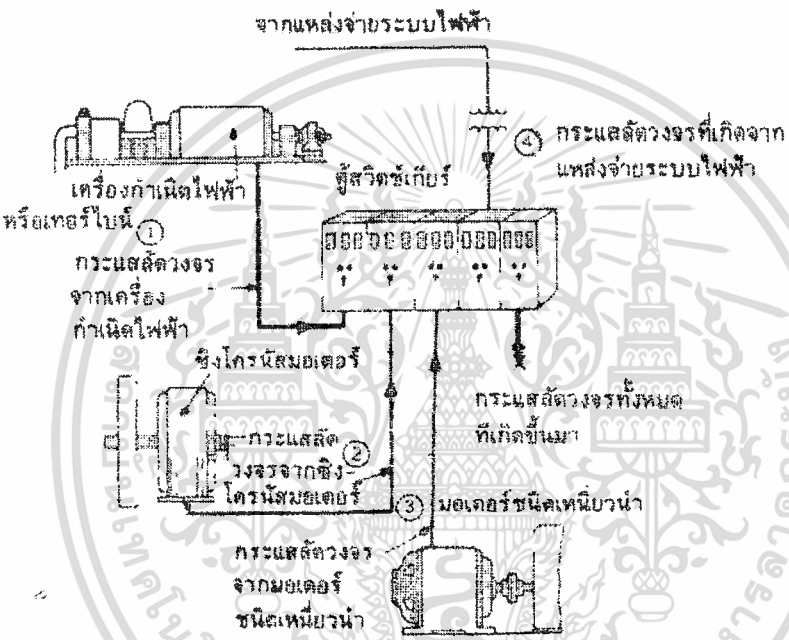
แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร อันได้แก่ ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลัง (Utility system) หรือการไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ชนิดซิงโครนัส และ มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เป็นการแสดงถึงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรทั้งหมด ซึ่งแหล่งกำเนิดเหล่านี้มีผลต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดเกิดลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร

เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือฟอลท์ขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การขนาดของกระแสลัดวงจรเพื่อที่จะได้นำมาพิจารณาเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างถูกต้อง การหาขนาดของกระแสลัดวงจรจำเป็นต้องทราบถึงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรและคุณลักษณะรีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรนั้นซึ่งมีอยู่ 4 แหล่ง ที่แสดงดังรูปที่ 2.3

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



รูปที่ 2.3 แสดงแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร

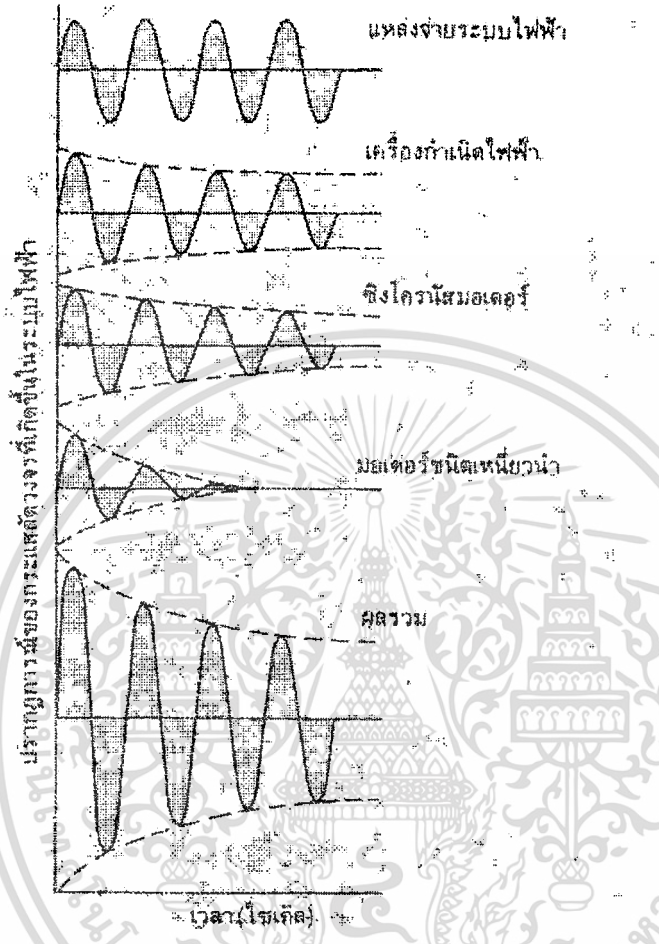
1. ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังโดยจะจ่ายพลังงานให้แก่หม้อแปลง เพื่อที่จะได้อาศัยหม้อแปลงในการลดแรงดันไฟฟ้าลงมา แต่หม้อแปลงไม่ใช่แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร เพราะว่าตัวหม้อแปลงเองเป็นเพียงตัวเปลี่ยนขนาดของกระแสเท่านั้น ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิและเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังนั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของตัวกำเนิดกระแสลัดวงจรตัวอื่น ๆ มาก ดังนั้นขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังจึงจะมีค่าสม่ำเสมอ ดังแสดงไว้ในรูปที่ (รูปที่ 2.3)

ในกรณีที่พิจารณาถึงกระแสลัดวงจรนั้น จะหมายถึงเป็นกระแสในค่าของ RMS หรือค่าจริงของสัญญาณรูปไซน์นั่นเอง โดยสัญญาณคลื่นของกระแสจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม

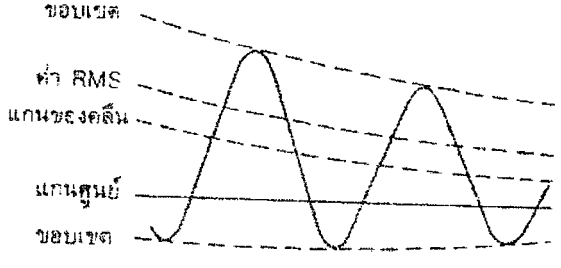
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. กระแสสมมาตร หมายถึง กระแสสลับที่สมดุลรอบแกนศูนย์ ดังรูปที่ 2.5

ข. กระแสไม่สมมาตร หมายถึง กระแสสลับที่ไม่สมดุลรอบแกนศูนย์ ดังรูปที่ 2.6

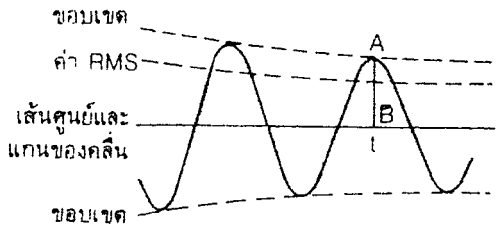


รูปที่ 2.4 ค่ากระแสลัดวงจรชนิดวงจรชนิดสมมาตร จะมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่นทั้งหมด



รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่า RMS ที่เวลา T = $\frac{\text{ค่าสูงสุดที่เวลา T}}{1.414}$

AB = ค่าสูงสุดที่เวลา T

รูปที่ 2.6 แสดงรูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสไม่สมมาตร

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้น ตัวต้นกำลัง (prime mover) และกระแสกระตุ้น (excite field) ยังมีอยู่ ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบในวงจรที่อยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับจุดที่เกิดการลัดวงจร นอกจากนี้ผลของการลัดวงจรยังจะมีผลต่อเนื่องมาถึงค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกด้วย

ค่าซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์แกนตรง (direct axis subtransient reactance ; X''_d) จะเป็นค่ารีแอกแตนซ์ของขดสเตเตอร์ (stator winding) โดยจะปรากฏขึ้นทันทีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นและจะเป็นตัวกำหนดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในช่วง 1-2-3 ไซเคิลแรกหลังจากการเกิดลัดวงจร

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

ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์แกนตรง (direct axis synchronous reactance ; X_d) ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดการไหลของกระแสลัดวงจรในช่วงสถานะอยู่ตัว (steady state) และจะไม่มีผลอะไรค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะนำมาพิจารณาหลังจากที่เกิดการลัดวงจนผ่านไปแล้วหลายวินาที ดังนั้นส่วนใหญ่จึงจะไม่นิยมใช้ค่า X_d ในการคำนวณหากระแสลัดวงจร

ค่ารีแอกแตนซ์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ถ้านำมาเขียนถึงผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ากระแสลัดวงจรจะค่อยๆ ลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) จากค่าสูงลงไปสู่ค่าต่ำจนถึงช่วงสถานะอยู่ตัว ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนี่จะขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว จึงพอกล่าวได้ว่า โดยค่ารีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับเวลา ค่า X''_d และ X'_d จะถูกกำหนดมาโดยโรงงานผู้ผลิต จึงพอจะกล่าวได้ว่าผลของกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าสูงและจะลดลง สู่ค่าปกติค่าหนึ่ง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับรีแอกแตนซ์ของระบบวงจรนั่นเอง

3. ซิงโครนัสมอเตอร์ เนื่องจากลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส และซิงโครนัส มอเตอร์ค่อย ๆ หยุดหมุน และยังคงมีแรงเฉื่อยซึ่งทำตัวคล้ายกับเป็นตัวต้นกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะถือว่า ซิงโครนัสมอเตอร์ ได้กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นก็เกิดกระแสลัดวงจรขึ้นในช่วงหลายไซเคิล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

ค่า X''_d , X'_d , X_d ในซิงโครนัสมอเตอร์จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป และผลของกระแสลัดวงจรที่มาจากซิงโครนัสมอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงม้า แรงดันไฟฟ้า และค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ตลอดจนค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงมอเตอร์นั้น

4. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เนื่องจากมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะทำงานได้ต้องอาศัยการกระตุ้นสนาม (Excited field) ที่ได้จากผลของการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งไม่ใช่จากชดเชยกระตุ้นกระแส (DC field winding) ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงขึ้น กระแสจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ก็จะพุ่งไปสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร เพราะฉะนั้นสนามแม่เหล็ก (Flux) ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนภายในช่วง 2-3 ไซเคิล นับจากเกิดการลัดวงจร ซึ่งในกรณีเช่นนี้กระแสลัดวงจร ก็จะลดลงจนเป็นค่าศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 ไซเคิล ดังนั้นค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ก็จะพิจารณาเฉพาะค่าซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง เท่านั้น โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าของ ล็อคโรเตอร์รีแอกแตนซ์ (Lock rotor reactance)

ค่าของกระแสลัดวงจรชนิดสมมาตรในตอนเริ่มแรก จะมีค่าเกือบเท่ากับกระแสตอนเริ่มแรกสตาร์ตโดยมีแรงดันเต็มที่ของมอเตอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 600% - 900% ของกระแสโหลดปกติ และค่ากระแสลัดวงจรนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงม้า พิกัดแรงดันไฟฟ้า ค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ตลอดจนค่ารีแอกแตนซ์ของจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงตัวมอเตอร์

ผลของกระแสลัดวงจรอันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดต่างๆ นั้น จะถูกรวมกันเป็นกระแสลัดวงจรทั้งหมด โดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 และอิทธิพลของเวลาจะมีผลต่อช่วงของการเกิดลัดวงจรซึ่งทำให้เกิดลักษณะของคลื่นที่แตกต่างกัน คือ

กระแสรูปไซน์แบบสมมาตร (Symmetrical sinusoidal current) โดยแสดงในรูปที่ 2.5

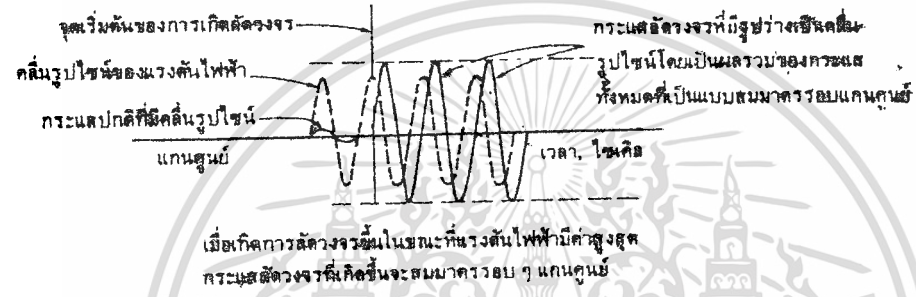
กระแสรูปไซน์แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical sinusoidal current) โดยแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 กระแสสมมาตรและกระแสไม่สมมาตร

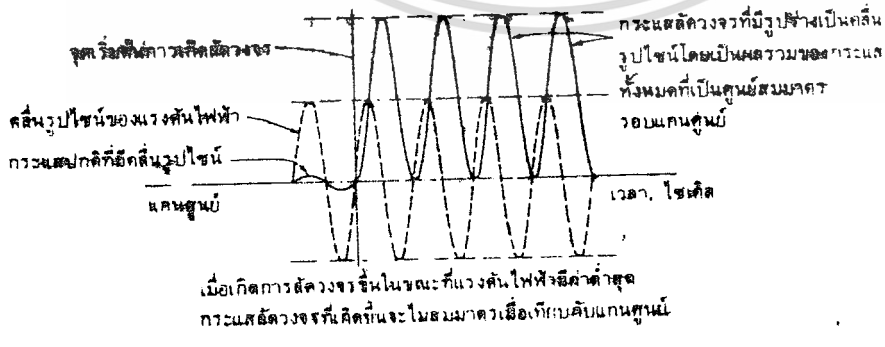
ในกรณีที่ระบบเกิดการลัดวงจรขึ้นจะเป็นกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ในช่วง 1- 2 – 3 ไซเคิลแรกหลังจากการเกิดการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรจะมีค่ามากอยู่ในช่วงไซเคิลแรก ๆ และหลังจาก 2 – 3 ไซเคิลต่อ ๆ มาจะเริ่มเข้าสู่กระแสลัดวงจรแบบสมมาตรต่อไป

กรณีที่เกิดการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของวงจรมีค่าสูงสุด กระแสลัดวงจรจะเริ่มที่ค่าเกือบเป็นศูนย์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นลักษณะของรูปไซน์ และทำมุม 90 องศา (ต่างเฟส) กับแรงดันไฟฟ้า และผลของการที่เกิดการลัดวงจรในลักษณะนี้ จะเป็นแบบสมมาตรรอบๆ แกนศูนย์ (Symmetrical about zero axis) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของสมมาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะเกิดการลัดวงจรนั้นคือค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าสูงสุด

กรณีที่เกิดการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าศูนย์ กระแสลัดวงจรจะเริ่มต้นที่ค่าศูนย์ กระแสจะล้าหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศา และจะเป็นลักษณะของกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ดังแสดงได้ดังรูป 2.8



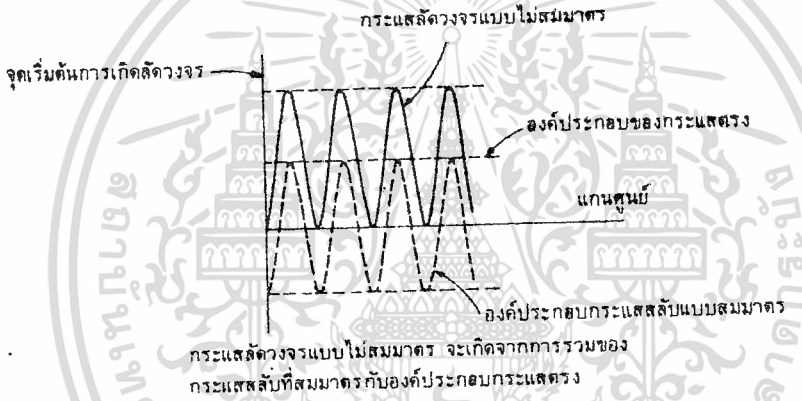
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของการไม่สามาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

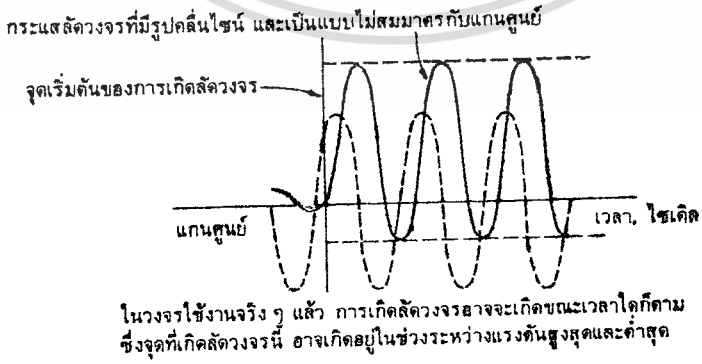
ในรูปที่ 2.9 นั้นเป็นการแสดงว่าในกรณีของผลรวมของกระแสไม่สมมาตรทั้งหมดก็จะมาจากกระแสสมมาตรที่มีส่วนของกระแสตรงเข้ามาประกอบนั่นเอง

ในรูปที่ 2.10 นั้นเป็นการแสดงถึงกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้น ในขณะที่แรงดันอยู่ระหว่างค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นก็คือกระแสไม่สมมาตรที่มีกระแสตรงเข้ามาประกอบเพียงแต่ช่วงของการเปลี่ยนรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรนี้อาจจะขยับได้ ซึ่งคล้าย ๆ กับรูปที่ 2.9

ในรูปที่ 2.11 นั้นเป็นการแสดงถึงกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้น โดยเริ่มต้นจากไม่สมมาตรในไซเคิลแรก ๆ หลังจากนั้น 2 – 3 ไซเคิล ต่อมาก็จะกลายเป็นสมมาตร ทั้งนี้เนื่องจากค่าองค์ประกอบกระแสตรงได้ลดลงไป ค่าองค์ประกอบกระแสตรงนี้จะถือว่าเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (I^2R) ภายในวงจรก็ได้

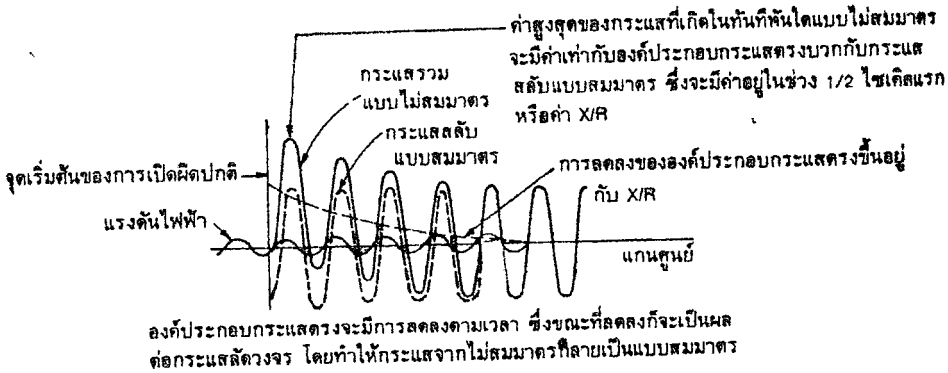


รูปที่ 2.9 แสดงกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร จะเกิดการรวมของกระแสลับที่สมมาตรกับองค์ประกอบกระแสตรง



รูปที่ 2.10 แสดงการลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าระหว่างสูงสุดและต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบกระแสตรง

2.2.2.2 แฟกเตอร์ X/R

คืออัตราส่วนของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของวงจรที่จะพิจารณา อัตราส่วนของ X/R นี้จะมีผลต่อการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงอย่างมาก (ค่า X , R นี้ได้จากค่ารีแอกแตนซ์และความต้านทานของวงจร ที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดดันจุดที่เกิดการลัดวงจร)

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

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

สำหรับในกรณีของอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรนั้น จะพิจารณาเฉพาะค่าองค์ประกอบของเซอร์กิจเบรกเกอร์ และ ฟิวส์ ทั้งนี้เพราะจะได้แน่ใจได้ว่าอุปกรณ์ป้องกันเหล่านี้สามารถที่จะทนต่อกระแสลัดวงจรสูงสุดได้

2.2.2.3 โมเมนทารีคิวตี้

ในการพิจารณากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง 1/2 ไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจรนั้น ถ้าในระบบไฟมีแหล่งกำเนิดหลายอย่างจะต้องพิจารณากระแสในกรณีไม่สมมาตร (จะเกิดขึ้นในช่วงไซเคิลแรก ดูได้จากนั้นจะทำการหารูปคลื่นของกระแสในกรณีไม่สมมาตรโดยปกติทั่ว ๆไป ในระบบแรงดันไฟฟ้าสูง และแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง ค่าตัวคูณจะเท่ากับ 1.5 – 1.6 ส่วนในระบบแรงต่ำ ค่าตัวคูณจะมีค่า 1.25 ดังตารางที่ 2.1 ข้างล่างนี้เป็นค่าตัวคูณที่กำหนดโดย NEMA รูปที่ 2.12 แสดงค่าตัวคูณที่ค่า X/R ถูกเปลี่ยนแปลงไป พิจารณาในล่วงที่เกิดการผิดปกติแล้ว 0 – 6 ไซเคิล

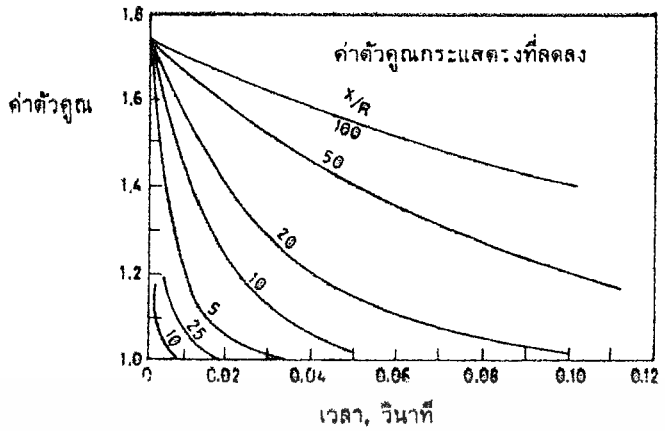
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การหาค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรหาได้โดยการใช้ค่าตัวคูณ คูณกับกระแสสมมาตร

ค่าประกอบกำลังลัดวงจร %	ค่าอัตราส่วน X/R ลัดวงจร	ค่าอัตราส่วนกระแส RMS แบบสมมาตร		
		ค่าสูงสุดในช่วงขณะของระบบ 1 เฟส	ค่า RMS สูงสุดที่ 1/2 ไซเคิลของระบบ 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

เอกสารอ้างอิงที่ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการหาค่าตัวคูณในการเปลี่ยนแปลงค่า X/R สัมพันธ์กับเวลานับตั้งแต่เริ่มต้นเกิดการผิดปกติ

2.2.2.4 อินเตอร์รัพติ้งดิวตี้

จะพิจารณาจากขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ที่จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรหรือฟิวส์เริ่มละลาย โดยปกติเซอรกิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจร (Interrupts) ออกจาก 3 , 5 , 8 ไซเคิลแล้วและในโรงงานอุตสาหกรรม จะนิยมตั้งเวลาไว้ 8 ไซเคิลเซอร์กิจเบรกเกอร์หลังจาก 8 ไซเคิลนับจากที่เกิดการผิดปกติผ่านไป มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะไม่เข้ามายุ่งเกี่ยวด้วย และค่ารีแอกแตนซ์ของ มอเตอร์ชนิดซิงโครนัสจะถูกเปลี่ยนจากซับทรานเซียนต์ไปเป็นทรานเซียนต์ ซึ่งจะเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมในระบบแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 600 V อินเตอร์รับติ้งดิวตี้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงใช้ค่าตัวคูณเป็น 1 เพราะพิจารณาในกรณีของซับทรานเซียลรีแอกแตนท์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าทรานเซียลรีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึงมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และองค์ประกอบกระแสตรงหลังจาก 8 ไซเคิลแล้วหายไป

2.3 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่น้อยกว่า 1 kV

2.3.1 ผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า

2.3.1.1 เครื่องจักรไฟฟ้าหมุน (Rotating Machine) ชนิดและรายละเอียดของซิงโครนัสมอเตอร์และอินดักชั่นมอเตอร์ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น มาตราฐานของการคำนวณอุปกรณ์อินเตอร์รับติ้งทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำนั้นจะพิจารณากลุ่มค่าซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์แรงดันไฟฟ้าต่ำของอินดักชั่นมอเตอร์และซิงโครนัสมอเตอร์ ถ้าแรงม้า (Horse power) ทั้งหมดของมอเตอร์ที่พิกัดแรงดัน 480 โวลต์ หรือ 600 โวลต์ เท่ากับพิกัดกำลัง(Rated Power VA) หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์ยูนิตของรีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.25 ของหม้อแปลงแบบระบายความร้อนด้วตัวเองอาจพิจารณาเพียงตัวเดียวก็ได้

ในกรณีที่ไม่ทราบค่า X/R สามารถนำ 1.25 มาคูณกับกระแสลัดวงจร ได้เพราะเมื่อพิจารณาจากกราฟทั้งหมดแล้ว ค่าสูงสุดจะมีค่าประมาณ 1.25 และจะไม่เกินค่าอินเตอร์รัพติ้งคาร์พาบิริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ด้วย

2.3.1.2 ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน (Rotating Machine Reactance)

ค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้น (Initial Short - circuit Current) ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่หมุน จะถูกกำหนดโดยค่าของซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์แกนตรง ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรจากทั้งสองวิธีข้างต้น จะใช้ค่ารีแอกแตนซ์ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกที่ใช้ในการคำนวณของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน

TYPE OF ROTATION MACHINE	POSITIVE REACTANCE FOR CALCULATE	
	MOMENTARY DUTY	INTERRUPPING DUTY
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		
1. Above 1000 hp at 1800 rpm or less	1.0 X_d"	1.5 X_d"
2. Above 250 hp at 3600 rpm	1.0 X_d"	1.5 X_d"
3. All others, 50 hp and above	1.2 X_d"	3.0 X_d"
4. All smaller than 50 hp	Neglect	Neglect

หมายเหตุ

1. X_d" ของเครื่องจักรหมุนซิงโครนัส จะพิจารณา ที่พิกัดศักดา และ ค่าไดเร็กแอกซิสซับทรานเซียรีแอกเตอร์ (Direct – axis Subtransient Reactance)
2. X_d' ของเครื่องจักรหมุนซิงโครนัส จะพิจารณา ที่พิกัดศักดา และ ค่าไดเร็กแอกซิสทรานเซียรีแอกเตอร์ (Direct – axis Transient Reactance)
3. X_d" ของอินดักชันมอเตอร์ เท่ากับ 1.00 หารด้วย เปอร์ยูนิต ของกระแสล็อกโรเตอร์ (Lock – rotor Current) ที่พิกัดศักดาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กระแสที่เกิดจากการถ้วงจรของ อินดักชันมอเตอร์ และ ซิงโครนัสมอเตอร์ขนาดเล็ก จะไม่พิจารณาที่ยูนิตี้ซิสเต็ม (Unity System) ยกเว้น ระบบจ่าย และสถานีย่อยที่จ่ายให้กับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพราะมอเตอร์จะมีขนาดใหญ่ กระแสใน 1/2 ไซเคิล จะมากกว่ากระแสสมมาตร อาจจะคูณด้วย 1.6 ที่กระแสสมาตร แต่จะไม่เกินไมแมนทารีดิวตี้ของเบรกเกอร์
5. ค่าตัวคูณรีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุน และ E/X แอมแปร์ จะอยู่ในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะพิจารณาผลของ AC ทั้งหมด

การพิจารณากลุ่มของอินดักชั่นมอเตอร์ที่มีค่ากำลังรวม 50 แรงม้า และมากกว่าจะคูณด้วย 1.0 หรือ 1.2 ที่ ซับทรานเซียลอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ขนาดใหญ่ ในกลุ่มของมอเตอร์

ในการหาขนาดของเซอร์กิจเบรกเกอร์ทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำของมอเตอร์จะอยู่ในมาตราฐานANSI/IEEE C37.13-1981 โดยจะกำหนดให้ขนาดของกระแสลัดวงจรที่บัสเท่ากับ 4 เท่าของกระแสพิกัด (หรือประมาณ 0.25 เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์)

ค่า 4 เท่านี้เป็นเพียงแค่ค่าประมาณ กรณีที่มีอินดักชั่นมอเตอร์ 75 % ของมอเตอร์ทั้งหมด จะคูณด้วย 4 เท่าของพิกัดกระแส และซิงโครนัสมอเตอร์ 25 % จะคูณด้วย 4.8 เท่าของพิกัดกระแส ซึ่งรายละเอียดของค่าอิมพีแดนซ์จะอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าตัวคูณรีแอกแตนซ์ (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 or less	1.0 X_d"	1.5 X_d"
Above 250 hp at 3600 rpm	1.0 X_d"	1.5 X_d"
All others, 50 hp and above	1.2 X_d"	3.0 X_d"
All smaller than 50 hp	Neglect	Neglect

จาก ANSI/IEEE C37.010-1979 และ C 37.5-1979 (เอกสารอ้างอิง [4])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอินดักชั่นมอเตอร์ขนาดเล็กน้อยกว่า 50 แรงม้า จะคูณด้วย 3.6 กับพิกัดกระแส (หรือประมาณ 0.28 ของค่าอิมพีแดนซ์ เป็นเปอร์ยูนิต) หรือนำค่าตัวคูณ 1.67 คูณกับค่าซับทรานเซียลอิมพีแดนซ์

สำหรับอินดักชั่นมอเตอร์ที่มีขนาด 50 แรงม้าและมากกว่า จะคูณด้วย 1.2 กับค่าซับทรานเซียลอิมพีแดนซ์ หรือที่ 0.2 ของค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต

โดยจากหลักการข้างต้นสามารถที่จะหากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรในช่วงไซเคิลแรกที่มอเตอร์ได้ โดยพิจารณา ค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่ารีแอกแตนซ์เปอร์ยูนิต ไม่คิดค่าของความต้านทาน

$$I_{sc(sym)} = (E_{pu} * I_{pu}) / Z_{pu} \quad \text{..... (2.2)}$$

ในกรณีที่คิดกระแสไม่สมมาตร (Closeing and Latching Capabilites) จะคูณด้วย 1.6 เท่าของกระแสสมมาตรในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_{sc(tot)} = (E_{pu} / X_{pu}) * 1.6 * I_{base} \quad \text{..... (2.3)}$$

ตารางที่ 2.4 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 [4])

2.4 การคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่มากกว่า 1 kV

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การคิดกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส $I_{(3\phi)} = E / X_1$ .....(2.4)

การคิดกระแสลัดวงจรแบบซิงเกิลเฟส $I_{(1\phi)} = 3E / (2X_1 + X_o)$.... .....(2.5)

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 * $I_{(3\phi)}$

วิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจรอย่างง่าย โดยจะพิจารณาเฉพาะค่า X ของระบบ ส่วนค่า R ไม่พิจารณา และผลที่ได้จะถูกต้องเพียงพอก็ต่อเมื่อ X/R ของระบบมีค่า $\leq$ 15

ค่าที่คำนวณได้จากวิธีนี้จะถือเป็น 80 % ของอินเตอร์รับติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ในกรณีความผิดพลาดปกติแบบสามเฟส และถือเป็น 70 % ของอินเตอร์รับติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ในกรณีความผิดพลาดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน

2.4.2 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 % ของค่าอินเตอร์รัพติ้งคาร์พาบีริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ในกรณีผิดปกติแบบ 3 เฟส

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

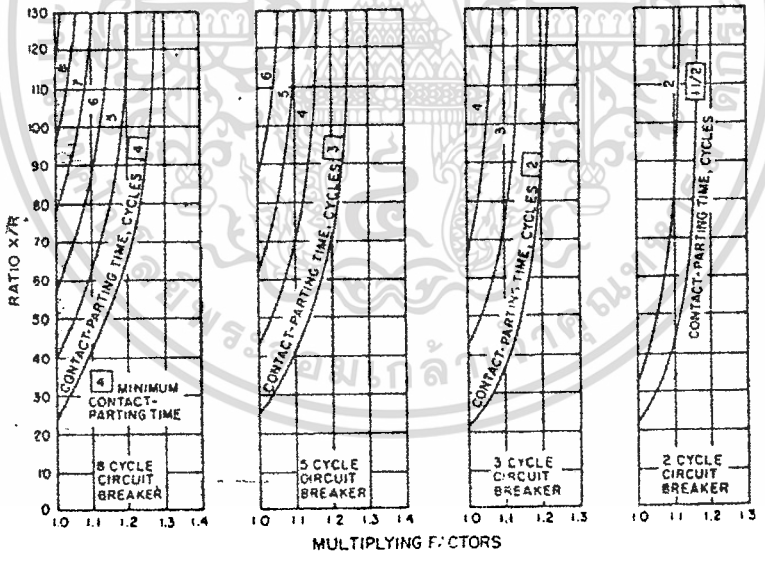
วิธีนี้จะเริ่มต้นด้วยการหาค่ากระแสตามวิธีอย่างง่ายโดยพิจารณา E/X ก่อน จากนั้นจะใช้เฟกเตอร์ตัวคูณ (Multiplying Factor) ที่มีความสัมพันธ์กับค่า อัตราส่วน X/R คูณเพื่อแก้ค่ากระแสลัดวงจร ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอย่างง่ายซึ่งพิจารณา E/X เพียงอย่างเดียว

ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณที่ใช้สามารถหาได้ดังนี้

(1) กรณีคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ (AC and DC Decrement) ทั้งสองค่า ซึ่งกรณีนี้จะใช้เมื่อกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลงหนึ่งตัว (One Transformer) หรือจ่ายผ่านรีแอกแตนท์ภายนอก (External Reactance) ที่มีค่าน้อยกว่า 1.5 $*X_d''_{(gen)}$ ที่พิกัดกำลังเบสของระบบ และเป็นไปดังกราฟรูปที่ 2.13

(2) กรณีคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง(DC Decrement) อย่างเดียว ซึ่งกรณีนี้จะใช้เมื่อกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายผ่านหม้อแปลง 2 ตัวขึ้นไป (Two or More Transformer) หรือจ่ายผ่านรีแอกแตนท์ภายนอกมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $1.5*X_d''_{(gen)}$ ที่พิกัดกำลังเบสของระบบกราฟที่ใช้จะเป็นดังกราฟรูปที่ 2.14

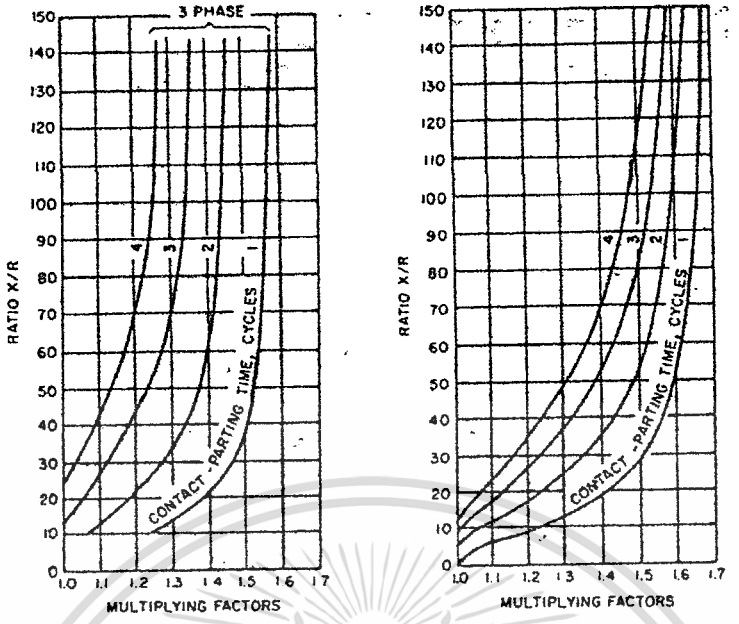
ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จากวิธีนี้ไม่ควรเกินค่าอินเตอร์รัพติ้งคาร์พาบิริตี้แบบสมมาตรของเซอร์กิจเบรกเกอร์ที่เลือกใช้



ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับ E/X แอมแปร์ (Amperes)

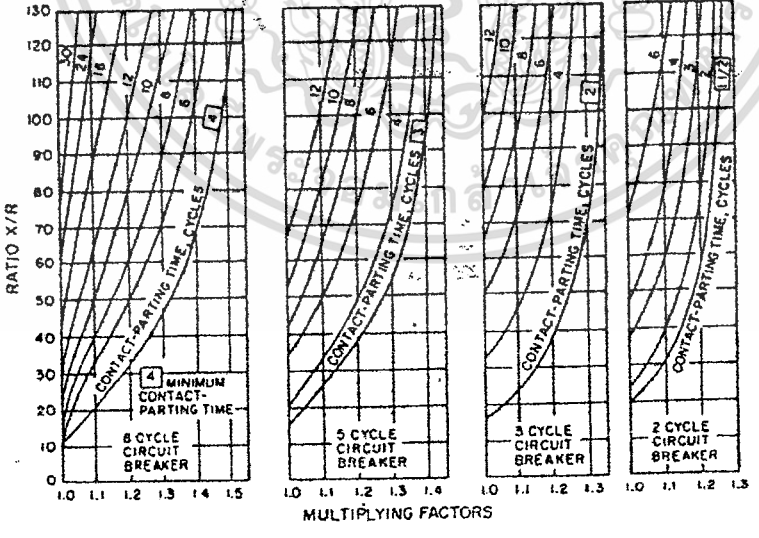
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส โดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
038478



ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับ E/X แอมแปร์ (Amperes)

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส และ ความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน โดยคิดของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรง และกระแสสลับ



ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณสำหรับ E/X แอมแปร์ (Amperes)

รูปที่ 2.15 กราฟแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวคูณในกรณีความผิดปกติแบบสามเฟส และหนึ่งเฟสลงดินโดยคิดผลของการลดลงขององค์ประกอบกระแสตรงเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ค่าความต้านทานของระบบและอัตราส่วนรีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์ (Resistance of System and Typical X/R Ratio)

จุดประสงค์ของการคำนวณ X/R มาให้ก็เพื่อใช้ในการหาค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตัวนั้น ๆ และเป็นการแสดงว่า ค่าความต้านทานของระบบมีผลต่อค่าของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องนำค่าความต้านทานที่หาได้มาพิจารณาประกอบในการกระแสลัดวงจร สำหรับพวกเครื่องจักรไฟฟ้า (Machines) ค่าอัตราส่วน X/R จะเป็นค่าที่ใช้ในการวัดค่าไทม์คอนสแตนท์ของการลดทอนขององค์ประกอบกระแสตรงและกระแสผิดปกติจากเครื่องจักร (Time Constant of Exponential Delay of DC Component of Machine Fault Current)

โดยปกติแล้วค่าความต้านทาน และอัตราส่วน X/R จะดูได้จากคู่มือของอุปกรณ์จากโรงงาน หรืออาจจะใช้ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงช่วงอัตราส่วน X/R ของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้

อุปกรณ์ในระบบ	ช่วง	ค่าที่เลือก
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่และซิงโครนัสคอนแดนเซอร์แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	40-120	80
หม้อแปลงกำลัง	ดูรูปที่ 2.14	--
มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ	ดูรูปที่ 2.15	--
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่และซิงโคนัสมอเตอร์	ดูรูปที่ 2.16	--
รีแอกเตอร์	40-120	80
สายส่งแบบเปลือย(Open Wire Lines)	2-13	5
สายเคเบิลใต้ดิน(Underground Cables)	1-3	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในระบบที่สามารถเลือกใช้ได้

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) (ไม่รวมความสูญเสียในขณะไม่มีโหลดหรือความสูญเสียช่วย (No-load Losses or Auxiliary Losses))
5. รีแอกเตอร์	ความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance)
6. สายส่งและสายเคเบิล	ความต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance)

หมายเหตุ : ความต้านทานประสิทธิผล = $\frac{X_{2V}}{2\pi f T_{a3}}$

เมื่อ X_{2V} คือ รีแอกแตนซ์ลำดับลบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า

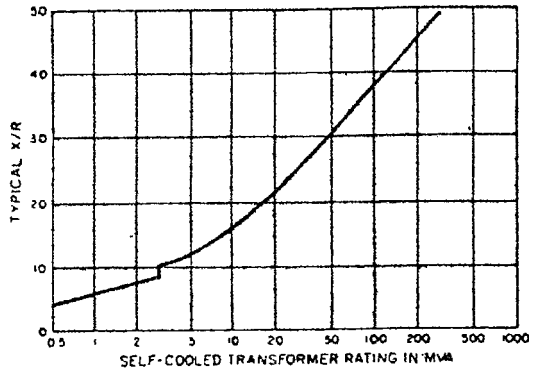
T_{a3} คือ ค่าไทม์คอนสแตนต์อาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า

โดยปกติแล้วค่าความต้านทานประสิทธิผล จะเท่ากับ 1.2 เท่าของความต้านทานกระแสตรง

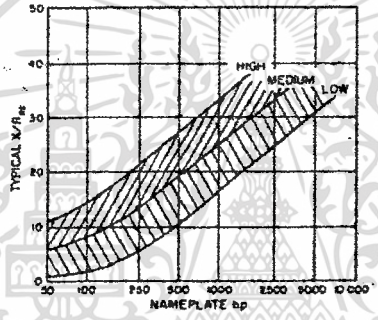
ตารางที่ 2.7 กรณีที่เป็นคลาสอื่น ให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ในตารางคูณกับค่าพิกัดกำลัง (MVA) ก่อนที่จะใช้รูปที่ 2.16

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

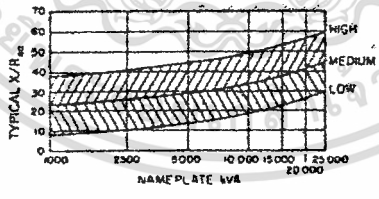
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับหม้อแปลงกำลัง



รูปที่ 2.17 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 2.18 ช่วงของอัตราส่วน X/R สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซาเลี่ยนโพลที่มีโซลิดโรเตอร์ขนาดเล็ก (Small Solid Rotor and Salient Pole Generator) และ ซิงโครนัสมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตราฐานของ ANSI/IEEE

1. พิจารณาแบบ Single line Diagram ที่ให้ มาพิจารณา โดยการคิดเฉพาะโหลดหลัก ๆ เท่านั้น (ไม่คิดโหลดย่อย ๆ เช่น load panel)
2. กำหนดค่า Base Power , Base Voltage นำมาหาค่าของ Base current และ Base impedance โดย :

$$I_{base} = \frac{VA_{base}}{3V_{base\ per\ phase}} \quad \text{.....(2.6)}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base\ per\ phase}}{I_{base\ per\ phase}} \quad \text{.....(2.7)}$$

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

4.1 ในกรณีของโหลดของระบบไฟฟ้าจะทราบค่าโวลต์แอมป์ (VA) ของโหลด สามารถหาอิมพีแดนซ์ ของโหลดได้โดย

$$Z_{จริง} = \frac{VA}{3V^2_{phase}} \quad \text{.....(2.8)}$$

$$Z_{p.u.} = \frac{Z_{จริง}}{Z_{base}} \quad \text{.....(2.9)}$$

หากบอกค่าของเพาเวอร์แฟกเตอร์(power factor) ของโหลดระบบไฟมา ก็สามารถหาค่าของรีแอกแตนซ์และรีซิสแตนซ์ได้จาก

$$R_{p.u.} = \frac{V^2}{VA * (pf.)} \quad \text{.....(2.10)}$$

$$X_{p.u.} = \sqrt{(Z^2_{p.u.} - R^2_{p.u.})} \quad \text{.....(2.11)}$$

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

-ในกรณีไม่ทราบค่า (X_d'') ให้ประมาณได้จากตารางที่ 2.7 ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องจักรไฟฟ้านั้น ๆ

- เมื่อทราบค่า (X_d'') แล้วให้นำมาพิจารณาในตารางที่ 2.5 เพื่อนำตัวประกอบมาคูณ

5. ขนาดและความยาวสาย

สามารถหา X และ R ในกรณีที่บอกขนาดสายเป็น ตารางมิลลิเมตร ชนิด และความยาว

6. เปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตของ อิมพีแดนซ์ , รีแอกแตนซ์ , รีซีสแตนซ์ ให้อยู่ในเบสกำลังเดียวกัน โดยส่วนมากเบสกำลังจะกำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่จ่ายเป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. พิจารณาค่าที่คำนวณได้ไปในชิงเกิลไลน์ไดอะแกรม แล้วทำการยุบวงจรอย่างง่าย โดยค่าของอิมพีแดนซ์ (โดยแยกพิจารณา รีซีสแตนซ์ กับ รีแอกแตนซ์)
8. เมื่อหาค่าของ รีซีสแตนซ์รวม และ รีแอกแตนซ์รวม ได้แล้ว ก็นำค่าของรีซีสแตนซ์ และ รีแอกแตนซ์มาหาค่า อิมพีแดนซ์

$$Z_{p.u.} = \sqrt{(X^2_{\text{total p.u.}} + R^2_{\text{total p.u.}})} \qquad \text{.....(2.12)}$$

9. ในกรณีพิจารณา ที่ ระดับแรงดันไฟฟ้ากลาง (Medium Voltage)ให้นำ $(X/R)_{total}$ ที่ได้มาพิจารณาเพิ่มเติมโดยพิจารณาค่า ตัวคูณจากตารางที่ 2.1 เพื่อคูณกับกระแสลัดวงจร (I_{sc})ที่ได้
10. คำนวณหากระแสลัดวงจรได้จาก

$$I_{sc\ sym} = \frac{kVA_{base} * 1000}{Z_{p.u.} * V_{Low\ volt}} \qquad \text{.....(2.13)}$$

$$I_{sc(sym)} = (E_{pu} * I_{pu}) / Z_{pu} \qquad \text{.....(2.14)}$$

11. ในกรณีหาขนาดของกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงจะพิจารณาด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Secondary Voltage) โดยที่ต้องทราบค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า (Rated Current) จากสมการที่ (2.15)

$$I_{Rated} = \frac{VA}{3\, V_{phase\ (Secondary\ Voltage)}} \qquad \text{.....(2.15)}$$

12. เมื่อได้ค่าของกระแสที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า นำค่าของอิมพีแดนซ์ที่เป็นเปอร์ยูนิตหรือเปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ (%Z or $Z_{p.u.}$) ของหม้อแปลงมาหาร ดังสมการที่ (2.16)หรือถ้าไม่ทราบอาจจะพิจารณาจากตารางที่ 2.11

$$I_{sc\ sym} = \frac{I_{Rated}}{Z_{p.u}} \qquad \text{.....(2.16)}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

1. จากข้อที่ 7 นั้นพิจารณา เพื่อหาค่า รีแอกแตนซ์ กับ รีซีสแตนซ์ ของมอเตอร์ที่แรงดันมากกว่า 1 กิโลโวลต์ อาจมีปัจจัยของตัวคูณค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ที่คำนวณได้ดูจากกราฟรูปที่ 2.13 , 2.14 , 2.15
2. ในการพิจารณาผลของมอเตอร์ในแรงดันต่ำนั้น ให้นำ 4 คูณกับค่า กระแสพิกัดของมอเตอร์ แล้วนำไปบวกเพิ่มกับกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ โดยค่า 4 ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าประมาณ ซึ่งประมาณ 75% ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ ใช้ตัวคูณ 3.6 และประมาณ 25% ของซิงโครนัสมอเตอร์ ใช้ตัวคูณ 4.8 ส่วนที่เหลืออนุโลมได้ สรุปได้ว่า ใช้ 4 เป็นตัวคูณ กับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำที่ไม่ระบุมา
3. ในกรณีที่ไม่ทราบค่ารีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์ (X/R) ของอุปกรณ์ไฟฟ้า , เครื่องจักรต่างๆ อาจจะประมาณค่าได้โดยพิจารณาจากกราฟรูปที่ 2.16 , 2.17 , 2.18

วิธีการยุบวงจรให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

1. ในการพิจารณา ให้เราพิจารณาหม้อแปลงเพียงตัวเดียวเท่านั้น แม้ว่าระบบนั้นจะใช้หม้อแปลงสองตัวโดยใช้เซอร์กิจเบรกเกอร์เชื่อมกัน(Tie Circuit Breaker)เราจะคิดหม้อแปลงเพียงตัวเดียว ที่ใช้จ่ายโหลดทั้งหมด
2. ในการคิดให้ยึดบรานซ์เป็นหลัก โดยพิจารณาว่าไลน์ ใดที่ติดกับบรานซ์ให้คิดทีหลัง แยกพิจารณาต่างหาก
3. ให้คิด รีแอกแตนซ์ รวมกันแบบขนานในแต่ละบรานซ์ และอนุกรมกันในแต่ละไลน์
4. ให้คิด รีซิสแตนซ์ รวมกันแบบขนานในแต่ละบรานซ์ และอนุกรมกันในแต่ละไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ค่ารีแอกแตนซ์สำหรับเครื่องจักรไฟฟ้าอินดักชั่นและซิงโครนัส เป็นค่าเปอร์ยูนิตของเครื่องจักรไฟฟ้าที่พิกัด 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 2.2 และ 2.3		

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 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด 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 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายชนิด PD-THW ไม่เดินในท่อโลหะ และชนิด PD-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

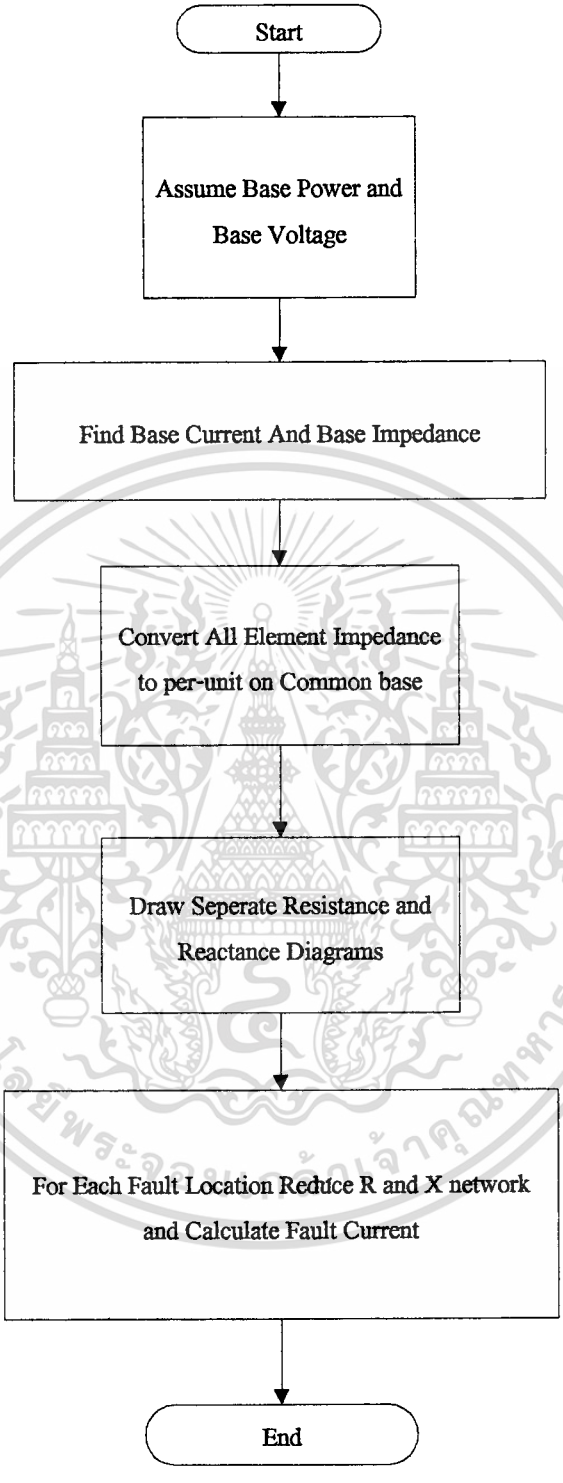
เอกสารอ้างอิง [5]

ตารางที่ 2.11 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

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 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 โฟลว์ชาร์ทแสดงการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตราฐาน ANSI/IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

3.1 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า (Protective Devices)

หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถรับรู้การเกิดการผิดปกติ และสามารถแก้ปัญหาเมื่อเกิดการผิดปกติแล้วได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับการศึกษาและประสบการณ์ของผู้ออกแบบในการที่จะเลือกใช้อุปกรณ์ดังกล่าว ในการออกแบบระบบไฟฟ้านั้น สิ่งที่ต้องการก็คือต้องการให้ระบบสามารถที่จะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะต้องมีพลังงานไฟฟ้าพร้อมที่จะจ่ายให้แก่เครื่องมือและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้ตลอดเวลา ดังนั้นความเชื่อถือ (reliability) จึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด ถ้าในระบบเกิดกระแสที่มีขนาดมากกว่าปกติหรือกระแสเกิน (over current) ไหลผ่านแล้วย่อมจะเกิดอันตรายมาก กระแสนี้อาจจะเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกันและอาจจะมีกระแสมากกว่า 100 kA ก็ได้

แต่ที่นิยมแบ่งสาเหตุของกระแสเกินก็คือ

1. โหลดเกิน (overload)
2. ลัดวงจร (short circuit)

ดังนั้นเมื่อมีกระแสเกินเกิดขึ้นในวงจรจะต้องมีอุปกรณ์ที่จะเปิดวงจรออกแต่ต้องเปิดวงจรเฉพาะวงจรที่จำเป็นและน้อยที่สุด แต่มีความปลอดภัยมากที่สุด เพื่อที่จะให้อุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสเกินมีพลังงานไฟฟ้าใช้ตลอดเวลา

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินควรที่มีหลักการข้อกำหนดในการทำงานดังนี้

1. การทำงานควรเป็นไปอย่างอัตโนมัติ
2. ในกรณีที่กระแสปกติไหลผ่านตัวมัน ไม่ควรจะมีการเปิดวงจร
3. จะต้องเปิดวงจรทันทีถ้ามีการเกิดกระแสเกิดขึ้นไหลผ่านตัวมัน
4. จะต้องสามารถเปลี่ยนหรือปรับแต่งได้สะดวก
5. จะต้องมีความปลอดภัยในการใช้งาน ทั้งในกรณีปกติและกรณีกระแสเกินไหลผ่านตัวมัน

โดยทั่วไปจะมีอุปกรณ์ป้องกันอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ฟิวส์ (Fuse)
2. เซอร์กิจเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

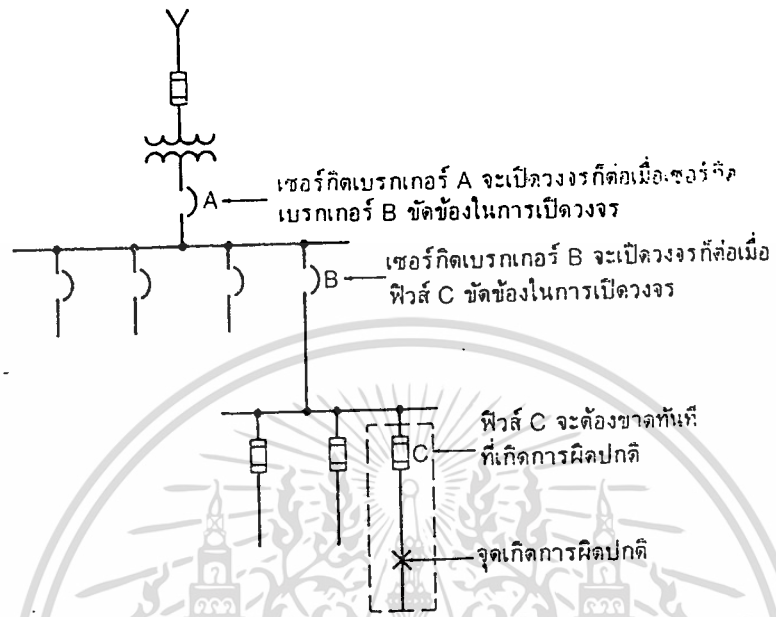
3.2 การทำงานร่วมกัน (Coordination) หมายถึง เมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดที่เกิดการผิดปกติมากที่สุดจะต้องทำงานก่อน และมีประสิทธิภาพ

3.2.1 หลักการทั่วไปของการทำงานร่วมกัน

1. ให้อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดผิดปกติมากที่สุดทำงานก่อน
2. เมื่ออุปกรณ์ป้องกันดังกล่างทำงานแล้ว อุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นไม่ควรทำงาน
3. ให้มีความต่อเนื่องของระบบไฟฟ้ามากที่สุด กล่าวคือ ไม่ควรให้อุปกรณ์ป้องกันตัดไฟฟ้าออกจากระบบบ่อยเกินความจำเป็น และไม่ควรให้โหลดขาดไฟฟ้าเป็นบริเวณกว้าง
4. เมื่อทำการโคออดิเนทแล้ว กราฟที่ได้จากการโคออดิเนทไม่ควรตัดกัน
5. เมื่ออุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดที่เกิดความผิดปกติมากที่สุดไม่ทำงานเนื่องจากความผิดปกติภายในอุปกรณ์ตัวถัดไปต้องทำงานแทนโดยเป็นแบ็คอัพ(Back up) ให้กับตัวแรก ซึ่งทำได้โดยตั้งเวลาเซฟตี้มาจิน (Safety Margin)
6. การทำงานควรเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

การทำงานร่วมกัน (Coordination) ของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้ามีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบระบบไฟฟ้า เพราะถ้าเกิดมีการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อาจจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกอย่างหยุดทำงานได้เนื่องจากการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ในการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าที่ดีนั้น จะต้องมีลักษณะการทำงานคือ เมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้จุดที่เกิดการผิดปกติมากที่สุดจะต้องทำงานก่อนอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นและต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดการผิดปกติ

3.3 อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าที่สำคัญและจะนำมาใช้ในโปรแกรมเพื่อทำการโคออร์ดิเนทมีดังนี้คือ (เอกสารอ้างอิง[6])

3.3.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)

เราสามารถที่จะแบ่งชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามค่าแรงดันที่ใช้งานออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

3.3.1.1ระบบแรงดันสูงกว่า 600 V

1. **เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบอากาศ (Air Breaker)**
2. **เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบสูญญากาศ (Vacumm Breaker)**
3. **เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบน้ำมัน (Oil Breaker)**
4. **เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัดวงจรระบบใช้แก๊สเติม (Gas-filled Breaker)**

โดยที่ทั้งสี่แบบนี้สามารถเลือกการทำงานเปิดวงจรทั้งแบบทำงานโดยตรงและแบบไม่ทำงานโดยตรงก็ได้

3.3.1.2ระบบแรงดันต่ำกว่า 600 V

1. **เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดอากาศ (Air Circuit Breaker) โดยส่วนมากแล้วจะใช้ป้องกันในระบบเมน คือเป็นเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อป้องกันสายเมนทั้งหมด**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโมลเคส (MCCB) โดยส่วนมากแล้วจะใช้ในระบบการป้องกันของสายป้อนหรือวงจรย่อย หรือระบบเมนใหญ่แต่กระแสต้องไม่สูงมากนัก

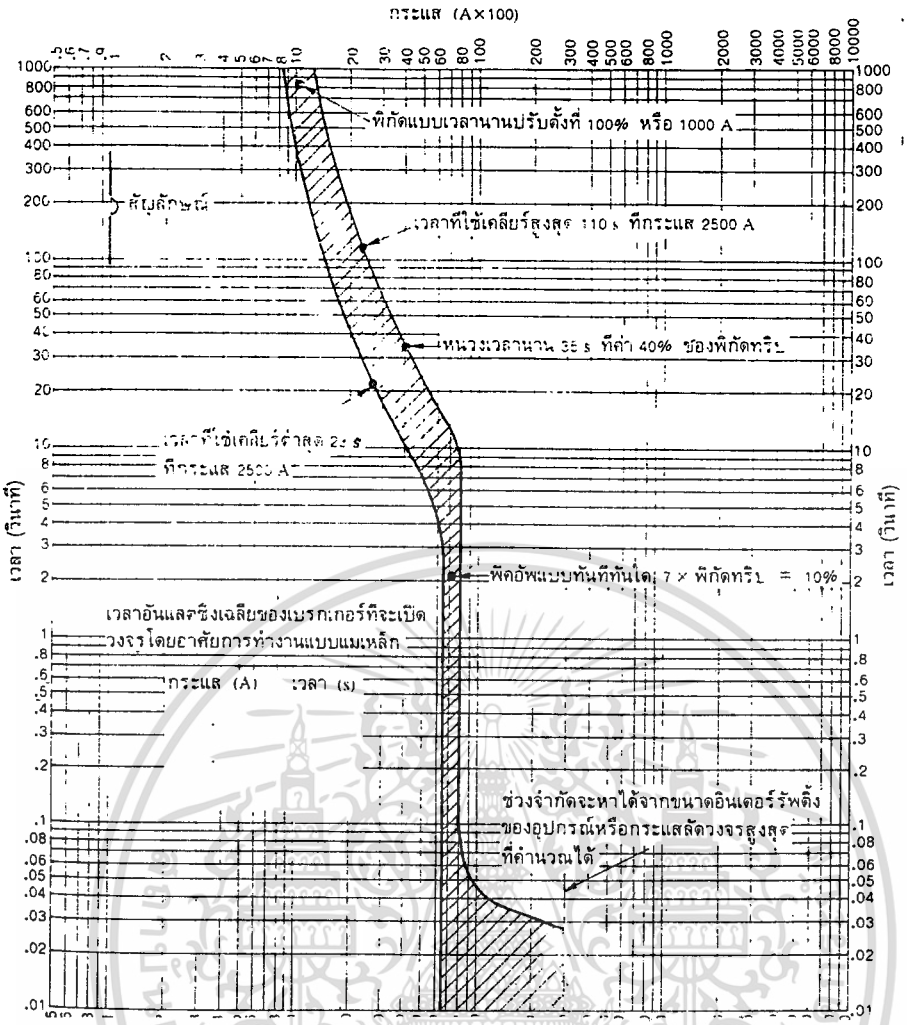
ในการแสดงคุณสมบัติประจำตัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์ สามารถแสดงได้ด้วยเส้นกราฟในสเกล log-log ซึ่งในแนวแกน y จะหมายถึง แกนของเวลา(มีหน่วยเป็นวินาที) ส่วนแนวแกน x จะหมายถึง ค่ากระแส (มีหน่วยเป็นแอมแปร์) ดังรูปที่ 3.2 รูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

ในระบบแรงดันต่ำ (Low Voltage) นั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่พบนั้นจะใช้วิธีการเปิดวงจรแบบอิเล็กโตรแมกคานิคอลทริป (Electro-mechanical trip) และ โซลิดสเตททริป (Solid state trip) ซึ่งในทั้งสองแบบนี้จะมีค่าที่ใช้พิจารณาในกราฟคุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ การหน่วงเวลาแบบเวลานาน (long time delay) , การหน่วงเวลาแบบสั้น (short time delay) , การทำงานแบบทันทีทันใด (instantaneous pickup) , อันแลตชิ่งไทม์ และพิกัดการทนต่อกระแสลัดวงจร

ในแบบ อิเล็กโตรแมกคานิคอลทริป นั้นลักษณะกราฟคุณสมบัติแสดงในรูปที่ 3.2โดยในบางรุ่นสามารถปรับค่าได้ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอากาศที่ปรับค่าได้จะมีพิกัดการปรับตั้งแต่ 80% - 160% เพื่อสะดวกในการนำมาโคออร์ดิเนท

ส่วนในแบบโซลิดสเตททริป นั้นเราสามารถปรับช่วงการทำงานได้อย่างละเอียดมากกว่า ซึ่งสามารถทำให้ได้ค่าที่แน่นอนตามต้องการมากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4

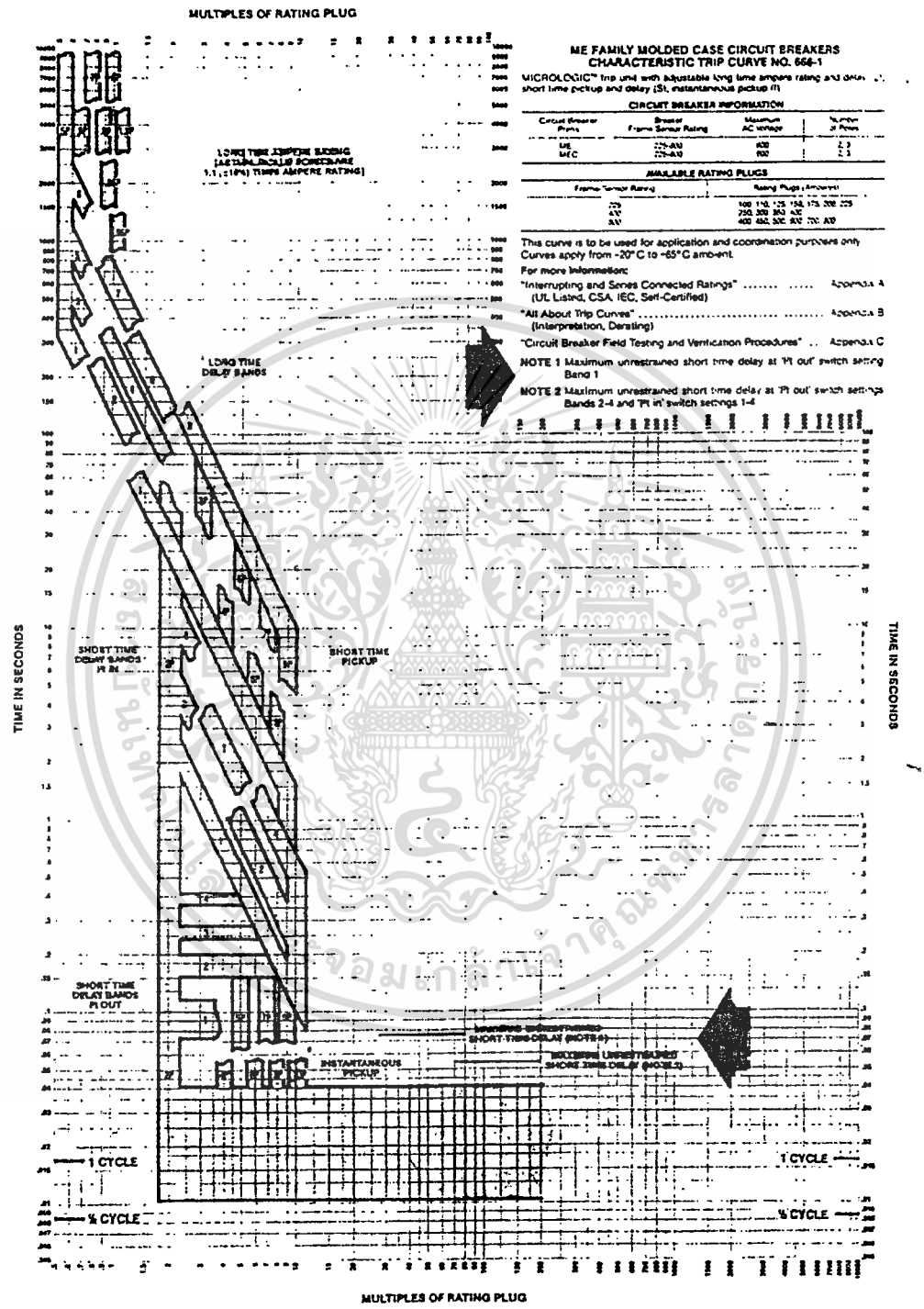
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟกระแส-เวลาของเซอร์กิตเบรกเกอร์

รูปที่ 3.3 แสดงคุณลักษณะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิดสเตททริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิดสเตททริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ฟิวส์ (Fuse)

เราสามารถอธิบายหลักการการทำงานของฟิวส์อย่างง่ายๆคือ เมื่อมีกระแสผิดปกติหรือกระแสที่เกิดจากโหลดเกินไหลผ่านตัวฟิวส์จะทำให้ไส้ฟิวส์ซึ่งอยู่ภายในหลอมละลายออก ทำให้เปิดวงจรได้โดยอัตโนมัติ ฟิวส์ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิดคือ

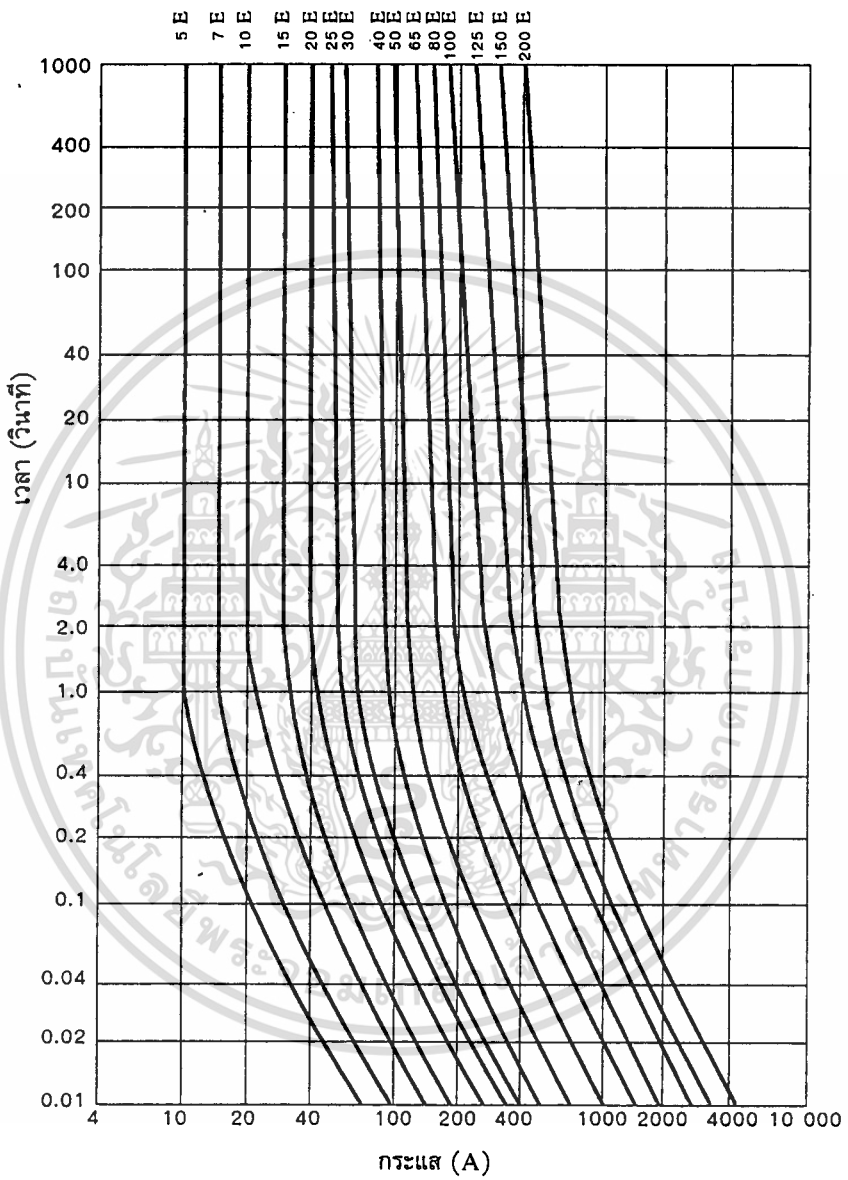
1. ฟิวส์ชนิดจำกัดกระแส
2. ฟิวส์ชนิดไม่จำกัดกระแส

โดยทั้งสองชนิดนี้จะมีพิกัดการทนต่อกระแสลัดวงจรในช่วงของการเปิดวงจรในรูปของกระแสแบบสมมาตรและก็จะสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรได้ถึง 1.6 เท่าของกระแสแบบสมมาตร

ฟิวส์ชนิดจำกัดกระแสนั้นจะมีค่าขนาดการทนต่อกระแสลัดวงจรขณะเปิดวงจรสูงมากและสามารถทำงานเปิดวงจรในกรณีที่มีการผิดปกติอย่างรุนแรงได้รวดเร็วประมาณ 1/2 ไซเคิลเท่านั้น ส่วนชนิดไม่จำกัดกระแสจะทำงานที่ 1-2 ไซเคิล

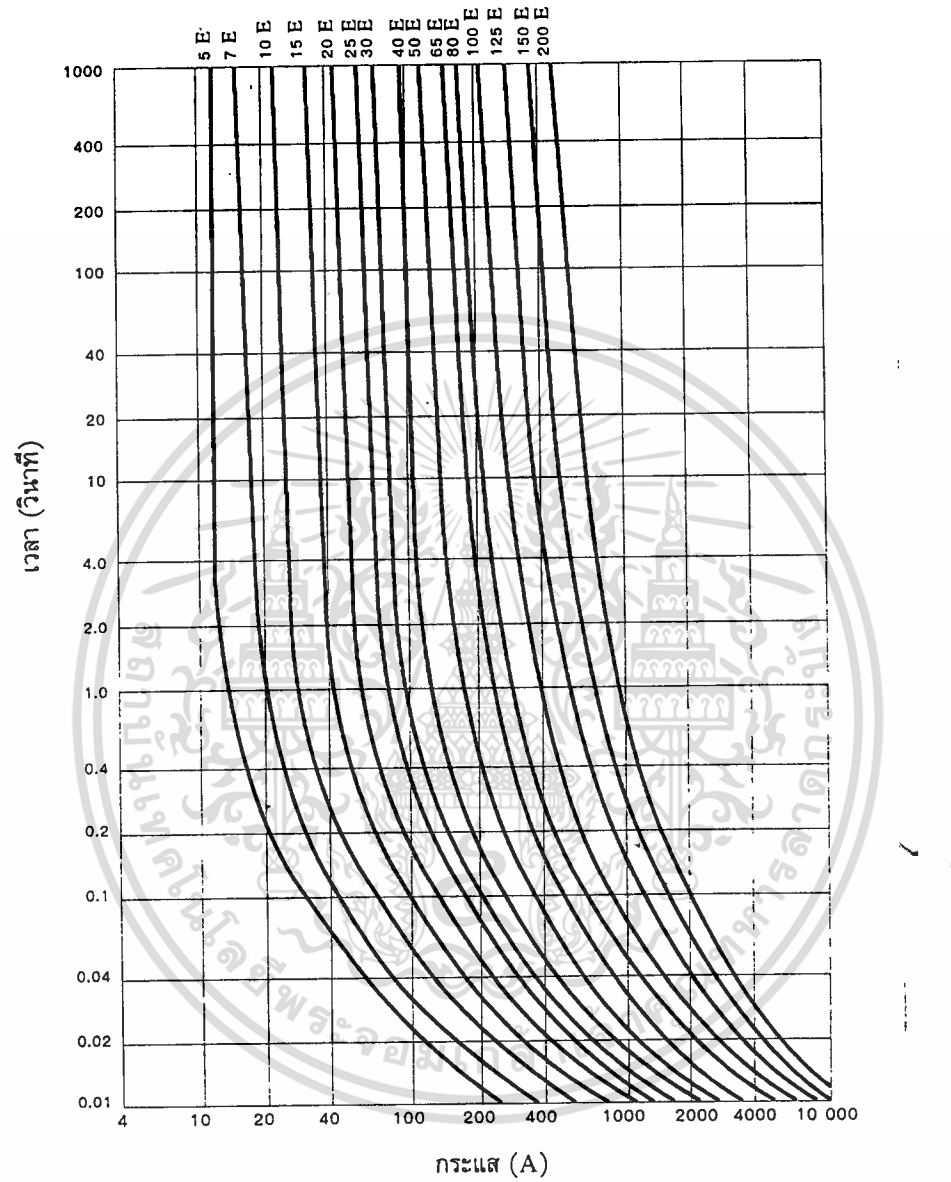
ค่าที่จำเป็นต้องรู้สำหรับคุณสมบัติของฟิวส์ตัวนั้นคือ ค่าเวลาการหลอมเหลวต่ำสุดของฟิวส์ (minimum melting) และค่าเวลาในการเปิดวงจรสูงสุด (maximum clearing) ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงเวลาในการหลอมต่ำสำหรับฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติของเวลาในการเปิดวงจรสูงสุดสำหรับฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า

สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า จะต้องประกอบไปด้วย(เอกสารอ้างอิง[3])

*3.4.1วันไลน์ไดอะแกรม*โดยจะระบุถึงชนิดและพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทุกชนิดที่ใช้ในระบบไฟฟ้า ,ข้อมูลโหลด ,ข้อมูลหม้อแปลง ,ข้อมูลสายตัวนำ ,ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิด

3.4.2 อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าชนิดพิเศษ โดยในแต่ละวงจรอาจจะมีการหาอุปกรณ์ป้องกันพิเศษขึ้น แต่ต้องเป็นไปตามกฎข้อบังคับของ NEC ,ANSI เช่น ในกรณีหม้อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง อุปกรณ์ป้องกันต้องมีการพิจารณาถึงจุด ANSI ของหม้อแปลง จุดแมกเนติคอินรัช หรือกระแสสตาร์ทของมอเตอร์

3.4.3การเลือกสเกล การเลือกสเกลนี้เป็นประโยชน์ในการเขียนคุณสมบัติประจำตัวลงในแผ่นสเกลนั้นการเลือกสเกลจะทำเพื่อสามารถให้กราฟของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ระดับแรงดันต่างกันสามารถนำมา plot ลงในกราฟสเกล log-log อันเดียวกันได้

<u>วิธีการเลือกสเกล</u> อย่างเช่นในกรณีที่ในระบบไฟฟ้าที่เราพิจารณานั้นมีระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกันดังนี้คือ 480 V ,4.16 kV ,34.4 kV สามารถทำสเกลต่างดังนี้

ถ้าให้ที่ระดับแรงดัน 4.16 kV มีตัวคูณมีค่าเท่ากับ 10 สำหรับกระแสที่ระดับแรงดันที่ระดับแรงดัน 480 V จะมีค่าของตัวคูณกระแสเท่ากับ (4160/480)* 10 มีค่าเท่ากับ 87
ที่ระดับแรงดัน 34.4 kV จะมีค่าของตัวคูณกระแสเท่ากับ (4160/34400)*10 มีค่าเท่ากับ 1.21

ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดให้ที่แรงดัน 4.16 kV มีค่าตัวคูณเท่ากับ 10 ถ้านำอุปกรณ์ป้องกันที่ระดับแรงดัน 480 V มาทำการโคออร์ดิเนท โดยที่มีค่าของกระแส AT และกระลัดวงจรเท่ากับ 100A และ 11,000A แบบสมมาตร ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนสเกลดังนี้คือ ค่ากระแส AT จะมีค่าเป็น 100/87 เท่ากับ 1.15 A และกระแสลัดวงจรจะมีค่าเป็น 11,000/87 เท่ากับ 126.4 A ดังนั้นกราฟคุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะพล็อต ลงในสเกล log-log จะมีค่า AT ที่ 1.15 และค่ากระแสลัดวงจรที่ 126.4 A

3.4.4จุดคงที่ โดยในกระดาษสเกลซึ่งเป็น log-log นั้นอุปกรณ์ป้องกันจะมีคุณสมบัติประจำตัวที่แสดงด้วยจุดคงที่ได้ เช่น กระแสแมกเนติกอินรัช ,กระแส ANSI

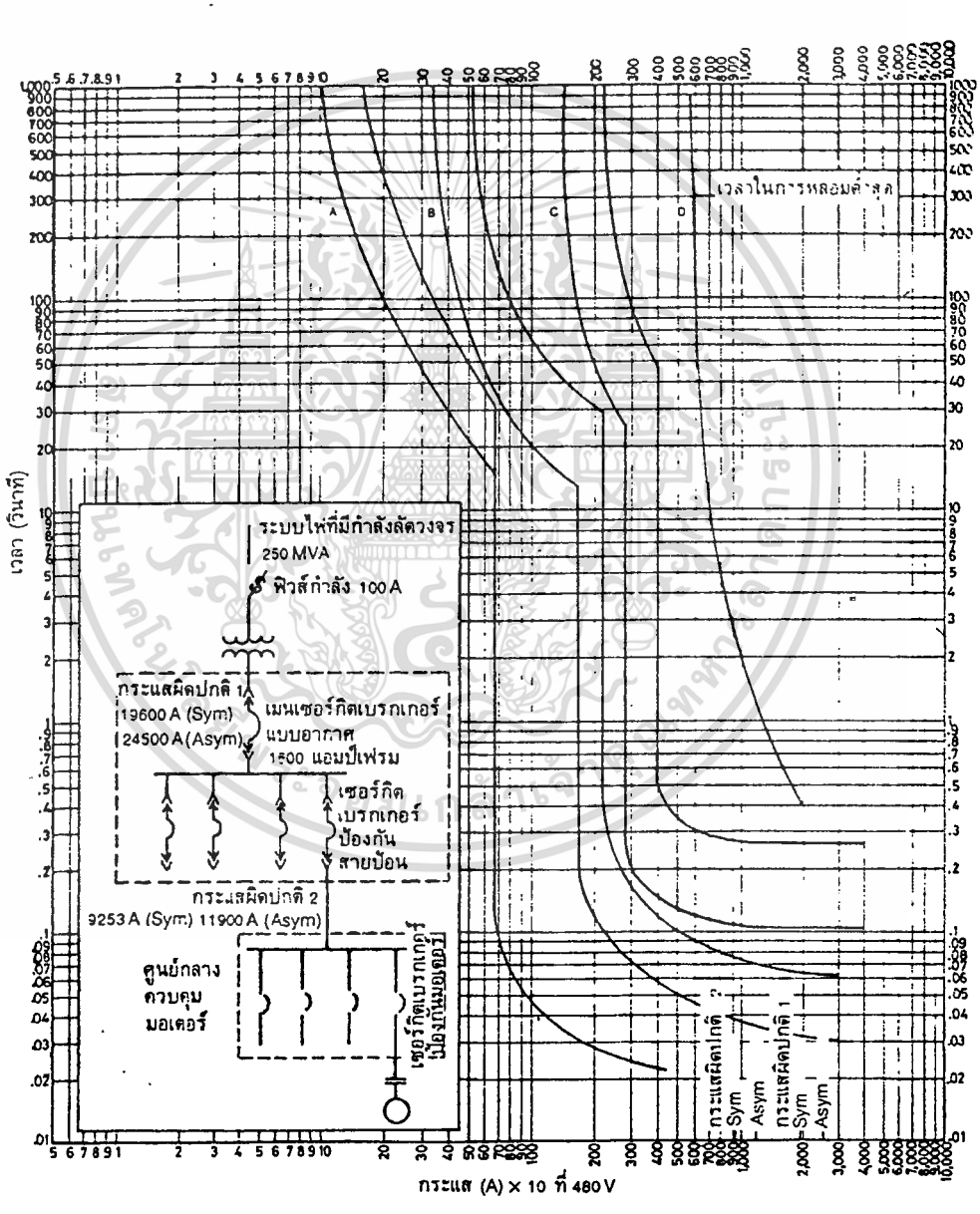
5.การเริ่มทำการออกแบบ โดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากอุปกรณ์ป้องกันของวงจรย่อยไล่ไปเรื่อยๆจนถึงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

6.คุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกัน จะต้องหาความสัมพันธ์ของระดับแรงดันไฟฟ้าเหล่านั้น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า 75 KVA 480 V/ 220 V กระแสทางด้านแรงต่ำ 225 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านแรงสูงจะมีค่าเท่ากับ 225*240/480 = 112.5 A (คิด กำลังไฟฟ้าเท่ากันทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ)

3.4.7เลือกพิกัดและการปรับของอุปกรณ์ป้องกัน โดยปกติจะเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าต่ำก่อน โดยยอมให้กระแสปกติไหลผ่านแต่จะเปิดวงจรเมื่อมีกระแสผิดปกติไหลผ่านกราฟของอุปกรณ์ป้องกันที่นำมานั้นต้องไม่ทับกัน(overlap) จึงจะใช้ได้ และอุปกรณ์ป้องกันต้องทำงานตามลำดับจากวงจรย่อยๆ ไปสู่วงจรหลัก จึงจะเป็นการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการทำงานร่วมกันของฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ข้อมูลที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า

3.5.1 ข้อมูลโหลด ค่าโวลต์แอมป์ (VA) ของโหลด กระแสโหลดสูงสุดไหลในวงจร กระแสในกรณีที่ขณะสับโหลดทันที

3.5.2 หม้อแปลง พิกัดกิโลโวลต์แอมป์ (kVA) แรงดันปฐมภูมิและทุติยภูมิ การต่อวงจร เช่น เดลต้า-เดลต้า (Delta-Delta) , (เดลต้า-สตาร์)Delta-Star เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ (%Z) กระแสแมกนีติกอินรัช ชนิดของหม้อแปลงว่าเป็นแบบแห้ง , น้ำมันท่วมเต็ม ขนาดของการจ่ายโหลดเกิน

3.5.3 มอเตอร์ แรงม้า(HP) กระแสพิกัด (A) กระแสล็อกโรเตอร์ ค่าเซอร์วิสแฟกเตอร์ เวลาในการสตาร์ท ชนิดของการสตาร์ท DOL , Star-Delta

3.5.4 กระแสลัดวงจร จะพิจารณาถึงกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีลัดวงจรแบบ 3 เฟส ควรจะทราบค่ากระแสลัดวงจรนี้ทุกตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

3.5.5 คุณสมบัติของกระแส-เวลาของอุปกรณ์ เพื่อนำไปเขียนลงในกระดาษกราฟชนิด log - log ได้

3.5.6 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ชนิด บริษัทผู้ผลิต ขนาดของ เฟรม พิกัดกระแสหรือพิกัดกระแสของอุปกรณ์ตรวจสอบ ค่าการปรับแต่งแบบหน่วงเวลานาน เวลาช้าแบบทันทีทันใด ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่ทนได้ ค่าแรงดันไฟฟ้า

3.5.7 รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ชนิด บริษัทผู้ผลิต ค่าการปรับกระแสเปิดวงจร ค่าหน่วงเวลา ค่าการปรับแต่งให้ทำงานทันทีทันใด อัตราส่วนของ CT ที่ใช้กับ Relay

3.5.8 ฟิวส์ ชนิด บริษัทผู้ผลิต พิกัดกระแสต่อเนื่อง ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสลัดวงจร

3.5.9 สายเคเบิลหรือสายตัวนำ จำนวนตัวนำ / เฟส เดินในท่อหรือเดินลอยในอากาศ ชนิดของตัวนำ ชนิดของฉนวน ขนาดกระแสสูงสุด การทนได้ต่อกระแสลัดวงจร

3.5.10บัสเวย์ ขนาดกระแสสูงสุด

3.5.11แผงย่อย สวิตซ์บอร์ด ขนาดกระแสสูงสุด

3.5.12 บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ จะให้ข้อมูล พิกัด ชนิด การปรับแต่งอุปกรณ์ป้องกัน การปรับแต่งพิเศษในอุปกรณ์บางตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 หลักการของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการโคออดิเนทเมื่ออยู่ในซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม

3.6.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์(Circuit Breaker)

1.ในการพิจารณาเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะนำมาโคออดิเนท นั้นต้องรู้ข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังนี้

- AT
- AF (> = AT)
- กระแสลัดวงจร
- แรงดันไฟฟ้า

2. ที่ตู้จ่ายไฟหลัก (Main Distribution Board) นั้น อินเตอร์รัพติ้งคาร์ปาซิตี้ (I_c) ของอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวต้องมีค่าเท่ากัน

3. ที่ทำหน้าที่เป็น ไทร์เบรกเกอร์ จะมีขนาดพิกัดเหมือนกับเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ทุกประการ

4. กรณีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวที่อยู่ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงนั้น การทนได้ของกระแสพิกัดปกติของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นยังไม่เพียงพอยังต้องสามารถทนกระแสพิกัดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงได้อีกด้วย

5.เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ป้องกันหม้อแปลง ตามมาตราฐาน NEC 450-3 (เอกสารอ้างอิง[7])

5.1 หม้อแปลงขนาด > 600 V

5.1.1 ใส่ด้านปฐมภูมิอย่างเดียว (NEC 450-3(a)(2)a)

ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีขนาดพิกัดไม่มากกว่า 300 % ของกระแสพิกัดด้านปฐมภูมิในกรณีที่ขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์สูงกว่ามาตราฐานให้ใช้ มาตราฐานที่ถัดขึ้นไป

5.1.2 ใส่ทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (NEC 450-3(a)(1))

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะทำการโคออดิเนท

%Z	ปฐมภูมิ > 600 V	ทุติยภูมิ > 600 V	ทุติยภูมิ < 600 V
Z < 6 %	600%	300%	125%
6 < Z < 10 %	400%	250%	125%

- ด้านปฐมภูมิถ้าค่าที่คำนวณได้สูงกว่า มาตราฐานที่มีให้ใช้มาตราฐานที่ต่ำลงมา
- ด้านทุติยภูมิถ้าค่าที่คำนวณได้สูงกว่า มาตราฐานที่มีให้ใช้มาตราฐานที่ต่ำลงมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 หม้อแปลงขนาด < 600 V

5.2.1ใส่เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านปฐมภูมิอย่างเดียว (NEC 450-3(b)(1))

กระแสที่พิกัด >= 9A ค่าการปรับต้องไม่น้อยกว่า 1.25 เท่าของกระแสที่พิกัด ถ้าขนาดสูงกว่าขนาดมาตราฐานให้ใช้ขนาดสูงถัดขึ้นไป

2 <= **กระแสที่พิกัด < 9A** ค่าการปรับต้องไม่น้อยกว่า 1.67 เท่าของกระแสที่พิกัด ถ้าขนาดสูงกว่าขนาดมาตราฐานให้ใช้ขนาดที่ต่ำลงมา

กระแสที่พิกัด < 2A ค่าการปรับต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของ กระแสที่พิกัด ถ้าขนาดสูงกว่าขนาดมาตราฐานให้ใช้ขนาดที่ต่ำลงมา

5.2.2ใส่เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (NEC 450-3(b)(2))

ทางด้านปฐมภูมิ ค่าการปรับไม่มากกว่า 2.5 เท่าของพิกัดกระแส ทางด้านทุติยภูมิเหมือนกับการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านปฐมภูมิอย่างเดียว

ยกเว้น กรณีที่ทางด้านปฐมภูมิมีอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินติดมาด้วยจะใช้ค่าดังนี้

ตารางที่3.2 ค่าตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีที่ทางด้านปฐมภูมิมีอุปกรณ์ป้องกันโหลด เกินติดมาด้วย

%Z	ปฐมภูมิ
%Z < 6%	ไม่มากกว่า 6 เท่า
6% < %Z < 10 %	ไม่มากกว่า 4 เท่า

6. เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะนำมาติดกรณีที่โหลดเป็น โหลดโดยรวมทั่วๆ ไป(เอกสารอ้างอิง [2])

เราจะเลือก AT = I_{rated}*1.25

โดยที่ : I_{rated} = ค่ากระแสที่พิกัด

7. เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จะนำมาใช้กับคาร์ปาซิเตอร์ (Cap Bank) (เอกสารอ้างอิง[6])

- ที่แรงดัน 400 V ค่าตัวคูณมีค่าเท่ากับ 1.95
- ที่แรงดัน 415 V ค่าตัวคูณมีค่าเท่ากับ 1.88

โดยจะนำค่าตัวคูณนี้ไปคูณกับค่ากิโลวาร์ (kVAR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันสายและสายเคเบิลตามมาตราฐาน NEC จะมีขนาด 1.25 เท่าของพิกัดกระแสของตัวนำ

9. เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีขนาดประมาณ 1.25 เท่าของพิกัดกระแส

3.6.2 ฟิวส์(Fuse)

1. ในการพิจารณาฟิวส์ที่จะนำมาโคออดิเนท นั้นต้องรู้ข้อมูลฟิวส์ดังนี้(เอกสารอ้างอิง[6])

- ขนาดกระแสของฟิวส์
- กระแสลัดวงจร
- แรงดันไฟฟ้า

2.ฟิวส์ที่ใช้ป้องกันหม้อแปลง ตามมาตราฐาน NEC 450-3 (เอกสารอ้างอิง[7])

2.1 หม้อแปลงขนาด > 600 V

2.1.1 ใส่ฟิวส์ทางด้านปฐมภูมิอย่างเดียว (NEC 450-3(a)(2)a) ขนาดของฟิวส์ต้องไม่มากกว่า 250 % ของกระแสที่พิกัดถ้าขนาดที่คำนวณได้เกินกว่ามาตราฐานที่มีให้ใช้ขนาดถัดขึ้นไปใส่ฟิวส์ทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (NEC 450-3(a)(1))

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าตัวคูณของฟิวส์ที่ใช้ในการโคออดิเนท

%Z	ปฐมภูมิ > 600 V	ทุติยภูมิ > 600 V	ทุติยภูมิ < 600 V
Z < 6 %	300%	250%	125%
6 < Z < 10 %	300%	225%	125%

- ด้านปฐมภูมิถ้าค่าที่คำนวณได้สูงกว่า มาตราฐานที่มีให้ใช้มาตราฐานที่ต่ำลงมา
- ด้านทุติยภูมิถ้าค่าที่คำนวณได้สูงกว่า มาตราฐานที่มีให้ใช้มาตราฐานที่ต่ำลงมา

2.2 .หม้อแปลงขนาด < 600 V

2.2.1. ใส่ฟิวส์ด้านปฐมภูมิอย่างเดียว (NEC 450-3(b)(1))

- กระแสที่พิกัด >= 9A ค่าการปรับต้องไม่น้อยกว่า 1.25 เท่าของ กระแสที่พิกัด ถ้าขนาดสูงกว่าขนาดมาตราฐานให้ใช้ขนาดสูงถัดขึ้นไป
- 2 <= กระแสที่พิกัด < 9A ค่าการปรับต้องไม่น้อยกว่า 1.67 เท่าของกระแสที่พิกัด ถ้าขนาดสูงกว่าขนาดมาตราฐานให้ใช้ขนาดที่ต่ำลงมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสที่พิกัด < 2A ค่าการปรับต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของ กระแสที่พิกัด ถ้าขนาดสูงกว่าขนาดมาตราฐานให้ใช้ขนาดที่ต่ำลงมา

2.2.2. ใส่ฟิวส์ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (NEC 450-3(b)(2))

- ทางด้านปฐมภูมิ ค่าการปรับไม่มากกว่า 2.5 เท่าของพิกัดกระแส
- ทางด้านทุติยภูมิ เหมือนกับการใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ด้านปฐมภูมิอย่างเดียว ยกเว้น กรณีที่ทางด้านปฐมภูมิมีอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินติดมาด้วยจะใช้ค่าดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวคูณของเซอร์กิตเบรกเกอร์กรณีที่ทางด้านปฐมภูมิมีอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินติดมาด้วย

%Z	ปฐมภูมิ
%Z < 6%	ไม่มากกว่า 6 เท่า
6% < %Z < 10 %	ไม่มากกว่า 4 เท่า

หมายเหตุ ในกรณีที่ต้องการใส่อุปกรณ์ป้องกันทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมินั้นถ้าจะใส่เซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมด้านปฐมภูมิและใส่ฟิวส์ด้านทุติยภูมิหรือสลับกันระหว่างฟิวส์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ก็สามารถทำได้ โดยดูข้อกำหนดค่าของตัวคูณในหัวข้อของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ดังข้างต้น

3. ฟิวส์ที่ใช้ป้องกันสายและสายเคเบิล ตามมาตราฐาน IEEE std 242-1986 (เอกสารอ้างอิง[3]) จะมีขนาด 300-400% ของพิกัดกระแสของตัวนำ

4. ขนาดฟิวส์ที่จะมาป้องกัน Capacitor (เอกสารอ้างอิง[6])

- ที่แรงดัน 400 V จะมีค่าตัวคูณเท่ากับ 2.38
- ที่แรงดัน 415 V จะมีค่าตัวคูณเท่ากับ 2.30

โดยจะนำค่าตัวคูณนี้ไปคูณกับค่ากิโลวาร์ (kVAR)

3.6.3 *หม้อแปลง(Transformer)*

3.6.3.1 การคำนวณหม้อแปลง

- กระแสพิกัดทางด้านปฐมภูมิ = VA / $\sqrt{3}$ *V_{pri}
- กระแสพิกัดทางด้านทุติยภูมิ = VA /$\sqrt{3}$ *V_{sec}

3.6.3.2. การคำนวณอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงในกรณีที่เป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากลาง (Medium Voltage) เราจะพิจารณาค่าที่จุดอินรัช (Inrush Point) และจุดแอนซี (ANSI Point) ด้วยส่วนในกรณีแรงดันไฟฟ้าต่ำ (Low Voltage) ไม่ต้องนำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หาจุดอินรัช

Inrush Point คือ จุดที่เรานำมาพิจารณาในการหาขนาดของฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้กับหม้อแปลงโดยพิจารณาจากกระแสอินรัช(Inrush Current)ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต่อหม้อแปลงเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยรวดเร็ว

กระแสแมกนีติกอินรัช = กระแสพิกัดด้านที่เราจะใส่ อุปกรณ์ป้องกัน * ค่าคงที่(ใช้ค่า K = 12)

เวลาของจุดอินรัชพิจารณาที่ 0.1 วินาที

2. หาจุดแอนซี

ANSI Point คือ จุดที่เรานำมาพิจารณาในการหาขนาดของฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้กับหม้อ แปลงโดยพิจารณาจากกระแสแอนซี ที่ได้ปรับค่าแล้ว

กระแสแอนซี = (กระแสพิกัดที่จะใส่ฟิวส์หรือเบรกเกอร์ * 100) / $Z_{p.u.}$

กระแสแอนซี ที่ได้ปรับค่า = ค่าจากตาราง 3.7 * I_{ANSI}

เวลาของจุดแอนซีพิจารณาที่ 2 วินาที

3. คำนวณหาค่าอุปกรณ์ป้องกันกระสูงสุดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงตามมาตราฐาน NEC 450 –3 (เอกสารอ้างอิง[7])
4. ในการพิจารณากราฟคุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ของหม้อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากลางนั้นกราฟของอุปกรณ์ป้องกันต้องอยู่ระหว่างจุดแอนซีและอินรัช

3.6.4 มอเตอร์(Motor)

1. การคำนวนอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์พิจารณาตามตารางที่ 3.6 ตามมาตราฐาน NEC ตารางที่ 430-152 (เอกสารอ้างอิง[7])

ขนาดอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ = กระแสพิกัด*ค่าตามตารางที่ 3.5

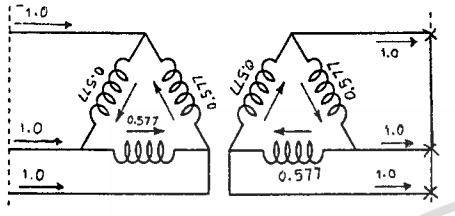
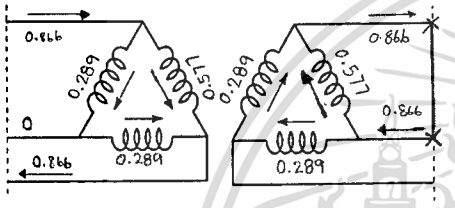
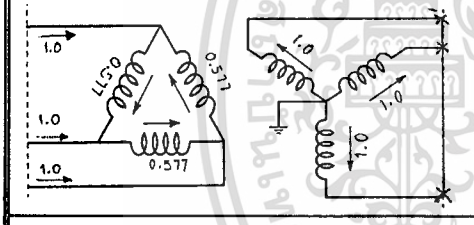
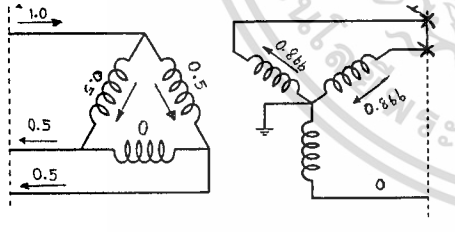
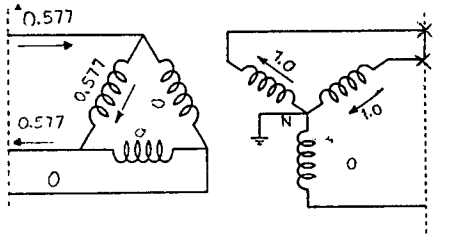
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 Maximum Rating or Setting of Motor Branch-Circuit , Short-Circuit , Ground-Fault Protective Device

Type of Motor	Percent of Full load current			
	Nontime Delay Fuse	Dual Element (Time Delay) Fuse	Instantaneous Trip Breaker	Inverse Time Breaker
Single Phase Motor	300	175	800	250
AC Polyphase motors other than Wound rotor Squirrel Cage Other than Design E	300	175	800	250
Design E	300	175	1100	250
Synchronous	300	175	800	250
Wound Rotor	150	150	800	150
Direct-Current (Constant Voltage)	150	150	250	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ผลของการเกิดผิดปกติที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆซึ่งจะมีผลต่อการป้องกันหม้อแปลงและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

การต่อ		การเกิดผิดปกติ	ความต้องการในการที่จะปรับแต่งเพื่อที่จะให้บรรลุถึงการป้องกันหรือการทำงานร่วมกัน
ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ		
		3-ϕ	- จะไม่มีการปรับแต่งในคุณสมบัติประจำตัว (เวลากระแส) ของอุปกรณ์ป้องกันที่จะใช้ในการทำงานร่วมกัน - จะไม่มีการปรับแต่งกระแส ANSI withstand
		L - L	- จะไม่มีการปรับแต่งในคุณสมบัติประจำตัว (เวลากระแส) ของอุปกรณ์ป้องกันที่จะใช้ในการทำงานร่วมกัน - สำหรับอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรจะคูณกระแส ANSI withstand ด้วย 0.866
		3-ϕ	- จะไม่มีการปรับแต่งในคุณสมบัติประจำตัว (เวลากระแส) ของอุปกรณ์ป้องกันที่จะใช้ในการทำงานร่วมกัน - จะไม่มีการปรับแต่งกระแส ANSI withstand
		L - L	- คุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์ที่ติดตั้งทางด้านปฐมภูมิจะถูกหักออกเป็นจำนวน 13.4 % ของกระแสมาร์จิน ดังนั้นกระแสจะถูกคูณด้วยค่า 0.866 และคุณสมบัติของกระแสที่ได้ใหม่จะถูกเขียนลงทางด้านซ้ายของอุปกรณ์ป้องกันทางด้านปฐมภูมิเดิมที่มีอยู่แล้ว - จะไม่มีการปรับแต่งในกระแส ANSI withstand
		L – N	- จะไม่มีการปรับแต่งในคุณสมบัติประจำตัว (เวลากระแส) ของอุปกรณ์ป้องกันที่จะใช้ในการทำงานร่วมกัน - สำหรับการป้องกันการลัดวงจร จะคูณกระแส ANSI withstand ด้วย 0.577

หมายเหตุ ค่ากระแสจะเป็นค่าเพอร์ยูนิตของกระแสที่เกิดในกรณีทรีเฟสฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 โฟลว์ชาร์ทแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีการออกแบบและการใช้โปรแกรม

4.1 บทนำ

การเขียนโปรแกรมการหาขนาดของกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์นั้น จำเป็นต้องทราบข้อมูลหลักอยู่ 3 อย่างคือ

1. ข้อมูลของกระแสลัดวงจร (Short Circuit Data Base)
2. ข้อมูลของรีเลย์ป้องกัน (Protective Relay Data Base)
3. ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Equipment Data Base)

4.2 ขั้นตอนการออกแบบหาขนาดของกระแสลัดวงจรโดยการอ้างอิงมาตรฐานของ ANSI/IEEE Std 141-1986 ของโปรแกรม

1. เมื่อมีการวาดแบบของระบบไฟฟ้า (Single line diagram) ลงในโปรแกรม
2. โปรแกรมจะมีอุปกรณ์ให้ผู้ออกแบบเลือกคือ
   2.1 ระบบไฟฟ้า (Utility System)
   2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) สามารถมีหม้อแปลงเปลี่ยนระดับแรงดันได้ 1 ระดับเท่านั้น
   2.3 มอเตอร์ (Motor)
   2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)
   2.5 โหลดของระบบไฟฟ้า
   2.6 คาปาซิเตอร์ (Capacitor or Cap bank , kVAR)
   2.7 สาย (Feeder)
3. เมื่อผู้ออกแบบได้ทำการออกแบบระบบไฟฟ้าแล้ว จะต้องป้อนค่าต่างๆของอุปกรณ์นั้นได้แก่ ระดับแรงดันไฟฟ้า , กำลังไฟฟ้าของระบบ (MVA) , ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA) , เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (%Z) , ค่าซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์ , ค่ารีแอกแตนซ์ต่ออิมพีแดนซ์ (X/R)ของสาย , ชนิดสาย ความยาว และ พื้นที่หน้าตัดของสาย , ขนาดโหลด (kW) , ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลด (pf.) , ขนาดของกำลังเครื่องจักรไฟฟ้า (kW)
4. เมื่อมีการรับค่าต่าง ๆ แล้ว โปรแกรมจะมีขั้นตอนในการคำนวณโดยแยกการพิจารณาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 กำหนดเบสกำลัง , กำหนดเบสแรงดันไฟฟ้า , หาเบสอิมพีแดนซ์ , หาเบสกระแส

4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าหาค่ากระแสลัดวงจรจากสมการที่ 2.15 และ 2.16 หากไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (%Z) สามารถพิจารณาจากตารางที่ 2.11

4.3 ค่าอิมพีแดนซ์และรีซีสแตนซ์ของสายสามารถทราบค่าได้จากการเปิดตารางที่ 2.9 และ 2.10

4.4 ค่าของซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้าต่างๆ สามารถทราบค่าได้จากตารางที่ 2.2 , 2.3 , 2.4 , 2.5 และ 2.8 และสามารถ หาค่า รีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์ (X/R) จากรูปที่ 2.16 , 2.17 , 2.18

4.5 โหลดของระบบไฟฟ้า สามารถหาค่ารีซีสแตนซ์และรีแอกแตนซ์จากสมการที่ 2.8 , 2.9 , 2.10 , 2.11

โดยที่ทุกขั้นตอนในข้อ 4 จะพิจารณาเป็นเปอร์ยูนิตทั้งหมด

5. เมื่อทราบค่ารีแอกแตนซ์และรีซีสแตนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ แล้ว เปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตทั้งของรีแอกเตอร์และรีซีสเตอร์ให้อยู่ในเบสเดียวกัน

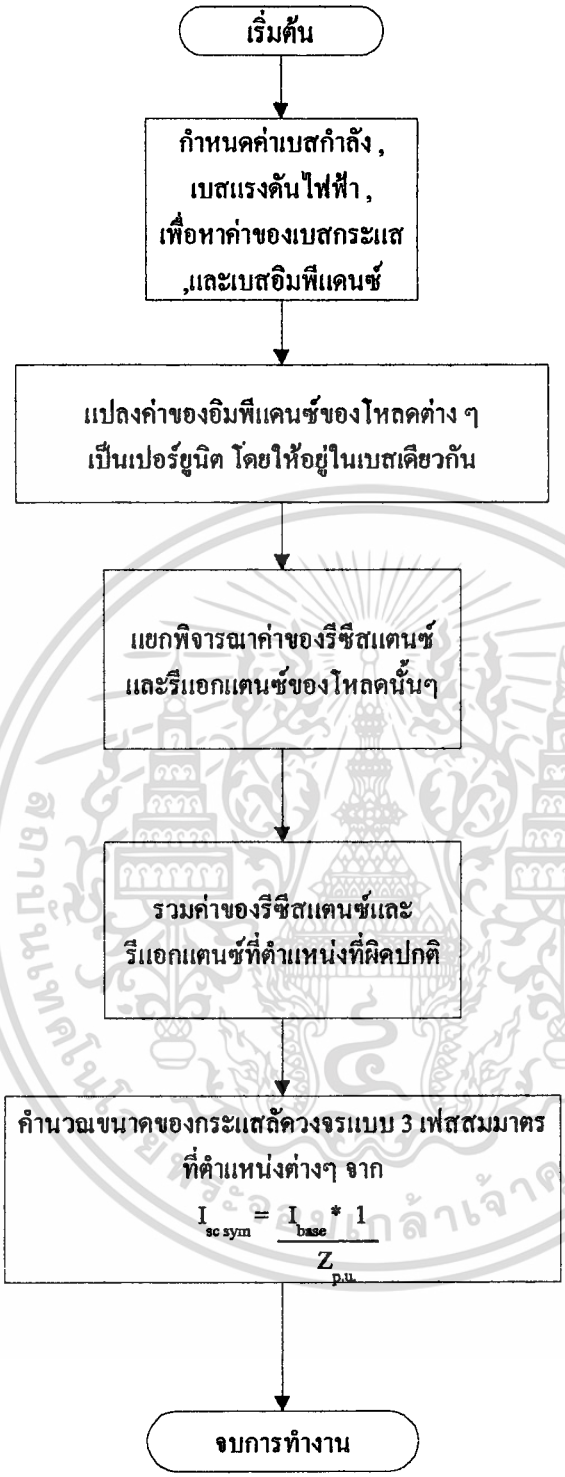
6. เมื่อทราบค่าเปอร์ยูนิตของรีซีสแตนซ์และรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งระบบแล้วจะทำการยุบวงจรโดย จะแยกพิจารณารีซีสแตนซ์และรีแอกแตนซ์ รีซีสแตนซ์ที่อยู่บนบรานซเดียวกันจะขนานกัน และที่อยู่บนไลน์เดียวกันจะอนุกรม

7. หลังจากที่ยุบค่าของรีซีสแตนซ์และรีแอกแตนซ์ แล้ว จะหาขนาดของกระแสลัดวงจรบนบรานซนั้น ๆ จากสมการที่ 2.13 , 2.14

8. แสดงค่าของกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากขั้นตอนทั้งหมดจะสามารถทราบค่ากระแสลัดวงจรตามจุดต่าง ๆ ของ ระบบไฟฟ้าที่ออกแบบได้ โดยจะแสดงเป็นโฟลว์ชาร์ทรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการคำนวณหากระแสลัดวงจรของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

โปรแกรมการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันจะพิจารณา 2 กรณีคือ

1. การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันแบบผู้ออกแบบเลือกเอง
   1.1 โปรแกรมจะคำนวณค่ากระแสที่พิกัดและกระแสลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่างๆ
   1.2 ค่าของกระแสที่พิกัดและกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโหลด จะถูกเก็บไว้ในรหัสของอุปกรณ์ป้องกัน
   1.3 เมื่อมีการเลือกชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน โปรแกรมเข้าไปในฐานข้อมูล (Data base) ที่เก็บข้อมูลอุปกรณ์ป้องกัน เก็บเป็นไฟล์ (File of record)
   1.4 เมื่อดับเบิ้ลคลิกไปที่รุ่นของอุปกรณ์ป้องกันจะแสดงกราฟคุณลักษณะแต่ละชนิดของเซอร์กิจเบรกเกอร์ ในกราฟ ล็อก – ล็อก (log – log) ที่มีการพล็อตในลักษณะคู่ลำดับ X , Y ซึ่งจะเก็บเป็นอาร์เรย์ (Array) ซึ่งอยู่ในไฟล์อีกทีหนึ่ง
2. การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันแบบอัตโนมัติ
   2.1 โปรแกรมจะคำนวณค่ากระแสที่พิกัดและกระแสลัดวงจร ณ ตำแหน่งต่างๆ
   2.2 ค่าของกระแสที่พิกัดและกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโหลด จะถูกเก็บไว้ในรหัสของอุปกรณ์ป้องกัน
   2.3 โปรแกรมทำการเลือกค่าตัวคูณตามมาตราฐาน NEC 450-3 ซึ่งเป็นมาตราฐานสำหรับเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมมาคูณกับกระแสที่พิกัด
   2.4 นำรายการอุปกรณ์ที่เลือกไว้มาแสดงในรายงานซึ่งสามารถบันทึกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วิธีการใช้โปรแกรม

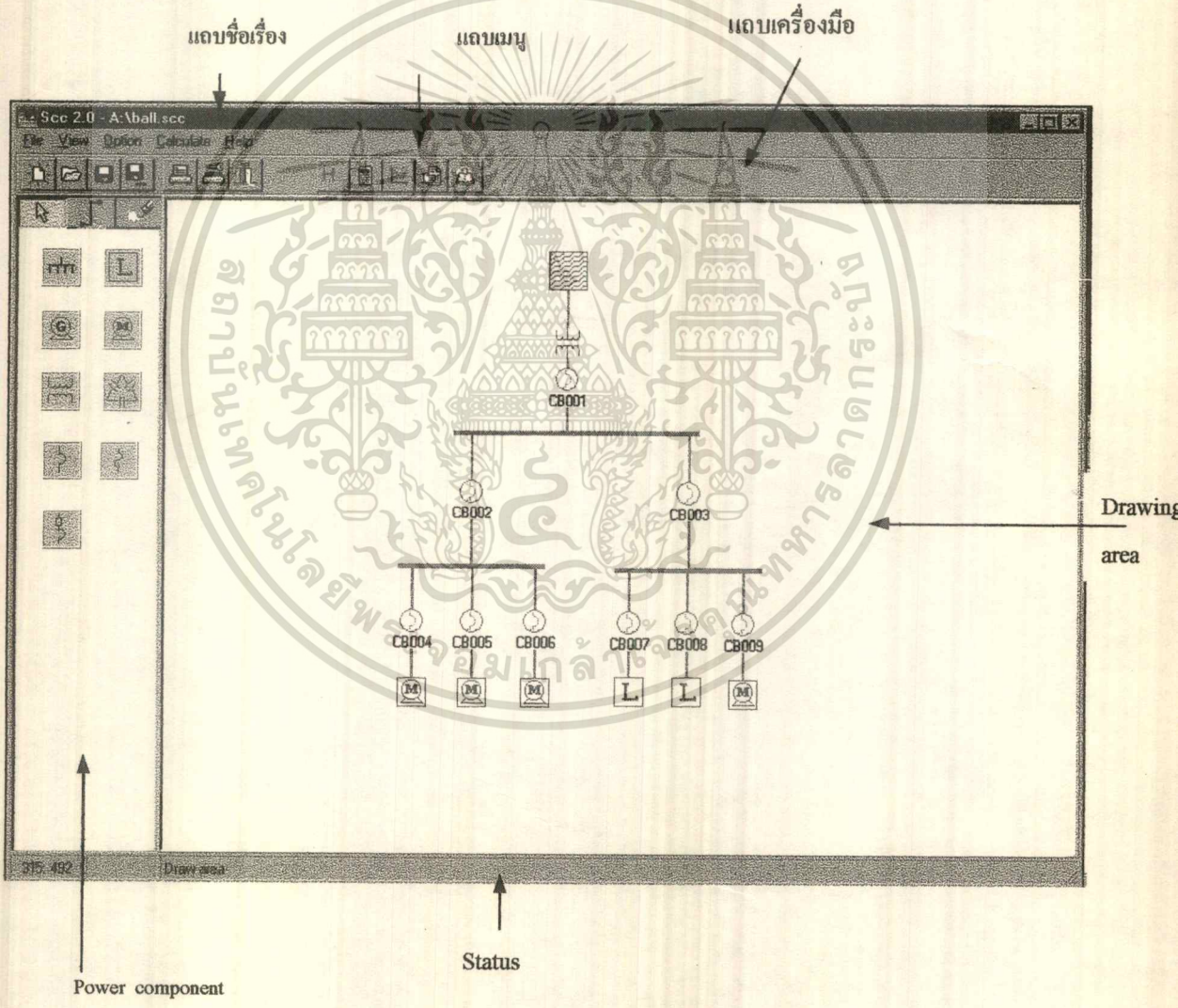
ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

4.4.1 ส่วนในการวาดวงจร ซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม และการคำนวณหากระแสลัดวงจร, กระแสที่พิกัดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ

4.4.2 ส่วนในการแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เช่น เซอร์กิจเบรกเกอร์ หรือ ฟิวส์ เป็นต้น

4.4.1 ส่วนในการวาดวงจรซิงเกิลไลน์ (single line diagram) และการคำนวณหากระแสลัดวงจร กระแสที่พิกัดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ส่วนประกอบของหน้าต่าง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงหน้าจอของโปรแกรมการคำนวณหากระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบชื่อเรื่อง (title bar)

เป็นส่วนที่แสดงชื่อของโปรแกรม และแสดงชื่อของไฟล์

แถบเมนู (menu bar)

เป็นส่วนคำสั่งทั้งหมด มี hot key ระบุต่อท้ายด้วย

แถบเครื่องมือ (tool bar)

เป็นส่วนแสดงคำสั่งที่ใช้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

ช่วงแรก ประกอบไปด้วยคำสั่งที่ใช้โดยทั่วไป เช่น การสร้างข้อมูลใหม่ , การเปิดข้อมูลเก่า , การบันทึกข้อมูล เป็นต้น

ช่วงที่สอง ประกอบไปด้วยคำสั่งเฉพาะในโปรแกรมนี้ อาทิเช่น

คำสั่งการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร และกระแสพิกัดจากวงจรไฟฟ้า

คำสั่งการเข้าสู่ส่วนของการโคออดิเนท (Coordination)

คำสั่งในการตรวจสาเหตุในการเกิดการคำนวณผิดพลาด

ใช้ในการบอกความถี่ของระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ในการวาดวงจร (drawing component)

pointer เป็นที่ใช้ชี้เลือกอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ใช้ลากอุปกรณ์ที่ต้องการมาวางในพื้นที่ที่ใช้วาด (draw area)

line เป็นสาย (feeder) ที่ใช้เชื่อมระหว่างอุปกรณ์ กับอุปกรณ์

delete เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลบส่วนที่ไม่ต้องการออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทางไฟฟ้า (power component)

system เป็นระบบทางไฟฟ้าถูกกำหนดให้มีเพียง 1 ระบบต่อวงจร

transformer หม้อแปลง ถูกกำหนดให้มีเพียง 1 ตัว ต่อวงจร

motor เป็นทั้งอินดักชันและซิงโครนัส (Induction & Synchronous)

generator เป็นการออกแบบเพื่อจ่ายไฟสำรอง

capacitor เป็นตัวใช้ในการปรับปรุงค่า power factor

load อาทิเช่น อุปกรณ์แสงสว่าง เป็นต้น

bus bar

แถบสถานะ (status bar)

บอกสถานะปัจจุบัน

ตำแหน่งพิกัดของ pointer

บอกค่า I_{sc} และ I_{rated}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 วิธีการใช้

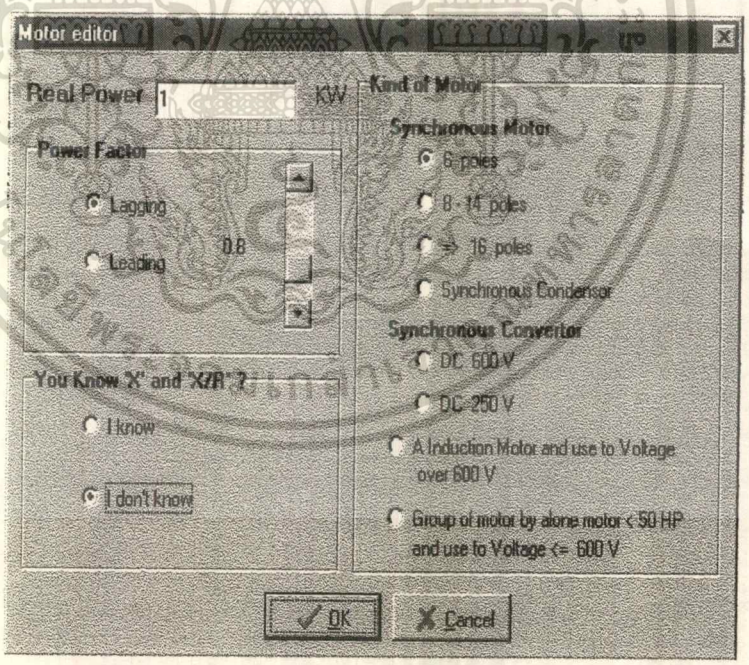
1. ใช้ ตัวชี้ (pointer) ในการลากอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาวางในพื้นที่ที่ใช้วาด (อาจดูจากที่ status bar ก็ได้)

2. ใช้ Line (ใช้ ตัวชี้ (pointer) ไปคลิ๊กที่รูปสาย)ในการเชื่อมอุปกรณ์ทางไฟฟ้าใช้แทนเป็นสาย (feeder)ในกรณีที่ต้องการลบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าบางตัวให้ใช้ delete (ใช้ ตัวชี้ (pointer) ไป คลิ๊ก ที่รูปยางลบ) อาจใช้วิธี คลิ๊กเมาส์ทางขวาแล้วเลือก Pointer , Line , Delete ก็ได้

3. ป้อนข้อมูลของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าโดยการ ใช้ ชี้ไปที่อุปกรณ์ทางไฟฟ้าแล้วดับเบิ้ลคลิ๊ก โดยจำแนกออกเป็น

3.1 ข้อมูลทั่วไปที่ต้องรู้ (I know) เช่น ค่า โวลต์แอมป์ (VA) , กิโลวัตต์ (kW) , pow เพาว์เวอร์แฟกเตอร์ (pf.) ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า , ค่าขนาดและความยาวของสายตัวนำ , ค่าแรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง เป็นต้น

3.2 ข้อมูลจำเพาะที่อาจไม่ทราบก็ได้ (I don't know) เช่น ค่าซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์(Subtransient Reactance) ของมอเตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (motor & generator) , ค่ารีแอกแตนซ์ และ รีซีสแตนซ์ ของสายตัวนำ เป็นต้น



รูปที่ 4.3 แสดงการป้อนค่าของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

4. ใช้ ตัวชี้ (pointer) ไปคลิ๊ก ที่รูปเครื่องคิดเลข (หรือ กด F9) เพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่า กระแสลัดวงจร และกระแสที่พิกัดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าใช้ ตัวชี้ (pointer) ชี้ที่สาย (feeder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะแสดงค่าของกระแสลัดวงจร และกระแสที่พิกัดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า (แสดงที่ status bar ด้วย)

5. ในการกรณีที่เกิดการคำนวณผิดพลาดขึ้นโปรแกรมจะแสดงให้เห็น โดยดูข้อผิดพลาดได้ที่ Report (ใช้ ตัวชี้ (pointer) ไป คลิ๊ก ที่รูปรายงาน)

4.4.1.2 เงื่อนไขในการใช้โปรแกรม (condition)

1. ไม่สามารถวาดหม้อแปลงได้มากกว่า 1 ตัว ในกรณีที่ต้องการลดแรงดันไฟฟ้าหม้อแปลงหรือมีหม้อแปลง 2 ตัวช่วยจ่ายโหลด เนื่องจากผู้เขียนโปรแกรมเห็นว่าในปัจจุบันการต่อหม้อแปลงลักษณะดังกล่าวไม่นิยมปฏิบัติ เพราะปัจจุบันระบบไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือมากขึ้น อีกทั้งระบบ ATS (Automatics Transfer Switch) มีความรวดเร็วในการทำงานและมีราคาถูกลงกว่าแต่ก่อนด้วย

2.จากข้อ 1. ทำให้การคิดคำนวณหาค่าต่าง ๆ จะกระทำที่แรงดันระดับเดียวเท่านั้นเพราะมีหม้อแปลงเพียงตัวเดียวในระบบเท่านั้น

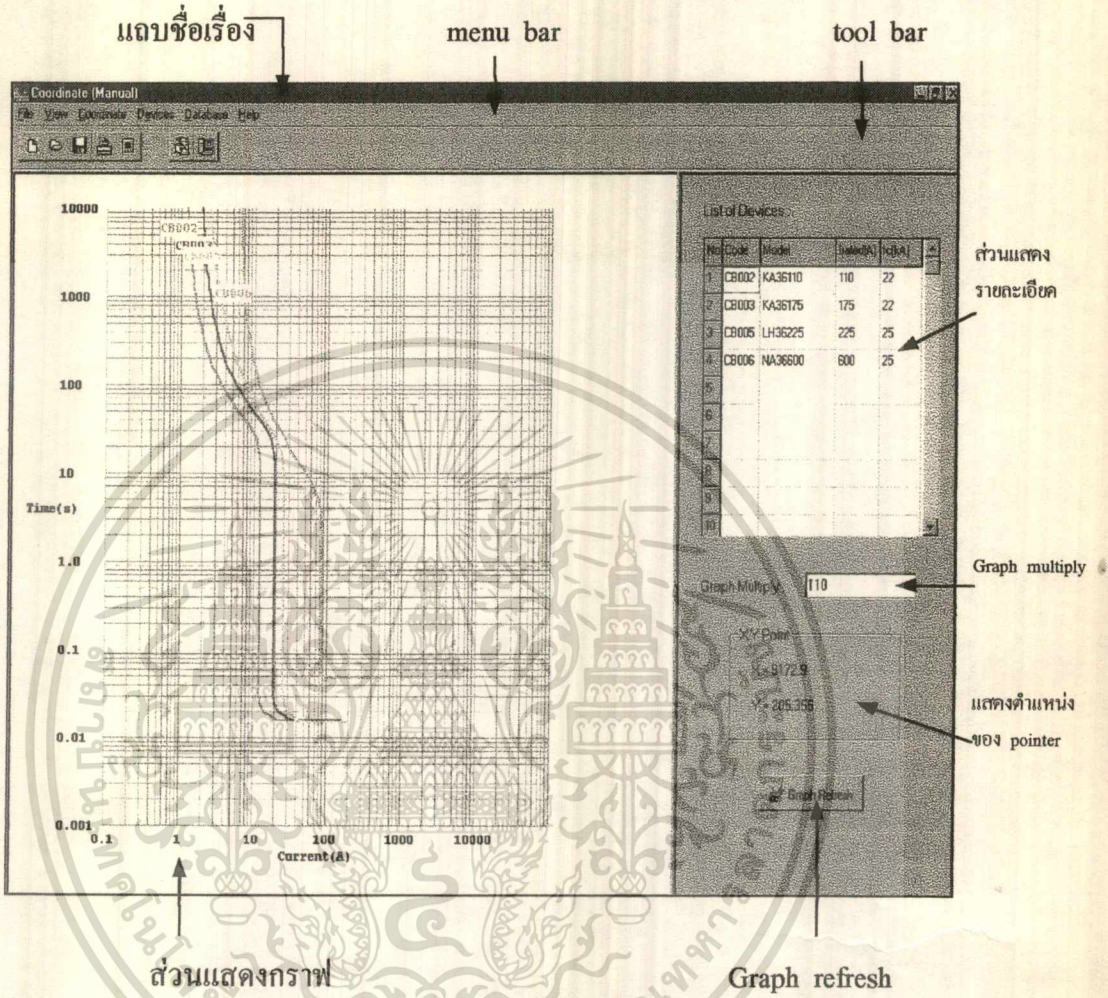
3.การลากสาย (feeder) ระหว่างบัสบาร์ ไม่สามารถลากมา 2 เส้นได้ โดยโปรแกรมจะแจ้งว่า "Fault" ออกมา

4.ค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะใช้เป็นพิจารณาเป็นเฟส ในขณะที่ค่าโวลต์แอมป์ (VA) , กิโลวัตต์ (kW) จะใช้เป็นลักษณะต่อ 3 เฟส

5.เนื่องจากค่าจำเพาะนั้นผู้ใช้ส่วนใหญ่ไม่สามารถระบุได้ ดังนั้นโปรแกรมจะประมาณค่าเหล่านั้นตามข้อมูลที่ผู้ใช้ทราบ โดยอ้างอิงจากมาตรฐานตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ส่วนของการแสดงการโคออดิเนท (Coordinate) อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 แสดงหน้าจอการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

โดยหน้าต่างของการแสดงการโคออดิเนทนี้นั้นจะมีส่วนที่คล้ายคลึงกันบ้างกับส่วนแรก ซึ่ง มีส่วนที่แตกต่างกันดังนี้

menu bar แสดงคำสั่งโดยรวม ซึ่งมีโปรแกรมนี้คือ

device ใช้ในการเรียกข้อมูลกราฟของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์

database ใช้ในการแก้ไขหรือเพิ่มข้อมูลของกราฟคุณลักษณะ (Characteristics)

tool bar แสดงคำสั่งที่ใช้บ่อย ๆ ที่แตกต่างออกไปได้แก่

manual เป็นการทำการโคออดิเนท (Coordinate) โดยผู้ใช้เอง

automatics เป็นการทำโคออดิเนท (Coordinate) แบบอัตโนมัติ

ส่วนแสดงกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เช่น รุ่น (Model) , รหัส(Code) , AT, อินเทอร์รัพติ้ง คาปาซิตี้ (Interrupting Capacity , I_c)

ส่วนแสดงตำแหน่งพิกัดของตัวชี้ (pointer)

Graph refresh เป็นการเคลียร์ข้อมูลและเส้นกราฟในส่วนการแสดงกราฟทั้งหมด

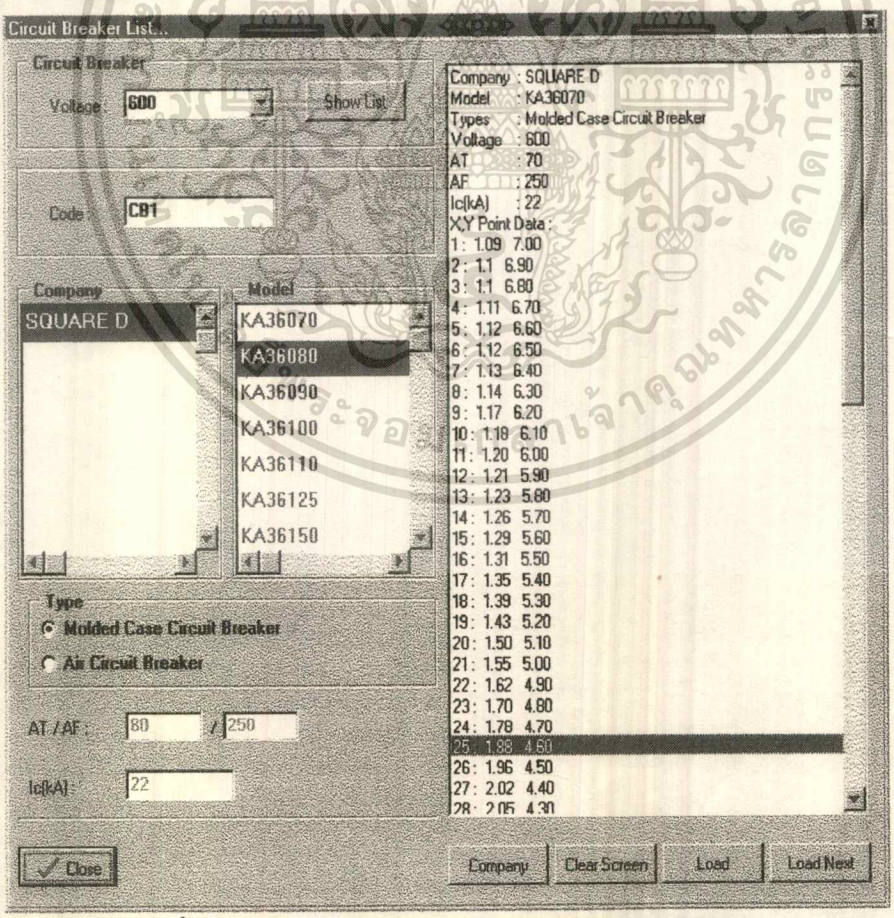
Graph multiply บอกอัตราส่วนการคูณของกราฟ

4.4.2.1 วิธีการใช้

1.คลิ๊กที่รูปโคออดิเนท(Coordinate)จากหน้าต่างการคำนวณเข้าสู่การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า

2.ในกรณีทำเป็นแบบผู้ใช้เลือกเอง (manual) นั้นจะเป็นการเลือกเซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์ มาใช้เอง จากนั้น คลิ๊ก ไปที่อุปกรณ์ (device) ให้เลือกว่าจะใช้ เซอร์กิจเบรกเกอร์หรือ ฟิวส์ มาใช้

2.1ใส่ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) แล้วใส่ชื่อ code เป็นการใส่ชื่อของเซอร์กิจเบรกเกอร์ , ฟิวส์ ในการแสดงกราฟนั่นเอง



รูปที่ 4.5 แสดงการเลือกชนิด และ รุ่นของอุปกรณ์ป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คลิ๊ก ที่ Show list จะแสดงชื่อบริษัทที่มีอยู่ในฐานข้อมูล (Database) จากนั้น คลิ๊กที่ชื่อ บริษัท จะปรากฏชื่อรุ่น (model) ของ เซอร์กิจเบรกเกอร์หรือ ฟิวส์

2.3 คลิ๊ก ที่ชื่อรุ่นของ เซอร์กิจเบรกเกอร์หรือ ฟิวส์ จะปรากฏค่า AT / AF และค่าอินเทอร์รัพติ้งคาร์ปาซิตี้ (Interrupting Capacity , I_c)ให้ พิจารณาว่าตรงกับการคำนวณ ในส่วนแรก รวมทั้งความต้องการของผู้ใช้ด้วยหรือไม่

2.4 ดับเบิ้ลคลิ๊กที่ชื่อรุ่นของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์ จะปรากฏกราฟในส่วนการ แสดงกราฟ

2.5ในกรณีต้องการดูรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละตัวให้คลิ๊กที่โหลดในส่วนแสดงรายงาน

2.6 ในกรณีต้องการจะแก้ไข หรือเพิ่มเติมข้อมูลของกราฟของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์ ทำได้ โดย คลิ๊ก ที่ ฐานข้อมูล (Database) จะปรากฏให้เลือก ในกรณีต้องการดูรายละเอียดจากรายงาน (report) ให้ คลิ๊กที่ โหลด ในส่วนแสดงรายงาน

2.7 ในกรณีของ ฟิวส์ ต้องใส่ค่าตัวคูณของกราฟของ ฟิวส์ ในช่อง multiply

3.ในกรณีต้องการจะแก้ไข หรือเพิ่มเติมข้อมูลของกราฟของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์ ทำได้โดยคลิ๊กที่ฐานข้อมูล (database) จะแสดงตัวเลือก เซอร์กิจเบรกเกอร์หรือ ฟิวส์

<u>ในกรณีเพิ่มข้อมูล Add</u>

1.ให้ป้อนข้อมูลทั้งหมดของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์ เช่น ค่า voltage , ชื่อรุ่น , ขนาดของ AT / AF , ลักษณะของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์

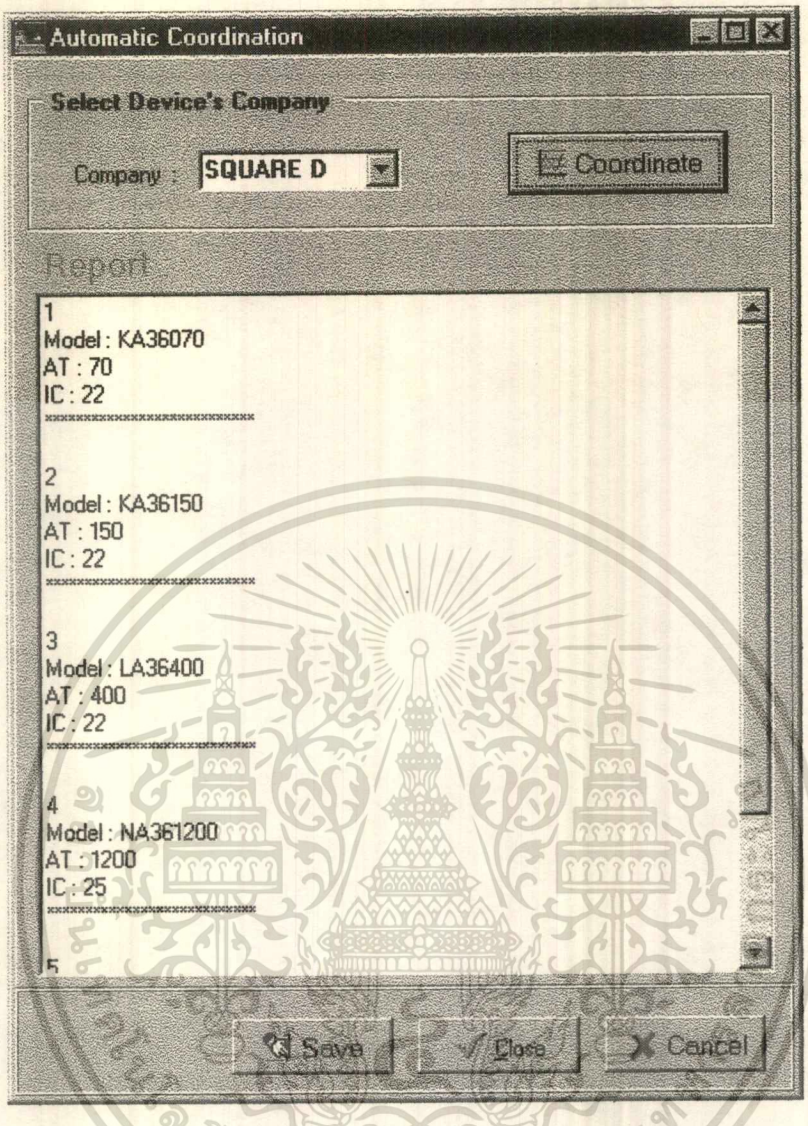
2.ป้อนค่าพิกัดค่า characteristics ของ เซอร์กิจเบรกเกอร์, ฟิวส์ โดยการป้อนค่า X,Y แล้วกด Next เพื่อเติมค่าต่อไป

3.ในกรณีที่ลักษณะกราฟมีค่าคุณลักษณะ (characteristics) คล้ายคลึงกันสามารถใช้ปุ่ม " Get X, Y " โดยใส่ค่าชื่อรุ่นของอุปกรณ์ที่ต้องการอ้างอิงลงในช่อง รุ่น (model)

<u>ในกรณีแก้ไข Edit</u>

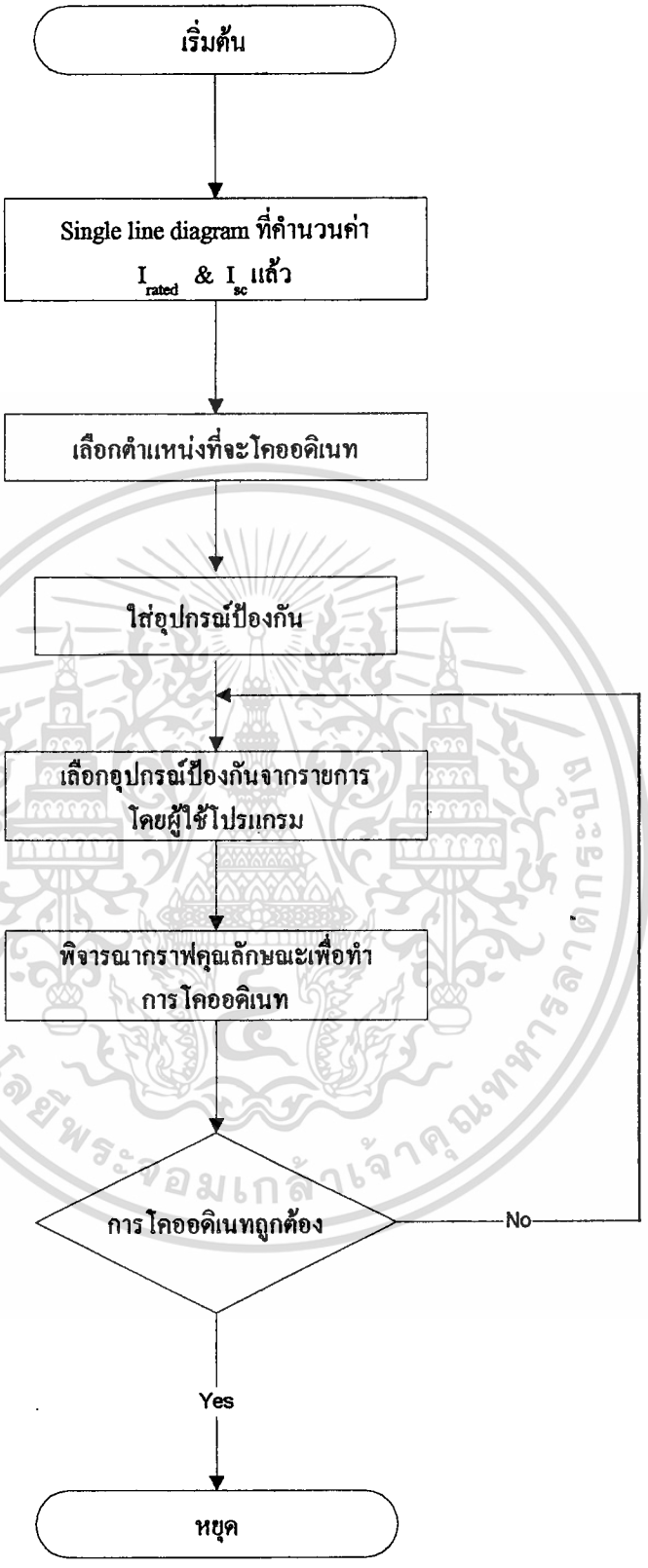
จะแก้ไขค่าเฉพาะอย่าง ทำลักษณะเดียวกันกับกรณีของ Add เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



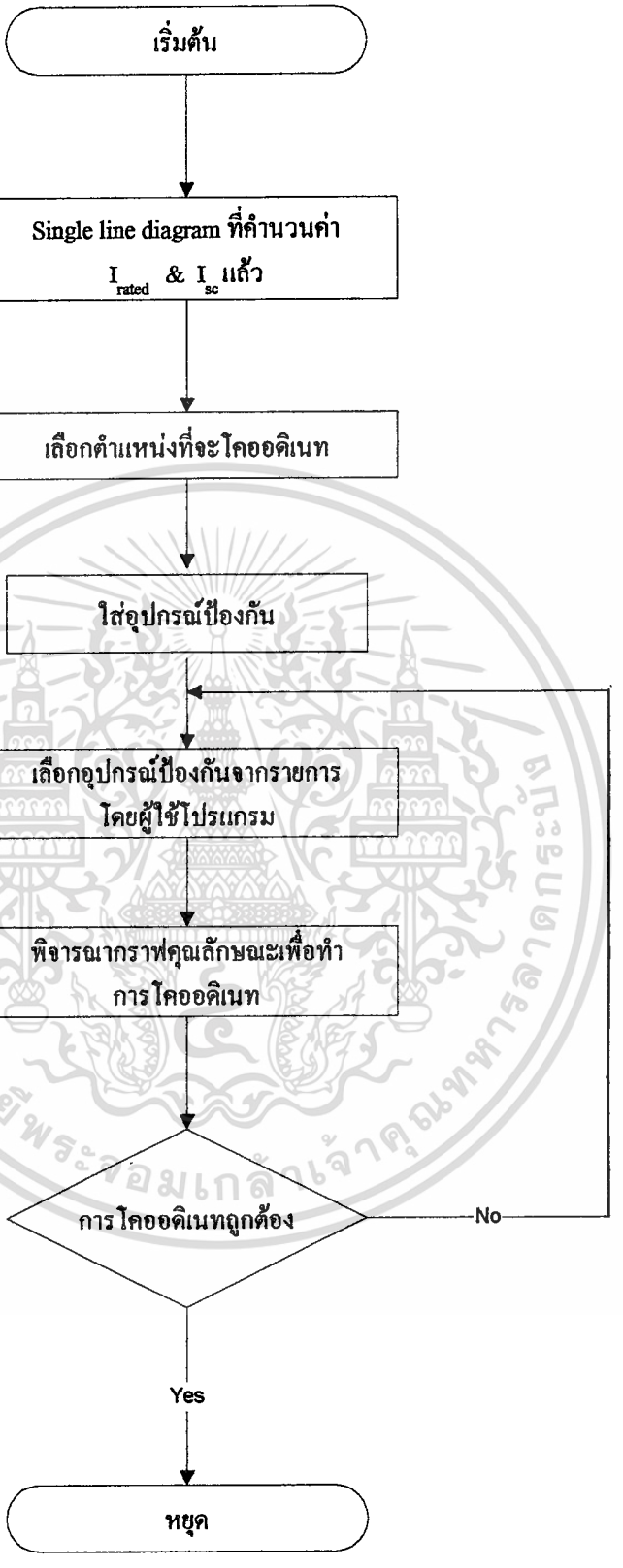
รูปที่ 4.6 แสดงชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่มีการทำงานร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



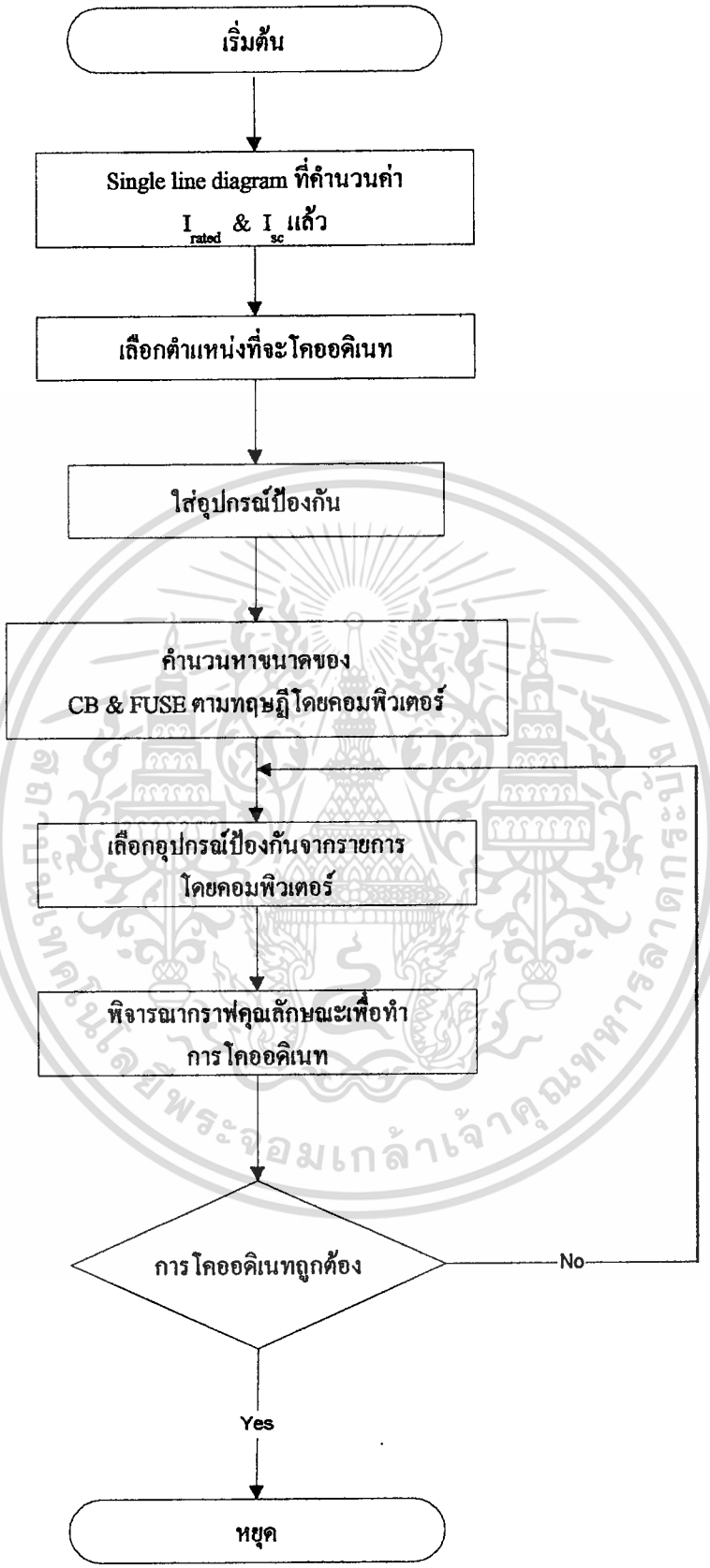
รูปที่ 4.7 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการโคออดิเนทของอุปกรณ์ป้องกันแบบผู้ใช้เลือกเอง (manual)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการโคออดิเนทของอุปกรณ์ป้องกันแบบผู้ใช้เลือกเอง (manual)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมในการโคออดิเนทของ อุปกรณ์ป้องกันแบบอัตโนมัติ (Automatic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและวิจารณ์

5.1 บทสรุป

การใช้โปรแกรมวิเคราะห์กระแสลัดวงจรและแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า พิจารณาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 600 โวลต์ ซึ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรของโปรแกรมนั้น จะพิจารณากระแสผิดปกติแบบ 3 เฟสสมมาตร (Three phase symmetrical fault) เนื่องจากมีโอกาสเกิดมากกว่ากระแสผิดปกติแบบไลน์ทูกราวด์ (Line to ground fault) แม้ว่ากระแสผิดปกติแบบไลน์ทูกราวด์จะมีความรุนแรงมากกว่า และการคำนวณค่าของกระแสผิดปกติแบบ 3 เฟสสมมาตร จะอ้างอิงมาตรฐานของ ANSI/IEEE Std 141-1986 ในการคำนวณ ซึ่งปัจจัยที่มีผลการคำนวณต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น คือ ค่าซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์ (X_d") ของมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่ารีแอกแตนซ์ต่อรีซีสแตนซ์ (X/R) ของมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายตัวนำ หลักการในการคำนวณกระแสลัดวงจรของโปรแกรมคือจะพิจารณาเป็นเปอร์ยูนิต โดยที่จะทราบค่าของกระแสลัดวงจรที่จุดต่างๆ จากการนำกระแสเบสหารด้วยค่าผลรวมของรีแอกแตนซ์และรีซีสแตนซ์ที่จุดนั้นๆ และตำแหน่งที่จะเกิดกระแสลัดวงจรที่รุนแรงที่สุดคือที่หม้อแปลงไฟฟ้าการหากระแสลัดวงจรจะคิดจากค่ากระแสที่พิกัดของหม้อแปลงหารด้วยเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง เมื่อทำการคำนวณขนาดของกระแสลัดวงจรได้แล้ว จะต้องทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือ ฟิวส์ แต่ต้องทราบค่ากระแสที่พิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ ก่อน โดยการคำนวณโดยโปรแกรมจะทราบกระแสลัดวงจรแต่ที่เซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์จะบอกค่าของอินเตอร์รัพติ้งคาปาซิตี้ (I_c) จะต้องเลือกอินเตอร์รัพติ้งคาปาซิตี้ให้มากกว่ากระแสลัดวงจรเพื่อความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า ส่วนการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้านั้น การทำงานที่มีประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ป้องกันที่ควรจะทำงานก่อน คือ ที่มีความสำคัญน้อยที่สุดและที่ไม่ควรจะตัดวงจรออกก็คือบริเวณอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าหลัก (Main distribution) เมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดย่อยๆ ดังนั้น อินเตอร์รัพติ้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์หลัก (Main circuit breaker) จึงมีค่ามากที่สุด โดยในส่วนของโปรแกรมการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 กรณี คือ กรณีแรกผู้ใช้เลือกอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าเองและทำการพิจารณากราฟ (Charecteristic) ของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า และกรณีที่ สอง คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเลือกขนาดของเซอร์กิจเบรกเกอร์ให้โดยจะคูณกระแสที่พิกัดของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าด้วยตัวคูณตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานของ NEC ผู้ใช้จะพิจาณากราฟตามรุ่นของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่โปรแกรมคำนวณให้มา ทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน โดยไม่ให้กราฟทับกัน (Overlap) อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อมีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์กระแสลัดวงจรแสะแสดงการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน เรียบร้อยแล้วสามารถที่จะบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์

5.2 วิจารณ์

โปรแกรมในการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าจะคำนวณกระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตรจะคำนวณค่าของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นน้อยกว่าความเป็นจริง หากมีกระแสลัดวงจรแบบไลน์ทูกราวด์เกิดขึ้น ซึ่งจะพิจารณาอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence) อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence) และอิมพีแดนซ์ลำดับลบ(Negative Sequence) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดแยกกัน ข้อจำกัดของโปรแกรมการคำนวณประการที่สอง คือผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบค่าซับทรานเซียลรีแอกแตซ์ของมอเตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะสามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรได้ถูกต้องมากขึ้น เพราะโปรแกรมการคำนวณกระแสผิดปตินี้จะประมาณค่าของซับทรานเซียลรีแอกแตนซ์จากมาตรฐานของ ANSI/IEEE Std 141-1986 ประการที่สามคือ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมินั้นจะพิจารณาเป็นเฟส หม้อแปลงด้านทุติยภูมิจะต่อแบบสตาร์หรือเดลต้าต้องแปลงค่าให้เป็นต่อเฟสเสียก่อน ประการที่สี่คือ การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังไม่สามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ในการออกแบบระบบไฟฟ้า และประการสุดท้ายคือ จากที่ทำการทดสอบโปรแกรมสามารถต่ออุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้มากสุดที่ 19 ไลน์ในบรานซเดียวกัน จะไม่ส่งค่าไปยังส่วนของการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าได้ แต่ยังสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรและกระแสที่พิกัดได้ ส่วนโปรแกรมการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้านั้นมีข้อจำกัดในกรณีที่โปรแกรมจะเลือกอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าให้จะเป็นเพียงการเลือกรุ่นให้ ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบกราฟคุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละรุ่นไว้ให้เนื่องจาก หากจำนวนบรานซและไลน์มากจะทำให้ดูยุ่งยาก ต้องให้ผู้ออกแบบเลือกเองว่าต้องการดูกราฟคุณลักษณะของเซอร์กิจเบรกเกอร์ที่มีการทำงานร่วมกันในไลน์ไหน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Transactions on Power Delivery Vol.6 , No.2 , April 1991

[2] Aplication Guide for Ac High Voltage ANSI/IEEE C.37.010-1979

[3] IEEE Std 242-1986 "IEEE , Recommend pratice for protection and coordinate of industrial and commercial power system ; 1986 "

[4] IEEE Std 141-1986 "IEEE , Recommend pratice for electric power distribution for industrial plant ; 1986 "

[5] Table 4D-1, Table 4D-2 "Phelps Dodge's Design Manual on Electrical Conductor for Interior Wiring"

[6] รศ. ศุลี บรรจงจิตร " หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง (ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม) " บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) , 2537

[7] National Electrical Code (NEC) ; 1996 Edition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของท่านต่างๆดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ศุลี บรรจงจิตร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำ ความรู้ทางวิชาการต่างๆ จนนำมาซึ่งการโครงงานทางวิชาการนี้

2. อาจารย์ ชาย ชมภูอินไหว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา และรุ่นพี่ที่แสนดี ให้คำปรึกษา หาข้อมูลมากมายให้กับกลุ่ม คอยให้กำลังใจ และดูแลโครงงานของกลุ่มเป็นอย่างดี

3. คุณ ภัคพงษ์ ภาคภูมิ

วิศวกรฝ่ายขายอาวุโส บริษัท ชไนเดอร์ จำกัด ให้ข้อมูล และคำแนะนำ ในการทำโครงงานนี้

4. คุณ ไชยวัฒน์ กิจพัฒนาศิลป์

วิศวกรฝ่ายขาย บริษัท ชไนเดอร์ จำกัด ให้คำแนะนำในการดูสเปกและลักษณะกราฟของอุปกรณ์ป้องกันของ Merlin Gerin

5. คุณ วัชระ แก้วนุช

Site Engineer บริษัท ไทยโตโกเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด สอนวิธีการดูแบบซิงเกิลไลน์ไดอะแกรมและให้สเปกของอุปกรณ์ป้องกัน ของ FUJI

6. คุณ วัฒนชัย วัฒนาบรรจงสุข

ผู้ช่วยผู้จัดการ บริษัท ซีเทค จำกัด แนะนำและให้แบบซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม มาเพื่อศึกษา

7. คุณ ลือชา โพธิ์อบ

ผู้จัดการบริษัท แมกคานิคอล แอนด์ อิเล็กติคอล เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด แนะนำวิธีการออกแบบ

เพื่อน ๆ ภาคคอมพิวเตอร์ที่ให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศุลี บรรจงจิตร

อ. ชาย ชมภูอินไหว

ผู้จัดทำโครงงาน

นาย จิรชัย ว่องวิบูลย์พร

ที่อยู่ : 481/708 ซ. จรัญสนิทวงศ์ 37

ถ. จรัญสนิทวงศ์ ต. บางขุนศรี

บางกอกน้อย กทม.10700

โทร : 864-4383

นาย ภณพล ภู่ตระกูล

ที่อยู่ : 100/134 ถ. รามอินทรา

แขวง จระเข้บัว เขต ลาดพร้าว

กทม. 10230

โทร : 945-8285

นาย บดินทร์ เฉลิมวุฒิศักดิ์

ที่อยู่ : 8/261 หมู่บ้าน รัตนาธิเบศร์ ม. 4

ต. บางรักพัฒนา อ. บางบัวทอง

จ.นนทบุรี 11110

โทร : 594-2152

นาย วุฒิชัย รัญเสวะ

ที่อยู่ : 73 ซ. อินทามระ 18 ถ. วิภาวดีรังสิต

แขวง ดินแดง เขต ดินแดง

กทม. 10320

โทร : 277 – 3628

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้