

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรเพื่อใช้ปรับตั้งและเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน



นายอริยะ เมธเศรษฐ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

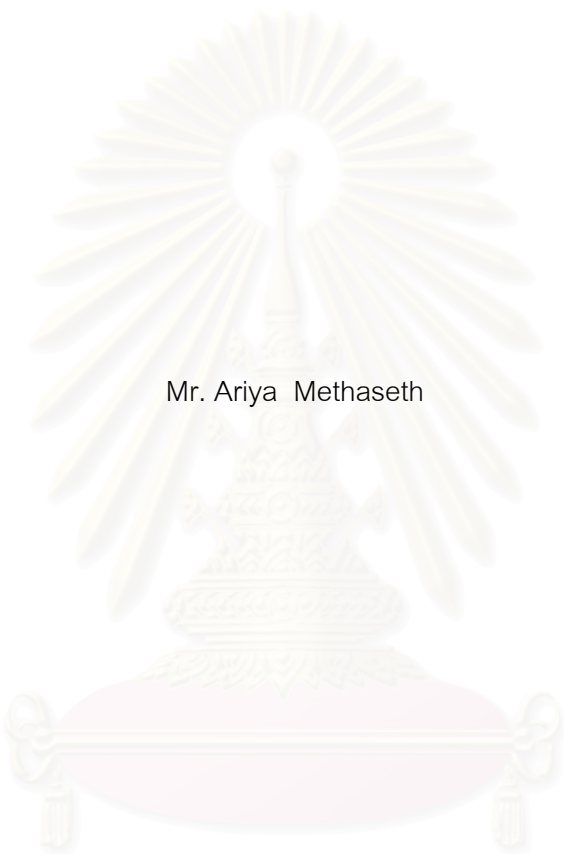
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0873-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS FOR SETTING AND RATING SELECTION
OF PROTECTIVE DEVICES



Mr. Ariya Methaseth

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0873-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรเพื่อใช้ปรับตั้งและเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน
โดย	นายอริยะ เมธเศรษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ไชยะ แซ่ม้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ไชยะ แซ่ม้อย)

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

นายอริยะ เมธเศรษฐ์ : การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรเพื่อใช้ปรับตั้งและเลือกค่าพิกัดของ
อุปกรณ์ป้องกัน (SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS FOR SETTING AND
RATING SELECTION OF PROTECTIVE DEVICES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ประสิทธิ์ พิทย
พัฒน์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย, 131 หน้า. ISBN XXX-XXX-XXX-X

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การวิเคราะห์กระแสลัดวงจร ตามวิธีการในมาตรฐาน IEC
909 และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านไฟฟ้า ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การเลือกค่า
พิกัดอุปกรณ์ป้องกัน และการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน โดยรายละเอียดในการศึกษาประกอบด้วย
การคำนวณกระแสลัดวงจรตามวิธีในมาตรฐาน IEC 909 คุณลักษณะทั่วไปและการเลือกค่าพิกัด
ของอุปกรณ์ป้องกัน และหลักการในการศึกษาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้มีการทำงานเป็นลำดับ

หลังจากทำการศึกษาในทางทฤษฎี จึงได้ทำการศึกษาถึงวิธีการนำคอมพิวเตอร์มา
ประยุกต์กับทฤษฎีที่ได้ศึกษา เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้น ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาจะแบ่ง
การทำงานเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนการคำนวณกระแสลัดวงจร, ส่วนการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน,
ส่วนการปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น
ทั้ง 3 ส่วนนั้นจะทำงานสอดคล้องกัน โดยการส่งผ่านข้อมูลระหว่างแต่ละส่วนการทำงานนั้น ซึ่ง
ประโยชน์ในการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยงานนี้ ทำให้ลดภาระการทำงานของมนุษย์ในเรื่องดังกล่าว
รวมทั้งผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270654221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: SHORT CIRCUIT / PROTECTIVE DEVICE SELECTION / COORDINATION STUDY

ARIYA METHASETH: SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS FOR SETTING AND RATING SELECTION OF PROTECTIVE DEVICES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PRASIT PITTAYAPAT, THESIS COADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY, 131 pp. ISBN XXX-XXX-XXX-X.

This Thesis presents a short circuit calculation following the IEC 909 standard and brings calculated results to implement on two electrical works, i.e. selecting rating and setting of protective devices. Details in this study are short-circuit calculation on IEC 909 standard, characteristics and rating selection of protective devices, principle of setting selective protective device.

After finishing theoretical details, the thesis also studies on how to develop a computer program. The developed software comprises 3 sections, short-circuit calculations, rating selection of protective devices and setting of protective devices. The calculation process of the program is based on the transaction of data among these sections. The benefit of this computer-aided is to reduce human work and also increase accuracy of the results.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature

Field of study ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature

Academic year 2001 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้ง อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากนั้น ต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณพระคุณ มารดา บิดา ที่ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจน
जनทุกๆท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อริยะ เมธเศรษฐ์

มีนาคม 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2. การคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 วัตถุประสงค์การคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909.....	5
2.3 ขอบเขตการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909.....	6
2.4 สัญลักษณ์และนิยามที่สำคัญในการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909.....	6
2.5 สมมติฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909.....	8
2.6 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Impedance).....	9
2.6.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (Impedance of Network Feeder).....	10
2.6.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Impedance of Transformer).....	10
2.6.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล (Impedance of Overhead Line and Cable).....	11
2.6.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ (Impedance of Motor).....	12
2.7 ขั้นตอนการพิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจร.....	13
2.8 การคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุด.....	15
2.9 การคำนวณกระแสลัดวงจรประเภทไกลและใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	15

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9.1 การลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Far from Generator Short Circuit).....	15
2.9.2 การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Near to Generator Short Circuit).....	17
2.10 รูปแบบของการเกิดลัดวงจร.....	20
2.10.1 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Short Circuit)...	21
2.10.2 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Short Circuit)....	28
2.10.3 การลัดวงจรแบบระหว่างเฟส (Phase to Phase Short Circuit).....	29
2.10.4 การลัดวงจรแบบระหว่างเฟสลงดิน (Phase to Phase to Ground Short Circuit).....	30
2.11 การคำนวณกระแสลัดวงจรอสมมาตร (Asymmetrical Short Circuit Current).....	31
2.12 การพิจารณาการเกิดลัดวงจรกรณีมีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรมากกว่าหนึ่งแหล่ง.	32
2.13 การพิจารณากระแสลัดวงจรระหว่างการเลือกค่าพิกัดกับการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน.....	35
3. อุปกรณ์ป้องกันและการเลือกค่าพิกัด.....	37
3.1 บทนำ.....	37
3.2 อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ.....	37
3.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ (Low Voltage Circuit Breaker).....	37
3.2.1.1 คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ.....	38
3.2.1.2 การเลือกค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ.....	41
3.2.2 ฟิวส์แรงดันต่ำ (Low Voltage Fuses).....	43
3.2.2.1 คุณลักษณะของฟิวส์แรงดันต่ำ.....	43
3.2.2.2 การเลือกค่าพิกัดของฟิวส์แรงดันต่ำ.....	44
3.3 อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง.....	45
3.3.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง (Medium Voltage Circuit Breaker).....	45
3.3.1.1 คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง.....	45
3.3.1.2 การเลือกค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง.....	47
3.3.2 ฟิวส์แรงดันปานกลาง (Medium Voltage Fuses).....	50
3.3.2.1 การเลือกค่าพิกัดของฟิวส์แรงดันปานกลาง.....	50
4. กระแสลัดวงจรกับการปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	52
4.1 บทนำ.....	52

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 ขั้นตอนการศึกษาการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	53
4.2.1 กำหนดปรัชญาในการป้องกันของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา.....	53
4.2.2 พิจารณาแบบจำลองของระบบหรือไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา.....	53
4.2.3 ศึกษากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า.....	54
4.2.4 ศึกษาคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า.....	54
4.2.5 ศึกษาและปรับตั้งคุณลักษณะของกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกัน.....	55
4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาการปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	55
5. การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณกระแสลัดวงจรเพื่อเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน.....	58
5.1 บทนำ.....	58
5.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณกระแสลัดวงจรที่พัฒนา.....	58
5.2.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา.....	58
5.2.1.1 ส่วนการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	58
5.2.1.2 ส่วนการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน.....	62
5.2.1.3 ส่วนการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน.....	63
5.2.2 ลักษณะและหน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา.....	64
5.2.2.1 เมนูการวาดแผนภูมิเชิงเส้นเดี่ยว (Draw Single Line Diagram).....	65
5.2.2.2 เมนูการคำนวณกระแสลัดวงจร (Execute Short Circuit Calculation).....	66
5.2.2.3 เมนูการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Selection).....	66
5.2.2.4 เมนูการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Setting).....	67
5.2.2.5 เมนูฐานข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Database).....	67
5.2.2.6 เมนูแสดงผลลัพธ์ของการทำงานของโปรแกรม (Report).....	68
5.2.2.7 เมนูกำหนดรายละเอียดของการศึกษา (Options).....	70
5.2.3 วิธีการใช้งานโปรแกรม 'Short Circuit Calculator'.....	71
5.3 การศึกษากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าตัวอย่างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา..	72
5.3.1 การศึกษาระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1.....	73
5.3.1.1 พิจารณากรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด.....	76
5.3.1.2 พิจารณากรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด.....	87

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.3.2 การศึกษาระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2.....	93
5.3.3 การศึกษาระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2.....	101
6. สรุปและข้อเสนอนะ.....	113
6.1 ข้อสรุป.....	113
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	114
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	118
ก. ข้อมูลคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	119
ข. ข้อมูลคุณลักษณะของสายไฟฟ้าหรือเคเบิล.....	123
ค. ข้อมูลคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	129
ง. ข้อมูลคุณลักษณะของมอเตอร์.....	130
ประวัติผู้เขียน.....	131



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์และความหมายในการคำนวณกระแสลัดวงจรที่สำคัญ.....	6
2.2 ค่าตัวประกอบแรงดัน c (Voltage Factor).....	9
2.3 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรสามเฟสสมมูลเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	22
2.4 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรสามเฟสสมมูลอันเป็นผลจากเครื่องจักรกลหมุน (มอเตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า).....	23
2.5 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินเฟสเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	28
2.6 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรระหว่างเฟส.....	29
2.7 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน..	30
3.1 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ.....	43
3.2 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกพิกัดฟิวส์แรงดันต่ำ.....	44
3.3 ความสัมพันธ์การทำงานของรีเลย์กระแสเกินในแต่ละแบบ.....	47
3.4 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง...	49
3.5 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าพิกัดฟิวส์แรงดันปานกลาง.....	51
3.6 สรุปข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อใช้พิจารณาค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน.....	51
4.1 ข้อมูลกระแสลัดวงจรสำหรับใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน.....	57
5.1 สรุปประเภทการลัดวงจรของแต่ละแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร.....	75
5.2 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.4 กรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด โดยพิจารณาที่ระดับแรงดัน 400 V.....	77
5.3 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.4 กรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด โดยพิจารณาที่ระดับแรงดัน 400 V.....	77
5.4 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	85
5.5 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	86
5.6 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

ตารางที่	หน้า
5.7 สรุปผลการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดที่แต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	87
5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.14 ที่ใช้คำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด.....	87
5.9 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.14 ที่ใช้คำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด.....	88
5.10 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	88
5.11 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	89
5.12 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	89
5.13 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุดของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1.....	90
5.14 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1.....	90
5.15 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1.....	91
5.16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรแบบสามเฟส ระหว่างผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [14] กับที่ได้จากการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	91
5.17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินระหว่างผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [14] กับที่ได้จากการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	92
5.18 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	95
5.19 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฐ

ตารางที่	หน้า
5.20 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	96
5.21 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	97
5.22 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	97
5.23 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	98
5.24 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	98
5.25 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุดของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2.....	99
5.26 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้เลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2.....	99
5.27 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2.....	100
5.28 ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (I_k) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20].....	105
5.29 ค่ากระแสลัดวงจรค้ายอด (i_p) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20].....	106
5.30 ค่ากระแสลัดวงจร (I_p) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20] ที่เวลาลัดวงจร 0.02 วินาที.....	107
5.31 ค่ากระแสลัดวงจรอสมมาตร (I_{basym}) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20] ที่เวลาลัดวงจร 0.02 วินาที.....	108
5.32 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3.....	109
5.33 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3.....	110

ตารางที่	หน้า
ก.1 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) พิกัดด้านแรงดันสูง 3 ถึง 24 kV (U_{HV}); ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 4% ; ตามมาตรฐาน DIN 42500.....	119
ก.2 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) พิกัดด้านแรงดันสูง 3 ถึง 24 kV (U_{HV}); ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 4% ; ตามมาตรฐาน DIN 42503.....	119
ก.3 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) พิกัดด้านแรงดันสูง 24 ถึง 36 kV (U_{HV}); ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 6% ; ตามมาตรฐาน DIN 42511.....	120
ก.4 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer); ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 6% ; ตามมาตรฐาน DIN 42511.....	120
ก.5 ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัดของหม้อแปลง (Rated impedance voltage u_{kr}).....	121
ก.6 ค่าแรงดันรีซิสแตนซ์พิกัดของหม้อแปลง (Rated resistance voltage u_{Rr}).....	121
ก.7 ค่าช่วงเวลาที่ยหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทนต่อกระแสค่าต่างๆได้ [5].....	121
ก.8 ค่ากระแสพุ่งเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด [5].....	121
ก.9 ค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า [5].....	122
ก.10 ขีดจำกัดกระแสหรือค่าความคงทนของหม้อแปลง โดยแสดงเป็นสมการของ Through-Fault Protection Curve [14].....	122
ข.1 ค่าความต้านทานของตัวนำของสายไฟ ที่อุณหภูมิ 20°C	123
ข.2 ค่าพิกัดหรือค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันสายไฟ [5].....	126
ข.3 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายรวมทั้งค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟ เมื่อตัวนำ คือ ทองแดง.....	127
ข.4 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายรวมทั้งค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟ เมื่อตัวนำ คือ อลูมิเนียม.....	128
ค.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส แรงดันต่ำ.....	129
ง.1 ค่า Maximum allowance stall time ของมอเตอร์แต่ละชนิด [5].....	130
ง.2 ค่าพิกัดหรือค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ [5].....	130

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แหล่งแรงดันสมมูลที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	9
2.2 ขั้นตอนการพิจารณาการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	14
2.3 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	16
2.4 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	18
2.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	19
2.6 ลักษณะการลัดวงจรประเภทต่างๆ.....	21
2.7 กราฟแสดงค่า μ ต่อค่าอัตราส่วน I_{kG}'' / I_{rG} หรือ I_{kM}'' / I_{rM}	24
2.8 กราฟแสดงค่า q ต่อ กำลังจริงของมอเตอร์หนึ่งคู่ขั้ว.....	25
2.9 กราฟแสดงค่า λ_{max} และ λ_{min} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบใบพัด (Turbine Generator) ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 1.3 เท่าของค่าพิกัดที่โหลดพิกัดและที่ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) พิกัด.....	26
2.10 กราฟแสดงค่า λ_{max} และ λ_{min} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบใบพัด (Turbine Generator) ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 1.3 เท่าของค่าพิกัดที่โหลดพิกัดและที่ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) พิกัด.....	26
2.11 กราฟแสดงค่า λ_{max} และ λ_{min} ของเครื่องจักรกลแบบ Salient Pole ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 1.6 เท่าของค่าพิกัด.....	27
2.12 กราฟแสดงค่า λ_{max} และ λ_{min} ของเครื่องจักรกลแบบ Salient Pole ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 2.0 เท่าของค่าพิกัด.....	27
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสลัดวงจรสูงสุดกับค่าองค์ประกอบลำดับต่างๆ.....	31
2.14 รูปแบบต่างๆการต่อของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร.....	33
2.15 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีมีแหล่งจ่ายไฟมากกว่า 1 แหล่ง โดยไม่มีอิมพีแดนซ์ร่วมกันระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร.....	34
2.16 ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร เพื่อใช้พิจารณาค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน.....	35
2.17 ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร เพื่อใช้พิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน.....	36
3.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ.....	38
3.2 การทำงานตัดวงจรแบบ Thermal-Magnetic.....	39
3.3 การทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	40
3.4 ฟิวส์แรงดันต่ำ.....	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 คุณลักษณะการทำงานของฟิวส์แรงดันต่ำ.....	44
3.6 เซอร์คิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง.....	45
3.7 กราฟลักษณะเวลา-กระแสของรีเลย์.....	46
3.8 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรขณะเซอร์คิตเบรกเกอร์เปิดหรือปิดวงจร.....	48
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเปิดวงจรของเซอร์คิตเบรกเกอร์กับ $%i_{dc}$	48
3.10 ฟิวส์แรงดันปานกลาง.....	50
4.1 ตำแหน่งของอุปกรณ์ป้องกันหลักและอุปกรณ์ป้องกันสำรอง.....	52
4.2 การใช้กระแสลัดวงจรในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน.....	56
5.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนหลักของการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	60
5.2 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนย่อยของการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	61
5.3 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนการเลือกค่าพิคตอุปกรณ์ป้องกัน.....	62
5.4 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน.....	63
5.5 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของเมนูหลัก (Main Menu).....	64
5.6 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนเมนูเชิงเส้นเดี่ยว (Draw Single Line Diagram)....	65
5.7 รูปหน้าต่างแสดงการใส่ข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	65
5.8 รูปหน้าต่างแสดงส่วนการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Selection)....	66
5.9 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Setting).....	67
5.10 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนฐานข้อมูลอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Database).....	68
5.11 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนรายงานแสดงรายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา.....	69
5.12 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนแสดงผลการคำนวณกระแสลัดวงจร.....	69
5.13 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ป้องกันรวมถึงค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน.....	70
5.14 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนเมนูกำหนดรายละเอียดของการศึกษา (Options).....	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ด

รูปที่	หน้า
5.15 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างจากเอกสารอ้างอิง [14].....	76
5.16 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวก กรณีพิจารณา แหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ ระบบไฟฟ้า.....	78
5.17 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับศูนย์ กรณีพิจารณา แหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ ระบบไฟฟ้า.....	81
5.18 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวก กรณีพิจารณา แหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ มอเตอร์1 และ มอเตอร์2.....	81
5.19 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับศูนย์ กรณีพิจารณา แหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ มอเตอร์1 และ มอเตอร์2.....	78
5.20 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่2 ซึ่งเป็นกรณีมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงาน.....	93
5.21 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 [20,21].....	104
ข.1 ค่าอัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับความต้านทานลำดับบวกของ สายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ ทองแดง...	124
ข.2 ค่าอัตราส่วนค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของ สายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ ทองแดง...	124
ข.3 ค่าอัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับความต้านทานลำดับบวกของ สายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ อลูมิเนียม.	125
ข.4 ค่าอัตราส่วนค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของ สายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ อลูมิเนียม.	125

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีความจำเป็นในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าซึ่งมีหน้าที่ตอบสนองความต้องการพื้นฐานของมนุษย์มีขนาดใหญ่และซับซ้อน การออกแบบระบบไฟฟ้าจึงต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ทำการออกแบบ โดยข้อพิจารณาพื้นฐานที่ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงเพื่อให้ได้ระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด คือต้องเพียงพอ กับความต้องการไฟฟ้า และการลงทุนต้องมีความคุ้มค่ามากที่สุด ข้อพิจารณาพื้นฐานดังกล่าวคือ

1. ความปลอดภัย (Safety)
2. ความเชื่อถือได้ (Reliability)
3. ความยืดหยุ่น (Flexibility)
4. ความคงที่ของระดับแรงดัน (Voltage Regulation)
5. เงินลงทุนเบื้องต้น (Initial Investment)
6. ความสะดวกในการใช้งาน (Simplicity of Operation)

อย่างไรก็ตาม ระบบไฟฟ้าไม่ว่าจะออกแบบมาดีเพียงใด ย่อมมีโอกาสเกิดความผิดปกติที่ไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้า ซึ่งความผิดปกติดังกล่าวมีได้หลายสาเหตุ ความผิดปกติที่สำคัญและต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน คือ ความผิดปกติเนื่องจากการเกิดลัดวงจร (Short Circuit) หรือ ความผิดปกติเนื่องจากการกระแสไหลเกิน (Overload) ซึ่งเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลในระบบไฟฟ้า และก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า รวมทั้งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

เพื่อจำกัดขอบเขตความเสียหายที่เกิดจากความผิดปกติดังกล่าวข้างต้นให้น้อยที่สุด จึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน คือ เซอร์คิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ และรีเลย์ เพื่อทำหน้าที่แยกส่วนที่เกิดความผิดปกติดังกล่าวข้างต้นออกจากระบบไฟฟ้า

ดังนั้น เมื่อมีการออกแบบระบบไฟฟ้าหรือมีการเพิ่มขึ้นของโหลดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า จึงต้องมีการศึกษาเรื่องกระแสลัดวงจรเสมอ เพื่อตรวจสอบค่าพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ

ไฟฟ้าว่าเพียงพอต่อการใช้งานหรือไม่ รวมทั้งใช้ผลการศึกษาระแสลัดวงจร ในการตรวจสอบค่าปรับตั้งหรือค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่วางไว้หรือไม่

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่า การคำนวณกระแสลัดวงจรมีความสำคัญมาก ปัจจุบันจึงมีการกำหนดมาตรฐาน หรือวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น โดยมีมาตรฐานหลักที่ใช้งานอยู่ 2 มาตรฐาน คือ วิธีคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI (IEEE) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันในทวีปอเมริกาเหนือ และ วิธีคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC (IEC 909) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันมากในยุโรปและเอเชีย

แต่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีการติดต่อซื้อขายสินค้าระหว่างประเทศกันมากขึ้น สินค้าเหล่านั้นซึ่งรวมไปถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าด้วย จึงต้องมีมาตรฐานในการกำหนดคุณภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว และมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันส่วนใหญ่ คือ มาตรฐาน IEC ซึ่งมีแนวโน้มจะเป็นมาตรฐานสากลในอนาคตต่อไป ดังนั้น เพื่อให้ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้พิจารณาร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC ได้อย่างเหมาะสม วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรที่นำมาใช้จึงควรจะเป็นไปตามวิธีในมาตรฐาน IEC

เนื่องจากขนาดและความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรมสมัยใหม่มีมากขึ้น การคำนวณกระแสลัดวงจรจึงมีความซับซ้อนและต้องใช้เวลามากถ้าคำนวณด้วยมือเปล่า ดังนั้นจึงมีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณกระแสลัดวงจร ซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดเวลาและได้ความถูกต้องแล้ว ยังทำให้การคำนวณกระแสลัดวงจรมีรูปแบบเป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งทำให้นำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานกับมาตรฐานในงานด้านอื่นๆต่อไปได้ถูกต้อง

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการศึกษาถึงขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส รวมทั้งศึกษาถึงการนำค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ไปใช้ในการพิจารณาค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน และการนำค่ากระแสลัดวงจรที่ได้มาใช้ในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อจัดลำดับการทำงาน โดยขอบเขตระบบไฟฟ้าที่ศึกษาคือ ระบบไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำจนถึงระดับแรงดันปานกลางซึ่งมีลักษณะเป็นระบบจำหน่าย (Distribution System) โดยค่าพิกัดต่างๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะยึดตามมาตรฐาน IEC เป็นหลัก และการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันจะยึดตามกฎข้อบังคับตามกฎของการไฟฟ้า หรือ วสท. และในท้ายที่สุด จะนำข้อสรุปที่ได้จากการศึกษา มาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909
2. เพื่อนำผลลัพธ์จากการคำนวณกระแสลัดวงจรตามวิธีในมาตรฐาน IEC 909 ไปใช้งานในการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน และการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน
3. เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการคำนวณกระแสลัดวงจร รวมทั้งเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้มีลำดับการทำงาน

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1 ศึกษาวิธีและหลักการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909
- 2 ศึกษาหลักการในการเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน
- 3 ศึกษาวิธีการเขียนและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 4 ทำการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยเหลือในการคำนวณกระแสลัดวงจร รวมทั้งการเลือกและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน ตามสิ่งที่ได้ศึกษามาข้างต้น
- 5 ทำการทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนากับตัวอย่างระบบไฟฟ้า และพิจารณาความถูกต้องของโปรแกรม
- 6 สรุปสิ่งที่ได้ศึกษามารวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆไป
- 7 เรียบเรียงและจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์

1. วิธีการและขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 909
2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำถึงแรงดันไฟฟ้าปานกลาง (0 ถึง 32 kV) ซึ่งมีลักษณะเป็นระบบจำหน่าย เช่น ระบบไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Power System) เป็นต้น โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้แก่ มอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และสายไฟฟ้า
3. การเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ อ้างอิงตามมาตรฐาน IEC ที่เกี่ยวข้อง
4. การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันจะเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า

5. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณค่ากระแสลัดวงจรและนำไปประยุกต์ใช้งานตามวัตถุประสงค์ต่างๆ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. เพื่อความเข้าใจในการคำนวณกระแสลัดวงจรตามวิธีมาตรฐาน IEC 909 รวมไปถึงการนำข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ได้ไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ต่างๆได้ถูกต้อง
2. ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการคำนวณกระแสลัดวงจร และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้งานต่างๆ
3. ได้ข้อสรุปหรือข้อเสนอแนะในการคำนวณกระแสลัดวงจรเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง วิธีการและขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟส ตามมาตรฐาน IEC 909 โดยแสดงวิธีการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมทั้งการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรตามชนิด และประเภทการลัดวงจรต่างๆ

บทที่ 3 กล่าวถึง อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดในการพิจารณาค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันตามมาตรฐาน IEC โดยใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรเป็นตัวพิจารณา

บทที่ 4 กล่าวถึง ความสำคัญและหลักการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน รวมทั้งข้อมูลกระแสลัดวงจรต่างๆที่ใช้ในการปรับตั้ง

บทที่ 5 กล่าวถึง การนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในบทก่อนๆ มาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และประยุกต์ใช้งานกับตัวอย่างระบบไฟฟ้า โดยคำนวณด้วยมือและจากเอกสารอ้างอิงเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา

บทที่ 6 กล่าวถึง ข้อสรุปที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ และข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุง

บทที่ 2

การคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

2.1 บทนำ

จากที่ได้กล่าวถึงความสำคัญของการคำนวณกระแสลัดวงจรในบทที่ 1 ทำให้ทราบว่ามีข้อกำหนดหรือรายละเอียดในการคำนวณกระแสลัดวงจรที่เป็นมาตรฐาน และมาตรฐานในการคำนวณที่มีแนวโน้มจะใช้อย่างแพร่หลาย คือ มาตรฐาน IEC 909

ดังนั้นในบทที่ 2 นี้จะได้แสดงรายละเอียดต่างๆ ในการคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้มาตรฐาน IEC 909 อ้างอิง เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งานด้านอื่นต่อไป

2.2 วัตถุประสงค์การคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

โดยทั่วไป ค่ากระแสลัดวงจรและค่าอิมพีแดนซ์สามารถหาได้โดยการทดสอบในระบบไฟฟ้า หรือโดยการใช้เครื่องมือวัด ซึ่งวิธีการทดสอบหรือวัดนั้นค่อนข้างลำบากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีคำนวณกระแสลัดวงจรจากค่าพิกัดของอุปกรณ์ไฟฟ้า ไม่ว่าจะพิจารณาในกรณีที่ระบบไฟฟ้าติดตั้งอยู่แล้ว หรือกรณีที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในขั้นตอนออกแบบก็ตาม

การคำนวณกระแสลัดวงจรที่สมบูรณ์และละเอียดมากๆ นั้น จะได้ค่ากระแสลัดวงจรซึ่งเป็นฟังก์ชันกระแสลัดวงจรที่ช่วงเวลาใดๆ ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร โดยช่วงเวลาของฟังก์ชันกระแสลัดวงจรนั้น เริ่มตั้งแต่เกิดสภาวะลัดวงจรจนถึงสภาวะลัดวงจรนั้นหายไป แต่ในทางปฏิบัติทั่วไปแล้ว การคำนวณกระแสลัดวงจรที่ได้มาซึ่งฟังก์ชันของกระแสลัดวงจรที่ช่วงเวลาใดๆ นั้น อาจไม่จำเป็นในการใช้งานจริงทั่วไป ค่ากระแสลัดวงจรที่ผู้ใช้งานส่วนใหญ่นำไปใช้ คือ ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (I_k'') ค่ากระแสลัดวงจรค่ายอด (i_p) และถึง ค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร (I_b) ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากวิธีในมาตรฐานนี้

ดังนั้นมาตรฐาน IEC 909 “Short-circuit current calculation in three-phase a.c. System” [2] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟส จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการกำหนดขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรที่ไม่ยุ่งยาก ใช้งานได้ทั่วไป รวมทั้งได้ผลลัพธ์ที่ปลอดภัยและมีความถูกต้องเพียงพอ นอกจากนี้มาตรฐาน IEC 909 ได้กล่าว

อีกว่า ขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรในมาตรฐาน มีขั้นตอนการคำนวณที่ช่วยให้วิศวกรที่ไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญในด้านนี้ สามารถนำไปใช้งานได้ และได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

2.3 ขอบเขตการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

มาตรฐาน IEC 909 ได้กำหนดขอบเขตในการคำนวณกับระบบไฟฟ้าที่มีลักษณะดังนี้

1. ระบบไฟฟ้าที่คำนวณเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ระดับแรงดันต่ำ (100 V ถึง 1 kV) ที่ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz หรือ
2. ระบบไฟฟ้าที่คำนวณเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันปานกลางถึงสูง คือ ตั้งแต่ 1 kV แต่ไม่เกิน 230 kV ที่ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz

2.4 สัญลักษณ์และนิยามที่สำคัญในการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

มาตรฐาน IEC 909 กำหนดสัญลักษณ์และความหมาย ที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรไว้ โดยสัญลักษณ์สำคัญที่ใช้ในการคำนวณมีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และความหมายในการคำนวณกระแสลัดวงจรที่สำคัญ

สัญลักษณ์	ความหมาย
I_k''	กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (Initial Symmetrical Short Circuit Current) หรือ ค่า RMS ขององค์ประกอบไฟสลับของกระแสลัดวงจรขณะเริ่มเกิดลัดวงจร
i_p	กระแสลัดวงจรค่ายอด (Peak Short Circuit Current) หรือ ค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจร ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้นของการเกิดลัดวงจร มีค่าขึ้นกับค่าคงตัวเวลาการลดลงขององค์ประกอบไฟตรง (L/R) และความถี่ไฟฟ้า และจากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า กระแสลัดวงจรค่ายอด (i_p) จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาแรกๆของการเกิดลัดวงจร

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และความหมายในการคำนวณกระแสลัดวงจรที่สำคัญ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
I_b	กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical Short Circuit Breaking Current) หรือ ค่า RMS ขององค์ประกอบไฟสลับของกระแสลัดวงจร ขณะที่หน้าสัมผัสขั้วแรกของอุปกรณ์ตัดวงจร (Switch Gear) แยกออก โดยขึ้นกับเวลาในการแยกหน้าสัมผัสของอุปกรณ์ตัดวงจร (t_{min}) นั้น
I_k	กระแสลัดวงจรอยู่ตัว (Steady-State Short Circuit Current) หรือ ค่า RMS ของกระแสลัดวงจรที่ยังคงมีอยู่หลังจากผ่านสภาวะชั่วคราว (Transient)
i_{DC}	องค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร (DC component)
U_n	แรงดันไฟฟ้าของระบบ (Nominal System Voltage) หรือ ค่าแรงดันระหว่างสาย (Line to Line Voltage) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา
Z_k	อิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลที่คำนวณได้ ที่ตำแหน่งเกิดลัดวงจร (Equivalent Short Circuit Impedance)
t_{min}	ระยะเวลาสั้นที่สุดที่อุปกรณ์ตัดวงจรใช้แยกหน้าสัมผัสสุดท้ายออกจากกัน

ในที่นี้ได้แสดงรายละเอียดของสัญลักษณ์ไว้เพียงบางส่วนเท่านั้น ผู้อ่านสามารถหาอ่านรายละเอียดของสัญลักษณ์เพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [2,3]

2.5 สมมติฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

การคำนวณกระแสลัดวงจรในมาตรฐาน IEC 909 นี้ ใช้หลักการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) โดยกำหนดให้เสมือนมีแหล่งแรงดันสมมูล (Equivalent Voltage Source) ณ ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรเพียงแหล่งเดียวในระบบไฟฟ้าขณะเกิดการลัดวงจร ส่วนอุปกรณ์อื่นซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร ซึ่งได้แก่ ระบบไฟฟ้า (Network Feeder), มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกแทนโดยค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้น ส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่พิจารณาในการคำนวณกระแสลัดวงจร ซึ่งได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า และสายไฟฟ้า จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นเช่นกัน

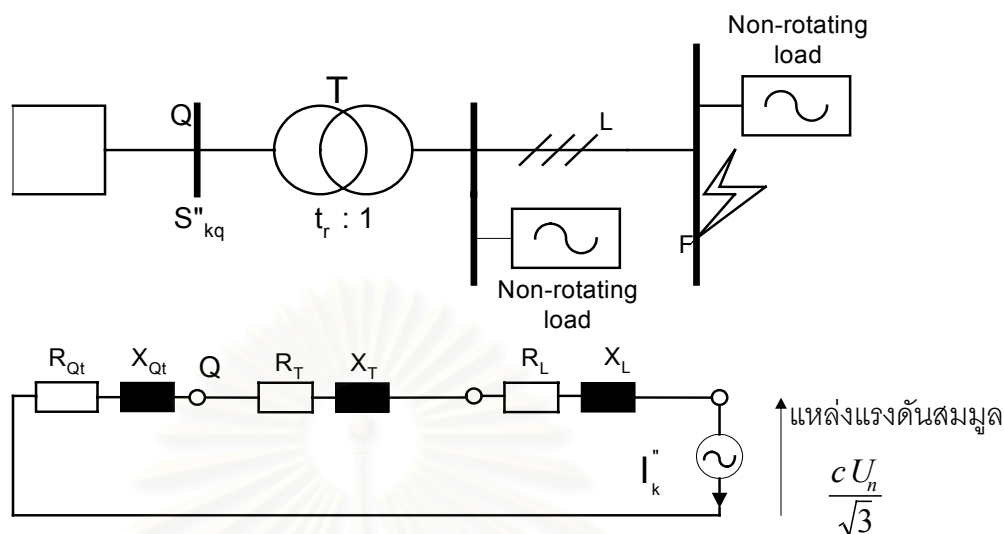
ตัวอย่างของแหล่งแรงดันสมมูล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจากรูปมีแหล่งแรงดันสมมูลอยู่แหล่งเดียวในระบบไฟฟ้าในขั้นตอนการคำนวณ ส่วนแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอื่นในรูปที่ 2.1 คือ ระบบไฟฟ้า จะถูกแทนโดยค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 ส่วนค่าความจุไฟฟ้าในสายไฟ และค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นจะถูกละเลย

แหล่งแรงดันสมมูลมีขนาดแรงดันเท่ากับ $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ ซึ่งจะมีตัวประกอบแรงดัน c เป็นตัวคูณ โดยค่าของตัวประกอบแรงดัน c แสดงในตารางที่ 2.2

นอกจากนี้ยังมีข้อสมมติฐานเพิ่มเติมในการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 ดังนี้

1. ในระหว่างที่เกิดการลัดวงจรนั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของวงจรในขณะนั้น เช่น ขณะเกิดการลัดวงจรแบบสมดุลสามเฟส ก็จะมีการลัดวงจรแบบสมดุลสามเฟสเท่านั้น จะไม่เกิดเหตุการณ์อื่นขึ้นระหว่างนั้น
2. ในกรณีหม้อแปลงเป็นแบบ Tap changer จะพิจารณาให้ Tap changer นั้นอยู่ที่ตำแหน่งหลักเสมอ
3. ไม่พิจารณาถึงผลจากค่าความต้านทานของอาร์กที่เกิดจากกระแสลัดวงจร

สมมติฐานข้างต้นอาจไม่ถูกต้องทั้งหมด แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณยังคงมีความถูกต้องเพียงพอ และอยู่ในช่วงที่ปลอดภัย (Safe Side) [2]



รูปที่ 2.1 แหล่งแรงดันสมมูลที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร [2]

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวประกอบแรงดัน c (Voltage Factor)

แรงดันพิกัด (U_n)	Voltage factor c for the calculation of	
	กระแสลัดวงจรสูงสุด Maximum Short Circuit Current	กระแสลัดวงจรต่ำสุด Minimum Short Circuit Current
แรงดันต่ำ (100 V – 1 kV)		
1. 230V / 400V	1.00	0.95
2. แรงดันระดับอื่น	1.05	1.00
แรงดันปานกลาง (มากกว่า 1 kV ถึง 35 kV)	1.10	1.00
แรงดันสูง (มากกว่า 35 kV ถึง 230 kV)	1.10	1.00

2.6 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Impedance)

จากที่กล่าวมาข้างต้น การคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 จะใช้แหล่งแรงดันสมมูลเพียงแหล่งเดียวในการคำนวณขณะเกิดลัดวงจร ส่วนอุปกรณ์อื่นในระบบไฟฟ้า

จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้น จากนั้นทำการรวมค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดรวมกันเป็นอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูล (Equivalent Short Circuit Impedance) ภายหลัง เพื่อใช้คำนวณต่อไป

ในมาตรฐาน IEC 909 กล่าวถึงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆที่พิจารณาซึ่งสามารถแบ่งเป็นของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆได้ดังนี้

1. อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า
2. อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. อิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล
4. อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

2.6.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (Impedance of Network Feeder)

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบไฟฟ้าแทนด้วย Z_Q สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \quad (2.1)$$

โดย	U_{nQ}	คือ แรงดันพิกัดของระบบไฟฟ้า
	S_{kQ}''	คือ กำลังลัดวงจรพิกัดของระบบไฟฟ้า
	I_{kQ}''	คือ กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นพิกัดของระบบไฟฟ้า
	c	คือ ตัวประกอบแรงดัน (ตามตารางที่ 2.2)

ในกรณีที่ไม่ทราบค่าความต้านทาน (R_Q) ของระบบไฟฟ้า อาจใช้ความสัมพันธ์ $R_Q = 0.1X_Q$ โดยที่ $X_Q = 0.995Z_Q$ ได้ หรือถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากจนถือว่าเป็นบัสอนันต์ (Infinite Bus) แล้ว ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมากจนถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์

2.6.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Impedance of Transformer)

ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาเฉพาะกรณีหม้อแปลง 2 ขดลวด (Two-winding Transformer) โดยค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ($Z_T = R_T + jX_T$) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z_T = \frac{u_{kT}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (2.2)$$

$$R_T = \frac{u_{RT}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (2.3)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (2.4)$$

โดย	U_{rT}	คือ แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ
	I_{rT}	คือ กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ
	S_{rT}	คือ กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง
	P_{krT}	คือ กำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงในขดลวดที่กระแสพิกัด
	u_{kT}	คือ แรงดันลัดวงจรพิกัด มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
	u_{RT}	คือ แรงดันพิกัดโอห์มมิก (Ohmique Voltage)

สำหรับข้อมูลอื่นๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จำเป็นนั้น สามารถหาได้จากป้ายพิกัด (Name Plate) หรือสอบถามจากบริษัทผู้ผลิต

2.6.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล (Impedance of Overhead Line and Cable)

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล ($Z_L = R_L + jX_L$) นั้น สำหรับสายไฟฟ้าเหนือศีรษะ (Overhead Line) สามารถหาข้อมูลได้จากผู้ผลิตหรือสามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (2.5)$$

โดย	ρ	คือ ความต้านทานจำเพาะ,
	q_n	คือ พื้นที่หน้าตัดของสายไฟเหนือศีรษะ

$$X_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (2.6)$$

โดย	d	คือ ระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ,
	f	คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า,
	n	คือ จำนวนตัวนำบนเดือ (Bundle)
	r	คือ รัศมีของตัวนำเดี่ยว ซึ่งในกรณีของตัวนำบนเดือจะแทน r ด้วย $\sqrt{nrR^{n-1}}$
	μ_0	คือ ค่าความซาบซึมได้ของสูญญากาศเท่ากับ $4\pi 10^{-4}$

โดยค่าความจุไฟฟ้าในสายไฟเหนือศีรษะสามารถละเลยได้ [2]

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายเคเบิลสามารถหาได้จากผู้ผลิตสายเคเบิลนั่นเอง ซึ่งส่วนใหญ่จะให้ป็นหน่วยของโอห์มต่อหน่วยความยาว

2.6.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ (Impedance of Motor)

โดยทั่วไปมอเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ มอเตอร์แบบซิงโครนัส กับมอเตอร์แบบอินดักชัน โดยค่าอิมพีแดนซ์สำหรับมอเตอร์แบบซิงโครนัสนั้น จะพิจารณาเหมือนค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [2] ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อกระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป สำหรับกรณีคิดผลกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ซิงโครนัส สามารถพิจารณาอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสได้ดังนี้

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (2.7)$$

โดย	U_{rM}	คือ แรงดันพิกัดของมอเตอร์
	I_{rM}	คือ กระแสพิกัดของมอเตอร์
	S_{rM}	คือ กำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์
	I_{LR}/I_{rM}	คือ อัตราส่วนของกระแสลัดกรโเตอร์ต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ R_M / X_M สามารถใช้ค่าดังนี้ [2]

$$R_M / X_M = 0.1, X_M = 0.995Z_M \text{ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง, กำลังต่อคู่ของขั้ว} \geq 1 \text{ MW} \quad (2.8)$$

$$R_M / X_M = 0.15, X_M = 0.989Z_M \text{ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง, กำลังต่อคู่ของขั้ว} < 1 \text{ MW} \quad (2.9)$$

$$R_M / X_M = 0.42, X_M = 0.922Z_M \text{ สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน} \quad (2.10)$$

2.7 ขั้นตอนการพิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจร

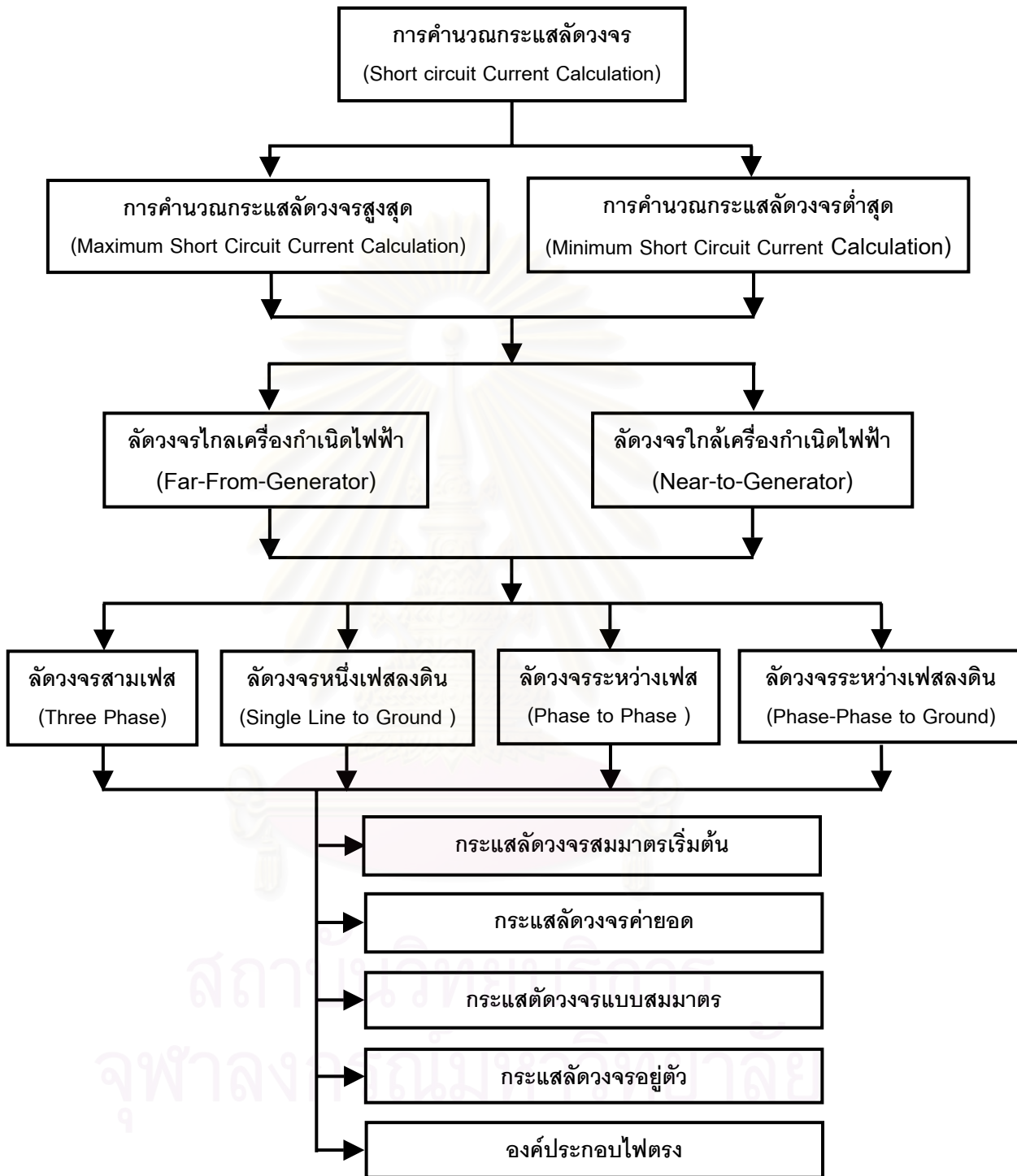
ในการคำนวณกระแสลัดวงจรนั้น ผู้คำนวณควรทราบวัตถุประสงค์ว่าจะนำผลลัพท์ในการคำนวณไปใช้ในประเภทงานใด ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ประเภทงานดังกล่าวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [4] คือ

1. การเลือกพิกัดอุปกรณ์
2. การปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

จากลักษณะงานทั้งสองประเภทข้างต้น จะมีความมุ่งหมายที่แตกต่างกันคือ ในการเลือกพิกัดอุปกรณ์นั้น ต้องการค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุปกรณ์นั้น ส่วนการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้น ต้องใช้ทั้งค่ากระแสลัดวงจรทั้งสูงสุดและต่ำสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้

ดังนั้น ในการคำนวณกระแสลัดวงจร จึงควรคำนวณกระแสลัดวงจรทุกกรณี ทุกประเภทและทุกแบบ รวมทั้งทุกชนิดของกระแสลัดวงจรด้วย เพื่อได้ข้อมูลกระแสลัดวงจรไปใช้งานทั้ง 2 ประเภท โดยขั้นตอนในการพิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจรนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการพิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจรนั้น จะเป็นลำดับขั้นไป โดยขั้นแรกคือพิจารณาว่าการคำนวณนั้นเป็นการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดหรือต่ำสุด จากนั้นพิจารณาว่าการลัดวงจรนั้น เป็นการลัดวงจรประเภทไกลหรือใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วจึงมาพิจารณาว่าการเกิดลัดวงจรเป็นแบบใด คือลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ฯลฯ แล้วในขั้นสุดท้ายจึงคำนวณกระแสลัดวงจรชนิดต่างๆ เช่น กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (I_k'') , กระแสลัดวงจรสมมาตร (I_b) ฯลฯ ต่อไป โดยในแต่ละขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการพิจารณาการคำนวณกระแสลัดวงจร

2.8 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุด

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุดมีรายละเอียดหรือข้อกำหนดในการคำนวณไม่เหมือนกัน โดยการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุดนั้น ต้องพิจารณารูปแบบของวงจรไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรสูงสุด คือ คิดผลของกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ทั้งหมดและพิจารณาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด รวมทั้งพิจารณารูปแบบ (Configuration) ของระบบไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดสูงสุด [2]

ส่วนวิธีการคำนวณและความสัมพันธ์ในการหาค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดนั้น จะคล้ายกับการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด เพียงแต่มีรายละเอียดเพิ่มเติมในการคำนวณซึ่งมาตรฐาน IEC 909 ได้กล่าวไว้ดังนี้

1. ค่าตัวประกอบ c ที่ใช้ในความสัมพันธ์จะใช้ค่า C_{min} ในตารางที่ 2.2
2. รูปแบบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ต้องพิจารณากรณีที่จะเกิดกระแสลัดวงจรมินที่สุด เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม ผู้คำนวณต้องคำนวณระบบไฟฟ้าในขณะที่เดินเครื่องต่ำที่สุด หรือจ่ายโหลดต่ำที่สุด
3. ไม่คิดผลของกระแสลัดวงจรที่มาจากมอเตอร์
4. พิจารณาความต้านทานของสายเคเบิลที่ระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง ค่าความต้านทานจะมีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าลดลง โดยความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ สามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

2.9 การคำนวณกระแสลัดวงจรประเภทไกลและใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

หลังจากพิจารณาว่าจะทำการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดหรือต่ำสุดได้แล้ว ในมาตรฐาน IEC 909 ยังได้แบ่งประเภทของการคำนวณกระแสลัดวงจรได้อีก 2 ประเภท คือ

2.9.1 การลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Far from Generator Short Circuit)

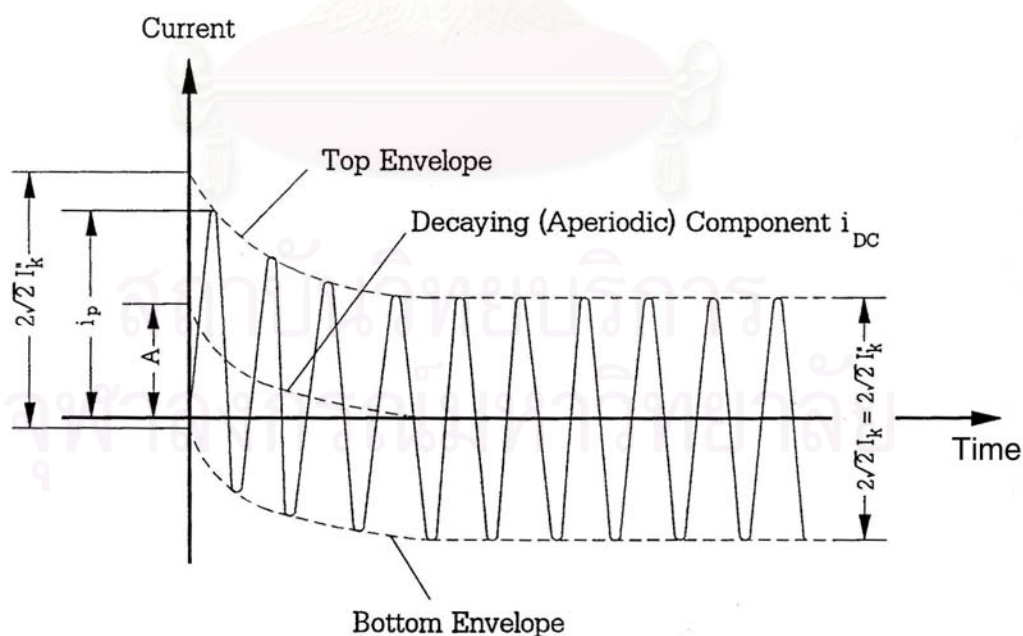
การลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือการลัดวงจรที่ไม่คิดผลการลดลงขององค์ประกอบไฟสลับ เป็นการพิจารณาการลัดวงจรที่ไม่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์จักรกลหมุน (มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) หรือค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรทั้งหมดมีค่าคงที่

ตลอดการเกิดลัดวงจร โดยรูปคลื่นกระแสลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ สามารถพิจารณาเป็นผลรวมขององค์ประกอบ 2 ส่วนคือ

1. **องค์ประกอบไฟสลับ (AC Component)** เป็นองค์ประกอบหลักของกระแสลัดวงจร ซึ่งการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีขนาดคงที่ตลอดการเกิดลัดวงจร โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3
2. **องค์ประกอบไฟตรง (DC Component)** เป็นองค์ประกอบมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในช่วงเริ่มต้นและลดลงเท่ากับศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง โดยการคำนวณกระแสลัดวงจรในส่วนขององค์ประกอบไฟตรง (i_{DC}) นั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์คือ

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi ft \frac{R}{X}} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณกระแสลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้พิจารณากับระบบไฟฟ้าที่มีลักษณะรับไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย (Distribution System) หรือระบบไฟฟ้า (Network Feeder) แรงดันสูง แรงดันปานกลาง และแรงดันต่ำของการไฟฟ้า [5] ส่วนกระแสลัดวงจรที่มีผลมาจากมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะพิจารณาเป็นการลัดวงจรแบบใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.9.2 การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Near to Generator Short Circuit)

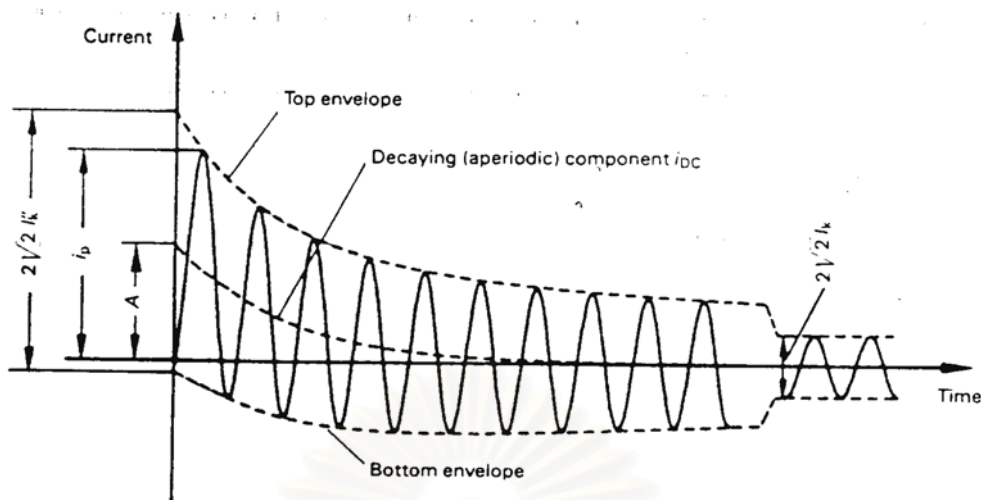
การคำนวณกระแสลัดวงจรประเภทลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นการพิจารณาการลัดวงจรที่มีผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์จักรกลหมุนมาเกี่ยวข้อง หรือคือการพิจารณาผลของกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์นั่นเอง

การคำนวณกระแสลัดวงจรที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ มีสิ่งที่น่าสนใจอยู่ที่กระแสลัดวงจรสมมาตร (I_b) และกระแสลัดวงจรอยู่ตัว (I_k) เพราะความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณจะแตกต่างจากกรณีลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากพิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์จักรกลหมุนด้วย

ในกรณีการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้สามารถพิจารณาเป็นผลรวมขององค์ประกอบ 2 ส่วนเหมือนการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ องค์ประกอบไฟสลับ (AC Component) และองค์ประกอบไฟตรง (DC Component) ซึ่งรูปคลื่นกระแสลัดวงจรกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดยแตกต่างจากการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (รูปที่ 2.3) ตรงที่มีการลดลงขององค์ประกอบไฟสลับในช่วงแรกแล้วเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์จักรกลหมุนนั่นเอง

หลักการคำนวณกระแสลัดวงจรในการลัดวงจรประเภทนี้คล้ายกับการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตรงที่พิจารณาเสมือนมีแหล่งแรงดันไฟฟ้าสมมูลที่จุดเกิดลัดวงจรเหมือนกัน แตกต่างที่ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์บางประเภทจะพิจารณาแตกต่างกัน โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องเพิ่มเติม ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้าโดยตรงกับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากความสัมพันธ์คือ



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นของกระแสลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (2.12)$$

โดย R_G คือ ค่าความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หน่วย โอห์ม

X_d'' คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หน่วย โอห์ม

ค่าตัวประกอบ K_G สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} x \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (2.13)$$

โดยที่ c_{\max} คือ ตัวประกอบแรงดัน (แสดงในตารางที่ 2.2)

U_n คือ แรงดันของระบบไฟฟ้า

U_{rG} คือ แรงดันพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

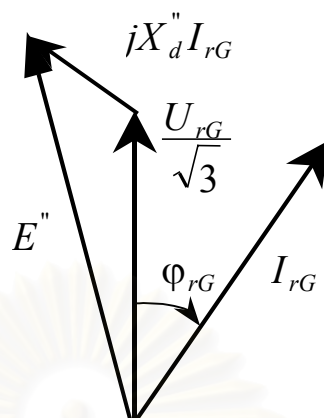
Z_{GK} คือ อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการคำนวณ

Z_G คือ อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริง

x_d'' คือ ค่าชั้บทรานเซียนต์อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

φ_{rG} คือ มุมเฟสระหว่าง I_{rG} และ $\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}}$

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสสามารถแสดงดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เนื่องจากการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรในมาตรฐาน IEC 909 ใช้ค่าแหล่งแรงดันสมมูลขนาด $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ แทนการใช้ค่าแรงดันขั้วขานเขียนต์จริง จึงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ [2] โดยการคูณด้วยค่าตัวประกอบ K_G ตามความสัมพันธ์ที่ (2.13) สำหรับคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้อง (Z_{GK})

ค่าความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า R_G สามารถหาได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้ [2]

$$R_G = 0.05X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่ง } U_{rG} > 1 \text{ kV และ } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA} \quad (2.14)$$

$$R_G = 0.07X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่ง } U_{rG} > 1 \text{ kV และ } S_{rG} < 100 \text{ MVA} \quad (2.15)$$

$$R_G = 0.15X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่ง } U_{rG} < 1000 \text{ V} \quad (2.16)$$

โดยสรุปแล้ว การที่จะพิจารณาว่าการลัดวงจรเป็นประเภทลัดวงจรไกลหรือใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ต้องพิจารณาจากไดอะแกรมเส้นเดียว (Single Line Diagram) ของระบบไฟฟ้าที่ทำการคำนวณว่า กระแสลัดวงจรที่กำลังคำนวณนั้น เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใด เช่น ถ้าเป็นระบบไฟฟ้าก็ให้พิจารณาเป็นการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือถ้าแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ ก็ให้พิจารณาเป็นการลัดวงจรประเภทใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ถ้ากระแสลัดวงจรมาจากแหล่งกำเนิดลัดวงจรหลายแหล่ง

พร้อมกัน ให้พิจารณาว่า แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดมีความสามารถในการให้กระแสลัดวงจรมากกว่ากัน ก็พิจารณาใช้ความสัมพันธ์ของการลัดวงจรประเภทนั้นคำนวณ

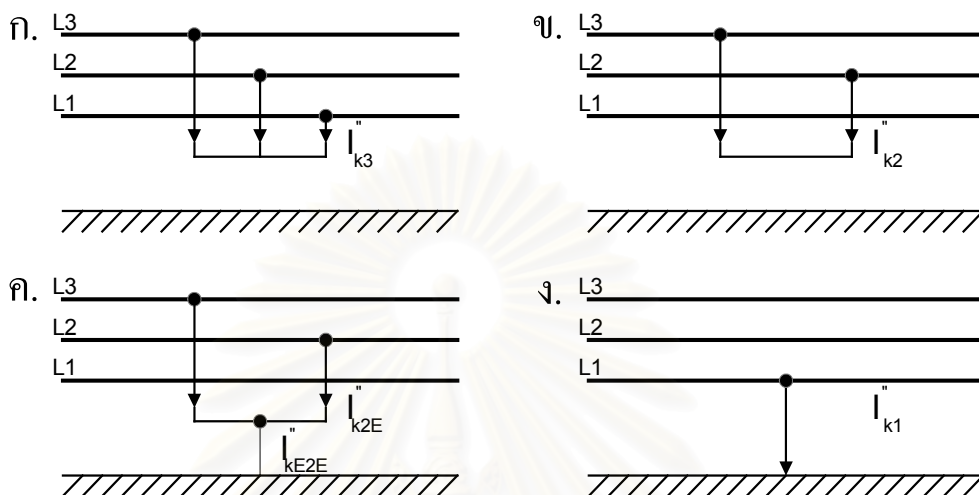
2.10 รูปแบบของการเกิดลัดวงจร

หลังจากทราบแล้วว่า ในการคำนวณกระแสลัดวงจรจะพิจารณาเป็นประเภทลัดวงจรใดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ประเภทลัดวงจรใดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จึงพิจารณาต่อว่าจะคำนวณการลัดวงจรแบบใด โดยสามารถแบ่งรูปแบบของการเกิดลัดวงจรได้เป็น 2 แบบใหญ่คือ

1. **การเกิดลัดวงจรแบบสมดุล (Balanced Short Circuit) หรือการลัดวงจรแบบสามเฟส (รูปที่ 2.6-ก)** นั้น มักจะถูกพิจารณาเสมอ เพราะการลัดวงจรแบบนี้มักจะทำให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด โดยการคำนวณการลัดวงจรแบบสมดุลนี้ จะพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) เท่านั้น
2. **การเกิดลัดวงจรแบบไม่สมดุล (Unbalanced Short Circuit) ได้แก่ การลัดวงจรแบบระหว่างเฟส (รูปที่ 2.6-ข) ,การลัดวงจรแบบระหว่างเฟสลงดิน (รูปที่ 2.6-ค) และการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (รูปที่ 2.6-ง) ซึ่งโดยทั่วไปค่ากระแสลัดวงจรจากการลัดวงจรแบบไม่สมดุลจะมีค่าน้อยกว่าการลัดวงจรแบบสมดุล แต่ในกรณีเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งใกล้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อลงดิน หรือมีค่าอิมพีแดนซ์องค์ประกอบลำดับศูนย์ต่ำ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน อาจให้ค่ากระแสลัดวงจรมากกว่าการลัดวงจรแบบสมดุลได้ ดังนั้นการคำนวณการเกิดลัดวงจรแบบไม่สมดุลจึงต้องมีการพิจารณาไปด้วยเสมอ โดยในการคำนวณการลัดวงจรแบบไม่สมดุลนี้จะพิจารณาองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วน คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component) องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Component) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) โดยไม่คิดผลการเหนี่ยวนำระหว่างอุปกรณ์ และพิจารณาให้ องค์ประกอบลำดับบวก เท่ากับ องค์ประกอบลำดับลบ [2]**

รูปแบบการลัดวงจรที่ให้ค่ากระแสลัดวงจรค่าต่ำสุดนั้นไม่แน่นอน แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการลัดวงจรแบบระหว่างเฟส [4] แต่เพื่อความสมบูรณ์จึงควรคำนวณกระแสลัดวงจรของการ

ลัดวงจรทุกรูปแบบ แล้วจึงพิจารณาว่า ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดนั้นมีค่าเท่าใด เกิดจากการลัดวงจรรูปแบบใด



รูปที่ 2.6 ลักษณะการลัดวงจรประเภทต่างๆ

จากการแบ่งรูปแบบการลัดวงจรเป็น 2 แบบใหญ่คือ การลัดวงจรแบบสมดุลกับการลัดวงจรแบบไม่สมดุล ดังกล่าวข้างต้นนั้น ความสัมพันธ์ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรสามารถแสดงได้โดยแบ่งตามรูปแบบการลัดวงจรเป็น 4 แบบตามรูปที่ 2.6 โดยมีความสัมพันธ์ในการคำนวณในแต่ละรูปแบบดังนี้

2.10.1 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three Phase Short Circuit)

โดยทั่วไปการลัดวงจรแบบนี้จะให้กระแสลัดวงจรสูงสุด [5] ดังนั้นในการออกแบบระบบไฟฟ้าทุกครั้งต้องมีการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลเสมอ

ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทการลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (กระแสลัดวงจรที่มาจากระบบไฟฟ้า) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ในการลัดวงจรประเภทใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะมีความสัมพันธ์ในการคำนวณชนิดของกระแสลัดวงจรที่มาจากผลของเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ มอเตอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรสามเฟสสมมูลเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทโกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชนิดกระแสลัดวงจร	ลัดวงจรโกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
I_{k3}''	$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (2.17)$
i_{p3}	$i_{p3} = \chi\sqrt{2}I_{k3}'' \quad (2.18)$
I_{b3}	$I_{b3} = I_{k3}'' \quad (2.19)$
I_{k3}	$I_{k3} = I_{b3} = I_{k3}'' \quad (2.20)$
i_{DC3}	$i_{DC3} = \sqrt{2}I_{k3}'' e^{-2\pi ft \frac{R_k}{X_k}} \quad (2.21)$

โดย Z_k คือ อิมพีแดนซ์สมมูลองค์ประกอบลำดับบวก ที่ตำแหน่งลัดวงจร k ซึ่ง

$$Z_k = R_k + jX_k$$

$$\chi \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_k/X_k}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรสามเฟสสมมูลอันเป็นผลจากเครื่องจักรกลหมุน (มอเตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ชนิด กระแส ลัดวงจร	ลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	
	(ผลจากมอเตอร์)	(ผลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)
I''_{k3M} , I''_{k3G}	$I''_{k3M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_{kM}^2 + X_{kM}^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{kM}} \quad (2.22)$	$I''_{k3G} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_{kG}^2 + X_{kG}^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{kG}} \quad (2.23)$
i_{p3M} , i_{p3G}	$i_{p3M} = \chi_M \sqrt{2} I''_{k3M} \quad (2.24)$	$i_{p3G} = \chi_G \sqrt{2} I''_{k3G} \quad (2.25)$
I_{b3M} , I_{b3G}	$I_{b3M} = \mu q I''_{k3M} \quad (2.26)$	$I_{b3G} = \mu I''_{k3G} \quad (2.27)$
I_{k3M} , I_{k3G}	$I_{k3M} = 0 \quad (2.28)$	$I_{k3G \max} = \lambda_{\max} I_{rG} \quad (2.29)$ $I_{k3G \min} = \lambda_{\min} I_{rG} \quad (2.30)$
i_{DC}	$i_{DC} = \sqrt{2} I''_{k3M} e^{-2\pi f t \frac{R_{kM}}{X_{kM}}} \quad (2.31)$	$i_{DC} = \sqrt{2} I''_{k3G} e^{-2\pi f t \frac{R_{kG}}{X_{kG}}} \quad (2.32)$

หมายเหตุ ในการคำนวณสามารถละเลยผลของมอเตอร์เมื่อ มอเตอร์ดังกล่าวมีค่ากระแสฟักัดรวม น้อยกว่า 1 % ของกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นที่ตำแหน่งเกิดลัดวงจรโดยไม่มีผลของมอเตอร์

- โดย
- Z_{kM}, Z_{kG} คือ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่จุดเกิดการลัดวงจร โดยรวมค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($Z_{kM} = R_{kM} + jX_{kM}$ และ $Z_{kG} = R_{kG} + jX_{kG}$) ตามลำดับ
 - $\chi_M \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_{kM}/X_{kM}}$
 - $\chi_G \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_{kG}/X_{kG}}$
 - μ จะขึ้นกับค่า Minimum Time Delay (t_{\min}) และอัตราส่วนของกระแสลัดวงจรจากอุปกรณ์จักรกลหมุนต่อค่ากระแสฟักัดของอุปกรณ์จักรกลหมุนนั้น เช่น ในกรณีของมอเตอร์ก็คือ I''_{kM}/I_{rM} ซึ่งความสัมพันธ์ของค่า μ มีดังนี้

$$\mu = 0.84 + 0.26e^{-0.26I_{kM}''/I_{rM}} \text{ เมื่อ } t_{\min} = 0.02s \quad (2.33)$$

$$\mu = 0.71 + 0.51e^{-0.30I_{kM}''/I_{rM}} \text{ เมื่อ } t_{\min} = 0.05s \quad (2.34)$$

$$\mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32I_{kM}''/I_{rM}} \text{ เมื่อ } t_{\min} = 0.10s \quad (2.35)$$

$$\mu = 0.56 + 0.94e^{-0.38I_{kM}''/I_{rM}} \text{ เมื่อ } t_{\min} \geq 0.25s \quad (2.36)$$

5. ค่า q จะขึ้นกับค่า Minimum Time Delay (t_{\min}) และค่า m คือค่ากำลังใช้งานพิกัดของ มอเตอร์ (MW) ต่อคู่ของขั้ว ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

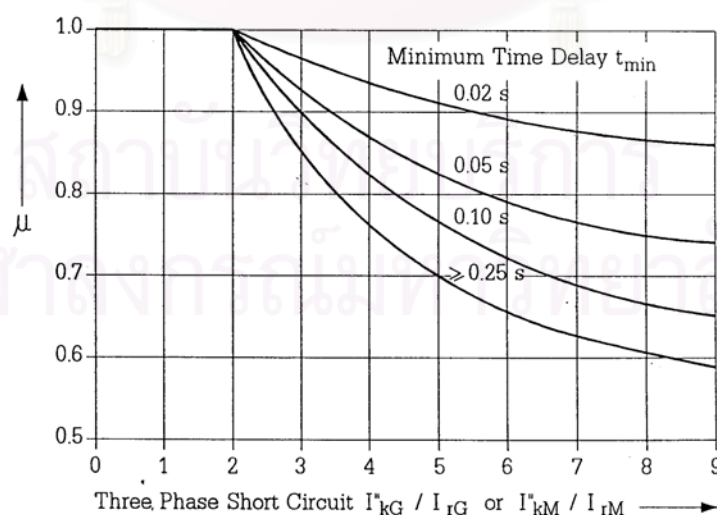
$$q = 1.03 + 0.12 \ln m \text{ เมื่อ } t_{\min} = 0.02s \quad (2.37)$$

$$q = 0.79 + 0.12 \ln m \text{ เมื่อ } t_{\min} = 0.05s \quad (2.38)$$

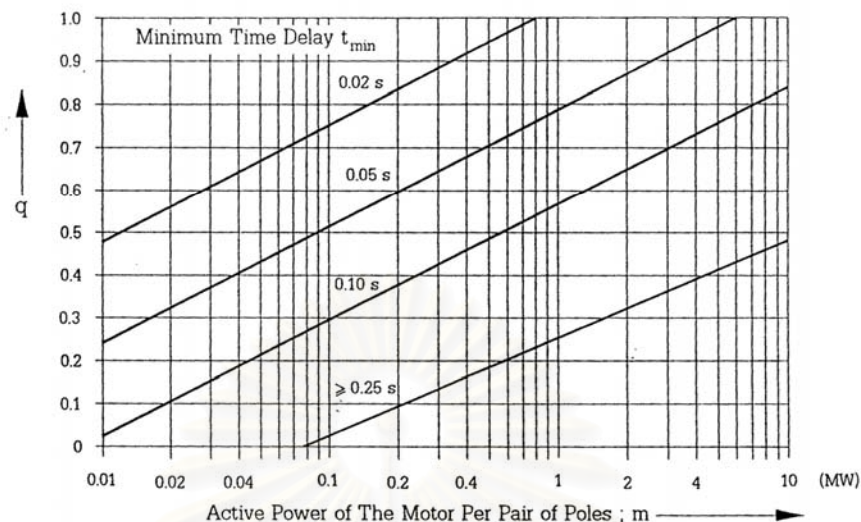
$$q = 0.57 + 0.12 \ln m \text{ เมื่อ } t_{\min} = 0.10s \quad (2.39)$$

$$q = 0.26 + 0.10 \ln m \text{ เมื่อ } t_{\min} \geq 0.25s \quad (2.40)$$

และถ้าค่า t_{\min} ที่พิจารณาไม่ตรงกับข้อกำหนดความสัมพันธ์ข้างต้น ให้ทำการประมาณระหว่างความสัมพันธ์ที่ t_{\min} อยู่ระหว่างข้อกำหนดนั้น หรือ Interpolation ระหว่างความสัมพันธ์ที่ t_{\min} อยู่ระหว่างข้อกำหนดนั้น และถ้าคำนวณได้ค่า q มากกว่า 1 ให้ใช้ค่า $q = 1$ แทน [2] ค่า μ และ q ได้ดังกราฟในรูปที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8



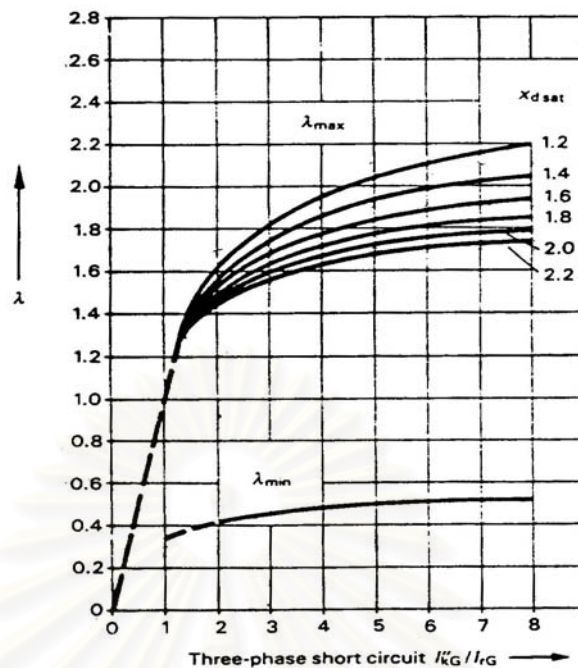
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่า μ ต่อค่าอัตราส่วน I_{kG}''/I_{rG} หรือ I_{kM}''/I_{rM} [2]



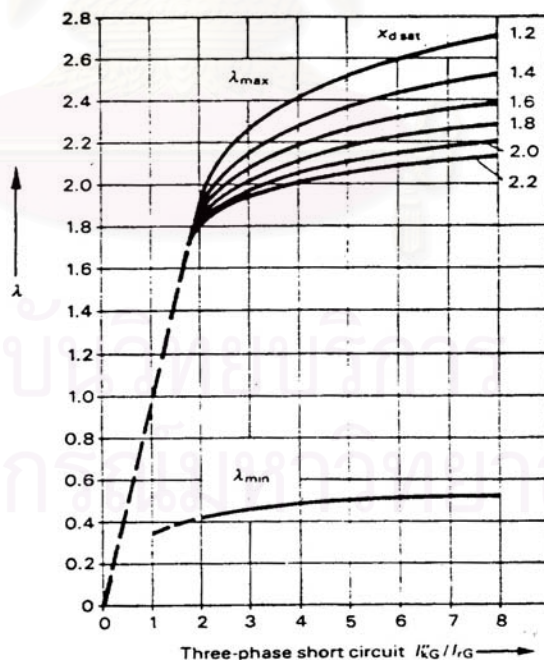
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่า q ต่อ กำลังจริงของมอเตอร์หนึ่งคู่ขั้ว [2]

ค่าตัวคูณ λ_{\max} และ λ_{\min} ที่ใช้สำหรับคำนวณค่ากระแสลัดวงจรอยู่ตัวที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ถึงรูปที่ 2.12 ซึ่งแบ่งตามประเภทของและค่าอิมพีแดนซ์อิมิตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

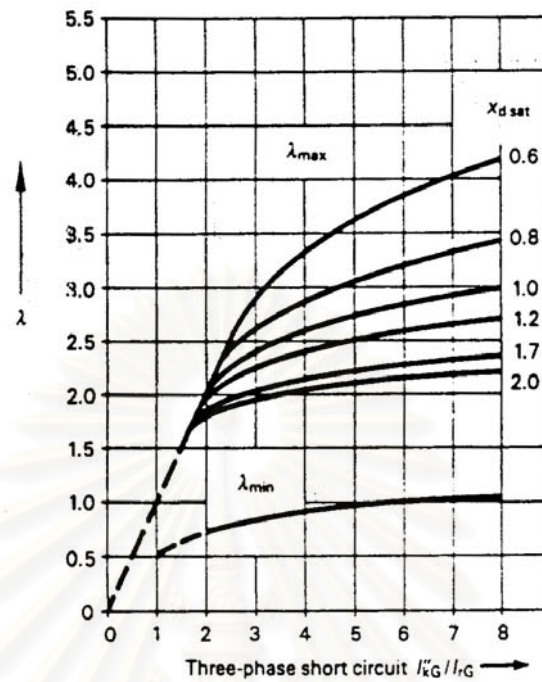
สำหรับการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรอยู่ตัวที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในความสัมพันธ์ที่ (2.29) และ (2.30) นั้น ในมาตรฐาน IEC 909 กล่าวว่า ค่ากระแสลัดวงจรอยู่ตัวขึ้นอยู่กับผลของความอิมิตัวและวิธีการตัดต่อสวิตช์ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นการคำนวณที่ได้จะไม่แม่นยำเท่าการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรมาตรฐานเริ่มต้น และความสัมพันธ์ที่ (2.29) และ (2.30) นั้นเป็นการประมาณค่ากระแสลัดวงจรอยู่ตัวมากที่สุดและน้อยสุดที่เพียงพอ (Sufficient Estimate) ซึ่งมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรืออุปกรณ์จักรกลเชิงโครนัส 1 ตัว [2]



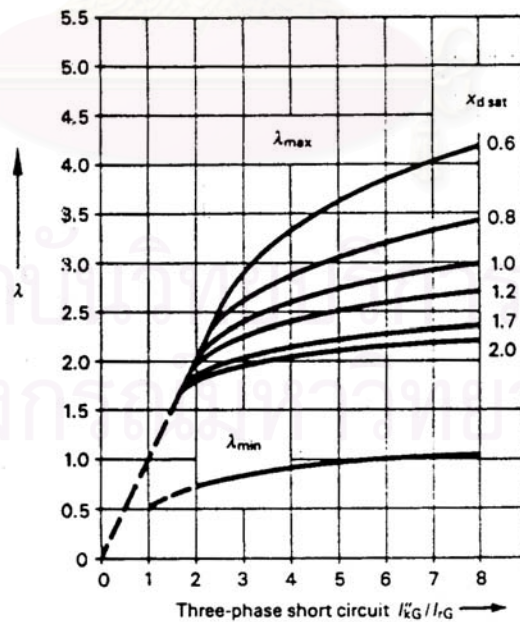
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงค่า λ_{\max} และ λ_{\min} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบใบพัด (Turbine Generator) ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 1.3 เท่าของค่าพิกัดที่โหลดพิกัดและที่ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) พิกัด



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงค่า λ_{\max} และ λ_{\min} ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบใบพัด (Turbine Generator) ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 1.3 เท่าของค่าพิกัดที่โหลดพิกัดและที่ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) พิกัด



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่า λ_{\max} และ λ_{\min} ของเครื่องจักรกลแบบ Salient Pole ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 1.6 เท่าของค่าพิกัด



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงค่า λ_{\max} และ λ_{\min} ของเครื่องจักรกลแบบ Salient Pole ซึ่งมีค่าแรงดันกระตุ้น (Excitation-Voltage) สูงสุดได้เท่ากับ 2.0 เท่าของค่าพิกัด

2.10.2 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Short Circuit)

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน เป็นการลัดวงจรที่เกิดบ่อยที่สุด และค่ากระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแบบนี้มีช่วงกว้างมาก ซึ่งในบางกรณีมีค่าสูงกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล [5]

ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (กระแสลัดวงจรที่มาจากระบบไฟฟ้า) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดินเฟสเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชนิดกระแสลัดวงจร	ลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
I_{k1}''	$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ Z_{k(1)} + Z_{k(2)} + Z_{k(0)} } = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ 2Z_{k(1)} + Z_{k(0)} } \quad (2.41)$
i_{p1}	$i_{p1} = \chi\sqrt{2}I_{k1}'' \quad (2.42)$
I_{b1}	$I_{b1} = I_{k1}'' \quad (2.43)$
I_{k1}	$I_{k1} = I_{b1} = I_{k1}'' \quad (2.44)$
i_{DC1}	$i_{DC1} = \sqrt{2}I_{k1}'' e^{-2\pi ft \frac{R_k}{X_k}} \quad (2.45)$

โดย $Z_{k(1)}, Z_{k(2)}, Z_{k(0)}$ คืออิมพีแดนซ์สมมูลองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ ณ ตำแหน่งเกิดลัดวงจร ตามลำดับ

สำหรับกรณีของการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์ในการคำนวณชนิดของกระแสลัดวงจรที่มาจากผลของเครื่องจักรกลหมุนดังตารางที่ 2.4 คล้ายกัน แตก

ต่างเพียงแต่เปลี่ยนตัวแปรจาก กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบสามเฟส (I_{k3}'') เป็นความสัมพันธ์กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (I_{k1}'') เท่านั้น

2.10.3 การลัดวงจรแบบระหว่างเฟส (Phase to Phase Short Circuit)

โดยทั่วไป ค่ากระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแบบระหว่างเฟสจะน้อยกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล [5] ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรแบบนี้พิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันด้วย

ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบระหว่างเฟสเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทการลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (กระแสลัดวงจรที่มาจากระบบไฟฟ้า) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรระหว่างเฟส

ชนิดกระแสลัดวงจร	ลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
I_{k2}''	$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{ Z_{k(1)} + Z_{k(2)} } = \frac{cU_n}{2 Z_{k(1)} } \quad (2.46)$
i_{p2}	$i_{p2} = \chi\sqrt{2}I_{k2}'' \quad (2.47)$
I_{b2}	$I_{b2} = I_{k2}'' \quad (2.48)$
I_{k2}	$I_{k2} = I_{b2} = I_{k2}'' \quad (2.49)$
i_{DC2}	$i_{DC2} = \sqrt{2}I_{k2}'' e^{-2\pi f \frac{R_k}{X_k}} \quad (2.50)$

สำหรับกรณีของการลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์ในการคำนวณชนิดของกระแสลัดวงจรที่มาจากผลของเครื่องจักรกลหมุนดังตารางที่ 2.4 เหมือนกัน เพียงแต่เปลี่ยนตัวแปรจากกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบสามเฟส (I_{k3}'') เป็นกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบระหว่างเฟส (I_{k2}'') เท่านั้น

2.10.4 การลัดวงจรแบบระหว่างเฟสลงดิน (Phase to Phase to Ground Short Circuit)

การลัดวงจรแบบนี้ จะมีค่าอยู่ระหว่างการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล และการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน แต่โดยทั่วไปแล้ว การลัดวงจรแบบนี้จะไม่เกิดในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ [5]

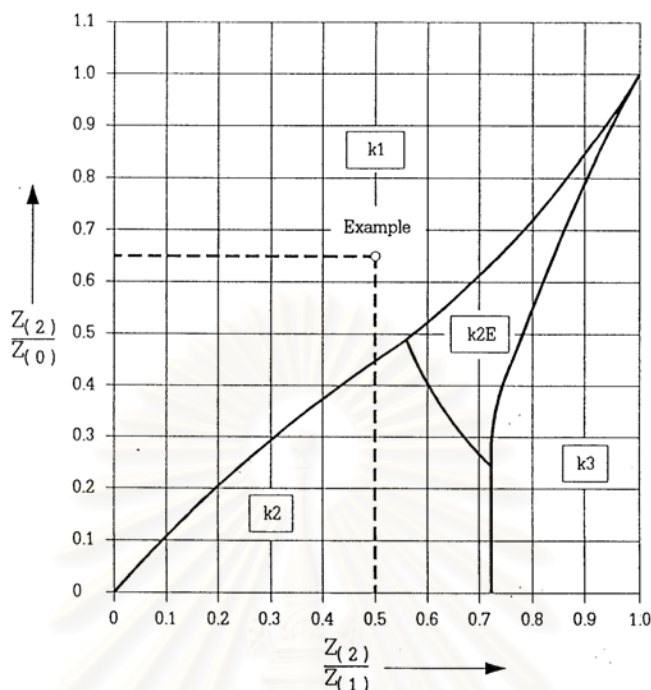
ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบระหว่างเฟสลงดินเมื่อพิจารณาการลัดวงจรประเภทการลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (กระแสลัดวงจรที่มาจากระบบไฟฟ้า) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน

ชนิดกระแสลัดวงจร	ลัดวงจรไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
I''_{k2E} (ไหลในเฟส)	$I''_{k2E} = cU_n \frac{ 1 + a^2 + Z_{k(0)}/Z_{k(1)} }{ Z_{k(1)} + 2Z_{k(0)} } \quad (2.51)$
I''_{kE2E} (ไหลลงดิน)	$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ Z_{k(1)} + 2Z_{k(0)} } \quad (2.52)$
i_{p2E}	$i_{p2E} = \chi\sqrt{2}I''_{k2E} \quad (2.53)$
I_{b2E}	$I_{b2E} = I''_{k2E} \quad (2.54)$
I_{k2E}	$I_{k2E} = I_{b2E} = I''_{k2E} \quad (2.55)$
i_{DC}	$i_{DC} = \sqrt{2}I''_k e^{-2\pi ft \frac{R_k}{X_k}} \quad (2.56)$

และการลัดวงจรประเภทใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็พิจารณาเหมือนกับรูปแบบการลัดวงจรอื่นๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

จากรูปแบบการลัดวงจรต่างๆข้างต้นนั้น การพิจารณาว่าการลัดวงจรแบบใด จะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรมากที่สุดนั้น ในมาตรฐาน IEC 909 ได้แสดงกราฟในการพิจารณาเรื่องดังกล่าวในรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถยกตัวอย่างได้ เช่น ถ้า $\frac{Z_{(2)}}{Z_{(1)}}$ เท่ากับ 0.5 และ $\frac{Z_{(2)}}{Z_{(0)}}$ เท่ากับ 0.65 จะเห็นได้ว่าการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน จะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรมากที่สุด



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสลัดวงจรสูงสุดกับค่าองค์ประกอบลำดับต่างๆ [2]

2.11 การคำนวณกระแสลัดวงจรอสมมาตร (Asymmetrical Short Circuit Current)

จากที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่า กระแสลัดวงจรประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ องค์ประกอบไฟตรง และองค์ประกอบไฟสลับ ซึ่งในหัวข้อที่ผ่านมา ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ข้างต้นนั้น จะคิดเฉพาะส่วนขององค์ประกอบไฟสลับเท่านั้น ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จะเป็นกระแสลัดวงจรสมมาตร (Symmetrical Short Circuit Current) แต่ในการใช้งานบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงผลขององค์ประกอบไฟตรงด้วย เช่น ในกรณีคำนวณกระแสลัดวงจรอสมมาตร (Asymmetrical Short Circuit Breaking Current) เพื่อใช้พิจารณาเลือกฟิวส์หรือกิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง [7,8,19] ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลขององค์ประกอบไฟตรงแล้วค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จะเป็นกระแสลัดวงจรแบบอสมมาตร

ค่ากระแสลัดวงจรอสมมาตรสามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้ [2]

$$\%i_{dc} = \frac{i_{dc}}{I_{AC}} \times 100\% = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{sym} \cdot e^{-\frac{2\pi f t R}{X}}}{\sqrt{2} \cdot I_{sym}} \times 100\% = e^{-\frac{2\pi f t R}{X}} \times 100\% \quad (2.57)$$

$$I_{asym} = I_{sym} \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\%i_{dc}}{100} \right)^2} \quad (2.58)$$

โดย	I_{asym}	คือ ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร RMS (Asymmetrical Short Circuit Current)
	I_{sym}	คือ ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร RMS (Symmetrical Short Circuit Current)
	I_{AC}	คือ ค่าองค์ประกอบไฟสลับ
	$\%i_{dc}$	คือ เปอร์เซนต์ขององค์ประกอบไฟตรงเทียบกับองค์ประกอบไฟสลับ

มาตรฐาน IEC 909 ไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรในรูปของฟังก์ชันเวลา แต่ในกรณีที่ต้องการพิจารณากระแสลัดวงจรจากอุปกรณ์จักรกล (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ มอเตอร์) โดยละเอียดแล้วสามารถพิจารณาได้ตามความสัมพันธ์ที่ (2.59) ดังนี้ [8]

$$i(t) = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \sin(\omega t) - \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{\frac{-t}{T_d''}} \quad (2.59)$$

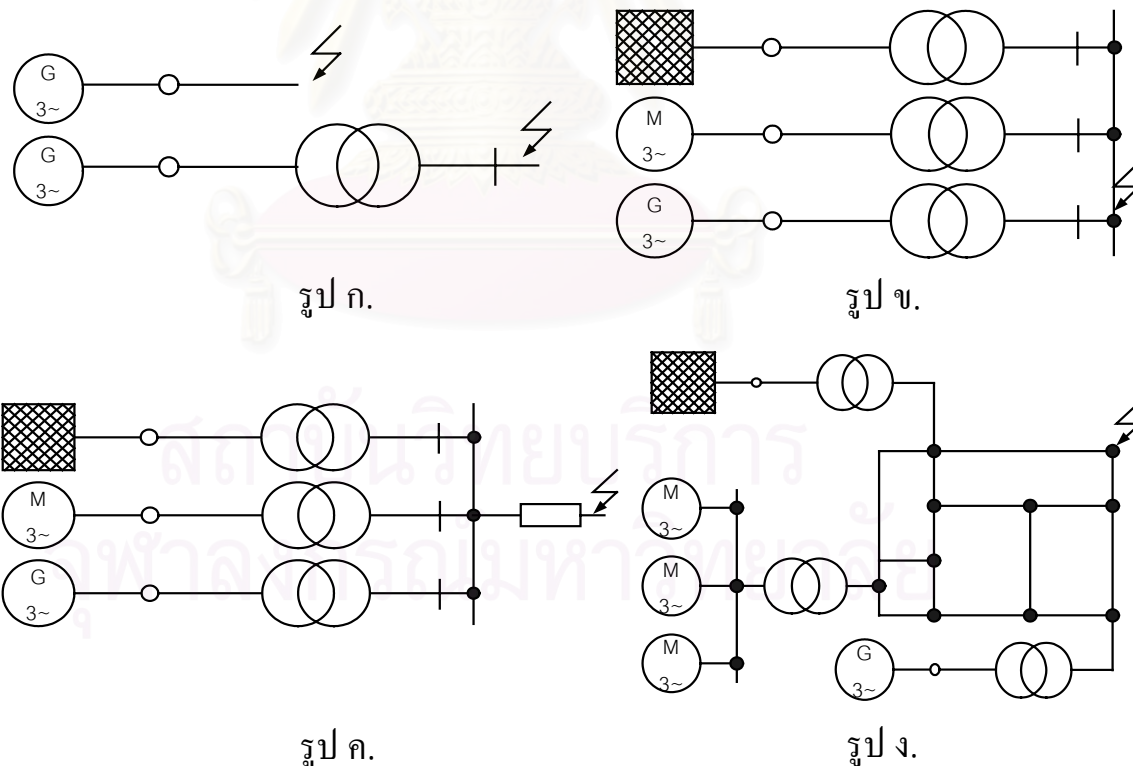
ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่มาจากอุปกรณ์จักรกล ที่เวลาใดๆได้ ซึ่งในเอกสารอ้างอิง [8] แนะนำว่าถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลางติดตั้งในตำแหน่งที่มีอัตราส่วน X/R สูง จำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์ข้างต้นคำนวณกระแสลัดวงจรจากอุปกรณ์จักรกล เพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน [7] แต่จะมีความยุ่งยากในเรื่องของข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการคำนวณตามความสัมพันธ์ที่ (2.59) ดังนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาจึงไม่คำนึงถึงกรณีนี้

2.12 การพิจารณาการเกิดลัดวงจรกรณีมีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรมากกว่าหนึ่งแหล่ง

ในกรณีมีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรมากกว่าหนึ่งแหล่งนั้น มาตรฐาน IEC 909 ได้แสดงถึงลักษณะการต่อระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรไว้ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.14 โดยในกรณีของรูปที่ 2.14 ก. และรูปที่ 2.14 ข. นั้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเกิดลัดวงจร F แล้ว การไหลของกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรแต่ละแหล่งไม่มีเส้นทางร่วมกัน หรือไม่มีการไหลของกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรหลายๆแหล่งผ่านอิมพีแดนซ์ร่วมกัน (Common Impedance) ดังนั้น ในการคำนวณกระแสลัดวงจรจากแต่ละแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร

จรใดๆลักษณะนี้ จึงสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรโดยแยกการคำนวณกระแสลัดวงจรจากที่ละแห่งกำเนิดกระแสลัดวงจร แล้วรวมค่ากระแสลัดวงจรจากแต่ละแห่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่มีอยู่เข้าด้วยกัน ซึ่งในมาตรฐาน IEC 909 ได้แนะนำว่า สามารถนำขนาดกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรมาบวกกันแบบพีชคณิตได้เลยดังในรูปที่ 2.15 โดยยังคงให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องอยู่ [2]

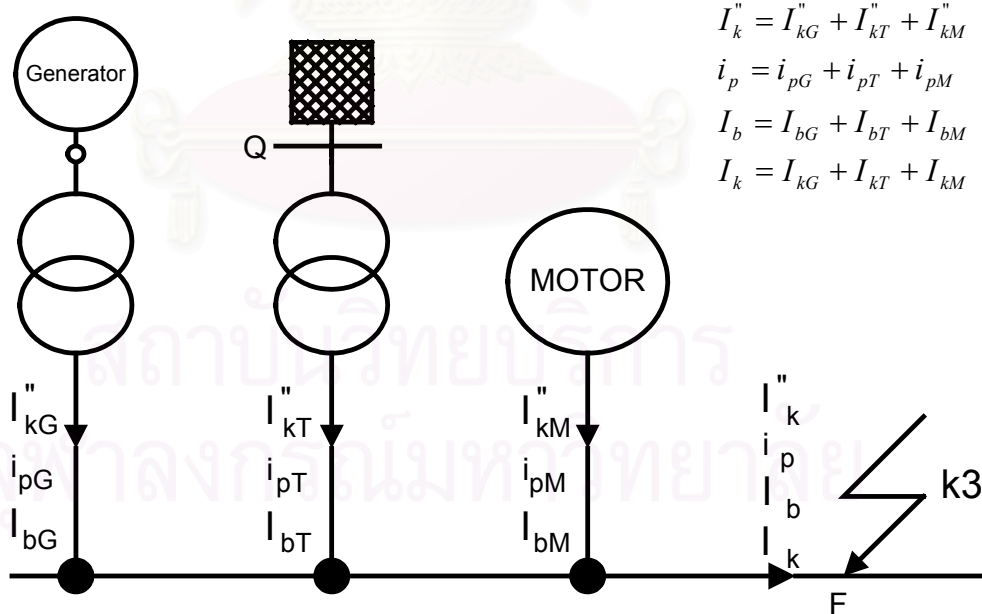
ส่วนกรณีลักษณะการต่อระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรในรูปที่ 2.14 ค. และรูปที่ 2.14 ง. นั้น เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเกิดลัดวงจร F แล้ว จะเห็นได้ว่ามีเส้นทางการไหลของกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดๆร่วมกัน หรือมีการไหลของกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรหลายๆแหล่งผ่านอิมพีแดนซ์ร่วมกัน ดังนั้น ในการคำนวณกระแสลัดวงจรจากแต่ละแห่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดๆที่มีอิมพีแดนซ์ร่วมกันในระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดๆแล้ว ให้พิจารณาคำนวณกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรดังกล่าวนั้นพร้อมกัน



รูปที่ 2.14 รูปแบบต่างๆการต่อของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรที่เกิดการลัดวงจรในบริเวณที่มีการไหลของกระแสลัดวงจรผ่านอิมพีแดนซ์ร่วมกันระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดๆ หรือการต้องพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรพร้อมกันนั้น จะต้องพิจารณาว่า แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดมีความสามารถในการสร้างกระแสลัดวงจร (Short Circuit Capacity) มากที่สุด ก็ใช้ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับแหล่งกำเนิดลัดวงจรนั้นในการคำนวณ เช่น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความสามารถในการให้กระแสลัดวงจรมากกว่าแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรอื่น ก็พิจารณาใช้ความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรประเภทใกล้เคียงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาในขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้แล้วระบบไฟฟ้า (Network Feeder) จะมีความสามารถในการสร้างกระแสลัดวงจรมากที่สุด เพราะในระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันต่ำถึงปานกลางนั้น จะเป็นลักษณะของระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม (Industrial System) ซึ่งมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้น มักจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้ระบบไฟฟ้านั้น

เพื่อความเข้าใจที่ดีขึ้น ผู้อ่านสามารถศึกษาการคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรหลายแหล่งได้ในตัวอย่างการคำนวณบทที่ 6 ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจได้ดีขึ้น

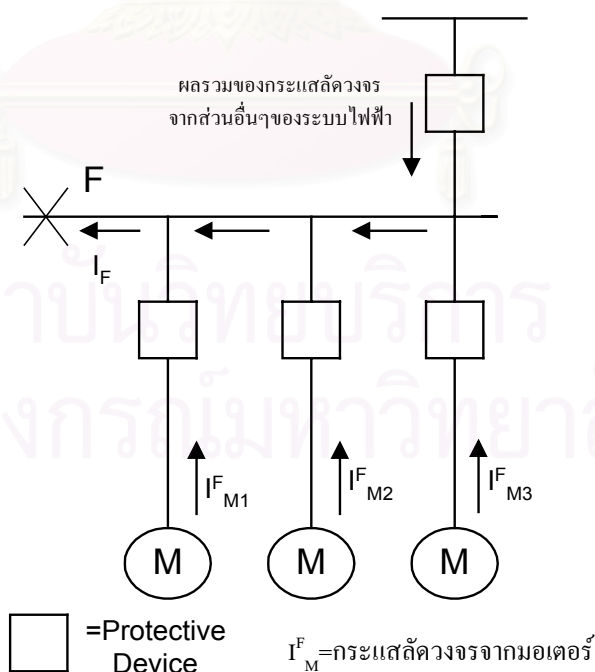


รูปที่ 2.15 การคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีมีแหล่งจ่ายไฟมากกว่า 1 แหล่ง โดยไม่มีอิมพีแดนซ์ร่วมกันระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร

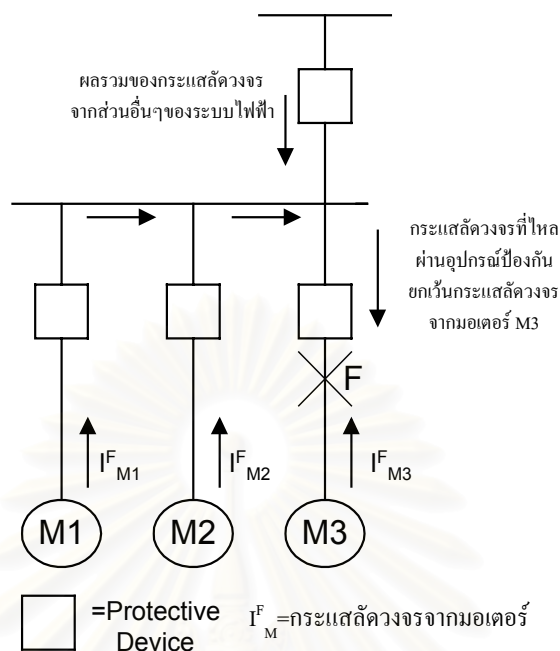
2.13 การพิจารณาระแสลัดวงจรระหว่างการเลือกค่าพิกัดกับการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

จากเอกสารอ้างอิง [4] ได้กล่าวถึงวิธีการในการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจร เพื่อใช้ในการเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันไว้ โดยแสดงดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 โดยข้อแตกต่างระหว่างทั้ง 2 กรณี คือ เมื่อพิจารณาค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งที่บัสไหน ให้ใช้ค่ากระแสลัดวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งเท่ากับ I_{F3}^f เพราะเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส (Busbar) แล้วจะมีกระแสลัดวงจรไหลเข้ามาที่บัสดังกล่าว จากทุกๆ เส้นทางที่กระแสลัดวงจรสามารถไหลได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด จึงควรใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรรวมทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่บัสนั้นพิจารณา เพื่อแน่ใจได้ว่าอุปกรณ์ป้องกันจะไม่เสียหายเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรที่บัสซึ่งอุปกรณ์ป้องกันติดตั้งอยู่ แต่เมื่อพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรเพื่อปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้น ต้องใช้ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้น ซึ่งจากรูปที่ 2.17 ค่ากระแสลัดวงจรจะเท่ากับ $I_{F3}^f - I_{M5}^f$ หรือ เท่ากับกระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันหักลบกับกระแสลัดวงจรที่มาจากมอเตอร์ M5 นั้นเอง

ดังนั้น เมื่อทำการคำนวณกระแสลัดวงจร จึงต้องคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งสองกรณี เพื่อการพิจารณาเลือกใช้ค่ากระแสลัดวงจรอย่างถูกต้อง ซึ่งในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรได้ทั้ง 2 รูปแบบ



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร เพื่อใช้พิจารณาค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร เพื่อใช้พิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

นอกจากมาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร IEC 909 แล้วยังมีรายงานทางเทคนิค (Technical Report) ที่ใช้สนับสนุนการคำนวณกระแสลัดวงจรของมาตรฐาน IEC 909 อีกด้วย ซึ่งได้แก่

1. IEC 909-1 [9] อธิบายรายละเอียดที่มาของตัวคูณ (factor) ต่างๆ ที่ใช้ในมาตรฐาน IEC 909
2. IEC 909-2 [10] แสดงข้อมูลต่างๆของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งสามารถใช้ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ
3. IEC 909-4 [11] แสดงข้อมูลเพิ่มเติม รวมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909

บทที่ 3

อุปกรณ์ป้องกันและการเลือกค่าพิกัด

3.1 บทนำ

องค์ประกอบสำคัญที่สุดในระบบป้องกันไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ โดยอุปกรณ์ป้องกันอาจแบ่งเป็นประเภทที่ปรับตั้งการทำงานโดยไม่ต้องพิจารณาจัดลำดับการทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น เช่น รีเลย์ผลต่าง (Differential Relay) กับอีกประเภทหนึ่งคือต้องปรับตั้งโดยพิจารณาจัดลำดับการทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น เช่น รีเลย์กระแสเกิน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาเฉพาะอุปกรณ์ป้องกันที่มีการจัดลำดับการทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น

ในบทที่ 3 นี้จะได้กล่าวถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา คือ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ซึ่งได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ รวมไปถึงรีเลย์กระแสเกิน รวมทั้งข้อพิจารณาในการเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันโดยใช้ข้อมูลการศึกษากระแสลัดวงจร ซึ่งสามารถอธิบายและแบ่งอุปกรณ์ป้องกันตามระดับแรงดันใช้งานดังนี้

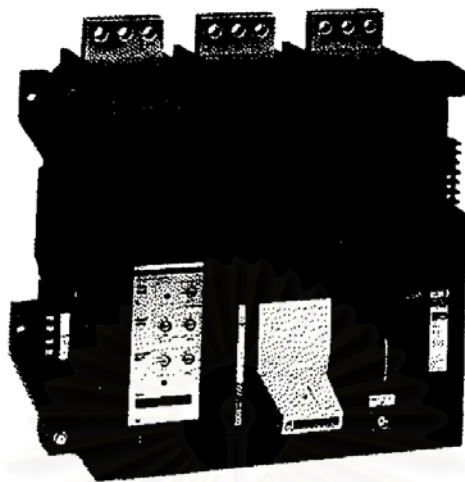
1. อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ
2. อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

3.2 อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่พิจารณาได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ และฟิวส์แรงดันต่ำ ซึ่งมีระดับแรงดันใช้งานอยู่ในช่วง 0 ถึง 1000 V [12,13] โดยคุณลักษณะและข้อพิจารณาในการเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน สามารถอธิบายตามประเภทอุปกรณ์ได้ดังนี้

3.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ (Low Voltage Circuit Breaker)

เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิด-เปิดวงจร ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งสามารถเปิดและปิดด้วยมือในสภาวะปกติ และเปิดวงจรอย่างอัตโนมัติเมื่อถึงค่าปรับตั้งที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

3.2.1.1 คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

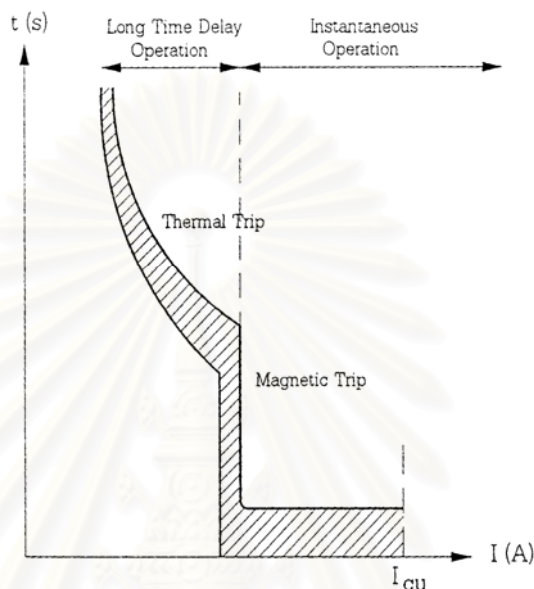
เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำมีคุณลักษณะในการทำงานขึ้นกับ หน่วยการทำงานตัดวงจร (Trip Unit) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ [14]

1. หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบ Thermal-Magnetic
2. หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์

1. หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบ Thermal-Magnetic

หน่วยการทำงานลักษณะนี้ มีคุณลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.2 โดยด้านซ้ายมือของกราฟจะแสดงผลตอบสนองทางความร้อนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่ระดับกระแสค่าต่ำและที่ระดับกระแสค่าสูง การตัดวงจรเป็นแบบอาศัยผลตอบสนองทางแม่เหล็กซึ่งอยู่ด้านขวามือของกราฟ การตัดวงจรแบบอาศัยผลตอบสนองทางความร้อนเกิดเมื่อแผ่นโลหะคู่ในเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้รับความร้อนจากกระแสที่ไหล แผ่นโลหะคู่จะขยายตัวและปลดล็อกของกลไกและทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำการเปิดวงจร โดยยิ่งกระแสมีค่ามาก เวลาในการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ยิ่งเร็วขึ้น และเมื่อกระแสมากจนถึงระดับการทำงานแบบอาศัยผลตอบสนองทางแม่เหล็ก กระแส

เกินที่เกิดขึ้นจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงแม่เหล็ก และปลดล๊อคกลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์อย่างทันที (Instantaneous)



รูปที่ 3.2 การทำงานตัดวงจรแบบ Thermal-Magnetic

2. หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์

เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีหน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์ มีคุณลักษณะการทำงานที่สามารถปรับได้ในส่วนย่อยต่างๆของกราฟคุณลักษณะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งส่วนย่อยต่างๆของกราฟการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

- Long-Time Pickup and Delay

ลักษณะการทำงานแบบนี้จำลองมาจากการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic ซึ่งมีจุดประสงค์ใช้ป้องกันกระแสเกินที่ซึ่งมีค่าไม่สูงนัก โดยค่า Long-Time Pickup นั้น เป็นระดับกระแส ที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเริ่มทำการตัดวงจร และค่า Long-Time Delay เป็นระยะเวลาที่เซอร์กิตเบรกเกอร์หน่วงเวลาไว้ก่อนจะตัดวงจร

ดังนั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการตัดวงจรเมื่อระดับกระแสที่ตรวจจับได้เกินค่า Long-Time Pickup และคงอยู่เป็นเวลานานถึงค่า Long-Time Delay

- Short-Time Pickup and Delay

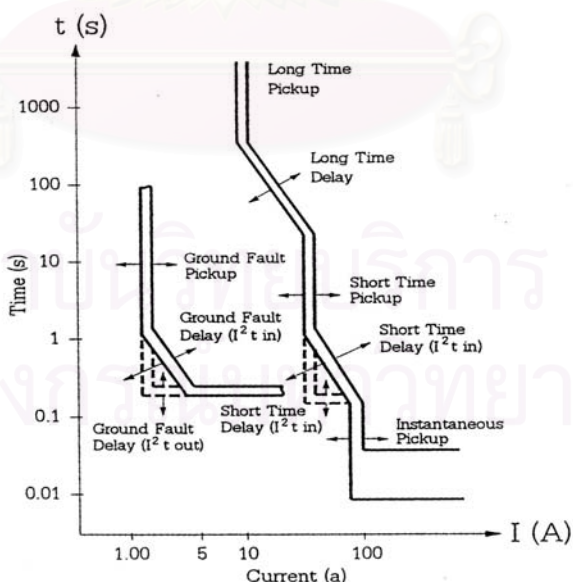
ลักษณะการทำงานแบบนี้คล้ายกับการทำงานแบบ Long-Time Pickup แตกต่างตรงที่การทำงานแบบนี้ใช้ป้องกันกระแสลัดวงจรซึ่งมีค่าสูง โดยค่า Short-Time Pickup เป็นค่าระดับกระแสลัดวงจรซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการตัดวงจร ซึ่งถ้าค่ากระแสลัดวงจรมันคง อยู่จนถึงระยะเวลา Short-Time Delay เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทำการตัดวงจร

- Instantaneous Pickup

ลักษณะการทำงานแบบนี้จำลองมาจากการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ Thermal-Magnetic ในส่วนการทำงานแบบอาศัยผลตอบสนองของทางแม่เหล็ก ซึ่งการตัดวงจรแบบนี้จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรทันทีเมื่อมีกระแสถึงระดับค่าที่ตั้งไว้

- Earth-Fault Pickup and Delay

ลักษณะการทำงานในส่วนนี้ เป็นการป้องกันการลัดวงจรลงดิน ซึ่งมีหลักการเหมือนการป้องกันในเฟสเพียงแต่จะตรวจจับกระแสที่ไหลลงดิน โดยการทำงานในส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนเริ่มทำงาน (Earth-Fault Pickup) กับส่วนหน่วงเวลา (Earth-Fault Delay) ซึ่งมีหลักการเหมือนกรณีการทำงานแบบ Long-Time และ Short-Time



รูปที่ 3.3 การทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์

3.2.1.2 การเลือกค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันไม่ว่าจะเป็นชนิดใดก็ตาม ปัจจัยที่สำคัญที่สุด คือ ความปลอดภัย อุปกรณ์ป้องกันที่เลือกใช้งานต้องได้มาตรฐานที่กำหนดไว้ รวมไปถึงค่าพิกัดที่เลือกใช้งาน ต้องเพียงพอกับสภาวะที่นำไปใช้

ข้อมูลค่าพิกัดพื้นฐานที่สำคัญในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้แก่ ค่าแรงดันพิกัด (Rated Voltage) และค่ากระแสพิกัด (Rated Current) นอกจากนี้ยังรวมถึงค่าความสามารถในการเปิดหรือปิดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันขณะเกิดกระแสลัดวงจร (Breaking and Making Short Circuit Capacity) ด้วย

ในเบื้องต้น ขออธิบายความหมายของค่าพิกัดทั่วไป รวมทั้งค่าพิกัดที่ต้องใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรในการพิจารณาดังนี้

1. ค่าแรงดันพิกัด (Rated Voltage)

ค่าแรงดันพิกัด คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าใช้งานสูงสุดของอุปกรณ์ ซึ่งต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งาน เช่น ฟิวส์ที่มีแรงดันพิกัด 600 V สามารถนำไปใช้ได้กับวงจรระดับแรงดัน 380 V เป็นต้น

2. ค่ากระแสพิกัด (Rated Current)

ค่ากระแสพิกัด คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์ป้องกันใช้งานในสภาวะปกติ โดยอุปกรณ์ป้องกันทุกประเภทจะมีค่ากระแสพิกัดที่ระบุชัดเจน การเลือกค่ากระแสพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน ต้องพิจารณาถึงลักษณะของโหลดที่อุปกรณ์ป้องกันนั้นป้องกันอยู่ ซึ่งไม่ควรเกินค่ากระแสใช้งานปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น เช่น ถ้าสายไฟฟ้ามีพิกัดในการนำกระแสเท่ากับ 20 A ฟิวส์ที่มีขนาด 20 A ควรเป็นขนาดใหญ่ที่สุดที่ใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม มีบางกรณีที่ค่ากระแสพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันมีค่าเกินค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ถูกป้องกัน เช่น ในกรณีของมอเตอร์นั้น อาจใช้ฟิวส์ชนิดธรรมดาขนาด 175% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ เพื่อเพื่อผลจากกระแสสตาร์ทของมอเตอร์

3. ค่าความสามารถในการตัดวงจร (Breaking Short Circuit Current Capacity)

ค่าความสามารถในการตัดวงจร คือ ระดับกระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันพิกัด อุปกรณ์ป้องกันซึ่งมีหน้าที่เปิดวงจร สามารถเปิดหรือตัดวงจรที่มีกระแสลัดวงจรไหลอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

4. ค่าความสามารถในการปิดวงจร (Making Short Circuit Current Capacity)

ค่าความสามารถในการปิดวงจร คือ ระดับกระแสลัดวงจรที่ระดับแรงดันพิกัดซึ่ง อุปกรณ์ป้องกันที่สามารถปิดวงจรได้อย่างเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น สามารถทำการปิดวงจรขณะมีกระแสลัดวงจรไหลได้โดยอุปกรณ์ป้องกันไม่เกิดระเบิด

ดังนั้นในกรณีของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำนั้น ค่าพิกัดจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60947-2 [12] ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวใช้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์หรืออุปกรณ์ประกอบของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีค่าแรงดันพิกัดระหว่างสายที่ไม่เกิน 1000 V_{AC} หรือ 1500 V_{DC} นี้เหมาะสำหรับใช้งานโดยผู้มีความรู้ในการติดตั้งหรือปรับแต่งค่าต่างๆของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำที่ใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรพิจารณาในที่นี้มีดังนี้

- **พิกัดกระแสปิดวงจร (I_{cm})** หมายถึง พิกัดกระแสลัดวงจรซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทำการปิดวงจรได้หรือค่าความสามารถในการปิดวงจร ซึ่งใช้ค่ากระแสลัดสูงสุด (i_p) ในการพิจารณา
- **พิกัดการตัดกระแสลัดวงจรสูงสุด (I_{cu})** หมายถึง พิกัดการตัดกระแสลัดวงจรหรือค่าความสามารถในการตัดวงจรที่ไม่คำนึงถึงความสามารถในการรับกระแสใช้งานอย่างต่อเนื่องภายหลังจากทดสอบ คือหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจเสียหายหลังการตัดวงจร
- **พิกัดการตัดกระแสลัดวงจรใช้งาน (I_{cs})** หมายถึง พิกัดการตัดกระแสลัดวงจรหรือค่าความสามารถในการตัดวงจรที่คำนึงถึงความสามารถในการรับกระแสใช้งานปกติอย่างต่อเนื่อง คือภายหลังจากการแยกวงจรแล้ว เซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงใช้งานได้อย่างปกติ ภายหลังจากทดสอบ ซึ่งโดยปกติจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ ของ I_{cu} เช่น $I_{cs} = 75\% I_{cu}$ เป็นต้น

ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาเลือกฟิวส์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกฟิวส์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

กระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าฟิวส์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ			
ค่าฟิวส์การตัดกระแสลัดวงจร (I_{cu}, I_{cs})		ค่าฟิวส์กระแสปิดวงจร (I_{cm})	
กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด	กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด
I_b	—	i_p	—

3.2.2 ฟิวส์แรงดันต่ำ (Low Voltage Fuses)

ฟิวส์ คืออุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่มีหลักการทำงานที่ว่า เมื่อมีกระแสค่าสูงไหลผ่าน ฟิวส์จะหลอมละลายอย่างรวดเร็วและเปิดวงจรออก โดยความเร็วในการหลอมละลายจะขึ้นกับปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน นอกจากนี้ คุณลักษณะของฟิวส์จะเสถียร ดังนั้น ฟิวส์จึงไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาหรือตรวจสอบเหมือนเซอร์กิตเบรกเกอร์ [15]



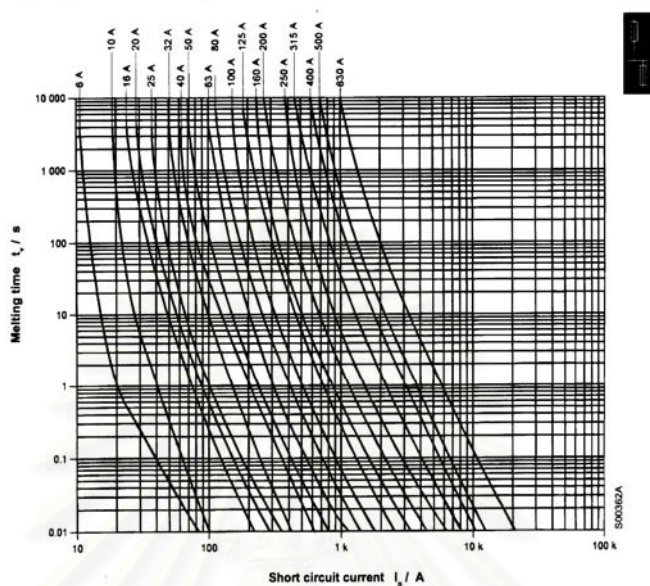
รูปที่ 3.4 ฟิวส์แรงดันต่ำ

3.2.2.1 คุณลักษณะของฟิวส์แรงดันต่ำ

คุณลักษณะการทำงานของฟิวส์แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดยเมื่อเกิดกระแสเกินที่มีค่าต่ำ ฟิวส์จะใช้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อหลอมละลายหรือเปิดวงจร แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้ากระแสเกินมีค่าสูง ฟิวส์จะหลอมละลายอย่างรวดเร็ว หรือเปิดวงจรอย่างรวดเร็วนั่นเอง ดังนั้น เวลาในการเปิดวงจรของฟิวส์จึงเป็นฟังก์ชันกับขนาดของกระแสเกินที่ฟิวส์ได้รับ

OFAA -fuses, melting times

Values are valid also for industrial fuses OFAA...H20.



รูปที่ 3.5 คุณสมบัติการทำงานของฟิวส์แรงดันต่ำ

3.2.2.2 การเลือกค่าพิกิตของฟิวส์แรงดันต่ำ

ค่าพิกิตของฟิวส์แรงดันต่ำจะอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC60269-1 [13] ซึ่งค่าพิกิตของฟิวส์แรงดันต่ำที่ใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรพิจารณาเลือกฟิวส์มีดังนี้

- **พิกิตกระแสลัดวงจร (I_b)** คือ ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด ซึ่งฟิวส์สามารถทำการตัดวงจรได้อย่างปลอดภัย โดยชนิดของกระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาคือค่ากระแสลัดวงจร (I_b) ที่ได้

ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาเลือกฟิวส์แรงดันต่ำแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกพิกิตฟิวส์แรงดันต่ำ

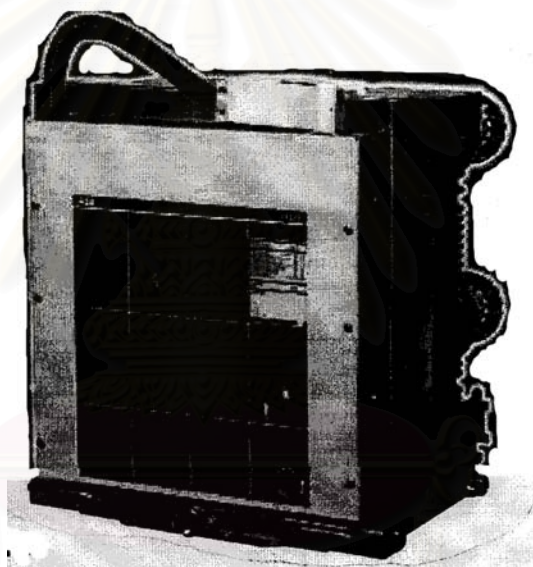
กระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าพิกิตฟิวส์แรงดันต่ำ			
ค่าพิกิตการตัดกระแสลัดวงจร (I_b)		ค่าพิกิตกระแสลัดวงจร	
กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด	กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด
I_b	—	—	—

3.3 อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (1kV ถึง 35 kV) ที่พิจารณาได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง ฟิวส์แรงดันปานกลาง รวมไปถึงรีเลย์ โดยคุณลักษณะและข้อพิจารณาในการเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.3.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง (Medium Voltage Circuit Breaker)

คุณสมบัติการทำงานโดยทั่วไปของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง คล้ายกับ เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ แตกต่างที่ระดับแรงดันใช้งานและข้อกำหนดในการเลือกค่าพิกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งมาตรฐานที่ใช้พิจารณากับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลางคือ IEC 56 [7]



รูปที่ 3.6 เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง

3.3.1.1 คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง

โดยทั่วไป คุณลักษณะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลางจะถูกควบคุมการทำงานโดย หน่วยควบคุมการทำงาน ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [16] คือ

1. หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์
2. รีเลย์ (Relay)

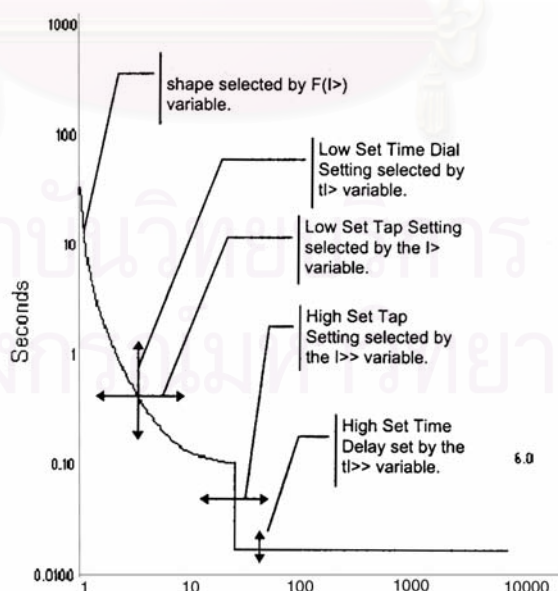
1. หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์

หน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์ในที่นี้จะเหมือนกับหน่วยการทำงานตัดวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ ดังนั้นจึงใช้รายละเอียดดังข้างต้น

2. รีเลย์

รีเลย์ คือ อุปกรณ์ป้องกันที่ตรวจสอบความผิดปกติของระบบไฟฟ้าซึ่งรวมไปถึงกระแสลัดวงจร โดยรับสัญญาณจากหม้อแปลงกระแส และ/หรือ หม้อแปลงแรงดัน หรือรับจากตัวตรวจจับ (Sensor) อื่นๆ เพื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น เมื่อค่าผิดปกติถึงระดับที่ปรับตั้งไว้ รีเลย์จะทำการสั่งให้อุปกรณ์ตัดวงจร คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ทำการตัดส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้า

รีเลย์ที่ใช้ในระบบป้องกันนั้นมีหลายประเภท บางชนิดไม่ต้องทำการจัดลำดับการทำงานกับอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น เช่น รีเลย์แบบผลต่าง (Differential Relay: 87) หรือรีเลย์ความดัน (Pressure Relay: 63) ซึ่งใช้ตรวจจับความผิดปกติภายในตัวหม้อแปลงน้ำมัน เป็นต้น แต่บางชนิดต้องใช้กระแสลัดวงจรเป็นข้อมูลพิจารณาค่าปรับตั้ง เช่น รีเลย์กระแสเกินแบบทำงานทันที (50) หรือแบบหน่วงเวลา (51) โดยรีเลย์กระแสเกินมีคุณลักษณะการทำงานดังในรูปที่ 3.7 และความสัมพันธ์ในการทำงานระหว่างกระแสและเวลาของรีเลย์แสดงได้ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 กราฟลักษณะเวลา-กระแสของรีเลย์

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์การทำงานของรีเลย์กระแสเกินในแต่ละแบบ [5,16]

ประเภทการทำงานของรีเลย์	$T = M \left[\frac{K}{\left(\frac{I}{I_{pu}} \right)^E - 1} \right]$	
	K	E
IEC Curve A	0.140	0.020
IEC Curve B	13.500	1.000
IEC Curve C	80.000	2.000

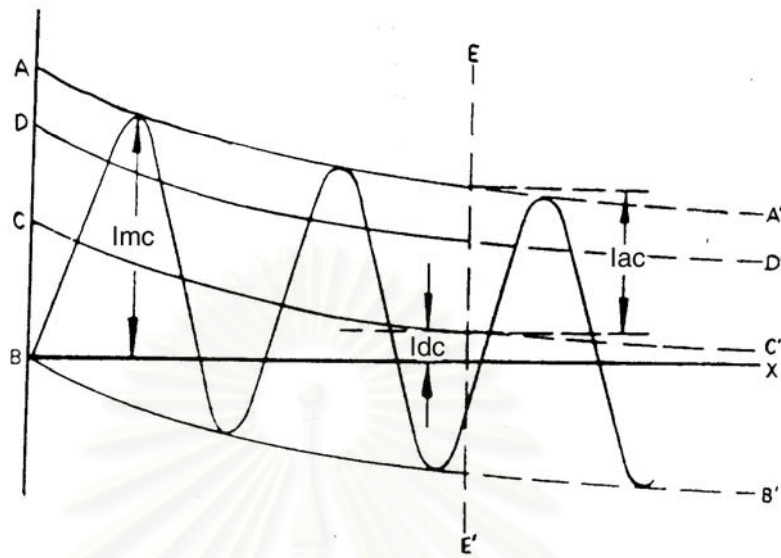
โดย T = Trip Time (sec)
 M = Multiple Setpoint
 I = Input Current
 I_{pu} = Pickup Current Setpoint
 K, E = Constant

3.3.1.2 การเลือกค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง [19]

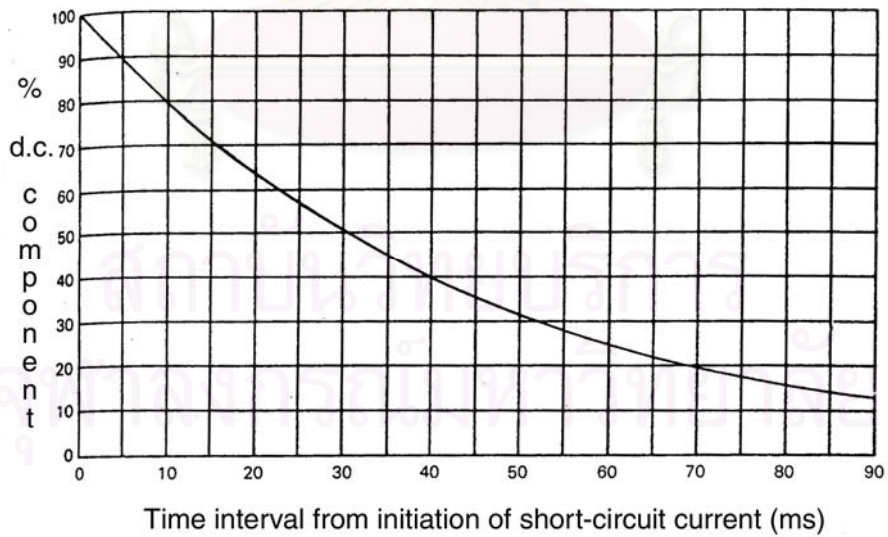
ค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง ที่ต้องพิจารณาโดยใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจร อ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEC 56 [7] โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณา 2 ค่า คือ พิกัดกระแสตัดวงจรและพิกัดกระแสปิดวงจร ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 และมีรายละเอียดดังนี้

- **พิกัดกระแสตัดวงจร (I_b)** คือ ค่าความสามารถในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ค่าพิกัดนี้โดยทั่วไปแสดงในรูปของกระแสสมมาตร (Symmetrical Current) ซึ่งจากรูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นโดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ทำการเปิดวงจรที่ตำแหน่ง EE' ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าว กระแสลัดวงจรจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

1. ค่า RMS ขององค์ประกอบไฟสลับของกระแสตัดวงจร (I_b)
2. ค่าเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบไฟตรง ($\%i_{dc}$) เทียบกับกระแสลัดวงจรในส่วนขององค์ประกอบไฟสลับ ณ ขณะกำลังแยกหน้าสัมผัส ซึ่งต้องสอดคล้องกับเวลาในการเปิดวงจรจากรูปที่ 3.9 อธิบายได้ว่า ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลางมีเวลาในการเปิดวงจรต่ำสุดเท่ากับ 40 มิลลิวินาที ค่าเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบไฟตรง ($\%i_{dc}$) ที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ดังกล่าวต้องสามารถรับได้จะเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดหรือปิดวงจร [7]



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์กับ % i_{dc} [7]

ตัวอย่างในการพิจารณาเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง สามารถยกตัวอย่างได้เช่น ค่ากระแสตัดวงจร (I_b) ที่คำนวณได้เท่ากับ 27 kA และค่า $\%i_{dc}$ (จากความสัมพันธ์ที่ 2.57) ที่คำนวณได้เท่ากับ 65% ดังนั้นกระแสตัดวงจรแบบอสมมาตร (Asymmetrical breaking current) จะเท่ากับ $27kA\sqrt{1+2(0.65)^2} = 36.7kA$ (จากความสัมพันธ์ที่ 2.58) และถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์มีเวลาในการตัดวงจรต่ำสุดเท่ากับ 50 มิลลิวินาทีแล้ว จากรูปที่ 3.9 จะได้ว่าค่า $\%i_{dc}$ ที่กำหนดจะเท่ากับ 30% ดังนั้นค่าพิกัดการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะพิจารณาได้ว่า

$$I_{asym} = I_{sym} \sqrt{1 + 2\left(\frac{\%dc}{100}\right)^2}$$

$$I_{sym} = \frac{I_{asym}}{\sqrt{1 + 2\left(\frac{\%dc}{100}\right)^2}} = \frac{36.7kA}{\sqrt{1 + 2(0.3)^2}} = 33.8kA$$

ดังนั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ในกรณีนี้ต้องมีค่าพิกัดตัดวงจร (ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่บริษัทกำหนดมาจะอยู่ในรูปค่า RMS ดังนั้นจึงต้องแปลงจากกระแสตัดวงจรสมมาตร มาเป็นกระแสตัดวงจรสมมาตร) มากกว่าหรือเท่ากับ 33.8 kA ซึ่งค่าพิกัดที่ใกล้เคียงที่สุดเท่ากับ 40 kA

- **พิกัดกระแสปิดวงจร (I_{MC})** คือ พิกัดกระแสลัดวงจรสูงสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทำการปิดวงจรได้ ซึ่งในมาตรฐาน [7] ได้กล่าวว่ามีค่า 2.5 เท่าของค่า RMS ขององค์ประกอบไฟสลับของพิกัดกระแสตัดวงจร (I_b) หรืออาจพิจารณาให้เท่ากับกระแสค่ายอด (i_p) ก็ได้

ดังนั้น ในกรณีของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง จึงมีข้อมูลกระแสลัดวงจรในการเลือกค่าพิกัดดังแสดงได้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง

กระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลาง			
ค่าพิกัดการตัดกระแสลัดวงจร (I_b)		ค่าพิกัดกระแสปิดวงจร (I_{MC})	
กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด	กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด
I_b, i_{dc}	—	i_p	—

3.3.2 ฟิวส์แรงดันปานกลาง (Medium Voltage Fuses)

ฟิวส์แรงดันปานกลางมีคุณสมบัติคล้ายฟิวส์แรงดันต่ำ แตกต่างเพียงระดับแรงดันใช้งาน ซึ่งฟิวส์แรงดันปานกลางมีพิกัดแรงดันในช่วง 1 kV ถึง 35 kV [17] คุณลักษณะการทำงานของฟิวส์แรงดันปานกลางเหมือนกับฟิวส์แรงดันต่ำที่ได้อธิบายในหัวข้อข้างต้น



รูปที่ 3.10 ฟิวส์แรงดันปานกลาง

3.3.2.1 การเลือกค่าพิกัดของฟิวส์แรงดันปานกลาง

ค่าพิกัดของฟิวส์แรงดันปานกลางจะอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 282-1 [17] ซึ่งค่าพิกัดที่ใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรพิจารณามีดังนี้

- **พิกัดกระแสลัดวงจร (I_b)** คือ ค่ากระแสลัดวงจรซึ่งฟิวส์สามารถทำการตัดวงจรได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นชนิดของกระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาควรเป็นค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้

ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาเลือกฟิวส์แรงดันปานกลางแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าฟิวส์แรงดันปานกลาง

กระแสลัดวงจรเพื่อการเลือกค่าฟิวส์แรงดันปานกลาง			
ค่าฟิวส์การตัดกระแสลัดวงจร (I_b)		ค่าฟิวส์กระแสเปิดวงจร	
กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด	กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด
I_b	—	—	—

จากรายละเอียดการเลือกค่าฟิวส์ต่างๆข้างต้น สามารถสรุปถึงชนิดของกระแสลัดวงจรที่ต้องคำนวณเพื่อใช้เลือกค่าฟิวส์ได้ตามตารางที่ 3.6 ดังนั้นในการเลือกค่าฟิวส์ของอุปกรณ์ป้องกัน จึงควรคำนวณกระแสลัดวงจรถัดข้อกำหนดในตารางดังกล่าว รวมถึงต้องหาค่ากระแสลัดวงจร ณ ตำแหน่งที่อุปกรณ์นั้นติดตั้งดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.13

ตารางที่ 3.6 สรุปข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อใช้พิจารณาค่าฟิวส์อุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกัน	ค่าฟิวส์อุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณา			
	ค่าฟิวส์กระแสลัดวงจร		ค่าฟิวส์กระแสเปิดวงจร	
	กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด	กระแสลัดวงจรสูงสุด	กระแสลัดวงจรต่ำสุด
<u>แรงดันไฟฟ้าต่ำ</u> (น้อยกว่า 1 kV)				
- เซอร์กิตเบรกเกอร์	I_b	—	i_p	—
- ฟิวส์	I_b	—	—	—
<u>แรงดันไฟฟ้าปานกลาง</u> (1kV ถึง 35 kV)				
- เซอร์กิตเบรกเกอร์	I_b, i_{dc}	—	i_p	—
- ฟิวส์	I_b	—	—	—

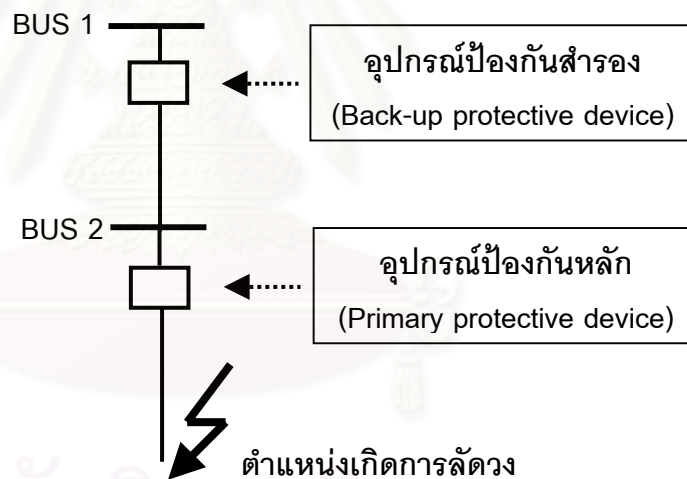
รายละเอียดของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่กล่าวในบทนี้ ผู้อ่านสามารถศึกษาถึงรายละเอียดเพิ่มเติมในเอกสารอ้างอิง [5,14,] ซึ่งได้อธิบายถึงชนิดต่างๆของอุปกรณ์แต่ละประเภท รวมทั้งคุณลักษณะของอุปกรณ์ดังกล่าวไว้อย่างละเอียด

บทที่ 4

กระแสลัดวงจรกับการปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

4.1 บทนำ

จากเอกสารอ้างอิง [18] ซึ่งได้กล่าวถึงประเภทต่างๆ ของระบบป้องกันไฟฟ้านั้น ระบบป้องกันไฟฟ้าแบบมีการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Selective Protective System) มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด คือสามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และส่งผลกระทบต่อบริเวณที่ไม่เกิดสภาวะผิดปกติน้อย โดยระบบป้องกันไฟฟ้างกล่าวหาอาศัยหลักการที่ว่า อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ใกล้ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรที่สุดซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันหลัก (Primary Protective Device) ต้องทำงานก่อนอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ลำดับถัดไป ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง (Back up protection) โดยจะทำงานเมื่ออุปกรณ์ป้องกันหลักไม่ทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของอุปกรณ์ป้องกันหลักและอุปกรณ์ป้องกันสำรอง

การจะได้ระบบป้องกันไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น ต้องมีการศึกษาการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อปรับตั้งหรือเลือกอุปกรณ์ป้องกันให้ทำงานได้อย่างเหมาะสม โดยอาศัยข้อมูลในการศึกษา คือ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษากระแสลัดวงจรที่ครบถ้วน รวมไปถึงคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในระบบ [18]

4.2 ขั้นตอนการศึกษาการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

ขั้นตอนการจัดลำดับการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันที่ต่ออนุกรมกันนั้น เบื้องต้นต้องมีการกำหนดหน่วยทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้า รวมทั้งศึกษาข้อกำหนดต่างๆในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการเลือกหรือปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน แล้ววาดแถบหรือเส้นคุณลักษณะการทำงานทางกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกันนั้น บนกราฟ ล็อก-ล็อก (log-log) โดยแถบหรือเส้นคุณลักษณะดังกล่าวต้องไม่มีการซ้อนทับกัน จึงจะได้ระบบป้องกันที่มีลำดับการทำงาน [1]

การจะทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานแบบมีลำดับ ส่วนใหญ่ต้องใช้วิธีทดลองปรับ (Trial-and-Error) อุปกรณ์ป้องกัน จนกว่าจะทำให้แถบหรือเส้นคุณลักษณะการทำงานทางกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดที่พิจารณานั้น สอดคล้องกันและไม่มีการซ้อนทับกัน รวมทั้งต้องมีช่วงระยะเวลาในการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกัน (Coordination Time Interval; CTI) ที่เหมาะสมด้วย นอกจากนี้ควรต้องเพื่อความคลาดเคลื่อนในการทำงานของกลไกในอุปกรณ์รีเลย์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วย ซึ่งความคลาดเคลื่อนตรงนี้ได้รวมไว้ในส่วนของ CTI แล้ว

ดังนั้นโดยสรุปแล้ว ขั้นตอนในการจัดลำดับการทำงานอุปกรณ์ป้องกัน มีดังนี้

4.2.1 กำหนดปรัชญาในการป้องกันของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

การที่จะทำการปรับตั้งหรือพิจารณาเลือกอุปกรณ์ป้องกันใดๆนั้น จะต้องรู้จุดมุ่งหมายของระบบป้องกันที่ศึกษาว่าต้องการอะไร ต้องการป้องกันอุปกรณ์ใดเป็นสำคัญ อุปกรณ์ตัวไหนมีความจำเป็นต้องทำงานก่อน โหลดตัวไหนต้องการความต่อเนื่องในการทำงาน รวมทั้งระยะเวลาในการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกัน (CTI) ว่ามีค่าเท่าไร ดังนั้นข้อพิจารณาทั้งหลายเหล่านี้จะต้องมีการกำหนดก่อนที่จะทำการปรับตั้งและจัดลำดับการทำงานอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อได้ระบบป้องกันที่สอดคล้องตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการซึ่งโดยทั่วไปจะให้เท่ากับ 0.3 - 0.5 วินาที [5]

4.2.2 พิจารณาแบบจำลองของระบบหรือไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษา

ก่อนทำการศึกษากระแสลัดวงจร และการจัดลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ผู้ศึกษาต้องทราบถึงรายละเอียดของแบบจำลองหรือไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาก่อน ซึ่งในการศึกษาส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง เพราะถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาและเป็นการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา ดังนั้นยังสามารถเข้าใจแบบจำลองหรือ

ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าได้ถูกต้องเท่าไร ผลลัพธ์ที่ได้จะยังมีความถูกต้องตามไปด้วย ข้อมูลที่ไดอะแกรมเส้นเดียวควรแสดง คือ

1. แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร ซึ่งรวมไปถึง แรงดัน และความสามารถในการสร้างกระแสลัดวงจรของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้น
2. ขนาด ประเภท พิกัดกระแสและจำนวนของสายไฟฟ้าทั้งหมด
3. พิกัด แรงดัน ค่าอิมพีแดนซ์ รูปแบบการต่อ ประเภทการระบายความร้อนและวิธีการต่อลงดินของหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ประเภทและรูปแบบของอุปกรณ์ป้องกัน (Relays, Fuses, Circuit Breakers)
5. ลักษณะและรูปแบบของโหลด เช่น มอเตอร์, โหลดแสงสว่าง ฯลฯ

หลังจากศึกษาถึงไดอะแกรมเชิงเส้นเดียวและมีข้อมูลต่างๆครบถ้วนแล้ว จึงสามารถศึกษากระแสลัดวงจร และ การปรับตั้งและจัดลำดับการทำงานอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าได้

4.2.3 ศึกษากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

การศึกษาในส่วนนี้คือ การคำนวณและบันทึกค่าอิมพีแดนซ์ และค่าพิกัดต่างๆ ที่กำหนดไว้ แล้วคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่างๆในระบบไฟฟ้า เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการเลือกและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันต่อไป โดยวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

4.2.4 ศึกษาคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

การศึกษาในหัวข้อนี้ได้แก่ การศึกษาถึงคุณลักษณะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำการป้องกัน ซึ่งใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันไม่ทำงานในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานในสภาวะปกติ และอุปกรณ์ป้องกันจะต้องทำงานก่อนที่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ได้รับการป้องกันจะได้รับความเสียหายด้วย ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวมีดังนี้

1. ความคงทนต่อกระแสของอุปกรณ์ไฟฟ้า
2. คุณลักษณะในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ค่ากระแสฟุ้งเข้า เป็นต้น
3. ข้อกำหนดของมาตรฐานสำหรับป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น

รายละเอียดของคุณลักษณะการทำงานต่างๆข้างต้นของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ผู้อ่านสามารถศึกษาได้ในเอกสารอ้างอิง [5,14,18] และในภาคผนวก

4.2.5 ศึกษาและปรับตั้งคุณลักษณะของกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกัน

เมื่อมีข้อมูลที่ได้จากการศึกษากระแสลัดวงจร อุปกรณ์ป้องกัน รวมถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำการป้องกันแล้ว จึงมาถึงขั้นตอนสุดท้าย คือ การปรับตั้งหรือเลือกอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ซึ่งในส่วนนี้ต้องใช้คุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันมาพิจารณาบนกราฟ ล็อก-ล็อก (log-log) ให้ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน สอดคล้องตามต้องการ

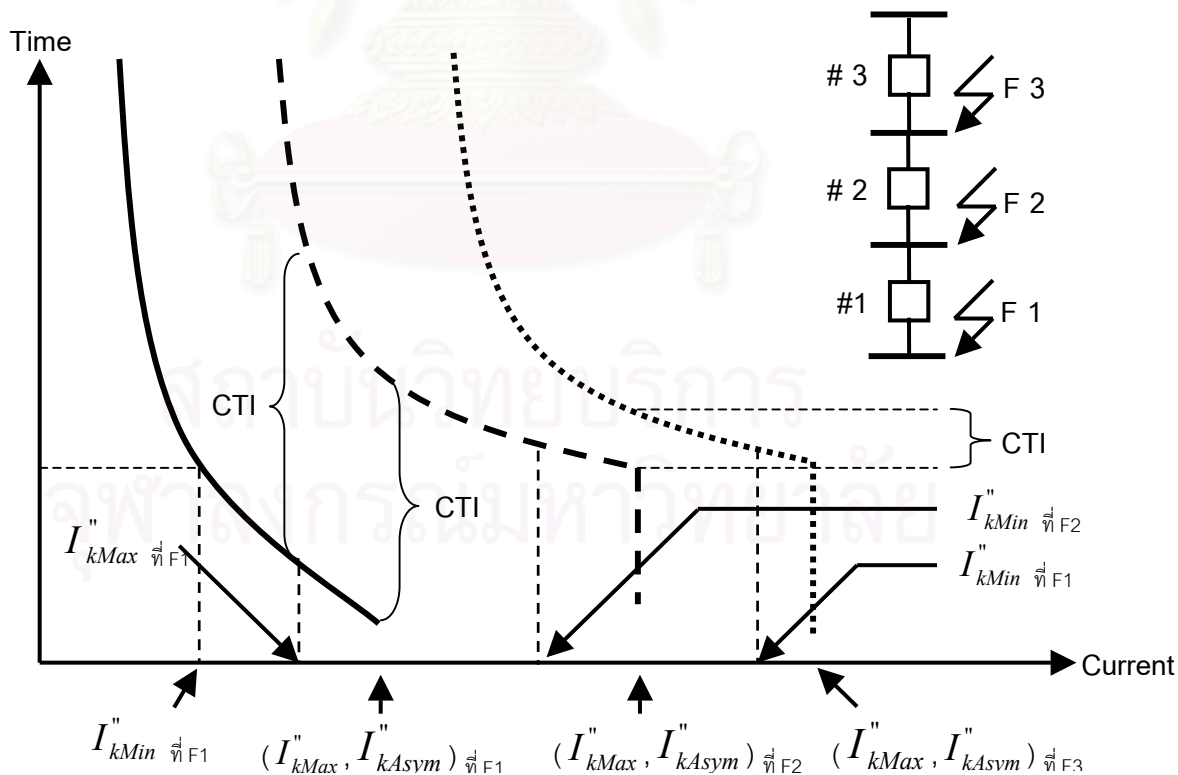
4.3 ค่ากระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาการปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

ในการพิจารณาปรับตั้งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่มักจะใช้พิจารณาลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันคือ กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสูงสุด (I_k'') เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานอย่างรวดเร็วที่สุดเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ให้กระแสลัดวงจรสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้น และในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันหลักไม่ทำงาน อุปกรณ์ป้องกันสำรอง (Backup Protection) ควรทำงานแทน โดยควรมีช่วงระยะเวลาการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันหลักและอุปกรณ์ป้องกันสำรองหรือค่า CTI (Coordination Time Interval) ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรที่ใช้พิจารณาค่า CTI คือ ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (I_k'') ของอุปกรณ์ป้องกันหลักเช่นกัน โดยสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.2 คือเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 1 แล้วอุปกรณ์ป้องกันหลัก (อุปกรณ์ที่ 1) ไม่ทำงานภายในระยะเวลา CTI ที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ป้องกันสำรอง (อุปกรณ์ป้องกันที่ 2) จะทำงานแทน

เมื่อทำการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันแล้ว ควรตรวจสอบความไวในการทำงาน (Sensitivity) ว่าไม่ว่าจะเกิดลัดวงจรประเภทไหน อุปกรณ์ป้องกันควรทำงานในเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรมีข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุด เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์ป้องกันต้องทำงานในระยะเวลาที่เหมาะสมเมื่อเกิดการลัดวงจร

โดยสรุปแล้ว ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ต้องใช้พิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันสามารถสรุปได้ดังนี้ [8]

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสูงสุด (Maximum Initial Symmetrical Short Circuit Current ; I''_{kMax}) ใช้สำหรับปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่ทำงานแบบทันทีซึ่งใช้องค์ประกอบฟาสต์สลิปในการทำงาน (เช่น รีเลย์) รวมทั้งใช้พิจารณาระยะเวลาการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่ทำงานแบบทันที (Coordination Time Interval; CTI) กับอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินอื่น ด้วย [8]
2. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นต่ำสุด (Minimum Initial Symmetrical Short Circuit Current ; I''_{kMin}) ใช้พิจารณาในกรณีที่ ถ้าเกิดการลัดวงจรแล้ว ค่ากระแสลัดวงจรเริ่มต้นต่ำสุดนั้น มีค่าต่ำกว่าค่าปรับตั้งของการทำงานแบบทันที อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินในส่วนที่ทำงานแบบทันทีจะไม่ทำงาน โดยอุปกรณ์ป้องกันในส่วนการทำงานแบบหน่วงเวลา (Time Delayed) จะต้องทำงานแทน ซึ่งถ้าเกิดกรณีนี้แล้ว ต้องใช้ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นต่ำสุด เพื่อพิจารณาว่าอุปกรณ์ป้องกันในส่วนการทำงานแบบหน่วงเวลานั้นทำงานในเวลาที่เหมาะสมหรือไม่ [8]



รูปที่ 4.2 การใช้กระแสลัดวงจรในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

3. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสูงสุด (Maximum Initial Asymmetrical Short Circuit Current ; I''_{kAsym}) ใช้สำหรับพิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินแบบทำงานทันที ซึ่งต้องใช้ทั้งองค์ประกอบไฟสลับ และองค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจรในการทำงาน (เช่น หน่วยการทำงานแบบทันทีในเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์) [8]
4. กระแสลัดวงจรอยู่ตัวสูงสุด (Maximum Steady State Short Circuit Current ; I''_{kMax}) ใช้สำหรับพิจารณาระยะเวลาการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินที่ทำงานแบบหน่วงเวลา (Coordination Time Interval;CTI) กับอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินอื่น [8]
5. กระแสลัดวงจรอยู่ตัวต่ำสุด (Minimum Steady State Short Circuit Current; I''_{kMin}) ใช้พิจารณาว่า เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ค่ากระแสนี้ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาจะทำงานในเวลาที่เหมาะสมหรือไม่ [8]

ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ต้องใช้พิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน แบ่งตามประเภทของอุปกรณ์ป้องกันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลกระแสลัดวงจรสำหรับใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

ประเภทอุปกรณ์ป้องกัน	ข้อมูลกระแสลัดวงจร
• อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินแบบทำงานทันที ซึ่งใช้เฉพาะองค์ประกอบไฟสลับของกระแสลัดวงจร	I''_{kMax} , I''_{kMin}
• อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินแบบทำงานทันที ซึ่งใช้ทั้งองค์ประกอบไฟสลับ และองค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร	I''_{kMin} , I''_{kAsym}
• อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาซึ่งใช้เฉพาะองค์ประกอบไฟสลับของกระแสลัดวงจร	$I''_{kMax} , I''_{kMax} I''_{kMin}$

ดังนั้นในการศึกษาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน จำเป็นต้องมีข้อมูลกระแสลัดวงจรในรูปแบบต่างๆที่กล่าวข้างต้น เพื่อเตรียมไว้ใช้ในการศึกษาต่อไป

บทที่ 5

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณกระแสลัดวงจรเพื่อเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

5.1 บทนำ

ถึงแม้ขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจร การเลือกใช้และการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้น จะไม่มีความซับซ้อนมากมายนัก แต่ถ้าระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีขนาดใหญ่ ขั้นตอนดังกล่าวจะเป็นการทำซ้ำๆกัน ซึ่งอาจเป็นงานที่ยุ่งยากและเสียเวลาได้ถ้าทำโดยไม่มีเครื่องมือช่วยเหลือที่มีประสิทธิภาพ

ในบทที่ 5 นี้จะได้อธิบายถึง การนำคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการทำงานดังกล่าว โดยคอมพิวเตอร์จะคำนวณผลการศึกษาระแสลัดวงจรและแสดงผลการคำนวณที่ใช้เลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 3 และ บทที่ 4 ตามลำดับ

5.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณกระแสลัดวงจรที่พัฒนา

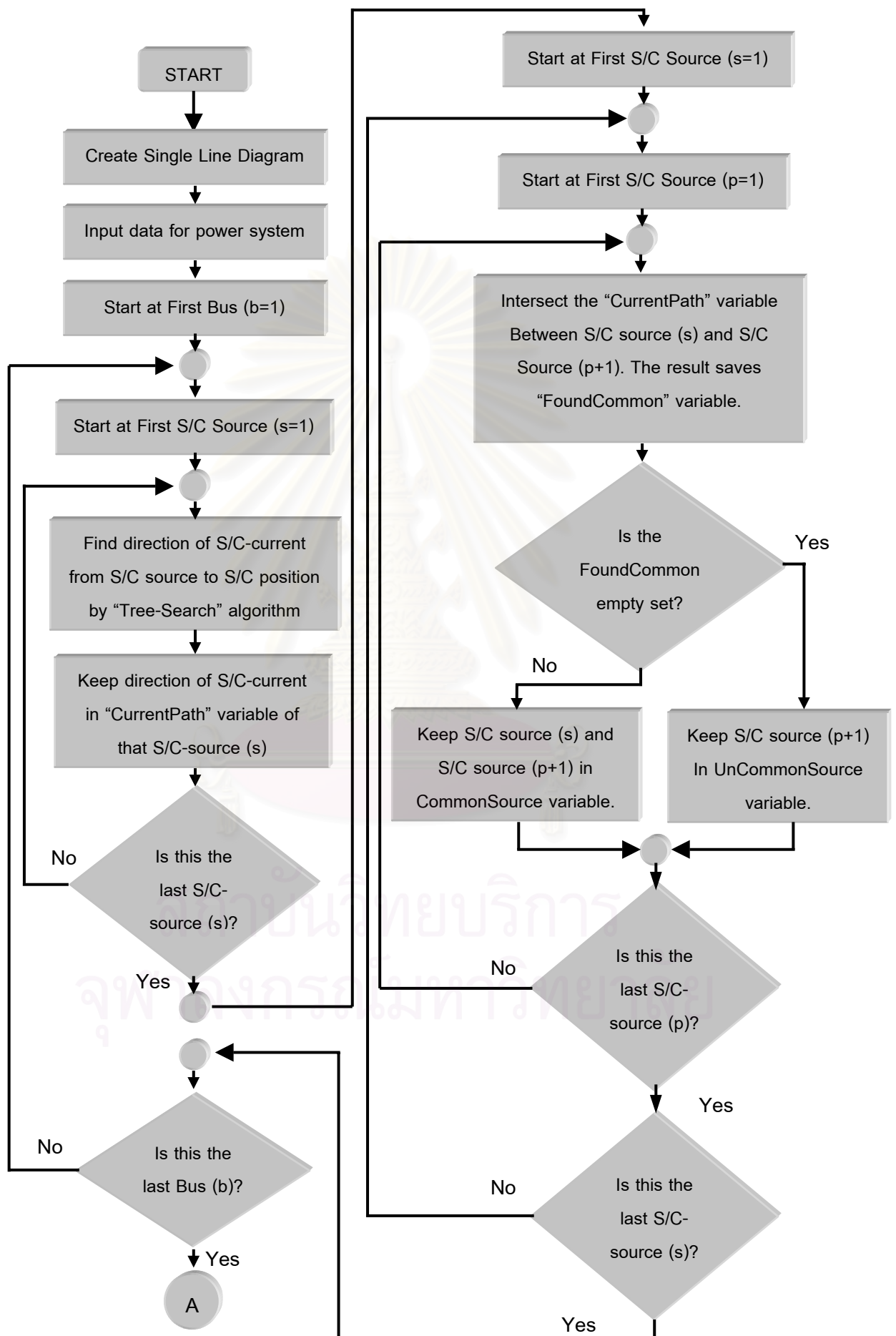
การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ถ้าทำการคำนวณด้วยมือแล้ว จะเป็นงานที่ค่อนข้างยุ่งยาก ไม่สะดวกและใช้เวลามาก ในปัจจุบันจึงได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณกระแสลัดวงจร ทำให้ทำงานได้สะดวกขึ้น โดยข้อมูลกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาจะนำไปใช้ต่อในการเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันต่อไป

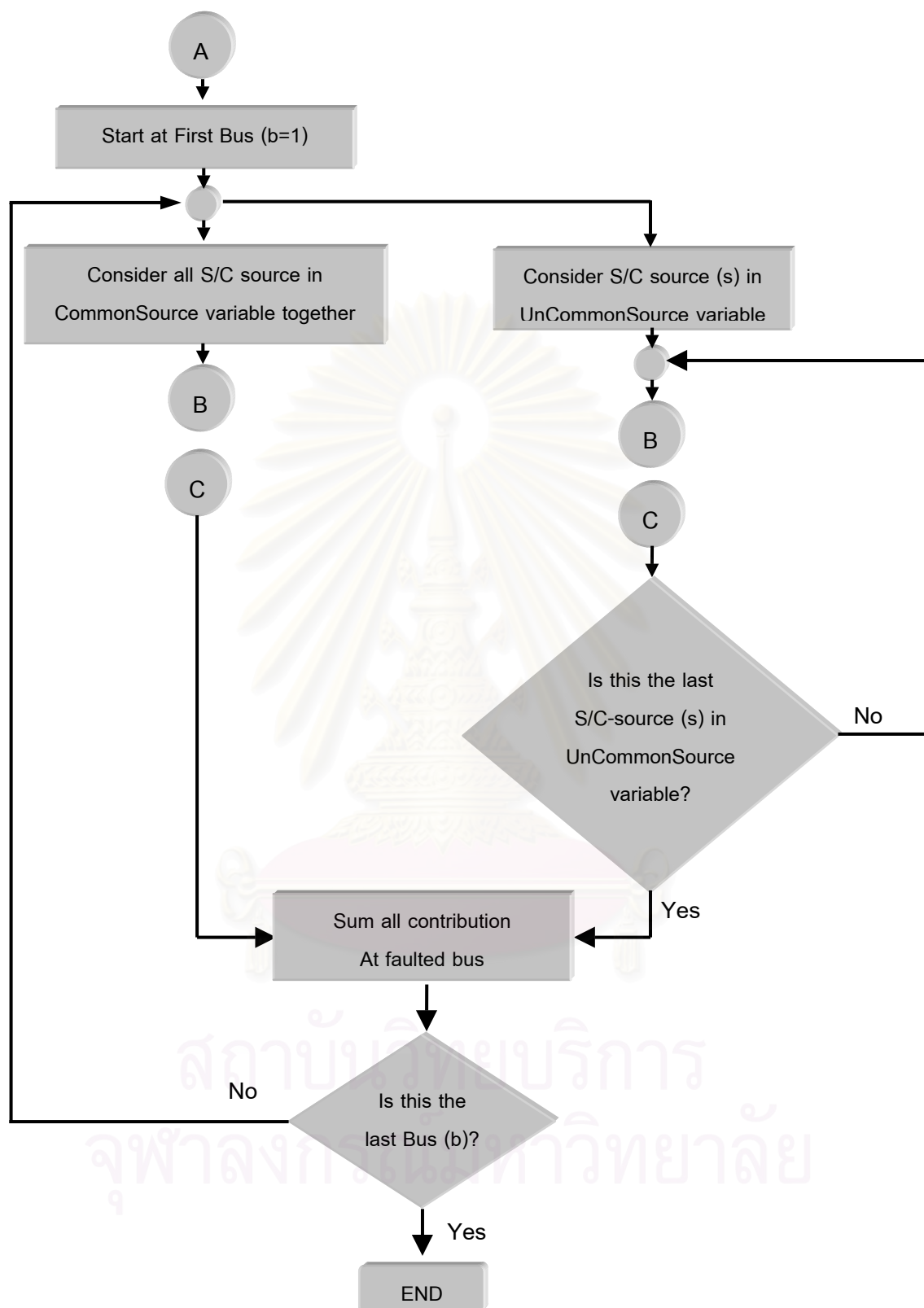
5.2.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ดังนี้

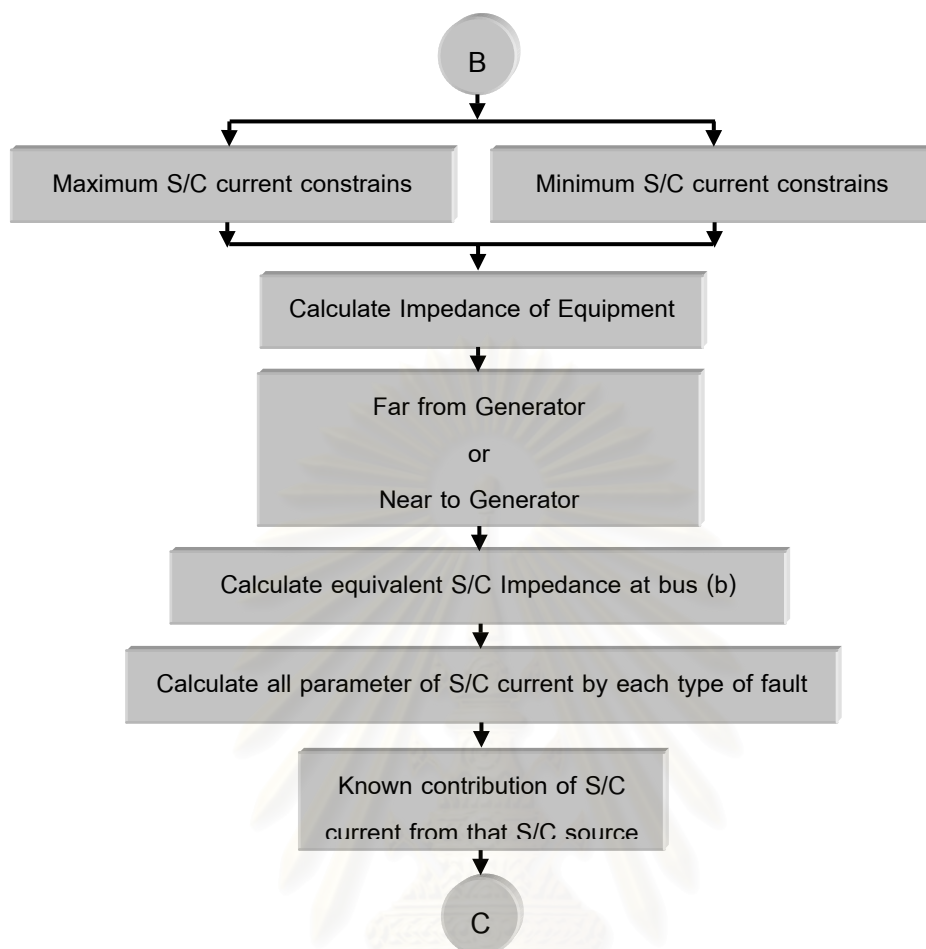
5.2.1.1 ส่วนการคำนวณกระแสลัดวงจร

ส่วนการคำนวณนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ แผนภูมิเชิงเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้า (Single Line Diagram) และข้อมูลค่าพิกัดต่างๆของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้ว ส่วนการคำนวณนี้จะคำนวณกระแสลัดวงจรตามความสัมพันธ์ที่แสดงในบทที่ 2 และตามขั้นตอนซึ่งแสดงในรูปที่ 5.1





รูปที่ 5.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนหลักของการคำนวณกระแสลัดวงจร



รูปที่ 5.2 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนของขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจร

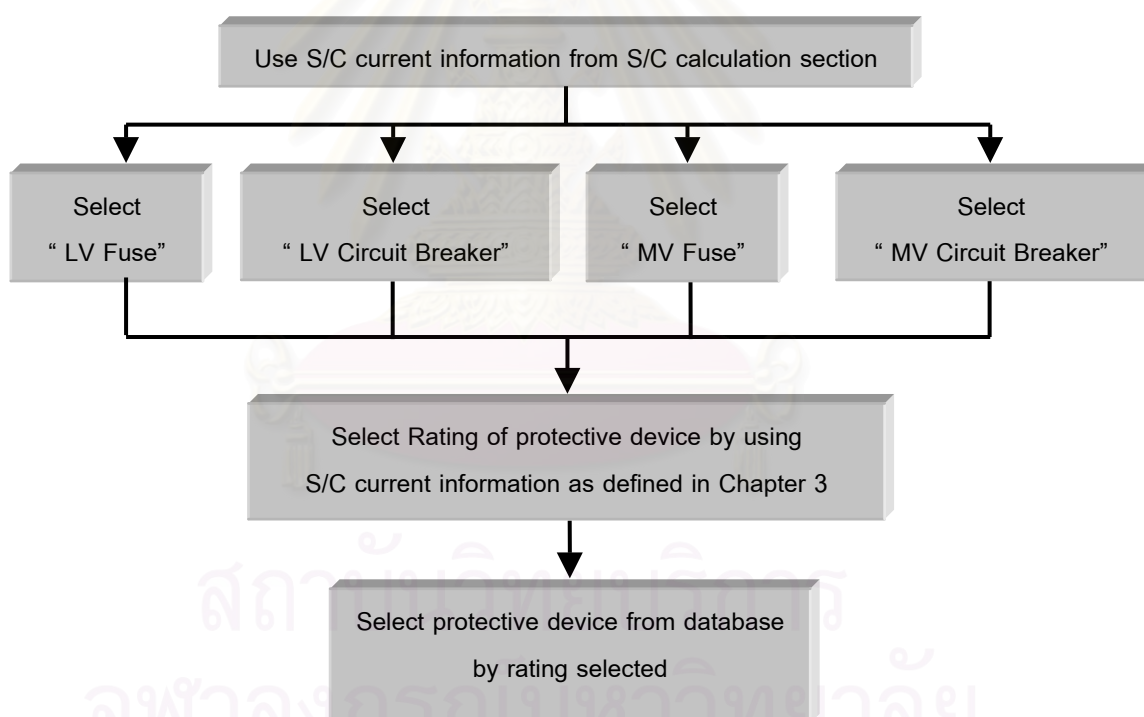
จากขั้นตอนการคำนวณกระแสลัดวงจรในรูปที่ 5.1 และ 5.2 เป็นวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 อย่างแท้จริงตามแนววิธีที่มาตรฐานดังกล่าวได้แสดงไว้ คือ จะพิจารณาว่ากระแสลัดวงจรที่ไหลมายังบัสที่เกิดการลัดวงจร มาจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใด และไหลมาจากเส้นทางไหน ซึ่งทำให้ทราบข้อมูลการไหลหรือ Contribution ของกระแสลัดวงจรว่าที่บัสที่เกิดลัดวงจรมีกระแสไหลมาจากเส้นทางไหนและมีค่าเท่าไร

ขั้นตอนการทำงานที่พัฒนาขึ้นนี้คือ ในส่วนของขั้นตอนการทำงานหลักในรูปที่ 5.1 นั้น จะทำการหาเส้นทางการไหลของกระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรไปยังบัสต่างๆ โดยใช้ขั้นตอนทำงาน (Algorithm) แบบ Tree-Search [22] ซึ่งจะมีความเร็วในการหาสูง หลังจากทราบเส้นทางการไหลแล้วจึงพิจารณาต่อว่าแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดที่ต้องพิจารณา ร่วมกัน โดยหลักในการพิจารณาได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้ว ซึ่งเมื่อถึงตรงนี้จะทำให้ทราบถึง

Contribution ของกระแสลัดวงจรที่ไหลมายังบัสนั้นแล้ว จากนั้นก็ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระแสลัดวงจรที่ทุกบัสและทุกรูปแบบการลัดวงจร ซึ่งขั้นตอนการทำงานจะอยู่ในรูปที่ 5.2 (จาก Node B ไป Node C) และสามารถหาระดับกระแสลัดวงจร (Short Circuit Level) ได้ โดยการรวมค่า Contribution ของกระแสลัดวงจรที่มายังบัสต่างๆ

5.2.1.2 ส่วนการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน

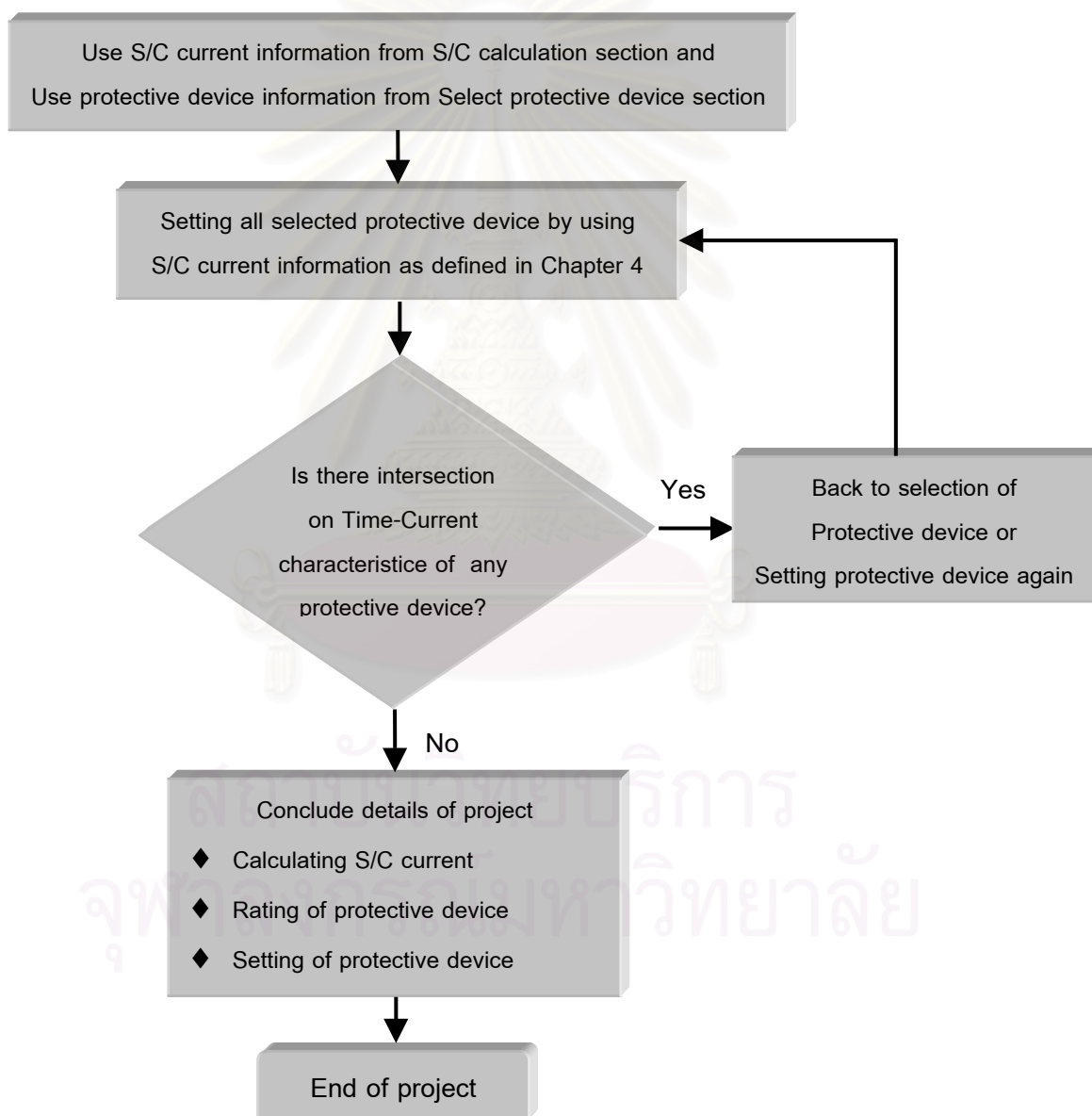
ส่วนการทำงานส่วนนี้จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากส่วนการคำนวณกระแสลัดวงจร มาพิจารณาเลือกค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งหลักการเลือกนั้นได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้ว โดยอุปกรณ์ป้องกันจะถูกเลือกมาจากฐานข้อมูล (Database) ซึ่งสามารถแก้ไขเพิ่มเติมได้ และขั้นตอนการทำงานในส่วนการทำงานนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน

5.2.1.3 ส่วนการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

ส่วนการทำงานนี้จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากส่วนการทำงาน 2 ส่วนแรก มาเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้มีความเป็นลำดับ (Selective) ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยข้อมูลที่ใช้ประกอบการทำงานในส่วนนี้จะได้แก่ค่ากระแสลัดวงจร และคุณลักษณะการทำงานทางกระแสและเวลาของอุปกรณ์ป้องกันที่เลือก ดังที่ได้แสดงในบทที่ 4 ขั้นตอนการทำงานในส่วนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

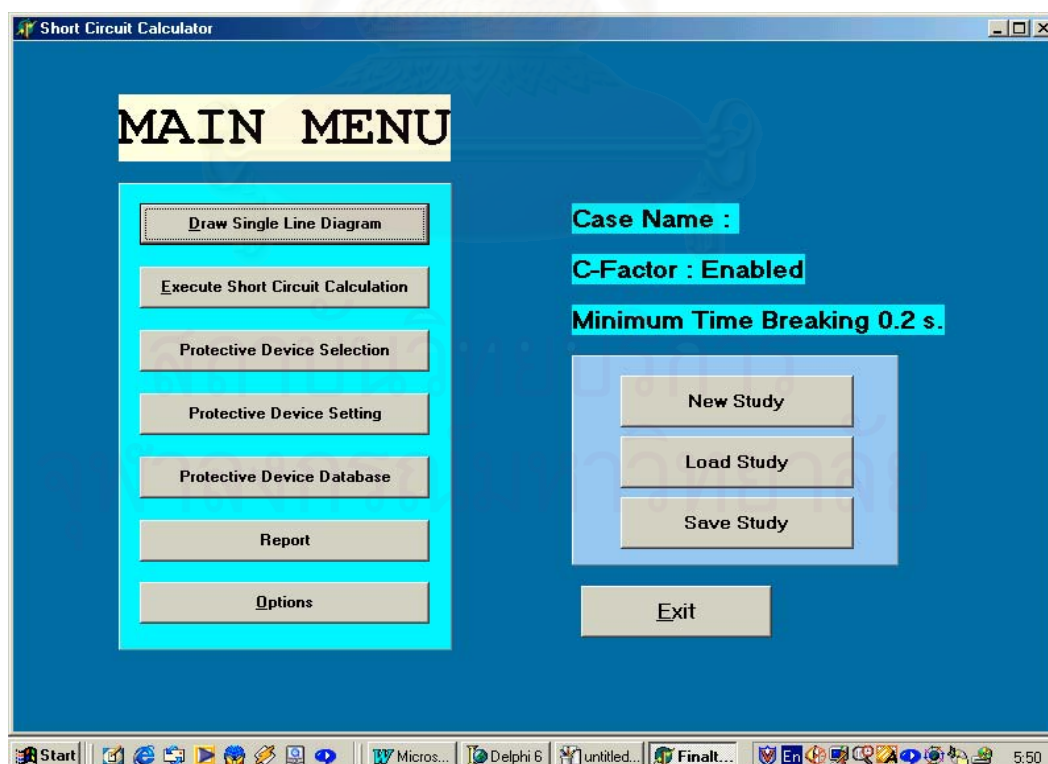


รูปที่ 5.4 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนการจัดลำดับการทำงานอุปกรณ์ป้องกัน

5.2.2 ลักษณะและหน้าต่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า 'Short Circuit Calculator' ซึ่งพัฒนาโดยใช้โปรแกรม 'Delphi 6' โปรแกรมที่พัฒนาสามารถใช้งานกับระบบปฏิบัติการวินโดวส์เวอร์ชัน 9.X ขึ้นไป โดยโปรแกรมมีส่วนประกอบการทำงานหลักอยู่ 3 ส่วนดังที่ได้กล่าวข้างต้น ในหัวข้อนี้จะได้แสดงถึงลักษณะของโปรแกรมที่พัฒนา โดยเมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาจะมีหน้าต่างหลักดังในรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงถึงเมนูย่อยๆ ดังนี้

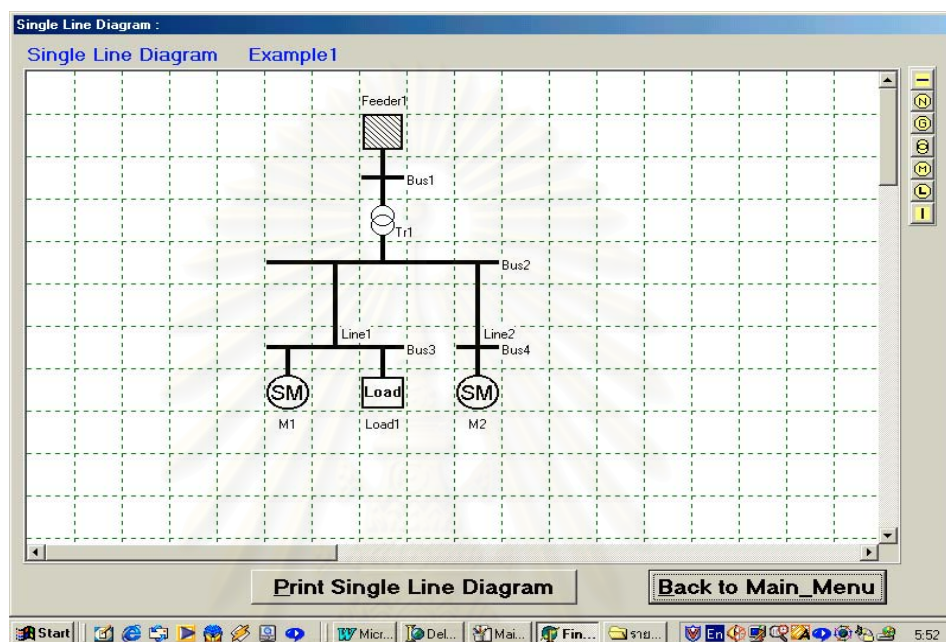
1. เมนูการวาดแผนภูมิเชิงเส้นเดี่ยว (Draw Single Line Diagram)
2. เมนูการคำนวณกระแสลัดวงจร (Execute Short Circuit Calculation)
3. เมนูการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Selection)
4. เมนูการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Setting)
5. เมนูฐานข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Database)
6. เมนูแสดงผลไฟร์ของการทำงานของโปรแกรม (Report)
7. เมนูกำหนดรายละเอียดของการศึกษา (Options)



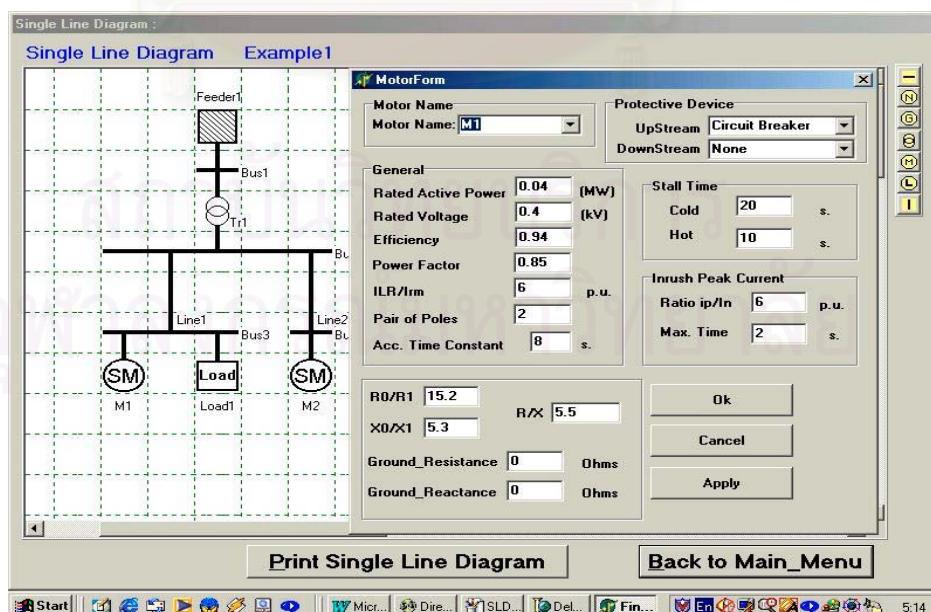
รูปที่ 5.5 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของเมนูหลัก (Main Menu)

5.2.2.1 เมนูการวาดไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Draw Single Line Diagram)

ในเมนูนี้จะใช้สร้างไดอะแกรมเส้นเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 5.6 และผู้ใช้งานสามารถใส่ข้อมูลคุณสมบัติของอุปกรณ์ในไดอะแกรมเส้นเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งข้อมูลที่ใส่ในเมนูนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร



รูปที่ 5.6 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Draw Single Line Diagram)



รูปที่ 5.7 รูปหน้าต่างแสดงการใส่ข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้า

5.2.2.2 เมนูการคำนวณกระแสลัดวงจร (Execute Short Circuit Calculation)

เมนูนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้งานในเมนูการวาดโดยะแกรมเส้นเดี่ยว มาคำนวณกระแสลัดวงจรตามขั้นตอนที่ได้อธิบายในบทที่ 2 โดยเมื่อทำการคลิกที่ปุ่มเมนูนี้ โปรแกรมจะคำนวณกระแสลัดวงจรให้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนั้น ผู้ใช้งานสามารถดูได้ในเมนูแสดงผลการคำนวณของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5.12

5.2.2.3 เมนูการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Selection)

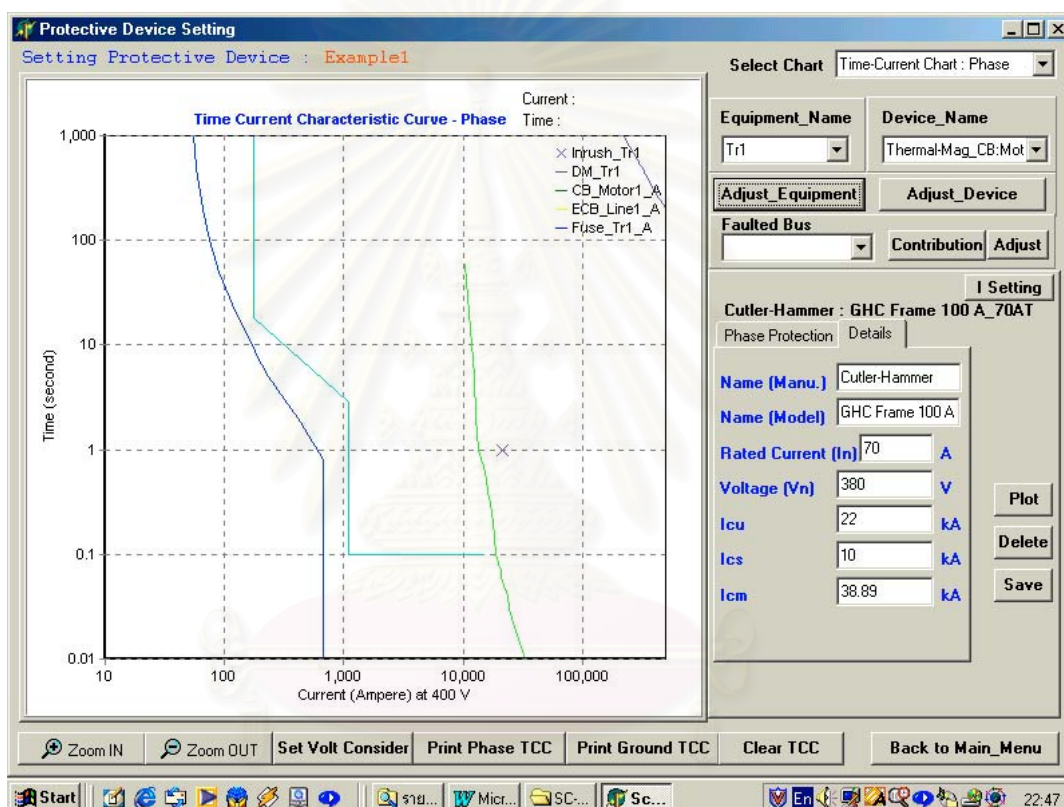
เมนูนี้จะนำผลลัพธ์การคำนวณกระแสลัดวงจรที่ได้ มาทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันในฐานข้อมูล ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันที่เลือกได้จะมีค่าพิกัดในการใช้งานสอดคล้องกับข้อมูลกระแสลัดวงจร โดยหลักเกณฑ์การเลือกอุปกรณ์ป้องกันนั้นได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 หน้าต่างของเมนูการเลือกอุปกรณ์ป้องกันนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และในเมนูนี้ยังมีส่วนการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกระแสลัดวงจรที่จะนำมาใช้ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันในแต่ละบัสด้วย รวมทั้งระบุได้ว่า แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใด สร้างกระแสลัดวงจรออกมาเท่าใด และในแต่ละอุปกรณ์มีกระแสลัดวงจรไหลผ่านเท่าใด

นอกจากนี้ ผู้ใช้งานสามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้โดยใส่ค่ากระแสลัดวงจรจากส่วนนี้เลยได้ และยังสามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้ตามผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นๆ ได้

รูปที่ 5.8 รูปหน้าต่างแสดงส่วนการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Selection)

5.2.2.4 เมนูการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Setting)

เมนูนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันที่เลือกได้ในเมนูก่อนหน้านี้มาใช้ในการปรับตั้ง โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกให้แสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานทางกระแส-เวลาของอุปกรณ์ป้องกัน หรือกราฟคุณลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ได้รับการป้องกัน และค่ากระแสลัดวงจรที่ใช้ในการพิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 ได้ ซึ่งหน้าต่างของเมนูในส่วนนี้ได้แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 หน้าต่างโปรแกรมในส่วนการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Setting)

5.2.2.5 เมนูฐานข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Database)

เมนูนี้มีหน้าที่รับข้อมูลคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อนำไปเก็บในฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันในเมนูการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเพิ่ม ลด หรือแก้ไขข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันในฐานข้อมูลได้โดยอาศัยเมนูในส่วนนี้ ซึ่งหน้าต่างของเมนูฐานข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันนี้ได้แสดงดังรูปที่ 5.10

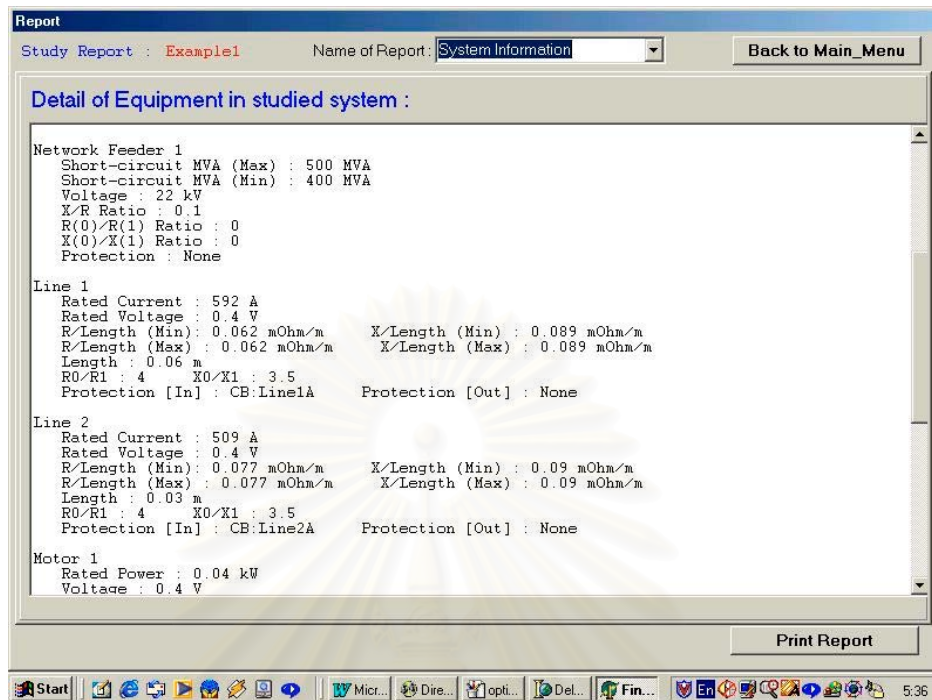
รูปที่ 5.10 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนฐานข้อมูลอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device Database)

5.2.2.6 เมนูแสดงผลการทำงานของโปรแกรม (Report)

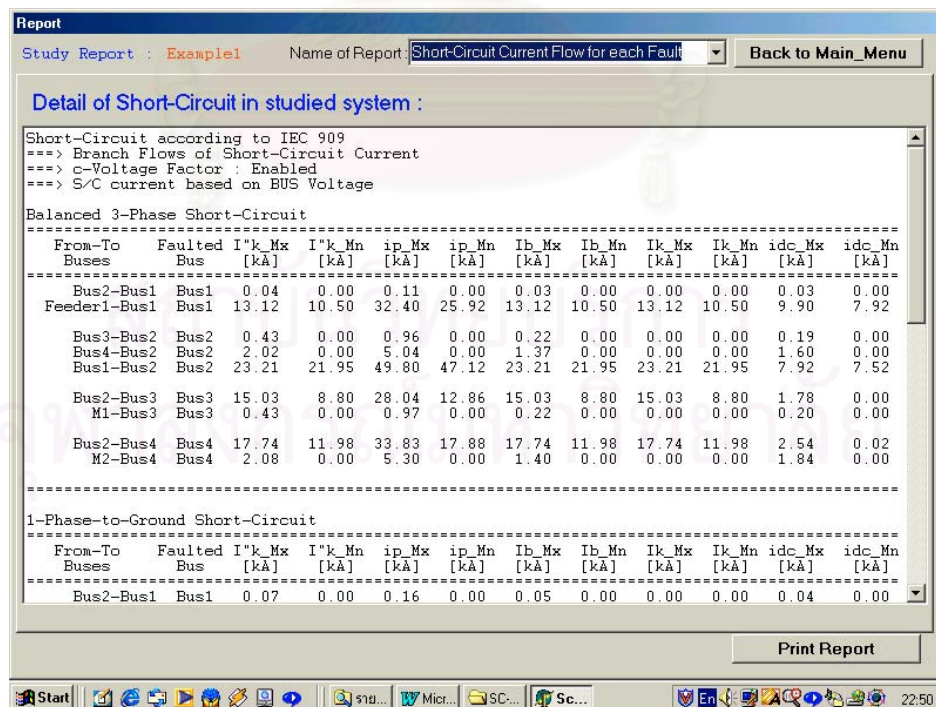
เมนูนี้มีหน้าที่ในการแสดงผลที่ได้จากการใช้งานเมนูต่างๆ ซึ่งรายงานซึ่งแสดงในเมนูนี้ได้แก่

1. รายงานแสดงรายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา (รูปที่ 5.11)
2. รายงานแสดงผลการคำนวณกระแสลัดวงจร (รูปที่ 5.12)
3. รายงานแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ป้องกันรวมถึงค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันนั้น (รูปที่ 5.13)

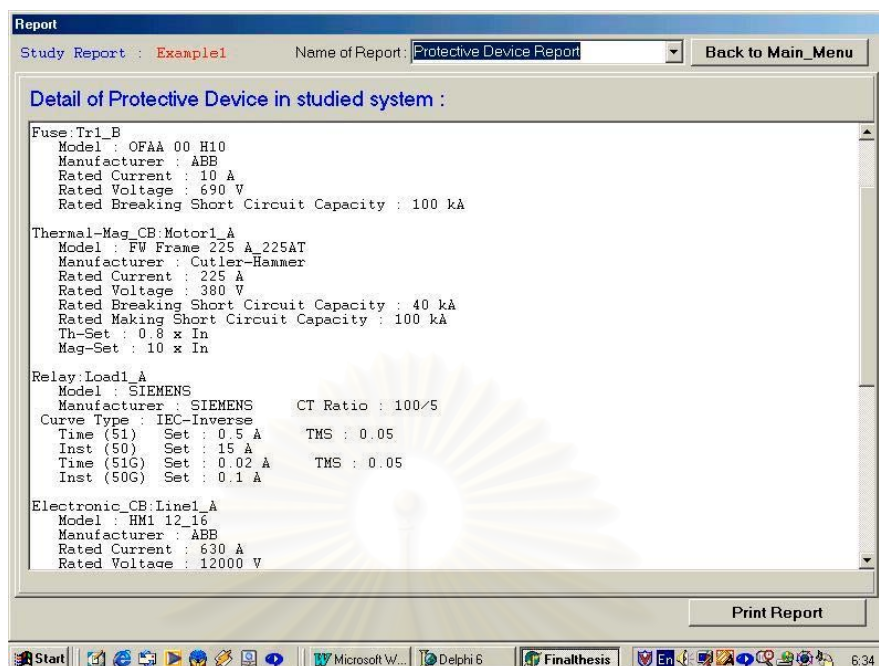
โดยลักษณะของหน้าต่างของเมนูนี้แสดงดังรูปที่ 5.11, 5.12 และ 5.13 ซึ่งรายงานทั้ง 3 ส่วนนี้ สามารถพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์ (Printer) ได้



รูปที่ 5.11 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนรายงานแสดงรายละเอียดของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา



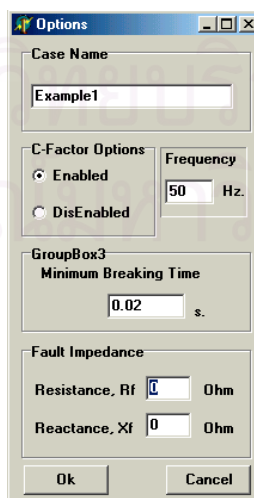
รูปที่ 5.12 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนแสดงผลการคำนวณกระแสลัดวงจร



รูปที่ 5.13 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ป้องกันรวมถึงค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน

5.2.2.7 เมนูกำหนดรายละเอียดของการศึกษา (Options)

เมนูนี้ทำหน้าที่กำหนดรายละเอียดปลีกย่อยอื่น ๆ ในการทำงานของโปรแกรม ซึ่งได้แก่ การกำหนดว่าจะให้ใช้ค่าตัวประกอบแรงดัน (c-Factor) ในการคำนวณหรือไม่ ค่าเวลาในการตัดวงจรต่ำสุดของอุปกรณ์ตัดวงจร (t_{min}) ว่ามีค่าเท่าใด รวมไปถึงค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault Impedance) ที่พิจารณาด้วย โดยหน้าต่างของเมนูกำหนดรายละเอียดของการศึกษาได้แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 รูปหน้าต่างโปรแกรมในส่วนเมนูกำหนดรายละเอียดของการศึกษา (Options)

5.2.3 วิธีการใช้งานโปรแกรม 'Short Circuit Calculator'

การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม 'Short Circuit Calculator' จะเริ่มต้นโดยเรียกโปรแกรมชื่อ 'Short_Circuit_Calculator.EXE' หลังจากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่างหลัก (Main Menu) ดังรูปที่ 5.5 โดยขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมในการศึกษาระบบไฟฟ้าหนึ่งการศึกษา (Study) มีขั้นตอนดังนี้

1. คลิกปุ่ม 'New Study' เพื่อทำการเริ่มข้อมูลใหม่ (Reset Data) ใหม่
2. คลิกปุ่ม 'Options' เพื่อทำการใส่รายละเอียดของการศึกษา เช่น ชื่อเรื่องที่ต้องการศึกษา ค่าเวลาในการเปิดวงจรล่าสุด เป็นต้น
3. คลิกปุ่ม 'Draw Single Line Diagram' เพื่อทำการสร้างไดอะแกรมเส้นเดียว โดยวาดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้โดยใช้เมาส์คลิกที่อุปกรณ์ที่ต้องการวาดแล้วคลิกอีกครั้งในหน้าต่างที่กำหนดไว้
4. คลิกขวาที่อุปกรณ์ไฟฟ้าในหน้าต่างไดอะแกรมเส้นเดียว เพื่อใส่ข้อมูลของอุปกรณ์ดังกล่าว เช่น ค่ากระแสฟัด อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ เป็นต้น
5. กลับมาสู่เมนู 'Main Menu' แล้วคลิกปุ่ม 'Execute Short Circuit Calculation' เพื่อทำการคำนวณกระแสลัดวงจร และหลังจากนั้นผู้ใช้งานสามารถดูผลลัพธ์ของกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้โดยคลิกที่เมนู 'Report' แล้วเลือกดูที่ 'Short Circuit Result'
6. กลับมาที่เมนู 'Main Menu' แล้วคลิกปุ่ม 'Protective Device Selection' เพื่อเข้าสู่เมนูการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน โดยในเมนูนี้ ผู้ใช้งานทำการคลิกที่หน้าต่าง 'Name of Equipment' เพื่อกำหนดว่าต้องการเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าใด (เช่น เลือก 'CB:Tr1_B' หมายถึง เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ)
7. เมื่อทำการคลิกเลือกในหน้าต่าง 'Name of Equipment' แล้ว โปรแกรมจะแสดงค่าฟัดต่างๆ เช่น ฟัดกระแส หรือ ฟัดกระแสลัดวงจร ที่อุปกรณ์ป้องกันนั้นต้องมีความสามารถได้ตามกำหนด และจากนั้นทำการเลือกขอบเขตของค่าฟัดต่างๆ ในหน้าต่าง 'Criterion_on' เพื่อกำหนดขอบเขตมากที่สุดและต่ำสุดของค่าฟัดที่ต้องการ แล้วจึงทำการเลือกรายชื่อผู้ผลิตที่ต้องการที่หน้าต่าง 'Manufacturer'
8. ทำการคลิกปุ่ม 'Search' แล้วโปรแกรมจะทำการเลือกอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดที่มีคุณสมบัติสอดคล้องตามค่าฟัดที่ต้องการ รวมทั้งเป็นอุปกรณ์ป้องกันของบริษัทที่ต้องการ โดยอุปกรณ์ป้องกันทั้งหมดจะอยู่ในหน้าต่าง 'Alternatives'

9. เลือกอุปกรณ์ป้องกันที่ต้องการเลือกใช้และต้องการปรับตั้งจากหน้าต่าง 'Alternative' ไปยังหน้าต่าง 'Selected' แล้วจากนั้นคลิกปุ่ม 'Accept Selected Protective Device' เพื่อส่งผ่านข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันที่เลือกไปส่วนการปรับตั้งต่อไป
10. กลับมาที่เมนู 'Main Menu' แล้วคลิกปุ่ม ' Protective Device Setting' เพื่อเข้าส่วนการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน
11. ในเมนู 'Protective Device Setting' ผู้ใช้งานสามารถเลือกที่จะแสดงกราฟคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน คุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมทั้งค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุด ตามต้องการ แล้วจึงปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันตามต้องการ หรืออาจเลือกอุปกรณ์ป้องกันใหม่ โดยกลับไปขั้นตอนที่ 6 ได้
12. เมื่อทำการเลือกและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันเรียบร้อยแล้ว จึงกลับมาที่หน้าต่าง 'Main Menu' เพื่อทำการบันทึกข้อมูลต่างๆลงในไฟล์โดยการคลิกปุ่ม 'Save Study' ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเรียกไฟล์ดังกล่าวเพื่อดึงข้อมูลกลับมาใช้ใหม่โดยคลิก 'Load Study' ซึ่งเมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ ถือได้ว่าทำการศึกษาเสร็จแล้ว ผู้ใช้งานสามารถดูผลสรุปการศึกษาได้โดยคลิกที่ปุ่ม 'Report'

5.3 การศึกษากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าตัวอย่างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนั้น จะนำมาทดสอบการทำงานกับระบบไฟฟ้า 3 ตัวอย่าง โดยระบบไฟฟ้าในตัวอย่างแรกนั้น ได้นำระบบไฟฟ้าในเอกสารอ้างอิง [14] ซึ่งเป็นวิทยานิพนธ์ที่ได้ทำการศึกษานำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจัดความสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกัน ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสอง

ส่วนระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 ที่ทำการศึกษานั้น ได้นำระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 1 มาดัดแปลงโดยเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงงาน (In-plant Generator) เข้าไป ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมสามารถหากระแสลัดวงจรในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรหลายแหล่งพร้อมกันได้ และต้องการแสดงถึงผลลัพธ์และการใช้งานกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ระหว่างกรณีที่เกิดลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 กับระบบไฟฟ้าในตัวอย่างแรกซึ่งไม่มีผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ว่าแตกต่างกันอย่างไร

ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 ที่ทำการศึกษา ได้นำตัวอย่างระบบไฟฟ้าในเอกสารอ้างอิง [20,21] ซึ่งเป็นตัวอย่างระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนานั้น สามารถใช้งานได้ในทางปฏิบัติจริงและมีความถูกต้อง

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าตัวอย่าง จะพิจารณารูปแบบการลัดวงจร 3 รูปแบบ คือ ลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล แบบหนึ่งเฟสลงดิน และ แบบระหว่างเฟส สำหรับการลัดวงจรแบบระหว่างเฟสลงดินจะไม่พิจารณาเนื่องจากเป็นรูปแบบการลัดวงจรที่ไม่ค่อยเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ [6]

5.3.1 การศึกษาระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

ข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 ที่แสดงในรูปที่ 5.15 มีดังนี้

ระบบไฟฟ้า : Network Feeder 1

กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสูงสุด ($S''_{kq \max}$) เท่ากับ 500 MVA

กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นต่ำสุด ($S''_{kq \min}$) เท่ากับ 400 MVA

แรงดันระบบ (U_n) เท่ากับ 22 kV ; X/R Ratio เท่ากับ 10

หม้อแปลงไฟฟ้า : Tr1

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 1000 kVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 22kV / 400V

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 6 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 13.5 kW

ลักษณะการต่อ คือ Delta-Wye to Ground ; $R_{(0)}/R_{(1)}$ เท่ากับ 1 ; $X_{(0)}/X_{(1)}$ เท่ากับ 0.95

สายไฟฟ้า 1 : Line1

ขนาดสาย 3x300 mm² ; กระแสพิกัด เท่ากับ 592 A ; ความยาวสาย เท่ากับ 60 เมตร

$R'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.062 m Ω /m ; $X'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.089 m Ω /m

$R_{L(0)}/R_{L(1)}$ เท่ากับ 4 ; $X_{L(0)}/X_{L(1)}$ เท่ากับ 3.5

สายไฟฟ้า 2 : Line2

ขนาดสาย 3x240 mm² ; กระแสพิกัด เท่ากับ 509 A ; ความยาวสาย เท่ากับ 30 เมตร

$R'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.077 m Ω /m ; $X'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.090 m Ω /m

$R_{L(0)}/R_{L(1)}$ เท่ากับ 4 ; $X_{L(0)}/X_{L(1)}$ เท่ากับ 3.5

มอเตอร์ 1 : M1

กำลังพิกัด (P_{rM}) เท่ากับ 40 kW ; แรงดันพิกัด (U_{rM}) เท่ากับ 400 V

กระแสยึดตัวหมุน (I_{LR}) เท่ากับ 434 A ; ค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos \varphi_r$) เท่ากับ 0.85

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_r) เท่ากับ 0.94 ; X/R Ratio เท่ากับ 5.5

$R_{M(0)}/R_{M(1)}$ เท่ากับ 15.2 ; $X_{M(0)}/X_{M(1)}$ เท่ากับ 5.3

เวลาเร่ง เท่ากับ 8 วินาที ; Max. Stall Time เท่ากับ 20 วินาที

มอเตอร์ 2 : M2

กำลังพิกัด (P_{rm}) เท่ากับ 200 kW ; แรงดันพิกัด (U_{rm}) เท่ากับ 400 V

กระแสยึดตัวหมุน (I_{LR}) เท่ากับ 2076 A ; ค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos \varphi_r$) เท่ากับ 0.86

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_r) เท่ากับ 0.97 ; X/R Ratio เท่ากับ 13.5

$R_{M(0)} / R_{M(1)}$ เท่ากับ 15.2 ; $X_{M(0)} / X_{M(1)}$ เท่ากับ 5.3

เวลาเร่ง เท่ากับ 8 วินาที ; Max. Stall Time เท่ากับ 20 วินาที

จากระบบไฟฟ้าตัวอย่างในรูปที่ 5.15 สามารถสรุปรายละเอียดของระบบไฟฟ้าได้ดังนี้

- ระบบไฟฟ้าตัวอย่างมีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรอยู่ 3 แหล่งด้วยกัน ได้แก่ ระบบไฟฟ้า (Network Feeder), มอเตอร์ 1 (Motor 1), มอเตอร์ 2 (Motor 2)
- กำหนดให้ระยะเวลาหน้อยที่สุดที่อุปกรณ์ตัดวงจรใช้แยกหน้าสัมผัสสุดท้ายออกจากกัน (t_{min}) เท่ากับ 0.02 วินาที
- เมื่อพิจารณาตำแหน่งลัดวงจรทุกๆ บัสแล้วตามวิธีในหัวข้อ 2.9 และ 2.12 สามารถแยกแยะได้ว่าแต่ละแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร จะพิจารณาเป็นการลัดวงจรประเภทไกลหรือใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดบ้างต้องพิจารณาร่วมกัน ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการพิจารณาที่บัส 1 ได้ดังนี้

เส้นทางการไหลของกระแสลัดวงจรจาก ระบบไฟฟ้า มายัง บัสที่ 1 ซึ่งเก็บในตัวแปร CurrentPath คือ { Feeder1 }

เส้นทางการไหลของกระแสลัดวงจรจาก มอเตอร์ 1 มายัง บัสที่ 1 ซึ่งเก็บในตัวแปร CurrentPath คือ { M1, Bus3, Line1, Bus2, Transformer1 }

เส้นทางการไหลของกระแสลัดวงจรจาก มอเตอร์ 2 มายัง บัสที่ 1 ซึ่งเก็บในตัวแปร CurrentPath คือ { M2, Bus4, Line2, Bus2, Transformer1 }

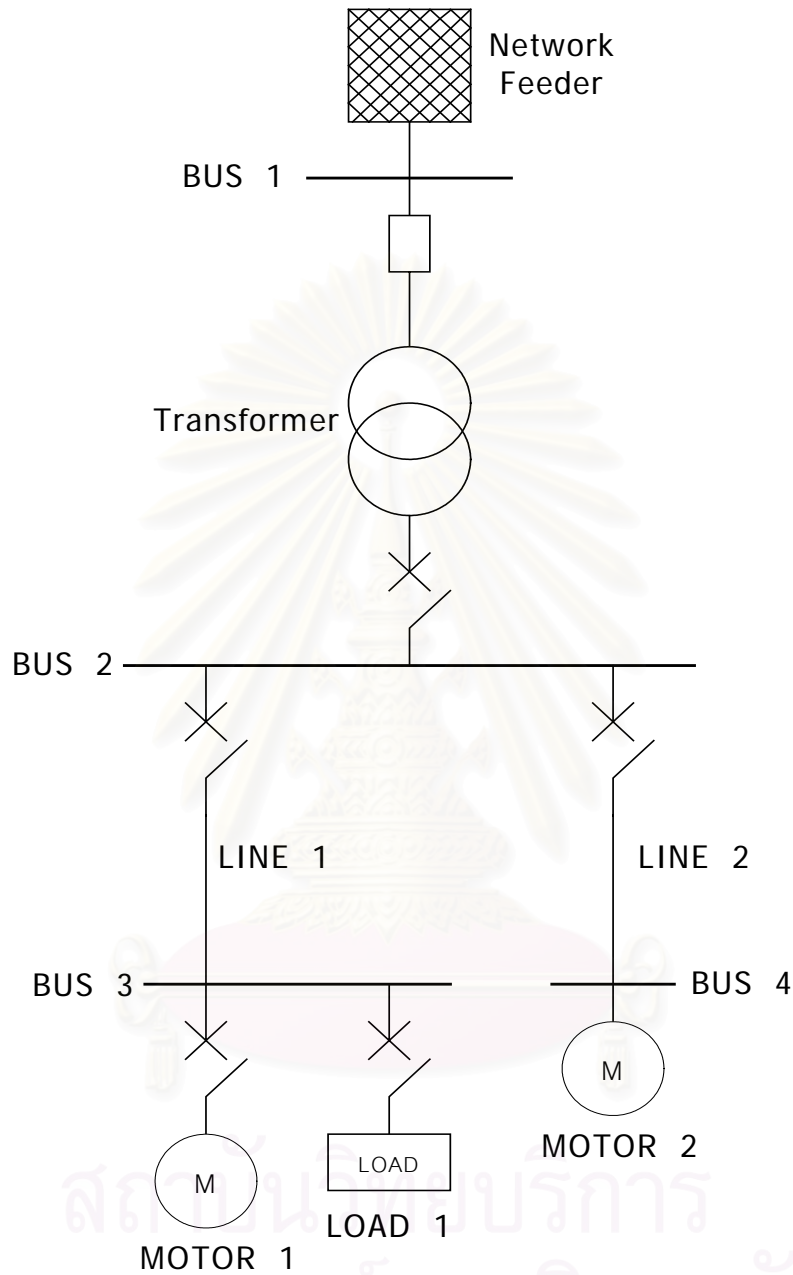
เมื่อทำการ Intersect เซตทั้ง 3 เซตที่ละคู่ จะได้ว่าเซตของระบบไฟฟ้าเมื่อ Intersect กับ เซตอื่นแล้ว จะได้สมาชิกเป็นเซตว่าง จะมีแต่การ Intersect ระหว่างเซตของมอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2 เท่านั้น ที่จะได้ผลลัพธ์คือ { Bus2, Transformer1 } ซึ่งไม่เท่ากับ เซตว่าง ดังนั้น จึงพิจารณา มอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2 ร่วมกัน ดังที่แสดงไว้ในขั้นตอนการคำนวณรูปที่ 5.1 และ 5.2

สำหรับการพิจารณาว่าเป็นประเภทการลัดวงจรแบบใดนั้น หลังจากทราบที่ตำแหน่งลัดวงจรใดๆ นั้น มีกระแสลัดวงจรไหลมาจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใดบ้าง ซึ่งในกรณีของการลัดวงจรที่บัสที่ 1 ในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 จะมี 2 ส่วน คือ ในส่วนแรกมาจากระบบไฟฟ้า และส่วนที่สองมาจาก มอเตอร์ 1 และมอเตอร์ 2 นั้น เมื่ออาศัยแนวพิจารณาที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้วจะได้ว่า กระแสลัดวงจรที่มาจากระบบไฟฟ้าจะพิจารณาได้เป็นการลัดวงจรประเภทไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกระแสลัดวงจรที่มาจาก มอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2 จะพิจารณาได้เป็นการลัดวงจรประเภทใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ดังนั้น สำหรับการลัดวงจรที่บัสอื่นๆ สามารถพิจารณาได้ในแนววิธีเดียวกันซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปประเภทการลัดวงจรของแต่ละแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร

ตำแหน่งเกิดการลัดวงจร	แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร	ประเภทการลัดวงจร
บัสที่ 1	1 ระบบไฟฟ้า (Network Feeder)	ไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	2 { มอเตอร์ 1 (MOTOR 1) มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
บัสที่ 2	1 ระบบไฟฟ้า (Network Feeder)	ไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	2 มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	3 มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
บัสที่ 3	1 { ระบบไฟฟ้า (Network Feeder) มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	ไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	2 มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
บัสที่ 4	1 { ระบบไฟฟ้า (Network Feeder) มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	ไกลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	2 มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.15 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างจากเอกสารอ้างอิง [14]

5.3.1.1 พิจารณากรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด

จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.15 เมื่อพิจารณากรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับศูนย์ได้ ดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.15 กรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด โดยพิจารณาที่ระดับแรงดัน 400 V

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ($m\Omega$)
ระบบไฟฟ้า (Network Feeder)	0.0350+j0.3502
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	2.16+j9.35
มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	95.19+j523.5
มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	8.22+j110.9
สายไฟ 1 (LINE 1)	3.72+j5.34
สายไฟ 2 (LINE 2)	2.31+j2.7

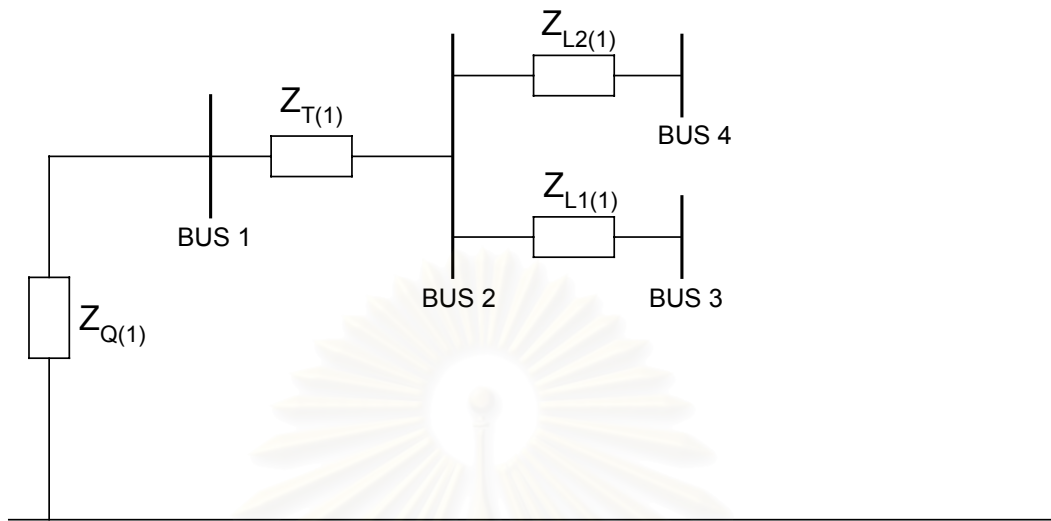
ตารางที่ 5.3 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.15 กรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด โดยพิจารณาที่ระดับแรงดัน 400 V

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ ($m\Omega$)
ระบบไฟฟ้า (Network Feeder)	-
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	2.16+j8.89
มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	1446.9+j2774.6
มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	124.9+j587.8
สายไฟ 1 (LINE 1)	14.88+j18.69
สายไฟ 2 (LINE 2)	9.24+j9.45

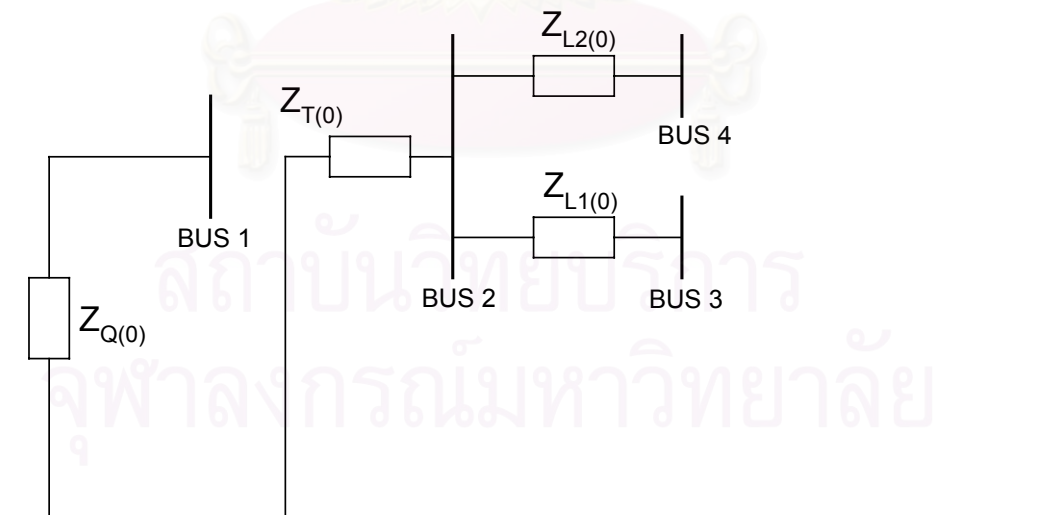
เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัสที่ 1 สามารถแสดงวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรได้ดังนี้
พิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่ละแหล่งดังนี้

- แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร : ระบบไฟฟ้า

วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวกและลำดับศูนย์ กรณีพิจารณาแหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ ระบบไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวก กรณีพิจารณาแหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.17 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับศูนย์ กรณีพิจารณาแหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ ระบบไฟฟ้า

อิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวกและลำดับลบที่บัสที่ 1 เท่ากับ

$$Z_{k(1)} = Z_{Q(1)} = 0.0350 + j0.3502 \text{ m}\Omega, |Z_{k(1)}| = 0.3519 \text{ m}\Omega$$

อิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับศูนย์ที่บัสที่ 1 เท่ากับ

$$Z_{k(0)} = Z_{Q(0)} = 0 \text{ m}\Omega$$

เมื่อเกิดลัดวงจรแบบลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น

$$I''_{k3} = \frac{1.1 \times 400}{\sqrt{3} \times 0.3519} = 721.8011 \text{ kA ที่แรงดัน 400 V}$$

$$\text{หรือ } I''_{k3} = 721.8011 \times \left(\frac{0.4}{22}\right) = 13.12 \text{ kA ที่แรงดัน 22 kV}$$

2. กระแสลัดวงจรค้ายอด

$$\chi = 1.02 + 0.98e^{(-3 \times 0.0350/0.3502)} = 1.7461$$

$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times 13.12 = 32.4 \text{ kA}$$

3. กระแสลัดวงจรสมมาตร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ ระบบไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } I_b = I''_{k3} = 13.12 \text{ kA}$$

4. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ ระบบไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } I_k = I''_{k3} = 13.12 \text{ kA}$$

5. องค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร

จากความสัมพันธ์ที่ (2.11) จะได้

$$i_{dc} = \sqrt{2} \times 13.12 \times e^{(-2 \times \pi \times 50 \times 0.02 \times 0.0350/0.3502)} = 9.90 \text{ kA}$$

เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น

$$I''_{k1} = \sqrt{3} \cdot \frac{1.1 \cdot 400}{2 \cdot (0.3519) + 0} = 1082.36 \text{ kA ที่แรงดัน 400 V}$$

$$\text{หรือ } I''_{k3} = 1082.36 \times \left(\frac{0.4}{22}\right) = 19.68 \text{ kA ที่แรงดัน 22 kV}$$

2. กระแสลัดวงจรค่ายอด

$$\chi = 1.02 + 0.98e^{(-3 \times 0.0350/0.3502)} = 1.7461$$

$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times 19.68 = 48.6 \text{ kA}$$

3. กระแสตัดวงจรสมมาตร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ ระบบไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } I_b = I''_{k1} = 19.68 \text{ kA}$$

4. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ ระบบไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } I_k = I''_{k1} = 19.68 \text{ kA}$$

5. องค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร

จากความสัมพันธ์ที่ (2.11) จะได้

$$i_{dc} = \sqrt{2} \times 19.68 \times e^{(-2 \times \pi \times 50 \times 0.02 \times 0.0350/0.3502)} = 14.85 \text{ kA}$$

เมื่อเกิดลัดวงจรแบบระหว่างเฟส

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น

$$I''_{k2} = \frac{1.1 \times 400}{(0.3519 + 0.3519)} = 625.1 \text{ kA ที่แรงดัน 400 V}$$

$$\text{หรือ } I''_{k2} = 625.1 \times \left(\frac{0.4}{22}\right) = 11.36 \text{ kA ที่แรงดัน 22 kV}$$

2. กระแสลัดวงจรค่ายอด

$$\chi = 1.02 + 0.98e^{(-3 \times 0.0350/0.3502)} = 1.7461$$

$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times 11.36 = 28.06 \text{ kA}$$

3. กระแสตัดวงจรสมมาตร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ ระบบไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } I_b = I''_{k2} = 11.36 \text{ kA}$$

4. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ ระบบไฟฟ้า

$$\text{ดังนั้น } I_k = I''_{k2} = 11.36 \text{ kA}$$

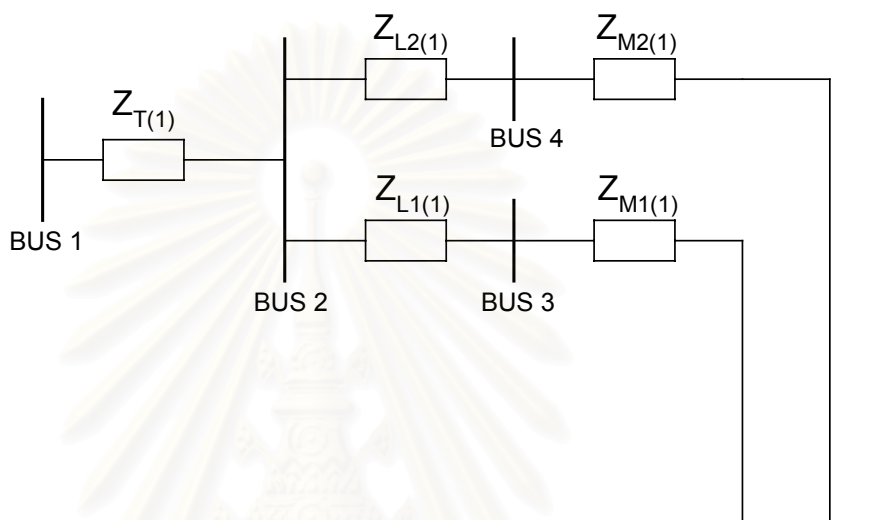
5. องค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร

จากความสัมพันธ์ที่ (2.11) จะได้

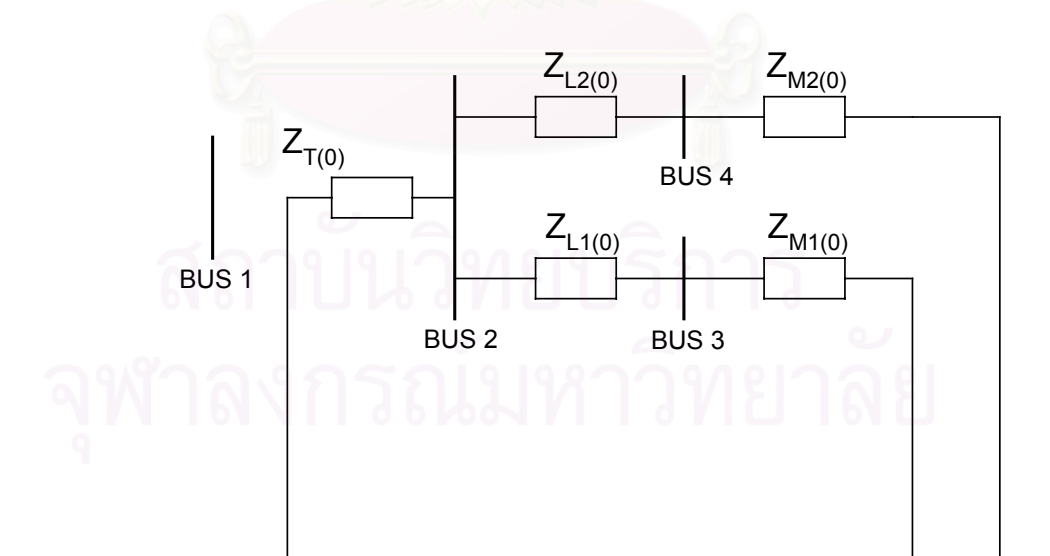
$$i_{dc} = \sqrt{2} \times 11.36 \times e^{(-2 \times \pi \times 50 \times 0.02 \times 0.0350/0.3502)} = 8.578 \text{ kA}$$

- แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร : มอเตอร์ 1 และมอเตอร์ 2

วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวกและลำดับศูนย์ กรณีพิจารณาแหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ มอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวก กรณีพิจารณาแหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ มอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2



รูปที่ 5.19 วงจรสมมูลสำหรับคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับศูนย์ กรณีพิจารณาแหล่งกำเนิดลัดวงจร คือ มอเตอร์ 1 และ มอเตอร์ 2

อิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับบวกและลำดับลบที่บัสที่ 1 เท่ากับ

$$Z_{k(1)} = Z_{T(1)} + (Z_{L1(1)} + Z_{M1(1)}) // (Z_{L2(1)} + Z_{M2(1)}) = 12.37 + j102.98 \text{ m}\Omega$$

$$|Z_{k(1)}| = 103.72 \text{ m}\Omega$$

อิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลลำดับศูนย์ที่บัสที่ 1 เท่ากับ

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

จากการพิจารณาตามหัวข้อที่ 2.12 คือเป็นการพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรพร้อมกันตั้งแต่ 2 แหล่งขึ้นไป ดังนั้นจึงพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่มีความสามารถในการสร้างกระแสลัดวงจรสูงสุด ซึ่งในกรณีนี้คือมอเตอร์ 2

เมื่อเกิดลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น

$$i''_{k3} = \frac{1.1 \times 400}{\sqrt{3} \times 103.72} = 2.449 \text{ kA ที่แรงดัน 400 V}$$

$$\text{หรือ } i''_{k3} = 2.449 \times \left(\frac{0.4}{22}\right) = 0.045 \text{ kA ที่แรงดัน 22 kV}$$

2. กระแสลัดวงจรค่ายอด

$$\chi = 1.02 + 0.98e^{(-3 \times 12.368/102.98)} = 1.704$$

$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times 0.045 = 0.108 \text{ kA}$$

3. กระแสลัดวงจรสมมาตร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ มอเตอร์ 2

เนื่องจาก $i''_{k3}/I_{rm} = 45/346 = 0.13$ ซึ่งน้อยกว่า 2 ดังนั้น $\mu = 1.0$

$$q = 1.03 + 0.12 \ln(0.2/2) = 0.754$$

$$\text{ดังนั้น } I_b = \mu \times q \times i''_{k3} = 1.0 \times 0.754 \times 0.045 = 0.034 \text{ kA}$$

4. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ มอเตอร์ 2

$$\text{ดังนั้น } I_k = 0 \text{ kA}$$

5. องค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร

จากความสัมพันธ์ที่ (2.11) จะได้

$$i_{dc} = \sqrt{2} \times 0.0445 \times e^{(-2 \times \pi \times 50 \times 0.02 \times 12.368 / 102.98)} = 0.029 \text{ kA}$$

เมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น

$$i''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 400}{(2 \times 103.72)} = 3.67 \text{ kA ที่แรงดัน 400 V}$$

$$\text{หรือ } i''_{k1} = 3.67 \times \left(\frac{0.4}{22}\right) = 0.0667 \text{ kA ที่แรงดัน 22 kV}$$

2. กระแสลัดวงจรค่ายอด

$$\chi = 1.02 + 0.98e^{(-3 \times 12.368 / 102.98)} = 1.704$$

$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times 0.0667 = 0.1607 \text{ kA}$$

3. กระแสตัดวงจรสมมาตร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ มอเตอร์ 2

เนื่องจาก $i''_{k1} / I_{rm} = 66.7 / 346 = 0.192$ ซึ่งน้อยกว่า 2 ดังนั้น $\mu = 1.0$

$$q = 1.03 + 0.12 \ln(0.2/2) = 0.754$$

$$\text{ดังนั้น } I_b = \mu \times q \times i''_{k1} = 1.0 \times 0.754 \times 0.0667 = 0.05 \text{ kA}$$

4. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรที่พิจารณาคือ มอเตอร์ 2

$$\text{ดังนั้น } I_k = 0 \text{ kA}$$

5. องค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร

จากความสัมพันธ์ที่ (2.11) จะได้

$$i_{dc} = \sqrt{2} \times 0.0667 \times e^{(-2 \times \pi \times 50 \times 0.02 \times 12.368 / 102.98)} = 0.044 \text{ kA}$$

เมื่อเกิดลัดวงจรแบบระหว่างเฟส

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น

$$i''_{k2} = \frac{1.1 \times 400}{(103.72 + 103.72)} = 2.1211 \text{ kA ที่แรงดัน 400 V}$$

$$\text{หรือ } i''_{k2} = 2.1211 \times \left(\frac{0.4}{22}\right) = 0.038 \text{ kA ที่แรงดัน 22 kV}$$

2. กระแสลัดวงจรค่ายอด

$$\chi = 1.02 + 0.98e^{(-3 \times 12.368 / 102.98)} = 1.704$$

$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times 0.038 = 0.09 \text{ kA}$$

3. กระแสตัดวงจรสมมาตร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสตัดวงจรที่พิจารณาคือ มอเตอร์ 2

เนื่องจาก $I''_{k2} / I_m = 38/346 = 0.11$ ซึ่งน้อยกว่า 2 ดังนั้น $\mu = 1.0$

$$q = 1.03 + 0.12 \ln(0.2/2) = 0.754$$

$$\text{ดังนั้น } I_b = \mu \times q \times I''_{k2} = 1.0 \times 0.754 \times 0.038 = 0.029 \text{ kA}$$

4. กระแสตัดวงจรอยู่ตัว

เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสตัดวงจรที่พิจารณาคือ มอเตอร์ 2

$$\text{ดังนั้น } I_k = 0 \text{ kA}$$

5. องค์ประกอบไฟตรงของกระแสตัดวงจร

จากความสัมพันธ์ที่ 2.6 จะได้

$$i_{dc} = \sqrt{2} \times 0.038 \times e^{(-2 \times \pi \times 50 \times 0.02 \times 12.368 / 102.98)} = 0.025 \text{ kA}$$

ดังนั้น ค่ากระแสตัดวงจรที่บัส 1 มีค่าเท่ากับ ค่ากระแสตัดวงจรจากระบบไฟฟ้ารวมกับ ค่ากระแสตัดวงจรจากมอเตอร์ 1 และมอเตอร์ 2 ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้

ลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล

$$I''_{k3} = I''_{k3 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I''_{k3 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 13.12 + 0.045 = 13.17 \text{ kA}$$

$$i_{p3} = i_{p3 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + i_{p3 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 32.4 + 0.108 = 32.51 \text{ kA}$$

$$I_{b3} = I_{b3 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{b3 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 13.12 + 0.034 = 13.15 \text{ kA}$$

$$I_{k3} = I_{k3 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{k3 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 13.12 + 0 = 13.12 \text{ kA}$$

$$I_{dc3} = I_{dc \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{dc \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 9.90 + 0.029 = 9.93 \text{ kA}$$

ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

$$I''_{k1} = I''_{k1 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I''_{k1 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 19.68 + 0.0667 = 19.75 \text{ kA}$$

$$i_{p1} = i_{p1 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + i_{p1 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 48.6 + 0.1607 = 48.76 \text{ kA}$$

$$I_{b1} = I_{b1 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{b1 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 19.68 + 0.05 = 19.73 \text{ kA}$$

$$I_{k1} = I_{k1 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{k1 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 19.68 + 0 = 19.68 \text{ kA}$$

$$I_{dc1} = I_{dc \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{dc \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 14.85 + 0.044 = 14.89 \text{ kA}$$

ลัดวงจรแบบระหว่างเฟส

$$I''_{k2} = I''_{k2 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I''_{k2 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 11.36 + 0.038 = 11.40 \text{ kA}$$

$$i_{p2} = i_{p2 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + i_{p2 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 28.06 + 0.09 = 28.15 \text{ kA}$$

$$I_{b2} = I_{b2 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{b2 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 11.36 + 0.029 = 11.39 \text{ kA}$$

$$I_{k2} = I_{k2 \text{จากระบบไฟฟ้า}} + I_{k2 \text{จากมอเตอร์ 1+2}} = 11.36 + 0 = 11.36 \text{ kA}$$

$$I_{dc2} = I_{dc \text{ 2จากระบบไฟฟ้า}} + I_{dc \text{ 2จากมอเตอร์ 1+2}} = 8.58 + 0.025 = 8.61 \text{ kA}$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัส 2 บัส 3 หรือบัส 4 ก็สามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรตามวิธีที่ได้แสดงในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่บัส 1 ซึ่งในที่นี้จะแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณกระแสลัดวงจรที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณเหมือนการคำนวณกระแสลัดวงจรที่บัสที่ 1 โดยผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 5.4, 5.5, 5.6 ซึ่งแสดงค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่ไหลในแต่ละกิ่งเข้ามาสู่บัสที่เกิดลัดวงจรของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1 ของแต่ละรูปแบบการลัดวงจร ซึ่งข้อมูลในลักษณะนี้จะนำไปใช้พิจารณาปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน และ ในตารางที่ 5.7 แสดงค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่ไหลรวมในแต่ละบัสของทุกประเภทการเกิดกระแสลัดวงจร ซึ่งนำไปใช้ในการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.13 โดยค่ากระแสลัดวงจรที่แสดงในตารางต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นค่ากระแสลัดวงจรที่พิจารณาอ้างอิงที่ระดับแรงดันที่บัสลัดวงจรมานั้น

ตารางที่ 5.4 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ,กรณีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	13.12	32.40	13.12	13.12	9.90
	บัส2 - บัส1	0.04	0.11	0.03	0.00	0.00
บัส 2	บัส1 - บัส2	23.21	49.80	23.21	23.21	7.92
	บัส3 - บัส2	0.43	0.96	0.22	0.00	0.19
	บัส4 - บัส2	2.02	5.04	1.37	0.00	1.60
บัส 3	บัส2 - บัส3	15.03	28.04	15.03	15.03	1.78
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.43	0.97	0.22	0.00	0.20
บัส 4	บัส2 - บัส4	17.74	33.83	17.74	17.74	2.54
	มอเตอร์ 2 - บัส4	2.08	5.30	1.40	0.00	1.84

ตารางที่ 5.5 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน, กรณีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	19.68	48.60	19.68	19.68	14.85
	บัส2 - บัส1	0.07	0.16	0.05	0.00	0.04
บัส 2	บัส1 - บัส2	23.86	51.18	23.86	23.86	8.14
	บัส3 - บัส2	0.64	1.42	0.31	0.00	0.28
	บัส4 - บัส2	2.92	7.28	1.91	0.00	2.31
บัส 3	บัส2 - บัส3	11.04	20.60	11.04	11.04	1.03
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.63	1.42	0.31	0.00	0.29
บัส 4	บัส2 - บัส4	14.63	27.90	14.63	14.63	2.09
	มอเตอร์ 2 - บัส4	2.87	7.33	1.88	0.00	2.55

ตารางที่ 5.6 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบระหว่างเฟส, กรณีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	11.36	28.06	11.36	11.36	8.57
	บัส2 - บัส1	0.04	0.09	0.03	0.00	0.03
บัส 2	บัส1 - บัส2	20.10	43.13	20.10	20.10	6.86
	บัส3 - บัส2	0.37	0.83	0.19	0.00	0.16
	บัส4 - บัส2	1.75	4.37	1.20	0.00	1.38
บัส 3	บัส2 - บัส3	13.01	24.29	13.01	13.01	1.54
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.38	0.84	0.19	0.00	0.17
บัส 4	บัส2 - บัส4	15.36	29.30	15.36	15.36	2.20
	มอเตอร์ 2 - บัส4	1.80	4.59	1.23	0.00	1.60

ตารางที่ 5.7 สรุปผลการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดที่แต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร		I''_k (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)
บัส 1	สามเฟสสมดุล	13.17	32.51	13.16	13.12	9.93
	หนึ่งเฟสลงดิน	19.75	48.76	19.73	19.68	14.89
	ระหว่างเฟส	11.40	28.15	11.39	11.36	8.60
บัส 2	สามเฟสสมดุล	25.66	55.81	24.80	23.21	9.71
	หนึ่งเฟสลงดิน	27.41	59.89	26.08	23.86	10.73
	ระหว่างเฟส	22.23	48.33	21.49	20.10	8.41
บัส 3	สามเฟสสมดุล	15.46	29.02	15.25	15.03	1.97
	หนึ่งเฟสลงดิน	11.67	22.02	11.34	11.04	1.59
	ระหว่างเฟส	13.39	25.13	13.21	13.01	1.71
บัส 4	สามเฟสสมดุล	19.82	39.13	19.14	17.74	4.38
	หนึ่งเฟสลงดิน	17.50	35.23	16.52	14.63	4.64
	ระหว่างเฟส	17.16	33.88	16.59	15.36	3.80

5.3.1.2 พิจารณากรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด

จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.15 เมื่อพิจารณากรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด โดยอาศัยข้อกำหนดในหัวข้อ 2.8 (เรื่องการคำนวณกระแสลัดวงจรต่ำสุด) แล้ว สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับศูนย์สำหรับกรณีคำนวณกระแสลัดวงจรต่ำสุดได้ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.15 ที่ใช้คำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Ω)
วงจรจ่ายไฟ (Network feeder)	$0.0397 + j 0.398$
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	$2.16 + j 9.35$
มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	$95.19 + j 523.5$
มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	$8.22 + j 110.9$
สายไฟ 1 (LINE 1)	$4.613 + j 5.34$
สายไฟ 2 (LINE 2)	$2.86 + j 2.7$

ตารางที่ 5.9 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ารูปที่ 5.15 ที่ใช้คำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด

อุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Ω)
วงจรจ่ายไฟ (Network feeder)	-
หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)	2.16+ j 8.89
มอเตอร์ 1 (MOTOR 1)	1446.9 + j 2774.6
มอเตอร์ 2 (MOTOR 2)	124.9 + j 587.8
สายไฟ 1 (LINE 1)	18.4512+ j 18.69
สายไฟ 2 (LINE 2)	11.44+ j 9.45

การคำนวณกระแสลัดวงจรต่ำสุดนี้จะใช้ข้อกำหนดในหัวข้อที่ 2.8 คือจะไม่คิดผลของกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ (กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์เท่ากับศูนย์) ส่วนความสัมพันธ์และขั้นตอนการคำนวณอย่างอื่นจะเหมือนกับการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดดังแสดงข้างต้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ในกรณีการคำนวณกระแสลัดวงจรต่ำสุดจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 5.10, 5.11, 5.12 และ 5.13

ตารางที่ 5.10 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่โหนดในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล, ลัดวงจรแบบค่ากระแสต่ำสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	10.50	25.92	10.50	10.50	7.92
	บัส2 - บัส1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 2	บัส1 - บัส2	21.95	47.12	21.95	21.95	7.52
	บัส3 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	บัส4 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 3	บัส2 - บัส3	8.80	12.86	8.80	8.80	0.00
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 4	บัส2 - บัส4	11.98	17.88	11.98	11.98	0.02
	มอเตอร์ 2 - บัส4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.11 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน, ลัดวงจรแบบค่ากระแสต่ำสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	15.75	38.88	15.75	15.75	11.88
	บัส2 - บัส1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 2	บัส1 - บัส2	22.59	48.50	22.59	22.59	7.74
	บัส3 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	บัส4 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 3	บัส2 - บัส3	5.09	7.43	5.09	5.09	0.00
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 4	บัส2 - บัส4	7.61	11.37	7.61	7.61	0.01
	มอเตอร์ 2 - บัส4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.12 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบระหว่างเฟส, ลัดวงจรแบบค่ากระแสต่ำสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	9.09	22.45	9.09	9.09	6.86
	บัส2 - บัส1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 2	บัส1 - บัส2	19.01	40.80	19.01	19.01	6.51
	บัส3 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	บัส4 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 3	บัส2 - บัส3	7.62	11.14	7.62	7.62	0.00
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 4	บัส2 - บัส4	10.38	15.49	10.38	10.38	0.01
	มอเตอร์ 2 - บัส4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.13 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุดของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 1

ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร		I''_k (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)
บัส 1	สามเฟสสมดุล	10.50	25.92	10.50	10.50	7.92
	หนึ่งเฟสลงดิน	15.76	38.88	15.75	15.75	11.88
	ระหว่างเฟส	9.09	22.45	9.09	9.09	6.86
บัส 2	สามเฟสสมดุล	21.95	47.12	21.95	21.95	7.52
	หนึ่งเฟสลงดิน	22.59	48.50	22.59	22.59	7.74
	ระหว่างเฟส	19.01	40.80	19.01	19.01	6.51
บัส 3	สามเฟสสมดุล	8.80	12.86	8.80	8.80	0.00
	หนึ่งเฟสลงดิน	5.09	7.43	5.09	5.09	0.00
	ระหว่างเฟส	7.62	11.14	7.62	7.62	0.00
บัส 4	สามเฟสสมดุล	11.98	17.88	11.98	11.98	0.02
	หนึ่งเฟสลงดิน	7.61	11.37	7.61	7.61	0.01
	ระหว่างเฟส	10.38	15.49	10.38	10.38	0.01

จากข้อมูลในตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.13 และอาศัยรายละเอียดในบทที่ 2 บทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถสรุปผลลัพธ์ที่ได้เพื่อใช้ในการเลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันดังตารางที่ 5.14 และ 5.15 ซึ่งเป็นข้อมูลกระแสลัดวงจรที่เราต้องการนั่นเอง

ตารางที่ 5.14 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

ตำแหน่ง ลัดวงจร	เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน						
	LV. Fuse	MV. Fuse	LV. CB		MV. CB		
	I_b	I_b	I_{cu}, I_{cs}	I_{cm}	I_b	I_{basym}	I_{MC}
บัสที่ 1	-	19.73	-	-	19.73	24.72	48.76
บัสที่ 2	26.08	-	26.08	59.89	-	-	-
บัสที่ 3	15.25	-	15.25	29.02	-	-	-
บัสที่ 4	19.14	-	19.14	39.13	-	-	-

หน่วย : kA

ตารางที่ 5.15 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

บัสที่อุปกรณ์ป้องกัน ทำหน้าที่ป้องกัน	อุปกรณ์ป้องกัน ติดตั้งระหว่าง	I''_{kMax}	I''_{kMin}	I''_{kAsym}	I_{kMax}	I_{kMin}
บัส 1	Feeder1-Bus1	19.68	9.09	24.66	19.68	9.09
บัส 2	Bus1-Bus2	23.86	19.01	25.21	23.86	19.01
บัส 3	Bus2-Bus3	15.03	5.09	15.13	15.03	5.09
บัส 4	Bus2-Bus4	17.74	7.61	17.92	17.74	7.61

หน่วย : kA

จากการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าตัวอย่างซึ่งได้นำมาจากเอกสารอ้างอิง [14] สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในเอกสารอ้างอิง [14] กับการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ดังตารางที่ 5.16 และตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรแบบสามเฟสระหว่างผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [14] กับที่ได้จากการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ตำแหน่ง ลัดวงจร	ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ พัฒนา					ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรจากเอกสารอ้างอิง อิง [14]				
	I''_k (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)	I''_k (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)
บัส 1	13.17	32.51	13.16	13.12	9.93	13.16	-	-	-	-
บัส 2	25.66	55.81	24.80	23.21	9.71	25.65	-	-	-	-
บัส 3	15.46	29.02	15.25	15.03	1.97	15.45	-	-	-	-
บัส 4	19.82	39.13	19.14	17.74	4.38	19.74	-	-	-	-

ตารางที่ 5.17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินระหว่างผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [14] กับที่ได้จากการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ตำแหน่ง ลัดวงจร	ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรจากโปรแกรมที่ พัฒนา					ผลการคำนวณกระแสลัดวงจรจากเอกสารอ้างอิง [14]				
	I_k'' (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)	I_k'' (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)
บัส 1	19.75	48.76	19.73	19.68	14.89	19.75	-	-	-	-
บัส 2	27.41	59.89	26.08	23.86	10.73	25.67	-	-	-	-
บัส 3	11.67	22.02	11.34	11.04	1.59	11.25	-	-	-	-
บัส 4	17.50	35.23	16.52	14.63	4.64	15.75	-	-	-	-

จากตารางที่ 5.16 และตารางที่ 5.17 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำการพัฒนา กับผลลัพธ์จากวิทยานิพนธ์ตามเอกสารอ้างอิงที่ [14] มีความแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน่าจะเกิดมาจากการบวกกระแสลัดวงจรแบบพีชคณิตของค่ากระแสลัดวงจรจากแต่ละแหล่งกระแสลัดวงจร รวมทั้งขั้นตอนในการคำนวณที่แตกต่างกันคือ ในเอกสารอ้างอิงที่ [14] จะคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลของทุกแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรพร้อมกัน ในขณะที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแยกคิดอิมพีแดนซ์ลัดวงจรสมมูลของแต่ละแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร เพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรจากแต่ละแหล่งกำเนิดก่อน แล้วจึงนำมาบวกรวมในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งเป็นแนววิธีที่ได้แสดงในมาตรฐาน IEC 909 [2]

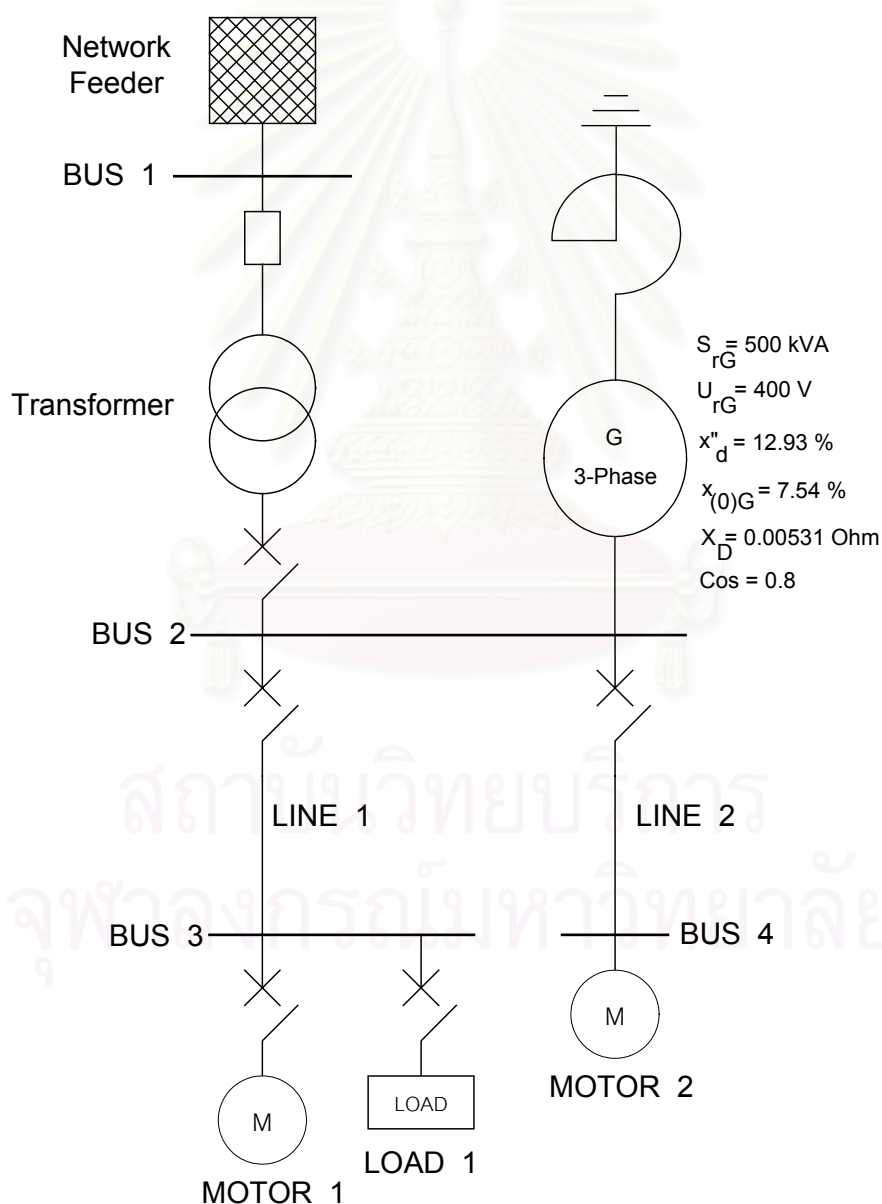
นอกจากนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำการพัฒนาสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรค่าต่ำสุดได้โดยอาศัยข้อกำหนดจากมาตรฐาน IEC 909 ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในเอกสารอ้างอิง [14] ไม่สามารถคำนวณได้ และยังสามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรโดยแบ่งจากที่แต่ละแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรได้ซึ่งโปรแกรมในเอกสารอ้างอิง [14] ไม่สามารถทำได้ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งข้อมูลกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ยังเป็นระบบคือ กำหนดลงไปเลยว่า ในการเลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ ต้องใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรตั้งที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หรือในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน ต้องใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่มีข้อกำหนดตั้งที่กล่าวไว้ในบทที่ 4

สำหรับการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างนั้น ผู้อ่านสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง [14] ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการปรับตั้งไว้อย่างละเอียด

ในหัวข้อถัดไปจะได้กล่าวถึงข้อได้เปรียบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น อีกข้อหนึ่งคือ สามารถคำนวณกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยใช้วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามวิธีที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 909

5.3.2 การศึกษาระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 นี้มีลักษณะคล้ายระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 โดยมีการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 500 kVA ที่บัส 2 และมีค่าพิกัดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในโรงงาน

การคำนวณระบบไฟฟ้าตัวอย่างในรูปที่ 5.20 จะคล้ายกับการคำนวณกระแสลัดวงจรที่แสดงในหัวข้อ 5.3.2 แตกต่างกันตรงที่ มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมา ซึ่งนั่นหมายถึงมีแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นมาอีก 1 แหล่งนั่นเอง โดยข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แสดงในรูปที่ 5.20 ส่วนข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ จะเหมือนในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

ดังนั้นในการคำนวณกระแสลัดวงจรในตัวอย่างนี้ จึงเพียงคำนวณอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ 2.9.2 เพิ่มจากตัวอย่างที่แล้ว และคำนวณตามแนวทางที่แสดงในหัวข้อ 5.3.2

ค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ (2.12) ได้ดังนี้

$$X_{(1)G} = X_d'' = \frac{x_d'' U_{rG}^2}{100\% \cdot S_{rG}} = \frac{12.93\% \cdot 0.4^2 \text{ kV}^2}{100\% \cdot 0.5 \text{ MVA}} = 0.04138 \ \Omega$$

$$R_{(1)G} = 0.15 X_{(1)G} = 0.15 \cdot 0.04138 = 0.00621 \ \Omega \quad (\text{จากหัวข้อที่ 2.9.2})$$

$$Z_{(1)G} = 0.00621 + j0.04138 \ \Omega$$

และจากความสัมพันธ์ที่ (2.13) ค่าตัวคูณสำหรับอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (K_G) เท่ากับ

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} = \frac{0.4 \text{ kV}}{0.4 \text{ kV}} \cdot \frac{1}{1 + 0.1293 \cdot 0.6} = 0.928$$

$$Z_{(1)GK} = K_G Z_{(1)G} = 0.928 \cdot (0.00621 + j0.04138) \ \Omega = (0.00576 + j0.0384) \ \Omega$$

$$Z_{(1)GK} = \sqrt{0.00576^2 + 0.0384^2} \ \Omega = 0.03883 \ \Omega$$

ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า:

$$X_{(0)G} = \frac{x_{(0)G}}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = \frac{7.54\%}{100\%} \cdot \frac{0.4^2 \text{ kV}^2}{0.5 \text{ MVA}} = 0.02413 \ \Omega$$

$$R_{(0)G} = R_{(1)G} = 0.00621 \ \Omega$$

$$Z_{(0)G} = 0.00621 + j0.02413 \ \Omega$$

$$Z_{(0)GK} = K_G \cdot Z_{(0)G} = 0.928(0.00621 + j0.02413)\Omega = (0.00576 + j0.02239) \Omega$$

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการต่อคาร์ี่แยกแดนซ์ที่สายนิวทรัลไว้เพื่อลดกระแสลัดวงจร โดยคาร์ี่แยกแดนซ์ X_D เท่ากับ 0.00531Ω ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของตัวรีแยกแดนซ์ เท่ากับ

$$Z_{(0)D} = 3 \cdot jX_D = j3 \cdot 0.00531 = j0.01593 \Omega$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้นี้จะใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดและกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด ซึ่งผลการคำนวณที่ได้จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.18 ถึงตารางที่ 5.21 ส่วนผลการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.22 ถึงตารางที่ 5.25 และสรุปผลลัพธ์ทั้งหมดของกระแสลัดวงจรที่จะนำไปใช้งานต่างๆของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 ในตารางที่ 5.25 และ 5.26

ตารางที่ 5.18 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่โหนดในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล ,ลัดวงจรแบบค่ากระแสสูงสุด				
		I''_k	I_p	I_b	I_k	I_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	13.12	32.40	13.12	13.12	9.90
	บัส2 - บัส1	0.12	0.29	0.12	0.12	0.06
บัส 2	บัส1 - บัส2	23.21	49.80	23.21	23.21	7.92
	Gen - บัส2	5.95	13.84	5.18	5.95	3.28
	บัส3 - บัส2	0.43	0.96	0.22	0.00	0.19
	บัส4 - บัส2	2.02	5.04	1.37	0.00	1.60
บัส 3	บัส2 - บัส3	16.94	31.26	16.94	16.94	1.80
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.43	0.97	0.22	0.00	0.20
บัส 4	บัส2 - บัส4	20.88	39.42	20.88	20.88	2.74
	มอเตอร์ 2 - บัส4	2.08	5.30	1.40	0.00	1.84

ตารางที่ 5.19 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ,ลัดวงจรแบบค่ากระแสสูงสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	19.68	48.60	19.68	19.68	14.85
	บัส2 - บัส1	0.19	0.43	0.19	0.19	0.10
บัส 2	บัส1 - บัส2	23.86	51.18	23.86	23.86	8.14
	Gen - บัส2	8.15	18.95	6.96	8.15	4.49
	บัส3 - บัส2	0.64	1.42	0.31	0.00	0.28
	บัส4 - บัส2	2.92	7.28	1.91	0.00	2.31
บัส 3	บัส2 - บัส3	12.02	22.17	12.02	12.02	1.28
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.63	1.42	0.31	0.00	0.29
บัส 4	บัส2 - บัส4	16.60	31.33	16.60	16.60	2.17
	มอเตอร์ 2 - บัส4	2.87	0.00	1.88	2.50	0.00

ตารางที่ 5.20 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบระหว่างเฟส ,ลัดวงจรแบบค่ากระแสสูงสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	11.36	28.06	11.36	11.36	8.57
	บัส2 - บัส1	0.11	0.25	0.11	0.11	0.06
บัส 2	บัส1 - บัส2	20.10	43.13	20.10	20.10	6.86
	Gen - บัส2	5.15	11.98	4.54	5.15	2.84
	บัส3 - บัส2	0.37	0.83	0.19	0.00	0.16
	บัส4 - บัส2	1.75	4.37	1.20	0.00	1.38
บัส 3	บัส2 - บัส3	14.67	27.07	14.67	14.67	1.56
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.38	0.84	0.19	0.00	0.17
บัส 4	บัส2 - บัส4	18.09	34.14	18.09	18.09	2.37
	มอเตอร์ 2 - บัส4	1.80	4.59	1.23	0.00	1.60

ตารางที่ 5.21 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร		I''_k (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)
บัส 1	สามเฟสสมดุล	13.25	32.69	13.25	13.25	9.96
	หนึ่งเฟสลงดิน	19.87	49.03	19.87	19.87	14.95
	ระหว่างเฟส	11.47	28.31	11.47	11.47	8.63
บัส 2	สามเฟสสมดุล	31.61	69.64	29.97	29.16	12.99
	หนึ่งเฟสลงดิน	35.56	78.84	33.03	32.00	15.22
	ระหว่างเฟส	27.38	60.31	26.03	25.25	11.25
บัส 3	สามเฟสสมดุล	17.37	32.23	17.16	16.94	2.00
	หนึ่งเฟสลงดิน	12.65	23.59	12.32	12.02	1.56
	ระหว่างเฟส	15.05	27.92	14.86	14.67	1.73
บัส 4	สามเฟสสมดุล	22.96	44.72	22.28	20.88	4.58
	หนึ่งเฟสลงดิน	19.47	38.66	18.48	16.60	4.72
	ระหว่างเฟส	19.88	38.73	19.32	18.09	3.97

ตารางที่ 5.22 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล, ลัดวงจรแบบค่ากระแสต่ำสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส 1	10.50	25.92	10.50	10.50	7.92
	บัส 2 - บัส 1	0.11	0.26	0.11	0.11	0.05
บัส 2	บัส 1 - บัส 2	21.95	47.12	21.95	21.95	7.52
	Gen - บัส 2	5.65	13.14	4.94	5.65	3.11
	บัส 3 - บัส 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	บัส 4 - บัส 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 3	บัส 2 - บัส 3	9.32	13.56	9.32	9.32	0.00
	มอเตอร์ 1 - บัส 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 4	บัส 2 - บัส 4	13.17	19.41	13.17	13.17	0.01
	มอเตอร์ 2 - บัส 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.23 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน, ลัดวงจรแบบค่ากระแสต่ำสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	15.75	38.88	15.75	15.75	11.88
	บัส2 - บัส1	0.17	0.38	0.17	0.17	0.08
บัส 2	บัส1 - บัส2	22.59	48.50	22.59	22.59	7.74
	Gen - บัส2	7.74	18.00	6.62	7.74	4.26
	บัส3 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	บัส4 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 3	บัส2 - บัส3	5.24	7.62	5.24	5.24	0.00
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 4	บัส2 - บัส4	7.99	11.79	7.99	7.99	0.00
	มอเตอร์ 2 - บัส4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.24 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุด เมื่อลัดวงจรแบบระหว่างเฟสที่ไหลในแต่ละกิ่งของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งลัดวงจร	กระแสไหลจาก (From-To)	ลัดวงจรแบบระหว่างเฟส, ลัดวงจรแบบค่ากระแสต่ำสุด				
		I''_k	i_p	I_b	I_k	i_{dc}
บัส 1	ระบบไฟฟ้า - บัส1	9.09	22.45	9.09	9.09	6.86
	บัส2 - บัส1	0.10	0.22	0.10	0.10	0.05
บัส 2	บัส1 - บัส2	19.01	40.80	19.01	19.01	6.51
	Gen - บัส2	4.89	11.38	4.33	4.89	2.70
	บัส3 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	บัส4 - บัส2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 3	บัส2 - บัส3	8.07	11.74	8.07	8.07	0.00
	มอเตอร์ 1 - บัส3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
บัส 4	บัส2 - บัส4	11.40	16.81	11.40	11.40	0.00
	มอเตอร์ 2 - บัส4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.25 สรุปผลลัพธ์จากการคำนวณกรณีกระแสลัดวงจรต่ำสุดของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2

ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร		I''_k (kA)	i_p (kA)	I_b (kA)	I_k (kA)	i_{dc} (kA)
บัส 1	สามเฟสสมดุล	10.61	26.18	10.61	10.61	7.97
	หนึ่งเฟสลงดิน	15.92	39.26	15.92	15.92	11.96
	ระหว่างเฟส	9.19	22.67	9.19	9.19	6.90
บัส 2	สามเฟสสมดุล	27.60	60.26	26.88	27.60	10.64
	หนึ่งเฟสลงดิน	30.33	66.50	29.21	30.33	12.01
	ระหว่างเฟส	23.90	52.19	23.33	23.90	9.21
บัส 3	สามเฟสสมดุล	9.32	13.56	9.32	9.32	0.00
	หนึ่งเฟสลงดิน	5.24	7.62	5.24	5.24	0.00
	ระหว่างเฟส	8.07	11.74	8.07	8.07	0.00
บัส 4	สามเฟสสมดุล	13.17	19.41	13.17	13.17	13.17
	หนึ่งเฟสลงดิน	7.99	11.79	7.99	7.99	0.00
	ระหว่างเฟส	11.40	16.81	11.40	11.40	0.01

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณข้างต้น สามารถสรุปผลที่ได้ในการนำไปใช้เลือกค่าพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันได้ดังตารางที่ 5.26 และ 5.27

ตารางที่ 5.26 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

ตำแหน่ง ลัดวงจร	เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน						
	LV. Fuse	MV. Fuse	LV. CB		MV. CB		
	I_b	I_b	I_{cu}, I_{cs}	I_{cm}	I_b	I_{basym}	I_{MC}
บัสที่ 1	-	19.87	-	-	19.87	24.87	49.03
บัสที่ 2	33.03	-	33.03	78.84	-	-	-
บัสที่ 3	17.16	-	17.16	32.23	-	-	-
บัสที่ 4	22.28	-	22.28	44.72	-	-	-

หน่วย : kA

ตารางที่ 5.27 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

บัสที่อุปกรณ์ป้องกัน ทำหน้าที่ป้องกัน	อุปกรณ์ป้องกัน ติดตั้งระหว่าง	I''_{kMax}	I''_{kMin}	I''_{kAsym}	I_{kMax}	I_{kMin}
บัส 1	Feeder1-Bus1	19.68	9.09	24.66	19.68	9.09
บัส 2	Bus1-Bus2	23.86	19.01	25.21	23.86	19.01
	G2-Bus2	8.15	4.89	9.30	2.40	0.74
บัส 3	Bus2-Bus3	16.94	5.24	17.04	16.94	5.24
บัส 4	Bus2-Bus4	20.88	7.99	21.06	20.88	7.99

หน่วย : kA

จากการคำนวณในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาในระบบ ทำให้ระดับของกระแสลัดวงจรที่บัสต่างๆเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ค่าองค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร (i_{dc}) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นจุดหนึ่งที่ควรระวังในการเลือกค่าพิกัดลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากถ้าองค์ประกอบไฟตรงของกระแสลัดวงจร (i_{dc}) สูงขึ้นมาก อาจต้องมีการเพิ่มค่าพิกัดลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน [5] โดยเฉพาะเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันปานกลางที่ติดตั้งใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า [19] ดังที่ได้แสดงตัวอย่างการพิจารณาไว้ที่ท้ายบทที่ 3 แต่ในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบแรงดันต่ำ ผลของเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบไฟตรงจึงมีค่าน้อยไม่เกินค่าที่กำหนด

และจากระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 ข้อมูลค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ที่แต่ละบัส จะเปลี่ยนไปคือ มีระดับสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อสังเกตได้ว่า ในระบบไฟฟ้าใดๆ เมื่อมีการเพิ่มหรือลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ จะต้องมีการศึกษากระแสลัดวงจรใหม่ เพื่อตรวจสอบพิกัดอุปกรณ์ป้องกันและค่าปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันว่ายังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดหรือไม่

จากตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจรในตัวอย่างระบบไฟฟ้าทั้ง 2 ตัวอย่างวิศวกรต้องมีข้อมูลกระแสลัดวงจร ดังที่ได้จากโปรแกรม เพื่อที่พร้อมจะนำไปใช้งาน เลือกพิกัดและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างสมบูรณ์ และถูกต้อง ซึ่งถ้าไม่มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณแล้ว การคำนวณด้วยมือเปล่าเป็นงานที่ต้องใช้เวลามาก

5.3.3 การศึกษาระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3

ระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 3 นี้ เป็นระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งในเอกสารอ้างอิง [20,21] นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณกระแสลัดวงจร และระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 นี้ได้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาเรื่องกระแสลัดวงจรอย่างแพร่หลาย โดยในเอกสารอ้างอิง [21] ได้ใช้ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 คำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้แนววิธีในมาตรฐาน IEC-909

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้ระบบไฟฟ้าตัวอย่างดังกล่าวมาคำนวณกระแสลัดวงจรพร้อมเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนากับผลลัพธ์ในเอกสารอ้างอิง [21] เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของโปรแกรมยิ่งขึ้น

ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 และข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 จากเอกสารอ้างอิง [20,21] นั้นแสดงในรูปแบบของมาตรฐาน IEEE ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้แปลงข้อมูลดังกล่าวเพื่อมาใช้งานกับมาตรฐาน IEC โดยให้ใกล้เคียงข้อมูลเดิมมากที่สุด ดังมีรายละเอียดดังนี้

ระบบไฟฟ้า1 : Network Feeder 1

กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสูงสุด ($S''_{kq \max}$) เท่ากับ 1000 MVA

กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นต่ำสุด ($S''_{kq \min}$) เท่ากับ 800 MVA

แรงดันระบบ (U_n) เท่ากับ 69 kV ; X/R Ratio เท่ากับ 22

ระบบไฟฟ้า2 : Network Feeder 2

กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นสูงสุด ($S''_{kq \max}$) เท่ากับ 800 MVA

กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นต่ำสุด ($S''_{kq \min}$) เท่ากับ 600 MVA

แรงดันระบบ (U_n) เท่ากับ 46 kV ; X/R Ratio เท่ากับ 9

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า1 : Generator1

กำลังปรากฏพิกัด (SrG) เท่ากับ 25 MVA, แรงดันพิกัด (UrG) เท่ากับ 13.8 kV

ค่าชั้บทรานเซียนตรีแอกแตนซ์ (xd'') เท่ากับ 9%, ค่า Power Angle เท่ากับ 0.8

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า2 : Generator2

กำลังปรากฏพิกัด (SrG) เท่ากับ 5 MVA, แรงดันพิกัด (UrG) เท่ากับ 2.4 kV

ค่าชั้บทรานเซียนตรีแอกแตนซ์ (xd'') เท่ากับ 9%, ค่า Power Angle เท่ากับ 0.8

หม้อแปลงไฟฟ้า : Tr1

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 20 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 69kV / 13.8 kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 7.008 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 66.67 kW

หม้อแปลงไฟฟ้า 2 และ 3 : Tr2, Tr3

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 7.5 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 13.8kV / 0.48 kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 5.52 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 29.46 kW

หม้อแปลงไฟฟ้า 4,5,6,7 : Tr4, Tr5, Tr6, Tr7

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 1.5 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 13.8kV / 0.48 kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 5.527 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 8.25 kW

หม้อแปลงไฟฟ้า 8 : Tr8

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 5 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 13.8 kV / 4.2 kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 5.51 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 17.186 kW

หม้อแปลงไฟฟ้า 9,10,11,12,13 : Tr9, Tr10, Tr11, Tr12, Tr13

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 1.5 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 4.2kV / 0.48kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 5.527 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 8.25 kW

หม้อแปลงไฟฟ้า 14 : Tr14

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 5 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 46kV / 4.2kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 6.512 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 20.31 kW

หม้อแปลงไฟฟ้า 15 : Tr15

กำลังปรากฏพิกัด (S_{rT}) เท่ากับ 5 MVA ; อัตราส่วนแรงดัน เท่ากับ 2.4kV / 4.2kV

แรงดันลัดวงจรพิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 5.52 % ; กำลังสูญเสีย เท่ากับ 22.92 kW

สายไฟฟ้า 1 : Line1

ความยาวสาย เท่ากับ 1 km. $R'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.185 m Ω /m ; $X'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.122 m Ω /m

สายไฟฟ้า 2 : Line2

ความยาวสาย เท่ากับ 1 km. $R'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.055 m Ω /m ; $X'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.041 m Ω /m

สายไฟฟ้า 3 : Line3

ความยาวสาย เท่ากับ 1 km. $R'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.003 m Ω /m ; $X'_{L(1)}$ เท่ากับ 0.188 m Ω /m

มอเตอร์ 1,2 : M1, M2

กำลังพิกัด (P_{rM}) เท่ากับ 6 MW ; แรงดันพิกัด (U_{rM}) เท่ากับ 480 V

กระแสยึดตัวหมุนต่อกระแสพิกัด เท่ากับ 5 ; ค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos \varphi_r$) เท่ากับ 0.8

มอเตอร์ 3,4,5,6,9,10,11 : M2

กำลังพิกัด (P_{rm}) เท่ากับ 1.52 MW ; แรงดันพิกัด (U_{rm}) เท่ากับ 480 V

กระแสยึดตัวหมุนต่อกระแสพิกัด เท่ากับ 5.954 ; ค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos \varphi_r$) เท่ากับ 1

มอเตอร์ 7,8,12,13 : M2

กำลังพิกัด (P_{rm}) เท่ากับ 1.75 MW ; แรงดันพิกัด (U_{rm}) เท่ากับ 4.2 kV

กระแสยึดตัวหมุนต่อกระแสพิกัด เท่ากับ 5.88 ; ค่าตัวประกอบกำลัง ($\cos \varphi_r$) เท่ากับ 1

หมายเหตุ 1. หม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัว มีลักษณะการต่อ คือ Delta-Wye to Ground ;

$R_{(0)}/R_{(1)}$ เท่ากับ 1 ; $X_{(0)}/X_{(1)}$ เท่ากับ 0.95

2. สายไฟทุกเส้นมีค่า $R_{L(0)}/R_{L(1)}$ เท่ากับ 4 ; $X_{L(0)}/X_{L(1)}$ เท่ากับ 3.5

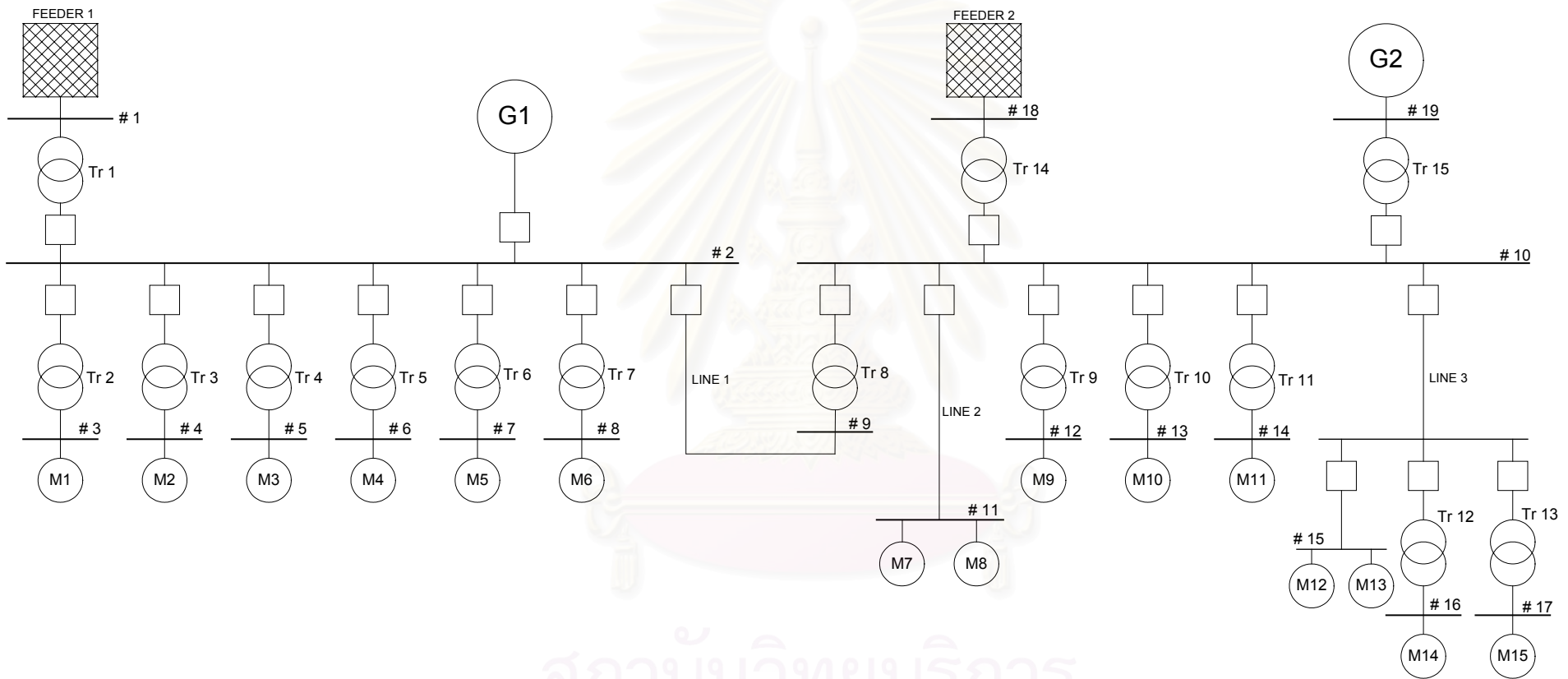
3. มอเตอร์ทุกตัวมีค่า $R_{M(0)}/R_{M(1)}$ เท่ากับ 15.2 ; $X_{M(0)}/X_{M(1)}$ เท่ากับ 5.3

เวลาเร่ง เท่ากับ 8 วินาที ; Max. Stall Time เท่ากับ 20 วินาที

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_r) เท่ากับ 0.97 ; X/R Ratio เท่ากับ 13.5

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยกระแสลัดวงจร รวมทั้งข้อมูลกระแสลัดวงจรที่จะนำไปใช้ปรับตั้งและเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกันนั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.28 ถึง 5.33 โดยจะได้แสดงเฉพาะค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูลเท่านั้น เพราะในเอกสารอ้างอิง [21] ได้แสดงไว้เฉพาะการลัดวงจรแบบสามเฟสสมมูล ทั้งนี้เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ได้อย่างชัดเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.21 ระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 [20,21]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.28 ค่ากระแสเงินสดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (I_k) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20]

บัสที่	ค่ากระแสเงินสดวงจรจากเอกสารอ้างอิง [20] (1)	ผลลัพธ์จากโปรแกรม (2)	ความคลาดเคลื่อน (%) $((1)-(2))/(1)*100\%$
1	10.04	9.91	1.29
2	27.09	28.78	-6.23
3	36.91	39.20	-6.20
4	36.91	39.20	-6.20
5	44.12	44.27	-0.34
6	44.12	44.27	-0.34
7	44.12	44.27	-0.34
8	44.12	44.27	-0.34
9	19.45	20.09	-3.29
10	35.56	36.46	-2.53
11	22.13	23.05	-4.15
12	41.98	42.18	-0.47
13	41.98	42.18	-0.47
14	41.98	42.18	-0.47
15	15.04	15.09	-0.33
16	37.84	37.97	-0.34
17	37.84	37.97	-0.34
18	10.77	10.78	-0.09
19	30.04	30.80	-2.49

จากตารางที่ 5.28 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์ในเอกสารอ้างอิง [21] สูงสุด 6.23% ซึ่งสาเหตุแห่งความคลาดเคลื่อนน่าจะเกิดจากข้อมูลที่ต้องมีการแปลงค่าทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจคลาดเคลื่อนจากเอกสารอ้างอิง [21] บ้าง นอกจากนี้ อาจเกิดมาจากการรวมค่า Contribution ของกระแสเงินสดที่ตำแหน่งลัด

วงจรที่บัสต่างๆนั้น ใช้วิธีการรวมแบบพีชคณิตโดยตรง คือไม่ได้รวมแบบเชิงซ้อน ซึ่งในตรงนี้อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้บ้าง แต่ในมาตรฐาน IEC 909 กล่าวว่าวิธีการรวมแบบพีชคณิตดังกล่าวจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไม่มากนัก สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 5.29 ค่ากระแสลัดวงจรค่ายอด (i_p) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20]

บัสที่	ค่ากระแสลัดวงจรจาก จากเอกสารอ้างอิง [20] (1)	ผลลัพธ์จาก โปรแกรม (2)	ความคลาดเคลื่อน (%) $((1)-(2))/(1)*100\%$
1	26.91	26.21	2.60
2	72.92	74.35	-1.96
3	103.37	101.80	1.52
4	103.37	101.80	1.52
5	111.08	109.10	1.78
6	111.08	109.10	1.78
7	111.08	109.10	1.78
8	111.08	109.10	1.78
9	42.66	37.52	12.04
10	94.71	92.27	2.57
11	46.99	43.23	8.00
12	105.62	103.80	1.72
13	105.62	103.80	1.72
14	105.62	103.80	1.72
15	41.38	39.83	3.74
16	95.08	94.40	0.71
17	95.08	94.40	0.71
18	26.53	26.33	0.75
19	83.17	78.09	6.11

หน่วย : kA

จากตารางที่ 5.29 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ของค่ากระแสลัดวงจรค่ายอดนั้น ก็มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ยกเว้นในบัสที่ 9, 11 และ 19 ที่มีความคลาดเคลื่อน 12%, 8% และ 6.11% ตามลำดับ โดยสาเหตุน่าจะเกิดจากการแปลงข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้กล่าวมาแล้ว เพราะค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (X/R Ratio) นั้น มีผลต่อกระแสลัดวงจรค่ายอดมาก ดังความสัมพันธ์ที่ (2.18) และโปรแกรมที่พัฒนานี้ในส่วนของข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ใช้ค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (X/R Ratio) ในมาตรฐาน IEC 909 ซึ่งทำให้ไม่ตรงกับข้อมูลในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 จึงทำให้มีเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

ตารางที่ 5.30 ค่ากระแสลัดวงจร (I_p) แบบสามเฟสสมมูลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20] ที่เวลาลัดวงจร 0.02 วินาที

บัสที่	ค่ากระแสลัดวงจรจาก จากเอกสารอ้างอิง [20]	ผลลัพธ์จาก โปรแกรม	ความคลาดเคลื่อน (%)
	(1)	(2)	$((1)-(2))/(1)*100\%$
1	9.91	9.91	0
2	24.69	26.97	9.23
3	35.98	38.23	6.25
5,6,7,8	-	42.99	-
9	17.94	20.09	-11.98
10	32.07	36.44	-13.62
11	20.18	22.68	-12.38
12,13,14	-	40.91	-
15	13.56	14.74	-8.70
16,17	-	36.70	-
18	10.77	10.78	-0.09
19	28.24	28.72	-1.69

หน่วย : kA

จากตารางที่ 5.30 ซึ่งแสดงค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรนั้น ในบางบัสจะไม่ได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ เพราะในเอกสารอ้างอิง [21] ไม่ได้คำนวณค่าดังกล่าวไว้ สำหรับ

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 5% ถึง 10% ซึ่งถือว่าสูงพอสมควรนั้น น่าจะเกิดมาจาก 2 สาเหตุดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นคือการแปลงข้อมูลอุปกรณ์ และการรวมค่า Contribution ของกระแสัดวงจรแบบพีชคณิต เพราะค่ากระแสัดวงจรนี้จะขึ้นกับของกระแสัดวงจรจากอุปกรณ์จักรกลหมุนต่อค่ากระแสพิคัดของอุปกรณ์จักรกลหมุน (I_{kM}''/I_{rM}) รวมไปถึงกำลังของมอเตอร์ด้วยดังความสัมพันธ์ที่ (2.26) และ (2.27)

ตารางที่ 5.31 ค่ากระแสัดวงจรสมมาตร (I_{basym}) แบบสามเฟสสมดุลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [20] ที่เวลาตัดวงจร 0.02 วินาที

บัสที่	ค่ากระแสัดวงจรจาก จากเอกสารอ้างอิง [20] (1)	ผลลัพธ์จาก โปรแกรม (2)	ความคลาดเคลื่อน (%) $((1)-(2))/(1)*100\%$
1	14.39	13.94	3.12
2	38.98	36.01	7.62
3	52.47	51.38	2.08
4	52.47	51.38	2.08
5,6,7,8	-	51.48	-
9	19.55	20.14	-3.02
10	45.02	45.01	0.02
11	22.51	24.15	-7.28
12,13,14	-	48.91	-
15	22.22	20.73	-6.71
16,17	-	44.77	-
18	12.77	12.72	-0.39
19	41.62	36.38	-12.59

หน่วย : kA

ตารางที่ 5.32 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3

ตำแหน่ง ลัดวงจร	เลือกค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน						
	LV. Fuse	MV. Fuse	LV. CB		MV. CB		
	I_b	I_b	I_{cu}, I_{cs}	I_{cm}	I_b	I_{basym}	I_{MC}
บัสที่ 1	-	10.69	-	-	10.69	14.99	28.23
บัสที่ 2	-	31.90	-	-	31.90	42.48	87.66
บัสที่ 3	-	43.29	-	-	43.29	58.46	116.9
บัสที่ 4	-	43.29	-	-	43.29	58.46	116.9
บัสที่ 5	46.80	-	46.80	120.00	-	-	-
บัสที่ 6	46.80	-	46.80	120.00	-	-	-
บัสที่ 7	46.80	-	46.80	120.00	-	-	-
บัสที่ 8	46.80	-	46.80	120.00	-	-	-
บัสที่ 9	-	20.09	-	-	20.09	20.14	24.09
บัสที่ 10	-	46.92	-	-	46.92	57.81	119
บัสที่ 11	-	22.68	-	-	22.68	24.15	37.13
บัสที่ 12	45.29	-	45.29	116.3	-	-	-
บัสที่ 13	45.29	-	45.29	116.3	-	-	-
บัสที่ 14	45.29	-	45.29	116.3	-	-	-
บัสที่ 15	-	16.83	-	-	16.83	23.56	45.91
บัสที่ 16	42.06	-	42.06	109.3	-	-	-
บัสที่ 17	42.06	-	42.06	109.3	-	-	-
บัสที่ 18	-	11.14	-	-	11.14	-	-
บัสที่ 19	-	32.56	-	-	32.56	-	-

หน่วย : kA

ข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกันที่แสดงในตารางที่ 5.32 นี้ ใช้แนวข้อกำหนดที่แสดงในบทที่ 3 ในการคำนวณ ประกอบกับความถูกต้องของโปรแกรมที่มีความคลาดเคลื่อนไม่มากจึงสามารถนำข้อมูลในตารางที่ 5.32 ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเพื่อความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น อาจใช้ค่าเผื่อ (Margin) ประมาณ 25% [5] คุณเข้าไป เพื่อเป็นการเผื่อโหลดในอนาคตก็ได้

ตารางที่ 5.33 สรุปค่ากระแสลัดวงจรที่นำไปใช้ปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3

บัสที่อุปกรณ์ป้องกัน ทำหน้าที่ป้องกัน	อุปกรณ์ป้องกัน ติดตั้งระหว่าง	I''_{kMax}	I''_{kMin}	I''_{kAsym}	I_{kMax}	I_{kMin}
บัส 1	Feeder1 - Bus1	8.37	5.27	11.86	8.37	5.27
บัส 2	G1 – Bus2	13.67	9.62	17.80	4.09	1.19
	Bus1 – Bus2	11.01	7.43	15.51	11.01	7.43
บัส 3	Bus2 – Bus3	31.66	22.95	41.18	31.66	22.95
บัส 4	Bus2 – Bus4	31.66	22.95	41.18	31.66	22.95
บัส 5	Bus2 – Bus5	33.84	27.06	40.79	33.84	27.06
บัส 6	Bus2 – Bus6	33.84	27.06	40.79	33.84	27.06
บัส 7	Bus2 – Bus7	33.84	27.06	40.79	33.84	27.06
บัส 8	Bus2 – Bus8	33.84	27.06	40.79	33.84	27.06
บัส 9	Bus2 – Bus9	20.09	9.77	20.14	20.09	9.77
บัส 10	Bus9 – Bus10	22.23	14.04	26.17	22.23	14.04
	Bus18 – Bus10	13.83	7.94	18.18	13.83	7.94
	Bus19 – Bus10	7.08	3.95	9.09	3.83	1.00
บัส 11	Bus10 – Bus11	19.67	7.69	19.67	19.67	7.69
บัส 12	Bus10 – Bus12	32.34	25.32	38.92	32.34	25.32
บัส 13	Bus10 – Bus13	32.34	25.32	38.92	32.24	25.32
บัส 14	Bus10 – Bus14	32.34	25.32	38.92	32.24	25.32
บัส 15	Bus10 – Bus15	10.14	7.78	14.51	10.14	7.78
บัส 16	Bus15 – Bus16	29.10	21.88	36.04	29.10	21.88
บัส 17	Bus15 – Bus17	29.10	21.88	36.04	29.10	21.88
บัส 18	Feeder2–Bus18	10.04	5.93	11.77	10.04	5.93
บัส 19	G2 – Bus19	14.05	7.68	18.30	4.53	1.22

หน่วย : kA

สำหรับข้อมูลในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันดังตารางที่ 5.33 นี้ พิจารณาจากแนวข้อกำหนดในบทที่ 4 ซึ่งได้แสดงข้อมูลในทุกตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลในส่วนนี้ไปใช้งานได้สะดวกและมีประสิทธิภาพ

จากการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาทั้ง 3 ตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าโปรแกรมสามารถนำไปใช้งานกับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมได้จริง และผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเทียบกับเอกสารอ้างอิง [21] แล้วมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งความคลาดเคลื่อนน่าจะเกิดมาจากการดัดแปลง ข้อมูลอุปกรณ์ไฟฟ้าในมาตรฐาน IEEE มาเป็นค่าที่ใช้กับมาตรฐาน IEC แต่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น ก็ไม่สูงจนเกินไป ซึ่งถ้ามีข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของมาตรฐาน IEC แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้น่าจะใกล้เคียงมากขึ้น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานในทางปฏิบัติได้จริง และได้ผลลัพธ์ของกระแสลัดวงจรที่มีความถูกต้องรวมทั้งได้ข้อมูลกระแสลัดวงจรในการทำงานด้านต่างๆ ตามแนววิธีที่ได้แสดงไว้

นอกจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาจะสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังมีคุณสมบัติเพิ่มเติม คือ สามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกันโดยใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ได้พิจารณา รวมทั้งยังนำคุณลักษณะทางกระแส-เวลาของอุปกรณ์ป้องกันที่เลือกมาพล็อตเพื่อทำการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้ทำงานอย่างมีลำดับ (Coordination) โดยใช้ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ได้เช่นกัน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่แสดงการเลือกและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันไว้ในตัวอย่างทั้งสาม เพียงแต่แสดงข้อมูลกระแสลัดวงจรที่ใช้ในงานทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าวว่าพิจารณาต่างกันอย่างไร และผลลัพธ์กระแสลัดวงจรที่จะนำไปใช้ทั้ง 2 ลักษณะนั้นมีค่าเท่าใด เพราะจะอยู่นอกเหนือวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แต่ผู้อ่านสามารถดูตัวอย่างการเลือกและปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันได้ในเอกสารอ้างอิง [5,9,14,18,21] ซึ่งได้แสดงแนววิธีไว้แล้ว

ดังนั้นข้อดีหรือจุดเด่นของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรสอดคล้องตามวิธีการในมาตรฐาน IEC 909
2. ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม (Algorithm) มีแนวคิดเหมือนวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรตามที่แสดงในตัวอย่างการคำนวณในมาตรฐาน IEC 909 [2,6] คือ จะคำนวณว่ากระแสลัดวงจรที่ใหญ่ที่สุดตำแหน่งลัดวงจรนั้น มาจากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรใด เป็นปริมาณเท่าไรก่อน แล้วจึงนำมารวมกันเป็นค่ากระแสลัดวงจรรวมที่ตำแหน่งลัดวงจรนั้น ซึ่งเป็นข้อดีเพราะ

ทำให้ผู้คำนวณทราบว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกันที่ป้องกันตำแหน่งลัดวงจรนั้นจริง เป็นเท่าไร (หัวข้อ 2.13)

3. โปรแกรมสามารถคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งกรณีกระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุด เพื่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆได้อย่างชัดเจนและถูกต้อง
4. โปรแกรมสามารถแสดงค่ากระแสลัดวงจรเพื่อเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน และค่ากระแสลัดวงจรเพื่อปรับตั้ง แยกออกจากกันอย่างชัดเจน คือข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกันนั้น จะใช้ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลรวมมาที่บัสซึ่งอุปกรณ์ป้องกันนั้นติดตั้งอยู่ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.13 ส่วนข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกัน จะใช้ค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านอุปกรณ์ป้องกันนั้นจริงๆ ดังที่แสดงการพิจารณาไว้ในหัวข้อ 2.13 เช่นกัน และนอกจากนี้ การคำนวณกระแสลัดวงจรจะใช้ข้อกำหนดในการคำนวณดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ด้วย
5. โปรแกรมสามารถใช้ผลลัพธ์ของกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้กับการเลือกอุปกรณ์ป้องกันจากฐานข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆได้ ซึ่งฐานข้อมูลสามารถเพิ่มเติมหรือแก้ไขได้โดยผู้ใช้งาน
6. สามารถนำโปรแกรมที่พัฒนาไปใช้ประกอบการเรียนการสอนในเรื่องการคำนวณกระแสลัดวงจร เพื่อความเข้าใจมากขึ้น

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อสรุป

จากผลการศึกษาและความรู้ในบทต่างๆที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าข้อมูลกระแสลัดวงจรนั้น จะนำไปใช้ในงาน 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. พิจารณาค่าพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งได้แก่ ค่าพิกัดกระแสลัดวงจร (Breaking Capacity) และค่าพิกัดกระแสปิดวงจร (Making Capacity)
2. พิจารณาการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ซึ่งได้แก่ ระยะเวลาในการทำงานระหว่างอุปกรณ์ป้องกัน (CTI) ค่ากระแสปรับตั้งการทำงาน (Pickup Current) และความไวในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

ในการพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรทั้ง 2 งานนั้น มีความแตกต่างในสมมติฐานการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็ข้อกำหนดเบื้องต้นในการคำนวณ ทั้งนี้เพราะความต้องการข้อมูลกระแสลัดวงจรเพื่อนำไปใช้ในงานทั้งสองมีจุดประสงค์ไม่เหมือนกัน

แต่ไม่ว่าจะคำนวณกระแสลัดวงจรเพื่อใช้ในงานประเภทใด ผู้ใช้งานควรต้องมีแนวทางในการคำนวณที่ถูกต้อง ซึ่งแนววิธีการที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ มาตรฐาน IEC 909 ซึ่งว่าด้วยวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรมีรายละเอียดในบทที่ 2

จากรายละเอียดการศึกษาในบทที่ 2 ถึงบทที่ 4 ทำให้ผู้ใช้งานนำผลการคำนวณกระแสลัดวงจรที่ได้ ไปประยุกต์ใช้งานได้ถูกต้อง ซึ่งสามารถนำข้อสรุปดังกล่าวใช้เป็นข้อกำหนดในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นใช้งานดังในบทที่ 5

การวิเคราะห์กระแสลัดวงจรเพื่อการปรับตั้งและเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มีข้อดีสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โปรแกรมใช้งานง่าย คำนวณได้อย่างรวดเร็ว และประหยัดแรงงานคน
2. ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม มีความใกล้เคียงกับที่คำนวณด้วยมือ นั้นหมายถึงโปรแกรมมีความถูกต้องในการคำนวณ นอกจากนี้ยังมีการเทียบเคียงผลลัพธ์ที่ได้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในเอกสารอ้างอิงที่ [14] แล้วมีความใกล้เคียงกัน
3. ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่สามารถนำไปใช้ประกอบกับฐานข้อมูลอุปกรณ์ป้องกันเพื่อช่วยเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้ตามความต้องการ ทำให้ใช้งานได้สะดวกขึ้น
4. ข้อมูลกระแสลัดวงจรที่สามารถนำไปใช้ในการจัดความสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันเพื่อช่วยตรวจสอบค่าปรับตั้งอุปกรณ์ ทำให้มองเห็นภาพในการทำงานมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาข้างต้น สามารถแสดงข้อเสนอแนะในการพัฒนางานต่อไปดังนี้

1. การคำนวณกระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC 909 จะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องระดับหนึ่ง ซึ่งผลการคำนวณที่ได้ยังคงอยู่ในช่วงปลอดภัย (Safety Side) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ แต่หากผู้ใช้งานต้องการผลการคำนวณที่ถูกต้องมากๆ แล้ว จะต้องใช้วิธีการคำนวณแบบ Dynamic Simulation [11] ซึ่งโปรแกรมที่มีลักษณะการคำนวณดังกล่าวคือ โปรแกรมประเภท EMTP, ATP ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ละเอียดและถูกต้อง ผลที่ได้จึงจะถูกต้อง
2. ฐานข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกันในโปรแกรมยังมีข้อมูลน้อยอยู่ น่าจะมีการเพิ่มข้อมูลดังกล่าวมากขึ้น
3. ในบางอุปกรณ์ป้องกันไม่ได้แสดงพิกัดตามมาตรฐาน IEC จึงน่าจะมีการศึกษาค่าพิกัดในมาตรฐาน IEC เปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่นเช่น ANSI ว่าสามารถนำมาใช้งานร่วมกันได้หรือไม่อย่างไร

รายการอ้างอิง

1. SIEMENS. 2000. General Technical and Application Information.
2. International Electrotechnical Commission. 1988. IEC Std. 909, Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems. 1st Edition. Geneva
3. International Electrotechnical Commission. 1984. IEC Std. 50, International Electrotechnical Vocabulary (IEV)-Chapter 441: switchgear, control gear and fuses. 1st Edition. Geneva .
4. Fleck, H.A.; Mercede, F. J.. 1998. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Short-Circuit Currents to Perform a Protective Device Coordination Study, 169-171. IEEE Published,
5. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. 2544. การออกแบบระบบไฟฟ้า (Electrical System Design). ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
6. G.G. Seip. 2000. Electrical Installations Handbook. 3rd Edition. Siemens and Publicis MCD Verlag : John Wiley & Sons,
7. International Electrotechnical Commission. 1987. IEC Std. 56, High-voltage alternating-current circuit-breaker. 4th Edition. Geneva ,
8. Roy E. Cosse, Terence G. Hazel, Georges Thomasset. 1998. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. IEC Medium Voltage Circuit Breaker Interrupting Ratings – Unstated Short-circuit Considerations, 51-60. IEEE Published,

9. International Electrotechnical Commission. 1991-10. IEC 909-1, Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems Part1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three phase a.c. system according to IEC 909. 1st Edition. Geneva,
10. International Electrotechnical Commission. 1992-08. IEC 909-2, Electrical equipment-Data for short-circuit currents calculations in accordance with IEC 909. 1st Edition. Geneva ,
11. International Electrotechnical Commission. 1995-09. IEC 909-3, Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems Part3: Currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits and partial short-circuit current flowing through earth. 1st Edition. Geneva ,
12. International Electrotechnical Commission. 1995. IEC 947-2, Low-voltage switchgear and controlgear – Part2: Circuit breaker. 1st Edition Geneva ,
13. International Electrotechnical Commission. 1998. IEC 60269-1, Low-voltage fuses – Part1: General Requirement. 1st Edition. Geneva ,
14. ณัฐพล โพธิ์รัตน์. 2542. การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจัดความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ป้องกัน สำหรับผู้ใช้ไฟรายใหญ่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
15. ABB Sace T.M.S. S.p.A. Technical Brochure: FuseLine.
16. IEEE Thailand Section. 2000. Relay Protection for Industrial Power System. IEEE Thailand Section ,
17. International Electrotechnical Commission. 1994. IEC 282-1, High-voltage fuses

Part1: Current-limiting fuses. 1st Edition. Geneva ,

18. เด็นเทพ เทพประเทืองทิพย์. 2539. โปรแกรมกราฟฟิกในการวิเคราะห์การป้องกันแบบ
ประสานการทำงานพร้อมทั้งการคำนวณหาค่าความผิดพลาดในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเร
เดียล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. Rasheek M. Rifaat. 1998. Industrial and Commercial Power Systems Technical
Conference. Considerations for Applying IEC Standards in Short-circuit
Calculations and Breaker Selections in Cogeneration Plants, 2299-2304. IEEE
Published,
20. A. J. Rodolakis. 1993. A Comparison of North American (ANSI) and European (IEC)
Fault Calculation Guidelines, 515-521. IEEE Transaction on Industry Application,
vol. 29 , no.3, May/June,
21. IEEE . 1986. ANSI/IEEE Std. 141 IEEE Recommended Practice for Electric Power
Distribution for Industrial Plants (Red Book), IEEE Published,
22. Robert L. Kruse, Bruce P. Leung, Clovis L. Tondo. 1991. Data Structure and
Program Design in C. 1st Edition. United States of America : Prentice Hall
International, Inc.,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer)
 พิกัดด้านแรงดันสูง 3 ถึง 24 kV (U_{rHV}) ; ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 4% ;
 ตามมาตรฐาน DIN 42500 [6]

S_{rt}	kVA	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630
u_{Rr}	%	2.1	1.89	1.75	1.64	1.47	1.42	1.3	1.24	1.15	1.1	1.03
U_{rLV}	V	230	Yyn0								-	
	V	400	Yzn5				Dyn5					
	V	525	Yyn0									

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer)
 พิกัดด้านแรงดันสูง 3 ถึง 24 kV (U_{rHV}) ; ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 4% ;
 ตามมาตรฐาน DIN 42503 [6]

S_{rt}	kVA	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630
u_{Rr}	%	2.3	2.09	1.95	1.84	1.75	1.65	1.64	1.56	1.5	1.43	1.33
U_{rLV}	V	230	Yyn0								-	
	V	400	-				Dyn5					
	V	525	Yyn0									
S_{rt}	kVA	50	75	100	125	160	200	-				
U_{Rr}	%	2.5	2.27	2.15	2	1.94	1.8					
U_{rUS}	V	400	Yzn5									

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer)

พิกัดด้านแรงดันสูง 24 ถึง 36 kV (U_{rHV}) ; ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 6% ;

ตามมาตรฐาน DIN 42511 [6]

S_{rt}	kVA	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
u_{Rr}	%	1.78	1.71	1.61	1.56	1.48	1.38	1.35	1.31	1.24
U_{rLV}	V	400	Dyn5							
	V	525	Yyn0							
S_{rT}	kVA	250	315	400	-					
u_{Rr}	%	1.84	1.73	1.62						
U_{rUS}	V	230	Yyn0							

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสระบบจำหน่าย (Distribution Transformer);

ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัด (u_{kr}) เท่ากับ 6% ; ตามมาตรฐาน DIN 42511 [6]

S_{rT}	kVA	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
u_{Rr}	%	2.1	2	1.88	1.78	1.75	1.71	1.61	1.56	1.48	1.38	1.35	1.31	1.24
U_{rLV}	V	230	Yyn0			-								
	V	400	-			Dyn5								
	V	525	Yyn0											
S_{rT}	kVA	100	125	160	200	250	315	400	-					
u_{Rr}	%	2.3	2.16	1	1.9	1.84	1.73	1.62						
U_{rUS}	V	230	-			Yyn0								
	V	400	Yzn5			-								

จากตารางที่ ก.4 ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าค่ากำลังพิกัด 250 ถึง 800 kVA ที่ระดับแรงดันสูง 3 ถึง 12 kV หรือ ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าค่ากำลังพิกัด 1000 ถึง 1500 kVA ที่ระดับแรงดันสูง 5 ถึง 12 kV หรือ ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าค่ากำลังพิกัด 250 ถึง 1600 kVA ที่ระดับแรงดันสูง 12 ถึง 24 kV

ตารางที่ ก.5 ค่าแรงดันอิมพีแดนซ์พิกัดของหม้อแปลง (Rated impedance voltage u_{kr}) [6]

High-voltage rating	kV	6 - 20	30	60	110
u_{kr}	%	3.5 - 8	6 - 11	9 - 12	9 - 15

ตารางที่ ก.6 ค่าแรงดันรีซิสแตนซ์พิกัดของหม้อแปลง (Rated resistance voltage u_{Rr}) [6]

Rated power	MVA	0.1	0.32	1	3.2	10	32
u_{Rr}	%	1.8 - 21	1.5 - 1.8	1.3 - 1.5	0.8 - 1.0	0.5 - 0.7	0.4 - 0.6

ตารางที่ ก.7 ค่าช่วงเวลาที่ยหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทนต่อกระแสค่าต่างๆได้ [5]

ค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร (I_k'')	ช่วงเวลาที่หม้อแปลงไฟฟ้าทนได้ (นาท)
25 เท่าของกระแสทำงาน	2
20 เท่าของกระแสทำงาน	3
16.6 เท่าของกระแสทำงาน	4
14.3 เท่าของกระแสทำงาน	5

ตารางที่ ก.8 ค่ากระแสฟุ้งเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด [5]

ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า	ค่ากระแสฟุ้งเข้า (เท่าของกระแสทำงาน)
หม้อแปลงไฟฟ้าแบบตัวแทน (Pad Type Unit)	12
หม้อแปลงไฟฟ้าศูนย์กลางโหลด (Load center type unit)	8
หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายแรงดันต่ำชนิดแห้ง (Dry type unit)	5

ตารางที่ ก.9 ค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า [5]

พิกัดอิมพีแดนซ์ ของหม้อแปลง	ด้านปฐมภูมิ (Primary side)		ด้านทุติยภูมิ (Secondary side)		
	แรงดันเกิน 600 V		แรงดันเกิน 600 V		แรงดันน้อยกว่า 600 V
	Circuit Breaker	Fuse	Circuit Breaker	Fuse	Circuit Breaker & Fuse
ไม่เกิน 6 %	600%	300%	300%	250%	125%
มากกว่า 6 %	400%	300%	250%	225%	125%

ตารางที่ ก.10 ซีตจำกัดกระแสหรือค่าความคงทนของหม้อแปลง โดยแสดงเป็นสมการของ Through-Fault Protection Curve [14]

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

โดย I คือ จำนวนเท่าของค่ากระแสพิกัดหม้อแปลง

T คือ เวลา หน่วย วินาที (s.)

Z_T คือ พิกัดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (%)

Z_S คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟ หรือ $Z_S = \frac{\text{Transformer (MVA)}}{\text{System Fault Capacity (MVA)}}$

ภาคผนวก ข

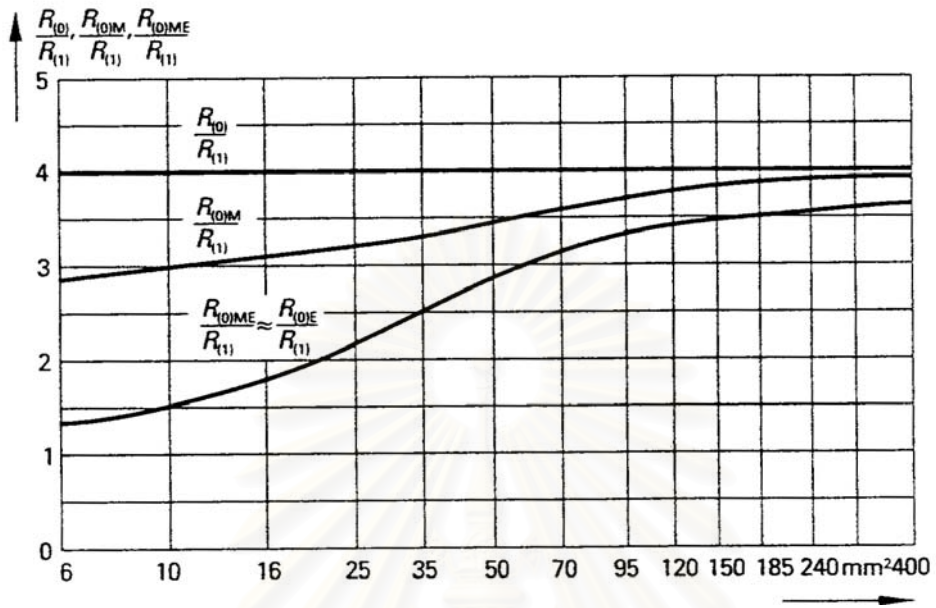
ข้อมูลคุณลักษณะของสายไฟฟ้าหรือเคเบิล

ตารางที่ ข.1 ค่าความต้านทานของตัวนำของสายไฟ ที่อุณหภูมิ 20 °C [6]

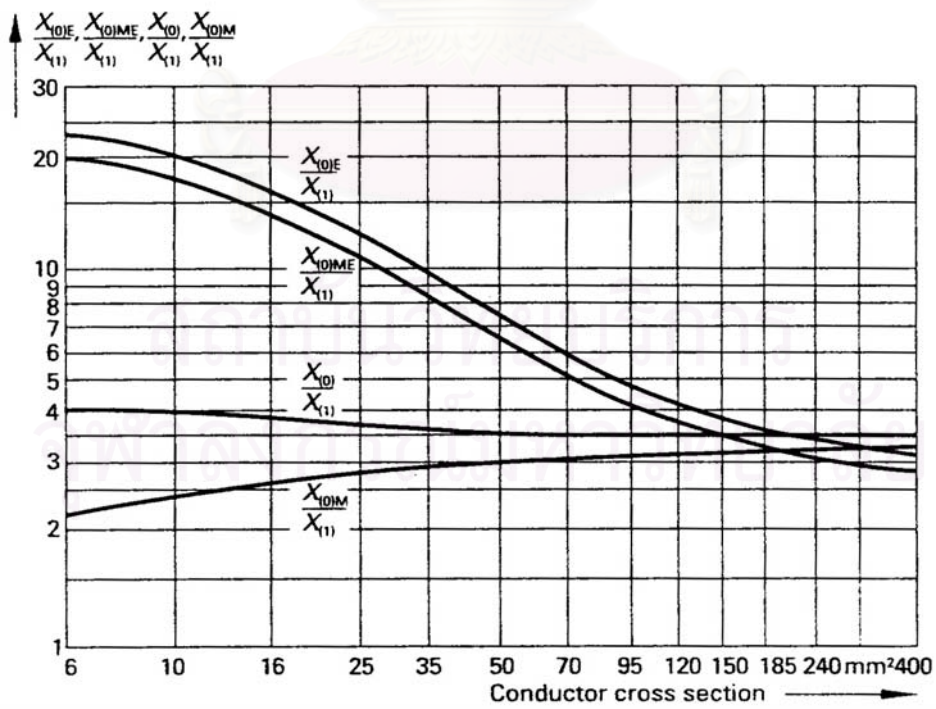
Nominal cross section q_n (mm ²)	Conductor diameter $d = 2r$ (mm)	Copper (Ω / km)	Aluminium (Ω / km)	E-AlMgSi (Ω / km)
10	4.10	1.806	-	-
16	5.10	1.139	1.802	2.090
25	6.30	0.746	1.181	1.370
35	7.50	0.527	0.834	0.967
50	9.00	0.366	0.579	0.671
70	10.50	0.276	0.437	0.507
95	12.50	0.195	0.309	0.358
120	14.00	0.155	0.246	0.285
150	15.80	0.124	0.196	0.227
185	17.50	0.100	0.159	0.184
240	20.30	0.075	0.119	0.138
300	22.50	0.061	0.097	0.112
400	26.00	0.046	0.072	0.084
500	29.10	0.037	0.058	0.067
625	32.60	-	0.046	0.054
800	36.90	-	0.036	0.042
1000	41.10	-	0.029	0.034

ค่าความต้านทานของสายไฟที่ระดับอุณหภูมิสูงสุด (T_{MAX}) เพื่อใช้คำนวณกระแสลัดวงจรต่ำสุด สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ (ข.1) โดย $T_{MAX} = 145^{\circ}C$ ที่แรงดันพิกัด 1 kV หรือมากกว่า และ $T_{MAX} = 80^{\circ}C$ ที่แรงดันพิกัดค่าอื่น

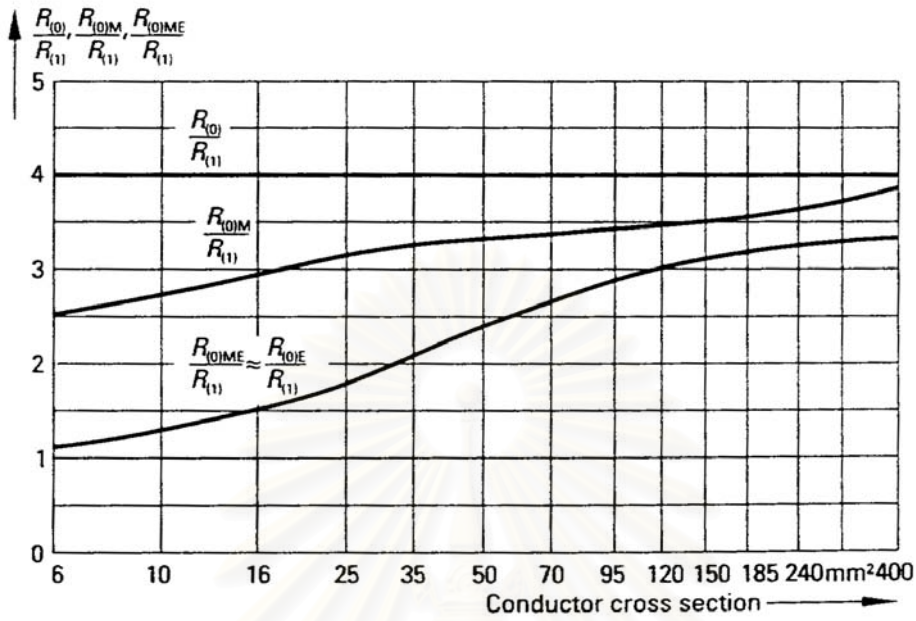
$$R_{line,MAX} = R_{ที่อุณหภูมิ 20^{\circ}C} \times (1.0 + 0.024 \times (T_{MAX} - 20.0)) \quad (ข.1)$$



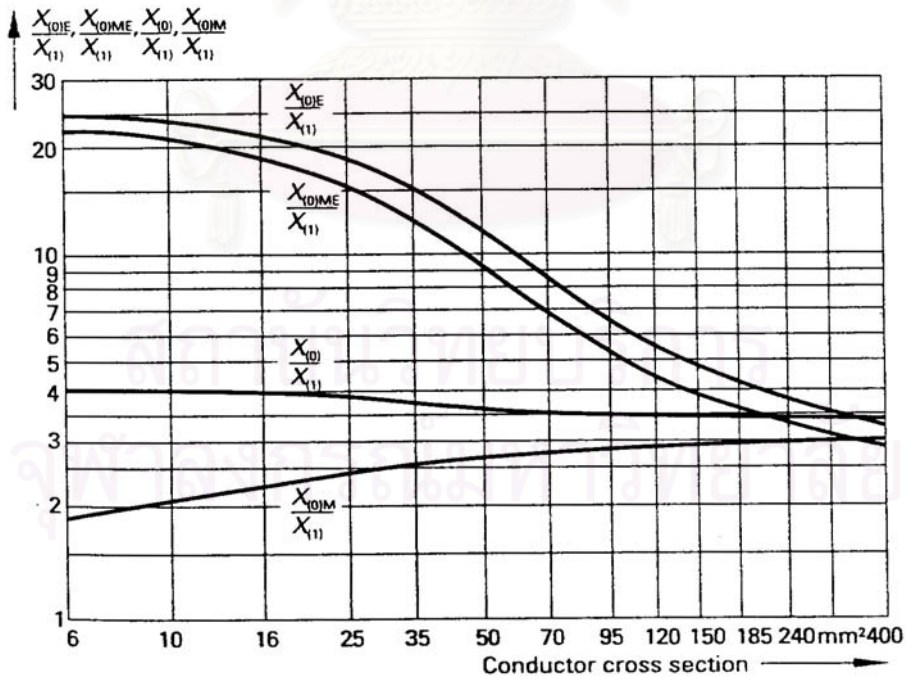
รูปที่ ข.1 ค่าอัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับความต้านทานลำดับบวกของสายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ ทองแดง



รูปที่ ข.2 ค่าอัตราส่วนค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของสายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ ทองแดง



รูปที่ ข.3 ค่าอัตราส่วนความต้านทานลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับความต้านทานลำดับบวกของสายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ อลูมิเนียม



รูปที่ ข.4 ค่าอัตราส่วนค่ารีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์เฉลี่ยเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกของสายเคเบิล 1 kV แบบ 4 ตัวนำต่อ 1 เส้น ที่ความถี่ 50 Hz โดยตัวนำคือ อลูมิเนียม

จากรูปที่ ข.1, ข.2, ข.3 และ ข.4 ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในกราฟมีความหมายดังนี้

$R_{(0)}$, $X_{(0)}$ กรณีทางเดินกลับ (Return Path) เป็นตัวนำเส้นที่ 4

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

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

$R_{(0)ME}$, $X_{(0)ME}$ กรณีทางเดินกลับเป็นตัวนำเส้นที่ 4 ปลอกเคเบิล

$R_{(1)}$, $X_{(1)}$ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ลำดับบวก และ ความต้านทานดินเท่ากับ

$$\rho = 100 \Omega m$$

ระยะเวลาที่สายไฟฟ้ายอมให้กระแสลัดวงจรไหล สามารถหาได้จากความสัมพันธ์
ดังนี้ [6]

$$t = k \left(\frac{q}{I} \right)^2 \quad (ง.1)$$

โดย t คือ เวลาที่ยอมให้กระแสลัดวงจรไหลผ่าน ในหน่วยวินาที

I คือ ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่ไหลผ่านสายไฟฟ้า

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวนำ หน่วย $A*s/m^2$ เช่น สายทองแดงขนาด 10 มม. จะมีค่า

k เท่ากับ $115 A*s/m^2$

q คือ พื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า หน่วย mm^2

โดยทั่วไปยอมให้กระแสลัดวงจรไหลในสายไฟฟ้าไม่เกิน 5 วินาที [6] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ
อุณหภูมิของสายว่าจะเกินขีดจำกัดหรือไม่

ตารางที่ ข.2 ค่าพิกัดหรือค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันสายไฟ [5]

อุปกรณ์ป้องกัน	ร้อยละของค่ากระแสพิกัดของสายไฟ
ฟิวส์	3
เซอร์กิตเบรกเกอร์	6

ตารางที่ ข.3 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายรวมทั้งค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่า
ขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟ เมื่อตัวนำ คือ ทองแดง

ชนิดของสาย	T1	T2	mm ²	CM	MCM	inch ²
Rubber isolated	60	200	141	0.0714	71.4	90968
PVC, flexible cable:						
=<300 mm ²	70	150	109	0.0552	55.2	70323
PVC, mounted						
=< 300 mm ²	70	160	115	0.0583	58.3	74194
>300 mm ²	70	140	103	0.0522	52.2	66452
PVC. High T	90	160	100	0.0507	50.7	64516
EPR.	90	250	143	0.0725	72.5	92258
EVA	120	250	126	0.0638	63.8	81290
ETFE	135	250	117	0.0593	59.3	75484
SiR	180	350	132	0.0669	66.9	85161
VPE-cable	90	250	143	0.0725	72.5	92258
PE-cable	70	150	109	0.0552	55.2	70323
Paperisolated shielded cable:						
0.6/1 or 3.6/6 kV	80	180	119	0.0603	60.3	76774
6/10 kV	65	165	121	0.0613	61.3	78065
Three phase shielded cable / radial field cable :						
06/1 or 3.6/6 kV	80	180	119	0.0603	60.3	76774
6/10 kV	70	170	120	0.0608	60.8	77420
12/20 kV	65	155	116	0.0588	58.8	74839
18/30 kV	60	140	111	0.0562	56.2	71613
Oilcable	85	170	110	0.0557	55.7	70968
Pressured Gas cable	85	170	110	0.0557	55.7	70968

ตารางที่ ข.4 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายรวมทั้งค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดของสายไฟ เมื่อตัวนำ คือ อลูมิเนียม

ชนิดของสาย	T1	T2	mm ²	CM	MCM	inch ²
VPE - Cable	90	250	94	0.0476	47.6	60645
PE - Cable	70	150	72	0.0365	36.5	46452
PVC :						
=< 300 mm ²	70	160	76	0.0385	38.5	49032
>300 mm ²	70	140	68	0.0345	34.5	43871
Paperisolated shielded cable:						
0.6/1 or 3.6/6 kV	80	180	78	0.0395	39.5	50323
6/10 kV	65	165	80	0.0405	40.5	51613
Three phase shielded cable / radial field cable :						
0.6/1 or 3.6/6 kV	80	180	78	0.0395	39.5	50323
6/10 kV	70	170	80	0.0405	40.5	51613
12/20 kV	65	155	77	0.0390	39.0	49678
18/30 kV	60	140	73	0.0370	37.0	47097
Oil cable	85	170	73	0.0370	37.0	47097
Pressured Gas cable	85	170	73	0.0370	37.0	47097

โดย T1 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (Assumed initial temperature)

T2 คือ อุณหภูมิสุดท้าย (Limiting final temperature)

mm² คือ ค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดตามความสัมพันธ์ที่

(3.1) เมื่อ พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็น mm²

CM คือ ค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดตามความสัมพันธ์ที่

(3.1) เมื่อ พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็น CM

MCM คือ ค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดตามความสัมพันธ์ที่

(3.1) เมื่อ พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็น MCM

inch² คือ ค่าตัวประกอบ k สำหรับการคำนวณค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดตามความสัมพันธ์ที่

(3.1) เมื่อ พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็น inch²

ภาคผนวก ค

ข้อมูลคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ ค.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แรงดันต่ำ [6]

		Turbine-driven Generator	Number of poles	Salient-pole generators	Number of poles
Rated power	kVA	40-100		1600-3600	
Subtransient reactance x''_d (saturated)	%	10-15	4-14	10-12	2
				11-23	4
Transient reactance x'_d (saturated)	%	20-40	4-14	13-17	2
				26-36	4
Synchronous reactance x_d (unstaturated)	%	150-300	4-14	170-220	2
				260-300	4
No-load short-circuit ratio K_0		0.4-0.8	4-14	0.6-0.7	2
				0.4-0.5	4
Negative-sequence reactance $x(2)$	%	$\approx x''_d$	4-14	$\approx x''_d$	2 & 4
Zero-sequence reactance $x(0)$	%	$(0.4-0.8) x''_d$	4-14	$(0.4-0.6) x''_d$	2 & 4
Subtransient time constant T''_d	S	0.001-0.03	4-14	0.001-0.035	2 & 4
Transient time constant T'_d	S	0.04-1.0	4-14	0.04-1.2	2 & 4
Timeconstant of d.c. component T_g	s	0.01-0.25	4-14	0.03-0.25	2 & 4

ภาคผนวก ง

ข้อมูลคุณลักษณะของมอเตอร์

ตารางที่ ง.1 ค่า Maximum allowance stall time ของมอเตอร์แต่ละชนิด [5]

ชนิดของมอเตอร์	Maximum allowance stall time
<ul style="list-style-type: none"> ● มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดเล็กและขนาดกลาง <ul style="list-style-type: none"> - Standard design - High efficiency design ● มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ 	<p style="text-align: right;">20 วินาที</p> <p style="text-align: right;">30 วินาที</p> <p style="text-align: right;">โดยเฉลี่ย 15 วินาที</p>

ตารางที่ ง.2 ค่าพิคต์หรือค่าปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ [5]

ชนิดของมอเตอร์	ร้อยละของค่ากระแสทำงาน			
	ฟิวส์แบบไม่ หน่วงเวลา	ฟิวส์แบบ หน่วงเวลา	เซอร์กิตเบรกเกอร์ แบบทำงานทันที	เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบ เวลาทำงานผกผัน
● มอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟส				
● มอเตอร์สามเฟสแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage)	300	175	700	250
● มอเตอร์ซิงโครนัส				
● มอเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์	150	150	700	150

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอริยะ เมธเศรษฐ์ เกิดวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 ณ โรงพยาบาลรามารทิ
บดี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
ไฟฟ้า วิชาเอกไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541
และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.
2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย