การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่

นายณัฐพล โพธิรัตน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-005-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18952513

COMPUTER-AIDED PROTECTION COORDINATION FOR LARGE ELECTRICAL CONSUMER

Mr. Natthapol Pothiratana

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-333-005-4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่
โดย	นายณัฐพล โพธิรัตน์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กีระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ณัฐพล โพธิรัตน์ : การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ (COMPUTER-AIDED PROTECTION COORDINATION FOR LARGE ELECTRICAL CONSUMER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ , 121 หน้า.
ISBN 974-333-005-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาวิธีการจัดความความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน โดยมุ่งเน้นสำหรับระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ รายละเอียดที่ทำการศึกษาประกอบด้วย วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจร คุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกัน หลักการในการป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า และข้อกำหนดต่าง ๆ ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงวิธีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันและทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้น ซึ่งมีความสามารถในการคำนวณกระแสลัดวงจร เขียนกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส สำหรับใช้ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ และแสดงผลค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันที่ได้จากการวิเคราะห์ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันนี้ จะทำให้ใช้เวลาในการพิจารณาน้อยลง และทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ณัฐพล โพธิรัตน์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์
ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม –

บทคัดย่อและบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เป็นการรวบรวมบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ของนิสิตที่ส่งผ่านบัณฑิตวิทยาลัย

4070269121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: PROTECTION / COORDINATION / COMPUTER-AIDED COORDINATION
NATTHAPOL POTHIRATANA : COMPUTER-AIDED PROTECTION COORDINATION FOR LARGE ELECTRICAL CONSUMER. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PRASIT PITTAYAPAT, 121 pp. ISBN 974-333-005-4.

This thesis presents protection coordination study, focusing on large electrical consumers. The study consists of short-circuit calculations, protective devices, electrical equipment protection, and coordination principles.

In addition, the studies of using computer to assist the coordination of protective devices have also been carried out. The developed computer program can be used to calculate short-circuit currents, draw time-current characteristic curves for coordination and display results of the calculated protective device settings. The main advantages of this computer-aided protection coordination program are the required calculation time is reduced and more accurate results are obtained.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต** ณัฐพล โพธิรัตน์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์
ปีการศึกษา 2542	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** –

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่งเนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ณัฐพล โพธิรัตน์

กันยายน 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฐ

สารบัญภาพ ..... ฒ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 3

1.4 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์ 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ 4

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 4

2. การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นและการคำนวณกระแสลัดวงจร 6

2.1 การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน 6

2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร 7

2.2.1 แหล่งจ่ายไฟสมมูล 8

2.2.2 อิมพิแดนซ์ลัดวงจร 10

2.2.2.1 อิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้า 10

2.2.2.2 อิมพิแดนซ์ของหม้อแปลง 12

2.2.2.3 อิมพิแดนซ์ของสายไฟฟ้า 13

2.2.2.4 อิมพิแดนซ์ของมอเตอร์ 14

2.2.3 วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจร 15

3. อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า 17

3.1 การพิจารณาคุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกัน 17

3.2 ฟิวส์ 18

หน้า

3.2.1 ฟิวส์แรงดันต่ำ..... 19
3.2.2 ฟิวส์แรงดันสูง..... 20
3.2.3 การพิจารณาในการใช้งานฟิวส์..... 21
3.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ..... 22
3.3.1 อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical หรือแบบ Thermal-Magnetic..... 23
3.3.2 อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Solid State หรือแบบ Electronic..... 24
3.3.3 การพิจารณาในการใช้งานเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ..... 26
3.4 รีเลย์ป้องกัน..... 27
3.4.1 รีเลย์กระแสเกินชนิดฉับพลัน และรีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลา..... 29
3.4.2 รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน..... 31
3.4.3 รีเลย์ป้องกันความร้อน..... 32
4. การป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า..... 34
4.1 ขอบเขตการป้องกันและการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า..... 34
4.2 การป้องกันมอเตอร์..... 35
4.2.1 ขอบเขตในการพิจารณาป้องกันมอเตอร์..... 35
4.2.1.1 คุณลักษณะของมอเตอร์..... 35
4.2.1.2 ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันมอเตอร์..... 37
4.2.1.3 ระดับความคงทนของมอเตอร์..... 38
4.2.2 การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์..... 38
4.2.2.1 การป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบฉับพลัน..... 38
4.2.2.2 การป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบหน่วงเวลา..... 39
4.2.2.3 การป้องกันโหลดเกิน..... 39
4.2.2.4 การป้องกันกระแสเกินลงดินแบบฉับพลัน..... 39
4.2.2.5 การป้องกันกระแสเกินลงดินแบบหน่วงเวลา..... 40
4.3 การป้องกันหม้อแปลง..... 40
4.3.1 ขอบเขตในการพิจารณาป้องกันหม้อแปลง..... 40
4.3.1.1 คุณลักษณะของหม้อแปลง..... 40
4.3.1.2 ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันหม้อแปลง..... 41
4.3.1.3 ระดับความคงทนของหม้อแปลง..... 42

หน้า

4.3.2 การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง..... 43
4.3.2.1 การป้องกันโหลดเกิน..... 44
4.3.2.2 การป้องกันกระแสลัดวงจร..... 44
4.4 การป้องกันสายไฟฟ้า..... 44
4.4.1 ขอบเขตในการพิจารณาป้องกันสายไฟฟ้า..... 44
4.4.1.1 คุณลักษณะของสายไฟฟ้า..... 44
4.4.1.2 ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันสายไฟฟ้า..... 45
4.4.1.3 ระดับความคงทนของสายไฟฟ้า..... 45
4.4.2 การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันสายไฟฟ้า..... 45
4.4.2.1 การป้องกันกระแสลัดวงจร..... 45
4.4.2.2 การป้องกันโหลดเกิน..... 46
4.5 การป้องกันโหลดชนิดอื่น..... 46
4.5.1 การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันโหลดชนิดอื่น..... 46
5. ข้อกำหนดในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน..... 48
5.1 การศึกษาวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน..... 48
5.2 การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันเฟส..... 51
5.3 การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน..... 54
5.4 ตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจรเพื่อใช้ในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน..... 56
5.4.1 การคำนวณกระแสลัดวงจรสำหรับระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1..... 57
5.4.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรสำหรับระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2..... 63
6. การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน..... 65
6.1 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน..... 65
6.2 ลักษณะและรูปแบบของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น..... 66
6.2.1 การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมและส่วนหลักของโปรแกรม..... 67
6.2.2 ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว..... 69
6.2.2.1 รายละเอียดและส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว..... 69
6.2.2.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว..... 73

หน้า

6.2.3 ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล..... 76
6.2.3.1 รายละเอียดและส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล..... 76
6.2.3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล..... 76
6.2.4 ส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน..... 76
6.2.4.1 รายละเอียดและส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน..... 76
6.2.4.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน..... 77
6.2.5 ส่วนประกอบอื่น ๆ ของโปรแกรม..... 84
6.2.5.1 ส่วนสร้างไฟล์ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน..... 85
6.2.5.2 ส่วนปรับตั้งการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส..... 87
6.2.5.3 ส่วนปรับตั้งการเลือกค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน..... 87
6.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน..... 90
6.3.1 การใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ตัวอย่างที่ 1..... 91
6.3.2 การใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ตัวอย่างที่ 2..... 100
7. สรุปและข้อเสนอแนะ..... 109
รายการอ้างอิง..... 111
ภาคผนวก..... 113
ก. ข้อมูลในการคำนวณอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลง..... 114
ข. ข้อมูลในการคำนวณอิมพิแดนซ์ของสายไฟฟ้า..... 115
ค. ข้อมูลในการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า..... 117
ง. กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของอุปกรณ์ป้องกัน..... 118
ประวัติผู้เขียน..... 121

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่าตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor)..... 9

4.1 ค่าพิกัดหรือค่าปรับตั้งสูงสุดของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร สำหรับการป้องกันมอเตอร์..... 37

4.2 ขนาดปรับตั้งและพิกัดสูงสุดของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง..... 41

4.3 ขีดจำกัดกระแสหรือค่าความคงทนของหม้อแปลง โดยแสดงเป็นสมการของ Through-Fault Protection Curve..... 42

5.1 ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบตัวอย่างที่ 1 คิดที่ระดับแรงดัน 400 V..... 60

5.2 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{k3}) และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{k1})ที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1..... 62

5.3 ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบตัวอย่างที่ 2 คิดที่ระดับแรงดัน 6.6 kV..... 64

5.4 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{k3}) และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{k1})ที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2..... 64

6.1 สัญลักษณ์อุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม..... 69

6.2 สัญลักษณ์อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในโปรแกรม..... 73

6.3 ความหมายของชื่อหรือชื่อย่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม..... 74

6.4 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบตัวอย่างที่ 1..... 92

6.5 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบตัวอย่างที่ 2..... 101

ก.1 ข้อมูลของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน พิกัดแรงดันปฐมภูมิ 12, 22 หรือ 24 kV แรงดันทุติยภูมิ 400/230 V..... 114

ข.1 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ต่อความยาวของสายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC..... 115

ค.1 ค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า..... 117

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการลัดวงจรแบบต่าง ๆ	8
2.2	แหล่งจ่ายไฟสมมูลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจร	9
2.3	ระบบไฟฟ้าและวงจรสมมูลสำหรับระบบไฟฟ้า	11
3.1	กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงดันต่ำ	20
3.2	กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงดันสูง	21
3.3	กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical	24
3.4	กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electronic	25
3.5	กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของการป้องกันความผิดพร่องลงดินสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electronic	25
3.6	ส่วนประกอบของระบบป้องกันซึ่งทำงานด้วยรีเลย์	28
3.7	กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส ของรีเลย์กระแสเกินแต่ละแบบ	30
3.8	รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Residually Connected Ground Relay	31
3.9	รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Zero Sequence Ground Relay	32
3.10	รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Neutral Ground Relay	32
3.11	กราฟการทำงานของรีเลย์ป้องกันความร้อนแต่ละประเภท	33
4.1	กราฟ Through-Fault Protection Curve สำหรับหม้อแปลง Category II	43
4.2	กราฟค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า (Maximum Short-Circuit Current Curve)	46
5.1	ค่ากระแสในหม้อแปลงที่ต่อแบบเดลต้า-วาย เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างสายกับสายทางด้านทุติยภูมิ	51
5.2	การจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันมอเตอร์	52
5.3	การจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันหม้อแปลง	53
5.4	การจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันสายไฟฟ้า	54
5.5	ระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 1	57

รูปที่ หน้า

5.6 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก กรณีเกิดการลัดวงจรที่บัส 1 60
5.7 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ กรณีเกิดการลัดวงจรที่บัส 1 60
5.8 ระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 2..... 63
6.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Coordination Program..... 68
6.2 หน้าต่างหลักของโปรแกรม (Main Window)..... 70
6.3 ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram Section)..... 70
6.4 แผนผังเส้นเดี่ยวและข้อมูลของอุปกรณ์ที่พิมพ์โดยโปรแกรม..... 75
6.5 ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล (Fault Calculation Section)..... 78
6.6 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรที่พิมพ์โดยโปรแกรม..... 78
6.7 ส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section). 79
6.8 หน้าต่างเลือกอุปกรณ์ (Select Protective Devices Window)..... 79
6.9 กราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์และค่ากระแสลัดวงจรบนหน้าจอกราฟเวลา-กระแส.... 80
6.10 กราฟการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันที่พิมพ์โดยโปรแกรม..... 83
6.11 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรและค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันที่พิมพ์โดยโปรแกรม..... 84
6.12 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของฟิวส์..... 87
6.13 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของ Thermal-Magnetic CB 88
6.14 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของ Electronic CB..... 88
6.15 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของรีเลย์..... 89
6.16 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน..... 89
6.17 หน้าต่างสำหรับปรับตั้งการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส..... 90
6.18 หน้าต่างสำหรับปรับตั้งการเลือกค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน..... 90
6.19 แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบตัวอย่างที่ 1..... 91
6.20 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ CB M1..... 96
6.21 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ CB M1, ECB D1 และ ECB L1A 96
6.22 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A..... 97

รูปที่ หน้า

6.23 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A , ECB L1A และ ECB T1B 97
6.24 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB T1B และฟิวส์ T1A 98
6.25 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A , ECB T1B และฟิวส์ T1A 98
6.26 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ ECB L2A..... 99
6.27 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ ECB D1 , ECB L1A และ ECB T1B 99
6.28 แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบตัวอย่างที่ 2..... 100
6.29 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ฟิวส์ D1..... 105
6.30 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M2..... 105
6.31 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M1..... 106
6.32 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M1 และ รีเลย์ T1B 106
6.33 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ T1B และ รีเลย์ T1A 107
6.34 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M1 , รีเลย์ T1B และ รีเลย์ T1A 107
6.35 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ รีเลย์ M1 และ รีเลย์ T1B 108
6.36 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสแสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ รีเลย์ T1A 108
ข.1 อัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์ต่อความต้านทานลำดับบวกสำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดง 4 แกน 1 kV ที่ความถี่ 50 Hz..... 116
ข.2 อัตราส่วนรีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ต่อรีแอกแตนซ์ลำดับบวกสำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดง 4 แกน 1 kV ที่ความถี่ 50 Hz..... 116
ง.1 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงสูง HRC..... 118
ง.2 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Electronic..... 119
ง.3 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic..... 120

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยพลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทต่อการเจริญเติบโตทั้งทางด้านเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งนับวันจะยิ่งมีการขยายตัวมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความซับซ้อนมากขึ้น

ในการใช้งานระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้น แม้ว่าจะได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องแล้วก็อาจจะเกิดสภาวะการทำงานที่ผิดปกติขึ้นได้เสมอ โดยไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดของตัวอุปกรณ์เอง หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดของบุคคลผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และอาจทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบป้องกันเพื่อทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นดังกล่าว โดยระบบป้องกันจะทำหน้าที่จำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้มีผลกระทบต่อการจ่ายไฟน้อยที่สุด

ในการออกแบบระบบป้องกัน ส่วนสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาได้แก่ การจัดความสัมพันธ์ (Coordination) ของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งหมายถึง การจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า ให้ทำงานสอดคล้องกัน คือเมื่อเกิดความผิดพร่อง (Fault) ขึ้นในระบบ อุปกรณ์ป้องกันตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดความผิดพร่องที่สุดจะต้องตัดวงจรก่อนอุปกรณ์ป้องกันตัวถัดไปจะทำงาน โดยอุปกรณ์ป้องกันตัวแรกที่ทำงานจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับการป้องกันเบื้องต้น (Primary Protection) ซึ่งจะตัดส่วนที่เกิดสภาวะผิดปกติออกน้อยที่สุดและทำงานในเวลาที่รวดเร็ว เพื่อทำให้ระบบมีไฟดับน้อยที่สุด ส่วนอุปกรณ์ป้องกันตัวถัดไปที่จะทำงานจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับการป้องกันสำรอง (Backup Protection) ซึ่งจะทำงานเมื่ออุปกรณ์สำหรับการป้องกันเบื้องต้นเกิดความผิดพลาดขึ้นและไม่ทำงานตามปกติ

สำหรับขั้นตอนในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันมีดังนี้ [1,2]

1. หาข้อมูลของระบบไฟฟ้า
2. พิจารณาคุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกัน

3. ศึกษาขอบเขตการป้องกันของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

4. ศึกษาเกี่ยวกับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ช่วงเวลาในการจัดความสัมพันธ์ (Coordination Time Interval) และหลักการพิจารณาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

วิธีการจัดความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ป้องกันทำได้โดย นำกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic Curve) ของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดมาเขียนลงบนกระดาษกราฟ และทดลองพิจารณาปรับตั้งจนได้ลักษณะของกราฟเวลากับกระแสของอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวสอดคล้องกัน ค่าที่ใช้ปรับตั้งต้องพิจารณาถึงขนาดกระแสโหลด กระแสลัดวงจร ขีดจำกัดทางความร้อนของอุปกรณ์ที่เหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานด้วย ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเป็นงานที่ค่อนข้างยุ่งยากไม่สะดวก และใช้เวลาค่อนข้างมาก

แต่ในปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการช่วยวิเคราะห์งานต่าง ๆ ทางด้านไฟฟ้ากำลังอย่างกว้างขวางมากขึ้น สำหรับงานทางด้านการออกแบบระบบป้องกัน ก็ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเช่นกัน ซึ่งได้แก่ โปรแกรมในการคำนวณหากระแสลัดวงจร โปรแกรมวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) รวมถึงโปรแกรมที่ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันด้วย

สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวนี้ จะมีข้อมูลที่จำเป็นต่าง ๆ ของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละชนิดในฐานข้อมูล เช่น ข้อมูลกราฟการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ หรือรีเลย์ รวมทั้งข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบ เช่น สายไฟฟ้า หม้อแปลง มอเตอร์ เป็นต้น โดยโปรแกรมจะช่วยทำการเขียนกราฟคุณลักษณะการทำงานแทนวิธีการเดิมซึ่งเขียนด้วยมือ ทำให้มีความสะดวกในการปรับเลื่อนกราฟมากขึ้นกว่าการทำบนกระดาษกราฟ ทำให้งานการออกแบบระบบป้องกันมีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยให้การออกแบบและการวิเคราะห์งานทางด้านระบบป้องกันใช้เวลาที่น้อยลงด้วย [3,4,5]

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันขึ้นมากมาย แต่โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันในประเทศไทยยังมีการพัฒนาขึ้นใช้ไม่มากนัก และแต่ละโปรแกรมก็มีวัตถุประสงค์และขอบเขตการทำงานที่แตกต่างกันไป

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการศึกษาขั้นตอนการป้องกันและการจัดความสัมพันธ์การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันโดยมุ่งเน้นสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ ซึ่งได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม หรือ สถานประกอบการธุรกิจ และจะทำการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อช่วยในการ

วิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน โดยจะพิจารณาในส่วนของระบบแรงต่ำและแรงดันปานกลาง เพื่อให้สามารถใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ ในการช่วยวิเคราะห์ออกแบบระบบป้องกันสำหรับโรงงานและ สถานประกอบการขนาดใหญ่ได้

สำหรับโปรแกรมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการพัฒนาขึ้นให้ใช้งานกับระบบปฏิบัติการวินโดว์ 95 บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) และทำการพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Delphi 3 และจะแสดงวิธีใช้โปรแกรมดังกล่าวในการวิเคราะห์ระบบป้องกันตัวอย่าง

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่

2.เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

3.เพื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นช่วยในการวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันแทนวิธีการวิเคราะห์แบบเดิม

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.ศึกษาวิธีและหลักการสำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน และเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง เช่น การคำนวณกระแสลัดวงจร

2. ศึกษาวิธีการเขียนและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

4.ทำการรวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันและข้อมูลอุปกรณ์ในระบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับโปรแกรมในการวิเคราะห์จัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

5.ทำการทดสอบโปรแกรมโดยวิเคราะห์ระบบตัวอย่าง และพิจารณาความถูกต้องของ ผลการวิเคราะห์

6. สรุปและประเมินผลการดำเนินงาน

7. เรียบเรียงและจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์เพื่อเสนอต่อคณะกรรมการ

1.4 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

1.ศึกษาวิธีการและขั้นตอนของการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันในระบบของผู้ ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ ซึ่งได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม หรืออาคารธุรกิจขนาดใหญ่

2.พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของ อุปกรณ์ป้องกันในระบบแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง ในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้า

3.ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าที่พิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันจะพิจารณา เฉพาะระบบแบบเรเดียล (Radial System)

4.อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าที่ถูกป้องกันจะพิจารณาเฉพาะอุปกรณ์ที่สำคัญ ซึ่งได้แก่ มอเตอร์ หม้อแปลง และสายไฟฟ้า

5. พิกัดของอุปกรณ์ป้องกันพิจารณาตามมาตรฐาน IEC และ ANSI

6. การติดตั้งและการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันพิจารณาตามมาตรฐาน NEC

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.ทำให้ทราบถึงขั้นตอนวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ขั้นตอนการออกแบบระบบป้องกัน และวิธีการพิจารณาหาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่

2.สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์จัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

3.สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์จัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งช่วยทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยลงกว่าวิธีเดิม

4.เป็นต้นแบบในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์งานทางด้านระบบป้องกัน

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ขั้นตอนการหาข้อมูลของระบบไฟฟ้า โดยจะกล่าวถึงการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น ข้อมูลที่ต้องใช้ในการพิจารณาสำหรับทำการจัดความสัมพันธ์สำหรับอุปกรณ์ป้องกัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รวมถึงการคำนวณกระแสลัดวงจร ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องใช้ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจร การหาค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูล (Equivalent Voltage Source) การหาค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจร (Short-circuit Impedance) และข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึง ขั้นตอนการพิจารณาคุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกัน โดยจะกล่าวถึงอุปกรณ์ป้องกันชนิดต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาจัดความสัมพันธ์ ซึ่งได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ และรีเลย์ชนิดต่าง ๆ เช่น รีเลย์กระแสเกินชนิดฉับพลัน (Instantaneous Overcurrent Relay) รีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time Overcurrent Relay) และรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน (Ground Fault Relay) โดยแต่ละอุปกรณ์จะกล่าวถึง ค่าพิกัดของอุปกรณ์ ชนิดของอุปกรณ์ กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส รวมทั้งการพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันแต่ละประเภท

บทที่ 4 กล่าวถึง ขั้นตอนการศึกษาขอบเขตการป้องกันของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า โดยจะกล่าวถึง คุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันอุปกรณ์ และระดับความคงทนของอุปกรณ์ รวมทั้งการพิจารณาค่าปรับตั้ง สำหรับป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบด้วย โดยอุปกรณ์ในระบบที่พิจารณาได้แก่ หม้อแปลง มอเตอร์ และสายไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึง ขั้นตอนการศึกษาเกี่ยวกับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งได้แก่ ช่วงเวลาในการจัดความสัมพันธ์ (Coordination Time Interval) การพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงที่มีการต่อแบบเดลต้า-วาย รวมทั้งหลักการพิจารณาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวถึงการจัดความสัมพันธ์ของทั้งอุปกรณ์ป้องกันแบบเฟสและอุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

บทที่ 6 กล่าวถึง การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน รายละเอียดและวิธีการใช้งานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีชื่อว่า 'Coordination Program ' พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม

บทที่ 7 กล่าวถึง สรุปผลการศึกษา และ ข้อเสนอแนะที่สามารถดำเนินการต่อไปได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นและการคำนวณกระแสลัดวงจร

2.1 การเตรียมข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เราจะต้องมีการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการพิจารณาหลายอย่าง ข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน อาจสามารถสรุปได้ดังนี้ [6]

1. แผนผังเส้นเดี่ยว (Single-line Diagram) ของระบบที่แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ในระบบ อุปกรณ์ป้องกัน รวมทั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ

2.ข้อมูลการวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจรทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุดซึ่งไหลผ่านอุปกรณ์ ป้องกันแต่ละตัวในระบบ โดยพิจารณาที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของระบบ

3.กระแสโหลดปกติของแต่ละวงจรหรือของแต่ละอุปกรณ์ รวมทั้งค่าสภาวะการทำงาน สูงสุดหรือต่ำสุดของอุปกรณ์ที่ยอมรับได้ เช่น ค่ากระแสโหลดเกิน หรือ ค่ากระแสเริ่มเดินเครื่อง เป็นต้น

4.ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า และข้อมูลที่เกี่ยวข้องซึ่งใช้ในการปรับตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส (Current Transformer : CT) และ ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer : VT)

5. ข้อกำหนดต่าง ๆ ของทางการไฟฟ้า รวมทั้งข้อมูลและกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic Curve) ของอุปกรณ์ป้องกันตัวบน (Upstream) ในระบบของการไฟฟ้า

6. กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส ค่าพิกัดการตัดวงจร (Interrupting Rating) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ของอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวในระบบและเอกสารข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ป้องกัน

7. มาตรฐานหรือข้อกำหนดอื่น ๆ เช่น มาตรฐาน NEC สำหรับใช้ในการอ้างอิง

ข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เราสามารถทำการคำนวณหรือหาได้จากเอกสารของผู้ผลิตอุปกรณ์ จากข้อมูลของทางการไฟฟ้าหรือจากมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยข้อมูลที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน คือการคำนวณกระแสลัดวงจร ซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณาเลือกขนาด ค่าปรับตั้ง พิกัดการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน และใช้ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์สำหรับอุปกรณ์ป้องกันด้วย โดยการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรต้องพิจารณาข้อมูลหลายอย่าง ซึ่งได้แก่ การหาค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูล การหาค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของอุปกรณ์ในระบบ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการดังกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร

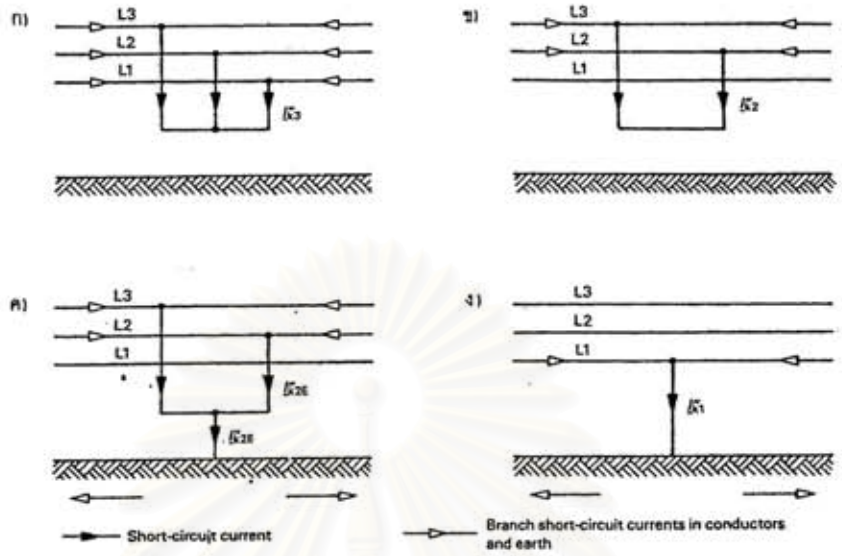
ในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า นอกจากจะคำนึงถึงกระแสใช้งานปกติแล้วยังจะต้องคำนึงถึงกระแสขณะที่เกิดการลัดวงจรด้วย เนื่องจากเมื่อเกิดการลัดวงจรจะทำให้มีกระแสไหลมากกว่าปกติ ทำให้เกิดความเครียดทางกล และความเครียดทางความร้อนขึ้น ส่งผลทำให้อุปกรณ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อบุคคลได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น โดยเราจะใช้ค่ากระแสลัดวงจรในการพิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน และใช้ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน [1,7,8]

เนื่องจากกระแสลัดวงจรมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าหลายประเทศจึงได้มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจร และเพื่อให้การคำนวณเป็นไปในแนวทางเดียวกัน IEC (International Electrotechnical Commission) จึงได้ร่างมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น คือ IEC 909 " Short-circuit Current Calculation in Three-phase A.C. Systems " [9]

ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 909 แบ่งชนิดของการลัดวงจรได้เป็น

1. การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Short Circuit) I''_{K3}
2. การลัดวงจรระหว่างสายกับสาย (Line To Line Short Circuit) I''_{K2}
3. การลัดวงจรระหว่างสาย สายกับดิน (Line To Line Short Circuit With Earth Connection) I''_{K2E}
4. การลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (Line To Earth Short Circuit) I''_{K1}

โดยลักษณะการลัดวงจรแต่ละแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการลัดวงจรแบบต่าง ๆ

ก) การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

ข) การลัดวงจรระหว่างสายกับสาย

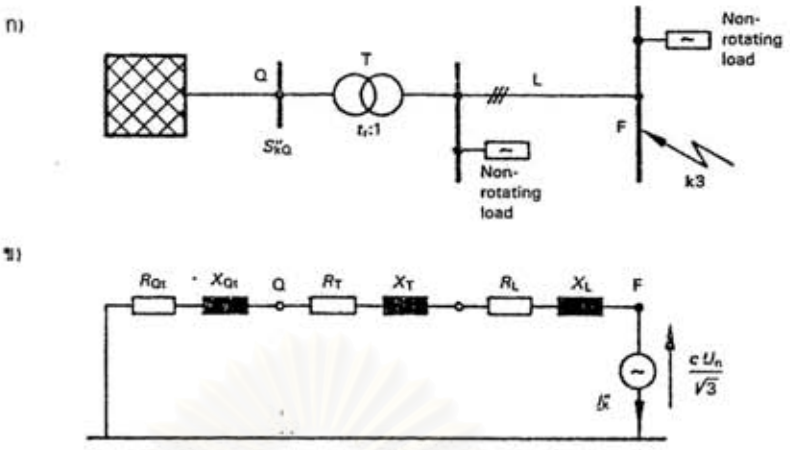
ค) การลัดวงจรระหว่างสาย สายกับดิน

ง) การลัดวงจรระหว่างสายกับดิน

2.2.1 **แหล่งจ่ายไฟสมมูล** (Equivalent Voltage Source) [7,9]

จากมาตรฐาน IEC 909 เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุดใด ๆ ในวงจรไฟฟ้า ณ จุดนั้นอาจจะแทนด้วยแหล่งจ่ายไฟสมมูล โดยแหล่งจ่ายไฟสมมูลจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแหล่งจ่ายไฟ เครื่องจักรซิงโครนัสและอซิงโครนัส จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ภายใน

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร โดยที่ตำแหน่งลัดวงจร F แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่าเป็น $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ โดย c คือ ตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor) และ U_n คือแรงดันระหว่างสายของระบบ ค่าตัวประกอบแรงดัน c จะมีค่าแตกต่างกันไปตามระบบแรงดันที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1



R_{Qt}, X_{Qt}, R_T, X_T, R_L, X_L คือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของ ระบบไฟฟ้า หม้อแปลง และสาย ตามลำดับ

รูปที่ 2.2 แหล่งจ่ายไฟสมมูลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจร

ก) ระบบไฟฟ้า

ข) วงจรสมมูล (ระบบลำดับบวก Positive-sequence System)

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor)

แรงดันระบบ U_n	ค่าตัวประกอบแรงดัน c สำหรับการคำนวณ	
	กระแสลัดวงจรสูงสุด c_{max}	กระแสลัดวงจรต่ำสุด c_{min}
แรงดันต่ำ 100V - 1000V		
ก) 230V / 400V	1.00	0.95
ข) แรงดันระดับอื่น	1.05	1.00
แรงดันปานกลาง > 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
แรงดันสูง >35 kV - 230 kV	1.10	1.00

ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟสมมูลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุดตามตารางที่ 2.1 จะมีค่าเป็น

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}} = 1.00\ \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ สำหรับระบบแรงดันต่ำ 230 V/ 400 V

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}} = 1.05\ \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ สำหรับระบบแรงดันต่ำระดับอื่น

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}} = 1.10\ \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ สำหรับระบบแรงดันปานกลางและแรงดันสูง

2.2.2 **อิมพีแดนซ์ลัดวงจร** (Short-circuit Impedance) [7,9]

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรนอกจากจะต้องทราบค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูลแล้ว ยังจำเป็นจะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรด้วย สำหรับวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้หลักการองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) อิมพิแดนซ์ลัดวงจรแต่ละส่วนจะพิจารณาเป็น

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก (Positive-sequence Short-circuit Impedance) $Z_{(1)}$

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับลบ (Negative-sequence Short-circuit Impedance) $Z_{(2)}$

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ (Zero-sequence Short-circuit Impedance) $Z_{(0)}$

โดยการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลจะพิจารณาจากเฉพาะค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก $Z_{(1)}$ ส่วนการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมดุลแบบอื่น ๆ จะพิจารณาจากอิมพิแดนซ์ลัดวงจรทั้งสามส่วน

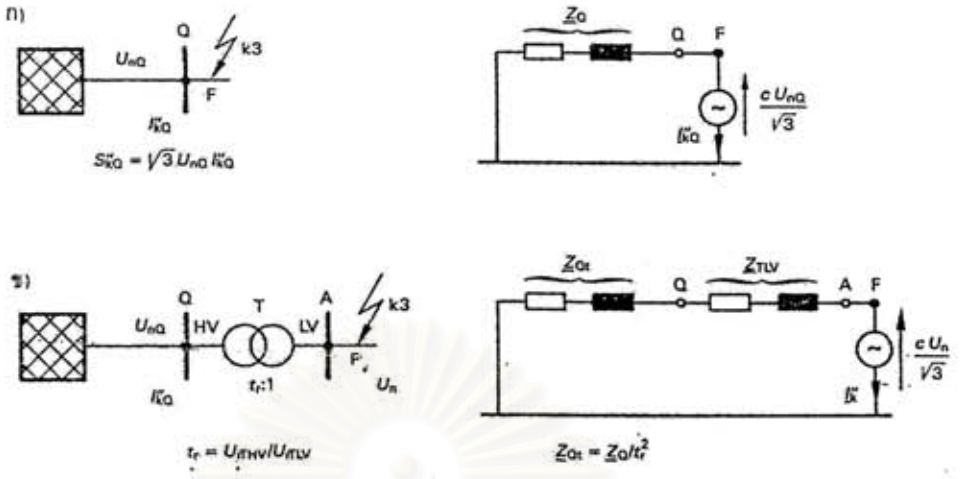
โดยปกติค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวกและอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับลบจะมีค่าเท่ากัน คือ $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ ส่วนค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ $Z_{(0)}$ สามารถทำการวัดได้สำหรับอุปกรณ์แต่ละประเภท และสามารถหาข้อมูลได้จากเอกสารของบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสามารถแบ่งเป็นสำหรับแต่ละอุปกรณ์ได้ดังนี้

- ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า
- ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- ค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้า
- ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

2.2.2.1. **อิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้า** (Network Feeder Impedance)

ขนาดของระบบไฟฟ้าอาจแทนได้ด้วยค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (Initial Symmetrical Short Circuit Power) S''_{kQ} ถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากจนถือว่าเป็นบัสอนันต์ (Infinite Bus) จะได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก จนถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ รูปที่ 2.3 แสดงระบบไฟฟ้าและอิมพิแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 ระบบไฟฟ้าและวงจรสมมูลสำหรับระบบไฟฟ้า

ก) กรณีไม่มีหม้อแปลง

ข) กรณีมีหม้อแปลง

พิจารณาการลัดวงจรในรูปที่ 2.3 (ก) ถ้าทราบกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} หรือกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q (อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก) ของระบบที่จุด Q สามารถหาได้จาก

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}\,I''_{kQ}} \qquad (2.1)$$

ส่วนกรณีการลัดวงจรในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งจ่ายไฟมาจากระบบแรงดันปานกลางหรือแรงดันสูงผ่านหม้อแปลง ถ้าทราบกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} หรือกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Qt} ซึ่งเปลี่ยนให้อยู่ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงสามารถหาได้จาก

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}}\frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}\,I''_{kQ}}\frac{1}{t_r^2} \qquad (2.2)$$

โดยที่

U_{nQ} เป็นแรงดันของระบบที่จุด Q

S''_{kQ} เป็นกำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ที่จุด Q

I''_{kQ} เป็นกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ที่จุด Q

c เป็นค่าตัวประกอบแรงดัน

t_r เป็นอัตราส่วนการแปลงพิกัด

ในกรณีที่ระบบมีแรงดันสูงกว่า 35 kV จ่ายด้วยสายส่งเหนือศีรษะ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q อาจพิจารณาเพียงค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียวเป็น $Z_Q = jX_Q$ ได้

ส่วนในกรณีอื่น ๆ ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน R_Q ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอน ให้ใช้ความสัมพันธ์ $R_Q = 0.1\ X_Q$ โดยที่ $X_Q = 0.995\ Z_Q$

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} และกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} นั้นสามารถหาได้จากทางการไฟฟ้า สำหรับที่ระดับแรงดัน 22 kV และ 24 kV นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ $S''_{kQ} = 500$ MVA [7]

สำหรับอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ของระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะไม่นำมาใช้ในการคำนวณ

2.2.2.2 **อิมพิแดนซ์ของหม้อแปลง** (Transformer Impedance)

ค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวกของหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด $Z_T = R_T + jX_T$ สามารถคำนวณได้จากข้อมูลค่าพิกัดของหม้อแปลงดังนี้

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \tag{2.3}$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \tag{2.4}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \tag{2.5}$$

โดยที่

U_{rT} เป็นแรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ

I_{rT} เป็นกระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ

S_{rT} เป็นกำลังพิกัดปรากฏของหม้อแปลง

P_{krT} เป็นกำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงในขดลวดที่กระแสพิกัด

u_{kr} เป็นแรงดันลัดวงจรพิกัด หน่วยเป็นเปอร์เซนต์

u_{Rr} เป็นแรงดันโอห์มมิก (Ohmique Voltage) พิกัด หน่วยเป็นเปอร์เซนต์

สำหรับข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณนั้น สามารถหาได้จากแผ่นป้ายพิกัด หรือสอบถามจากบริษัทผู้ผลิต ดังตัวอย่างข้อมูลของหม้อแปลงซึ่งแสดงในภาคผนวก ก

สำหรับอัตราส่วน X/R โดยปกติจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดหม้อแปลงใหญ่ขึ้น ดังนั้นหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ค่าความต้านทานจะมีค่าน้อยมาก ค่าอิมพิแดนซ์อาจพิจารณาเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์ได้สำหรับการคำนวณขนาดกระแสลัดวงจร ส่วนข้อมูลอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ $Z_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ ของหม้อแปลงสามารถหาได้จากบริษัทผู้ผลิต

2.2.2.3. **อิมพิแดนซ์ของสายไฟฟ้า** (Line Impedance)

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวกของสาย $Z_L = R_L + jX_L$ สามารถหาได้โดยการคำนวณจากข้อมูลต่าง ๆ ของตัวนำได้แก่ พื้นที่หน้าตัด และระยะศูนย์กลางของตัวนำ ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ของสายสามารถหาข้อมูลได้จากบริษัทผู้ผลิต โดยอาจบอกมาในรูปของอัตราส่วน $R_{(0)L}/R_L$ และ $X_{(0)L}/X_L$

สำหรับค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว R'_L ของสายที่อุณหภูมิ 20 °C สามารถคำนวณได้จาก ค่าพื้นที่หน้าตัด q_n และค่าความต้านทานจำเพาะ ρ ดังนี้

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \qquad (2.6)$$

โดยที่

$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m}$ สำหรับทองแดง (Copper)

$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega mm^2}{m}$ สำหรับอะลูมิเนียม (Aluminium)

$\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega mm^2}{m}$ สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy)

ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว X'_L สำหรับสายสามารถคำนวณได้จาก

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{0.25}{n} + \ln\frac{d}{r}\right)$$

$$= f\mu_0\left(\frac{0.25}{n} + \ln\frac{d}{r}\right) \qquad (2.7)$$

โดยที่

d เป็นระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ

r เป็นรัศมีของตัวนำเดี่ยว ในกรณีของตัวนำบันเดิล จะแทน r ด้วย $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ โดยที่ R คือ รัศมีบันเดิล

n เป็นจำนวนตัวนำบันเดิล

เมื่อแทนค่า $\mu_0 = 4\pi x10^{-4}$ H/km เป็นค่าความซึมซาบได้ (Permeability) ของสุญญากาศ จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$X'_L = 0.0628\left(\frac{0.25}{n} + \ln\frac{d}{r}\right) \quad \Omega/\text{km} \quad \text{สำหรับความถี่ f = 50 Hz}$$

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ข้อมูลค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายจะถูกคำนวณไว้ดังแสดงในภาคผนวก ข

2.2.2.4. **อิมพิแดนซ์ของมอเตอร์** (Motor Impedance)

มอเตอร์แบบอซิงโครนัสจะจ่ายกระแสลัดวงจรไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร โดยถ้ากรณีที่มอเตอร์หรือกลุ่มของมอเตอร์แบบอซิงโครนัส มีกระแสพิกัดรวมน้อยกว่า 1 % ของกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_k เมื่อไม่คิดผลของมอเตอร์ เราอาจไม่ต้องคิดถึงผลของมอเตอร์อซิงโครนัสได้ ดังนั้นผลของมอเตอร์อซิงโครนัสจะสามารถตัดทิ้งได้ถ้า

$$\sum I_{rM} \leq 0.01 I''_k$$

โดยที่

$\sum I_{rM}$ เป็นผลรวมของกระแสพิกัดของมอเตอร์ในบริเวณที่เกิดลัดวงจร

I''_k เป็นกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งลัดวงจรโดยไม่มีผลของมอเตอร์

ส่วนในกรณีที่จะต้องคิดกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ ค่าอิมพิแดนซ์ $Z_M = R_M + jX_M$ ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}}\frac{U_{rM}}{\sqrt{3}\, I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}}\frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \qquad (2.8)$$

โดยที่

U_{rM} เป็นแรงดันพิกัดของมอเตอร์

I_{rM} เป็นกระแสพิกัดของมอเตอร์

S_{rM} เป็นกำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์

I_{LR}/I_{rM} เป็นอัตราส่วนของกระแสยึดตัวหมุนต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ R_M/X_M ให้ใช้ค่าดังนี้

$R_M/X_M = 0.1$, $X_M = 0.995\ Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว ≥ 1 MW

$R_M/X_M = 0.15$, $X_M = 0.989\ Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว < 1 MW

$R_M/X_M = 0.42$, $X_M = 0.922\ Z_M$ สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำ

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลาย ๆ ตัวที่ต่อเป็นบัสเดียวกันอาจรวมกันเป็นกลุ่มมอเตอร์ได้ โดยพิกัดรวมของกลุ่มมอเตอร์ หาได้จากผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้ามอเตอร์ในกลุ่มซึ่งมีค่าเป็น kW หรือ MW และสามารถคำนวณหากำลังปรากฏ S_{rM} รวมและค่าอื่น ๆ ได้

ส่วนค่าอิมพิแดนซ์ลำดับศูนย์ของมอเตอร์สามารถหาได้จากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์

2.2.3 วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจร [7,9]

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ามีหลายแบบด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลจะให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ซึ่งจะนำมาใช้ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรแบบเฟส ส่วนการลัดวงจรระหว่างสายกับดินจะนำมาพิจารณาในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรลงดิน โดยสามารถทำการคำนวณได้ดังนี้

กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสำหรับการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3} สามารถหาได้จากสมการ

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R^2_{k(1)} + X^2_{k(1)}}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k(1)}} \qquad (2.9)$$

โดยที่

U_n เป็นแรงดันของระบบ

c เป็นค่าตัวประกอบแรงดัน

$R_{k(1)}$ เป็นผลรวมของความต้านทานลำดับบวกที่ต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์ในระบบ

$X_{k(1)}$ เป็นผลรวมของรีแอกแตนซ์ลำดับบวกที่ต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์ในระบบ

$Z_{k(1)}$ เป็นอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสำหรับการลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1} สามารถหาได้จากสมการ

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\, cU_n}{(Z_{k(0)} + Z_{k(1)} + Z_{k(2)})} = \frac{\sqrt{3}\, cU_n}{(Z_{k(0)} + 2Z_{k(1)})} \qquad (2.10)$$

โดยที่

U_n เป็นแรงดันของระบบ

c เป็นค่าตัวประกอบแรงดัน

$Z_{k(1)}$ เป็นอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

$Z_{k(2)}$ เป็นอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับลบ

$Z_{k(0)}$ เป็นอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

3.1 การพิจารณาคุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้า และทำการตัดส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบ เพื่อให้ระบบส่วนที่เหลือยังสามารถทำงานต่อได้ โดยอุปกรณ์ป้องกันมีหลายประเภท และมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันและการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่

- **ชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน**

อุปกรณ์ป้องกันโดยทั่วไปมีหลายชนิด มีทั้งแบบที่ปรับตั้งการทำงานโดยไม่ต้องพิจารณาจัดความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น เช่น รีเลย์วัดค่าผลต่าง (Differential Relay) รีเลย์แรงดันเกิน (Overvoltage Relay) รีเลย์แรงดันต่ำเกิน (Undervoltage Relay) เป็นต้น และอีกประเภทหนึ่งเป็นแบบที่ต้องทำการจัดความสัมพันธ์การทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) เป็นต้น โดยในที่นี้เราจะกล่าวถึงเฉพาะอุปกรณ์ป้องกันที่ต้องมีการจัดความสัมพันธ์ของการทำงานเท่านั้น

- **พิกัดการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน**

ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันต้องพิจารณาถึงค่าพิกัดของอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์แต่ละประเภทจะมีค่าพิกัดที่ต้องพิจารณาแตกต่างกันไป เช่น ค่าพิกัดกระแส (Ampere Rating) ค่าพิกัดการตัดกระแส (Interrupting Rating) และค่าพิกัดแรงดัน (Voltage Rating) เป็นต้น

- **กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส** (Time-current Characteristic Curve) [4,6,10]

เป็นกราฟที่แสดงการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ โดยกราฟจะแสดงค่าเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ณ ที่กระแสค่าต่าง ๆ ซึ่งไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกัน โดยแกนตั้งจะเป็นค่าเวลา และแกนนอนจะเป็นค่ากระแส โดยกราฟจะเขียนอยู่บนมาตราส่วนเป็นค่าลอการิทึม (Logarithm) โดยบริเวณส่วนที่อยู่ด้านซ้ายและด้านล่างของเส้นกราฟจะเป็นบริเวณที่อุปกรณ์ป้องกันไม่ทำงาน ส่วนด้านบนและด้านขวาจะเป็นบริเวณที่อุปกรณ์ทำงาน

สำหรับอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญและนิยมใช้กันมาก ได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ในหัวข้อต่อไป

3.2 ฟิวส์

ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ซึ่งจะทำหน้าที่เปิดวงจรด้วยการหลอมเหลวตัวเองด้วยความร้อนที่เกิดจากกระแสเกินค่าพิกัดที่ไหลผ่าน ฟิวส์ถูกใช้ในการป้องกันสภาวะโหลดเกินและลัดวงจร โดยลักษณะการทำงานของฟิวส์มีดังนี้ [10]

1.ฟิวส์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวตรวจจับ (Sensing) และตัดวงจร (Interrupting) ในตัวเดียว กัน

2.ฟิวส์มีคุณลักษณะการทำงานสัมพันธ์กับขนาดของกระแสและช่วงเวลาของกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน

3.ฟิวส์ไม่สามารถทำการเปิดปิดวงจรได้ด้วยมือ เมื่ออยู่ในสภาวะปกติ จึงมักใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ตัดวงจรอื่น เช่น สวิตช์ตัดกระแส (Interrupter switch)

4.ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานแบบเฟสเดียว คือฟิวส์เฉพาะเฟสที่เกิดสภาวะผิดปกติเท่า นั้นที่ทำหน้าที่ตัดวงจร

5.ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานเพียงครั้งเดียว ต้องทำการเปลี่ยนใหม่หลังเกิดการตัดวงจรแล้ว

ฟิวส์มีค่าพิกัดการทำงานที่สำคัญซึ่งต้องพิจารณาในการเลือกดังนี้

ค่ากระแสพิกัด (Ampere Rating) คือค่ากระแสที่ฟิวส์จะทำงานต่อเนื่องโดยไม่เกิดการหลอมเหลวหรือไม่ทำให้อุณหภูมิเกินค่าที่กำหนด

ค่าพิกัดการตัดกระแส (Interrupting Rating) คือค่ากระแสสูงสุดซึ่งฟิวส์สามารถทำการตัดวงจรได้ในสภาวะปกติ

ค่าพิกัดแรงดัน (Voltage Rating) คือค่าแรงดันใช้งานสำหรับฟิวส์

ชนิดของฟิวส์อาจสามารถแบ่งได้เป็น

1. ฟิวส์แรงดันต่ำ (Low-Voltage Fuse)
2. ฟิวส์แรงดันสูง (High-Voltage Fuse)

3.2.1. **ฟิวส์แรงดันต่ำ** (Low-Voltage Fuse) [10,11,12]

เป็นฟิวส์สำหรับใช้งานในระบบแรงดันต่ำ อาจสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานดังนี้

ฟิวส์แบบจำกัดกระแส (Current-Limiting Fuse) เป็นฟิวส์ที่สามารถทำหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อกระแสผิดพร่องมีค่าเกินกระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current) โดยฟิวส์จะสามารถกำจัดกระแสผิดพร่องได้ในช่วงครึ่งไซเคิลแรก

ฟิวส์แบบไม่จำกัดกระแส (Non-Current-Limiting Fuse) เป็นฟิวส์แบบที่มีพิกัดการตัดกระแสถึง 10 kA แต่ไม่มีการจำกัดกระแสที่ไหลในวงจร ใช้สำหรับวงจรที่มีกระแสลัดวงจรสูงสุดไม่เกิน 10 kA

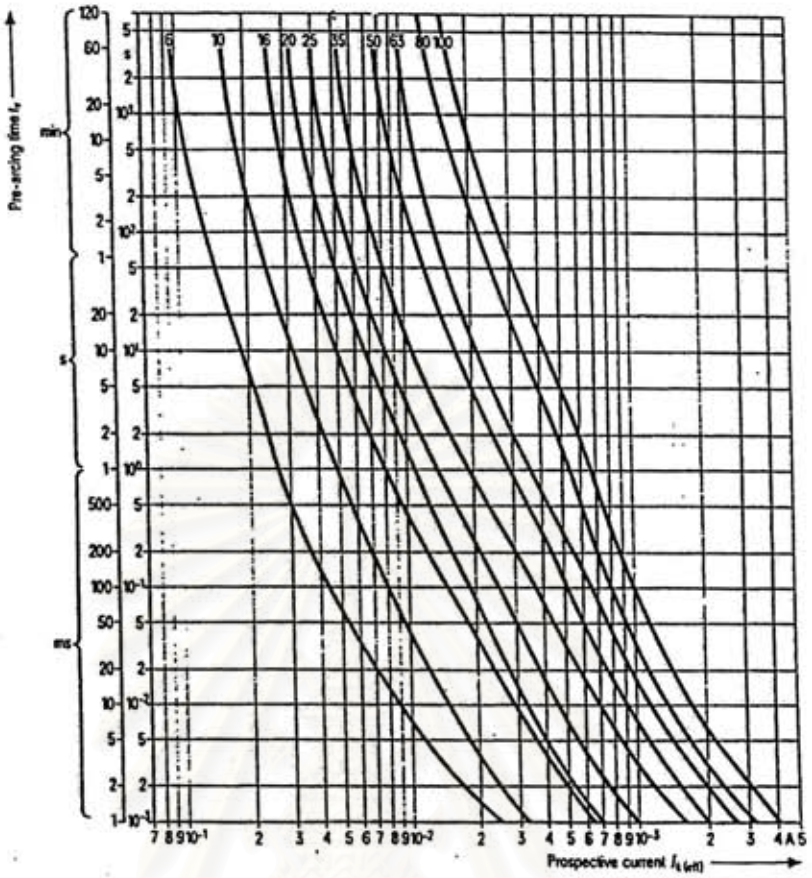
ฟิวส์แบบองค์ประกอบคู่ (Dual Element Fuse) **หรือฟิวส์แบบหน่วงเวลา** (Time-Delay Fuse) เป็นฟิวส์ที่มีส่วนประกอบ 2 ส่วน ที่มีคุณลักษณะการทำงานตอบสนองต่อค่ากระแสที่แตกต่างกันต่ออนุกรมกันอยู่ในกล่องบรรจุตัวเดียวกัน โดยส่วนที่มีคุณลักษณะการทำงานที่เร็วจะใช้ในการป้องกันการลัดวงจร ในขณะที่ส่วนที่มีคุณลักษณะการทำงานแบบหน่วงเวลาจะทำงานในกรณีสภาวะโหลดเกิน

สำหรับฟิวส์แรงดันต่ำที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

ฟิวส์ HRC หรือ ฟิวส์แบบ High Rupturing Capacity โดยทั่วไปจะหมายถึงฟิวส์แรงดันต่ำที่มีค่าพิกัดการตัดกระแสสูงถึง 100 kA มีลักษณะการทำงานเป็นฟิวส์แบบจำกัดกระแส ฟิวส์ HRC มีส่วนประกอบหลักได้แก่ ฐานฟิวส์ (Base) และตัวไส้ฟิวส์ (Fuse Link) มีหลายประเภทการทำงาน (Operation Class) เช่น Class gL, Class aM เป็นต้น

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงดันต่ำ

การพิจารณาจัดความสัมพันธ์การทำงานของฟิวส์กับอุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ ต้องพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสของฟิวส์ โดยค่าเวลาอาจแทนด้วยค่าเวลาหลอมเหลวต่ำสุด (Minimum Melting Time) เวลาหลอมเหลวเฉลี่ย (Average Melting Time) หรือเวลาตัดกระแสรวม (Total Clearing Time) โดยการนำกราฟมาเปรียบเทียบกัน กราฟทั้งสองจะต้องมีลักษณะค่าของเวลาแบบเดียวกัน ซึ่งโดยปกติค่าเวลาที่แสดงจะเป็นค่าเวลาหลอมเหลวเฉลี่ย โดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ ± 10% โดยลักษณะกราฟเวลา-กระแสของฟิวส์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงดันต่ำ

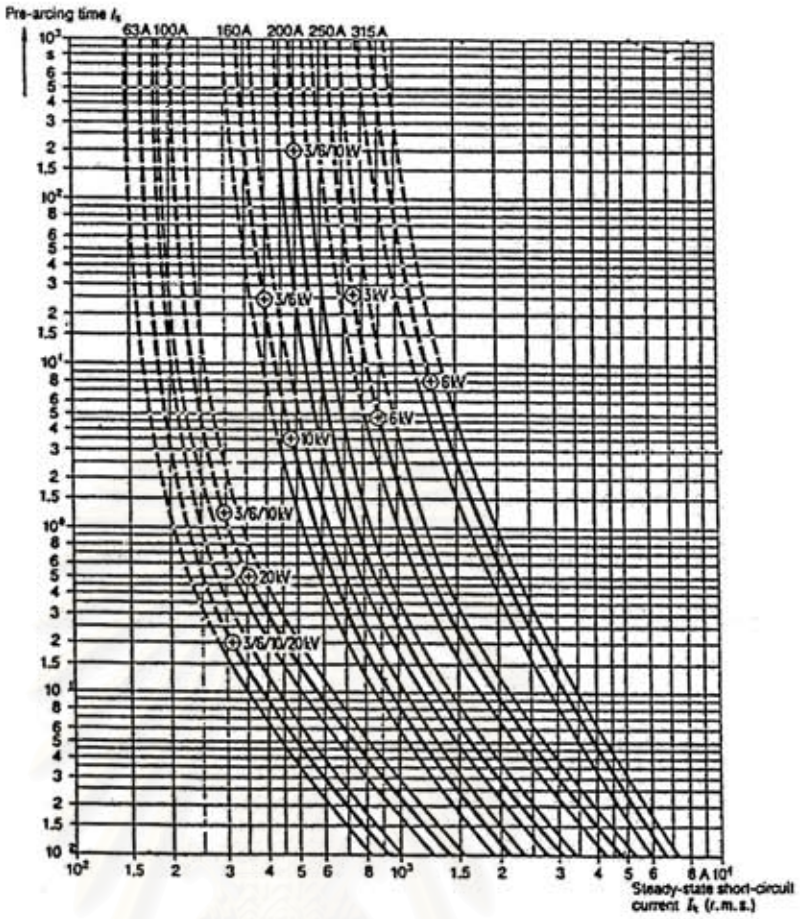
3.2.2 **ฟิวส์แรงดันสูง** (High-Voltage Fuse) [11,12]

ฟิวส์แรงดันสูง เป็นฟิวส์ที่ใช้ในระบบแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง ชนิดของฟิวส์แรงดันสูงที่นิยมใช้ได้แก่ ฟิวส์ HRC

ฟิวส์ HRC สามารถใช้ในการป้องกันอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า คาปาซิเตอร์ มอเตอร์ หม้อแปลงแรงดัน และสายไฟฟ้า

ตัวอย่างกราฟคุณลักษณะการทำงานของฟิวส์แรงดันสูง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงดันสูง

3.2.3 การพิจารณาในการใช้งานฟิวส์ [6,10]

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้ฟิวส์ ได้แก่ พิกัดแรงดัน พิกัดกระแส และพิกัดการตัดกระแส โดยถ้ากรณีที่ฟิวส์ต้องมีการจัดความสัมพันธ์ของการทำงานกับฟิวส์ตัวอื่น หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวอื่น ก็จะต้องพิจารณากราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์ รวมทั้งค่ากระแสปล่อยผ่าน (Let-through Current) หรือกระแส Cut-off ค่า I^2t และคุณลักษณะของโหลดที่ถูกป้องกันด้วย

สำหรับการจัดความสัมพันธ์ของฟิวส์กับฟิวส์ที่ต่ออนุกรมกันในระบบ จะต้องพิจารณาจากกราฟเวลา-กระแส และต้องพิจารณาค่า I^2t ขณะตัดกระแสของฟิวส์ตัวล่าง (Downstream) โดยจะต้องมีค่าน้อยกว่า I^2t ขณะหลอมเหลวของฟิวส์ตัวบน (Upstream) ในบางครั้งผู้ผลิตฟิวส์อาจจะแสดงข้อมูลของฟิวส์เป็นตารางว่าฟิวส์แต่ละขนาด สามารถจัดความสัมพันธ์กับฟิวส์ขนาดเท่าใดได้บ้าง โดยไม่ต้องมีการพิจารณาถึงรายละเอียดอื่นสำหรับฟิวส์ของบริษัทผู้ผลิตเดียวกัน

สำหรับค่าพิกัดแรงดัน ควรเลือกฟิวส์ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับหรือสูงกว่าแรงดันที่ใช้งาน ส่วนการพิจารณาพิกัดกระแสของฟิวส์ ก็ควรเลือกให้ฟิวส์ทำงานเฉพาะในสภาวะเกิดความผิดพร่อง โดยฟิวส์ไม่ควรทำงานในสภาวะกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ของอุปกรณ์ สำหรับอุณหภูมิใช้งานและเครื่องห่อหุ้มก็อาจจะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ด้วย

ขนาดของฟิวส์ที่ใช้งานโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้
6 , 10 , 16 , 20 , 25 , 32 , 40 , 50 , 63 , 80 , 100 , 125 , 160 , 200 , 250 , 315 , 400 A

3.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ (Low-voltage Circuit Breaker)

เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ใช้สำหรับเปิดและปิดวงจรด้วยมือในสภาวะปกติ และจะเปิดวงจรได้โดยอัตโนมัติเมื่อเกิดสภาวะโหลดเกินหรือเกิดการลัดวงจร เซอร์กิตเบรกเกอร์อาจสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ [12]

เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดเล็ก (Miniature Circuit Breaker : MCB) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ติดตั้งภายในแผงจ่ายไฟของที่อยู่อาศัย (Consumer Unit) แผงสวิตช์ (Panel Board) แผงจ่ายไฟย่อย (Distribution Board) ใช้สำหรับป้องกันวงจรย่อย (Branch Circuit) วงจรสายป้อน (Feeder Circuit)

เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบกล่องหุ้ม (Molded Case Circuit Breaker : MCCB) ใช้ป้องกันวงจรย่อย วงจรสายป้อนและวงจรหลัก (Main Circuit)

เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอากาศ (Air Circuit Breaker : ACB) หมายถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดใหญ่ มีค่าความคงทนต่อการลัดวงจรสูง

เซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าพิกัดการทำงานที่สำคัญซึ่งต้องพิจารณาในการเลือกดังนี้ [10,12]

ค่าพิกัดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Current Rating) คือค่ากระแสที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทนได้ ณ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) ที่กำหนด (ปกติ 25-40 °C) โดยถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ติดตั้งโดยมีกล่องหุ้ม (Enclosure) จะต้องไม่จ่ายโหลดเกิน 80 % ของค่ากระแสพิกัด ค่าพิกัดกระแสต่อเนื่องนี้อาจปรับตั้งได้หรือไม่ได้ก็ได้

ค่าพิกัดการตัดกระแส (Interrupting Rating) คือกระแสลัดวงจรสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถตัดวงจรได้ โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่เกิดความเสียหาย โดยทั่วไประบุเป็นค่ากระแสสมมาตร rms

ค่าพิกัดช่วงเวลาสั้น (Short-time Rating) คือค่ากระแสสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทนได้ในช่วงเวลาที่ไม่นานนัก ซึ่งโดยทั่วไปคือ ไม่เกิน 0.5 s โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่เปิดวงจร ค่านี้ใช้สำหรับพิจารณาในการให้อุปกรณ์ป้องกันตัวล่างของระบบทำงานก่อน สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำที่ไม่มีคุณลักษณะการทำงานแบบฉับพลัน (Instantaneous Trip) ค่าพิกัดช่วงเวลาสั้นนี้จะมีค่าเท่ากับค่าพิกัดการตัดกระแส

ค่าพิกัดแรงดัน (Voltage Rating) คือค่าแรงดันใช้งานสูงสุดสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถใช้งานที่ระดับแรงดันต่ำกว่าค่าที่กำหนดนี้ได้

การทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา โดยคุณลักษณะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะขึ้นอยู่กับ อุปกรณ์ตัดวงจร (Trip Device) ในตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical
2. อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Solid-state

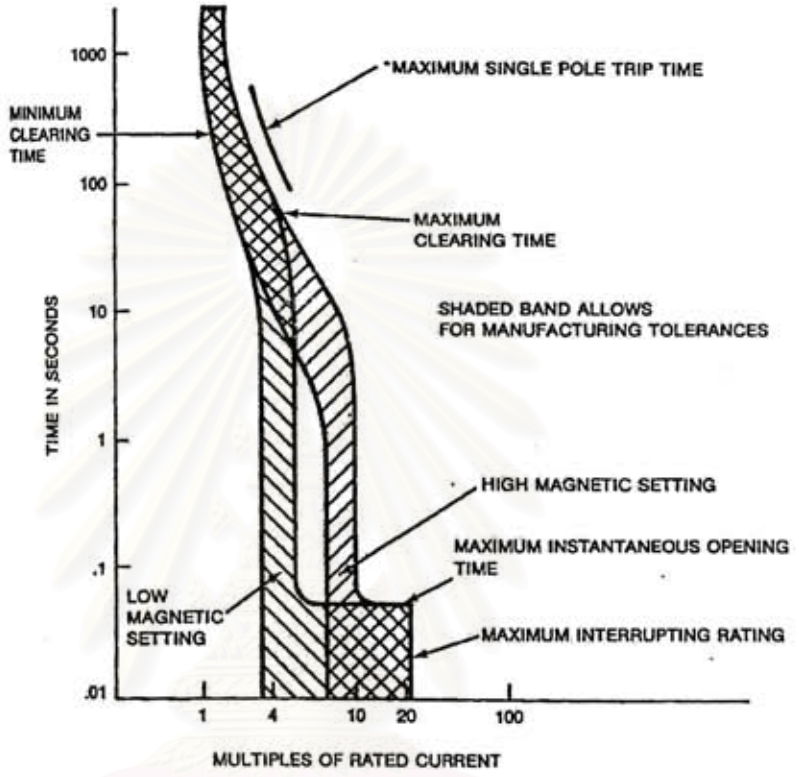
3.3.1. อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical หรือแบบ Thermal-Magnetic [10,12]

เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำซึ่งใช้อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical จะมีส่วนของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน Bimetal สำหรับป้องกันสภาวะโหลดเกิน และมีส่วนของ Magnetic สำหรับป้องกันสภาวะการลัดวงจร

คุณลักษณะการทำงานสามารถแบ่งเป็น Long Time Delay และ Instantaneous Trip โดยค่าปรับตั้งจะกำหนดเป็นจำนวนเท่าหรือเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าพิกัดกระแสต่อเนื่อง โดยส่วนของ Long Time Delay จะมีการหน่วงเวลาการทำงาน ขึ้นกับค่าของกระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ และจะทำงานด้วยส่วนของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนซึ่งปกติจะไม่สามารถปรับตั้งค่าการทำงานได้

สำหรับส่วนของ Instantaneous Trip จะมีลักษณะการทำงานแบบฉับพลันโดยไม่มีการหน่วงเวลา แต่จะมีเวลาการทำงานจากกลไกของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์เองและเวลาจากอาร์ก การทำงานของ Instantaneous Trip จะทำงานโดยส่วนของอุปกรณ์ Magnetic ซึ่งโดยปกติสามารถปรับตั้งค่าการทำงานได้ สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดตั้งแต่ 100 A ขึ้นไป ซึ่งปรับได้ตั้งแต่ค่าประมาณ 5-10 เท่าของกระแสพิกัดต่อเนื่อง

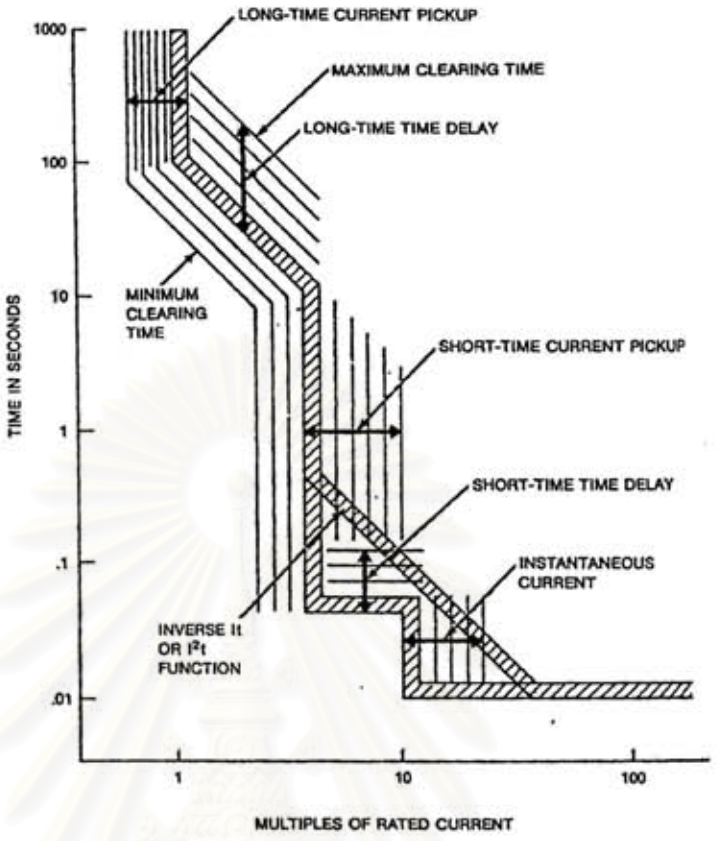
กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical แสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 โดยแถบการทำงานจะแสดงถึงความคลาดเคลื่อนเคลื่อนในการทำงาน



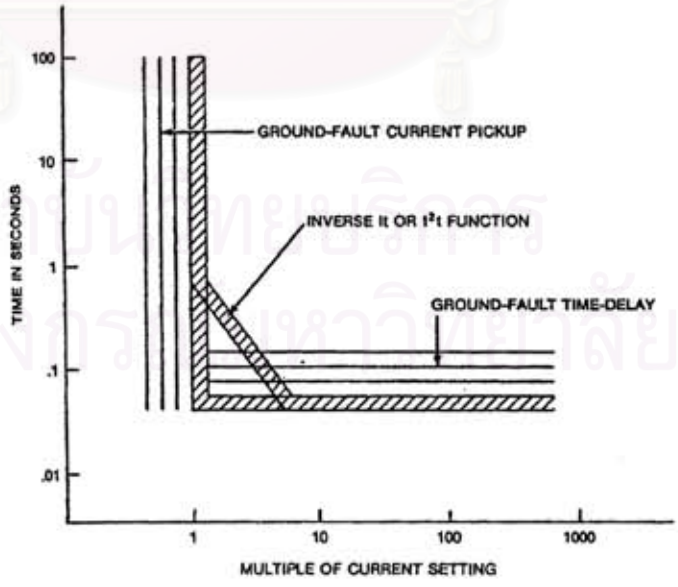
รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electromechanical

3.3.2. อุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Solid-state หรือแบบ Electronic [10,12]

มีคุณลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนกว่าแบบ Electromechanical โดยคุณลักษณะการทำงานสามารถแบ่งเป็น Long-time Current Pickup, Long Time Delay, Short-time Current Pickup, Short-Time Delay และ Instantaneous Trip ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าการทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยอาจจะมีคุณลักษณะการทำงานสำหรับป้องกันความผิดพร่องลงดินด้วย ซึ่งได้แก่ Ground-fault Current Pickup และ Ground-fault Time Delay ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สำหรับอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electronic นี้อาจมีฟังก์ชั่นการปรับตั้ง It หรือ I^2t ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 เพื่อช่วยให้สามารถทำการจัดความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันตัวล่างได้สะดวกขึ้น



รูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electronic (แสดงฟังก์ชั่นการทำงานทั้งหมดที่สามารถปรับตั้งได้)



รูปที่ 3.5 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของการป้องกันความผิดพร่องลงดินสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดวงจรแบบ Electronic

สำหรับฟังก์ชั่นการปรับตั้งคุณลักษณะการทำงานดังกล่าวข้างต้นอาจมีบางส่วนหรือมีทั้งหมดก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์และการผลิตของแต่ละบริษัทผู้ผลิต

3.3.3 การพิจารณาในการใช้งานเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ ได้แก่ แรงดัน กระแส พิกัดการตัดกระแส และอาจต้องพิจารณารวมถึง สถานที่ติดตั้ง อุณหภูมิ การบำรุงรักษา ฯลฯ โดยจะต้องทำการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรก่อนเพื่อเลือกค่าพิกัดการตัดกระแส ซึ่งอาจมีค่าพิกัดต่างกันสำหรับขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีพิกัดกระแส (Frame Size) เดียวกัน

โดยพิกัดการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ณ ตำแหน่งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ติดตั้ง

หลักการพิจารณาเลือกและปรับตั้งการทำงานสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำมีดังนี้ [10]

1. ทำการเลือกค่าพิกัดกระแสต่อเนื่อง และค่าปรับตั้งสำหรับ Long-time Delay โดยปรับตั้งให้เป็นตามมาตรฐานที่กำหนดและไม่ปรับตั้งที่ค่าสูงเกินไปแต่พอที่จะยอมให้กระแสชั่วขณะของอุปกรณ์ (เช่น กระแสขณะเริ่มเดินเครื่อง) ไหลผ่านได้ โดยไม่เกิดการตัดวงจร และยังต้องมีการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของการทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันตัวล่างของระบบด้วย

2. ทำการเลือกค่าปรับตั้งสำหรับ Instantaneous Trip โดยปรับตั้งไม่ให้มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสเนื่องจากสภาวะการทำงานปกติของโหลด (เช่น กระแสขณะเริ่มเดินเครื่อง) และไม่ปรับตั้งเกินค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่ตำแหน่งที่ติดตั้ง

3. การปรับตั้งการทำงานสำหรับป้องกันความผิดพร่องลงดิน ควรปรับตั้งที่ค่าต่ำสุด และมีการปรับตั้ง Ground-fault Time Delay ให้มีการจัดความสัมพันธ์ที่เหมาะสม

ขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC มีขนาดดังต่อไปนี้

6 , 10 , 16 , 20 , 25 , 32 , 40 , 50 , 63 , 80 , 100 , 125 , 160 , 200 , 250 , 315 , 400 , 500 , 630 , 800 , 1000 , 1250 , 1600 , 2000 , 2500 , 3200 , 4000 , 5000 , 6300 A

3.4 รีเลย์ป้องกัน (Protective Relays) [6,8,10,12-15]

รีเลย์ป้องกัน คืออุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบความผิดปกติของระบบไฟฟ้าจากสัญญาณที่ได้รับจากหม้อแปลงกระแส (Current Transformer : CT) และ/หรือ หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer : VT) โดยเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ รีเลย์จะทำการสั่งอุปกรณ์ตัดวงจร ซึ่งได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Power Circuit Breaker) ให้ทำการแยกส่วนที่เกิดสภาวะผิดปกติออกจากระบบ

ระบบป้องกันซึ่งทำงานด้วยรีเลย์จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนได้แก่

1. **เซอร์กิตเบรกเกอร์** ใช้สำหรับเปิดและปิดวงจรในขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ โดยสามารถทำการเปิดและปิดได้ด้วยมือ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะผิดปกติ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องทำการเปิดวงจรอย่างรวดเร็วโดยอัตโนมัติ ดังนั้นจึงต้องมีรีเลย์ทำหน้าที่ช่วยตรวจจับสภาวะผิดปกติ และทำหน้าที่สั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร สำหรับชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระดับแรงดันปานกลางและแรงดันสูง ที่นิยมใช้มากได้แก่ [12]

- เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสุญญากาศ (Vacuum Circuit Breaker) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีหน้าสัมผัส (Contact) อยู่ใน Vacuum Interrupter ซึ่งมีความดันต่ำมาก มีข้อดีคือ มีขนาดเล็กสามารถติดตั้งได้ทุกตำแหน่ง

- เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ SF_6 (SF_6 Circuit Breaker) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ก๊าซ SF_6 เป็นฉนวนและตัวดับอาร์ก เหมาะสำหรับใช้ในการตัดวงจร มอเตอร์ หม้อแปลง

2. **หม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน** มีหน้าที่แปลงกระแสและแรงดันจากกระแสและแรงดันที่ค่าสูง ให้เป็นกระแสและแรงดันที่ค่าต่ำเพื่อป้อนเข้าสู่รีเลย์ โดยทั่วไปจะแปลงเป็นกระแสที่ค่า 1 หรือ 5 A และแรงดันที่ 110 หรือ 120 V

พิกัดกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแส โดยทั่วไปมีค่าดังนี้

10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 40 , 50 , 60 , 75 , 100 , 150 , 200 , 250 , 300 , 400 , 500 , 600 , 800 , 1000 , 1500 , 2000 , 2500 , 3000 , 4000 , 5000 , 6000 A

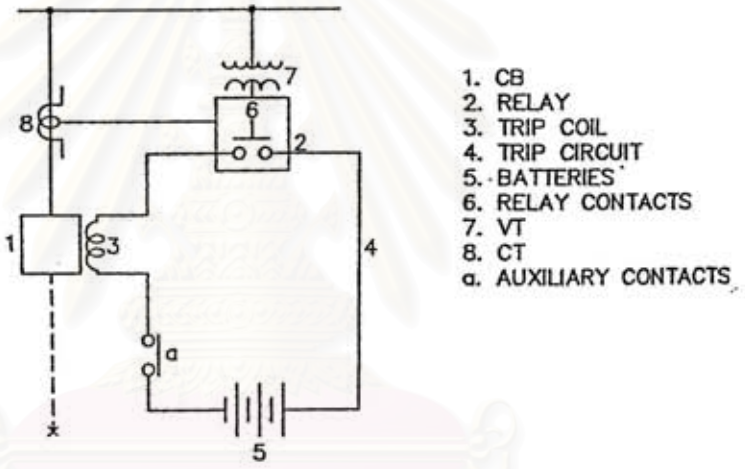
ส่วนพิกัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดัน จะมีค่าตามพิกัดแรงดันของระบบ

สำหรับการเลือกพิกัดของหม้อแปลงกระแส โดยทั่วไปจะเลือกค่ากระแสพิกัดด้านปฐมภูมิให้สูงกว่ากระแสพิกัดของวงจรที่จะป้องกัน

3. **รีเลย์ป้องกัน** ทำหน้าที่รับสัญญาณเข้าจากหม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน โดยอาจมีสัญญาณเข้าหนึ่งสัญญาณหรือมากกว่าขึ้นกับชนิดของรีเลย์ เมื่อขนาดของสัญญาณถึงค่าที่กำหนด หน้าสัมผัสของรีเลย์จะปิดทำให้วงจรทริปครบวงจร ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการเปิดวงจร

4. **วงจรทริป** ประกอบด้วยสายไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ซึ่งป้อนกระแสเข้าสู่ขดลวดทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ นอกจากนี้ยังอาจมีรีเลย์ช่วยอื่น ๆ ต่ออยู่ด้วย เช่น รีเลย์หน่วงเวลา (Time Delay Relay) และรีเลย์ช่วย (Auxiliary Relay) เป็นต้น

ส่วนประกอบของระบบป้องกันซึ่งทำงานด้วยรีเลย์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของระบบป้องกันซึ่งทำงานด้วยรีเลย์

รีเลย์ที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ตามหลักการทำงานได้ดังนี้ [8]

1. **รีเลย์แบบ** Electromechanical คือ รีเลย์ที่อาศัยกระแสไฟฟ้า สร้างแรงดึงดูดหรือ แรงบิดทางแม่เหล็กทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทางกลของหน้าสัมผัส รีเลย์แบบนี้เป็นรีเลย์ที่ใช้มาตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบันก็ยังมีใช้อยู่ อาจแบ่งตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ประเภท คือ

- รีเลย์แบบอาศัยแรงดึงดูดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Attraction)
- รีเลย์แบบอาศัยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

2. **รีเลย์แบบ** Solid-state เป็นรีเลย์ซึ่งใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีความเชื่อถือได้สูง ทำงานรวดเร็วและมีขนาดเล็ก แต่อาจมีปัญหาเรื่องอุณหภูมิ ความชื้น แรงดันเกิน และกระแสเกินได้

เป็นรีเลย์ที่มีคุณลักษณะการทำงานที่ดีกว่ารีเลย์แบบ Electromechanical ในปัจจุบันบริษัทผลิตอุปกรณ์ป้องกันจึงได้มาพัฒนาและผลิตรีเลย์แบบ Solid-state แทน

3. **รีเลย์แบบ Digital** เป็นรีเลย์ที่มีลักษณะเหมือนกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งรับสัญญาณเข้าและประมวลผลสัญญาณเหล่านั้นและทำการสร้างเป็นแรงบิดหรือ Logic Output ซึ่งจะมีส่วนประมวลผลทำหน้าที่ตัดสินใจเพื่อให้หน้าสัมผัสปิด หรือให้สัญญาณเอาท์พุทออกมา

รีเลย์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ามีหลายชนิดตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งบางชนิดไม่ต้องทำการจัดความสัมพันธ์กับรีเลย์ตัวอื่น เนื่องจากมีการทำงานในตัวเองโดยไม่เกี่ยวข้องกับรีเลย์ตัวอื่น สำหรับรีเลย์ที่ต้องจัดความสัมพันธ์ของการทำงานมีดังนี้

3.4.1 รีเลย์กระแสเกินชนิดฉับพลัน (Instantaneous Overcurrent Relay : 50) และรีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time Overcurrent Relay : 51)

รีเลย์ชนิดนี้เป็นแบบที่ใช้มากในการป้องกันกระแสเกินที่เกิดจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าทุกระบบ เช่น สถานีไฟฟ้าย่อย โรงงานอุตสาหกรรม และอาคารขนาดใหญ่ โดยมีทั้งแบบ Electromechanical และแบบ Solid-state โดยรีเลย์จะทำงานเมื่อมีกระแสเกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งเรียกว่าค่า Pickup โดยเวลาในการทำงานอาจจะทำงานทันทีในเวลา 0.01-0.03 s ซึ่งเรียกว่า รีเลย์กระแสเกินชนิดฉับพลัน (Instantaneous Overcurrent Relay : 50) หรือมีการทำงานโดยหน่วงเวลา ซึ่งเรียกว่ารีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time Overcurrent Relay : 51)

สำหรับรีเลย์แบบหน่วงเวลา นอกจากการตั้งค่า Pickup แล้ว ยังสามารถปรับเวลาในการทำงานได้ โดยทำการปรับตั้งค่า Time Multiplier Setting (TMS) ซึ่งคือการเลือกกราฟการทำงานที่มีลักษณะเดียวกันแต่มีค่าเวลาการทำงานที่ต่างกัน โดยปกติค่า TMS สามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ 0.05 - 1.00 โดยเวลาการทำงานของรีเลย์จะมีค่าเท่ากับ เวลาการทำงานของรีเลย์ที่ TMS = 1.00 คูณด้วยค่าปรับตั้ง TMS ซึ่งการปรับตั้งเวลาการทำงานนี้มีประโยชน์มากในการจัดความสัมพันธ์สำหรับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

ในรีเลย์แบบหน่วงเวลา เวลาในการทำงานจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับขนาดกระแสที่ผ่านรีเลย์ ถ้ากระแสมีค่ามากเวลาในการทำงานจะน้อย ซึ่งเราจะเรียกกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของรีเลย์แบบนี้ว่า Inverse Time โดยระดับความโค้งของกราฟจะมีหลายระดับซึ่งได้แก่ Standard Inverse, Longtime Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse ดังแสดงในรูปที่ 3.7 นอกจากนี้ยังมีแบบ Definite-Minimum Time ซึ่งเวลาในการทำงานจะไม่ขึ้นกับขนาดของกระแสเมื่อกระแสมีค่ามากกว่าค่า ๆ หนึ่ง

คุณลักษณะกราฟการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแต่ละแบบถูกกำหนดโดยสมการดังนี้

Standard Inverse $$t = \frac{0.14}{(I^{0.02} - 1)}$$

Longtime Inverse $$t = \frac{120}{(I - 1)}$$

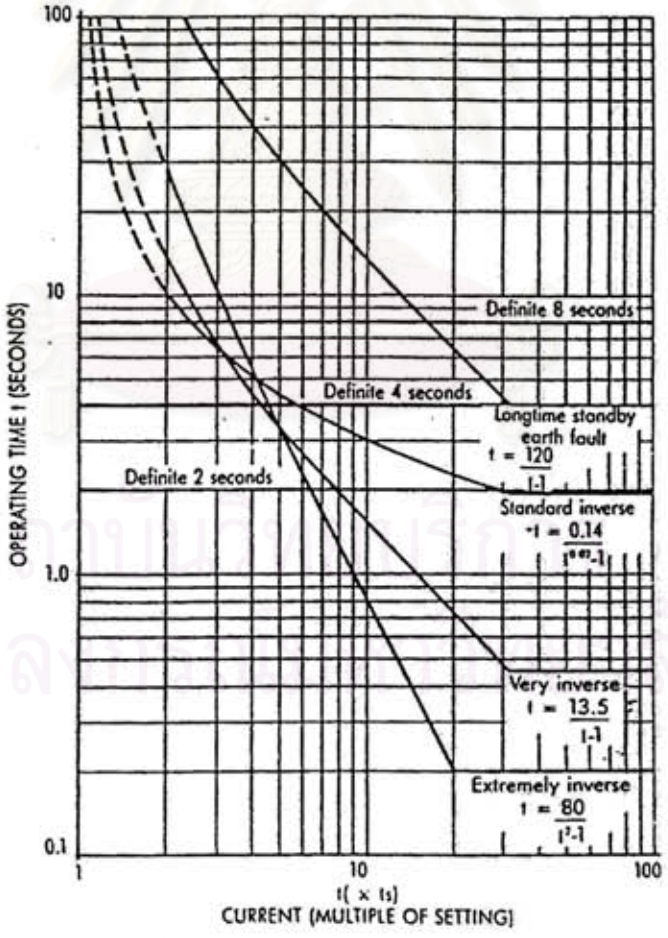
Very Inverse $$t = \frac{13.5}{(I - 1)}$$

Extremely Inverse $$t = \frac{80}{(I^2 - 1)}$$

โดยที่

I เป็นจำนวนเท่าของกระแส Pickup

t เป็นเวลาการทำงานของรีเลย์ที่ค่า TMS =1.00

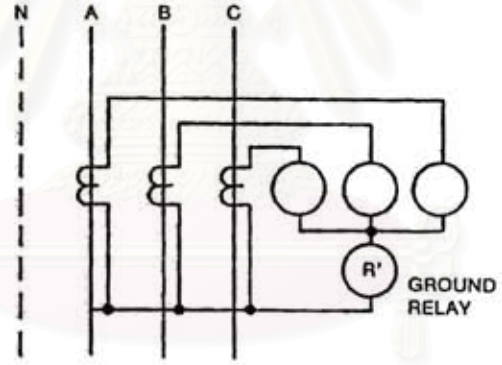


รูปที่ 3.7 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส ของรีเลย์กระแสเกินแต่ละแบบ

3.4.2 **รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน** (Ground Fault Relay : 50/51N, G, GS) [8,10,14]

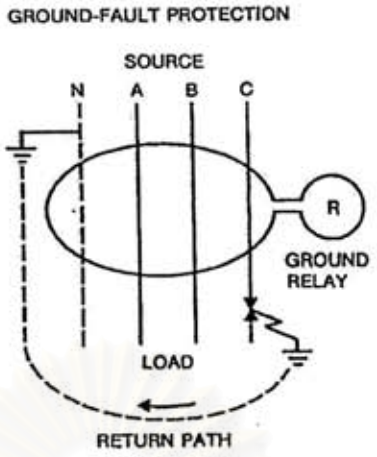
ในระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจะมีการต่อลงดินเพื่อจำกัดกระแสผิดพร่องลงดิน โดยเฉพาะการต่อลงดินผ่านความต้านทานจะทำให้กระแสผิดพร่องลงดินมีขนาดลดลง ดังนั้นรีเลย์กระแสเกินปกติจะไม่สามารถตรวจจับได้ จึงต้องมีรีเลย์ป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน ซึ่งมีความไวสูง สามารถตรวจจับกระแสผิดพร่องลงดินขนาดเล็กได้ ชนิดของรีเลย์ป้องกันกระแสผิดพร่องลงดินที่นิยมใช้มี 3 แบบได้แก่

1. **รีเลย์แบบ** Residually Connected Ground Relay (50/51N) เป็นแบบที่ใช้รีเลย์กระแสเกินต่อเข้ากับจุดร่วมของสายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสที่ต่อแบบวาย ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ คือ ผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ซึ่งก็คือกระแสลำดับศูนย์ แต่ในสภาวะปกติจะไม่มีกระแสไหล ดังนั้นจึงสามารถตั้งค่า Pickup ให้มีค่าต่ำมาก ๆ ได้ โดยต้องเผื่อการเกิดสภาวะไม่สมดุลชั่วขณะที่เกิดขึ้น และเผื่อค่าจากความคลาดเคลื่อนระหว่างอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสด้วย



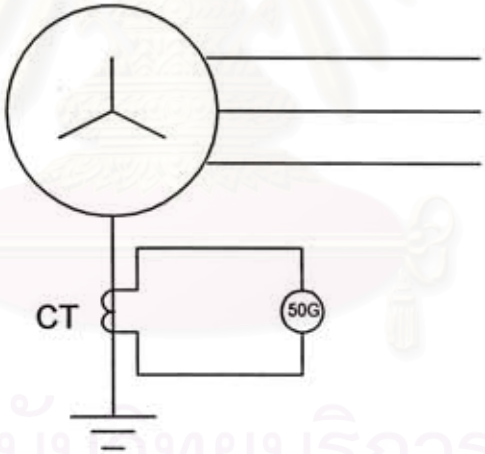
รูปที่ 3.8 รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Residually Connected Ground Relay

2. **รีเลย์แบบ** Zero Sequence Ground Relay (50/51GS) เป็นแบบที่ใช้ร่วมกับหม้อแปลงกระแสแบบ Window Type โดยใช้คล้องผ่านสายเฟสทั้งสามสาย และใช้รีเลย์กระแสเกินต่อที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส ดังรูปที่ 3.9 โดยกระแสที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะเกิดจากผลรวมฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสทั้ง 3 เฟส สำหรับในระบบ 3 เฟส 4 สาย จะต้องคล้องผ่านสายนิวทรัลเพิ่มขึ้นอีก 1 สายด้วย สำหรับรีเลย์แบบนี้ เนื่องจากใช้หม้อแปลงกระแสเพียงตัวเดียว จึงไม่มีปัญหาจากความคลาดเคลื่อนระหว่างอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส



รูปที่ 3.9 รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Zero Sequence Ground Relay

3. **รีเลย์แบบ** Neutral Ground Relay (50/51G) เป็นแบบที่ใช้ป้องกันอุปกรณ์ที่มีสายนิวทรัลต่อลงดิน เช่น หม้อแปลงหรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้หม้อแปลงกระแสและรีเลย์กระแสเกินต่อที่สายนิวทรัลของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.10 รีเลย์นี้จะสามารถตั้งค่าต่ำมาก ๆ ได้



รูปที่ 3.10 รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Neutral Ground Relay

3.4.3 **รีเลย์ป้องกันความร้อน** (Thermal Relay : 49)

รีเลย์ป้องกันความร้อนใช้ในการป้องกันมอเตอร์ หม้อแปลง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ รีเลย์แบบจำลองอุณหภูมิ (Replica-Type Temperature Relay) และรีเลย์ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature-Sensitive Relay)

รีเลย์แบบจำลองอุณหภูมิ (Replica Type) เป็นรีเลย์ที่ทำงานจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสมีค่าเกินค่าที่กำหนด โดยรับค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแส รีเลย์แบบนี้มีหลาย

ชนิดที่นิยมใช้ได้แก่ แบบ Bimetal strip และแบบ Melting Alloy Type โดยปกติรีเลย์ประเภทนี้จะใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กไม่เกิน 1000 kW

รีเลย์ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature Relay) เป็นรีเลย์ที่ทำงานร่วมกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Temperature Instrument) เช่น ตัวต้านทานตรวจจับอุณหภูมิ (Resistance Temperature Detector : RTD) เทอร์โมคัปเปิล (Thermal Couple) โดยจะถูกติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ที่จะป้องกัน เช่นใน ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขดลวดของหม้อแปลงหรือมอเตอร์ขนาดใหญ่ (มอเตอร์เกิน 1000 kW) โดยตัวตรวจจับอุณหภูมิจะถูกต่อไปยังวงจรบริดจ์ (Bridge) ของรีเลย์ป้องกันความร้อนเกิน ในสภาวะอุณหภูมิปกติวงจรบริดจ์จะสมดุล แต่ถ้าอุณหภูมิในขดลวดมีค่าสูงจะทำให้ค่าความต้านทานของตัวตรวจจับมีค่าสูงตาม ทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุล และรีเลย์จะเกิดการทำงาน

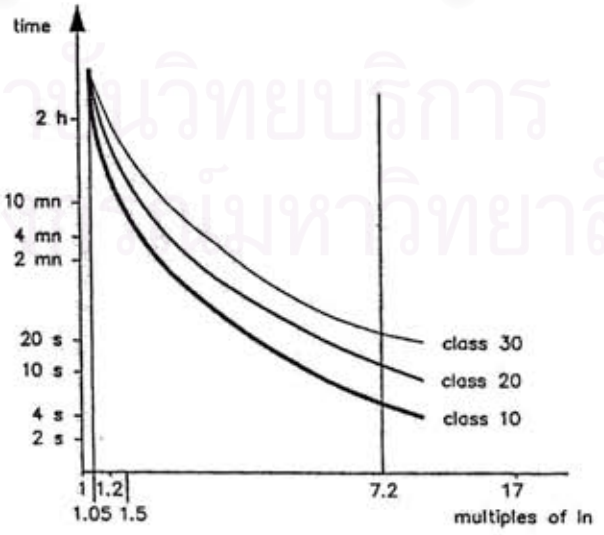
รีเลย์ป้องกันความร้อนเกินถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันมอเตอร์จากผลของกระแสเกิน อย่างไรก็ตามระหว่างมอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง รีเลย์ป้องกันความร้อนเกินต้องยอมให้กระแสจำนวนมากผ่านได้โดยไม่ตัดก่อน แต่ต้องตัดอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสเริ่มเดินเครื่องนานเกินไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเร่งมอเตอร์ รีเลย์ป้องกันความร้อนอาจสามารถแบ่งได้เป็น

รีเลย์ประเภท 10 (Class 10 Relay) ใช้สำหรับมอเตอร์ที่มีเวลาเร่งไม่เกิน 10 s

รีเลย์ประเภท 20 (Class 20 Relay) ใช้สำหรับมอเตอร์ที่มีเวลาเร่งไม่เกิน 20 s

รีเลย์ประเภท 30 (Class 30 Relay) ใช้สำหรับมอเตอร์ที่มีเวลาเร่งไม่เกิน 30 s

โดยกราฟการทำงานของรีเลย์ป้องกันความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟการทำงานของรีเลย์ป้องกันความร้อนแต่ละประเภท

บทที่ 4

การป้องกันอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

4.1 ขอบเขตการป้องกันและการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

เนื่องจากหน้าที่หลักของอุปกรณ์ป้องกันคือ ทำการป้องกันวงจรไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่อง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดขอบเขตการป้องกันอุปกรณ์เพื่อใช้ในการตัดสินใจปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้เหมาะสม โดยปัจจัยที่เป็นตัวพิจารณาขอบเขตการป้องกันของอุปกรณ์ในระบบสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ [1,2]

- **คุณลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า**

ได้แก่ ข้อมูลการทำงานในสภาวะปกติ โดยอุปกรณ์ป้องกันจะต้องไม่ทำงานที่ค่ากระแสเหล่านี้ ซึ่งได้แก่ ค่ากระแสพิกัด กระแสโหลดเกินที่อุปกรณ์ทนได้ และกระแสเริ่มเดินเครื่องหรือกระแสพุ่งเข้า โดยข้อมูลเหล่านี้สามารถหาได้จากผู้ผลิตอุปกรณ์หรือจากแผ่นป้ายพิกัด ถ้าในกรณีที่ไม่มีข้อมูล สามารถประมาณได้จากค่าตามที่กำหนดในมาตรฐานต่าง ๆ

- **ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า**

ได้แก่ ข้อมูลจากมาตรฐานต่าง ๆ ซึ่งกำหนดค่าปรับตั้งในการป้องกันอุปกรณ์แต่ละประเภทในระบบไฟฟ้า โดยมาตรฐานที่จะใช้พิจารณาได้แก่ มาตรฐาน NEC [16] และข้อกำหนดจากทางการไฟฟ้า

- **ระดับความคงทนของอุปกรณ์ไฟฟ้า**

ระดับความคงทนของอุปกรณ์ไฟฟ้า คือระดับขีดจำกัดกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ในระยะเวลาต่าง ๆ ที่กำหนด โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ ข้อมูลนี้สามารถหาได้จากผู้ผลิตอุปกรณ์ หรือสามารถประมาณได้จากค่าตามมาตรฐานที่กำหนด

สำหรับการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน ค่าที่กำหนดตามมาตรฐานต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นค่าสูงสุดซึ่งอนุญาตให้ทำการปรับตั้งได้ แต่ในทางปฏิบัติ การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันควรจะตั้งให้มีค่าต่ำที่สุดเพื่อให้ได้การป้องกันที่ดีที่สุด แต่ต้องไม่ทำให้เกิดการตัดวงจรที่ไม่ต้องการ โดยการปรับตั้งและการเลือกพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับป้องกันอุปกรณ์แต่ละชนิด จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะการป้องกันที่ต้องพิจารณาจัดความสัมพันธ์กันเท่านั้น

4.2 การป้องกันมอเตอร์

4.2.1 ขอบเขตในการพิจารณาป้องกันมอเตอร์

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์นอกจากจะทำให้เสียเวลาในการซ่อมบำรุงแล้ว ยังทำให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิตอีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะลดความเสียหายของมอเตอร์ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์จากความผิดพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น ข้อมูลในการพิจารณาสำหรับการป้องกันมอเตอร์ได้แก่

4.2.1.1 คุณลักษณะของมอเตอร์ [1,2,15]

กระแสพิกัด (Full Load Current) โดยทั่วไปมอเตอร์จะบอกพิกัดเป็นกิโลวัตต์ (kW) หรือแรงม้า (hp) เราสามารถคำนวณหาค่ากระแสพิกัดได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับกรณีมอเตอร์ 1 เฟส

$$I_{rM} = \frac{S_{rM} \times 1000}{U_{rM}} \qquad (4.1)$$

สำหรับกรณีมอเตอร์ 3 เฟส

$$I_{rM} = \frac{S_{rM\,(3\phi)} \times 1000}{\sqrt{3}\, U_{rM}} \qquad (4.2)$$

เมื่อกำลังปรากฏมีค่าเป็น

$$S_{rM}\,(kVA) = P_{rM}\,(kW) / (\cos \varphi_r \times \eta_r) \qquad (4.3)$$

โดยที่

I_{rM} เป็นกระแสพิกัดของมอเตอร์ (A)

U_{rM} เป็นแรงดันพิกัดของมอเตอร์ (V)

S_{rM} เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏของมอเตอร์ (kVA)

P_{rM} เป็นกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (kW)

$\cos \varphi_r$ เป็นตัวประกอบกำลัง

η_r เป็นค่าประสิทธิภาพ

ในกรณีที่ค่าประสิทธิภาพหรือค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ไม่ได้กำหนดไว้ให้ อาจสามารถประมาณค่ากำลังปรากฏได้ดังนี้ [1,2]

I18952613

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัดไม่เกิน 100 hp	S_{rM} (kVA)	=	พิกัดแรงม้า (hp)
พิกัด 100-1000 hp	S_{rM} (kVA)	=	0.95 x พิกัดแรงม้า (hp)
พิกัดตั้งแต่ 1000 hp	S_{rM} (kVA)	=	0.9 x พิกัดแรงม้า (hp)

สำหรับมอเตอร์ซิงโครนัส

ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8	S_{rM} (kVA)	=	พิกัดแรงม้า (hp)
ค่าตัวประกอบกำลัง 1.0	S_{rM} (kVA)	=	0.8 x พิกัดแรงม้า (hp)

กระแสโหลดเกิน (Overload Current) ค่ากระแสโหลดเกินจะขึ้นอยู่กับค่า Service Factor และอุณหภูมิขณะทำงาน (Ambient Temperature) ของมอเตอร์ สมมติให้อุณหภูมิขณะทำงานเป็น 40 °C และค่า Service Factor เป็น 1.15 กระแสโหลดเกินจะมีค่าเท่ากับ 1.15 เท่าของกระแสพิกัด โดยช่วงเวลาโหลดเกินต้องไม่เกิน 4 ชั่วโมง

กระแสยึดตัวหมุน (Locked Rotor Current) สามารถหาข้อมูลได้จากบริษัทผู้ผลิต หรืออาจสามารถประมาณค่ากระแสยึดตัวหมุนสำหรับมอเตอร์มาตรฐานได้ดังนี้

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีค่าตัวประกอบกำลัง = 1 และความเฉื่อยโหลดมีค่าต่ำ (Low Inertia Load) กระแสยึดตัวหมุนจะมีค่าเป็น 6 I_{rM}

2. มอเตอร์ซิงโครนัสที่มีค่าตัวประกอบกำลัง = 1 และความเฉื่อยโหลดมีค่าสูง กระแสยึดตัวหมุนจะมีค่าเป็น 9 I_{rM}

3. มอเตอร์ชนิดตัวหมุนพันด้วยขดลวด (Wound Rotor) กระแสยึดตัวหมุนจะมีค่าเป็น 4 I_{rM}

โดยที่ I_{rM} เป็นค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ ส่วนช่วงเวลาของกระแสยึดตัวหมุนจะมีค่าประมาณ 5 - 30 s ขึ้นอยู่กับความเฉื่อยของโหลด

กระแสสตาร์ต (Inrush Current) เป็นกระแสที่เกิดในสภาวะชั่วครู่ (Transient) ในขณะทำการเริ่มเดินเครื่อง กระแสสตาร์ตจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสยึดตัวหมุน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งแรงดันขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง โดยทั่วไปเมื่อแรงดันอยู่ที่ยอดคลื่น กระแสสตาร์ตจะเท่ากับกระแสยึดตัวหมุน โดยกระแสสตาร์ตจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ที่แรงดันขณะนั้นเป็นศูนย์ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.65 เท่าของกระแสยึดตัวหมุน และช่วงเวลากระแสสตาร์ตประมาณ 0.1 s

4.2.1.2. **ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันมอเตอร์** [1,2,15-17]

มอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดันไม่เกิน 600 V ตามมาตรฐาน NEC 430 กำหนดให้ต้องมีการป้องกันโหลดเกิน และป้องกันกระแสเกินจากการลัดวงจรดังต่อไปนี้

การป้องกันโหลดเกิน ตามมาตรฐานจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินทุกเฟส โดยต้องทำการปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันไม่ให้เกินค่าที่กำหนดดังต่อไปนี้

มอเตอร์ที่มีค่า Service Factor ไม่น้อยกว่า 1.15	$1.25\ I_{rM}$
มอเตอร์ที่กำหนดอุณหภูมิขณะใช้งานไม่เกิน 40 °C	$1.25\ I_{rM}$
มอเตอร์ประเภทอื่น	$1.15\ I_{rM}$

โดยที่ I_{rM} เป็นค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์

นอกจากอุปกรณ์ป้องกันขั้นต่ำตามที่มาตรฐานกำหนดแล้ว มอเตอร์อาจมีอุปกรณ์ป้องกันอื่นเพิ่มเติม เช่น อุปกรณ์ป้องกันความร้อนเกิน เป็นต้น

การป้องกันการลัดวงจร ตามมาตรฐานกำหนดให้อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรต้องปรับตั้งค่าการทำงานไม่ให้เกินค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัดหรือค่าปรับตั้งสูงสุดของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรสำหรับการป้องกันมอเตอร์

ชนิดของมอเตอร์	ร้อยละของกระแสพิกัด			
	ฟิวส์แบบไม่หน่วงเวลา	ฟิวส์แบบหน่วงเวลา	CB แบบปลดทันที	CB แบบเวลาผกผัน
มอเตอร์กระแสสลับ 1 เฟส มอเตอร์ 3 เฟส แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage) และแบบซิงโครนัส (Synchronous)	300	175	700	250
มอเตอร์แบบตัวหมุนพันด้วยขดลวด (Wound Rotor)	150	150	700	150

สำหรับกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินและป้องกันการลัดวงจรเป็นอุปกรณ์ตัวเดียวกัน สามารถปรับตั้งค่าให้สูงขึ้นได้แต่ต้องไม่เกิน 1300 % ของกระแสพิกัด

4.2.1.3. **ระดับความคงทนของมอเตอร์** [1,2]

ค่าความคงทนของมอเตอร์เรียกว่า Maximum Allowable Stall Time เป็นค่าเวลาสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทนได้ในขณะที่ตัวหมุน (Rotor) ถูกล็อค แต่ยังคงจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์อยู่ มีหน่วยเป็นวินาที โดยทั่วไปจะมีค่าดังนี้

- มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กและขนาดกลาง
  - 20 s สำหรับมอเตอร์มาตรฐาน
  - 30 s สำหรับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง
- มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่
  - 15 s โดยเฉลี่ย

4.2.2 **การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์** [10]

อุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ที่ต้องจัดความสัมพันธ์ สามารถพิจารณาปรับตั้งค่าได้ดังต่อไปนี้

4.2.2.1 **การป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบฉับพลัน** (Instantaneous Phase Overcurrent Protection)

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบฉับพลันได้แก่ รีเลย์กระแสเกินแบบฉับพลัน เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ (ส่วนของอุปกรณ์ตัดวงจรแบบฉับพลัน) และฟิวส์

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบฉับพลัน อุปกรณ์ป้องกันจะต้องปรับตั้งไม่ให้ทำงานในสภาวะดังต่อไปนี้

1. ขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ (กระแสพุ่งเข้า)
2. เมื่อมอเตอร์จ่ายกระแสลัดวงจรให้แก่ จุดลัดวงจรภายนอก

โดยทั่วไปจะปรับตั้งที่ค่าสูงกว่าค่ากระแสยึดตัวหมุนประมาณ 75 % และให้สอดคล้องกับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น ในการปรับตั้งค่า อาจพิจารณาโดยทำการทดลองเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการตัดวงจรที่ผิดพลาดในภายหลัง ซึ่งในขณะทดลองอาจไม่เกิดการตัดวงจรขึ้น เนื่องจากไม่เกิดกระแสสตาร์ตสูงสุด จึงควรมีการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้งในการพิจารณา

4.2.2.2 **การป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบหน่วงเวลา** (Time-Delay Phase Overcurrent Protection)

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบหน่วงเวลาได้แก่ รีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลา เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ ใช้เพื่อป้องกันสภาวะความผิดปกติเนื่องมาจาก

1. ความผิดพลาดเมื่อเร่งสู่ความเร็วพิกัดในช่วงขณะเริ่มเดินเครื่อง
2. สภาวะ Motor Stall

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในเฟสแบบหน่วงเวลา สำหรับการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน สามารถปรับตั้งที่ค่าสูงกว่าค่ากระแสโหลดเกิน 5-25% แต่ในกรณีที่ไม่ใช้ในการป้องกันโหลดเกินสามารถปรับตั้งที่ค่า 200-350% ของกระแสพิกัด

4.2.2.3 **การป้องกันโหลดเกิน** (Overload Protection)

ใช้ป้องกันกระแสเกินเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ได้แก่ รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบความร้อน (Thermal Overcurrent Relay) และฟิวส์แบบองค์ประกอบคู่หรือฟิวส์แบบหน่วงเวลา

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน สำหรับรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบความร้อน แบ่งได้เป็น Class ที่นิยมใช้ได้แก่ Class 10, 20 และ 30 โดยเวลาการทำงานที่กระแสยืดตัวหมุน (6 เท่าของกระแสพิกัด) ของแต่ละ Class จะแตกต่างกัน เช่น Class 10 จะทำงานที่เวลาไม่เกิน 10 s

สำหรับฟิวส์แบบองค์ประกอบคู่ใช้ฟิวส์ที่มีพิกัดดังต่อไปนี้

เลือกฟิวส์ที่มีพิกัด 100-115% ของกระแสพิกัดมอเตอร์สำหรับมอเตอร์ที่มี Service Factor 1.0

เลือกฟิวส์ที่มีพิกัด 115-125% ของกระแสพิกัดมอเตอร์สำหรับมอเตอร์ที่มี Service Factor 1.15

4.2.2.4 **การป้องกันกระแสเกินลงดินแบบฉับพลัน** (Instantaneous Ground Overcurrent Protection)

ใช้สำหรับป้องกันกระแสลัดวงจรลงดินโดยไม่มีการหน่วงเวลา อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ ได้แก่ รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินลงดินแบบฉับพลัน สำหรับรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Zero Sequence Ground Relay ปรับตั้งให้ทำงานที่ค่ากระแสความผิดพร่องลงดินมีค่าประมาณ 5-20 A

4.2.2.5 **การป้องกันกระแสเกินลงดินแบบหน่วงเวลา** (Time-Delay Ground Overcurrent Protection)

ใช้สำหรับป้องกันกระแสลัดวงจรลงดินโดยมีการหน่วงเวลา อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินลงดินแบบหน่วงเวลา สำหรับรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบ Zero Sequence Ground Relay และแบบ Residually Connected Ground Relay โดยทั่วไปใช้แบบ Extremely Inverse ปรับตั้งที่ค่า 0.5 A และ ค่า TMS ต่ำสุด

4.3 การป้องกันหม้อแปลง

4.3.1 ขอบเขตในการพิจารณาป้องกันหม้อแปลง

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งในระบบไฟฟ้า การเลือกระบบป้องกันที่เหมาะสมสำหรับหม้อแปลงจะต้องพิจารณาข้อมูลหลายอย่าง เนื่องจากหม้อแปลงแต่ละขนาดและแต่ละชนิดจะมีความต้องการในการป้องกันที่ต่างกัน โดยข้อมูลทั่วไปที่ใช้ในการพิจารณามีดังต่อไปนี้

4.3.1.1 คุณลักษณะของหม้อแปลง [1,2,15]

กระแสพิกัด (Full Load Current) กระแสพิกัดของหม้อแปลงสามารถหาได้จากแผ่นป้ายอุปกรณ์ หรืออาจคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับกรณีหม้อแปลง 1 เฟส

$$I_{rT} = \frac{S_{rT} \times 1000}{U_{rT}} \qquad (4.4)$$

สำหรับกรณีหม้อแปลง 3 เฟส

$$I_{rT} = \frac{S_{rT\,(3\phi)} \times 1000}{\sqrt{3}\, U_{rT}} \qquad (4.5)$$

โดยที่

I_{rT} เป็นกระแสพิกัดของหม้อแปลง (A)

U_{rT} เป็นแรงดันพิกัดของหม้อแปลง (V)

S_{rT} เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏของหม้อแปลง (kVA)

กระแสโหลดเกิน (Overload Current) ค่ากระแสโหลดเกินของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับวิธีการระบายความร้อนและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เช่น หม้อแปลงแบบ ONAN (Oil Natural Air Natural), ONAF (Oil Natural Air Forced) เป็นต้น

โดย กระแสโหลดเกินจะมีค่าเท่ากับ กระแสพิกัด x ค่าตัวประกอบการระบายความร้อน (Cooling Factor) x ค่าตัวประกอบอุณหภูมิ (Temperature Factor) โดยที่ ค่าตัวประกอบการระบายความร้อน และ ค่าตัวประกอบอุณหภูมิ สามารถหาได้จากข้อมูลของผู้ผลิตและมาตรฐานที่กำหนด

กระแสพุ่งเข้า (Magnetizing Inrush Current) กระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลงแต่ละชนิดสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

หม้อแปลงแบบตั้งแท่น (Pad Type Unit) 12 I_{rT}

หม้อแปลงแบบศูนย์กลางโหลด (Load-center Type Unit) 8 I_{rT}

หม้อแปลงระบบจำหน่ายแรงต่ำชนิดแห้ง (Dry type Units) (5-25) I_{rT}

โดยที่ I_{rT} เป็นค่ากระแสพิกัดของหม้อแปลง

ช่วงเวลาการเกิดกระแสพุ่งเข้ามีค่าประมาณ 0.1 s

4.3.1.2 **ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันหม้อแปลง** [1,2,15,16]

ตามมาตรฐาน NEC 450 อุปกรณ์ป้องกันจะต้องมีพิกัดหรือมีการปรับตั้งไม่เกินค่าร้อยละของกระแสพิกัดดังที่กำหนดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดปรับตั้งและพิกัดสูงสุดของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง

พิกัดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	ด้านปฐมภูมิ (Primary side)		ด้านทุติยภูมิ (Secondary side)		
	แรงดันเกิน 600 V		แรงดันเกิน 600 V		แรงดัน ≤ 600V
	ค่าปรับตั้งCB	พิกัดฟิวส์	ค่าปรับตั้ง CB	พิกัดฟิวส์	CB หรือฟิวส์
ไม่เกิน 6 %	600 %	300 %	300 %	250 %	125 %
มากกว่า 6 % แต่ไม่เกิน 10 %	400 %	300 %	250 %	225 %	125 %

4.3.1.3.ระดับความคงทนของหม้อแปลง [1,2,10,15]

ค่าความคงทนของหม้อแปลงจากมาตราฐาน ANSI C57.12.00 จะบอกถึงพิกัดในการออกแบบว่าขดลวดของหม้อแปลงสามารถทนกระแสลัดวงจรได้เท่าไร ขณะเกิดการลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลงเป็นระยะเวลาจำกัดค่าหนึ่ง โดยที่ไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนและความเครียดทางกล

สำหรับหม้อแปลงที่ต่อแบบ เดลต้า-วาย (Delta-wye) ขีดจำกัดกระแสหรือค่าความคงทนจะมีค่าเป็น 58 % ของค่าขีดจำกัดกระแสของการต่อแบบเดลต้า-เดลต้า (Delta-delta) เนื่องจากระหว่างที่เกิดการลัดวงจรแบบสายลงดินที่ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ทางฝั่งปฐมภูมิจะมีกระแสไหลเพียง 58 % ของกระแสกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส ถึงแม้ว่ากระแสผิดพร่องทางด้านทุติยภูมิทั้ง 2 กรณีจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันด้านปฐมภูมิทำงานในระยะเวลาตามที่กำหนด ค่าขีดจำกัดกระแสจึงต้องลดลงมาเป็น 58 %

ค่าขีดจำกัดกระแสหรือค่าความคงทนของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับค่าพิกัดหรือขนาดของหม้อแปลง โดยสามารถสรุปเป็นสมการของ Through-Fault Protection Curve ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขีดจำกัดกระแสหรือค่าความคงทนของหม้อแปลง โดยแสดงเป็นสมการของ Through-Fault Protection Curve

ประเภท	พิกัดขนาดหม้อแปลง	สมการ Through-Fault Protection Curve
I	≤ 500 kVA	$I^2T = 1250$ (Thermal)
II	501-1667 kVA (1 เฟส)	$I^2T = 1250 \quad ; I \le 0.7\left(\frac{1}{Z_T}\right)$ (Thermal)
	501-5000 kVA (3 เฟส)	$I^2T = \left(\frac{1}{Z_T}\right)^2 2 \quad ; I \ge 0.7\left(\frac{1}{Z_T}\right)$ (Mechanical)
III	1668-10000 kVA(1 เฟส)	$I^2T = 1250 \quad ; I \le 0.5\left(\frac{1}{Z_S+Z_T}\right)$ (Thermal)
	5001-30000 kVA(3 เฟส)	$I^2T = \left(\frac{1}{Z_S+Z_T}\right)^2 2 \; ; I \ge 0.5\left(\frac{1}{Z_S+Z_T}\right)$ (Mechanical)
IV	> 10000 kVA(1 เฟส)	$I^2T = 1250 \quad ; I \le 0.5\left(\frac{1}{Z_S+Z_T}\right)$ (Thermal)
	> 30000 kVA(3 เฟส)	$I^2T = \left(\frac{1}{Z_S+Z_T}\right)^2 2 \; ; I \ge 0.5\left(\frac{1}{Z_S+Z_T}\right)$ (Mechanical)

โดยที่

I เป็นจำนวนเท่าของค่ากระแสพิกัดหม้อแปลง

T เป็นเวลา (s)

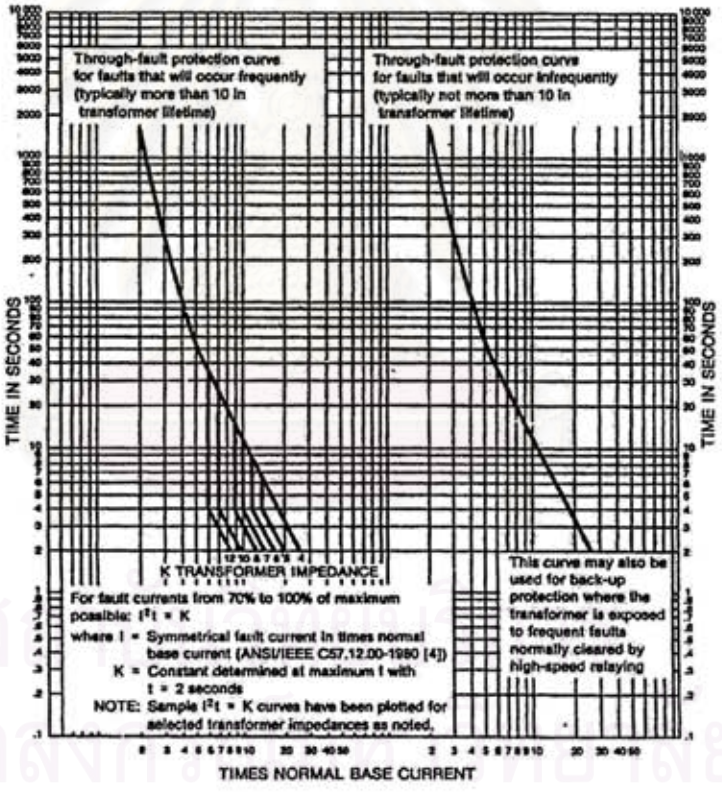
Z_T เป็นพิกัดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (%)

Z_S เป็นค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตของแหล่งจ่ายไฟ

(Z_S = Transformer MVA / System Fault Capacity MVA)

สำหรับหม้อแปลงประเภท (Category) II, III อาจพิจารณาเฉพาะความเสียหายทางความร้อนสำหรับกรณีที่ความผิดพร่องไม่เกิดขึ้นบ่อยได้

กราฟแสดงขีดจำกัดกระแสซึ่งเขียนจากสมการของ Through-Fault Protection Curve แสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟ Through-Fault Protection Curve สำหรับหม้อแปลง Category II

4.3.2 การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง [6,10]

อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงที่ต้องจัดความสัมพันธ์ สามารถพิจารณาปรับตั้งค่าได้ดังต่อไปนี้

4.3.2.1 **การป้องกันโหลดเกิน** (Overload Protection)

การทำงานในสภาวะโหลดเกิน เป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงมีค่าสูงขึ้น และถ้าอุณหภูมิมีค่าเกินขีดจำกัดของหม้อแปลงก็จะทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย และทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง อุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินที่ใช้ได้แก่ Temperature Indicator รีเลย์ความร้อน ฟิวส์

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน สำหรับอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินที่ต้องมีการปรับตั้งค่าและเลือกค่าพิกัด ได้แก่ ฟิวส์ด้านทุติยภูมิ เลือกพิกัดที่ค่าประมาณ 100-125% ของค่ากระแสพิกัดด้านทุติยภูมิ

4.3.2.2 **การป้องกันกระแสลัดวงจร** (Short-Circuit Current Protection)

อุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรได้แก่ รีเลย์กระแสเกิน เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำและฟิวส์

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจร สำหรับรีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลาด้านปฐมภูมิ ปรับตั้งที่ค่าประมาณ 150-200% ของกระแสพิกัดด้านปฐมภูมิ และค่า Instantaneous Pickup ปรับตั้งที่ค่าประมาณ 150-160% ของกระแสลัดวงจรสูงสุดแบบสามเฟสทางด้านทุติยภูมิ ส่วนรีเลย์กระแสเกินด้านทุติยภูมิ ปรับตั้งที่ค่า 150-200 % ของกระแสพิกัดด้านทุติยภูมิ

สำหรับฟิวส์แบบหน่วงเวลาด้านปฐมภูมิ เลือกพิกัดที่ค่าประมาณ 100-125% ของค่ากระแสพิกัดด้านปฐมภูมิ

4.4 การป้องกันสายไฟฟ้า

4.4.1 ขอบเขตในการพิจารณาป้องกันสายไฟฟ้า

สายไฟฟ้ามีหน้าที่สำหรับนำพลังงานไฟฟ้า จากแหล่งจ่ายไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยสายไฟฟ้าต้องพิจารณาขอบเขตในการป้องกันดังต่อไปนี้

4.4.1.1 **คุณลักษณะของสายไฟฟ้า**

กระแสพิกัด (Full Load Current) คือ ค่ากระแสของสายไฟฟ้าที่สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ทำให้อุณหภูมิมีค่าเกินค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้

กระแสโหลดเกิน (Overload Current) กระแสโหลดเกิน ขึ้นอยู่กับวิธีการติดตั้งสายไฟฟ้า และอุณหภูมิโดยรอบขณะทำการจ่ายโหลด

4.4.1.2 **ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับการป้องกันสายไฟฟ้า** [16]

สายไฟฟ้าสำหรับระบบแรงดันเกิน 600 V จะต้องมีการป้องกันกระแสเกินตามมาตรฐาน NEC 240 ซึ่งกำหนดพิกัดและค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันดังนี้

สำหรับฟิวส์ ต้องมีพิกัดไม่เกิน 3 เท่าของกระแสพิกัดสาย

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ต้องมีค่าปรับตั้งไม่เกิน 6 เท่าของกระแสพิกัดสาย

4.4.1.3 **ระดับความคงทนของสายไฟฟ้า** [1,2,15,18]

ค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้าแสดงได้โดยกราฟ Maximum Short-Circuit Current Curve โดยกราฟจะแสดงค่าช่วงเวลาที่สายไฟฟ้าสามารถทนได้ เมื่อกระแสลัดวงจรมีค่าต่าง ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \qquad (4.6)$$

โดยที่

S เป็นพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า (mm^2)

I เป็นค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านสายไฟฟ้า (A)

t เป็นช่วงเวลาที่สายไฟฟ้าสามารถทนได้ (s) โดยช่วงเวลาต้องมีค่าไม่เกิน 5 s

k เป็นค่าตัวประกอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของสาย ชนิดของตัวนำ ชนิดของฉนวน และอุณหภูมิ

สำหรับข้อมูลในการคำนวณสามารถหาได้จากผู้ผลิตสายไฟฟ้า หรือมาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค. โดยกราฟ Maximum Short-Circuit Current Curve มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2

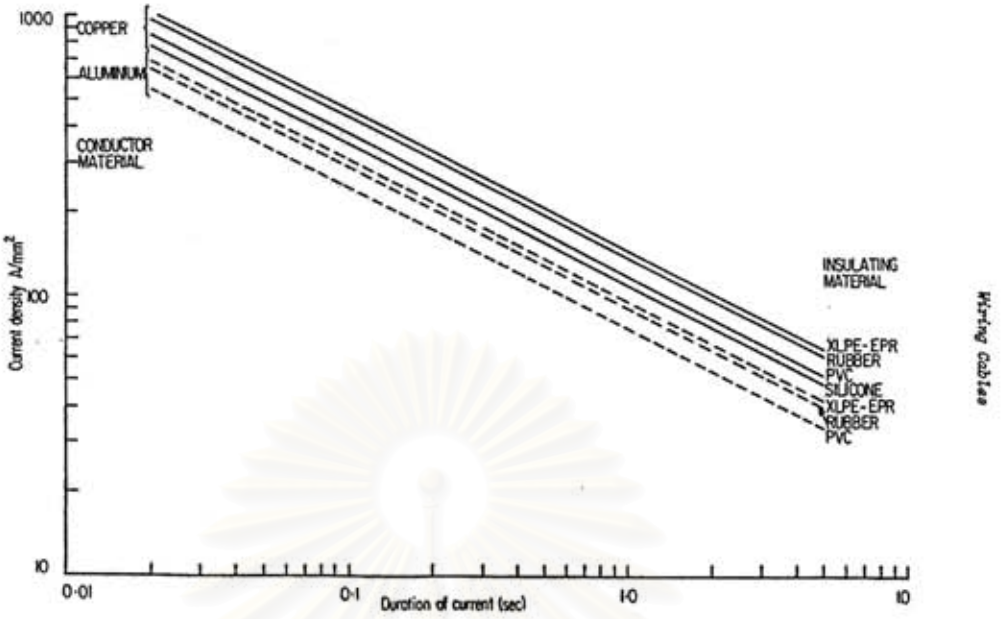
4.4.2 **การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันสายไฟฟ้า** [10]

อุปกรณ์ป้องกันสายไฟฟ้าที่ต้องพิจารณาปรับตั้งค่ามีดังต่อไปนี้

4.4.2.1 **การป้องกันกระแสลัดวงจร** (Short-Circuit Current Protection)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันกระแสลัดวงจรได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์กระแสเกิน

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจร อุปกรณ์ป้องกันกระแสลัดวงจรปรับตั้งที่ค่าประมาณ 100-125% ของกระแสพิกัด



รูปที่ 4.2 กราฟค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า (Maximum Short-Circuit Current Curve)

4.4.2.2 **การป้องกันโหลดเกิน** (Overload Protection)

อุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน ได้แก่ รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์อุณหภูมิ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และฟิวส์

การปรับตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน อุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินปรับตั้งที่ค่าประมาณ 110% ของกระแสพิกัด

4.5 การป้องกันโหลดชนิดอื่น

สำหรับโหลดชนิดอื่น ๆ เช่น ไฟฟ้าแสงสว่าง หรือ โหลดเต้ารับ สามารถพิจารณาการป้องกันได้จาก ค่ากระแสพิกัดของโหลดนั้น ๆ ซึ่งบางครั้งโหลดดังกล่าวอาจต่อร่วมอยู่กับอุปกรณ์อื่น เช่น มอเตอร์ ก็จำเป็นต้องมีการพิจารณาข้อกำหนดอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย

4.5.1 การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันโหลดชนิดอื่น [12]

- กรณีโหลดชนิดอื่น

ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าไม่เกิน 1.25 เท่าของพิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง

$$CB_F \leq 1.25\, I_{L1} \quad (4.7)$$

- กรณีมอเตอร์กับโหลดชนิดอื่น ซึ่งเป็นโหลดต่อเนื่อง

ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าไม่เกิน พิกัดอุปกรณ์ป้องกันตัวใหญ่ที่สุด + ผลรวมกระแสพิกัดมอเตอร์ที่เหลือ + 1.25 เท่าของพิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง

$$CB_F \leq CB_{MAX} + \sum I_R + 1.25\, I_{L1} \quad (4.8)$$

- กรณีมอเตอร์กับโหลดชนิดอื่น ซึ่งเป็นโหลดไม่ต่อเนื่อง

ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าไม่เกิน พิกัดอุปกรณ์ป้องกันตัวใหญ่ที่สุด + ผลรวมกระแสพิกัดมอเตอร์ที่เหลือ + พิกัดกระแสโหลดไม่ต่อเนื่อง

$$CB_F \leq CB_{MAX} + \sum I_R + I_{L2} \quad (4.9)$$

- กรณีมอเตอร์หลายตัว

ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าไม่เกิน พิกัดอุปกรณ์ป้องกันตัวใหญ่ที่สุด + ผลรวมกระแสพิกัดมอเตอร์ที่เหลือ

$$CB_F \leq CB_{MAX} + \sum I_R \quad (4.10)$$

โดยที่

CB_F เป็นค่าปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

CB_{MAX} เป็นพิกัดอุปกรณ์ป้องกันตัวใหญ่ที่สุด

$\sum I_R$ เป็นผลรวมกระแสพิกัดมอเตอร์ที่เหลือ

I_{L1} เป็นพิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง

I_{L2} เป็นพิกัดกระแสโหลดไม่ต่อเนื่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ข้อกำหนดในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

5.1 การศึกษาวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันเป็นการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบให้มีการทำงานที่สอดคล้องกัน สามารถป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบ และทำให้มีผลกระทบต่อระบบส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เกิดสภาวะผิดปกติน้อยที่สุด โดยใช้หลักการที่ว่า อุปกรณ์ป้องกันตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดความผิดพร่องที่สุดจะต้องตัดวงจรก่อนอุปกรณ์ป้องกันตัวถัดไปจะทำงาน โดยอุปกรณ์ป้องกันตัวแรกจะทำงานในเวลาที่รวดเร็ว ส่วนอุปกรณ์ป้องกันตัวถัดไปซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง จะทำงานเมื่ออุปกรณ์ป้องกันเบื้องต้นเกิดความผิดพลาดขึ้นและไม่ทำงานตามปกติ

จุดประสงค์ในการศึกษาเรื่องการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันคือ เพื่อหาคุณลักษณะ พิกัดและค่าปรับตั้งที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ป้องกัน โดยวิธีการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ทำได้โดย วาดกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดลงในกระดาษกราฟมาตราส่วนลอการิทึม โดยแกนตั้งจะเป็นค่าเวลาการทำงาน ส่วนแกนนอนจะเป็นค่ากระแส แล้วจึงทดลองพิจารณาปรับตั้งจนได้ลักษณะของกราฟเวลา-กระแสของอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวสอดคล้องกัน [1,2,4,6,10]

สำหรับขั้นตอนการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันมีวิธีการดังต่อไปนี้

1.แสดงระบบไฟฟ้าที่ต้องการจัดความสัมพันธ์ด้วยแผนผังเส้นเดี่ยว (Single-Line Diagram) ซึ่งแสดงอุปกรณ์ป้องกัน หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน บัส หม้อแปลง สายไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์โหลด อื่นๆ

2.ใส่ค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง มอเตอร์ เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า และสายไฟฟ้า

3.ทำการคำนวณกระแสลัดวงจร ทั้งค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุดที่แต่ละบัส ซึ่งมีอุปกรณ์ป้องกันต่ออยู่ ภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ

4. พิจารณาค่าพิกัดและขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

5.เลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับแรงดันระบบ ความถี่และกระแสโหลดที่ไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกัน รวมทั้งสภาวะที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

6. ทำการเลือกค่าที่ใช้ในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน โดยมีรายละเอียดการพิจารณาดังนี้

- เลือกค่าฐานแรงดันเพื่อใช้ในการพิจารณากราฟของอุปกรณ์ป้องกันให้มีค่าฐานแรงดันเดียวกัน
- เริ่มต้นพิจารณาจากมอเตอร์หรือโหลดอื่น ซึ่งเป็นตัวล่างสุดและมีขนาดใหญ่สุด
- ทำการเขียนกราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน ซึ่งได้แก่ กราฟการสตาร์ตของมอเตอร์ กราฟความเสียหายของอุปกรณ์ และค่ากระแสพิกัด เป็นต้น
- ทำการเขียนกราฟของอุปกรณ์ป้องกัน และทำการพิจารณาปรับตั้งค่าที่เหมาะสม ให้สอดคล้องกับกราฟการทำงานของอุปกรณ์ที่ป้องกัน ถ้าไม่ได้ให้พิจารณาเลือกอุปกรณ์ป้องกันตัวใหม่
- พิจารณาอุปกรณ์ตัวถัดไปทางด้านบนของระบบ ซึ่งได้แก่ เคเบิล หรือหม้อแปลง และเลือกชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน
- ทำการจัดความสัมพันธ์โดยให้อุปกรณ์ป้องกันตัวที่อยู่ใกล้จุดเกิดความผิดพร่องทำงานก่อน และปรับตั้งค่าหรือพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวให้เหมาะสม ทำการพิจารณาลักษณะเดียวกันนี้จนถึงอุปกรณ์ป้องกันตัวบนสุดของระบบ
- เลือกมอเตอร์หรือโหลดปลายทางตัวใหญ่สุดตัวถัดไป และเริ่มพิจารณาจัดความสัมพันธ์ตามขั้นตอนข้างต้นอีกครั้งจนครบสำหรับอุปกรณ์ป้องกันทุกตัวในระบบไฟฟ้า

การศึกษาเรื่องการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันจะทำเมื่อมีการออกแบบระบบใหม่ หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบเดิม เช่น เมื่อค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง มีการเพิ่มโหลดในระบบ หรือมีการเปลี่ยนขนาดอุปกรณ์ให้มีพิกัดสูงขึ้น ซึ่งการพิจารณาจะทำให้เราแน่ใจได้ว่าเมื่อระบบเปลี่ยนแปลงไป อุปกรณ์ป้องกันจะยังมีการจัดความสัมพันธ์ที่เหมาะสมอยู่

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันมีดังต่อไปนี้

- **ช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์** (Coordination Time Interval) [1,2,6,10,19]

คือช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อให้เกิดการทำงานถูกต้องตามลำดับสำหรับอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ติดกัน ซึ่งได้แก่ ช่วงระยะห่างของกราฟอุปกรณ์ป้องกันในกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสนั่นเอง โดยการจัดความสัมพันธ์จะพิจารณาที่ค่ากระแส ลัดวงจรสูงสุดซึ่งไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกันทั้งสองตัวที่อยู่ติดกัน

สำหรับรีเลย์กระแสเกินช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์จะมีค่าประมาณ 0.3-0.4 s ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวประกอบด้วย

เวลาการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์	0.08 s
เวลาการเคลื่อนเกินของรีเลย์ (Relay Overtravel)	0.10 s
เวลาเผื่อสำหรับการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส และความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ	0.22 s

สำหรับรีเลย์แบบ Solid-state จะไม่มีค่าเวลาการเคลื่อนเกิน ดังนั้นช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์ของรีเลย์แต่ละชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

รีเลย์แบบ Electromechanical 0.4 s รีเลย์แบบ Solid-state 0.3 s

สำหรับฟิวส์จะพิจารณาจากเวลาตัดกระแสรวม (Total Clearing Time) โดยช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์จะมีค่าประมาณ 0.1 s

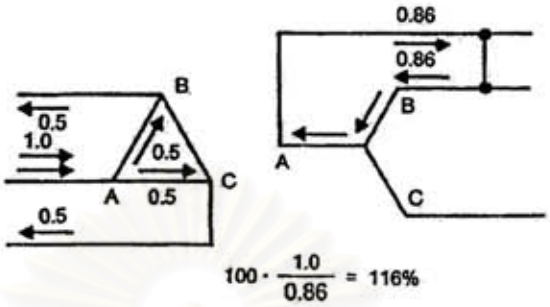
ส่วนการจัดความสัมพันธ์ระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำจะพิจารณาให้มีช่วงเวลาเล็กน้อย เพื่อไม่ให้มีส่วนเหลื่อมกันระหว่างกราฟ ส่วนช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์ระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำกับรีเลย์ จะมีค่าประมาณ 0.3 s

สำหรับช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นอาจมีค่าน้อยกว่านี้ได้ เมื่อทำการพิจารณาทดลองปรับตั้งใช้งานจริง ขึ้นกับชนิดและความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ป้องกัน

- **การพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบเดลต้า-วาย** (Delta-Wye) [1,2,6,10,14,15]

เมื่อต้องการจัดความสัมพันธ์ของการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ต่อแบบเดลต้า-วาย (Delta-Wye) จะต้องพิจารณาในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างสายกับสายทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งจะทำให้มีกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิเป็น 86 % ของกรณีการลัดวงจรแบบสามเฟส แต่ทางด้านปฐมภูมิจะมีกระแสไหลในเฟสหนึ่งมีค่าเป็น 100% ดัง

แสดงในรูปที่ 5.1 ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องนำส่วนนี้มาพิจารณาด้วย เพื่อให้ได้การจัดความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.1 ค่ากระแสในหม้อแปลงที่ต่อแบบเดลต้า-วาย เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างสายกับสายทางด้านทุติยภูมิ

ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันอาจจะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน ได้ดังนี้

1. การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันเฟส
2. การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

5.2 การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันเฟส [1,2,4,10,15]

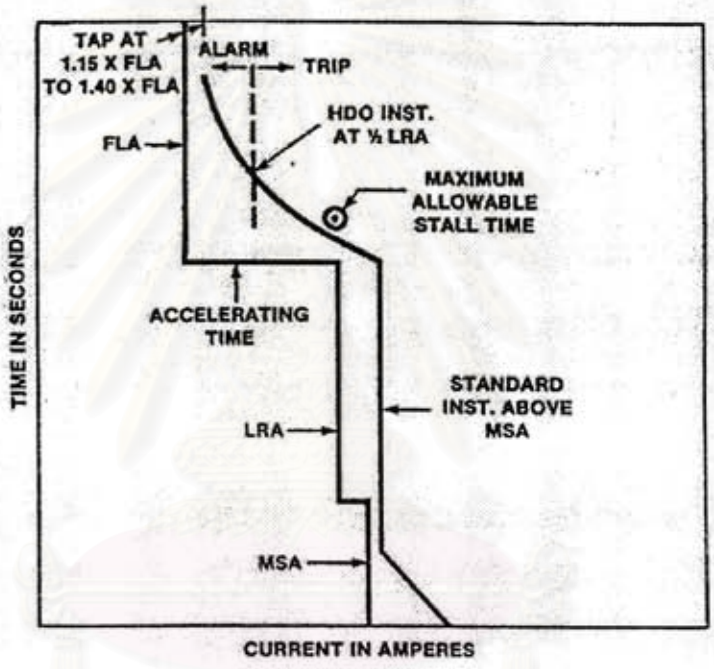
อุปกรณ์ป้องกันที่ต้องพิจารณาจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันเฟส ได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์กระแสเกินแบบเฟส โดยการจัดความสัมพันธ์จะพิจารณาจากค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ซึ่งได้แก่ กระแสลัดวงจรแบบสามเฟส ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

โดยหลักการในการพิจารณากราฟการทำงาน จะพิจารณาให้เวลาที่ 0 s เป็นเวลาขณะที่เกิดความผิดพร่อง และเวลาที่แสดงในกราฟจะเป็นเวลาทำงานของอุปกรณ์ป้องกันหลังจากเกิดความผิดพร่อง โดยในระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล อุปกรณ์ป้องกันทุกตัวระหว่างจุดผิดพร่องกับแหล่งจ่ายไฟ จะเห็นค่ากระแสลัดวงจรค่าเดียวกัน (เมื่อไม่คิดค่ากระแสที่จ่ายจากมอเตอร์ในระบบ) จนกระทั่งอุปกรณ์ป้องกันตัวใดตัวหนึ่งทำงานตัดวงจร

กราฟการทำงานของรีเลย์จะเริ่มต้นที่ค่า $1\frac{1}{2}$ เท่าของค่าพิกอัป และกราฟจะสิ้นสุดที่ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์แบบ

เวลาที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ แบบ Very Inverse และแบบ Standard Inverse โดยอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ใกล้โหลดกว่าจะใช้รีเลย์ที่มีคุณลักษณะการทำงานซึ่งมีลักษณะ Inverse มากกว่าตัวถัดไป

สำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ อุปกรณ์ป้องกันจะต้องมีกราฟการทำงานอยู่เหนือกราฟกระแสสตาร์ต กระแสยึดตัวหมุน และกระแสพิกัด แต่กราฟจะต้องอยู่ต่ำกว่าจุด Max Allowable Stall Time ของมอเตอร์ โดยค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันมอเตอร์

FLA(Full Load Amp) คือกระแสพิกัดมอเตอร์

LRA(Locked Rotor Amp) คือกระแสยึดตัวหมุนของมอเตอร์

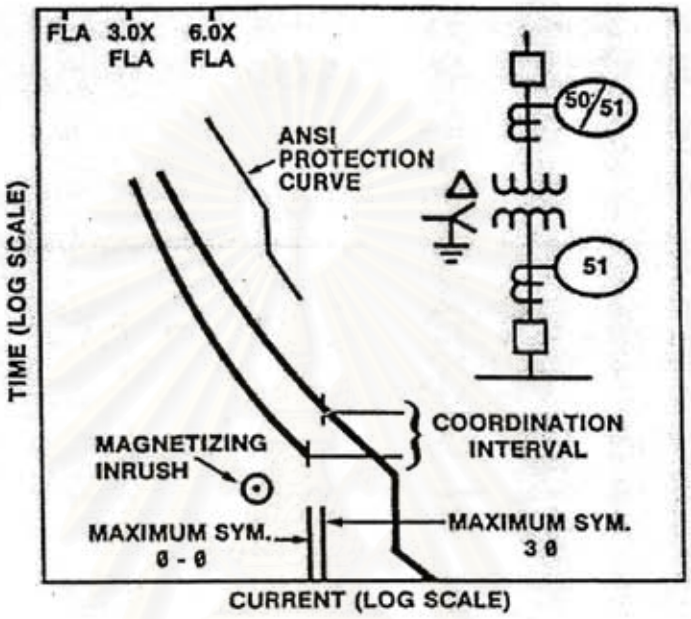
MSA(Max Start Amp) คือกระแสสตาร์ตสูงสุดของมอเตอร์

Maximum Allowable Stall Time คือค่าเวลาสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทนได้

Accelerating Time คือเวลาในการเร่งมอเตอร์ขณะสตาร์ต

สำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลง อุปกรณ์ป้องกันจะต้องมีกราฟการทำงานอยู่เหนือจุดกระแสพุ่งเข้า และอยู่เหนือกราฟอุปกรณ์ป้องกันตัวล่างของระบบ โดยต้องมีช่วงห่างของกราฟอุปกรณ์ตัวบนและตัวล่างตามค่าช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์ที่

เหมาะสม และกราฟจะต้องอยู่ต่ำกว่ากราฟ Through-Fault Protection Curve (ANSI Protection Curve) ของหม้อแปลง โดยค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน และสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบเดลต้า-วายก็จะต้องนำกรณีการลัดวงจรระหว่างสายกับสายดังที่กล่าวไปแล้วมาพิจารณาร่วมด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันหม้อแปลง

FLA(Full Load Amp) คือกระแสพิกัดหม้อแปลง

ANSI Protection Curve คือกราฟความคงทนของหม้อแปลง

Magnetizing Inrush คือกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง

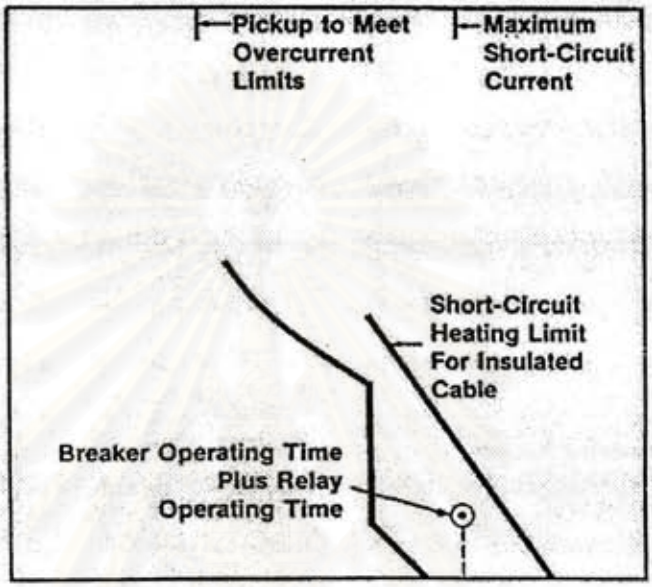
Coordination Interval คือช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์

Maximum Sym. ϕ-ϕ คือกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับสาย

Maximum Sym. 3ϕ คือกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

สำหรับการพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันที่มีการทำงานแบบฉับพลัน การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสองตัวที่อยู่ติดกัน จะต้องพิจารณาให้อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ตัวบนไม่ทำงานเมื่อขณะเกิดกระแสลัดวงจรสูงสุดที่ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันตัวล่าง ดังนั้นจึงต้องมีค่าอิมพิแดนซ์ที่มากพอระหว่างอุปกรณ์ป้องกันทั้งสองตัว ซึ่งโดยทั่วไปอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงจะมีค่าเพียงพอในการเลือกการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันแบบฉับพลันทั้งสองด้านของหม้อแปลง

สำหรับการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันสายไฟฟ้า กราฟการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องอยู่ต่ำกว่ากราฟ Maximum Short-Circuit Current Curve หรือค่า Cable Short-Circuit Heat Limit และค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันสายไฟฟ้า

5.3 การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

อุปกรณ์ป้องกันที่ต้องพิจารณาจัดความสัมพันธ์สำหรับการป้องกันความผิดพร่องลงดิน ได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ และรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน โดยการจัดความสัมพันธ์จะพิจารณาจากค่ากระแสลัดวงจรลงดิน สำหรับหลักการที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันความผิดพร่องลงดิน มีดังนี้ [10]

1. การลัดวงจรลงดินอาจเริ่มต้นจากการลัดวงจรระหว่างสายกับสาย แต่จะกลายมาเป็นการลัดวงจรลงดินโดยผ่านตัวนำต่าง ๆ

2. กระแสลัดวงจรลงดินไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสโหลด และสามารถปรับตั้งที่ค่ากระแสพิกอัปต่ำกว่ากระแสลัดวงจรแบบเฟสได้

3.กระแสลัดวงจรลงดินจะไม่ไหลผ่านไปอีกด้านของหม้อแปลงที่มีการต่อแบบเดลต้า-วาย หรือ เดลต้า-เดลต้า การป้องกันการลัดวงจรลงดินแต่ละด้านจะเป็นอิสระต่อกัน

4.กระแสลัดวงจรลงดินแบบอาร์ก ถ้าไม่ถูกกำจัดจะเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์และระบบไฟฟ้าได้

ชนิดของระบบไฟฟ้าในการพิจารณาป้องกันการลัดวงจรลงดิน [6,10]

1. **ระบบต่อลงดินโดยตรง** (Solid Grounding) เป็นระบบที่สะดวกในการป้องกันแรงดันเกินและป้องกันการลัดวงจรลงดิน สำหรับระบบแรงดันเกิน 600 V ที่ต่อลงดินโดยตรง จะใช้อุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งได้แก่ รีเลย์แบบ Residually Connected Ground Relay และแบบ Zero Sequence Ground Relay ส่วนระบบแรงดันต่ำกว่า 600 V ใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ สำหรับข้อเสียของระบบที่ต่อลงดินโดยตรง คือ ค่ากระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูง

2. **ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำ** (Low-Resistance Grounding) จะจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินให้มีค่าประมาณ 100-200 A หรือกรณีมีหลายแหล่งจ่ายไฟค่ากระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่ามากขึ้นเป็น 800-1600 A

3. **ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูง** (High-Resistance Grounding) จะจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินแห่งแรกให้มีค่าต่ำ แต่ไม่สามารถบอกตำแหน่งจุดเกิดความผิดพร่องได้ เนื่องจากค่าความต้านทานที่ต่อมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าอิมพิแดนซ์ลัดวงจร โดยค่าความต้านทานที่เลือกจะต้องจำกัดกระแสลัดวงจรลงดิน แต่ต้องไม่ให้น้อยกว่าค่ากระแสอัดประจุ (Charging Current) ของสาย สำหรับความผิดพร่องจุดแรกค่ากระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าต่ำ ซึ่งอาจปรับตั้งให้ส่งสัญญาณเตือน ส่วนจุดที่สองค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงเพราะไม่ถูกจำกัดจากความต้านทานต่อลงดิน ดังนั้นจึงอาจปรับตั้งให้มีการตัดวงจรเมื่อมีการลัดวงจรในจุดที่สอง

4. **ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน** (Ungrounded System) จะใช้อุปกรณ์ตรวจจับการต่อลงดิน เช่น โวลต์มิเตอร์ ต่อระหว่างเฟสกับกราวด์ เพื่อแสดงสภาวะการเกิดการลัดวงจรลงดิน แต่จะไม่สามารถบอกตำแหน่งที่เกิดได้ กระแสลัดวงจรลงดินในระบบแบบนี้จะมีค่าน้อย แต่ระบบอาจมีปัญหาเรื่องแรงดันเกินเนื่องจากเรโซแนนซ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำของระบบ เนื่องจากข้อเสียดังกล่าว ในปัจจุบันจึงมีการใช้ระบบแบบนี้น้อย

ลักษณะและขนาดของกระแสลัดวงจรลงดิน [10]

การลัดวงจรลงดินสามารถเกิดได้จากหลายกรณี โดยค่ากระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าในช่วงกว้างและอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้มาก สาเหตุของการเกิดการลัดวงจรลงดินได้แก่ 1. ความเป็นฉนวนเสื่อมลงเนื่องจากความชื้นหรือจากสภาวะการใช้งาน 2. ความเสียหายทางกล 3. การเกิดสภาวะแรงดันเกินมาก ๆ

ขนาดของกระแสลัดวงจรลงดินจะสามารถคำนวณได้จากสมการในบทที่ 2 โดยบางครั้งถ้าอิมพิแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าน้อยกว่าอิมพิแดนซ์ลำดับบวก ค่ากระแสลัดวงจรลงดินอาจจะมีค่ามากกว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสได้ ดังนั้นจึงต้องมีการต่ออิมพิแดนซ์สำหรับจำกัดค่ากระแสลัดวงจรลงดิน

สำหรับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าสูง (High Resistance Ground) ค่าความต้านทานต่อลงดิน R_N จะมีค่ามากกว่า ค่า Z_0, Z_1 และ Z_2 มาก ดังนั้นจึงอาจไม่คิดอิมพิแดนซ์ Z_0, Z_1, Z_2 ได้ ซึ่งสมการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรลงดินจะเป็น

$$I''_{k1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\,R_N} \qquad (5.1)$$

โดยที่

U_n เป็นแรงดันของระบบ

c เป็นค่าตัวประกอบแรงดัน (จากตารางที่ 2.1)

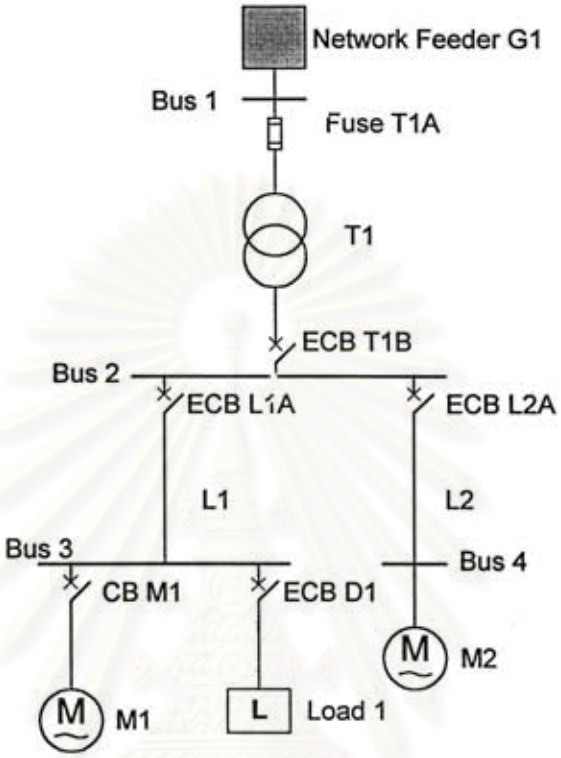
R_N เป็นค่าความต้านทานต่อลงดิน

สำหรับการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน อุปกรณ์ตัวล่างสุดของระบบสามารถปรับตั้งที่ค่าต่ำสุดได้ และอุปกรณ์ป้องกันตัวถัดมาก็ต้องมีการจัดความสัมพันธ์กันในลักษณะเดียวกันกับการจัดความสัมพันธ์แบบเฟส

5.4 ตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจรเพื่อใช้ในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน พิจารณาตัวอย่างซึ่งแสดงวิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจร เพื่อใช้ในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ดังต่อไปนี้

5.4.1 การคำนวณกระแสลัดวงจรสำหรับระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 5.5 ระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 1

ข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 มีรายละเอียดดังนี้

แหล่งจ่ายไฟ:G1 S''_{kQ} กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น = 500 MVA

U_n แรงดันระบบ = 22 kV ; X/R = 10

หม้อแปลง : T1 S_{rT} กำลังปรากฏพิกัด = 1000 kVA ; อัตราส่วนแรงดัน = 22 kV/400 V

u_{kr} แรงดันลัดวงจรพิกัด = 6 % ; P_{krT} กำลังสูญเสีย = 13.5 kW

การต่อ = Delta-Wye to Ground ; $R_{(0)}/R_T$ = 1.0 ; $X_{(0)}/X_T$ = 0.95

สายไฟฟ้า : L1 ขนาดสาย 3x300 mm^2 ; กระแสพิกัด = 592 A ; ความยาวสาย = 60 m

R'_L = 0.062 mΩ/m ; X'_L = 0.089 mΩ/m; $R_{(0)}/R_L$ = 4 ; $X_{(0)}/X_L$ = 3.5

สายไฟฟ้า : L2 ขนาดสาย 3x240 mm^2 ; กระแสพิกัด = 509 A ; ความยาวสาย = 30 m

R'_L = 0.077 mΩ/m ; X'_L = 0.090 mΩ/m; $R_{(0)}/R_L$ = 4 ; $X_{(0)}/X_L$ = 3.5

มอเตอร์ : M1 P_{rM} กำลังพิกัด = 40 kW ; U_{rM} แรงดันพิกัด = 400 V

I_{LR} กระแสยึดตัวหมุน = 434 A ; cos φ_r ค่าตัวประกอบกำลัง = 0.85

η_r ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ = 0.94 ; X/R Ratio = 5.5

$R_{(0)}/R_M$ = 15.2 ; $X_{(0)}/X_M$ = 5.3

Service Factor = 1 ; เวลาเร่ง = 8 s ; Max Stall Time = 20 s

มอเตอร์ : M2 P_{rM} กำลังพิกัด = 200 kW ; U_{rM} แรงดันพิกัด = 400 V

I_{LR} กระแสยึดตัวหมุน = 2076 A ; cos φ_r ค่าตัวประกอบกำลัง = 0.86

η_r ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ = 0.97 ; X/R Ratio = 13.5

$R_{(0)}/R_M$ = 15.2 ; $X_{(0)}/X_M$ = 5.3

Service Factor = 1.15 ; เวลาเร่ง = 8 s ; Max Stall Time = 20 s

โหลด : LD1 กระแสพิกัด = 380 A ; แรงดัน = 400 V

การคำนวณอิมพิแดนซ์ลัดวงจร

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรของอุปกรณ์แต่ละตัวในระบบสามารถคำนวณได้ดังนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้า : G1

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{1.1x(22\ kV)^2}{500\ MVA} = 1.0648\ \Omega = 1064.8\ m\Omega$$

$$R_Q = \frac{Z}{\sqrt{1+\left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{1064.8}{\sqrt{1+10^2}} = 105.95\ m\Omega$$

$$X_Q = 10 \times 105.95 = 1059.5\ m\Omega$$

$$Z_Q = 105.95 + j\ 1059.5\ \ m\Omega$$

หม้อแปลง : T1

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100}x\frac{(400\ V)^2}{1000\ kVA} = 9.6\ m\Omega$$

$$R_T = P_{krT}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 13.5\ kW\frac{(400\ V)^2}{(1000\ kVA)^2} = 2.16\ m\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{9.6^2 - 2.16^2} = 9.35\ m\Omega$$

$$R_{(0)} = 2.16 \times 1.0 = 2.16\ m\Omega$$

$$X_{(0)} = 9.35 \times 0.95 = 8.89\ m\Omega$$

$$Z_{T1} = 2.16 + j\ 9.35\ \ m\Omega \qquad Z_{(0)T1} = 2.16 + j\ 8.89\ \ m\Omega$$

สายไฟฟ้า : L1

$R_L = 0.062 \times 60 = 3.72\ m\Omega$ $X_L = 0.089 \times 60 = 5.34\ m\Omega$

$R_{(0)} = 3.72 \times 4 = 14.88\ m\Omega$ $X_{(0)} = 5.34 \times 3.5 = 18.69\ m\Omega$

$Z_{L1} = 3.72 + j\,5.34\ m\Omega$ $Z_{(0)L1} = 14.88 + j\,18.69\ m\Omega$

สายไฟฟ้า : L2

$R_L = 0.077 \times 30 = 2.31\ m\Omega$ $X_L = 0.090 \times 30 = 2.7\ m\Omega$

$R_{(0)} = 2.31 \times 4 = 9.24\ m\Omega$ $X_{(0)} = 2.7 \times 3.5 = 9.45\ m\Omega$

$Z_{L2} = 2.31 + j\,2.7\ m\Omega$ $Z_{(0)L2} = 9.24 + j\,9.45\ m\Omega$

มอเตอร์ : M1

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 434} = 0.53212\ \Omega = 532.12\ m\Omega$$

$$R_M = \frac{Z}{\sqrt{1+\left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{532.12}{\sqrt{1+5.5^2}} = 95.19\ m\Omega$$

$X_M = 95.19 \times 5.5 = 523.5\ m\Omega$

$R_{(0)} = 15.2 \times 95.19 = 1446.9\ m\Omega$

$X_{(0)} = 5.3 \times 523.5 = 2774.6\ m\Omega$

$Z_{M1} = 95.19 + j\,523.5\ m\Omega$

$Z_{(0)M1} = 1446.9 + j\,2774.6\ m\Omega$

มอเตอร์ : M2

คำนวณลักษณะเดียวกับการคำนวณอิมพิแดนซ์มอเตอร์ M1 จะได้

$Z_{M2} = 8.22 + j\,110.9\ m\Omega$

$Z_{(0)M2} = 124.9 + j\,587.8\ m\Omega$

เปลี่ยนค่าอิมพิแดนซ์ที่ระดับแรงดันอื่นเป็นที่ระดับแรงดัน 400 V

$$Z_Q = (105.95 + j\,1059.5) \times \left(\frac{0.4\ kV}{22\ kV}\right)^2 = 0.0350 + j\,0.3502\ m\Omega$$

ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 คิดที่ระดับแรงดัน 400 V สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

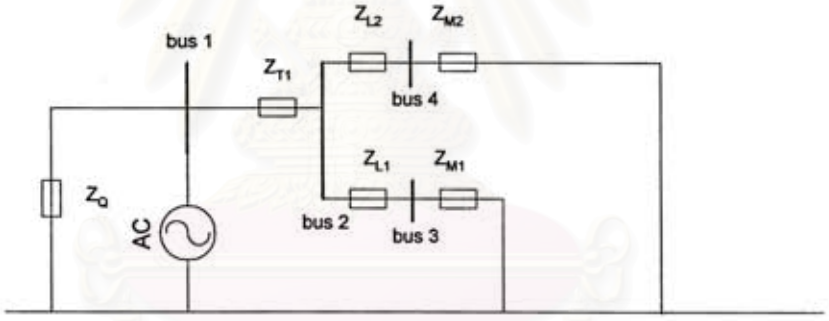
ตารางที่ 5.1 ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบตัวอย่างที่ 1 คิดที่ระดับแรงดัน 400 V

อุปกรณ์	อิมพิแดนซ์ลำดับบวก ลบ : Z_1, Z_2 (mΩ)	อิมพิแดนซ์ลำดับศูนย์ : Z_0 (mΩ)
G1	0.0350 + j 0.3502	-
T1	2.16 + j 9.35	2.16 + j 8.89
L1	3.72 + j 5.34	14.88 + j 18.69
L2	2.31 + j 2.7	9.24 + j 9.45
M1	95.19 + j 523.5	1446.9 + j 2774.6
M2	8.22 + j 110.9	124.9 + j 587.8

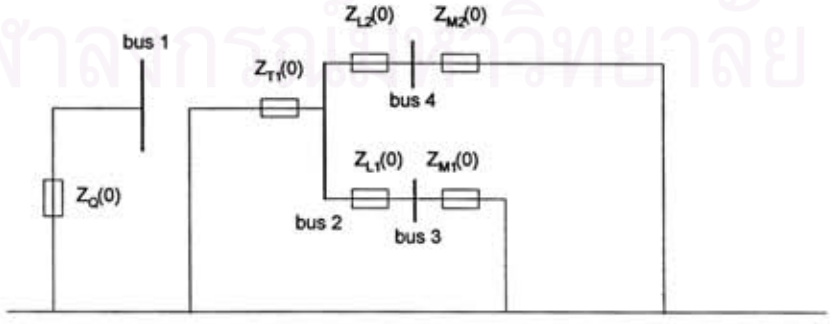
การคำนวณกระแสลัดวงจร

ค่ากระแสลัดวงจรที่แต่ละบัสสามารถคำนวณได้ดังนี้

<u>บัสที่ 1</u>



รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก กรณีเกิดการลัดวงจรที่บัส 1



รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ กรณีเกิดการลัดวงจรที่บัส 1

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

$$Z_{(1)} = Z_Q // [Z_{T1} + [(Z_{L1} + Z_{M1}) // (Z_{L2} + Z_{M2})]]$$

$$Z_{(1)} = 0.0349 + j\ 0.349\ m\Omega\ ,\ |Z_{(1)}| = 0.3508$$

(// หมายถึงการต่อขนานของอิมพิแดนซ์)

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์

$$Z_{(0)} = 0\ m\Omega$$

กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3}

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k(1)}} = \frac{1.1 \times 400}{\sqrt{3} \times 0.3508} \times \frac{0.4\ kV}{22\ kV} = 13.17\ kA$$

กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1}

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\ cU_n}{|Z_{k(0)} + 2Z_{k(1)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 400}{(0 + 2 \times 0.3508)} \times \frac{0.4\ kV}{22\ kV} = 19.75\ kA$$

<u>บัสที่ 2</u>

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

$$Z_{(1)} = (Z_Q + Z_{T1}) // (Z_{L1} + Z_{M1}) // (Z_{L2} + Z_{M2})$$

$$Z_{(1)} = 1.891 + j\ 8.800\ m\Omega\ ,\ |Z_{(1)}| = 9.001$$

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์

$$Z_{(0)} = Z_{(0)T1} // (Z_{(0)L1} + Z_{(0)M1}) // (Z_{(0)L2} + Z_{(0)M2})$$

$$Z_{(0)} = 2.126 + j\ 8.734\ m\Omega$$

กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3}

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k(1)}} = \frac{1 \times 400}{\sqrt{3} \times 9.001} = 25.66\ kA$$

กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1}

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\ cU_n}{|Z_{k(0)} + 2Z_{k(1)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1 \times 400}{|\ 5.908 + j26.334\ |} = 25.67\ kA$$

<u>บัสที่ 3</u>

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

$$Z_1 = [[(Z_Q + Z_{T1}) // (Z_{L2} + Z_{M2})] + Z_{L1}] // Z_{M1}$$

$$Z_1 = 5.415 + j\ 13.925\ m\Omega\ ,\ |Z_{(1)}| = 14.941$$

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์

$$Z_{(0)} = [[\ Z_{(0)T1} // (Z_{(0)L2} + Z_{(0)M2})] + Z_{(0)L1}] // Z_{(0)M1}$$

$$Z_{(0)} = 16.812 + j\ 27.183\ m\Omega$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3}

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k(1)}} = \frac{1 \times 400}{\sqrt{3} \times 14.941} = 15.46 \text{ kA}$$

กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1}

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\, cU_n}{|Z_{k(0)} + 2Z_{k(1)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1 \times 400}{|\, 27.642 + j\, 55.033\,|} = 11.25 \text{ kA}$$

<u>บัสที่ 4</u>

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

$$Z_1 = [[(Z_Q + Z_{T1}) \,//\, (Z_{L1} + Z_{M1})] + Z_{L2}] \,//\, Z_{M2}$$

$$Z_{(1)} = 3.690 + j\ 11.094\ m\Omega\ ,\ |Z_{(1)}| = 11.692$$

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์

$$Z_{(0)} = [[\, Z_{(0)T1} \,//\, (Z_{(0)L1} + Z_{(0)M1})] + Z_{(0)L2}] \,//\, Z_{(0)M2}$$

$$Z_{(0)} = 10.817 + j\ 17.843\ m\Omega$$

กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3}

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k(1)}} = \frac{1 \times 400}{\sqrt{3} \times 11.692} = 19.75 \text{ kA}$$

กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1}

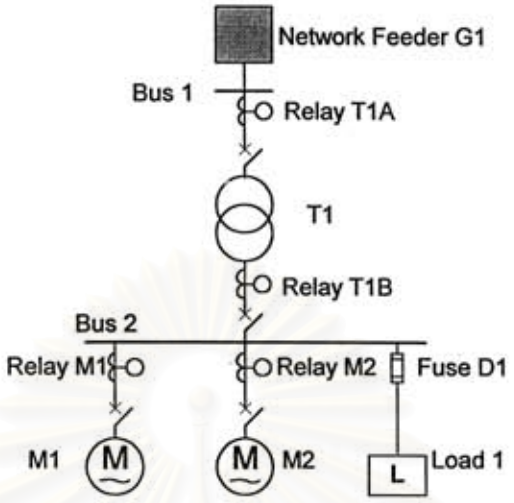
$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\, cU_n}{|Z_{k(0)} + 2Z_{k(1)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1 \times 400}{|\, 18.197 + j\, 40.031\,|} = 15.76 \text{ kA}$$

ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{k3}) และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{k1}) ที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{k3}) และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{k1}) ที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

บัส	กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3} (kA)	กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1} (kA)
1	13.17	19.75
2	25.66	25.67
3	15.46	11.25
4	19.75	15.76

5.4.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรสำหรับระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 5.8 ระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 2

ข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบมีรายละเอียดดังนี้

แหล่งจ่ายไฟ:G1 S''_{kQ} กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น = 500 MVA

U_n แรงดันระบบ = 22 kV ; X/R = 10

หม้อแปลง : T1 S_{rT} กำลังปรากฏพิกัด = 5000 kVA ; อัตราส่วนแรงดัน = 22 kV/6.6 kV

u_{kr} แรงดันลัดวงจรพิกัด = 8 % ; P_{krT} กำลังสูญเสีย = 35 kW

การต่อ = Delta-Wye to Ground ; $R_{(0)}/R_T$ = 1.0 ; $X_{(0)}/X_T$ = 0.95

มอเตอร์ : M1 P_{rM} กำลังพิกัด = 1200 kW ; U_{rM} แรงดันพิกัด = 6.6 kV

I_{LR} กระแสยึดตัวหมุน = 777.6 A ; cos φ_r ค่าตัวประกอบกำลัง = 0.9

η_r ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ = 0.9 ; X/R Ratio = 26

$R_{(0)}/R_M$ = 15.2 ; $X_{(0)}/X_M$ = 5.3

Service Factor = 1 ; เวลาเร่ง = 5 s ; Max Stall Time = 12 s

มอเตอร์ : M2 P_{rM} กำลังพิกัด = 1000 kW ; U_{rM} แรงดันพิกัด = 6.6 kV

I_{LR} กระแสยึดตัวหมุน = 648 A ; cos φ_r ค่าตัวประกอบกำลัง = 0.9

η_r ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ = 0.9 ; X/R Ratio = 15.5

$R_{(0)}/R_M$ = 15.2 ; $X_{(0)}/X_M$ = 5.3

Service Factor = 1 ; เวลาเร่ง = 7 s ; Max Stall Time = 15 s

โหลด : LD1 กระแสพิกัด = 50 A ; แรงดัน = 6.6 kV

การคำนวณอิมพิแดนซ์ลัดวงจร

อิมพิแดนซ์ลัดวงจรของอุปกรณ์แต่ละตัวในระบบ สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกับการคำนวณอิมพิแดนซ์ในตัวอย่างที่ 1 ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบตัวอย่างที่ 2 คิดที่ระดับแรงดัน 6.6 kV สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์ในระบบตัวอย่างที่ 2 คิดที่ระดับแรงดัน 6.6 kV

อุปกรณ์	อิมพิแดนซ์ลำดับบวก,ลบ : Z_1, Z_2 (mΩ)	อิมพิแดนซ์ลำดับศูนย์ : Z_0 (mΩ)
G1	9.536 + j 95.36	-
T1	60.984 + j 694.29	60.984 + j 659.57
M1	188.34 + j 4896.73	2862.7 + j 25952.66
M2	378.59 + j 5868.22	5754.64 + j 31101.56

การคำนวณกระแสลัดวงจร

ค่ากระแสลัดวงจรที่แต่ละบัสสามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกับการคำนวณในตัวอย่างที่ 1 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{k3}) และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{k1}) ที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{k3}) และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{k1}) ที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

บัส	กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3} (kA)	กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1} (kA)
1	13.49	20.24
2	6.85	6.77

สำหรับขนาดพิกัดและค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องทำการพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส เพื่อให้ได้ค่าปรับตั้งและการจัดความสัมพันธ์ที่เหมาะสม โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทถัดไป และจะใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการช่วยพิจารณา

บทที่ 6

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

6.1 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

ในอดีตวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ใช้วิธีการนำกราฟการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ได้จากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตมาเขียนลงบนกระดาษกราฟ และทดลองปรับกราฟและค่าปรับตั้งต่าง ๆ จนได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นงานที่ค่อนข้างยุ่งยากไม่สะดวก และใช้เวลาค่อนข้างมาก

แต่ในปัจจุบันได้มีการใช้คอมพิวเตอร์อย่างกว้างขวาง และสามารถนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ทำให้การออกแบบระบบป้องกันมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยตัวโปรแกรมจะสามารถเก็บข้อมูลที่จำเป็นต่าง ๆ ของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละชนิดในฐานข้อมูลได้ [3-5,20,21]

ประเภทข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมช่วยจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมอาจสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ข้อมูลสำหรับอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ข้อมูลกราฟการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ เช่น ข้อมูลของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ หรือรีเลย์ ซึ่งได้มาจากบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ และสามารถทำการเพิ่มเติมข้อมูลใหม่เข้าไปได้ เมื่อไม่มีข้อมูลที่ต้องการในฐานข้อมูล โดยข้อมูลของกราฟอุปกรณ์ป้องกันอาจแสดงได้เป็น 2 วิธี คือ แสดงเป็นกราฟซึ่งได้จากผู้ผลิตโดยเขียนขึ้นตามจุดที่กำหนดหรือ แสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์

2. ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ในระบบ เช่น สายไฟฟ้า หม้อแปลง มอเตอร์ เป็นต้น โดยข้อมูลทั้งสองแบบสามารถเรียกจัดเก็บ และแก้ไขได้

หน้าที่ของโปรแกรมช่วยจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

โดยทั่วไปโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำงานแทนวิธีการเดิมซึ่งทำด้วยมือ (Manual) จะมีหน้าที่หลักในการช่วยจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ดังนี้

1. ช่วยในการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อมูลกราฟการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

2.ช่วยในการเขียนกราฟของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะต้องทำการเขียนเป็นจำนวนมากใน แต่ละครั้ง

สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เพิ่มเติมส่วนที่ช่วยในการคำนวณกระแสลัดวงจรด้วย เพื่อให้สามารถทำการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยโปรแกรมมีความสามารถในการทำงานดังต่อไปนี้

1. สามารถช่วยในการพิจารณาปรับตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

2. สามารถคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

3.สามารถช่วยในการเขียนกราฟสำหรับการจัดความสัมพันธ์ โดยสามารถโหลดกราฟของอุปกรณ์ป้องกันจากไฟล์ข้อมูลได้

4.สามารถช่วยเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันและสามารถทำการเพิ่มเติมข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันเองได้

5. สามารถพิมพ์ผลการคำนวณกระแสลัดวงจร ค่าการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันและกราฟการจัดความสัมพันธ์ทางเครื่องพิมพ์ได้

ประโยชน์ของโปรแกรมช่วยจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

ประโยชน์หลักที่ได้จากการใช้โปรแกรมช่วยจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่

1.ทำให้สามารถจัดความสัมพันธ์และออกแบบระบบป้องกันโดยใช้เวลาที่น้อยลงกว่าวิธีเดิม

2.ทำให้การพิจารณามีความแม่นยำแน่นอนมากขึ้น และทำให้การปรับตั้งถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้นกว่าการทำโดยใช้มือ

นอกจากนี้ยังมีความสะดวกอื่น ๆ เช่น สามารถเรียกและจัดเก็บข้อมูลที่ทำไว้ได้ด้วย

6.2 ลักษณะและรูปแบบของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า 'Coordination Program' ใช้งานกับระบบปฏิบัติการวินโดว์ 95 ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Delphi 3 สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว (Single-Line Diagram Section)

2. ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล (Fault Calculation Section)

3. ส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section)

การใช้งานโปรแกรมเริ่มต้นจาก การเขียนแผนผังเส้นเดี่ยวและทำการใส่ข้อมูลอุปกรณ์อุปกรณ์ป้องกันในโปรแกรมส่วนที่ 1 หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณกระแสผิดพร่องโดยใช้โปรแกรมส่วนที่ 2 และทำการจัดความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าปรับตั้งและขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมในส่วนที่ 3

สำหรับรายละเอียดและการใช้งานของโปรแกรม 'Coordination Program' จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1

6.2.1 การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมและส่วนหลักของโปรแกรม

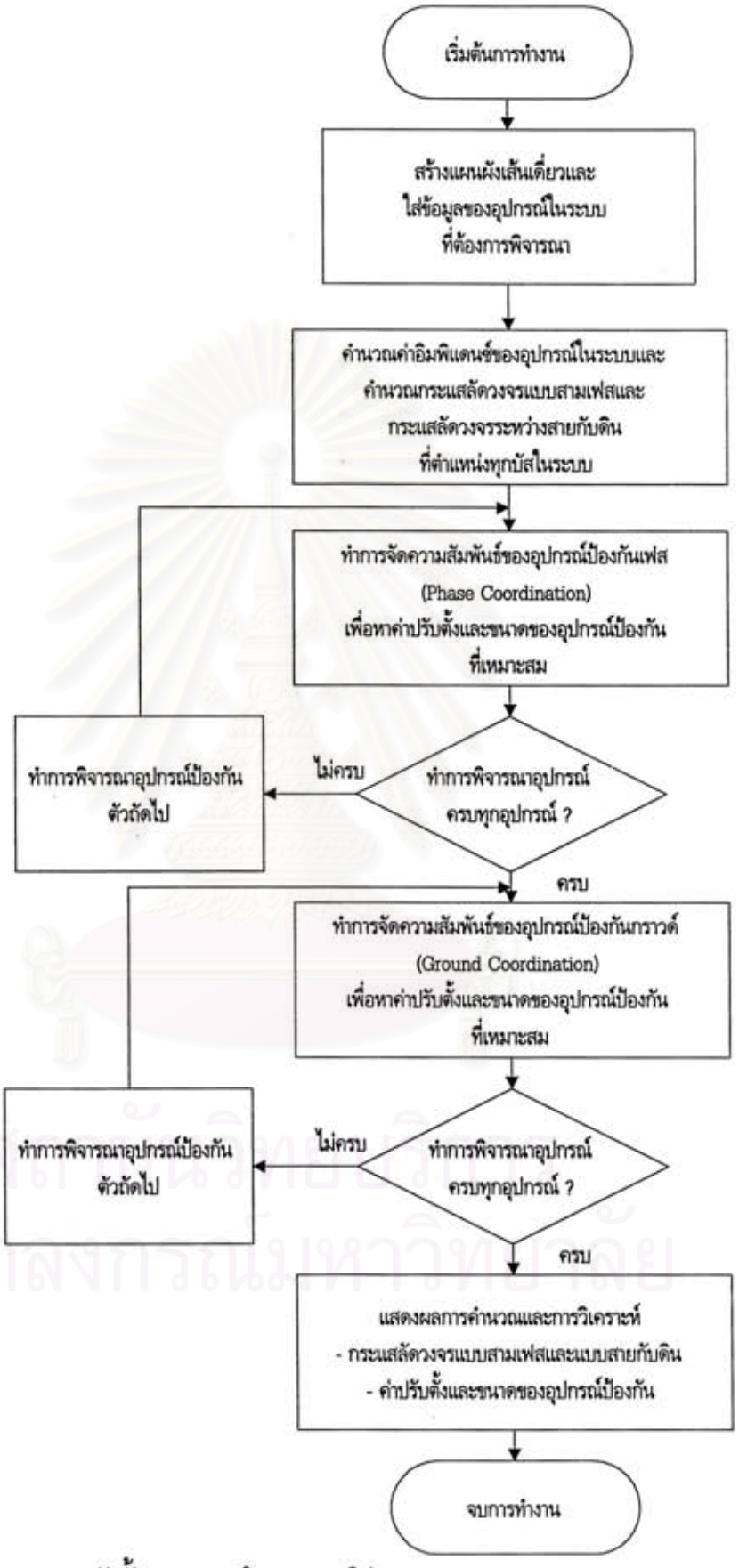
เมื่อเริ่มต้นใช้โปรแกรม 'Coordination Program' การทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นด้วยการเรียกหน้าต่างแสดงชื่อโปรแกรม 'Coordination Program' หลังจากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่างหลัก (Main Window) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่

1. **ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว** (Single-Line Diagram Section) เป็นส่วนที่ใช้สร้างแผนผังเส้นเดี่ยว และเป็นส่วนที่ทำการรับข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบ

2. **ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล** (Fault Calculation Section) เป็นส่วนแสดงผลการคำนวณกระแสผิดพร่อง รวมทั้งมีส่วนที่แสดงรายละเอียดของข้อมูลอุปกรณ์ในระบบและแสดงผลการพิจารณาเลือกค่าปรับตั้งและขนาดของอุปกรณ์ป้องกันในระบบ

3.**ส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน** (Coordination Section) เป็นส่วนที่ช่วยในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะแสดงกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส ของอุปกรณ์ป้องกันทั้งแบบเฟสและกราวด์

สำหรับหน้าต่างหลัก (Main Window) ของโปรแกรมมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Coordination Program

6.2.2 ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว (Single-Line Diagram Section)

6.2.2.1 รายละเอียดและส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว (Single-Line Diagram Section)

เป็นส่วนที่ใช้สร้างแผนผังเส้นเดี่ยว และเป็นส่วนที่ทำการรับข้อมูลของอุปกรณ์ในระบบ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.3

ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย ได้แก่

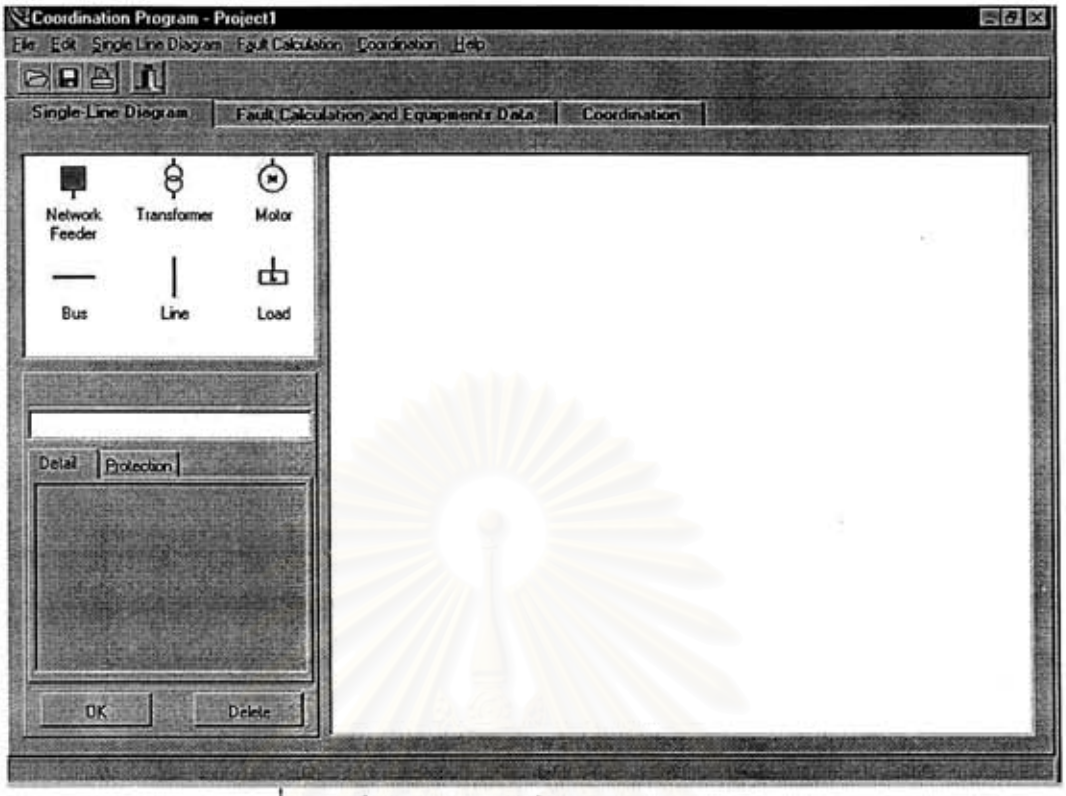
1. **ส่วนแสดงรูปอุปกรณ์** (Equipments Box) เป็นส่วนแสดงรูปอุปกรณ์หลักที่สามารถสร้างได้ในระบบ ซึ่งมี 6 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สัญลักษณ์อุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม

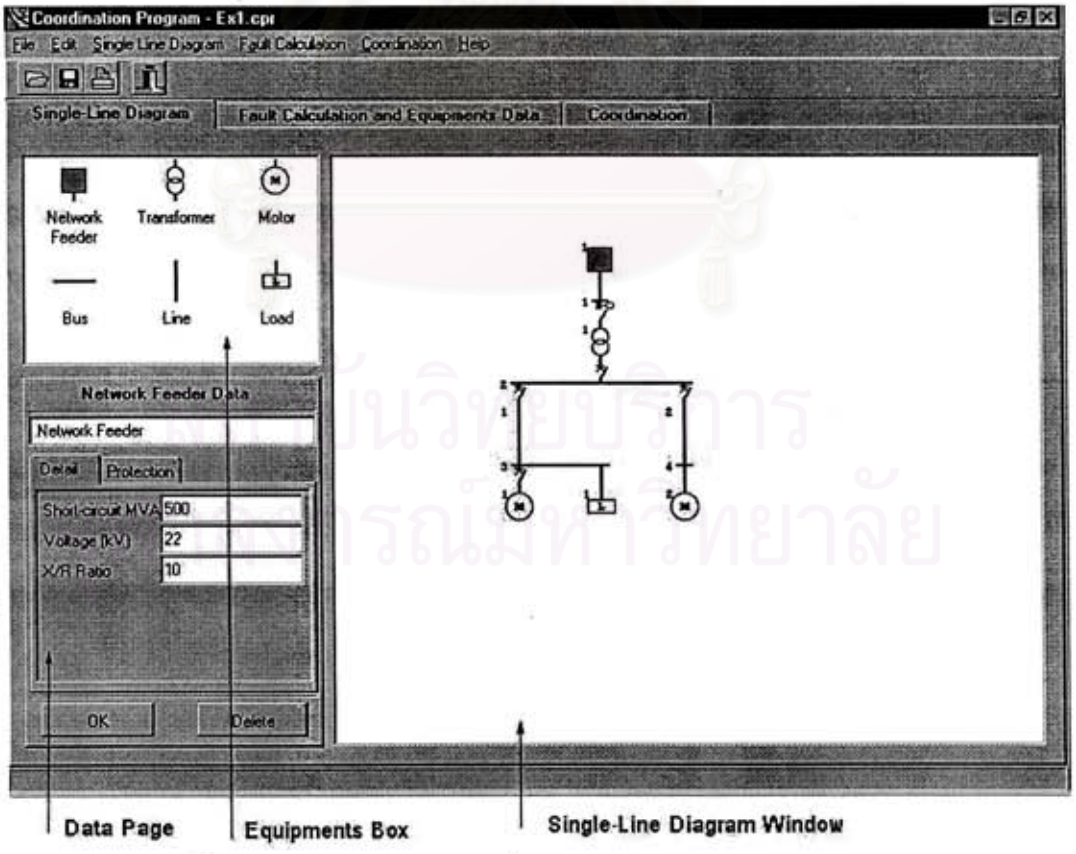
อุปกรณ์	สัญลักษณ์
แหล่งจ่ายไฟ	Network Feeder
บัส	Bus
หม้อแปลง	Transformer
สายไฟฟ้า	Line
มอเตอร์	Motor
โหลด	Load

2. **ส่วนแสดงรายละเอียดอุปกรณ์** (Data Page) เป็นส่วนแสดงชื่ออุปกรณ์และป้อนรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิด ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่

- ส่วนข้อมูลอุปกรณ์ (Detail Page) ใช้สำหรับป้อนข้อมูล ได้แก่ ขนาด แรงดัน เป็นต้น
- ส่วนข้อมูลการป้องกัน (Protection Page) ใช้สำหรับป้อนข้อมูล ได้แก่ ชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน เป็นต้น



รูปที่ 6.2 หน้าต่างหลักของโปรแกรม (Main Window)



รูปที่ 6.3 ส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram Section)

ข้อมูลที่ต้องทำการป้อนสำหรับแต่ละอุปกรณ์ ได้แก่

1. **แหล่งจ่ายไฟ** (Network Feeder) ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้
    - ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit MVA)
    - แรงดันระบบ (Voltage : kV)
    - อัตราส่วนของรีแอคแตนซ์ต่อค่าความต้านทานของระบบ (X/R Ratio)
    - ชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน (Out Device)
2. **บัส** (Bus) ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้
    - จำนวนช่องของกริดบนจอในการเขียนรูปบัส (Number of Block)
    - แสดงชื่อของอุปกรณ์ป้องกันตัวบน (In Device) (ไม่ต้องป้อนข้อมูล)
    - แสดงชื่อของอุปกรณ์ป้องกันตัวล่าง (Out Device) (ไม่ต้องป้อนข้อมูล)
3. **หม้อแปลง** (Transformer) ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้
    - พิกัดกำลังของหม้อแปลง (Rated : kVA)
    - แรงดันพิกัดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Pri. Volt : kV)
    - แรงดันพิกัดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Sec. Volt : V)
    - การต่อขดลวด (Connection)
    - แรงดันลัดวงจรพิกัด (U_{kr} : %)
    - กำลังสูญเสียในขดลวดหม้อแปลง (Loss : kW)
    - อัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์ต่อความต้านทานลำดับบวก ($R_{(0)}/R_{(1)}$)
    - อัตราส่วนรีแอคแตนซ์ลำดับศูนย์ต่อรีแอคแตนซ์ลำดับบวก ($X_{(0)}/X_{(1)}$)
    - ชนิดของอุปกรณ์ป้องกันด้านปฐมภูมิ (In Device :A)
    - ชนิดของอุปกรณ์ป้องกันด้านทุติยภูมิ (Out Device :B)
    - จุดกระแสพุ่งเข้า (Inrush Point : A,s)
4. **สายไฟฟ้า** (Line) ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้
    - จำนวนช่องของกริดบนจอในการเขียนรูปสายไฟฟ้า (Number of Block)
    - กระแสพิกัด (Rated Current : A)
    - ความต้านทานของสายไฟฟ้า (R : mOhm/m)
    - รีแอคแตนซ์ของสายไฟฟ้า (X : mOhm/m)
    - ความยาวสายไฟฟ้า (Length : m)

- อัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์ต่อความต้านทานลำดับบวก ($R_{(0)}/R_{(1)}$)
- อัตราส่วนรีแอคแตนซ์ลำดับศูนย์ต่อรีแอคแตนซ์ลำดับบวก ($X_{(0)}/X_{(1)}$)
- ชนิดของอุปกรณ์ป้องกันตัวบน (In Device :A)
- ชนิดของอุปกรณ์ป้องกันตัวล่าง (Out Device :B)
- กราฟความคงทนของสายไฟฟ้า (Damage Curve (Start, End Point) : A,s)

5. มอเตอร์ (Motor) ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- กำลังไฟฟ้าพิกัด (Power : kW)
- แรงดันพิกัด (Rated Volt : V)
- อัตราส่วนของรีแอคแตนซ์ต่อค่าความต้านทานของมอเตอร์ (X/R Ratio)
- ค่าตัวประกอบกำลัง (P.F.)
- ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency : P.U.)
- อัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์ต่อความต้านทานลำดับบวก ($R_{(0)}/R_{(1)}$)
- อัตราส่วนรีแอคแตนซ์ลำดับศูนย์ต่อรีแอคแตนซ์ลำดับบวก ($X_{(0)}/X_{(1)}$)
- ชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน (In Device)
- ค่าเวลา Stall Time (Stall Time : s)
- ค่ากระแสยึดตัวหมุน (Lock-Rotor Current : A,s)
- ค่ากระแสสตาร์ต (Starting Current : A,s)

6. โหลด (Load) ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

- กระแสพิกัด (Rated Current : A)
- แรงดันพิกัด (Rated Volt : V)
- ชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน (In Device)

สำหรับประเภทของอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถเลือกได้ ได้แก่

None หมายถึง ไม่มีการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน

Therm-Mag CB หมายถึง เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic

Electronic CB หมายถึง เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Electronic

Fuse หมายถึง ฟิวส์

Relay หมายถึง รีเลย์

3. **ส่วนหน้าจอแสดงแผนผังเส้นเดี่ยว** (Single-Line Diagram Window) เป็นส่วนที่ใช้แสดงแผนผังเส้นเดี่ยวที่สร้างขึ้น โดยหน้าจอแสดงผลนี้สามารถเลือกให้แสดงหรือไม่แสดงช่องกริดที่หน้าจอได้

6.2.2.2 **ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว** (Single-Line Diagram Section)

การใช้โปรแกรมในการสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการเปิดไฟล์งานใหม่ สามารถเริ่มสร้างแผนผังเส้นเดี่ยวได้ โดยวิธีการ Drag-Drop ของเมาส์ จากส่วนแสดงรูปอุปกรณ์ (Equipments Box) มาวางในส่วนหน้าจอแสดงแผนผังเส้นเดี่ยว (Single-Line Diagram Window) ภาพของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะมีหมายเลขกำกับแสดงว่าเป็นอุปกรณ์ตัวที่เท่าใดในระบบ โดยส่วนแสดงรายละเอียดอุปกรณ์ (Data Page) จะแสดงชื่ออุปกรณ์ที่วาด หลังจากนั้นทำการใส่ข้อมูลของอุปกรณ์ให้ครบ

2. ในการวาดรูป Network Feeder จะสามารถสร้างได้เพียง 1 จุดในระบบเท่านั้น เมื่อเขียนในแผนผังแล้วจะไม่สามารถเขียนรูป Network Feeder ได้อีก ส่วนการวาดบัสและสายไฟฟ้าจะสามารถลากให้ยาวขึ้นเพื่อเชื่อมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ โดยกำหนดความยาวเป็นจำนวนช่องของกริดบนจอ ซึ่งกำหนดค่าในช่อง Number of Block ในส่วนแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์

3. อุปกรณ์หลักทุกตัวซึ่งได้แก่ Network Feeder, Transformer, Line, Motor และ Load จะต้องถูกต่ออยู่กับบัส โดยอุปกรณ์แต่ละตัวจะไม่สามารถต่อกันได้โดยตรง เมื่ออุปกรณ์เชื่อมต่อกับบัส รูปอุปกรณ์ป้องกันที่ต่อที่บัสนั้นจะถูกเขียนขึ้น โดยสามารถดูชื่ออุปกรณ์ป้องกันที่บัสนั้น ๆ ได้ที่ข้อมูลการป้องกัน (Protection Page) ของบัส ถ้าอุปกรณ์ไม่ต่ออยู่กับบัส รูปอุปกรณ์ป้องกันจะไม่ถูกแสดง โดยรูปอุปกรณ์ป้องกันที่แสดงมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สัญลักษณ์อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในโปรแกรม

อุปกรณ์ป้องกัน	สัญลักษณ์
ฟิวส์ (Fuse)	
เซอร์กิตเบรกเกอร์ (ECB, CB)	
รีเลย์ (Relay)	

ชื่อของอุปกรณ์ป้องกันจะกำหนดจากชื่อของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ โดยชื่อหรือชื่อย่อของอุปกรณ์จะหมายถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ความหมายของชื่อหรือชื่อย่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม

ชื่อหรือชื่อย่ออุปกรณ์	อุปกรณ์
G	แหล่งจ่ายไฟ (Network Feeder)
T	หม้อแปลง (Transformer)
L	สายไฟฟ้า (Line)
M	มอเตอร์ (Motor)
D	โหลด (Load)
Fuse	ฟิวส์
CB	เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic
ECB	เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Electronic
Relay	รีเลย์

ตัวอย่างของชื่ออุปกรณ์ป้องกัน เช่น

ECB : M2 คือ Electronic CB ที่ต่ออยู่กับมอเตอร์ 2

CB : D1 คือ Thermal-Magnetic CB ที่ต่ออยู่กับโหลด 1

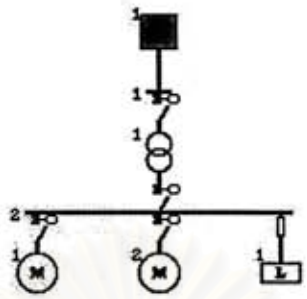
Relay : G1 คือ รีเลย์ที่ต่ออยู่กับ Network Feeder

สำหรับ หม้อแปลง และสายส่ง ชื่ออุปกรณ์ด้าน Incoming จะลงท้ายด้วย 'A' และด้าน Outgoing จะลงท้ายด้วย 'B' เช่น

Fuse : T1A คือ ฟิวส์ที่ต่ออยู่กับหม้อแปลง 1 ด้านปฐมภูมิ Incoming

4. เมื่อเขียนแผนผังเส้นเดี่ยวเรียบร้อยแล้ว สามารถทำการเรียกดูข้อมูลของอุปกรณ์ที่ทำการป้อนได้ และสามารถพิมพ์แผนผังเส้นเดี่ยวและข้อมูลของอุปกรณ์ทางเครื่องพิมพ์ (Printer) ได้ โดยข้อมูลที่พิมพ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.4

Single Line Diagram Project : Ex2



Data of Equipments

Network Feeder
- Short-circuit MVA : 500 MVA
- Voltage : 22 kV
- X/R Ratio : 10
- Protection : None

Transformer 1
- Rated : 5000 kVA
- Pri.Voltage : 22 kV Sec.Voltage : 6600 V
- Connection : Delta-Wye Ground
- Rated Impedance : 8 % Power Loss : 50 kW
- R0/R1 : 1 X0/X1 : 0.95
- Inrush Point : 3500 A, 0.1 s
- Protection [In] : Relay:T1A Protection [Out] : Relay:T1B

Motor 1
- Rated Power : 1200 kW
- Voltage : 6600 V X/R Ratio : 26
- Power Factor : 0.9 Efficiency : 0.9
- R0/R1 : 15.2 X0/X1 : 5.3
- Locked-Rotor Current : 777.6 A Stall Time : 12 s
- Protection : Relay:M1

Motor 2
- Rated Power : 1000 kW
- Voltage : 6600 V X/R Ratio : 15.5
- Power Factor : 0.9 Efficiency : 0.9
- R0/R1 : 15.2 X0/X1 : 5.3
- Locked-Rotor Current : 648 A Stall Time : 15 s
- Protection : Relay:M2

Load 1
- Rated Current : 50 A
- Voltage : 6600 V
- Protection : Fuse:D1

รูปที่ 6.4 แผนผังเส้นเดี่ยวและข้อมูลของอุปกรณ์ที่พิมพ์โดยโปรแกรม

6.2.3 ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล (Fault Calculation Section)

6.2.3.1 รายละเอียดและส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล (Fault Calculation Section)

เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลการคำนวณและผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.5

ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล ประกอบด้วย 2 ส่วนย่อยได้แก่

1.ส่วนแสดงผลการคำนวณกระแสผิดพร่อง (Fault Current Result) เป็นส่วน แสดงกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส และกระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน ที่ตำแหน่งบัสแต่ละบัส

2.ส่วนแสดงรายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์และค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (Equipment Data Result) เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลระบบและผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม ได้แก่

- ส่วนข้อมูลอุปกรณ์ในระบบ (Equipment Data)
- ส่วนข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันในระบบ (Device Setting)

6.2.3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล (Fault Calculation Section)

การใช้โปรแกรมในการคำนวณกระแสผิดพร่อง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.เมื่อทำการสร้างแผนผังเส้นเดี่ยวของระบบและใส่ข้อมูลของอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว สามารถทำการคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสแต่ละบัสได้ โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งแบบสามเฟส และแบบลัดวงจรระหว่างสายกับดิน โดยการคำนวณกระแสลัดวงจรสามารถเลือกให้ใช้หรือไม่ใช้ค่า C factor ตามมาตรฐาน IEC 909 ได้

2. สามารถพิมพ์ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรทางเครื่องพิมพ์ได้ โดยข้อมูลที่พิมพ์จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.6

6.2.4 ส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section)

6.2.4.1 รายละเอียดและส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section)

เป็นส่วนที่ใช้ในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.7

โดยส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section) ประกอบด้วย 3 ส่วนย่อยได้แก่

1.หน้าจอเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic Window) เป็นหน้าจอ แสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โดยสามารถเลือกให้แสดงหน้าจอสำหรับการพิจารณาจัดความสัมพันธ์แบบเฟส หรือแบบกราวด์ได้

2. **ส่วนแสดงชื่ออุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา** (Protective Device List) เป็นส่วนแสดงรายชื่ออุปกรณ์ป้องกันที่กำลังพิจารณาจัดความสัมพันธ์

3. **ส่วนแสดงค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน** (Device Setting Page) เป็นส่วนที่ใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่กำลังพิจารณา โดยส่วนแสดงค่าปรับตั้งนี้จะแบ่งเป็น

- ส่วนปรับตั้งสำหรับการป้องกันเฟส (Phase Setting Page)
- ส่วนปรับตั้งสำหรับการป้องกันกราวด์ (Ground Setting Page) ซึ่งจะมีเฉพาะ Electronic CB และ รีเลย์
- ส่วนปรับตั้งสำหรับการป้องกันโหลดเกิน (Overload Setting Page) ซึ่งจะมีเฉพาะสำหรับการป้องกันมอเตอร์ และสายไฟฟ้า

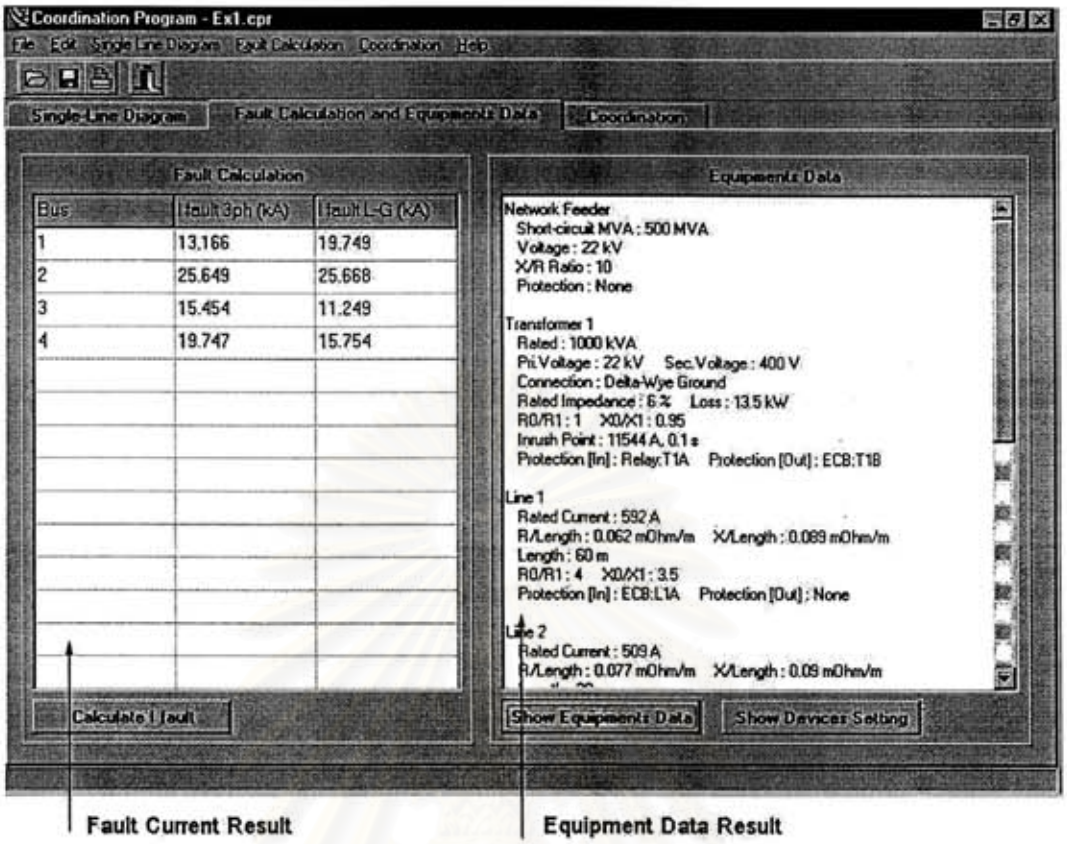
6.2.4.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section)

การใช้โปรแกรมในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่ต้องการพิจารณา จากหน้าต่างเลือกอุปกรณ์ (Select Protective Devices Window) ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งมีส่วนประกอบแบ่งเป็น

- ส่วนแสดงอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถเลือกมาพิจารณาได้ (Available Protective Devices)
- ส่วนแสดงอุปกรณ์ป้องกันที่ถูกเลือก (Consider Protective Devices)

ทำการเลือกอุปกรณ์ที่ต้องการพิจารณาไปใส่ในส่วนแสดงอุปกรณ์ Consider Protective Devices หลังจากนั้นชื่ออุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณาจะถูกแสดงใน ส่วนแสดงชื่ออุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา (Protective Device List) ในหน้าต่างหลัก (Main Window) และโปรแกรมจะทำการแสดงกราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ถูกป้องกันบนหน้าจอเวลา-กระแสสำหรับการจัดความสัมพันธ์แบบเฟส โดยกราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์แต่ละชนิดมีดังนี้

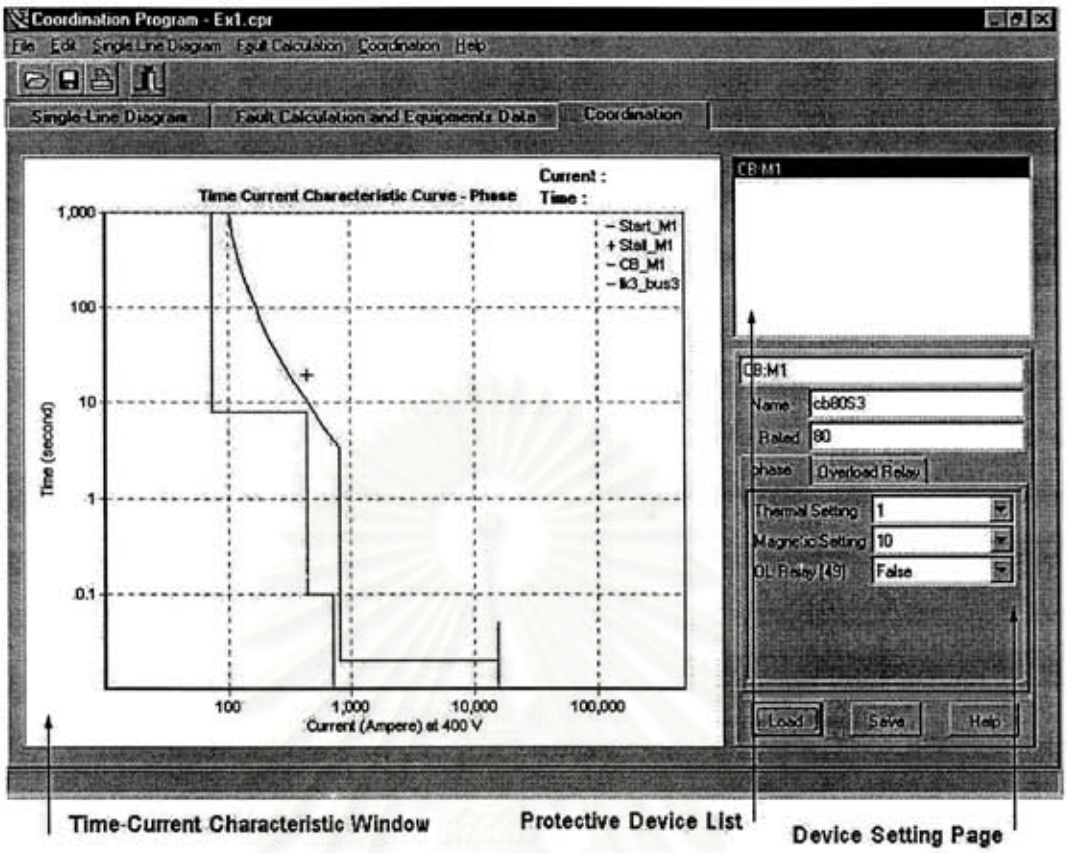


รูปที่ 6.5 ส่วนคำนวณกระแสผิดพร่องและแสดงผล (Fault Calculation Section)

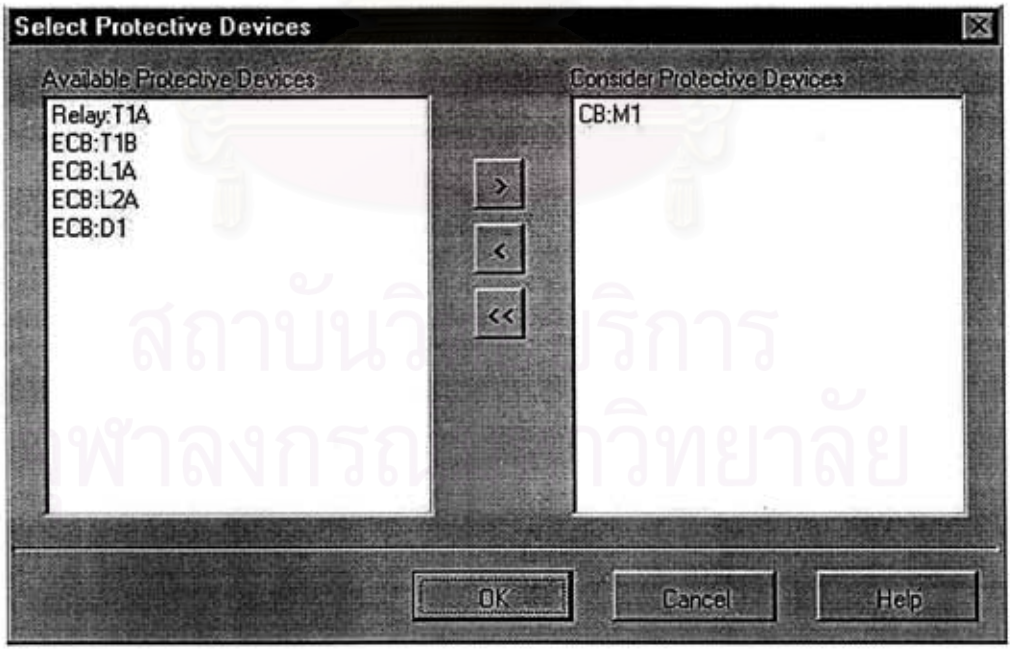
Fault Current Project : EX1

Bus	Three-Phase Short Circuit Current (kA)	Line to Earth Short Circuit Current (kA)
1	13.166	19.750
2	25.670	25.688
3	15.824	13.172
4	20.952	18.396

รูปที่ 6.6 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรที่พิมพ์โดยโปรแกรม



รูปที่ 6.7 ส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Section)



รูปที่ 6.8 หน้าต่างเลือกอุปกรณ์ (Select Protective Devices Window)

มอเตอร์ : Start_M หมายถึง กราฟกระแสสตาร์ตของมอเตอร์

Stall_M หมายถึง จุด Stall Time ของมอเตอร์

หม้อแปลง : FL_TR หมายถึง กระแสพิกัดของหม้อแปลง

ANSI_TR หมายถึงกราฟความคงทนของหม้อแปลงตามมาตรฐาน ANSI

Inrush_TR หมายถึง จุดกระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลง

สายไฟฟ้า : FL_line หมายถึง กระแสพิกัดของสายไฟฟ้า

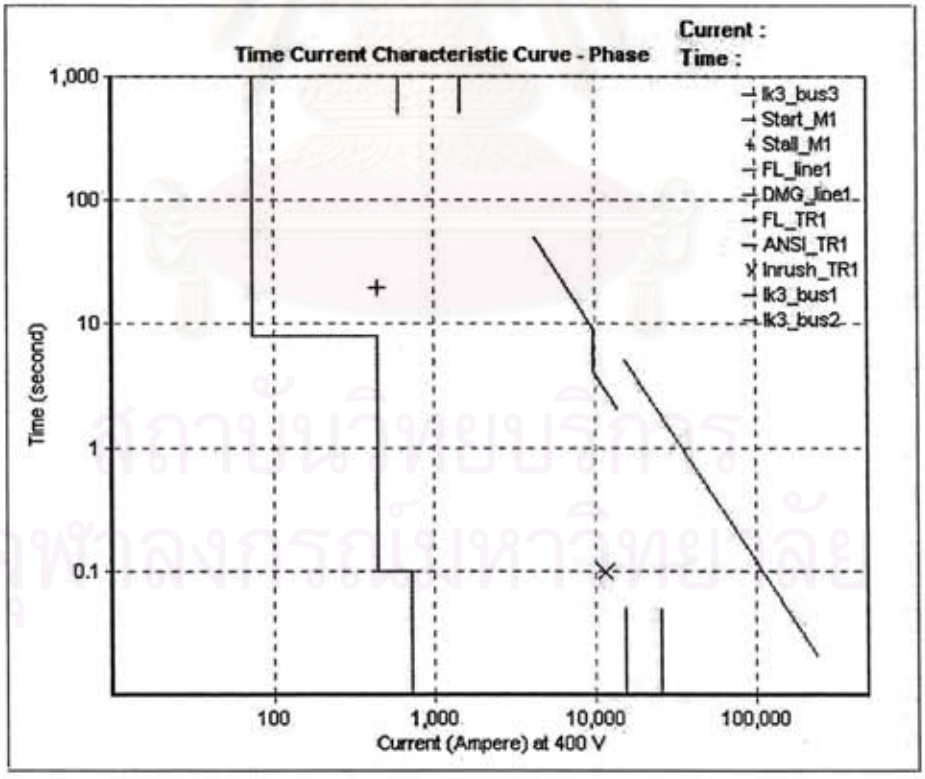
DMG_line หมายถึง กราฟขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า

นอกจากนี้โปรแกรมจะแสดงค่ากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งบัสซึ่งอุปกรณ์ต่ออยู่ ได้แก่

Ik3_bus หมายถึง กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส สำหรับหน้าจอการจัดความสัมพันธ์แบบเฟส

Ik1_bus หมายถึง กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดินที่บัส สำหรับหน้าจอการจัดความสัมพันธ์แบบกราวด์

ลักษณะของกราฟต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 กราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์และค่ากระแสลัดวงจรบนหน้าจอกราฟเวลา-กระแส

2. ทำการเลือกโหลดอุปกรณ์ป้องกันที่ต้องการ โดยทำการคลิ๊กเลือกชื่ออุปกรณ์ป้องกันจากส่วนแสดงชื่ออุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา (Protective Device List) จากนั้นส่วนแสดงค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน (Device Setting Page) จะแสดงชื่ออุปกรณ์ป้องกันตามที่เลือก และทำการโหลดกราฟอุปกรณ์ป้องกันที่ต้องการได้ โดยขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่ควรเลือกโปรแกรมจะช่วยคำนวณให้ โดยแสดงเป็นค่าของกระแสพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันที่ช่อง I Rated ส่วนกรณีที่ไฟล์งานมีการบันทึกการจัดความสัมพันธ์ไว้แล้ว ชื่อของอุปกรณ์ป้องกันที่บันทึกไว้จะแสดงที่ช่อง Name ซึ่งสามารถโหลดกราฟอุปกรณ์เดิมที่บันทึกไว้ได้

กราฟของอุปกรณ์ป้องกันที่โหลดขึ้นมาจะถูกปรับให้แสดงค่ากระแสที่ระดับแรงดันเดียวกัน เพื่อให้สามารถทำการจัดความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น ๆ ได้ โดยโปรแกรมจะเลือกแสดงค่ากระแสของอุปกรณ์ทุกตัวที่ค่าระดับแรงดันต่ำสุดของอุปกรณ์ กราฟของอุปกรณ์ป้องกันในส่วนเฟสจะมีชื่อตามชื่อของอุปกรณ์ป้องกัน ส่วนกราฟของอุปกรณ์ป้องกันในส่วนป้องกันการลัดวงจรลงดินจะเป็นชื่ออุปกรณ์และลงท้ายด้วย 'G'

3.ทำการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ต้องการ โดยรายละเอียดและการปรับตั้งอุปกรณ์ ป้องกันแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

CB (Thermal-Magnetic CB) มีรายละเอียดและการปรับตั้งดังต่อไปนี้

- Name : แสดงชื่อ Thermal-Magnetic CB
- I Rated : แสดงค่ากระแสพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์
- ค่าปรับตั้งสำหรับการป้องกันเฟส : Thermal Setting, Magnetic Setting

ECB (Electronic CB) มีรายละเอียดและการปรับตั้งดังต่อไปนี้

- Name : แสดงชื่อ Electronic CB
- I Rated : แสดงค่ากระแสพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์
- ค่าปรับตั้งสำหรับการป้องกันเฟส : LT PickUp , LT Delay , ST PickUp , ST I2t , ST Delay , Inst. PickUp
- ค่าปรับตั้งสำหรับการป้องกันกราวด์ : Ground PickUp , Ground I2t , Ground Delay

Fuse มีรายละเอียดและการปรับตั้งดังต่อไปนี้

- Name : แสดงชื่อฟิวส์
- I Rated : แสดงค่ากระแสพิกัดของฟิวส์

Relay มีรายละเอียดและการปรับตั้งดังต่อไปนี้

- Name : แสดงชื่อรีเลย์
- Setting : แสดงค่าที่ปรับตั้งของรีเลย์
- CT : แสดงอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสที่ใช้
- ค่าปรับตั้งสำหรับการป้องกันเฟส :

- Time Relay [51] (ใช้ปรับตั้งให้มีหรือไม่มี Time Overcurrent Relay), Time Setting , TMS Setting
- Inst. Relay [50] (ใช้ปรับตั้งให้มีหรือไม่มี Inst. Overcurrent Relay), Inst Setting

- ค่าปรับตั้งสำหรับการป้องกันกราวด์ :

- Time Relay [51N] (ใช้ปรับตั้งให้มีหรือไม่มี Time Ground Relay), Time Setting , TMS Setting
- Inst. Relay [50N] (ใช้ปรับตั้งให้มีหรือไม่มี Inst. Ground Relay), Inst Setting

สำหรับการป้องกันมอเตอร์ จะสามารถเลือกให้มีอุปกรณ์ป้องกันโหลดเกินได้ ซึ่งมีรายละเอียดที่แสดงได้แก่

OL Relay (Overload Relay) มีรายละเอียดและการปรับตั้งดังต่อไปนี้

- OL Relay [49] (ใช้ปรับตั้งให้มีหรือไม่มี Overload Relay)
- Name : แสดงชื่อรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน
- I Rated : แสดงค่ากระแสพิกัดของรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน

ทำการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันทั้งส่วนของเฟสและกราวด์ โดยสามารถเปลี่ยนหน้าจอกราฟเวลา-กระแสเป็นเฟสหรือกราวด์ได้ สำหรับการพิจารณาอุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดินจะมีเฉพาะใน รีเลย์ [50N, 51N] และ Electronic CB เท่านั้น

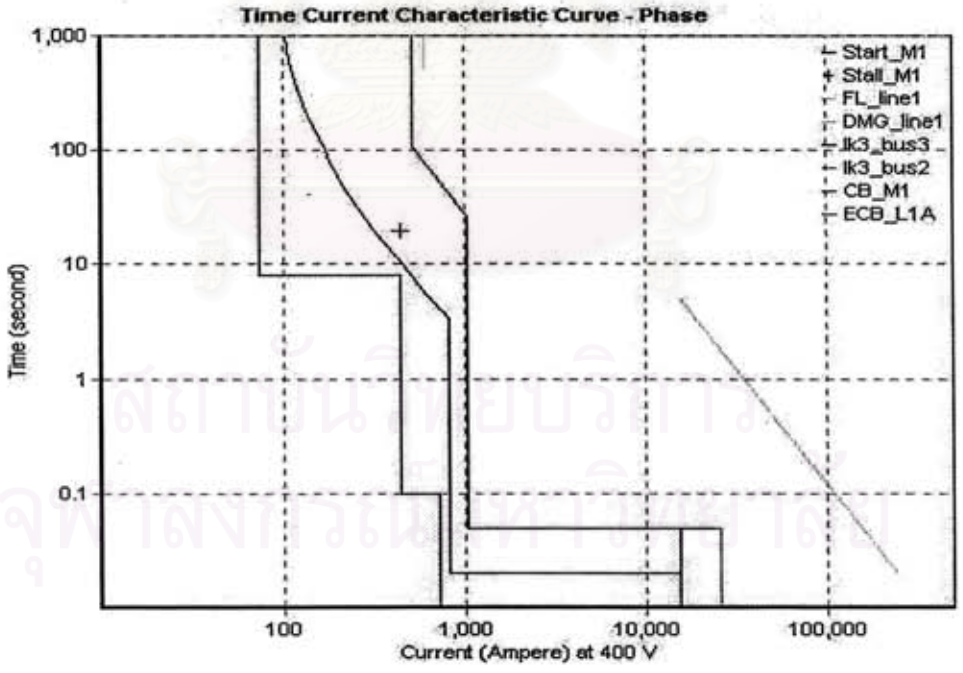
หลังจากทำการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันจนได้ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมแล้ว สามารถทำการบันทึกชื่ออุปกรณ์ป้องกัน และค่าปรับตั้งที่ต้องการได้

4.ทำการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันในระบบ โดยใช้หลักการและวิธีการพิจารณาดังที่กล่าวในบทที่ 5 พิจารณาหาค่าปรับตั้งและขนาดของอุปกรณ์ป้องกันในระบบจน

ครบทุกตัว หลังจากนั้นสามารถทำการบันทึก (Save) ข้อมูลปรับตั้งได้ และสามารถทำการเรียกดูข้อมูลค่าปรับตั้งและขนาดของอุปกรณ์ป้องกันของไฟล์งานที่มีการบันทึกไว้แล้วได้

5.นอกจากนี้โปรแกรมส่วนแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันยังมีฟังก์ชั่นการทำงานอื่น ๆ ซึ่งได้แก่

- สามารถเลือกให้แสดงหรือไม่แสดงกราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ ซึ่ง ได้แก่ มอเตอร์ หม้อแปลง และสายไฟฟ้า รวมทั้งค่ากระแสผิดพร่องได้
- สามารถเลือกเปลี่ยนสีของกราฟในส่วนของหน้าจอกราฟเวลา-กระแสได้
- สามารถพิมพ์กราฟการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน ทั้งแบบเฟสและกราวด์ทางเครื่องพิมพ์ (Printer) ได้ โดยกราฟการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันที่พิมพ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.10
- สามารถพิมพ์ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรรวมทั้งค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันทางเครื่องพิมพ์ (Printer) ได้ โดยข้อมูลที่พิมพ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.10 กราฟการจัดความสัมพันธ์ (Coordination) ของอุปกรณ์ป้องกันที่พิมพ์โดยโปรแกรม

Fault Current Project : EX2

Bus	Three-Phase Short Circuit Current (kA)	Line to Earth Short Circuit Current (kA)
1	13.495	20.242
2	6.852	6.773

Device Setting Project : Ex2

Relay:T1A
  Name : Very Inverse CT Ratio : 200/5
  Time (51) Set : 4.5 A TMS : 0.6
  Inst (50) Set : 60 A
  Inst (50G) Set : 0.5 A

Relay:T1B
  Name : Very Inverse CT Ratio : 600/5
  Time (51) Set : 4 A TMS : 0.3
  Time (51G) Set : 1.5 A TMS : 0.9

Relay:M1
  Name : Extremely Inverse CT Ratio : 200/5
  Time (51) Set : 5 A TMS : 1
  Inst (50) Set : 40 A
  Inst (50G) Set : 0.5 A

Relay:M2
  Name : Extremely Inverse CT Ratio : 150/5
  Time (51) Set : 6.5 A TMS : 1
  Inst (50) Set : 40 A
  Inst (50G) Set : 0.5 A

Fuse:D1
  Name : fuse63

รูปที่ 6.11 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรและค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันที่พิมพ์โดยโปรแกรม

6.2.5 ส่วนประกอบอื่น ๆ ของโปรแกรม

นอกจากการทำงานในส่วนหลักของโปรแกรมแล้ว โปรแกรมจะมีส่วนสำหรับการทำงานอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ ส่วนสร้างไฟล์ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน ส่วนปรับตั้งการทำงานของโปรแกรมในการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส และส่วนปรับตั้งในการเลือกค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.5.1 **ส่วนสร้างไฟล์ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน** (Add Protective Device Data Window)

เป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างและแก้ไขไฟล์ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน ใช้สำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันใหม่ซึ่งไม่มีในฐานข้อมูล โดยข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถสร้างได้ ได้แก่

1. **ฟิวส์** : ไฟล์ข้อมูลฟิวส์จะมีนามสกุลเป็น .fse (*.fse) ข้อมูลที่ต้องป้อนในการสร้างไฟล์ข้อมูลฟิวส์ ได้แก่

- Name : ชื่อของฟิวส์ โดยชื่อควรระบุถึงขนาดพิกัดด้วยเพื่อความสะดวกในการเลือกโหลดกราฟ
- I Rated : พิกัดกระแส
- Fuse Characteristic : คุณลักษณะของกราฟ โดยระบุเป็น
  - จุดคู่ลำดับของกระแสและเวลาจำนวน 24 จุด

ลักษณะของหน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของฟิวส์แสดงดังรูปที่ 6.12

2. **Thermal-Magnetic CB** : ไฟล์ข้อมูล Thermal-Magnetic CB จะมีนามสกุลเป็น .mcb (*.mcb) ข้อมูลที่ต้องป้อนในการสร้างไฟล์ข้อมูลเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic ได้แก่

- Name : ชื่อของ Thermal-Magnetic CB โดยชื่อควรระบุถึงขนาดพิกัดด้วยเพื่อความสะดวกในการเลือกโหลดกราฟ
- I_n : พิกัดกระแส
- Thermal-Magnetic CB Characteristic : คุณลักษณะของกราฟ โดยระบุเป็น
  - จุดคู่ลำดับของจำนวนเท่าของกระแสพิกัด (I_n) และเวลา จำนวน 16 จุด
  - Setting ค่าปรับตั้งที่สามารถปรับตั้งได้ โดยระบุเป็นจำนวนเท่าของกระแสพิกัด แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Thermal Setting และ Magnetic Setting

ลักษณะของหน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของ Thermal-Magnetic CB แสดงดังรูปที่ 6.13

3. **Electronic CB** : ไฟล์ข้อมูลของ Electronic CB จะมีนามสกุลเป็น .ecb (*.ecb) ข้อมูลที่ต้องป้อนในการสร้างไฟล์ข้อมูลเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Electronic ได้แก่

- Name : ชื่อของ Electronic CB โดยชื่อควรระบุถึงขนาดพิกัดด้วยเพื่อความสะดวกในการเลือกโหลดกราฟ
- I_n : พิกัดกระแส
- Electronic CB Characteristic : คุณลักษณะของกราฟ โดยระบุเป็น
  - Delay Curve Setting เป็นค่าเวลาการทำงานของกราฟหน่วงเวลา ซึ่งมี 3 แบบ ได้แก่ Long Time Delay , Short Time Delay และ Ground Delay โดยแต่ละกราฟมีข้อมูลที่ต้องป้อนได้แก่ Curve Name (ชื่อกราฟ) Multiple of I (จำนวนเท่าของกระแส) และ Time (เวลา)
  - Setting ค่าปรับตั้งที่สามารถปรับตั้งได้ โดยระบุเป็นจำนวนเท่าของกระแส ได้แก่ Long Time Setting , Short Time Setting , Inst. Setting และ Ground Setting

ลักษณะของหน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของ Electronic CB แสดงดังรูปที่ 6.14

4. **รีเลย์** : ไฟล์ข้อมูลของรีเลย์จะมีนามสกุลเป็น .rly (*.rly) ข้อมูลที่ต้องป้อนในการสร้างไฟล์ข้อมูลรีเลย์ ได้แก่

- Name : ชื่อของรีเลย์
- Relay Characteristic : คุณลักษณะของกราฟ โดยระบุเป็น
  - จุดคู่ลำดับของจำนวนเท่าของกระแส PickUp และเวลาที่ TMS = 1 จำนวน 24 จุด
  - Setting ค่าปรับตั้งที่สามารถปรับตั้งได้ แบ่งเป็น ส่วนของ Phase และ Ground แต่ละส่วนประกอบด้วย PickUp Setting , TMS Setting และ Inst. Setting

ลักษณะของหน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของรีเลย์ แสดงดังรูปที่ 6.15

5. **รีเลย์ป้องกันโหลดเกิน** : ไฟล์ข้อมูลของรีเลย์ป้องกันโหลดเกินจะมีนามสกุลเป็น .olr (*.olr) ข้อมูลที่ต้องป้อนในการสร้างไฟล์ข้อมูลรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน ได้แก่

- Name : ชื่อของรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน โดยชื่อควรระบุถึงขนาดพิกัดด้วยเพื่อความสะดวกในการเลือกโหลดกราฟ
- I_n : พิกัดกระแส
- Overload Relay Characteristic : คุณลักษณะของกราฟโดยระบุเป็น
  - จุดคู่ลำดับของกระแสและเวลาจำนวน 24 จุด

ลักษณะของหน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลรีเลย์ป้องกันโหลดเกินแสดงดังรูปที่ 6.16

6.2.5.2 **ส่วนปรับตั้งการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส** (CT Ratio Setting Window)

เป็นส่วนที่ใช้ในการปรับตั้งสำหรับการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส (CT) สำหรับรีเลย์ ซึ่งประกอบด้วย

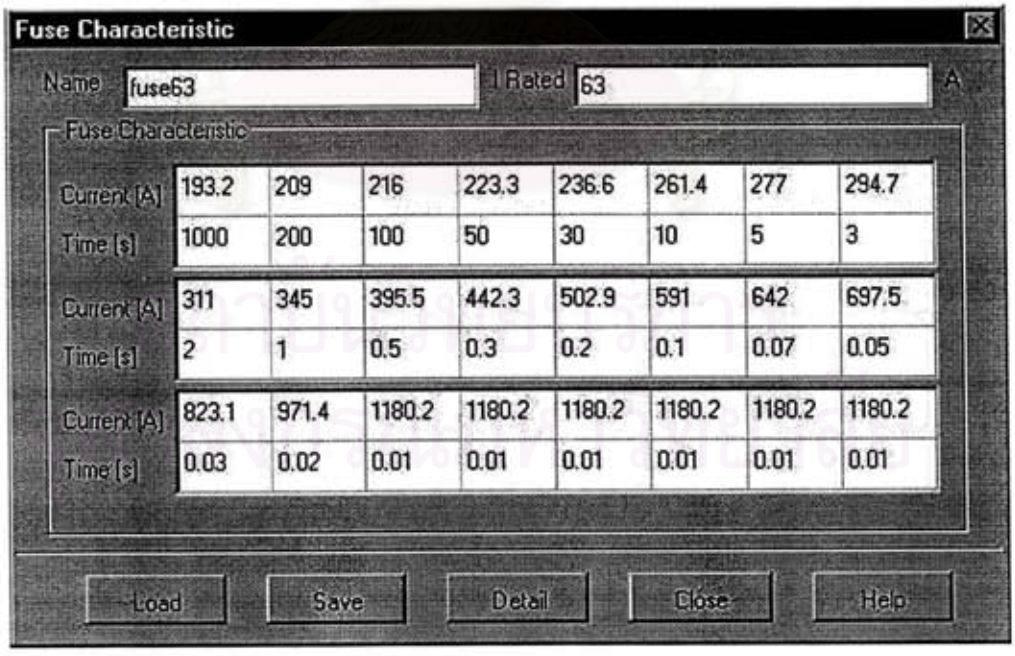
- ส่วนบันทึกค่าขนาด CT ที่พิจารณา : ใช้ใส่ค่ากระแสของ CT ด้านปฐมภูมิ โดยโปรแกรมจะพิจารณาเฉพาะสำหรับ CT ที่กระแสด้านทุติยภูมิเป็น 5 A
- ส่วนปรับตั้งสำหรับการเลือก CT : ใส่จำนวนเท่าของกระแสอุปกรณ์ ซึ่งใช้สำหรับการพิจารณาเลือกขนาดของ CT

โดยลักษณะของหน้าต่างสำหรับปรับตั้งการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส แสดงดังรูปที่ 6.17

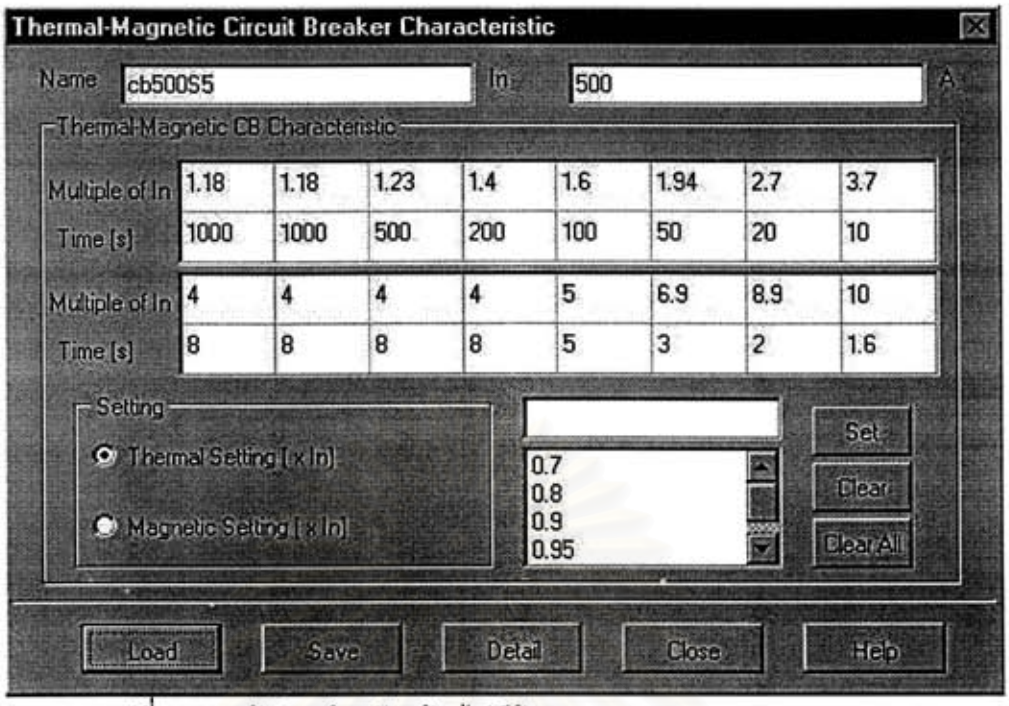
6.2.5.3 **ส่วนปรับตั้งการเลือกค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน** (Protective Device Setting Window)

โปรแกรมจะมีส่วนช่วยแสดงขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่ควรเลือก โดยจะแสดงค่าจากจำนวนเท่าของกระแสพิกัดอุปกรณ์ ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าจำนวนเท่าได้

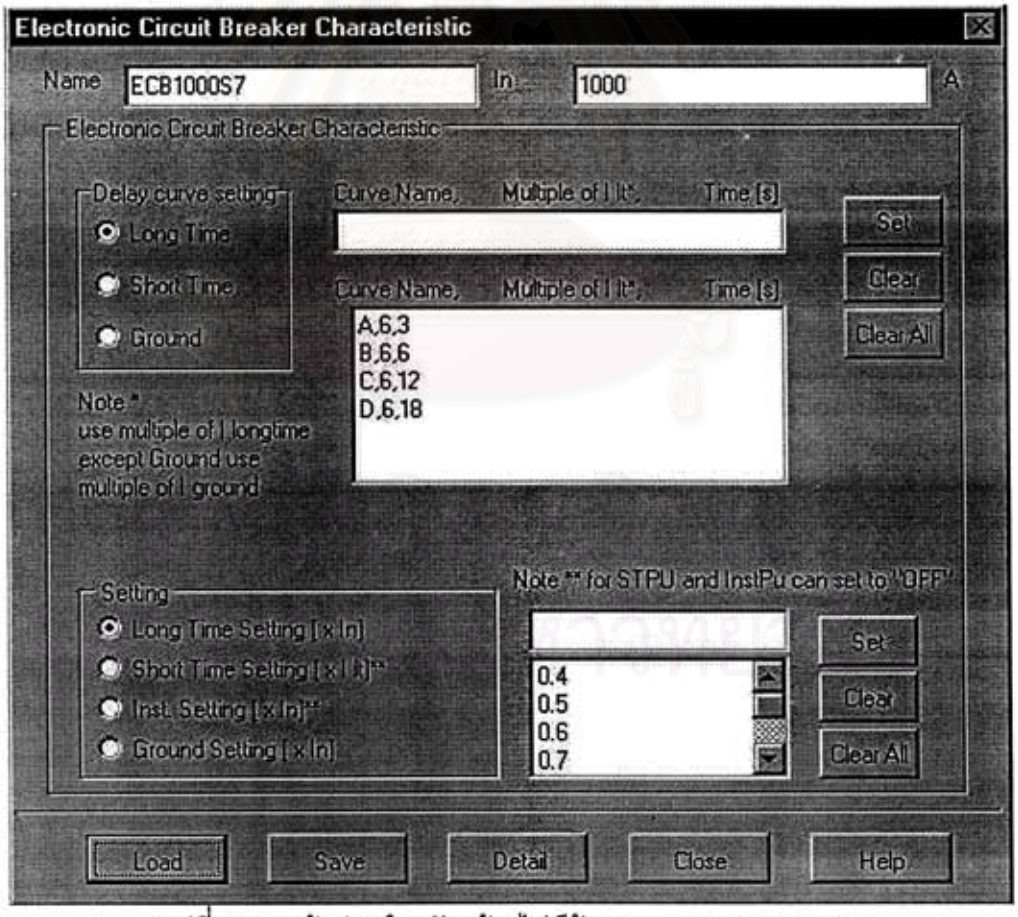
โดยลักษณะของหน้าต่างสำหรับปรับตั้งการเลือกค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน แสดงดังรูปที่ 6.18



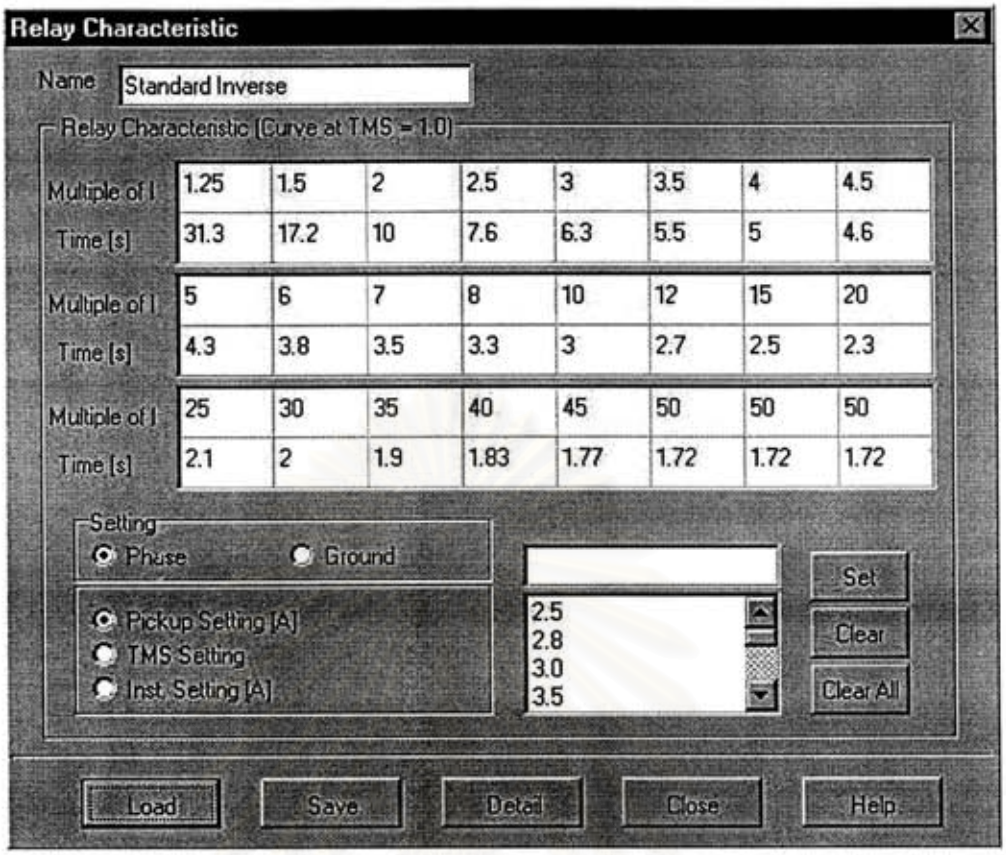
รูปที่ 6.12 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของฟิวส์



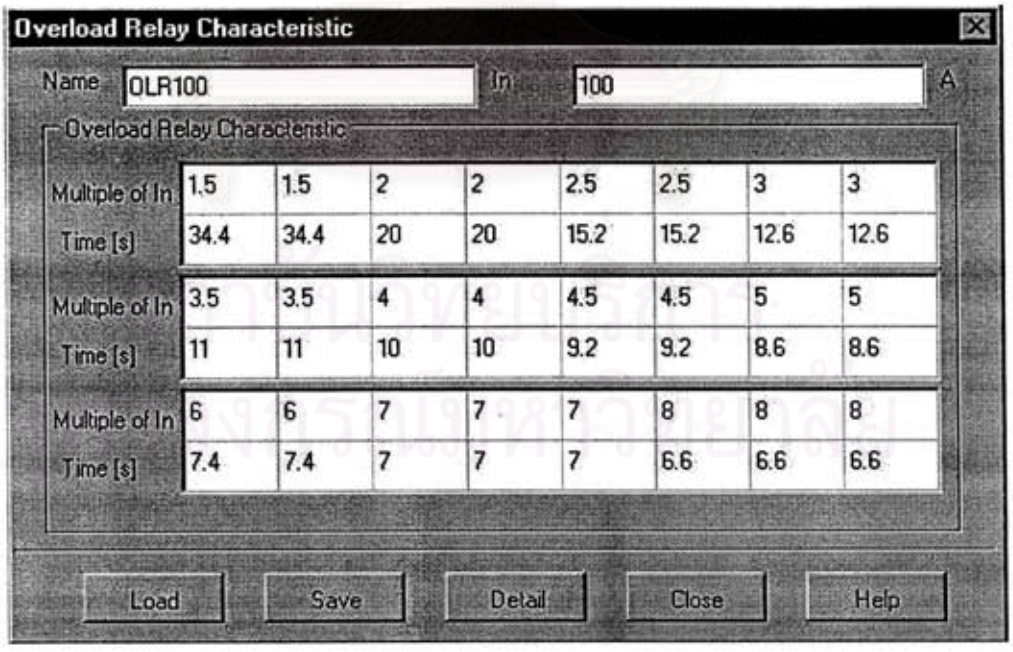
รูปที่ 6.13 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของ Thermal-Magnetic CB



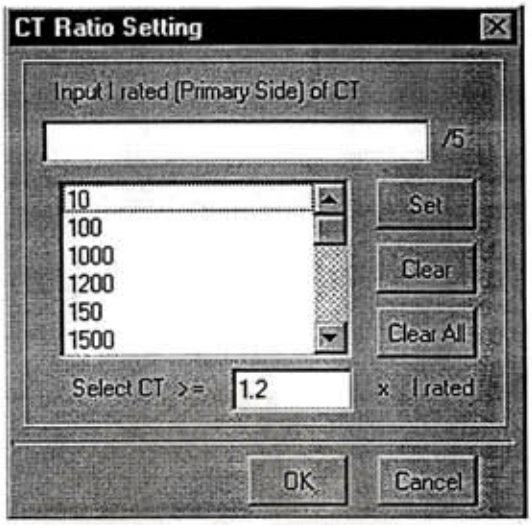
รูปที่ 6.14 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของ Electronic CB



รูปที่ 6.15 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของรีเลย์



รูปที่ 6.16 หน้าต่างสำหรับสร้างไฟล์ข้อมูลของรีเลย์ป้องกันโหลดเกิน



รูปที่ 6.17 หน้าต่างสำหรับปรับตั้งการเลือกพิกัดหม้อแปลงกระแส (CT Ratio Setting Window)

รูปที่ 6.18 หน้าต่างสำหรับปรับตั้งการเลือกค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน
(Protective Device Setting Window)

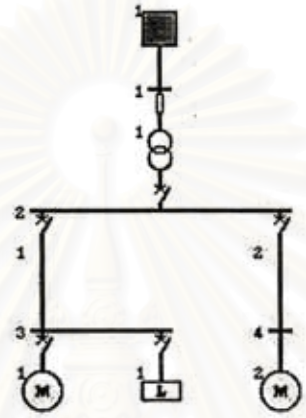
6.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน

ระบบตัวอย่างจากบทที่ 5 สามารถทำการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันโดยใช้โปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

6.3.1 การใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันตัวอย่างที่ 1

จากระบบตัวอย่างที่ 1 ในบทที่ 5 สามารถใช้โปรแกรม 'Coordination Program' ในการช่วยวิเคราะห์ได้ดังนี้

ทำการป้อนข้อมูลและเขียนแผนผังเส้นเดี่ยวโดยใช้โปรแกรม ได้แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบตัวอย่างที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบตัวอย่างที่ 1

Network Feeder :

Short-circuit MVA : 500 MVA, Voltage : 22 kV, X/R Ratio : 10, Protection : None

Transformer 1 :

Rated : 1000 kVA, Pri.Voltage : 22 kV, Sec.Voltage : 400 V,

Connection : Delta-Wye Ground, Rated Impedance : 6 %, Loss : 13.5 kW,

R0/R1 : 1, X0/X1 : 0.95, Inrush Point : 11544 A, 0.1 s,

Protection [In] : Fuse:T1A, Protection [Out] : ECB:T1B

Line 1 :

Rated Current : 592 A,

R/Length : 0.062 mOhm/m, X/Length : 0.089 mOhm/m,

Length : 60 m, R0/R1 : 4, X0/X1 : 3.5,

Protection [In] : ECB:L1A, Protection [Out] : None

Line 2 :

Rated Current : 509 A,

R/Length : 0.077 mOhm/m, X/Length : 0.090 mOhm/m,

Length : 30 m, R0/R1 : 4, X0/X1 : 3.5,

Protection [In] : ECB:L2A, Protection [Out] : None

Motor 1 :

Rated Power : 40 kW, Voltage : 400 V, X/R Ratio : 5.5,

Power Factor : 0.85, Efficiency : 0.94, R0/R1 : 15.2, X0/X1 : 5.3,

Locked-Rotor Current : 434 A, Accelerating Time : 8 s, Stall Time : 20 s,

Protection : CB:M1

Motor 2 :

Rated Power : 200 kW, Voltage : 400 V, X/R Ratio : 13.5,

Power Factor : 0.86, Efficiency : 0.97, R0/R1 : 15.2, X0/X1 : 5.3,

Locked-Rotor Current : 2076 A, Accelerating Time : 8 s, Stall Time : 20 s,

Protection : None

Load 1 :

Rated Current : 380 A, Voltage : 400 V, Protection : ECB:D1

ทำการคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม Coordination Program ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบตัวอย่างที่ 1

บัส	กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล I''_{k3} (kA)	กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน I''_{k1} (kA)
1	13.166	19.749
2	25.649	25.668
3	15.454	11.249
4	19.747	15.754

ทำการพิจารณาหาค่าปรับตั้งและจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันได้ดังต่อไปนี้

การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันเฟส (Phase Coordination)

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ CB M1

- มอเตอร์ M1 มีกระแสพิกัด 72.3 A
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 2.5 x 72.3 = 180.75 A
- มอเตอร์ Service Factor = 1 การป้องกันความร้อนเกิน ปรับตั้งไม่เกิน 1.15 x 72.3 = 83.15 A
- ค่า Inst PickUp ปรับตั้งไม่เกิน 13 x 72.3 = 939.9 A
- เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 80 A Thermal Setting = 1 I_n (80 A)
- เลือก Magnetic Setting = 10 I_n (800 A) ปรับตั้งเหนือกราฟการสตาร์ตมอเตอร์ M1

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ CB M1 แสดงได้ดังรูปที่ 6.20

2. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB D1

- โหลด D1 มีกระแส 380 A
- เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 400 A
- เลือก LT PickUp = 1.0 I_n (400 A) , LT Delay = Curve A
- เลือก ST PickUp = OFF , Inst PickUp = 1.5 I_n (600 A)

3. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB L1A

- มอเตอร์ M1 มีกระแสพิกัด 72.3 A โหลด D1 มีกระแส 380 A
- เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งที่ ค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ตัวใหญ่ที่สุด + 1.25 เท่าของพิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง 80 + 1.25 x 380 = 555 A
- เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 630 A ปรับตั้งให้สัมพันธ์กับกราฟ CB M1, ECB D1
- เลือก LT PickUp = 0.8 I_n (504 A) , LT Delay = Curve A
- เลือก ST PickUp = 2 I_{lt} (1008 A) , ST Delay = Curve A , STI2t = OFF
- Inst PickUp ต้องปรับตั้งที่ค่าเกิน กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 3 (15454 A) แต่เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งได้สูงสุด 12 I_n (7560 A) ดังนั้นจึงตั้ง Inst PickUp = OFF

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ CB M1, ECB D1 และ ECB L1A แสดงได้ดังรูปที่ 6.21

4. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB L2A

- มอเตอร์ M2 มีกระแสพิกัด 346 A
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 2.5 x 346 = 865 A
- มอเตอร์ Service Factor = 1.15 การป้องกันความร้อนเกิน ปรับตั้งไม่เกิน 1.25 x 346 = 432.5 A
- เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 630 A ปรับตั้งให้สัมพันธ์กับกราฟการสตาร์ตของมอเตอร์ M2
- เลือก LT PickUp = 0.6 I_n (378 A) , LT Delay = Curve C
- เลือก ST PickUp = 6 I_R (2268 A) , ST Delay = Curve C , STI2t = OFF
- เลือก Inst PickUp = 6 I_n (3780 A) ปรับตั้งเหนือกราฟการสตาร์ตของมอเตอร์ M2

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A แสดงได้ดังรูปที่ 6.22

5. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB T1B

- หม้อแปลง T1 มีกระแสพิกัดด้านทุติยภูมิ 1443 A
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 1.25 x 1443 = 1803.75 A
- เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 2000 A ปรับตั้งเหนือกราฟ ECB L1A, ECB L2A
- เลือก LT PickUp = 0.8 I_n (1600 A) , LT Delay = Curve A
- เลือก ST PickUp = 2 I_R (3200 A) , ST Delay = Curve B , STI2t = ON
- เลือก Inst PickUp = OFF ปรับตั้งเหนือจุด Inrush Point ของ T1

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A, ECB L1A และ ECB T1B แสดงได้ดังรูปที่ 6.23

6. ฟิวส์ T1A

- หม้อแปลง T1 มีกระแสพิกัดด้านปฐมภูมิ 26 A
- ตามมาตราฐาน NEC ใช้ฟิวส์ขนาดพิกัดไม่เกิน 3 x 26 = 78 A
- เลือกฟิวส์ที่กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสอยู่เหนือกราฟ ECB T1B และต่ำกว่า ANSI Curve หม้อแปลง T1
- เลือกฟิวส์ขนาด 40 A โดยฟิวส์ T1A จะมีการจัดความสัมพันธ์กับ ECB T1B ถึงค่ากระแส 20905.5 A (คิดที่ระดับแรงดัน 400 V) และจะป้องกันหม้อแปลงสำหรับการลัดวงจรที่มีค่าตั้งแต่ 7550 A ขึ้นไป ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่นในการป้องกันโหลดเกินด้วย

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB T1B และฟิวส์ T1A แสดงดังรูปที่ 6.24 และกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A, ECB T1B และฟิวส์ T1A แสดงดังรูปที่ 6.25

การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันกราวด์ (Ground Coordination)

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB D1

- เนื่องจาก ECB D1 เป็นอุปกรณ์ป้องกันตัวล่างสุดของระบบ จึงสามารถปรับตั้ง Ground PickUp ที่ค่าต่ำสุดได้
- ดังนั้นปรับตั้ง Ground PickUp = 0.2 I_n (80 A) , Ground Delay = Curve A (0.1s)

2. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB L1A

- ปรับตั้งเหนือกราฟ ECB D1
- ดังนั้นปรับตั้ง Ground PickUp = 0.2 I_n (126 A) , Ground Delay = Curve B (0.2s)

3. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB L2A

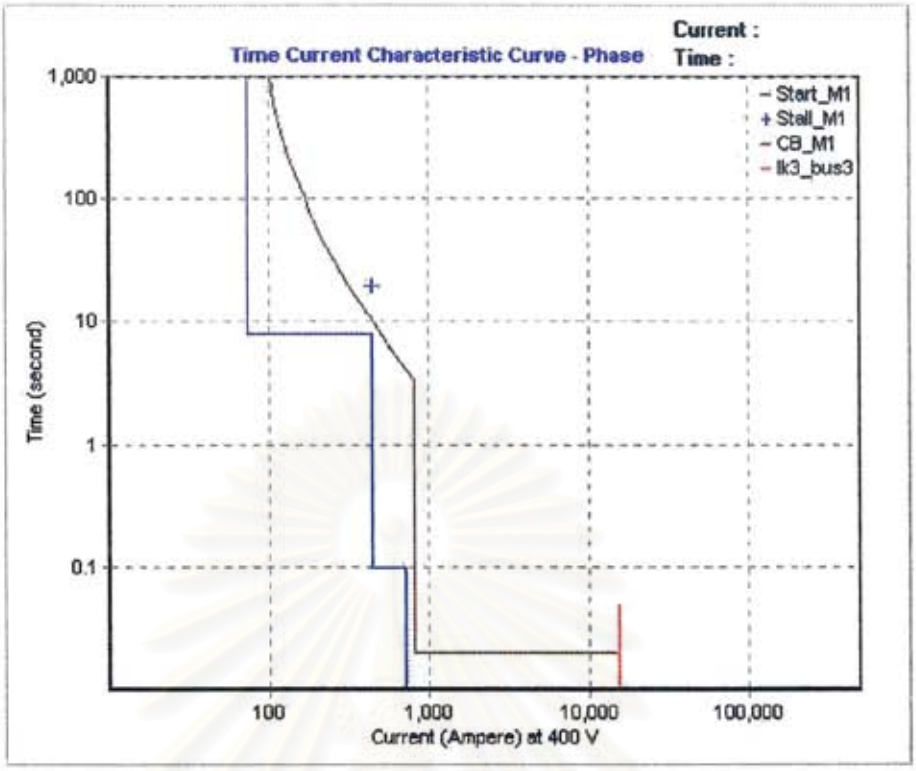
- เนื่องจาก ECB L2A เป็นอุปกรณ์ป้องกันตัวล่างสุดของระบบ จึงสามารถปรับตั้ง Ground PickUp ที่ค่าต่ำสุดได้
- ดังนั้นปรับตั้ง Ground PickUp = 0.2 I_n (126 A) , Ground Delay = Curve A (0.1s)

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ ECB L2A แสดงได้ดังรูปที่ 6.26

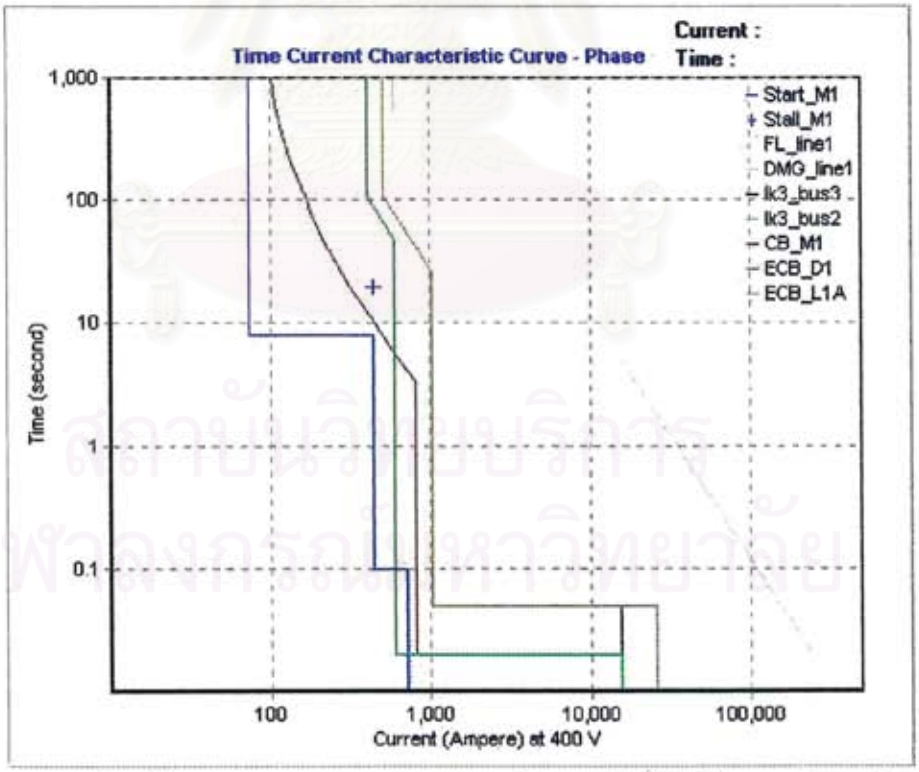
4. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ECB T1B

- ปรับตั้งเหนือกราฟ ECB L1A และ ECB L2A
- ดังนั้นปรับตั้ง Ground PickUp = 0.2 I_n (400 A) , Ground Delay = Curve C (0.3s)

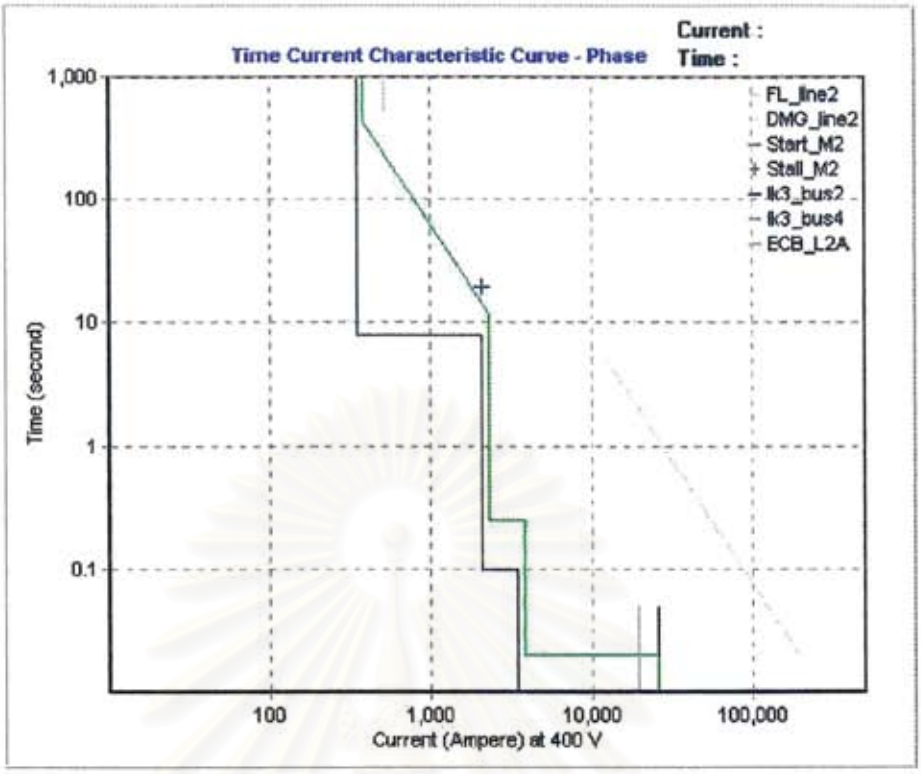
กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ ECB D1, ECB L1A และ ECB T1B แสดงได้ดังรูปที่ 6.27



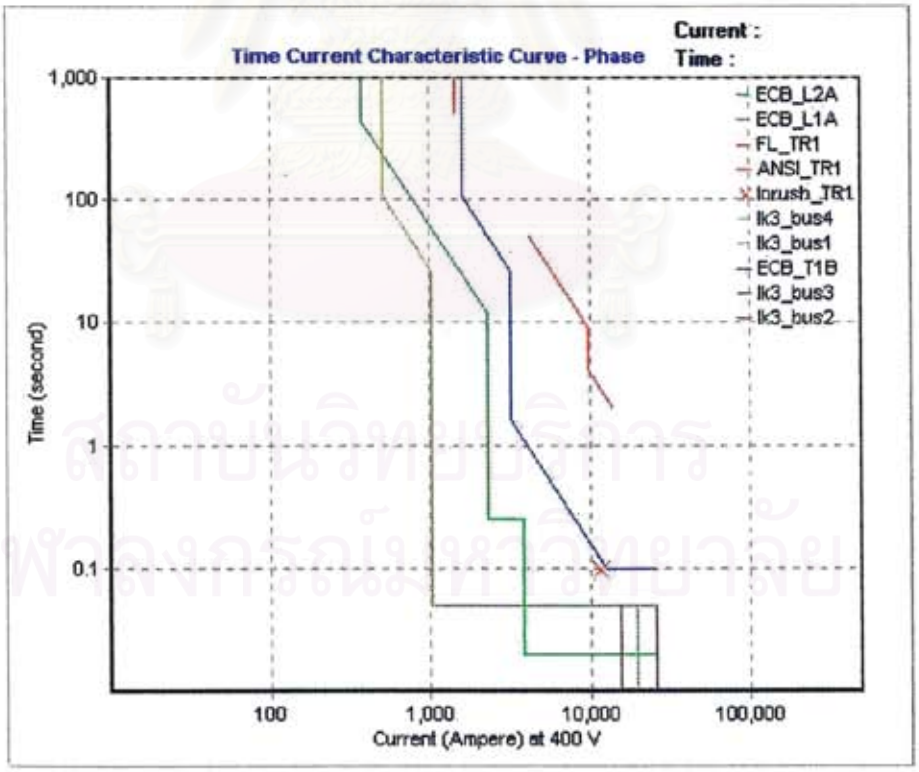
รูปที่ 6.20 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ CB M1



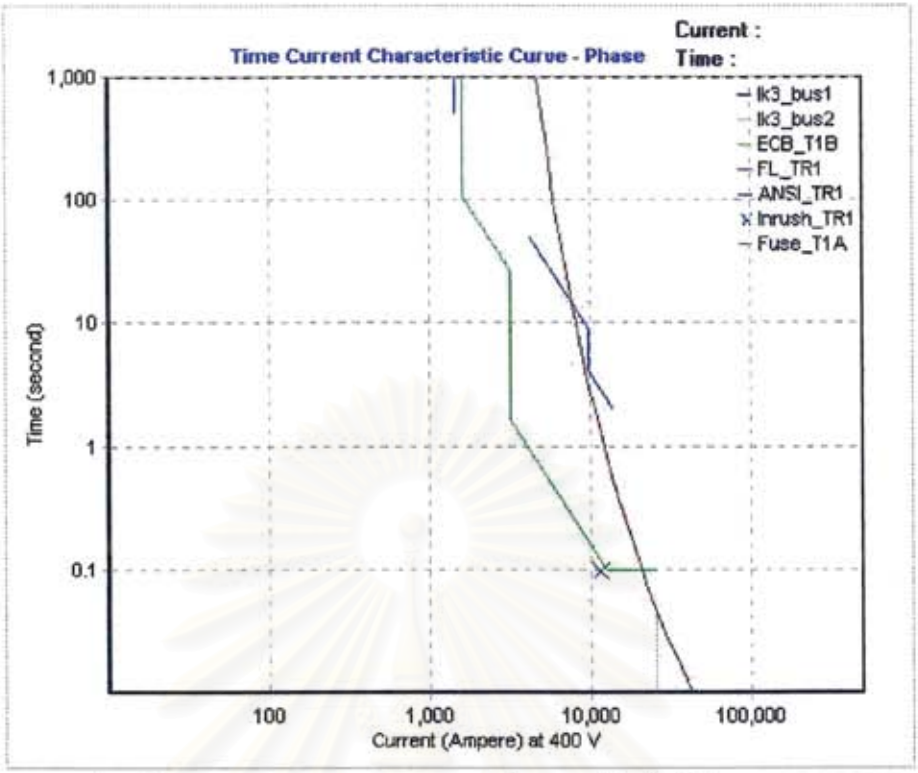
รูปที่ 6.21 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ CB M1, ECB D1 และ ECB L1A



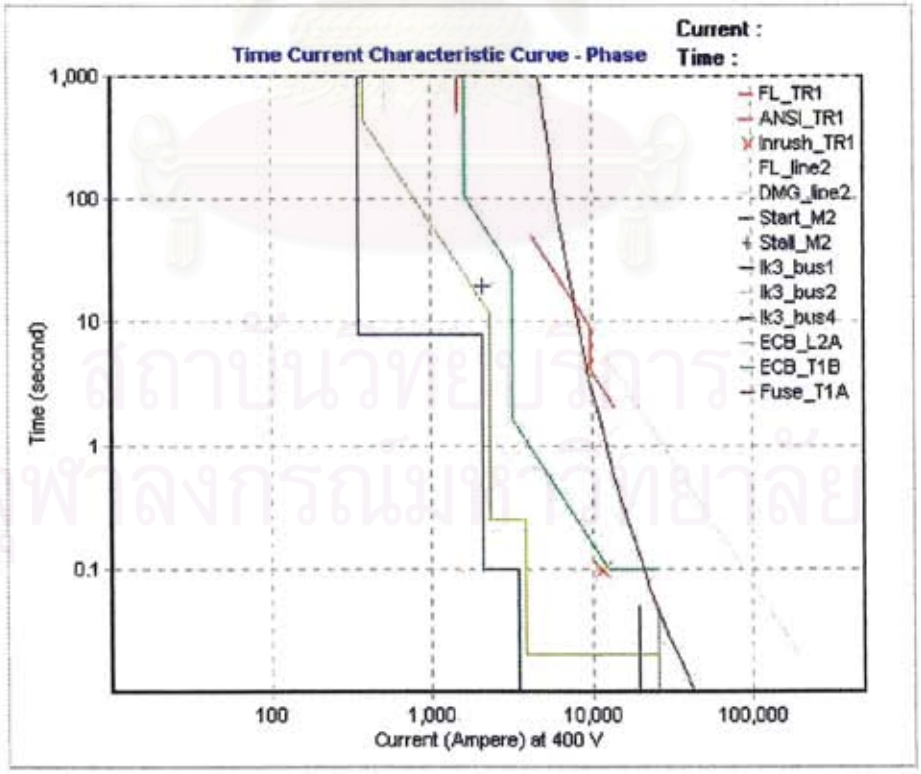
รูปที่ 6.22 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A



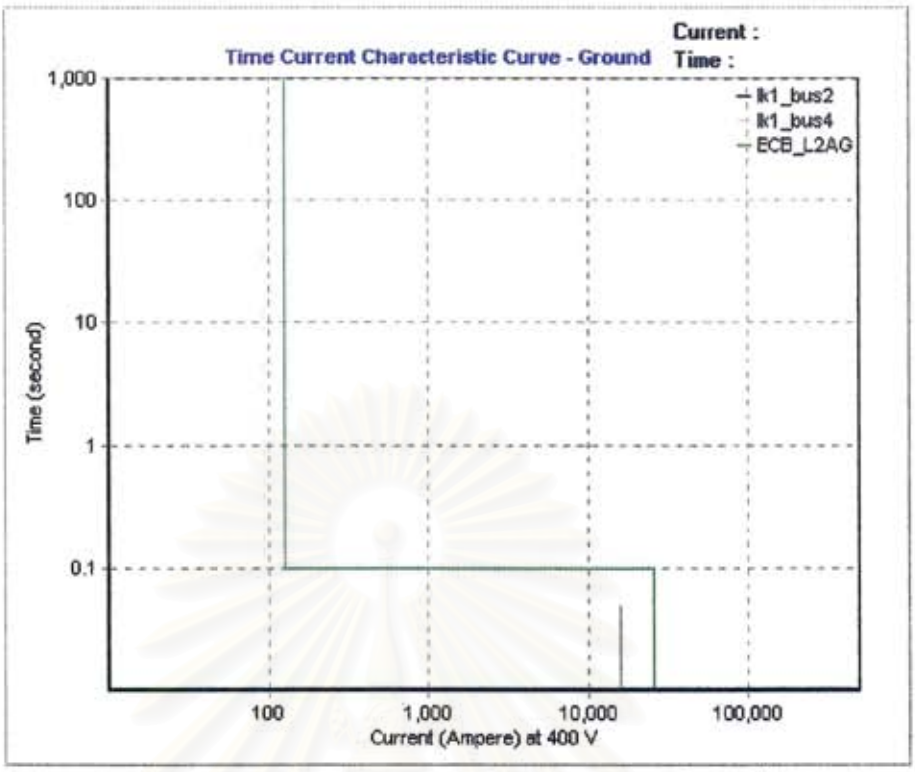
รูปที่ 6.23 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A, ECB L1A และ ECB T1B



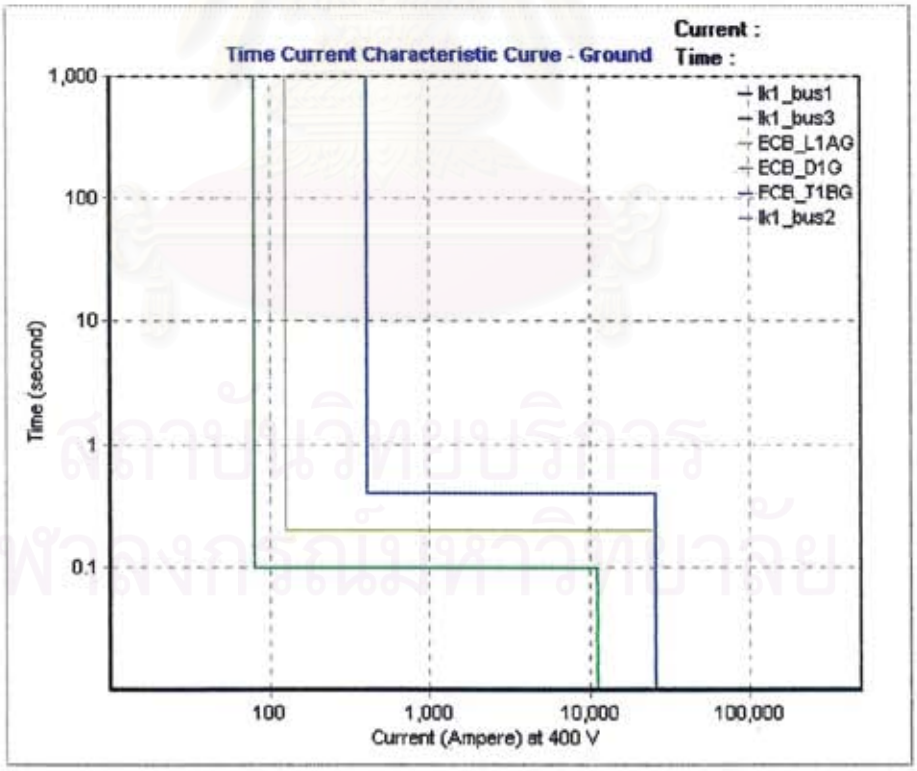
รูปที่ 6.24 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB T1B และ ฟิวส์ T1A



รูปที่ 6.25 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ECB L2A, ECB T1B และ ฟิวส์ T1A



รูปที่ 6.26 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ ECB L2A

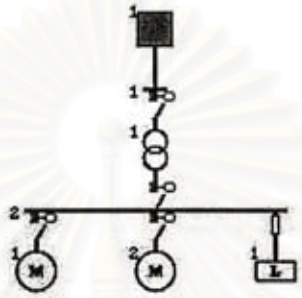


รูปที่ 6.27 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของ ECB D1, ECB L1A และ ECB T1B

6.3.2 การใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันตัวอย่างที่ 2

จากระบบตัวอย่างที่ 2 ในบทที่ 5 สามารถใช้โปรแกรม 'Coordination Program' ในการช่วยวิเคราะห์ได้ดังนี้

ทำการป้อนข้อมูลและเขียนแผนผังเส้นเดี่ยวโดยใช้โปรแกรม ได้แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบตัวอย่างที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.28 แผนผังเส้นเดี่ยวของระบบตัวอย่างที่ 2

Network Feeder :

Short-circuit MVA : 500 MVA, Voltage : 22 kV, X/R Ratio : 10, Protection : None

Transformer 1 :

Rated : 5000 kVA, Pri.Voltage : 22 kV, Sec.Voltage : 6600 V,

Connection : Delta-Wye Ground, Rated Impedance : 8 %, Loss : 35 kW

R0/R1 : 1, X0/X1 : 0.95, Inrush Point : 3500 A, 0.1 s,

Protection [In] : Relay:T1A, Protection [Out] : Relay:T1B

Motor 1 :

Rated Power : 1200 kW, Voltage : 6600 V, X/R Ratio : 26,

Power Factor : 0.9, Efficiency : 0.9, R0/R1 : 15.2, X0/X1 : 5.3,

Locked-Rotor Current : 777.6 A, Accelerating Time : 5 s, Stall Time : 12 s,

Protection : Relay:M1

Motor 2 :

Rated Power : 1000 kW, Voltage : 6600 V, X/R Ratio : 15.5,

Power Factor : 0.9, Efficiency : 0.9, R0/R1 : 15.2 X0/X1 : 5.3,

Locked-Rotor Current : 648 A, Accelerating Time : 7 s, Stall Time : 15 s,

Protection : Relay:M2

Load 1 :

Rated Current : 50 A, Voltage : 6600 V, Protection : Fuse:D1

ทำการคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้โปรแกรม Coordination Program ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบตัวอย่างที่ 2

บัส	กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (I''_{sc}) (kA)	กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับดิน (I''_{sc}) (kA)
1	13.494	20.242
2	6.854	6.775

ทำการพิจารณาหาค่าปรับตั้งและจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันได้ดังต่อไปนี้

การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันเฟส (Phase Coordination)

1. **ฟิวส์** D1

- โหลด D1 มีกระแส 50 A
- เลือกฟิวส์ขนาด 63 A

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ ฟิวส์ D1 แสดงได้ดังรูปที่ 6.29

2. **รีเลย์** M2

- มอเตอร์ M2 มีกระแสพิกัด 108 A
- เลือกหม้อแปลงกระแส (CT) พิกัด 150/5
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 2.5 x 108 = 270 A
- รีเลย์ Time Overcurrent (51) เลือกแบบ Extremely Inverse ปรับตั้งที่ 6.5 A TMS = 1
- รีเลย์ Instantaneous (50) เลือกปรับตั้งที่ 40 A ปรับตั้งให้สัมพันธ์กับกราฟการสตาร์ตของมอเตอร์ M2

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M2 แสดงได้ดังรูปที่ 6.30

3. รีเลย์ M1

- มอเตอร์ M1 มีกระแสพิกัด 129.6 A
- เลือกหม้อแปลงกระแส (CT) พิกัด 200/5
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 2.5 x 129.6 = 324 A
- รีเลย์ Time Overcurrent (51) เลือกแบบ Extremely Inverse ปรับตั้งที่ 5 A TMS = 1
- รีเลย์ Instantaneous (50) เลือกปรับตั้งที่ 40 A ปรับตั้งให้สัมพันธ์กับกราฟการสตาร์ตของมอเตอร์ M1

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M1 แสดงได้ดังรูปที่ 6.31

4. รีเลย์ T1B

- หม้อแปลง T1 กระแสพิกัดด้านทุติยภูมิ 437.4 A
- เลือกหม้อแปลงกระแส (CT) พิกัด 600/5
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 2.5 x 437.4 = 1093.5 A
- เลือกรีเลย์แบบ Very Inverse ปรับตั้งที่ 4.5 A
- ปรับตั้งให้สัมพันธ์กับกราฟอุปกรณ์ป้องกันตัวใหญ่ที่สุด คือ Relay M1
- ที่ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 2 (6854 A) รีเลย์ M1 ทำงานที่เวลา 0.02 s
- ดังนั้นที่ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 2 (6854 A) รีเลย์ T1B ต้องทำงานที่เวลา 0.3 + 0.02 = 0.32 s (พิจารณาให้ช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์มีค่า 0.3 s)
- คำนวณค่า TMS จาก

  กระแสลัดวงจรสามเฟสที่บัส 2 / กระแสปรับตั้ง = 6854 / 540 = 12.69

  เวลาทำงานที่ TMS $= 1 \frac{13.5}{(12.69-1)} = 1.15\,\text{s}$, $\text{TMS} = \frac{0.32}{1.15} = 0.28$

  เลือก TMS = 0.3
- เลือกรีเลย์ Time Overcurrent (51) แบบ Very Inverse ปรับตั้งที่ 4.5 A TMS = 0.3

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของ รีเลย์ M1 และรีเลย์ T1B แสดงได้ดังรูปที่ 6.32

5. **รีเลย์ T1A**

- หม้อแปลง T1 มีกระแสพิกัดด้านปฐมภูมิ 131.2 A
- เลือกหม้อแปลงกระแส (CT) พิกัด 200/5
- ตามมาตราฐาน NEC เซอร์กิตเบรกเกอร์ปรับตั้งไม่เกิน 4 x 131.2 = 524.8 A
- เลือกรีเลย์แบบ Very Inverse ปรับตั้งที่ 4.5 A
- ปรับตั้งให้สัมพันธ์กับกราฟ Relay T1B
- เนื่องจากหม้อแปลง T1 มีการต่อแบบ Delta - Wye Ground
- พิจารณากระแสลัดวงจรระหว่างสายกับสายที่บัส 2 (6854 x 0.866 = 5936 A)
- คำนวณเวลาที่รีเลย์ T1B ทำงานจาก

  กระแสลัดวงจรสายกับสาย ที่บัส 2 / กระแสปรับตั้ง = 5936 / 540 = 10.99

  เวลาที่รีเลย์ T1B ทำงาน $\frac{13.5}{(10.99-1)} \times 0.3 = 0.41$ s

- ดังนั้นที่ค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 2 (6854 A) รีเลย์ T1A ต้องทำงานที่เวลา 0.41 + 0.3 = 0.71 s (พิจารณาให้ช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์มีค่า 0.3 s)
- คำนวณค่า TMS จาก

  กระแสลัดวงจรสามเฟสที่บัส 2 / กระแสปรับตั้ง = 6854 / 600 = 11.42

  เวลาทำงานที่ TMS $=1 \frac{13.5}{(11.42-1)} = 1.3\,\text{s}$ $\text{TMS} = \frac{0.71}{1.3} = 0.55$

  เลือก TMS = 0.6

- เลือกรีเลย์ Time Overcurrent (51) แบบ Very Inverse ปรับตั้งที่ 4.5 A TMS = 0.6
- รีเลย์ Instantaneous (50) เลือกปรับตั้งที่ 60 A ซึ่งเกินค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 2 (6854 A)

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ T1B และรีเลย์ T1A แสดงได้ดังรูปที่ 6.33 และกราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ M1 รีเลย์ T1B และรีเลย์ T1A แสดงได้ดังรูปที่ 6.34

การจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันกราวด์ (Ground Coordination)

1. **รีเลย์ M1 และ M2**

- เนื่องจาก รีเลย์ M1 และ M2 เป็นอุปกรณ์ป้องกันตัวล่างสุด (Downstream) ของระบบ จึงสามารถปรับตั้ง Ground Relay ที่ค่าต่ำสุดได้
- ดังนั้นรีเลย์ M1 และ M2 เลือกรีเลย์ Ground Instantaneous (50N) ปรับตั้งที่ 0.5 A

2. **รีเลย์** T1B

- เลือกรีเลย์แบบ Very Inverse ปรับตั้งที่ 1.5 A
- ปรับตั้งให้มีการจัดความสัมพันธ์กับรีเลย์ M1 และ M2
- ที่ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่บัส 2 (6775 A) รีเลย์ M1 และ M2 ทำงานที่เวลา 0.02 s
- ดังนั้นที่ค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่บัส 2 (6775 A) รีเลย์ T1B ต้องทำงานที่เวลา 0.3 + 0.02 = 0.32 s (พิจารณาให้ช่วงเวลาการจัดความสัมพันธ์มีค่า 0.3 s)
- คำนวณค่า TMS จาก

กระแสลัดวงจรลงดินที่บัส 2 / กระแสปรับตั้ง = 6775 / 180 = 37.64

เวลาทำงานที่ TMS $= 1 \frac{13.5}{(37.64-1)} = 0.37\,\text{s}$, $\text{TMS} = \frac{0.32}{0.37} = 0.86$

เลือก TMS = 0.9

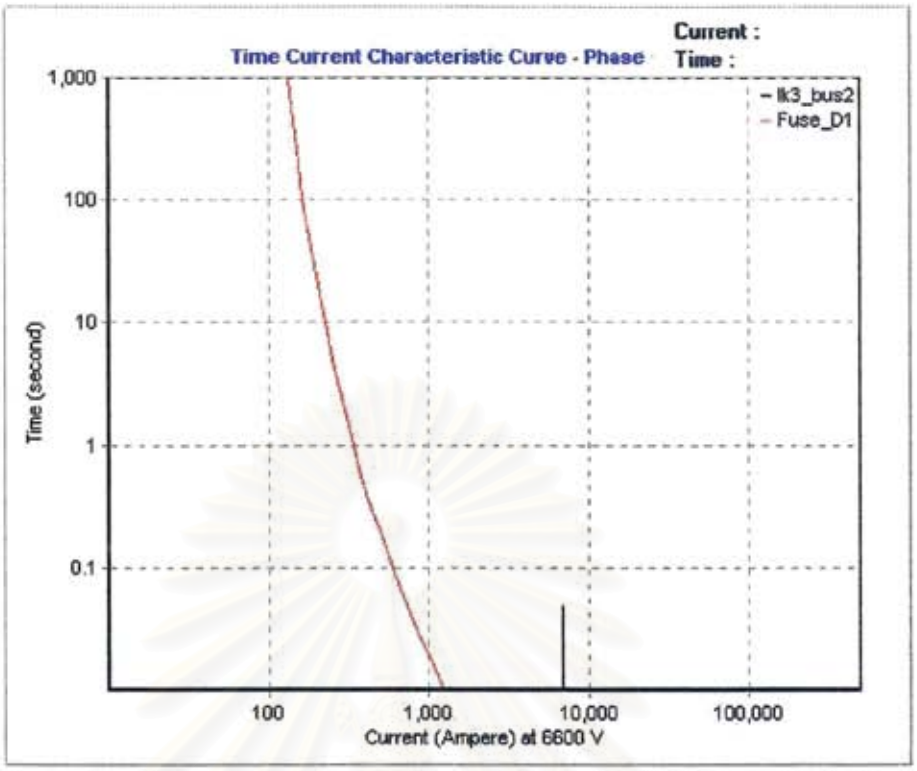
- เลือกรีเลย์ Ground Overcurrent (51N) แบบ Very Inverse ปรับตั้งที่ 1.5 A TMS = 0.9
- เนื่องจากระบบที่พิจารณาเป็นระบบต่อลงดินโดยตรง กระแสลัดวงจรลงดินจึงมีค่าสูง ดังนั้นอาจพิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าต่ำกว่านี้ โดยยอมให้มีการจัดความสัมพันธ์เพียงบางส่วน หรืออาจพิจารณาให้ระบบมีการต่อลงดินผ่านความต้านทาน เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรลงดินให้มีค่าต่ำลง

กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของรีเลย์ M1 รีเลย์ M2 และรีเลย์ T1B แสดงได้ดังรูปที่ 6.35

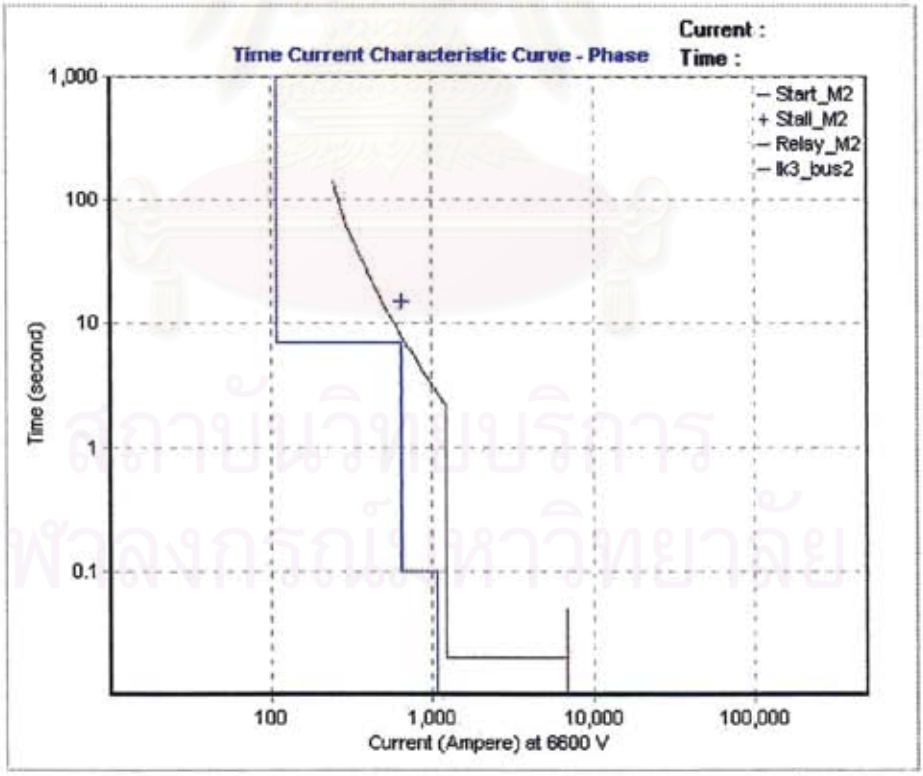
3. **รีเลย์** T1A

- ไม่ต้องมีการพิจารณาจัดความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันตัวล่าง เนื่องจากหม้อแปลงแบบเดลต้า-วายเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินทางด้านทุติยภูมิ อุปกรณ์ป้องกันความผิดพร่องลงดินด้านปฐมภูมิจะไม่เห็นค่ากระแสผิดพร่องดังกล่าว ดังนั้นสามารถปรับตั้งที่ค่าต่ำสุดได้
- เลือกรีเลย์ Ground Instantaneous (50N) ปรับตั้งที่ 0.5 A

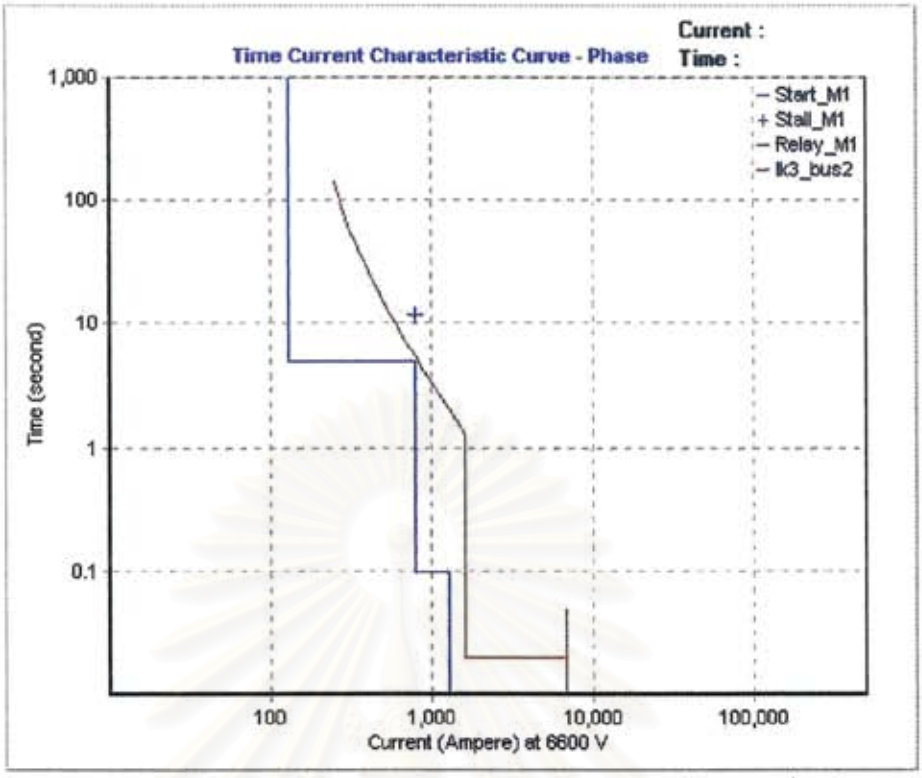
กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของรีเลย์ T1A แสดงได้ดังรูปที่ 6.36



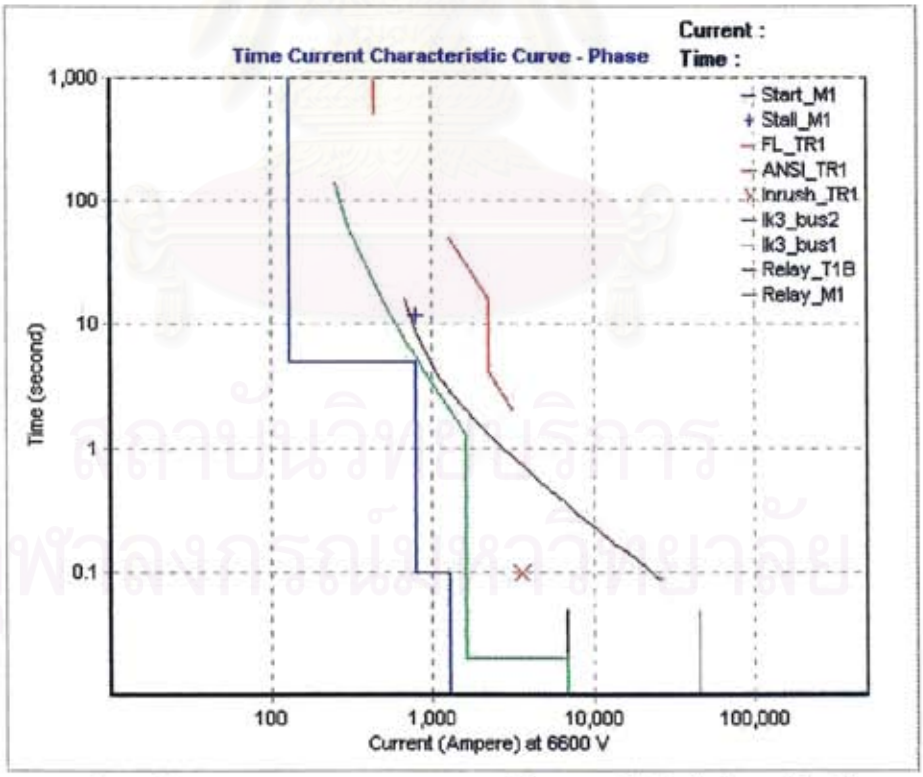
รูปที่ 6.29 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของฟิวส์ D1



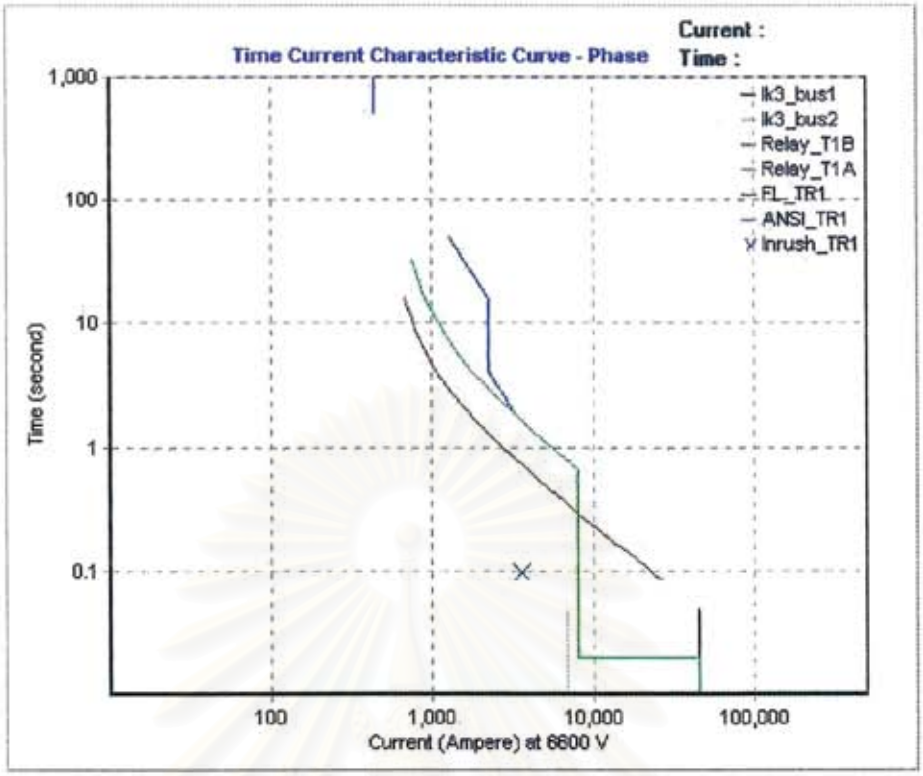
รูปที่ 6.30 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ M2



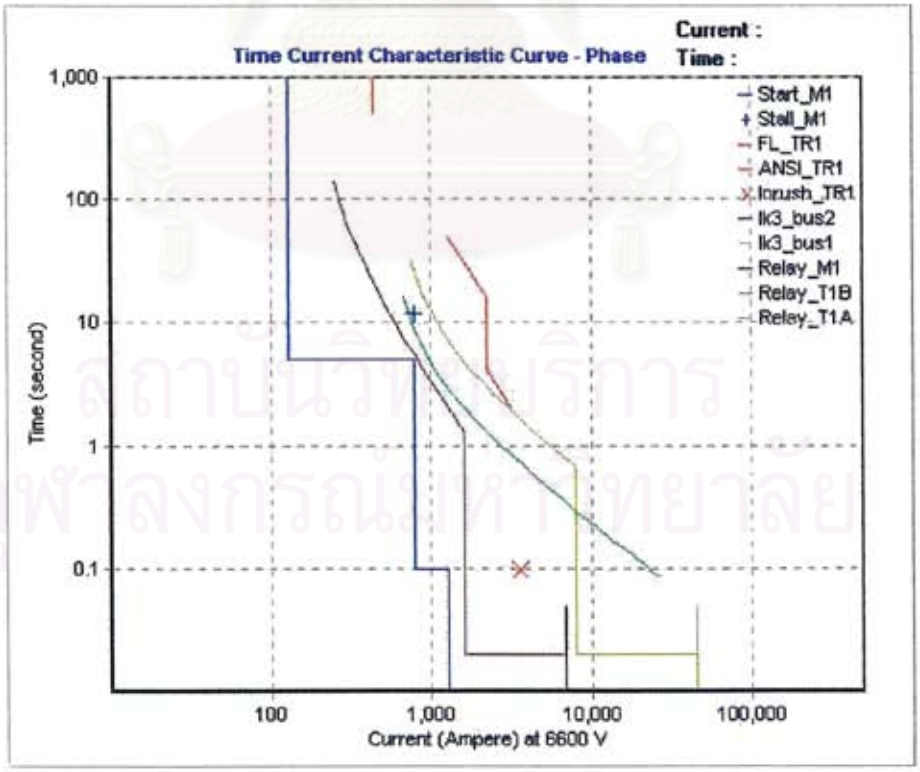
รูปที่ 6.31 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ M1



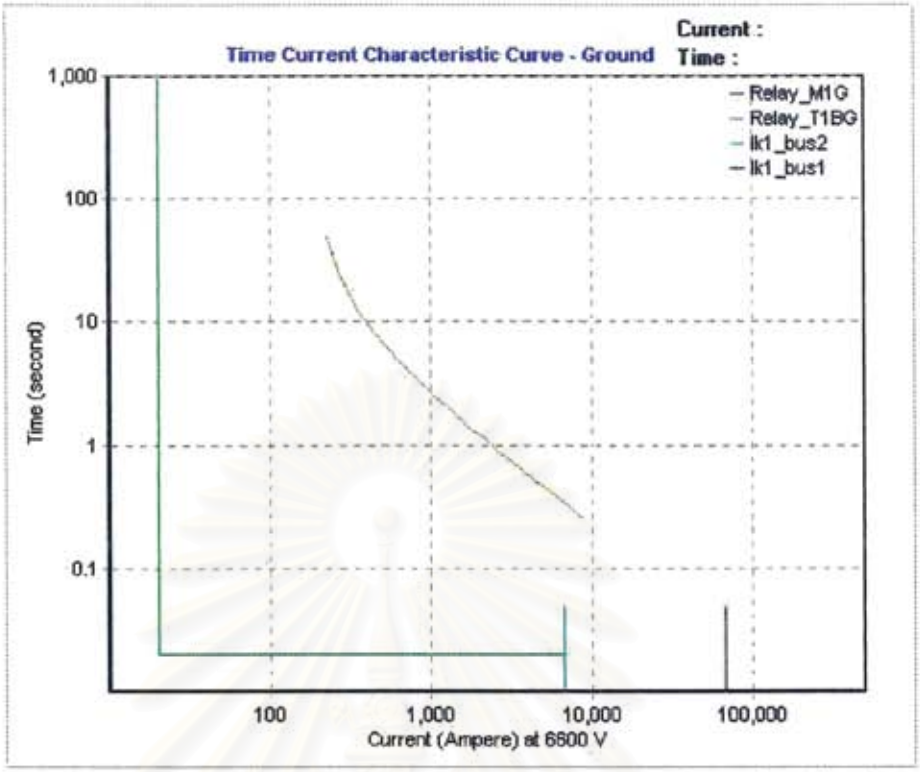
รูปที่ 6.32 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ M1 และรีเลย์ T1B



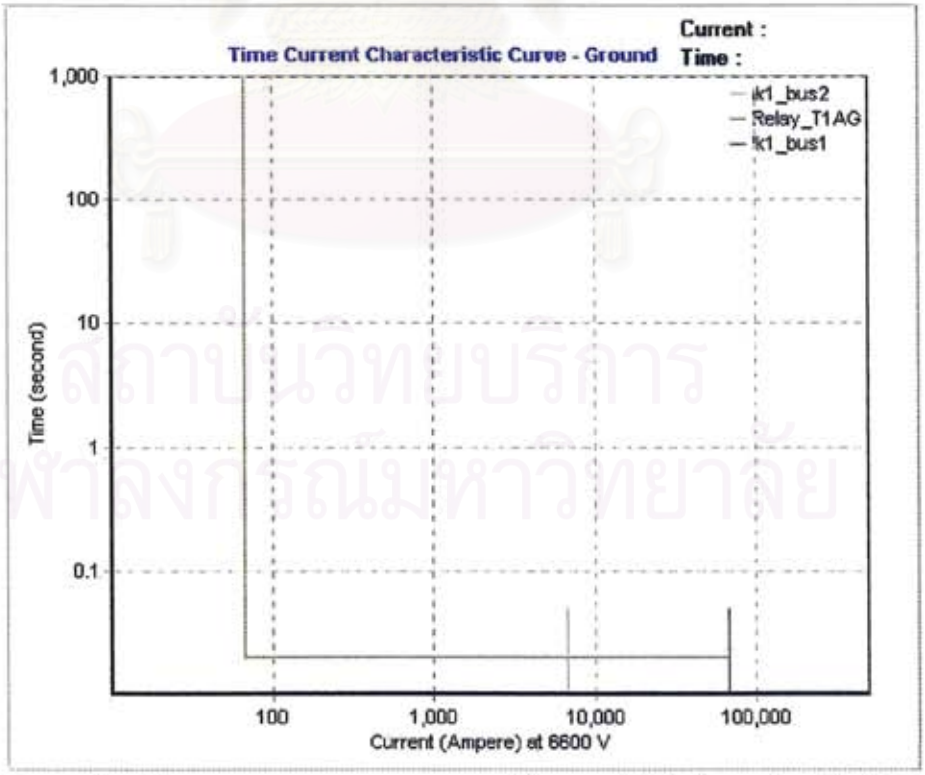
รูปที่ 6.33 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ T1B และรีเลย์ T1A



รูปที่ 6.34 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์เฟสของรีเลย์ M1 รีเลย์ T1B และรีเลย์ T1A



รูปที่ 6.35 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของรีเลย์ M1 และรีเลย์ T1B



รูปที่ 6.36 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแส แสดงการจัดความสัมพันธ์กราวด์ของรีเลย์ T1A

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน โดยมุ่งเน้นสำหรับระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ ซึ่งได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม หรืออาคารธุรกิจขนาดใหญ่ โดยทำการสรุปขั้นตอนและข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เพื่อเป็นแนวทางให้สามารถทำการพิจารณาหาค่าปรับตั้ง และจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างเป็นระบบและเหมาะสม นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงการนำความสามารถของคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยแทนวิธีการเดิมซึ่งทำด้วยมือ (Manual) โดยคอมพิวเตอร์สามารถนำมาช่วยในการจัดความสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันได้ ดังนี้

- ช่วยในการคำนวณกระแสลัดวงจร เพื่อใช้ในการพิจารณาหาขนาดและค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน
- ช่วยในการเก็บบันทึกและรวบรวมข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน
- ช่วยในการเขียนกราฟการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแทนวิธีการเดิมซึ่งทำด้วยมือ

การนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยจะทำให้ใช้เวลาในการพิจารณาจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันน้อยลงกว่าวิธีทำด้วยมือ และทำให้ผลการพิจารณามีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมที่ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกันขึ้นมากมายทั้งจำหน่ายและใช้งานฟรี ซึ่งมีรูปแบบและการทำงานแตกต่างกันไป แต่ในประเทศไทยยังมีการพัฒนาขึ้นใช้ไม่มากนัก ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับจัดความสัมพันธ์ขึ้นใช้งานเองก็จะทำให้เกิดประโยชน์ไม่น้อย เนื่องจากโปรแกรมที่จำหน่ายมักจะมีราคาสูง ส่วนโปรแกรมใช้งานฟรีก็จะมีลักษณะการใช้งานที่ไม่ครอบคลุม เช่น เป็นโปรแกรมใช้งานสำหรับอุปกรณ์ป้องกันของบริษัทหนึ่ง ๆ นอกจากนี้การพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองยังเป็นต้นแบบ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางด้านระบบไฟฟ้าด้วย

สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า 'Coordination Program' ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดว์ 95 ทำการพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม Delphi 3 โดยลักษณะของโปรแกรมจะออกแบบให้สามารถใช้งานได้อย่างสะดวก เช่น สามารถใช้การคลิ๊กรูปอุปกรณ์

เพื่อลากและวางในการสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว สามารถแสดงการปรับเลื่อนกราฟเมื่อมีการเปลี่ยนค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน และสามารถพิมพ์ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ได้

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถนำมาใช้ในการช่วยออกแบบระบบป้องกัน และหาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันของระบบไฟฟ้าในอาคารหรือโรงงานได้ ทั้งในการออกแบบสำหรับระบบใหม่ หรือในการหาค่าปรับตั้งใหม่สำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามการนำโปรแกรมไปใช้งานจริงยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ดังนั้นถ้าต้องการนำไปใช้งานจริงอาจต้องมีการปรับปรุงพัฒนาเพิ่มเติม

โดยข้อเสนอแนะที่ต้องการเสนอเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาโปรแกรมให้ดีขึ้นได้แก่

1. ในหน้าจอส่วนสร้างแผนผังเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) แผนภาพควรปรับปรุงให้แสดงชื่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ชัดเจน แต่เนื่องจากพื้นที่หน้าจอที่จำกัดทำให้ไม่สามารถแสดงชื่ออุปกรณ์และอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างครบถ้วน ในโปรแกรมนี้จึงออกแบบให้แสดงข้อมูลทั้งหมดในส่วนแสดงรายละเอียดอุปกรณ์ (Data Page) แทน

2. โปรแกรมนี้ออกแบบให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่รับไฟจากสายป้อน (Network Feeder) เพียง 1 สายป้อนเท่านั้น ในการวิเคราะห์ระบบที่รับไฟจากสายป้อนมากกว่า 1 สายป้อน จึงต้องทำการแยกวิเคราะห์ทีละสายป้อน ดังนั้นจึงควรปรับปรุงให้สามารถวิเคราะห์ระบบที่รับไฟจากกรณีมากกว่า 1 สายป้อนได้

3. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในโปรแกรมนี้ ไม่สามารถพิจารณากรณีของหม้อแปลงที่มีการต่อความต้านทานลงดินเพื่อจำกัดกระแสผิดพร่องได้ จึงควรปรับปรุงให้สามารถคำนวณกระแสลัดวงจรลงดินในกรณีนี้ได้ด้วย

4. เส้นกราฟการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ ฟิวส์ และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ควรจะมีลักษณะเป็นแถบกราฟเพื่อแสดงความคลาดเคลื่อนด้วย เพื่อให้สามารถจัดความสัมพันธ์ได้ถูกต้องเหมาะสมยิ่งขึ้น ดังนั้นในการบันทึกข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันจึงควรจะมีการเก็บข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ป้องกันด้วย นอกจากนี้ในการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันบางตัวอาจไม่สามารถบันทึกข้อมูลกราฟการทำงานได้อย่างถูกต้องทั้งหมด เนื่องจากการกำหนดคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์แต่ละบริษัทผู้ผลิตอาจมีความแตกต่างกัน

5. การป้องกันอุปกรณ์แต่ละตัว ในโปรแกรมนี้ออกแบบให้สามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้เพียง 1 ชนิดเท่านั้น ยกเว้นมอเตอร์และสายไฟฟ้า สามารถเลือกให้มีรีเลย์ป้องกันโหลดเกินเพิ่มเติมขึ้นมาได้ ดังนั้นอาจปรับปรุงให้มีอิสระในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้มากกว่านี้

รายการอ้างอิง

1. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. Coordination. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. Chase, P.,Mallon, J., Savoie, P., and Sweitzer, M. Low voltage protector application seminar. CT: GE Electrical Distribution & Control.
3. Brown, K. A., and Parker, J. M. A Personal Computer Approach to Overcurrent Protective Device Coordination. IEEE Transaction on Power Delivery volume 32 (April 1988) : 509-513.
4. Tolbert, L. M. Computer-Aided Coordination and Overcurrent Protection for Distribution Systems. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Record 1995 (1995) : 169-173.
5. Watson, M. F., and Smith, D. L. Graphical Coordination of Overcurrent Protection Devices Using A Desktop Computer. Southeastcon'96. Bringing Together Education, Science and Technology (1996) : 66-71.
6. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Std 141-1976. 1976.
7. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การคำนวณกระแสลัดวงจร. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
8. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. Industrial and Commercial Power System Protection. ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
9. International Electrotechnical Commission. Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems, IEC 909. 1988.
10. American National Standards Institute. IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrail and Commercial Power Systems, ANSI/IEEE Std 242-1986. New York, 1986.
11. Seip, G. G. Electrical Installations Handbook (Part 1 Power-Supply and Distribution Systems). Germany: Siemens-Aktiengesellschaft, John Wiley & Sons, 1987.

12. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

13. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. รีเลย์ป้องกัน. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

14. Stanley, H. H., and Arun, G. P. Power System Relaying. England: Research Studies Press, 1992.

15. Esher, J., Rook, M., and Savoie, P. Protective relay application seminar. Pennsylvania: General Electric, 1992.

16. National Fire Protection Association. National Electrical Code. MA, 1987.

17. Padden, L. K., and Pillai, P. A Flow Chart Methodology for Performing Low-Voltage Three-Phase Motor Coordination Studies. Petroleum and Chemical Industry Conference, Record of Conference Papers (1997) : 11-23.

18. The Institute of Electrical Engineers. Regulations for Electrical Installations. UK,1987.

19. Das, J. C. Protective Device Coordination -Ideal and Practical. Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record volume 2 (1989) : 1861-1874.

20. St. John, M., and Borgnino, A. Coordinating Overcurrent Protection Devices. IEEE Computer Application in Power volume 93 (July 1996) : 41-44.

21. เด่นเทพ เทพประเทืองทิพย์. โปรแกรมกราฟิกในการวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงานพร้อมทั้งการคำนวณหาค่าความผิดพร่องในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

22. SIBA Sicherungen-Bau GmbH. HV-Fuse links.

23. ABB Sace. Low-voltage moulded-case circuit -breakers Sace Isomax S. Italy, 1997.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลในการคำนวณอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน พิกัดแรงดันปฐมภูมิ 12, 22 หรือ 24 kV แรงดันทุติยภูมิ 400/230 V [7,11]

S_{rT} (kVA)	U_{xT} (%)	U_{RT} (%)	P_{kT} (kW)
50	4	2.1	1.05
75	4	1.89	1.42
100	4	1.75	1.75
125	4	1.64	2.05
160	4	1.47	2.35
200	4	1.42	2.84
250	4	1.3	3.25
315	4	1.24	3.9
400	4	1.15	4.6
500	4	1.1	5.5
630	4	1.03	6.5
800	6	1.38	11.0
1000	6	1.35	13.5
1250	6	1.31	16.4
1600	6	1.24	19.8
2000	6	1.2	24.0
2500	6	1.07	26.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

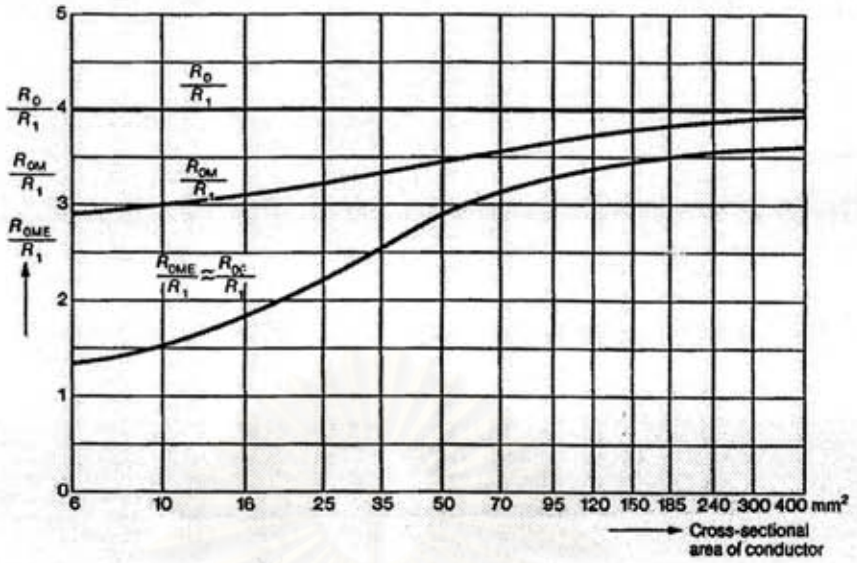
ภาคผนวก ข

ข้อมูลในการคำนวณอิมพิแดนซ์ของสายไฟฟ้า

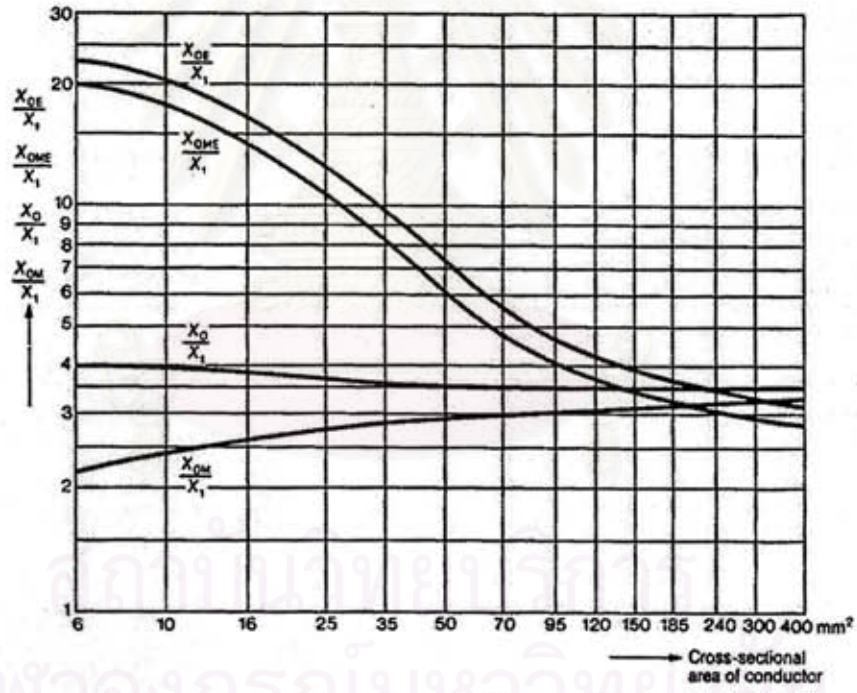
ตารางที่ ข.1 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ต่อความยาวของสายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC [7]

ขนาดสาย (mm^2)	ค่าความต้านทาน ($m\Omega$ /m)	ค่ารีแอกแตนซ์ ($m\Omega$ /m)
2.5	7.400	0.155
4	4.625	0.141
6	3.083	0.131
10	1.850	0.121
16	1.156	0.113
25	0.740	0.107
35	0.529	0.103
50	0.370	0.100
70	0.264	0.097
95	0.195	0.096
120	0.154	0.094
150	0.123	0.092
185	0.100	0.091
240	0.077	0.090
300	0.062	0.089
400	0.051	0.088
500	0.041	0.087

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 อัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์ต่อความต้านทานลำดับบวกสำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดง 4 แกน 1 kV ที่ความถี่ 50 Hz [11]



รูปที่ ข.2 อัตราส่วนรีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ต่อความต้านทานลำดับบวกสำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดง 4 แกน 1 kV ที่ความถี่ 50 Hz [11]

R_0, X_0 กรณีทางเดินกลับ (Return Path) เป็น ตัวนำเส้นที่ 4 (Ω)

R_{0M}, X_{0M} กรณีทางเดินกลับเป็น ตัวนำเส้นที่ 4 และปลอกเคเบิล (Cable Sheath) (Ω)

R_{0E}, X_{0E} กรณีทางเดินกลับเป็น ตัวนำเส้นที่ 4 และดิน (Earth) (Ω)

R_{0E}, X_{0ME} กรณีทางเดินกลับเป็นตัวนำเส้นที่ 4 ปลอกเคเบิลและดิน (Ω)

R_1, X_1 รีแอกแตนซ์ลำดับบวก (Ω)

ρ สภาพต้านทานของดิน (Earth Resistivity) = 100 Ωm

ภาคผนวก ค

ข้อมูลในการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า

ตารางที่ ค.1 ค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟฟ้า [18]

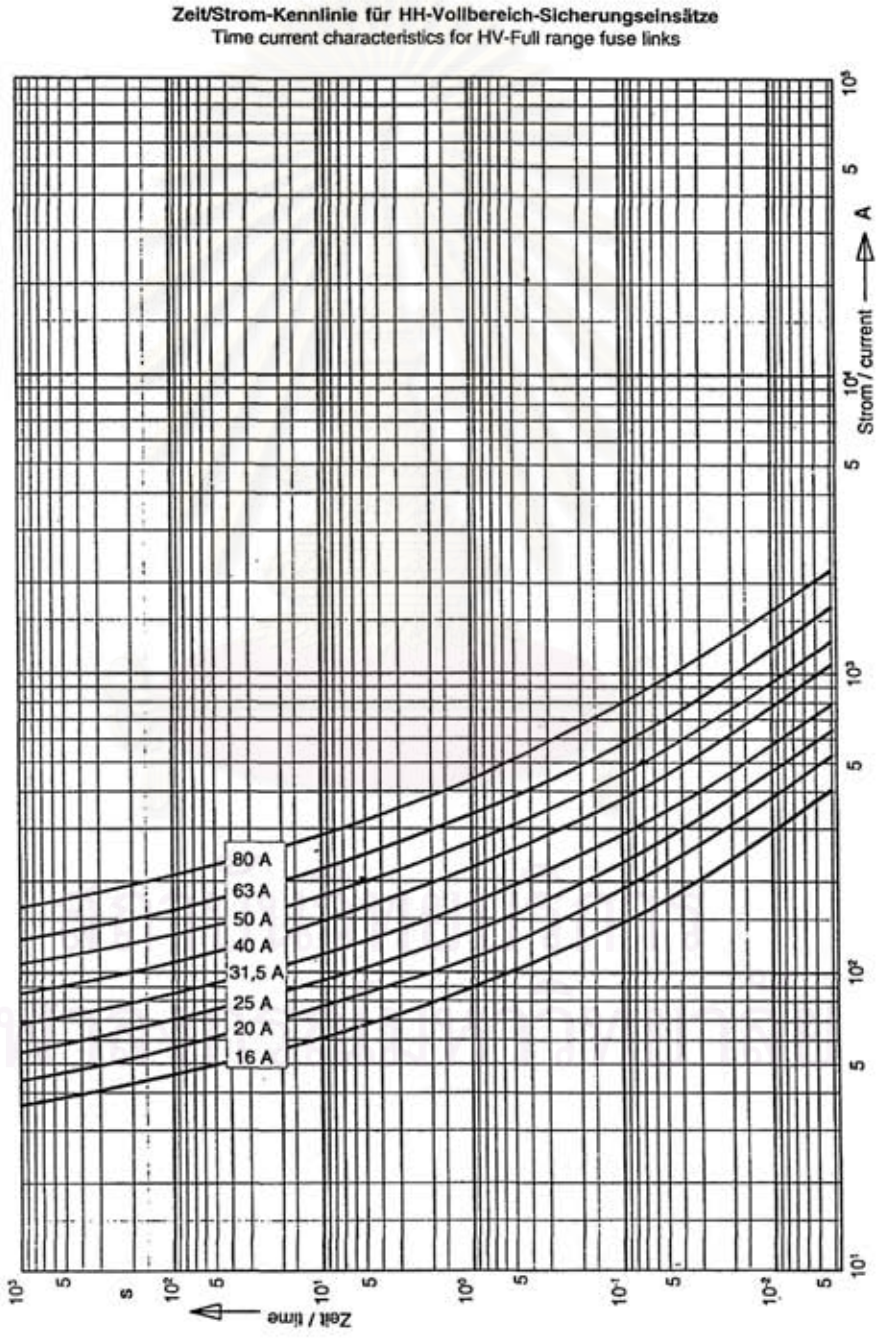
ชนิดของตัวนำ	ชนิดของฉนวน	อุณหภูมิเริ่มต้น (Assumed initial temperature) °C	อุณหภูมิสุดท้าย (Limiting final temperature) °C	k
ทองแดง	pvc	70	160/140	115/103
	60 °C rubber	60	200	141
	85 °C rubber	85	220	134
	90 °C rubber	90	250	143
	Impregnated paper	80	160	108
	mineral - conductor	70	160	115
	- sleeves and seals	105	250	135
อลูมิเนียม	pvc	70	160/140	76/68
	60 °C rubber	60	200	93
	85 °C rubber	85	220	89
	90 °C rubber	90	250	94
	Impregnated paper	80	160	71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

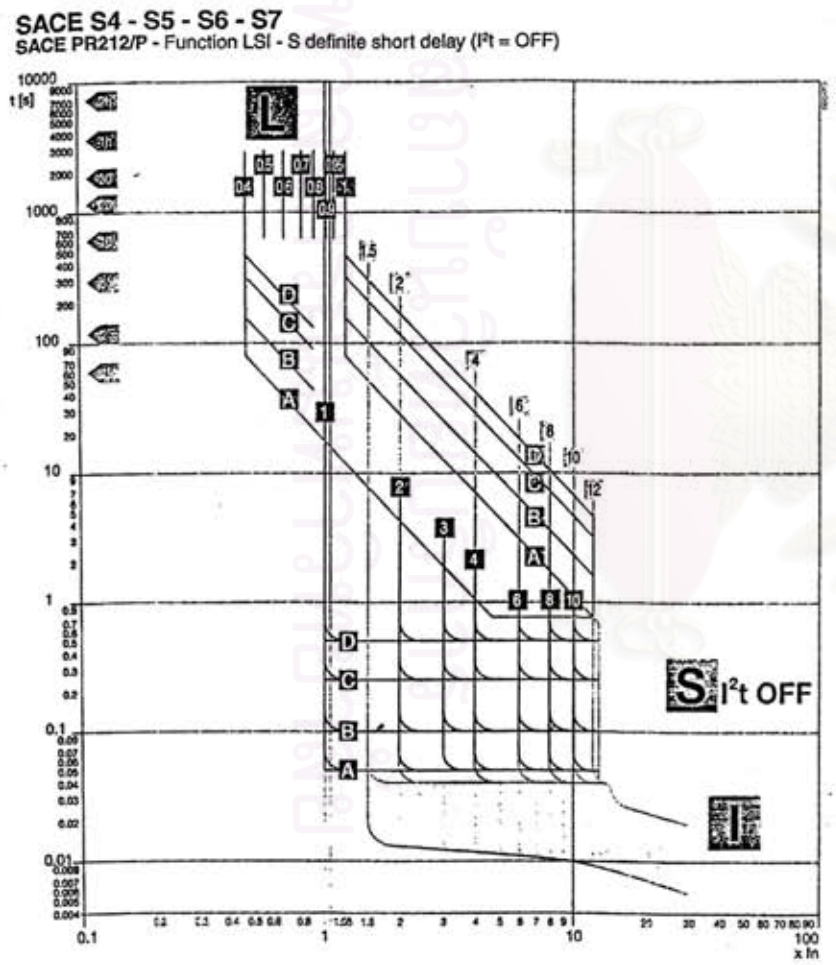
กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของอุปกรณ์ป้องกัน

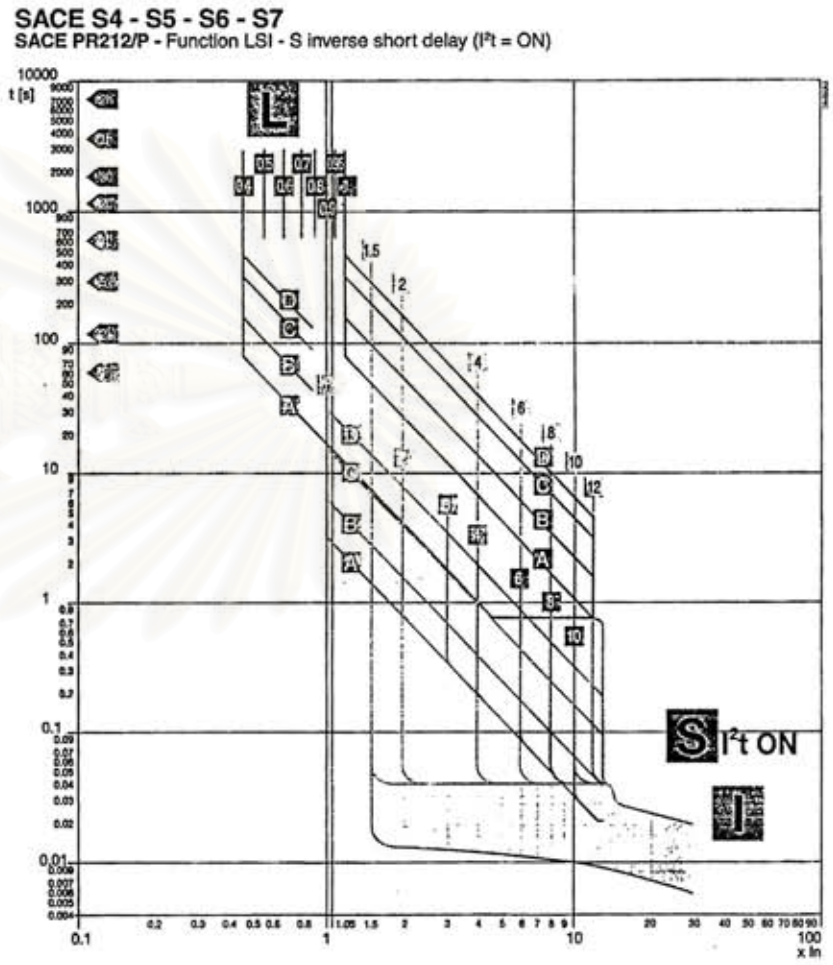
กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้พิจารณาสำหรับตัวอย่างในบทที่ 6 มีดังนี้



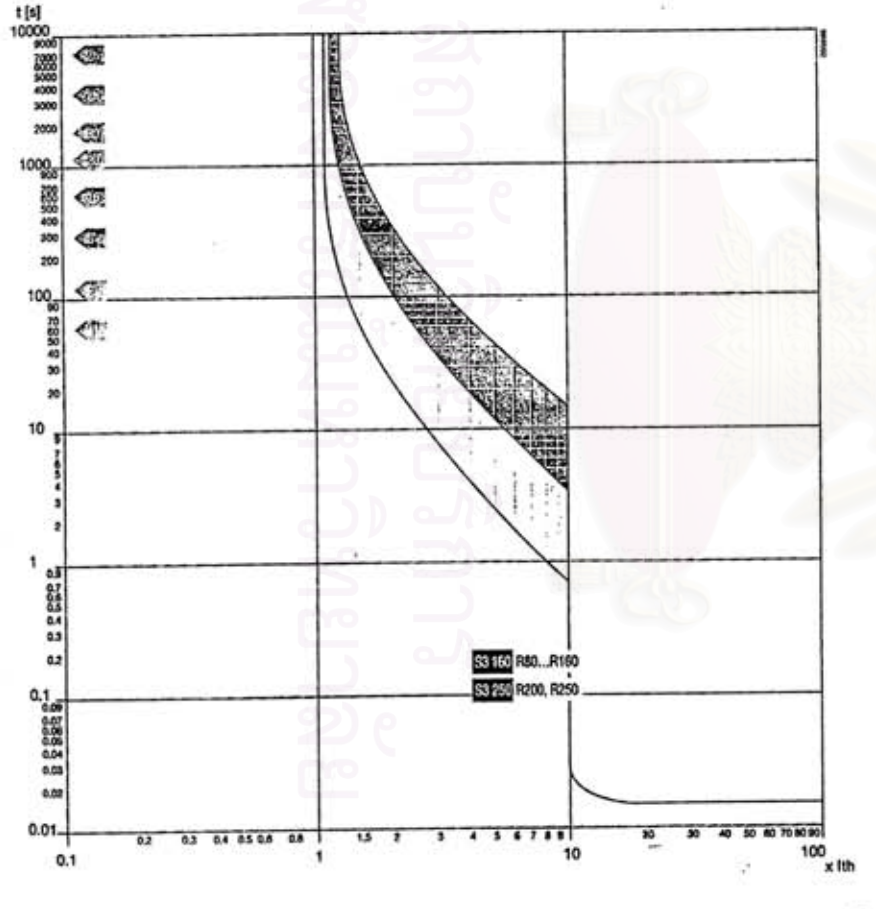
รูปที่ ง.1 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของฟิวส์แรงสูง HRC [22]

รูปที่ ง.2 (ก) กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Electronic (Phase Function) [23]



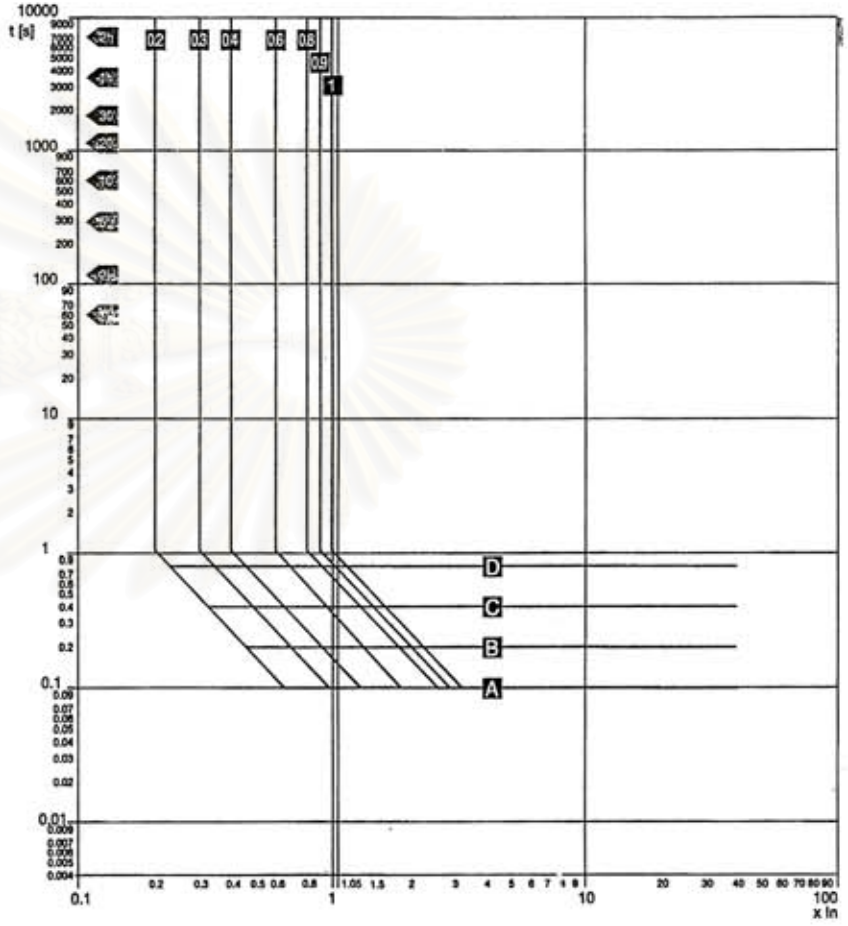


รูปที่ ง.3 กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic



61

รูปที่ ง.2 (ข) กราฟคุณลักษณะเวลา-กระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Electronic (Ground Function) [23]



ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพล โพธิรัตน์ เกิดวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2517 ที่เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2538 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2540 โดยระหว่างการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตได้รับทุนการศึกษาจาก ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย