การพัฒนาคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบหลายแรงดัน

CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS AND COORDINATION OF PROTECTIVE DEVICE FOR MULTI VOLTAGE SYSTEM

T 0 3 4 1 3 9

โดย

นายไกรเวทย์ อุณหก้องไตรภพ

นายมงคล กานดำรงรักษ์

นายวีรกร วันทอง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 34139
วัน, เดือน, ปี - 6 ต.ค. 2542

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2541

การพัฒนาคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบหลายแรงดัน

CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS AND COORDINATION OF PROTECTIVE DEVICE FOR MULTI VOLTAGE SYSTEM

โดย

นายไกรเวทย์ อุณหก้องไตรภพ

นายมงคล กานดำรงรักษ์

นายวีรกร วันทอง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ศุลี บรรจงจิตร

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบหลายแรงดัน

ผู้จัดทำ

1. นายไกรเวทย์ อุณหก้องไตรภพ
2. นายมงคล กานดำรงรักษ์
3. นายวีรกร วันทอง

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ศุลี บรรจงจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบหลายแรงดัน

ไกรเวทย์ อุณหก้องไตรภพ
มงคล กานดำรงรักษ์
วีรกร วันทอง
รศ.ศุลี บรรจงจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาขึ้นมาจากผลงานเดิมซึ่งเป็นการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์กระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน โดยใช้ซอฟแวร์เดลไฟ(Delphi) เป็นซอฟแวร์ในการใช้งานซึ่งจะทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสลัดวงจรทั้งในกรณีการลัดวงจรแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร รวมถึงการใช้อุปกรณ์ป้องกันร่วมกันได้ในระบบหลายแรง ดัน โดยวิธีที่ใช้ในการคำนวณของเครื่องอาศัยหลักการเปอร์ยูนิตและคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรด้วยบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Bus Impedance Matrix) ซึ่งจะทำให้สามารถทราบค่ากระแสลัดวงจรทุกตำแหน่งและสามารถนำไปเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเพื่อให้มาทำร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAD FOR SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS AND COORDINATION OF PROTECTIVE DEVICE FOR MULTI VOLTAGE SYSTEM

Kraiwate Unhakongtripop

Mongkol Kandamrongrux

Verakorn Vanthong

Associate processor Sulee Banjongjit Advisor

Chai Chompoo-Inwai Advisor

1998

Abstract

This thesis have been developed from computer aid for analyzing short circuit and coordination of protective devices by used Delphi software. This program is calculated the value of symmetrical and asymmetrical short circuit current . And coordinate with protective devices in multi voltage system .

The calculation method use by "per unit concept" and calculate the value of short circuit by bus impedance matrix .In this method ,it is useful to find out the value of short circuit in all position and be able selected the effective and economical protective devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญรูปภาพ	ค
สารบัญตาราง	ช
สัญลักษณ์	ซ
บทที่ 1 ความมุ่งหมายของปริญญานิพนธ์	
1.1 บทนำ	1
1.2 จุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่2 การคำนวณกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน	
2.1 บทนำ	3
2.2 พื้นฐานเบื้องต้นที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อที่จะคำนวณหากระแสลัดวงจร	3
2.3 ชนิดของการเกิดการผิดปกติ	13
2.4 โอเปอเรเตอร์ (Operator)	
2.4.1 โอเปอเรเตอร์ j	16
2.4.2 โอเปอเรเตอร์ a	16
2.5 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร	18
2.6 การพิจารณาขั้วและการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง	23
2.7 ลำดับของอิมพีแดนซ์และลำดับของวงจรไฟฟ้า	30
2.8 วงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบ	34
2.9 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์	35
2.10 ลำดับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	37
2.11 การคำนวณกระแสฟอลต์ด้วยบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์	39
2.12 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร	44
2.13 การคำนวณหากระแสลัดวงจร	46
2.14 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.15 การออกแบบระบบไฟฟ้าในส่วนที่เกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานร่วมกัน	68
2.16 สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า	73
บทที่ 3 ขั้นตอนการทำงานและการทำงานของซอฟแวร์	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	76
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ	77
3.3 ซอฟแวร์เดลไฟ (Delphi)	82
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	87
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	
5.1 บทสรุป	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
กิตติกรรมประกาศ	95
เอกสารอ้างอิง	96
ประวัติผู้เขียน	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร	5
2.2	ค่ากระแสลัดวงจรชนิดสมมาตรจะมีค่าเท่ากับผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่นทั้งหมด	6
2.3	รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสสมมาตร	7
2.4	รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสไม่สมมาตร	7
2.5	ลักษณะของการสมมาตรโดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าสูงสุด	10
2.6	ลักษณะของการไม่สมมาตรโดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด	10
2.7	กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร	11
2.8	กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าระหว่างสูงสุดและต่ำสุด	11
2.9	องค์ประกอบกระแสตรง	12
2.10	ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน	15
2.11	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a	18
2.12	ไดอะแกรมของหม้อแปลง 1 เฟส ที่กำกับด้วยเครื่องหมายตามมาตรฐานและสมมติให้ทิศทางการไหลของกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นบวก	23
2.13	การกำกับเครื่องหมายเพื่อแสดงขั้วของหม้อแปลง	24
2.14	เครื่องหมายมาตรฐานและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-วาย และแบบเดลต้า-เดลต้า โดยมีการเลื่อนเฟส = 0^{O}	25
2.15	เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้า ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า $V_{na}30^{O}$	26
2.16	เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า $V_{na}30^{O}$	26
2.17	เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับลบ สำหรับหม้อแปลงที่ต่อขดลวดแบบวาย – เดลต้า	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.18 วิธีการสำหรับการกำกับเฟสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-เดลต้า หรือเดลต้า – วาย	28
2.19 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวกและลำดับลบตามการกำกับเฟสเป็น b-c-a	29
2.20 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้ต่อโหลดและจุดนิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส	31
2.21 การไหลในแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า	32
2.22 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวายโดยนิวทรัลไม่ต่อลงดิน	35
2.23 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวายโดยนิวทรัลต่อลงดิน	36
2.24 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวายโดยนิวทรัลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Zn ลงดิน	36
2.25 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า	37
2.26 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของชุดหม้อแปลงสามเฟส ที่ประกอบด้วยไดอะแกรมการต่อขดลวดและสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพเส้นเดี่ยว	38
2.27 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบไฟฟ้า	39
2.28 วงจรไฟฟฟ้าของระบบในรูปที่ 2.27 ที่แสดงซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์เป็นค่าเปอร์ยูนิต	39
2.29 วงจรไฟฟ้าของรูปที่ 2.28 ที่เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตเป็นแอดมิดแตนซ์เปอร์ยูนิตและเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุลที่บัส 4 ของระบบซึ่งจำลองโดยการต่อ Vf อนุกรม-Vf	40
2.30 การต่อของบัสอิมพีแดนซ์สมมูลตามลำดับวงจรของระบบสามเฟสสำหรับจำลองการเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.31 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดการผิดปกติ	51
2.32 (ก) การทำงานร่วมกันแบบมีการทำงานร่วมกัน	52
(ข) การทำงานร่วมกันแบบไม่มีการทำงานร่วมกัน	52
2.33 ลักษณะของการจัดลำดับของการป้องกันในกรณีต่อฟิวส์อนุกรม	54
2.34 ลักษณะของการจัดลำดับของการป้องกันเซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ชุด โดยต่ออนุกรมกันและแสดงถึงค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าแตกต่างกันเมื่อมีความยาวมาเกี่ยวข้อง	55
2.35 ระบบแจกจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ป้องกันในระบบและต่ออนุกรมกัน	56
2.36 แผนภาพระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ โดยเป็นการแสดงให้เห็นถึงในช่วงป้องกันโหลดเกิน จะไม่มีการตัดกันของ คุณสมบัติฟิวส์และเบรกเกอร์เลย	57
2.37 แผนภาพลำดับการทำงา นระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ในช่วงลัดวงจร	58
2.38 แผนภาพของลำดับการทำงานระหว่างฟิวส์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อยในช่วงการป้องกันโหลดเกิน	59
2.39 แผนภาพของลำดับการทำงานระหว่างฟิวส์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อยในช่วงป้องกันการลัดวงจร	59
2.40 ระบบไฟฟ้าชนิดที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน 2 ตัวต่อขนานกัน	60
2.41. ระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 3 ชุดโดยแต่ละชุดมีขนาดเท่ากัน	61
2.42 ระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 2 ชุดและประกอบไปด้วยบัสไทร์เซอร์-กิตเบรกเกอร์	62
2.43 การทำงานสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 2 ชุดและบัสไทร์เซอร์-กิตเบรกเกอร์SK	63
2.44 ระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 2 ชุดและบัสไทร์เซอร์กิตที่เป็นชนิดจำกัดกระแส	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.45 กระแสตัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดจำกัดกระแสที่มีพิกัด 1000 A.	64
2.46 การเกิดลัดวงจรบนสายตัวนำ	66
2.47 การเกิดลัดวงจรของระบบแรงดันต่ำของวงจรตาข่ายเมช	67
2.48 การป้องกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง	70
3.1 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการทำงาน	76
3.2 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนในการออกแบบ	77
3.3 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในส่วนที่ 1 Simulate Section	78
3.4 โฟลว์ชาร์แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการคำนวณหากระแสลัดวงจรตามมาตรฐาน ANSI/ IEEE Std.141/1986	79
3.5 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมการโคออดิเนท ของอุปกรณ์ป้องกันแบบอัตโนมัติ (Automatic Coordinate)	80
3.6 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมการโคออดิเนท ของอุปกรณ์ป้องกันแบบผู้ใช้เลือกเอง (Manual Coordinate)	81
3.7 พื้นที่ที่ใช้งานในการเขียนวงจรเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจร	82
3.8 หน้าจอที่ใช้ในการป้อนค่าของระบบไฟฟ้า	83
3.9 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของบัสบาร์	84
3.10 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของ หม้อแปลง	84
3.11 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	85
3.12 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของมอเตอร์	85
3.13 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของโหลด	86
4.1 ระบบ Sample System ที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม	87
4.2 ระบบ Sample System ที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม	88
4.3 Single Line Diagram ที่ใช้งานจริง	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบของอุปกรณ์ระหว่างฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ กับการใช้ฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมกัน	53
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 7 หน้า 184	88
4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง IEEE Transaction on Industry Application vol. 32 No. 2 March/April 1996	89
4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง IEEE Transaction on Industry Application vol. 32 No. 2 March/April 1996 with 1000 HP Motor Contribution Locate at 100 ft. From 1200 A. Panel	90
4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองตามเอกสารอ้างอิง ซึ่งเป็นตัวอย่าง Single Line Diagram ที่ใช้งานในระบบจริง	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

	ระบบแรงดันจากการไฟฟ้า
	หม้อแปลงไฟฟ้า
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	มอเตอร์
	คาปาซิเตอร์
	โหลดไฟฟ้าต่าง ๆ
	บัสบาร์
	เซอร์กิตเบรคเกอร์
	ฟิวส์
	เซอร์กิตเบรคเกอร์และฟิวส์
	แสดงตำแหน่งเมาส์
	สายของวงจร
	ยางลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สร้างวงจรใหม่

เปิด

บันทึก

บันทึกแฟ้มเป็น

พิมพ์

ตั้งค่าเครื่องพิมพ์

ออกจากโปรแกรม

ความถี่

คำนวณ

โคออดิเนท

รายงานข้อผิดพลาด

รายละเอียดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

ความมุ่งหมายของปริญญานิพนธ์

1.1 บทนำ

การเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้านั้นนอกจากจะคำนึงถึงกระแสขณะใช้งานตามปกติแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงกระแสขณะที่เกิดลัดวงจรด้วย การลัดวงจรหมายถึงการที่วงจรไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดโดยอุบัติเหตุหรือความไม่ตั้งใจ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสไหลมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า กระแสลัดวงจรจะทำให้เกิดความเครียดทางกล และความเครียดทางความร้อนขึ้น ซึ่งสามารถส่งผลทำให้อุปกรณ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้า เพื่อที่จะได้เลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม ถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้อุปกรณ์ที่ทนกระแสลัดวงจรไม่เพียงพอก็อาจจะเกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สินและชีวิตเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในทางกลับกันถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ใหญ่เกินไป ราคาค่าติดตั้งระบบไฟฟ้าก็จะแพงเกินไปโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี

1.2 จุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์เรื่องการพัฒนาคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์หาขนาดกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบหลายแรงดัน มีจุดประสงค์หลักๆดังนี้

1.2.1 เพื่อพัฒนาจากโปรแกรมเดิมซึ่งมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำได้ในระบบหลายแรงดันและคำนวณการผิดปกติของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตรเพียงอย่างเดียวให้สามารถทำงานได้ในระบบหลายแรงดันและสามารถคำนวณหาค่าการผิดปกติของกระแสลัดวงจรในกรณีไลน์ทูกราวน์ฟอลต์ได้โดยยังคงยึดหลักตามมาตรฐาน ANSI/IEEE Std.141-1986

1.2.2 สามารถเลือกพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าและออกแบบการทำงานร่วมกันได้รวดเร็วและถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 ใช้เป็นซอฟแวร์ในการออกแบบระบบไฟฟ้าโดยบุคคลทั่วไปสามารถใช้งานได้ง่ายเพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและถูกต้อง

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 เขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาเดลไฟเป็นซอฟแวร์ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่ระดับหลายแรงดัน ตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE Std.141-1986

1.3.2 คำนวณกระแสที่พิกัดของโหลดต่าง ๆ กระแสลัดวงจรทั้งแบบสามเฟสสมมาตรและแบบไลน์ทูกราวด์ฟอลต์พร้อมทั้งสามารถนำไปเลือกขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์โดยผู้ออกแบบเลือกเองหรือให้โปรแกรมตัดสินใจ

1.3.3 มีฐานข้อมูลที่เก็บชนิดและรุ่นของอุปกรณ์ป้องกันให้ผู้ออกแบบเลือกหากมีอุปกรณ์ป้องกันรุ่นใหม่เพิ่ม สามารถเพิ่มเข้าไปในโปรแกรมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งใช้เป็นเครื่องมือช่วยการออกแบบงานระบบไฟฟ้าเพื่อให้สามารถออกแบบได้สะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้อง

1.4.2 ทำให้การออกแบบวันไลน์ไดอะแกรมมีการทำโหลดสมดุลย์ได้เด่นชัดขึ้น

1.4.3 ทำให้การออกแบบการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทำได้ง่ายและถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การคำนวณกระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

2.1 บทนำ

โดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้งานกันอยู่จะเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟสสมดุล ซึ่งสิ่งหนึ่งที่ไม่ปรารถนาให้เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังแต่ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ก็คือ ฉนวนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบเกิดเสื่อมสภาพ หรือการที่สายตัวนำเปลือยสัมผัสกัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุให้ระบบเกิด "การลัดวงจร" หรือ "ฟอลต์" ในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งฟอลต์ ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault)
2. ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault)

2.2 พื้นฐานเบื้องต้นที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อที่จะคำนวณหากระแสลัดวงจร

การเลือกอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ อย่างน้อยที่สุดจะต้องเลือกให้อยู่ในพื้นฐานของการเกิดการผิดปกติ และกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นโดยอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันก็คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์อาจจะใช้รีเลย์ (อาจจะประกอบหรือแยกออกจากกัน) เป็นตัวตรวจจับขนาดของกระแสที่เกินกว่าปกติ และจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรออกจากระบบ สำหรับฟิวส์นั้นจะเปิดวงจรออกจากระบบก็โดยการหลอมละลายเมื่อมีกระแสเกินกว่าปกติไหลผ่าน ในกรณีที่ระบบป้องกันการทำงานไม่ดีแล้ว อันตรายที่เกิดขึ้นจะมีมากและก่อให้เกิดความเสียหายอย่างใหญ่หลวง ซึ่งจะเป็นผลที่จะทำให้ระบบไม่สามารถที่จะทำงานต่อไปได้ ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบจะมีสิ่งต่อไปนี้ตามมาคือ

ก. เกิดการอาร์ก (arcing) และการลุกไหม้ (burning) ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

ข. กระแสลัดวงจรจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าหรือโหลดต่าง ๆ จะไหลเข้าสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร

ค. ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่จะรองรับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนี้ จะต้องทนทานต่อความร้อนและแรงกดทางกลศาสตร์ ซึ่งแรงกดนี้จะแปรตามฟังก์ชั่นของกระแสยกกำลังสองและช่วงการไหลของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. แรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) ของระบบจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น โดยที่จุดเกิดการลัดวงจรจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แต่ที่ส่วนต่าง ๆ ของระบบจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าตก

ขนาดของกระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายไฟที่จะจ่ายให้แก่ระบบ และจะไม่ขึ้นกับโหลดปกติแต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จะจ่ายให้ระบบ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้กระแสลัดวงจรสูงสุดเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในกรณีที่จะเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้แก่เซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์ได้ถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องทนกระแสลัดวงจรสูงสุดได้และไม่ทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดการเสียหายได้ เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดอันตรายจากกระแสลัดวงจรในการออกแบบควรคำนึงถึง

ก.ต้องหาขนาดของกระแสลัดวงจร โดยละเอียดเพื่อที่จะเลือกอุปกรณ์ป้องกันให้สอดคล้องกับกระแสลัดวงจรของวงจรนั้น ๆ

ข.การขยายโหลด ในอนาคตเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรรู้เพื่อที่จะได้เผื่อการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกันที่จะเลือกใช้ด้วย

ค. ต้องตรวจสอบขนาดของบัสบาร์ให้เพียงพอว่าสามารถที่จะรับแรงทางเชิงกล อันเนื่องมาจากการเกิดลัดวงจรรวมถึงจุดยึด จุดรองรับบัสบาร์ทั้งหมดด้วย

ง.ต้องตรวจสอบขนาดของสายตัวนำ เพื่อให้มีความสามารถทนต่อความร้อนที่เกิดเนื่องจากกระแสลัดวงจรได้

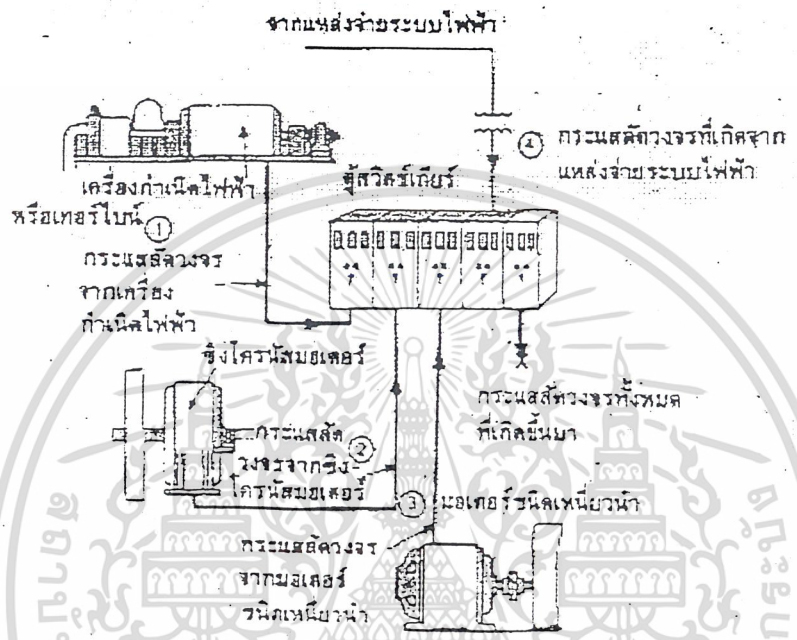
จ.ต้องตรวจสอบระบบทั้งหมด โดยเริ่มต้นตั้งแต่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปจนถึงโหลดตัวสุดท้าย ทั้งนี้ก็เพื่อความปลอดภัยนั่นเอง

2.2.1การเกิดกระแสลัดวงจร

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า ความรุนแรงของกระแสลัดวงจรที่จะเกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดการลัดวงจรนั้น จะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า (Source) ต่าง ๆ ในระบบ ค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิด ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจรอันได้แก่ ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลัง (utility system) หรือการไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ชนิดซิงโครนัส และมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ ในรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงถึงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรทั้งหมด ซึ่งแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะมีผลต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดเกิดลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.1 แหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร

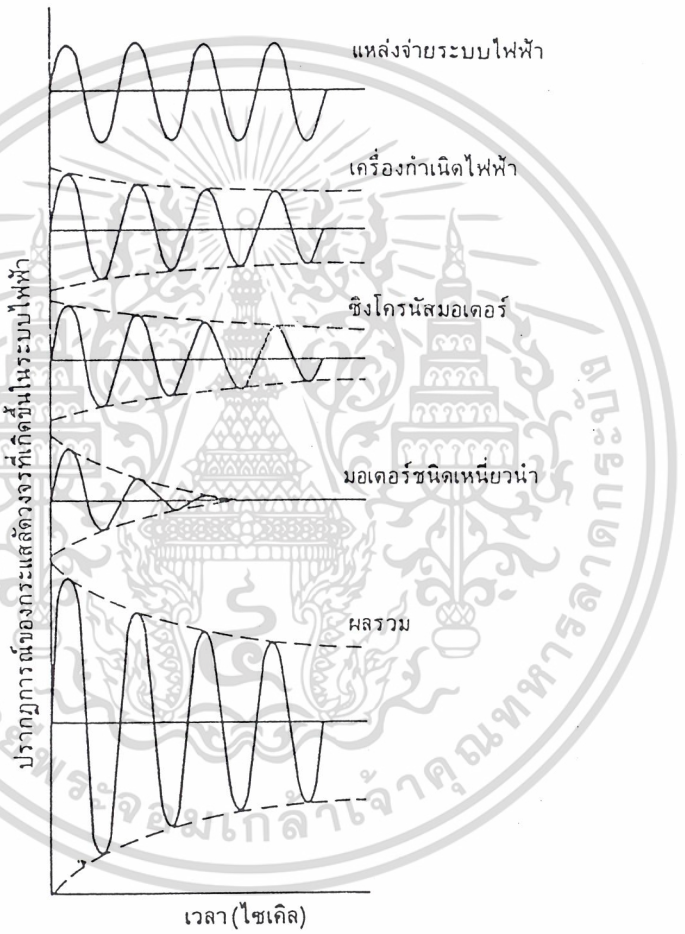
2.2.2 แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร (Sources of Short - Circuit Current)

เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือฟอลต์ขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การหาขนาดของกระแสลัดวงจรเพื่อที่จะได้นำมาพิจารณาเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตาม การหาขนาดของกระแสลัดวงจรนั้นมีความจำเป็นต้องทราบถึงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรและคุณลักษณะรีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรนั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น

1. ระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังโดยจะจ่ายพลังงานให้แก่หม้อแปลง เพื่อที่จะได้อาศัยหม้อแปลงในการลดแรงดันไฟฟ้าลงมา แต่หม้อแปลงไม่ใช่แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร เพราะว่าตัวหม้อแปลงเองจะเป็นเพียงตัวเปลี่ยนขนาดแรงดันหรือขนาดของกระแสเท่านั้น ดังนั้น กระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังจะถูกผ่านออกมาจากหม้อแปลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิและเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังนั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของตัวกำเนิดกระแสลัดวงจรตัวอื่น ๆมาก ดังนั้นขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายกำลังจึงจะมีค่าสม่ำเสมอดังแสดงในรูปที่ 2.2

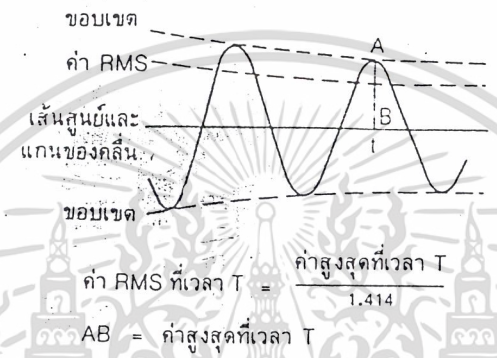


รูปที่ 2.2 ค่ากระแสลัดวงจรชนิดสมมาตร จะมีค่าเท่ากับผล
ของกระแสลัดวงจรที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

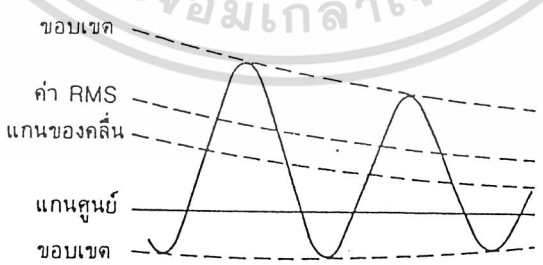
ในกรณีที่พิจารณาถึงกระแสลัดวงจรนั้น จะหมายถึงเป็นกระแสในค่าของ RMS หรือค่าจริงของสัญญาณรูปไซน์นั่นเอง โดยสัญญาณคลื่นของกระแสจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. กระแสสมมาตร หมายถึงกระแสสลับที่สมดุลรอบแกนศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่2.3 รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสสมมาตร

ข. กระแสไม่สมมาตร หมายถึงกระแสสลับที่ไม่สมดุลรอบแกนศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบไซน์ของกระแสไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้น ทั้งตัวต้นกำลัง (prime mover) และกระแสกระตุ้น (exciting field) ก็ยังคงมีอยู่ ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบในวงจรที่อยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับจุดที่เกิดการลัดวงจร นอกจากนี้ผลของการลัดวงจรยังจะมีผลต่อเนื่องมาถึงค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกด้วย

2.1 ค่าซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์แกนตรง (direct axis subtransient reactance ; X''_d) จะเป็นค่ารีแอกแตนซ์ของขดสเตเตอร์ (Stator winding) โดยจะปรากฏขึ้นทันทีที่เกิดการลัดวงจรขึ้นและจะเป็นตัวกำหนดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นภายในช่วง 1-2-3 ไซเคิลแรกหลังจากการเกิดลัดวงจร

2.2 ค่าทรานเซียนรีแอกแตนซ์แกนตรง (direct axis transient reactance ; X'_d) จะเป็นค่าที่กำหนดกระแสลัดวงจร โดยค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะมีผลจนถึง ฝ วินาที หรือนานกว่าถึง 2 วินาที ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องจักรนั้น ๆ

2.3 ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์แกนตรง (direct axis synchronous reactance ; X_d) ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดการไหลของกระแสลัดวงจรในช่วงสถานะอยู่ตัว (Steady state) และจะไม่มีผลอะไร ค่ารีแอกแตนซ์ค่านี้จะนำมาพิจารณาหลังจากที่เกิดการลัดวงจรผ่านไปแล้วหลายวินาที ดังนั้นส่วนใหญ่จึงจะไม่นิยมใช้ค่า X_d ในการคำนวณหากระแสลัดวงจร

ค่ารีแอกแตนซ์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ถ้านำมาเขียนถึงผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากระแสลัดวงจรจะค่อย ๆ ลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) จากค่าสูงสุดลงไปสู่ค่าต่ำจนถึงช่วงสถานะอยู่ตัว ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยค่ารีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับเวลา ค่า X''_d และ X'_d จะถูกกำหนดมาโดยโรงงานผู้ผลิต จึงพอจะกล่าวได้ว่าผลของกระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าสูงและจะลดลงสู่ค่าปกติค่าหนึ่ง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับรีแอกแตนซ์ของวงจรนั่นเอง

3. ซิงโครนัสมอเตอร์ เนื่องจากลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสและซิงโครนัสมอเตอร์คล้ายคลึงกัน ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น อิทธิพลของโหลดจะทำให้ซิงโครนัสมอเตอร์ค่อย ๆ หยุดหมุนลง และยังคงมีแรงเฉื่อยซึ่งทำตัวคล้ายกับเป็นตัวต้นกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะถือว่าซิงโครนัสมอเตอร์ได้กลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นก็จะเกิดกระแสลัดวงจรขึ้นในช่วงหลายไซเคิล ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูป 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า x''_d x'_d x_d ในชิงโครนัสมอเตอร์จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป และผลของกระแสลัดวงจรที่มาจากชิงโครนัสมอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงม้า แรงดันไฟฟ้า และค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ตลอดจนค่ารีแอกแตนซ์ระหว่างจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงมอเตอร์นั้น

4. มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ เนื่องจากมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะทำงานได้ต้องอาศัยการกระตุ้นสนาม (excited field) ที่ได้จากผลของการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งไม่ใช่จากขดกระตุ้นกระแสตรง (DC field winding) ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น กระแสจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ก็จะพุ่งไปสู่จุดที่เกิดการลัดวงจร เพราะฉะนั้นสนามแม่เหล็ก (flux) ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนภายในช่วง 2-3 ไซเคิลนับจากเกิดการลัดวงจร ซึ่งในกรณีเช่นนี้กระแสลัดวงจรก็จะลดลงจนเป็นค่าศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 ไซเคิล ดังนั้นค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ก็จะพิจารณาเฉพาะค่าซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์แกนตรง (x''_d) เท่านั้น โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับล็อคโรเตอร์รีแอกแตนซ์ (locked rotor reactance)

ค่าของกระแสลัดวงจรชนิดสมมาตรในตอนเริ่มแรก จะมีค่าเกือบเท่ากับกระแสตอนเริ่มสตาร์ตโดยมีแรงดันเต็มที่ของมอเตอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 600 - 900 % ของกระแสโหลดปกติ และค่ากระแสลัดวงจรนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงม้า พิกัดแรงดันไฟฟ้า ค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ตลอดจนค่ารีแอกแตนซ์ของจุดที่เกิดการลัดวงจรจนถึงตัวมอเตอร์

ผลของกระแสลัดวงจรอันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ นั้น จะถูกรวมกันเป็นกระแสลัดวงจรทั้งหมด โดยแสดงไว้รูปที่ 2.2 และอิทธิพลของเวลาจะมีผลต่อช่วงของการเกิดลัดวงจรซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะของคลื่นที่แตกต่างกันคือ

ก. กระแสรูปไซน์แบบสมมาตร (symmetrical sinusoidal current) โดยแสดงรูปที่ 2.3

ข. กระแสรูปไซน์แบบไม่สมมาตร (asymmetrical sinusoidal current) โดยแสดงดังรูปที่ 2. 4

2.2.3 กระแสสมมาตรและไม่สมมาตร

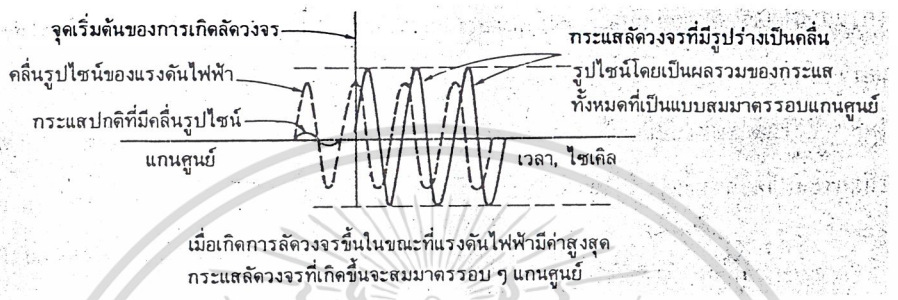
(Symmetrical and Asymmetrical Short - Circuit Current)

ในกรณีที่ระบบเกิดการลัดวงจรขึ้นกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ในช่วง 1-2-3 ไซเคิลแรกหลังจากการเกิดการลัดวงจรขึ้นกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรจะมีค่ามากกว่าอยู่ในช่วงไซเคิลแรก ๆ และหลังจาก 2-3 ไซเคิลต่อมาจะค่อย ๆ เริ่มเข้าสู่กระแสลัดวงจรแบบสมมาตรต่อไป

กรณีที่เกิดการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของวงจรมีค่าสูงสุด กระแสลัดวงจรจะเริ่มที่ค่าเกือบเป็นศูนย์ และจะมีเพิ่มขึ้นในลักษณะของรูปไซน์และทำมุม 90 องศา (ต่างเฟส) กับแรงดันไฟฟ้า

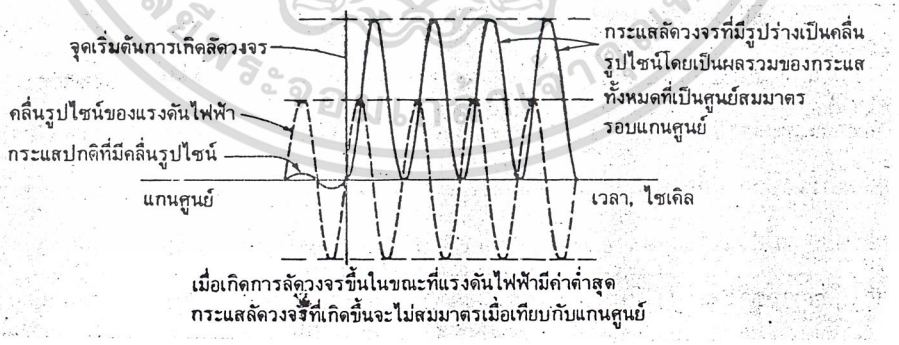
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลของการที่เกิดการลัดวงจรในลักษณะนี้จะเป็นแบบสมมาตรรอบ ๆ แกนศูนย์ (symmetrical about zero axis) ดังแสดงในรูปที่ 2. 5



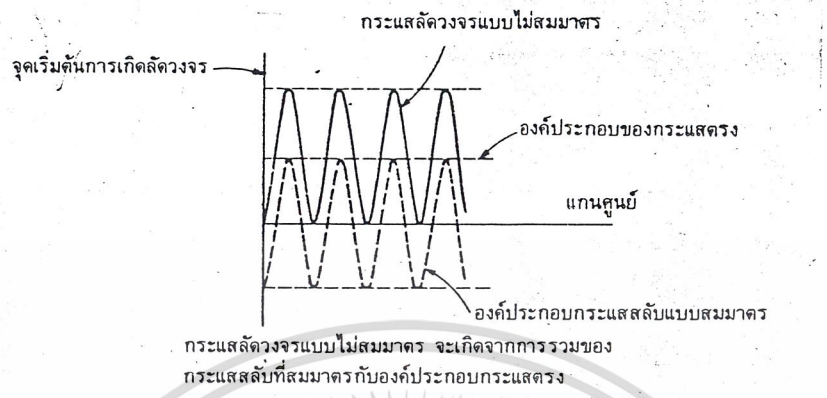
รูปที่ 2.5 ลักษณะของการสมมาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าสูงสุด

กรณีที่เกิดการลัดวงจรในขณะที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าศูนย์ กระแสลัดวงจรจะเริ่มต้นที่ค่าศูนย์ กระแสจะล้าหลัง (lag) แรงดันไฟฟ้าเป็นมุม 90 องศา และจะเป็นลักษณะของกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.6



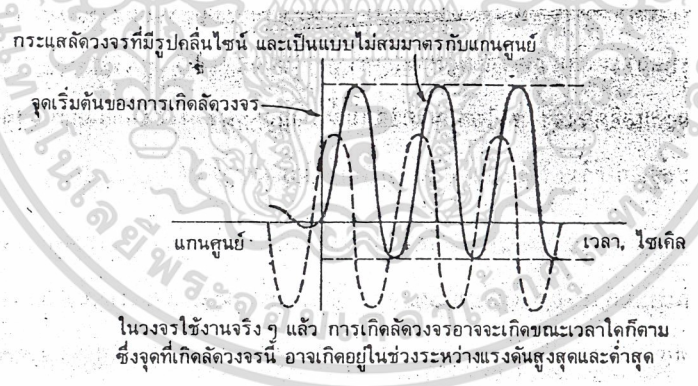
รูปที่ 2.6 ลักษณะของการไม่สมมาตร โดยจะเกิดขึ้นเมื่อขณะที่เกิดการลัดวงจรนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

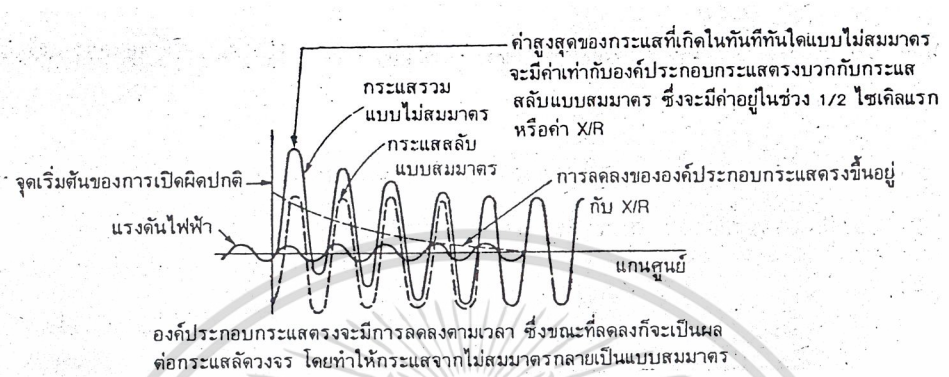
ในรูปที่ 2.7 นั้นเป็นการแสดงว่าในกรณีของผลรวมของกระแสไม่สมมาตรทั้งหมดก็จะมาจากกระแสสมมาตรที่มีส่วนของกระแสตรงเข้ามาประกอบนั่นเอง



รูปที่ 2.8 กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าระหว่างสูงสุดและค่าต่ำสุด

ในรูปที่ 2.8 เป็นการแสดงถึงกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้น ในขณะที่แรงดันอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นคือกระแสไม่สมมาตรที่มีกระแสตรงเข้ามาประกอบเพียงแต่ช่วงของการเปลี่ยนรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรนี้อาจจะขยับได้ ซึ่งคล้ายกับรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบกระแสตรง

ในรูปที่ 2.9 เป็นการแสดงถึงผลของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นโดยเริ่มต้นจากไม่สมมาตรในไซเคิลแรก ๆ หลักจากนั้น 2-3 ไซเคิลต่อมาก็จะกลายเป็นสมมาตร ทั้งนี้เนื่องจากค่าองค์ประกอบกระแสตรงได้ลดลงไป ค่าองค์ประกอบกระแสตรงนี้จะถือว่าเป็นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (I^2R) ภายในวงจรได้

2.2.4 แฟกเตอร์ X/R

อัตราส่วน X/R คืออัตราส่วนระหว่างรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานของวงจร การลดลงหรืออัตราการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วน X/R ของวงจร ซึ่งในทางทฤษฎีไฟฟ้าเหมือนกับการเปิดวงจรอนุกรมระหว่างแบตเตอรี่และอินดักตีฟโหลด

ถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าเป็นอนันต์ (ความต้านทานเป็นศูนย์) จะทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงจะไม่ลดลง

ถ้าอัตราส่วน X/R มีค่าเป็นศูนย์ (วงจรเป็นความต้านทานหมดไม่มีรีแอกแตนซ์)ส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงทันที สำหรับที่อัตราส่วน X/R ใด ๆ ระหว่างขีดจำกัดทั้งสอง ส่วนประกอบกระแสตรงจะลดลงไปตามเวลาจนเป็นศูนย์ในที่สุด ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 โมเมนทารีดิวตี้

ในการพิจารณากระแสลัดวงจรแบบสมมาตร ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลแรกของกระแแสลัดวงจรนั้น ถ้าในระบบไฟมีแหล่งกำเนิดหลายอย่างจะต้องพิจารณาถึงค่าซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์ของแหล่งกำเนิดทุกแหล่ง หลังจากนั้นจะทำการหารูปคลื่นของกระแสในกรณีไม่สมมาตร (จะเกิดขึ้นในช่วงไซเคิล ดูได้จากรูปที่ 2.9) จะต้องนำค่าตัวคูณคงที่มาคูณกับรูปคลื่นของกระแสในกรณีสมมาตร โดยปกติทั่วๆ ไปในระบบแรงดันไฟฟ้าสูงและแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง ค่าตัวคูณจะเท่ากับ 1.5-1.6 ส่วนในระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำ ค่าตัวคูณจะมีค่า 1.25

2.2.6 อินเตอร์รับติ้งดิวตี้

จะพิจารณาจากขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ที่จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรหรือฟิวส์เริ่มละลาย โดยปกติเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรออกหลังจาก 3,5 หรือ 8 ไซเคิลแล้ว และในโรงงานอุตสาหกรรมจะนิยมใช้ 8 ไซเคิลเบรกเกอร์ หลังจาก 8 ไซเคิลนับจากที่เกิดการผิดปกติผ่านไป มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำจะไม่เข้ามายุ่งเกี่ยวด้วย และค่ารีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์จะถูกเปลี่ยนจากซับทรานเซียนไปเป็นทรานเซียนต์ซึ่งจะเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมในระบบแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 600 โวลต์ อินเตอร์รับติ้งดิวตี้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงใช้ค่าตัวคูณเป็น 1 เพราะว่าพิจารณาในกรณีของซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าทรานเซียนรีแอกแตนซ์ของชิงโครนัสมอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึงมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ และค่าองค์ประกอบกระแสตรงหลังจาก 8 ไซเคิลแล้วจะหายไป

2.3 ชนิดของการเกิดการผิดปกติ

การเกิดผิดปกติหรือการลัดวงจรเป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้าและสามารถจำแนกออกได้หลายชนิด อุปกรณ์ป้องกันจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการเปิดวงจร (Interrupt) หรือทนต่อแรงดันและความร้อนที่จะเกิดขึ้น การเกิดการผิดปกติมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ แต่พื้นฐานการคำนวณทั่ว ๆไป จะคำนึงถึงการผิดปกติแบบทรีเฟสโบลต์ฟอลต์มากกว่าการผิดปกติแบบอื่น ๆ

1. ทรีเฟสโบลต์ฟอลต์ (three - phase blited fault) สภาวะเช่นนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก แต่ผลของการเกิดการผิดปกติแบบนี้จะให้ค่ากระแสลัดวงจรทีสูงสุด ดังนั้นจึงใช้การคำนวณการผิดปกตินี้ในพวกระบบไฟฟ้ากำลังทั่ว ๆ ไปที่ใช้กับงานพาณิชย์
2. ไลน์ทูไลน์โบลต์ฟอลต์ (line to line bolted fault) โดยปกติในระบบไฟ 3 เฟสกระแสที่เกิดจากการผิดปกติแบบนี้จะมีประมาณ 87 % ของกระแสที่เกิดจากกรณีที่ 1
3. ไลน์ทูกราวน์โบลต์ฟอลต์ (line to ground bolted fault) กระแสที่เกิดจากการผิดปกติแบบนี้เกือบมีค่าเท่ากับกรณีที่ 1 ทั้งนี้ต้องเป็นแบบระบบโซลิดกราวน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อาร์กซิ่งฟอลต์ (arcing fault) จะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยการอาร์กที่เกิดขึ้นนี้อาจจะแสดงออกมาน้อย ๆ ทั้งนี้กระแสที่ทำให้เกิดการอาร์กอาจจะน้อยกว่ากระแส่ที่เกิดจากกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 ก็ได้

2.3.1 ส่วนประกอบสมมาตร

ในการวิเคราะห์ฟอล์ตแบบไม่สมมาตรเราจะใช้วิธีของส่วนประกอบสมมาตร(Symmetrical component)ทฤษฎีส่วนประกอบสมมาตรที่ประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาระบบ 3 เฟสที่ไม่สมดุลด้วยระบบ3เฟสสมดุล จะประกอบด้วยเฟสเซอร์ส่วนประกอบดังนี้

1 ส่วนประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Components) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมแตกต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส (Phase sequence) เหมือนกับเฟสเดิม

2 ส่วนประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Components) ส่วนประกอบ 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสแตกต่างกัน120° และมีลำดับเฟสตรงข้ามกับเฟสเซอร์เดิม

3 ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Components) ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสเดียวกัน

ในระบบ 3 เฟสที่มีลำดับเฟสของแรงดันและกระแสเป็น abc ดังนั้นลำดับเฟสของส่วนประกอบลำดับบวกของเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุล คือ abc และลำดับเฟสของส่วนประกอบลำดับลบคือ acb ถ้าเฟสเซอร์เดิมของแรงดันเป็น V_a,V_b และ V_c แล้วเฟสเซอร์แรงดันของส่วนประกอบสมมาตรจะเขียนโดยการเพิ่มตัวห้อย หมายเลข 1 สำหรับส่วนประกอบลำดับบวก หมายเลข 2 สำหรับส่วนประกอบลำดับลบและหมายเลข 0 สำหรับส่วนประกอบศูนย์ ดังนั้นส่วนประกอบลำดับบวกของ V_a,V_b และ V_c คือ V_{a1},V_{b1} และ V_{c1} ในทำนองเดียวกันส่วนประกอบลำดับลบคือ V_{a2},V_{b2} และ V_{c2} และส่วนประกอบลำดับศูนย์ก็คือ V_{a0},V_{b0} และ V_{c0} สำหรับเฟสเซอร์ของกระแสจะเขียนด้วย I และมีตัวห้อยเช่นเดียวกับเฟสเซอร์ของแรงดัน ดังรูปที่ 2.10

สำหรับเฟสเซอร์ของแรงดัน V_a,V_b และ V_c ในที่ไม่สมดุล สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรได้ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad \text{.....(2.1)}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad \text{.....(2.2)}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad \text{.....(2.3)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

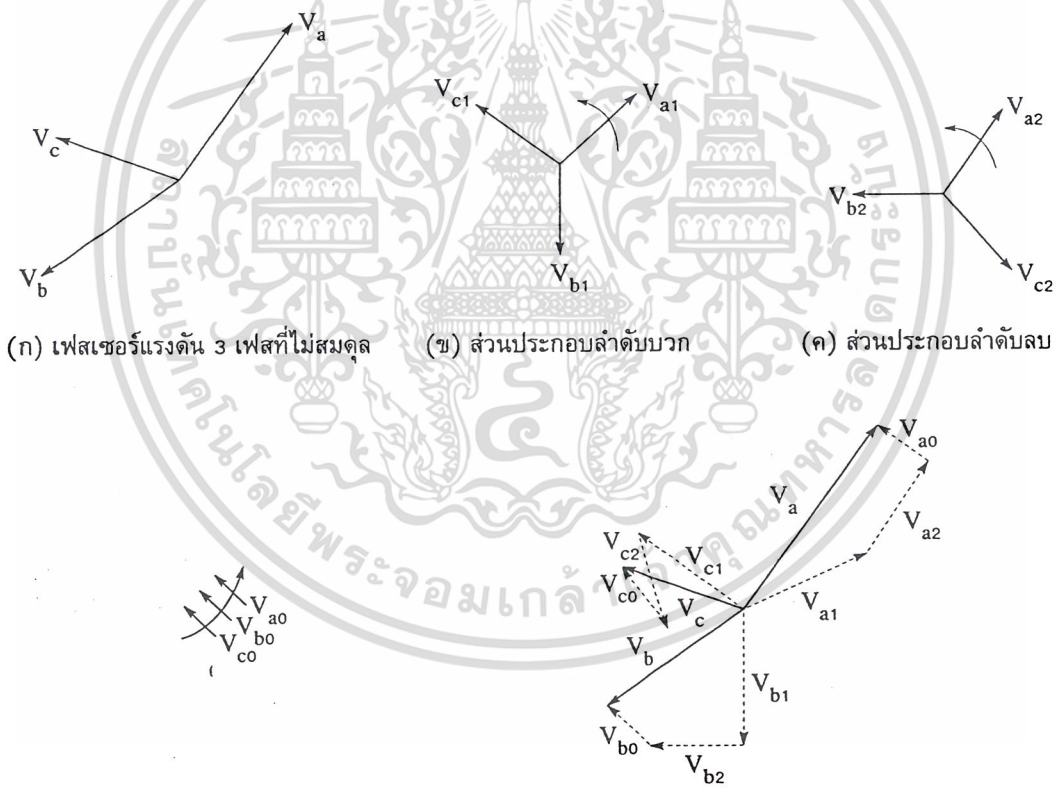
และในทำนองเดียวกันเฟสเซอร์ของกระแส I_a,I_b และ I_c ที่ไม่สมดุลคือ

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad \text{.....(2.4)}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad \text{.....(2.5)}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad \text{.....(2.6)}$$

วิธีการของส่วนประกอบสมมาตรนี้จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง



(ก) เฟสเซอร์แรงดัน 3 เฟสที่ไม่สมดุล (ข) ส่วนประกอบลำดับบวก (ค) ส่วนประกอบลำดับลบ

(ง) ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (จ) การรวมส่วนประกอบสมมาตรของรูป (ข) ถึง (ง) เพื่อที่จะได้เฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลตามรูป (ก)

รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โอเปอเรเตอร์ (Operator)

โอเปอเรเตอร์คือ จำนวนเชิงซ้อนที่มีขนาดเท่ากับหนึ่งหน่วย โอเปอเรเตอร์จะใช้ในการหมุนเวกเตอร์ไปยังมุมต่างๆโดยไม่มีการเปลี่ยนขนาด โอเปอเรเตอร์ที่คุ้นเคยกันดีก็คือ –1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1\angle 180^{\circ}$ หมายถึงเวกเตอร์มีขนาดเท่ากับหนึ่งและหมุนไปยังมุม 180°

2.4.1 โอเปอเรเตอร์ j

กำลังของโอเปอเรเตอร์ j อาจเขียนได้หลาย ๆ แบบ ดังนี้

$$j = 1\angle 90^{\circ} = 1\angle -270^{\circ} = 0+j = j$$

$$j^2 = 1\angle 180^{\circ} = 1\angle -180^{\circ} = -1+j0 = -1$$

$$j^3 = 1\angle 270^{\circ} = 1\angle -90^{\circ} = 0-j = -j$$

$$j^4 = 1\angle 360^{\circ} = 1\angle 0^{\circ} = 1+j0 = 1$$

$$j^5 = 1\angle 450^{\circ} = 1\angle 90^{\circ} = 0+j = j$$

2.4.2 โอเปอเรเตอร์ a

เวกเตอร์ของระบบ 3 เฟสสมดุลจะต้องมีโอเปอเรเตอร์ที่จะหมุนเวกเตอร์ไปยังมุม 120° ซึ่งมีความจำเป็นทีต้องนำมาใช้ในการคำนวณอย่างมาก โดยทั่วไปทางปฏิบัติจะใช้ตัวอักษร a แทนโอเปอเรเตอร์นี้ ดังนี้

$$a = 1\angle 120^{\circ}$$

ใช้ความสัมพันธ์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เขียนโอเปอเรเตอร์ a ให้อยู่ในรูปแบบเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$a = 1(\cos\theta + j\sin\theta) = \cos 120^{\circ} + j\sin 120^{\circ} = -0.5+j0.866$$

และ

$$a^2 = (-0.5+j0.866)^2 = -0.5-j0.866$$

หรือ

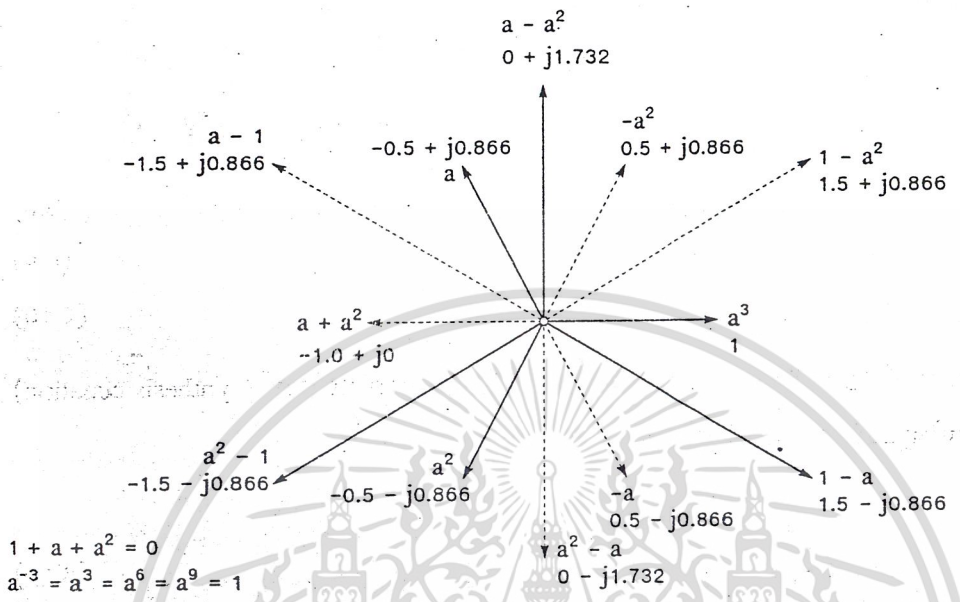
$$a^2 = a \times a = 1\angle 120^{\circ}+120^{\circ} = 1\angle 240^{\circ} = 1\angle -120^{\circ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชั่นของโอเปอเรเตอร์ a จะนำมาใช้งานมากในเรื่องส่วนประกอบสมมาตร เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจึงได้สรุปค่าของฟังก์ชั่นโอเปอเรเตอร์ a ดังข้างล่างนี้ และรูป (2.11) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a

a	=	$1\angle 120^{o}$	=	-0.5+j0.866
A^2	=	$1\angle 240^{o}$	=	-0.5-j0.866
A^3	=	$1\angle 360^{o}$	=	1.0+j0
A^4	=	$1\angle 120^{o}$	=	-0.5+j0.866
$-a$	=	$1\angle -60^{o}$	=	0.5-j0.866
$-a^2$	=	$1\angle 60^{o}$	=	0.5+j0.866
$1+a+a^2$	=	0		
$a+a^2$	=	-1		
$a-a^2$	=	0+j1.732	=	$\sqrt{3}\angle 90^{o}$
a^2-a	=	0-j1.732	=	$\sqrt{3}\angle -90^{o}$
$1-a$	=	1.5-j0.866	=	$\sqrt{3}\angle -30^{o}$
$1-a^2$	=	1.5+j0.866	=	$\sqrt{3}\angle 30^{o}$
$a-1$	=	-1.5+j0.866	=	$\sqrt{3}\angle 150^{o}$
a^2-1	=	-1.5-j0.866	=	$\sqrt{3}\angle -150^{o}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a

2.5 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร

(The Symmetrical Components of Unsymmetrical Phasor)

จากรูปที่2.10ได้แสดงให้เห็นว่าเฟสเซอร์เดิมจะมีค่าเท่ากับการรวมส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์เข้าด้วยกัน ตามที่ระบุไว้ในสมการที่(2.1),(2.2)และ(2.3) ซึ่งหัวข้อเราจะแสดงให้เห็นถึงการแก้ปัญหาเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร โดยการใช้ส่วนประกอบสมมาตรว่าทำได้อย่างไร

ถ้าเรากำหนดให้เฟส a เป็นเฟสอ้างอิง และด้วยการใช้โอเปอเรเตอร์ a ดังนั้นส่วนประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และ ลำดับศูนย์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left.\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} \\ V_{C1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} \\ V_{C2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= a V_{C1} = V_{a0} \end{aligned}\right\} \qquad \text{.....(2.7)}$$

แทนค่าสมการที่ (2.7) ลงในสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3) จะได้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{aO} \qquad \text{.....(2.8)}$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{aO} \qquad \text{.....(2.9)}$$

$$V_C = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{aO} \qquad \text{.....(2.10)}$$

จากสมการที่ (2.8) ถึง (2.10) เป็นที่ทราบกันว่า คือ สมการสังเคราะห์ (synthesis equation) สามารถเขียนในรูปแบบของเมทริกได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{aO} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} \qquad \text{.....(2.11)}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{012} \end{bmatrix} \qquad \text{.....(2.12)}$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \qquad \text{.....(2.13)}$$

$$V_{abc} = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \qquad \text{.....(2.14)}$$

$$V_{012} = \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} \qquad \text{.....(2.15)}$$

และจากการทำอินเวิร์สเมทริกซ์ A จะได้

$$A^{-1} = 1/3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \qquad \text{.....(2.16)}$$

นำค่า A^{-1} ของสมการที่ (2.16) ไปคูณสมการที่ (2.11) ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = 1/3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_C \end{pmatrix} \qquad \text{.....(2.17)}$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} V_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{abC} \end{bmatrix} \qquad \text{.....(2.18)}$$

จากสมการที่ (2.17) สามารถเขียนแยกให้อยู่ในรูปของสมการได้คือ

$$V_{aO} = 1/3\ (V_a + V_b + V_C) \qquad \text{.....(2.19)}$$

$$V_{a1} = 1/3\ (V_a + aV_b + a^2V_C) \qquad \text{.....(2.20)}$$

$$V_{a2} = 1/3\ (V_a + a^2V_b + aV_C) \qquad \text{.....(2.21)}$$

สมการที่ (2.19) ถึง (2.21) เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นสมการวิเคราะห์ (Analysis equation) และถ้าต้องการทราบค่าของส่วนประกอบ $V_{bO}, V_{b1}, V_{b2}, V_{CO}, V_{C1}$ และ V_{C2} สามารถนำค่าจากสมการที่ (2.19) ถึง (2.21) แทนในสมการที่ (2.8)

สำหรับสมการสังเคราะห์และสมการวิเคราะห์ที่อยู่ในเทอมเฟสและลำดับของกระแส สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{aO} \qquad \text{.....(2.22)}$$

$$I_b = a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{aO} \qquad \text{.....(2.23)}$$

$$I_C = aI_{a1} + a^2I_{a2} + I_{aO} \qquad \text{.....(2.24)}$$

และ

$$I_{aO} = 1/3\ (I_a + I_b + I_C) \qquad \text{.....(2.25)}$$

$$I_{a1} = 1/3\ (I_a + aI_b + a^2I_C) \qquad \text{.....(2.26)}$$

$$I_{a2} = 1/3\ (I_a + a^2I_b + aI_C) \qquad \text{.....(2.27)}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{aO} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} \quad \text{.....(2.28)}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix} \quad \text{.....(2.29)}$$

และ

$$\begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} = 1/3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_C \end{pmatrix} \quad \text{.....(2.30)}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{abC} \end{bmatrix} \quad \text{.....(2.31)}$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ผลรวมของกระแสไลน์จะเท่ากับกระแส I_n ที่ไหลกลับสู่จุดนิวทรัล ดังนั้น

$$I_n = I_a + I_b + I_C \quad \text{.....(2.32)}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.25) จะได้

$$I_{aO} = 1/3 \, (I_a + I_b + I_C) = 1/3 \, I_n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

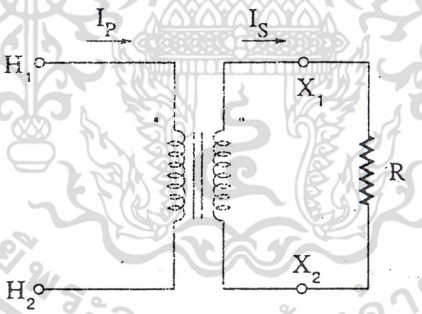
$$I_n = 3I_{aO} \quad \text{.....(2.33)}$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ไม่มีกระแสไหลผ่านนิวทรัล กระแส I_n มีค่าเป็นศูนย์ และกระแสไลน์ก็จะไม่มีส่วนประกอบศูนย์ สำหรับโหลด 3 เฟสที่ต่อแบบเดลต้าจะไม่มีส่วนของนิวทรัล ดังนั้นกระแสไลน์ที่ไหลผ่านโหลดที่ต่อแบบเดลต้าจะไม่มีส่วนประกอบศูนย์เช่นเดียวกัน

2.6 การพิจารณาขั้วและการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง

(Transformer Polarity and Phase-Shift Considerations)

เครื่องหมาย (Marking) ตามมาตรฐานของหม้อแปลงหนึ่งเฟสขั้วที่มีจุด (dot) บนขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำจะแทนด้วย H1 และ X1 ตามลำดับ โดยที่ปลายขั้วอีกข้างหนึ่งของขดลวดจะแทนด้วย H2 และ X2 ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่2.12 ไดอะแกรมของหม้อแปลง 1 เฟส ที่กำกับด้วยเครื่องหมายตามมาตรฐาน และสมมติให้ทิศทางการไหลของกระแสปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นบวก

จากรูปที่2.12 จุดที่กำกับที่ขั้วของขดลวดจะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสไหลจากขั้วที่มีจุดไปยังขั้วที่ไม่มีจุด สำหรับกระแส I_P และ I_S จะมีเฟสเดียวกัน และกระแสเป็นบวกเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วที่ไม่มีจุดกำกับ กล่าวคือกระแสไหลเข้าขั้วที่มีจุดของขดลวดขดหนึ่ง (I_P) และไหลออกจากขั้วที่มีจุดของอีกขดลวดหนึ่ง (I_S) ซึ่งขดลวดทั้งสองอยู่บนแกนหม้อแปลงเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงจะมีเทอมของขั้วบวก (additive polarity) และขั้วลบ (subtractive polarity) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางกายภาพของตำแหน่ง H และขั้ว X รูปที่2.12 แสดงความสัมพันธ์ของขั้วลบ และรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของขั้วบวก

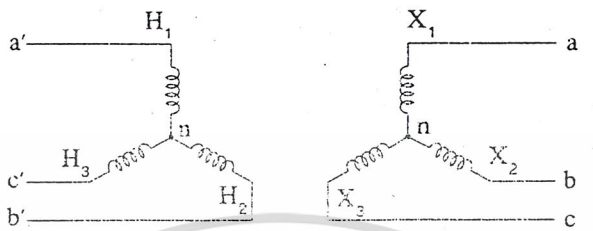
(ก) เทอมของขั้วลบ (ข) เทอมของขั้วบวก

รูปที่ 2.13 การกำกับเครื่องหมายเพื่อแสดงขั้วของหม้อแปลง

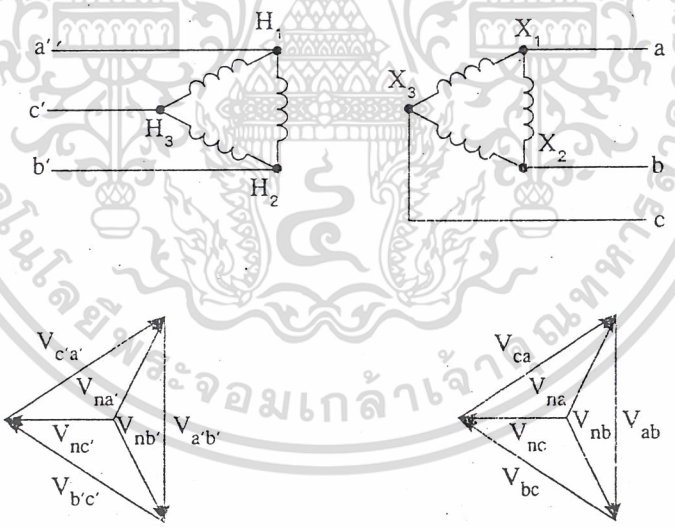
ในการตรวจสอบขั้วหม้อแปลงทำได้โดยการต่อขั้วด้านบน (ระหว่างขั้ว H และขั้ว X)เข้าด้วยกัน แล้วป้อนแรงดันที่ขดลวดด้านใดด้านหนึ่ง และวัดแรงดันระหว่างขั้วด้านล่างว่าแรงดันนี้จะเป็นผลบวก หรือผลต่างของขดลวด H และ X ตามรูปที่ 2.13 ก จะวัดได้เป็นผลต่างของแรงดันระหว่างขั้ว H_2 และ X_2 ดังนั้นจึงเป็นขั้วลบ ในทำนองเดียวกันแรงดันระหว่าง H_2 และ X_1 ของรูปที่ 2.13 ข จะวัดได้เป็นบวก

สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส ขั้วทางด้านแรงสูงจะกำกับด้วยเครื่องหมาย H_1,H_2 และ H_3 และขั้วทางด้านแรงต่ำกำกับด้วยเครื่องหมาย X_1,X_2 และ X_3 และสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบ วาย-วาย และแบบ เดลต้า-เดลต้า แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว H_1,H_2 และ H_3 จะมีเฟสเดียวกันกับแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว X_1,X_2 และ X_3 ตามลำดับ ดังแสดงตามรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) หม้อแปลงต่อขดลวดแบบวาย-วาย

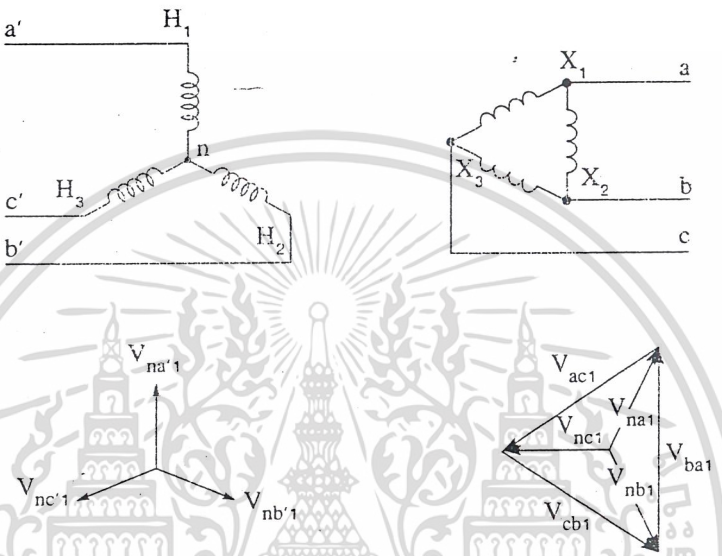


(ข) หม้อแปลงต่อขดลวดแบบเดลต้า-เดลต้า

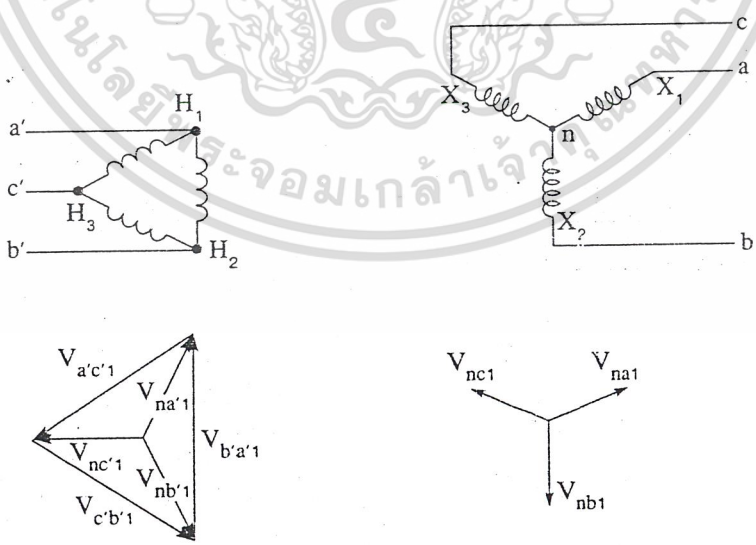
รูปที่2.14 เครื่องหมายมาตรฐานและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-วาย และแบบเดลต้า-เดลต้า โดยมีการเลื่อนเฟส = 0^{o}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหม้อแปลง 3 เฟสที่มีการต่อแบบวาย-เดลต้า และแบบเดลต้า-วาย จะมีแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว H_1,H_2 และ H_3 นำหน้าแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลของขั้ว X_1,X_2 และ X_3 ตามลำดับ เป็นมุม 30^O ดังแสดงในรูปที่15 และรูปที่ 2.16



รูปที่2.15 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้า ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30^O

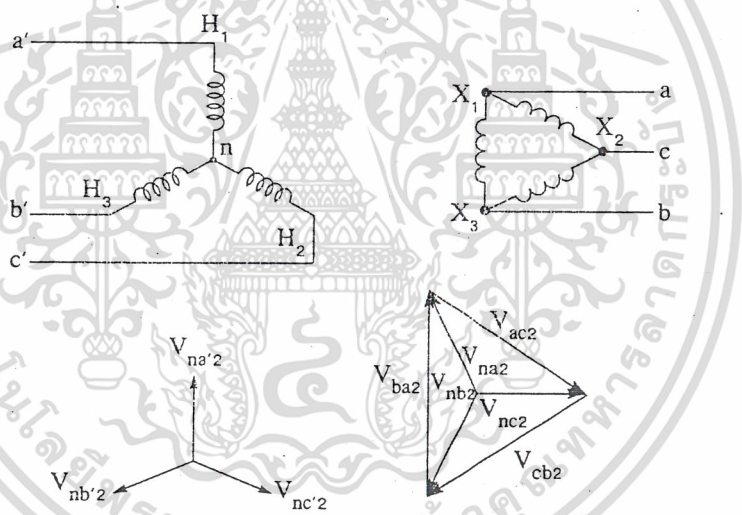


รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบเดลต้า-วาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30^{o}

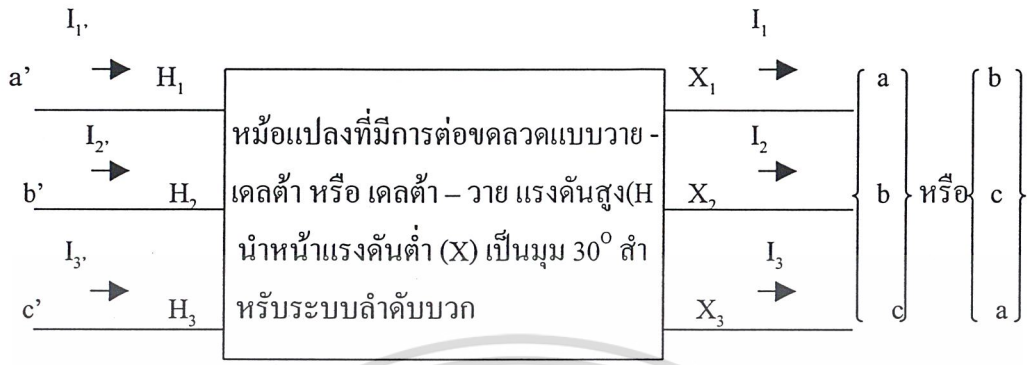
เรื่องของการเลื่อนเฟสนี้จะนำไปใช้ในการหากระแสฟอล์ตแบบไม่สมมาตร ถ้าทราบค่าของกระแสไลน์ทางด้านวายของหม้อแปลงที่ต่อแบบวาย-เดลต้า จะทำให้สามารถหาค่าของกระแสไลน์ทางด้านเดลต้าได้หลายวิธี ซึ่งวิธีหนึ่งก็โดยการใช้ส่วนประกอบสมมาตร โดยการเลื่อนเฟสแรงดันและกระแสลำดับบวกและลำดับลบด้วยมุมที่พอเหมาะ สำหรับแรงดันลำดับบวกมีการเลื่อนเฟสไป 30^{o} ดังในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ส่วนเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทางด้านแรงสูงและแรงต่ำของระบบลำดับลบได้แสดงในรูปที่ 2.17 ตามการใช้หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้าของรูปที่ 2.15 สำหรับไดอะแกรมของรูปที่ 2.17 ได้แสดงแรงดันสูงล้าหลังแรงดันต่ำเป็นมุม 30^{o} ในขณะที่แรงดันลำดับบวกตามรูปที่ 2.15 แรงดันสูงจะนำหน้าแรงดันต่ำเป็นมุม 30^{o}



รูปที่ 2.17 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับลบ สำหรับหม้อแปลงที่ต่อขดลวดแบบวาย-เดลต้าตามรูปที่ (ง)

จากการกำกับเฟสตามรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 คือ a' , b' และ c' สอดคล้องกับ H_1,H_2 และ H_3 และสำหรับ a , b และ c สอดคล้องกับ X_1,X_2 และ X_3 ซึ่งทางด้านแรงต่ำเราจะลำดับเฟสเป็น abc แต่เราก็สามารถเปลี่ยการลำดับเฟสเป็น bca ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 วิธีการสำหรับการกำกับเฟสทางด้านแรงต่ำของ
หม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-เดลต้าหรือเดลต้า-วาย

จากการใช้ความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ระหว่างด้านแรงสูงและแรงต่ำของหม้อแปลงที่กำกับเฟสเป็น a-b-c ตามรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.17 ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสลำดับบวกและลำดับลบตามรูปที่ 2.18 ดังนี้ (การกำกับเฟสด้านแรงต่ำเป็น a-b-c)

$$V_{na'1} = V_{na1}\angle 30^{O} \quad V_{nb'1} = V_{nb1}\angle 30^{O} \quad V_{nC'1} = V_{nC1}\angle 30^{O}$$

$$I_{a'1} = I_{a1}\angle 30^{O} \quad I_{b'1} = I_{b1}\angle 30^{O} \quad I_{C'1} = I_{C1}\angle 30^{O} \qquad \text{.....(2.34)}$$

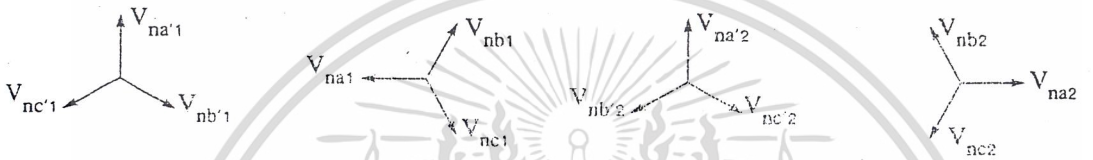
$$V_{na'2} = V_{na2}\angle -30^{O} \quad V_{nb'2} = V_{nb2}\angle -30^{O} \quad V_{nC'2} = V_{nC2}\angle -30^{O}$$

$$I_{a'2} = I_{a2}\angle -30^{O} \quad I_{b'2} = I_{b2}\angle -30^{O} \quad I_{C'2} = I_{C2}\angle -30^{O} \qquad \text{.....(2.35)}$$

การกำกับเฟสของไลน์ทางด้านแรงต่ำอาจเลือกใช้เป็น b-c-a เพื่อให้มีความง่ายต่อการคำนวณ กลับไปพิจารณาเฟสเซอร์ไดอะแกรมของรูปที่ 2.15 ที่มีการกำกับเฟสเป็น a-b-c ใหม่จะเห็นว่าเฟสเซอร์ของแรงดัน V_{nc1} จะนำหน้า $V_{na'1}$ เป็นมุม 90^{O} ดังนั้นเพื่อให้ง่ายขึ้นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{na'1}$ กับ V_{nc1} ของรูปที่ 2.15 เราจะใช้โอเปอเรเตอร์ –j แทน ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{nb'1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ V_{nb1} และ $V_{nC'1}$ กับ V_{nC1} ก็ใช้โอเปอเรเตอร์ –j ด้วยเช่นกัน เมื่อเป็นเช่นนี้ถ้าเราเปลี่ยนการกำกับเฟสของไลน์ด้านแรงต่ำของรูปที่ 2.18 จาก a-b-c เป็น c-b-a จะทำให้ได้เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวกใหม่ตามรูปที่ 2.19ก ส่วนเฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับลบสามารถหาได้จากการตรวจสอบรูปที่ 2.17 และแทน c ด้วย a ,b ด้วย c และ a ด้วย b ตามรูปที่ 2.19ข



(ก) เฟสเซอร์ลำดับบวก (ข) เฟสเซอร์ลำดับลบ

รูปที่ 2.19 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวกและลำดับลบตามการกำกับเฟสเป็น b-c-a ของรูปที่ 2.18

จากรูปที่ 2.19 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกระแสลำดับบวกและลำดับลบระหว่างด้านแรงสูงและแรงต่ำได้ดังนี้ (การกำกับเฟสด้านแรงต่ำเป็น b-c-a)

$$\left.\begin{aligned} &V_{na'1} = -jV_{na1} \quad V_{nb'1} = -jV_{nb1} \quad V_{nC'1} = -jV_{nC1} \\ &I_{a'1} = -jI_{a1} - \quad I_{b'1} = -jI_{b1} \quad I_{C'1} = -jI_{C1} \end{aligned}\right\} \quad \text{.....(2.36)}$$

$$\left.\begin{aligned} &V_{na'2} = jV_{na2} \quad V_{nb'2} = jV_{nb2} \quad V_{nC'2} = jV_{nC2} \\ &I_{a'2} = jI_{a2} \quad I_{b'2} = jI_{b2} \quad I_{C'2} = jI_{C2} \end{aligned}\right\} \quad \text{.....(2.37)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ลำดับของอิมพีแดนซ์และลำดับของวงจรไฟฟ้า (Sequence Impedances and Sequences Networks)

ในวงจรไฟฟ้าใด ๆ เมื่อมีกระแสลำดับบวกเพียงอย่างเดียวไหลผ่านอิมพีแดนซ์ เราจะเรียกอิมพีแดนซ์นี้ ดิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Positive sequence impedance) ในทำนองเดียวกัน เมื่อกระแสลำดับลบไหลผ่านก็จะเรียกว่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบ(Negative sequence impedance) และเมื่อกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์นี้ก็จะเรียกว่า อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Zero sequence impeadance)

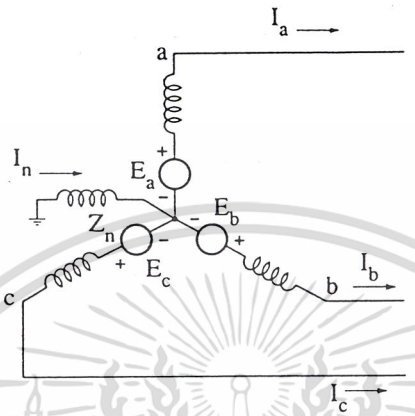
การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรด้วยระบบสมมาตรนั้น จะต้องหาส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมดุลที่ไหลในวงจร ส่วนประกอบของกระแสลำดับใดลำดับหนึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่มีลำดับเหมือนกับกระแสนั้น และจะเป็นอิสระต่อกระแสลำดับอื่น ๆ ในระบบที่สมดุลกระแสลำดับใดลำดับหนึ่งอาจพิจารณาให้ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจร ที่ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์กับกระแสลำดับนั้นเพียงอย่างเดียว วงจรสมมูลต่อเฟสที่ประกอบขึ้นด้วยอิมพีแดนซ์กับกระแสของลำดับใดลำดับหนึ่งเพียงอย่างเดียว เราจะเรียกวงจรสมมูลนี้ว่าเป็นลำดับของวงจรไฟฟ้า (Sequence Network) สำหรับลำดับนั้น ๆ ลำดับของวงจรไฟฟ้าจะรวมแรงดันเหนี่ยวนำใด ๆ ที่มีลำดับเหมือนกันเข้าไว้ด้วย และจะนำมาต่อเชื่อมเพื่อให้มีกระแส I_{a1} , I_{a2} และ I_{a0} ไหลผ่านวงจรตามเงื่อนไขของการเกิดฟอลต์แบบชนิดต่าง ๆ ดังนั้นการคำนวณหาผลของฟอลต์ด้วยการใช้วิธีการของส่วนประกอบสมมาตรจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาลำดับของอิมพีแดนซ์และนำมาต่อรวมกันเพื่อสร้างเป็นลำดับของวงจรไฟฟ้า

2.7.1 ลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโหลด

(Sequence Networks of Unloaded Generators)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จุดนิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์และไม่ได้ต่อโหลดไว้ ดังแสดงในรูปที่2.20 เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีกระแส I_a,I_bและ I_c ไหลในไลน์ a,bและ c ตามลำดับ ถ้าฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นเกี่ยวกับดินก็จะเกิดกระแส I_n ไหลเข้าจุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



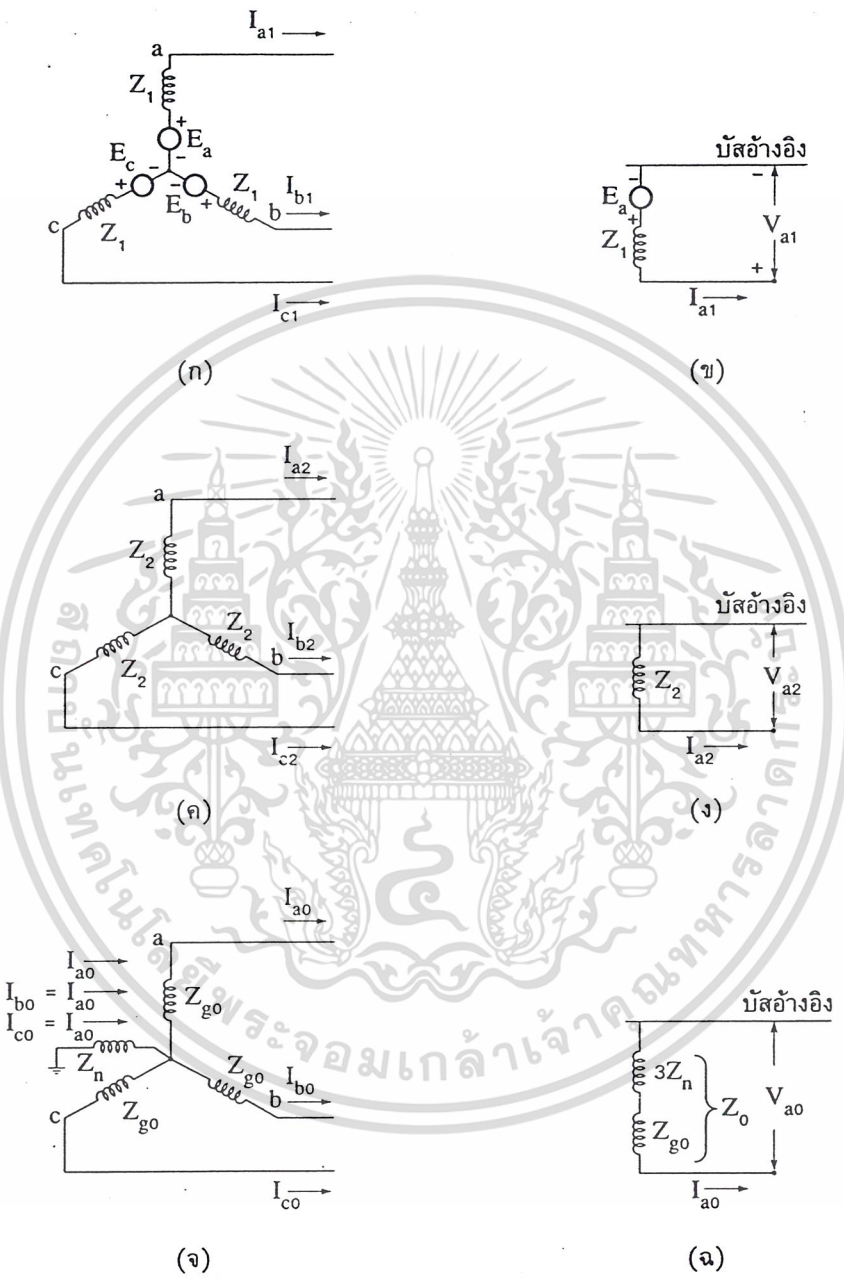
รูปที่ 2.20 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้ต่อโหลด และจุดนิวทรัลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกเตอร์แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสคือ E_a,E_bและ E_c

ลำดับวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเขียนได้ง่าย โดยมีแรงดันเหนี่ยวนำอยู่ในลำดับบวกเท่านั้น เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกแบบให้จ่ายแรงดันให้กับระบบ 3 เฟส สมดุล ดังนั้นลำดับของวงจรจะมีส่วนประกอบดังนี้

1. วงจรลำดับบวก (Positive Sequence Network)จะประกอบด้วยแรงดันเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. วงจรลำดับลบ (Negative Sequence Network) จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ลงจรลำดับศูนย์ (Zero Sequence Network) จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีส่วนประกอบของลำดับกระแสได้แสดงดังรูปที่ 2.21 กระแสลำดับใดก็จะจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่มีลำดับเหมือนกับกระแสนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การไหลของแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า (ก),(ค)และ (จ) แสดงการไหลของกระแสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับส่วน (ข),(ง)และ(ฉ)แสดงวงจรลำดับบวก ลำดับลบและลำดับศูนย์ตามลำดับ

ลำดับของวงจรไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.21 คือวงจรสมมูลต่อเฟสของวงจร 3 เฟสแบบสมดุลที่มีการพิจารณาการไฟลของส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมดุล แรดงดันเหนี่ยวนำในวงจรลำดับบวกคือ แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลที่ขั้วขณะที่ไม่มีโหลด ซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันทรานเซียนต์และซับทรานเซียนต์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟ้าขณะไม่มีโหลด สำหรับรีแอกแตนซ์ในวงจรลำดับบวกจะเป็น ซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนรีแอกแตนซ์ หรือซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ขึ้นอยู่กับว่าขณะที่ศึกษานั้นวงจรอยู่ในเงื่อนไขของสถานะซับทรานเซียนต์ ทรานเซียนต์ หรือสภาวะอยู่ตัว

บัสอ้างอิง (Reference bus) สำหรับวงจรลำดับบวกและลำดับลบก็คือ จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้ามีการต่อเชื่อมระหว่างจุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับดินก็จะมีส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Zn ที่ต่อระหว่างจุดนิวทรัลกับดิน คือ 3 Iao จากรูปที่ 2.21 (จ) จะเห็นได้ว่า แรงดันตกคร่อมของลำดับศูนย์จากจุด a กับดินคือ

$$-3I_{ao}Z_n - I_{ao}Z_{go}$$

เมื่อ Z_{go} คือ อิมพีแอนซ์ลำดับศูนย์ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรลำดับศูนย์จะต้องมีกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ $3Z_n + Z_{go}$ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.21(ฉ) ดังนั้นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวมที่มีกระแส I_{ao}(เป็นกระแสต่อเฟส) ไหลผ่านก็คือ.

$$Z_o = 3Z_n + Z_{go} \qquad \text{.....(2.38)}$$

โดยทั่วไปการเขียนสมการสำหรับลำดับของวงจรไฟฟ้า จะใช้ส่วนประกอบของแรงดันและกระแสในเฟส a สมการสำหรับส่วนประกอบของแรงดันตกคร่อมจากจุด a กับบัสอ้างอิง (หรือดิน) ดูรูป 2.21 ประกอบ

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \qquad \text{.....(2.39)}$$

$$V_{a2} = I_{a2}Z_2 \qquad \text{.....(2.40)}$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 \qquad \text{.....(2.41)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

E_a คือ แรงดันขณะไม่มีโหลดลำดับบวกเป็นแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัล

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับบวก

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับลบ

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม

สมการข้างต้นนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ที่มีกระแสไม่สมดุลไหลในวงจร และสามารถใช้กับกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่อยู่ภายใต้สภาวะอยู่ตัว แต่เมื่อคำนวณในสภาวะทรานเซียนต์หรือซับทรานเซียนต์ สามารถใช้สมการเหล่านี้ได้โดยการแทน E_a ด้วย E_g' หรือ E_g"

2.8 วงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบ (Positive and Negative sequence Networks)

จุดมุ่งหมายของการทราบค่าลำดับอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังก์เพื่อนำไปสร้างลำดับของวงจรไฟฟ้าให้เป็นระบบที่สมบูรณ์ ซึ่งในวงจรไฟฟ้าลำดับใดก็จะแสดงการไหลของกระแสลำดับนั้นในระบบ การเปลี่ยนวงจรไฟฟ้าลำดับบวกให้เป็นวงจรไฟฟ้าลำดับลบนั้นสามารถทำได้ง่ายด้วยเหตุที่ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและมอเตอร์ 3 เฟส จะมีแรงดันเหนี่ยวนำภายในเป็นแรงดันลำดับบวกเพียงอย่างเดียว เพราะว่าได้ออกแบบมาเพื่อผลิตแรงดันที่สมดุล เมื่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบของระบบสมมาตรมีค่าเท่ากันทำให้การเปลี่ยนวงจรไฟฟ้าลำดับบวกให้เป็นวงจรไฟฟ้าลำดับลบได้โดยการตัดส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำออก

เมื่อมีกระแส 3 เฟสสมดุลไหลในระบบไฟฟ้า จะทำให้จุดนิวทรัลทุกจุดของระบบสมมาตร 3 เฟส มีศักย์ไฟฟ้า (Potential) เท่ากัน จุดนิวทรัลทั้งหมดนี้จะต้องมีศักย์ไฟฟ้าเดียวกันสำหรับกระแสลำดับบวกและลำดับลบ ดังนั้นจุดนิวทรัลของระบบสมมาตร 3 เฟส จะใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับการกำหนดแรงดันตกคร่อมทั้งลำดับบวกและลำดับลบ และเป็นบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ (Zero Sequence Networks)

2.9.1 วงจรที่มีการต่อแบบวายโดยนิวทรัลไม่ต่อลงดินหรือไม่ต่อกับจุดนิวทรัลอื่น ๆ ในวงจร (Wye Connection Ungrounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะทำให้ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าไปยังจุดนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์เมื่อผลรวมของกระแสเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์ เสมือนว่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อระหว่างนิวทรัลกับดินมีค่าสูงมากจึงทำให้กระแสที่จะไหลไปสู่ดินมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์สามารถเขียนได้โดยการเปิดวงจรระหว่างจุดนิวทรัลของวงจรที่ต่อแบบวายกับบัสอ้างอิง (อิมพีแดนซ์ระหว่านิวทรัลกับดิน = ∞) ดังแสดงในรูปที่ 2.22

รูปที่ 2.22 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลไม่ต่อลงดิน

2.9.2 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อลงดินโดยตรง (Wye Connection Solidly Grounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะทำให้จุดนิวทรัลกับบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ต่อถึงกันโดยตรง (อิมพีแดนซ์ = 0) ดังแสดงในรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.23 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อลงดินโดยตรง

2.9.3 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวทรัลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน

(Wye Connection Impedance Grounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้ทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์มีอิมพีแดนซ์ $3Z_n$ ต่ออยู่ระหว่างจุดนิวทรัลกับบัสอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 2.24

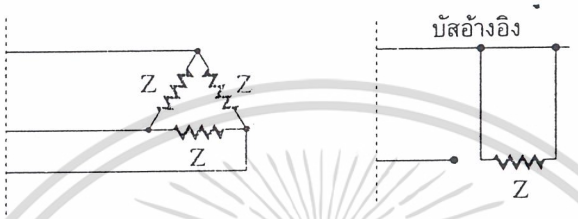
รูปที่ 2.24 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย
โดยนิวทรัลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน

2.9.4 วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า (Delta Connection)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะไม่มีเส้นทางการไฟลของกระแสลำดับศูนย์ในไลน์เพราะไม่มีการต่อลงดิน ดังนั้นจึงถือว่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าสูงมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่ต่อแบบเดลต้ามีการเปิดวงจรทางด้านเดลต้า แต่อีกด้านหนึ่งของการเปิดวงจรนี้จะมีการต่อระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ตัวเอง Z กับบัสอ้างอิง เพื่อเป็นการบ่งบอกว่าอาจเป็นไปได้ที่เกิดกระแสลำดับศูนย์หรือโดยการเหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายภายนอก วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้ากับวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ได้แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า

2.10 ลำดับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (Sequence Impedance of Transformers)

หม้อแปลง 3 เฟส อาจมีโครงสร้างของหม้อแปลงได้ 2 ประเภท คือ

1. หม้อแปลง 3 เฟสที่มีโครงสร้างของการแบงก์หม้อแปลง 1 เฟส จำนวน 3 ลูกที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ
2. หม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างให้เป็นหม้อแปลง 3 เฟส โดยมีขดลวดทั้ง 3 ติดตั้งร่วมอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน

หม้อแปลงมีอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบเหมือนกัน สำหรับอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์จะมีความแตกต่างไปจากอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบเพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติจะถือว่าอิมพีแดนซ์ทั้งลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์มีค่าเท่ากัน ดังสมการ

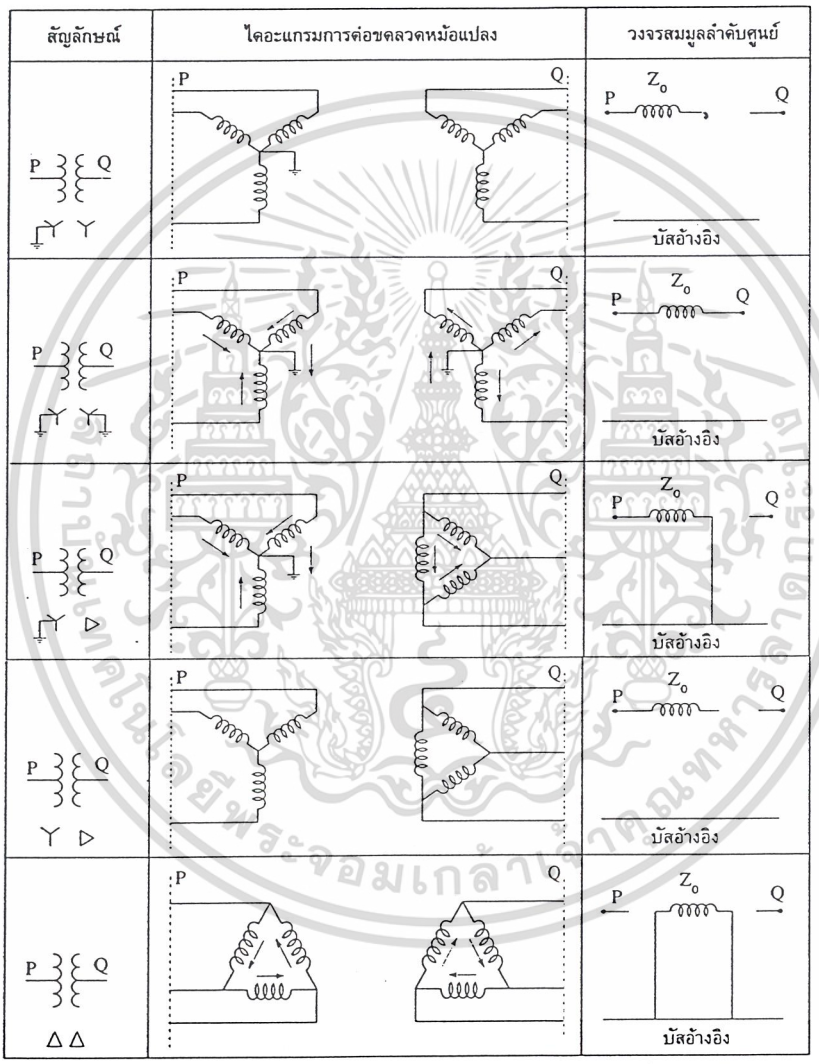
$$Z_o = Z_1 = Z_2 = Z_{tx}$$

เมื่อ Z_{tx} คืออิมพีแดนซ์ลัดวงจร (short circuit impedance) ของหม้อแปลง

สำหรับวงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ เนื่องจากการต่อขดลวดหม้อแปลงทั้งขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำในรูปแบบของวายและเดลต้าสามารถทำได้หลายกรณี ซึ่งจะทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยทั่วไปการพิจารณาการต่อขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงจะมี 5 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.26 สำหรับลูกศรในไดอะแกรมการต่อขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Connection diagram) แสดงเส้นทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ และถ้าไม่ปรากฏลูกศรในไดอะ-แกรมก็แสดงว่าไม่มีกระแสลำดับศูนย์ไหล



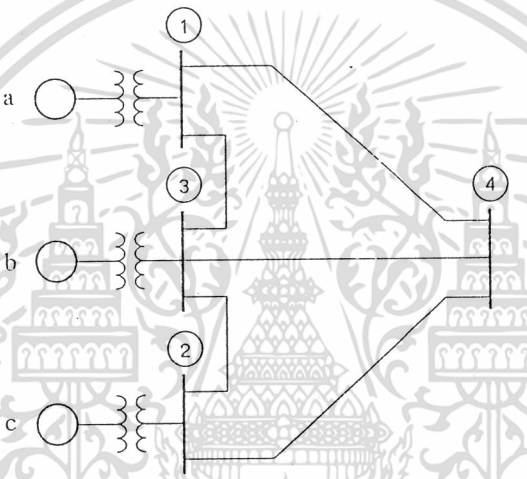
รูปที่2.26 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของชุดหม้อแปลง 3 เฟส ที่ประกอบด้วยไดอะแกรมการต่อขดลวดและสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพเส้นเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

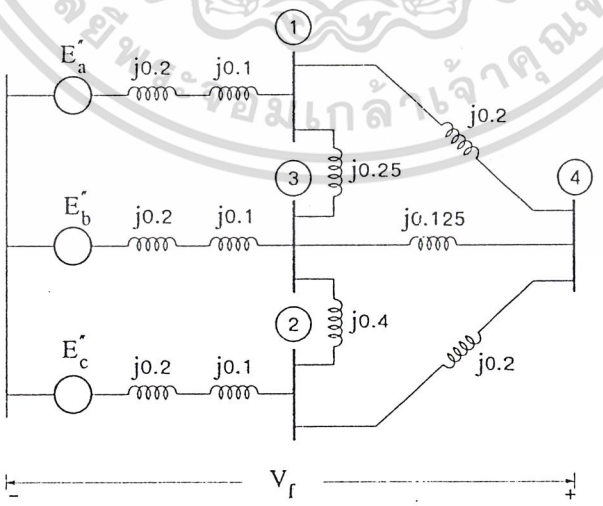
2.11 การคำนวณกระแสฟอลต์ด้วยบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

(Fault Calculation by The Bus Impedance Matrix)

โดยทั่วไปการศึกษาฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้วิธีการของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Z_{bus}) มาแก้ปัญหาเพื่อหากระแสฟอลต์ จากระบบตามรูปที่ 2.27 เมื่อเราแทนค่าซับทรานเซียนต์รีแอกเตอร์และแรงดันซับทรานเซียนต์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้เป็นวงจรตามรูปที่ 2.28 ซึ่งวงจรไฟฟ้านี้จะเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟส (single-phase equivalent circuit) ของระบบ 3 เฟส



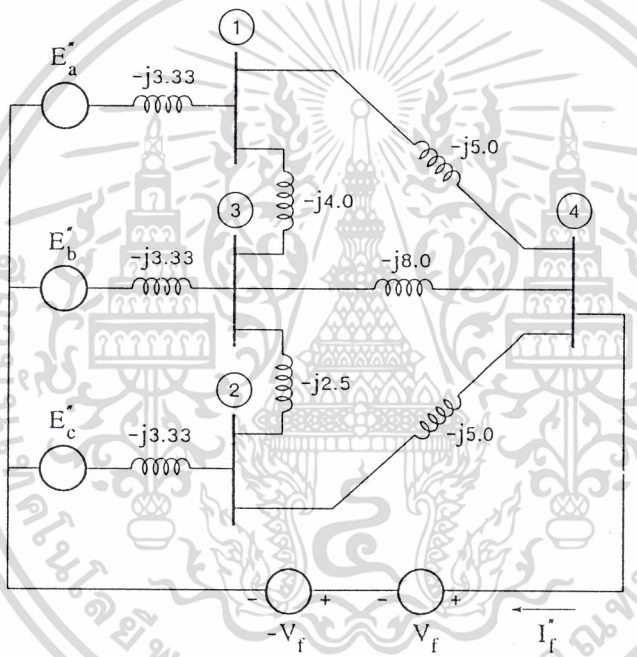
รูปที่ 2.27 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.28 วงจรไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 2.27 ที่แสดงซับทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์เป็นค่าเปอร์ยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษานี้จะเลือกให้เกิดฟอลต์ขึ้นที่บัสที่4ซึ่งเราสามารถดำเนินขั้นตอนโดยให้แรงดันก่อนเกิดฟอลต์ที่บัส 4 คือ V_f การเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุล ที่บัส 4 จะจำลองโดยวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 2.29 ด้วยการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต ตามรูป2.28 ให้เป็นค่าแอดมิตแตนซ์เปอร์ยูนิต ส่วนเหตุที่นำV_fและ–V_fมาต่ออนุกรมกันเพื่อให้แรงดันมีค่าเป็นศูนย์เสมือนว่าเป็นการลัดวงจรจึงทำให้มีกระแสฟอลต์ซับทรานเซียน $I_f^{"}$ ไหล



รูปที่2.29 วงจรไฟฟ้าของรูปที่ 2.28 ที่เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตเป็นแอดมิตแตนซ์เปอร์ยูนิต และเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุล ที่บัส4 ของระบบซึ่งจำลองโดยการต่อ V_f อนุกรม $-V_f$

จากรูปที่ 2.29 ถ้าทำการลัดวงจรแหล่งจ่าย $E_a^{"}$, $E_b^{"}$, $E_C^{"}$ และ V_f ดังนั้นจะเหลือแหล่งจ่าย $-V_f$ เพียงแหล่งจ่ายเดียว ที่จะจ่ายกระแส $I_f^{"}$ ไหลเข้าบัสที่ 4 (ปกติ $I_f^{"}$ ไหลออกจากบัสที่ 4)โดยการใช้วิธีการตรวจพินิจสามารถเขียนสมการโหนดสำหรับวงจรไฟฟ้าที่มี $-V_f$ เพียงแหล่งจ่ายเดียวให้อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_f'' \end{pmatrix} = j \begin{pmatrix} -12.33 & 0.0 & 4.0 & 5.0 \\ 0.0 & -10.83 & 2.5 & 5.0 \\ 4.0 & 2.5 & -17.83 & 8.0 \\ 5.0 & 5.0 & 8.0 & -18.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{V_1} \\ \hat{V_2} \\ \hat{V_3} \\ -V_f \end{pmatrix} \quad \text{.....(2.42)}$$

เมื่อตัวยก ^ (superscript ^) เป็นสิ่งที่ใช้บอกว่าแรงดันที่บัสจะมีผลกระทบ เนื่องจากแรงดัน $-V_f$ เพียงอย่างเดียวและที่เลือกเครื่องหมาย ^ เพื่อแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเนื่องมาจากฟอลต์ จากสมการ 2.42 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการทั่วไปคือ

$$I = Y_{bus} V$$

เมื่อทำการอินเวิร์สบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ Y_{bus} ของสมการที่ 2.42จะได้บัสอิมพีแดนซ์ - เมทริกซ์ และแรงดันที่บัสเนื่องจากแรงดัน $-V_f$ คือ

$$\begin{pmatrix} \hat{V_1} \\ \hat{V_2} \\ \hat{V_3} \\ -V_f \end{pmatrix} = Z_{bus} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_f'' \end{pmatrix} \quad \text{.....(2.43)}$$

ดังนั้น

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{44}} \quad \text{.....(2.44)}$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1^{\Lambda} = -I_f^{"} Z_{14} = -\frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_f \qquad \text{.....(2.45)}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_2^{\Lambda} = -\frac{Z_{24}}{Z_{44}} V_f \qquad \text{.....(2.46)}$$

$$V_3^{\Lambda} = -\frac{Z_{34}}{Z_{44}} V_f \qquad \text{.....(2.47)}$$

เมื่อทำการลัดวงจรแหล่งจ่าย $-V_f$ ดังนั้นวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 2.29 จะปรากฏแรงดันของแหล่งจ่าย $E_a^{"}$, $E_b^{"}$, $E_C^{"}$ และ V_f ทำให้มีแรงดันและกระแสในทุกส่วนของวงจรก่อนเกิดฟอลต์ โดยหลักการทับซ้อน (Superposition) จะมีการเพิ่มแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ด้วยแรงดันตามสมการที่(2.45) ถึง (2.46) ทำให้สามารถหาแรงดันหลังจากการเกิดฟอลต์ได้ ซึ่งโดยปกติจะสมมติให้วงจรไฟฟ้าไม่มีโหลด จึงไม่มีกระแสไหลก่อนเกิดฟอลต์ และแรงดันทั้งหมดของวงจรไฟฟ้านี้จะเหมือนกันหมดและมีค่าเท่ากับ V_f ด้วยสมมติฐานดังกล่าวนี้ทำให้สามารถพิจารณาและประยุกต์หลักการทับซ้อนของวงจรไฟฟ้าเพื่อหาค่าแรงดันหลังเกิดฟอลต์ (postfault voltage) ที่บัสต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} V_1 &= V_f + V_1^{\hat{}} = V_f - I_f^{"} Z_{14} \\ V_2 &= V_f + V_2^{\hat{}} = V_f - I_f^{"} Z_{24} \\ V_3 &= V_f + V_3^{\hat{}} = V_f - I_f^{"} Z_{34} \\ V_4 &= V_f - V_f - 0 \end{aligned} \qquad \text{.....(2.48)}$$

ถ้าไม่มีพิจารณากระแสก่อนเกิดฟอลต์ สมการทั่วไปที่ใช้สำหรับหากระแสเมื่อเกิดฟอลต์ที่บัส k คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{kk}} \qquad \text{.....(2.49)}$$

และแรงดันหลังเกิดฟอลต์ที่บัส n คือ

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f \qquad \text{.....(2.50)}$$

ถ้าเราใช้ค่าตัวเลขของสมการที่ (2.42) และทำการอินเวิร์สเมทริกซ์ Y_{bus} ของสมการนี้จะได้ Z_{bus} ดังนี้

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.1488 & 0.0651 & 0.0864 & 0.0978 \\ 0.0651 & 0.1554 & 0.0799 & 0.0967 \\ 0.0864 & 0.0798 & 0.1341 & 0.1058 \\ 0.0978 & 0.0967 & 0.1058 & 0.1566 \end{bmatrix}$$

ตามปกติแรงดัน V_f จะให้มีค่าเท่ากับ $1.0/\underline{0^o}$ pu ดังนั้นเราสามารถหากระแสและแรงดันตามที่ได้จำลองให้เกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุลขึ้นที่บัสที่ 4 ดังนี้

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{44}} = \frac{1.0}{j0.1566} = -j6.386\text{pu}$$

$$V_1 = V_f - \frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_f = 1 - \frac{j0.978}{j0.1566} = 0.3755\text{pu}$$

$$V_2 = V_f - \frac{Z_{24}}{Z_{44}} V_f = 1 - \frac{j0.967}{j0.1566} = 0.3825\text{pu}$$

$$V_3 = V_f - \frac{Z_{34}}{Z_{44}} V_f = 1 - \frac{j0.1058}{j0.1566} = 0.3244\text{pu}$$

กระแสที่ไหลส่วนต่าง ๆ ของระบบสามารถหาได้จากแรงดันและอิมพีแดนซ์ เช่น กระแสฟอลต์ที่ไหลในบรานซ์ที่ต่อระหว่างบัส 1 และบัส 3 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_f'' = \frac{V_1 - V_3}{\text{อิมพีแดนซ์ระหว่างบัสที่ 1 และ 3}}$$

$$= \frac{0.3755 - 0.3244}{j0.25} = -j0.2044\text{pu}$$

และกระแสที่ไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับบัสที่ 1 คือ

$$I_a'' = \frac{E_a'' - V_1}{j0.3}$$

$$= \frac{1.0 - 0.3755}{j0.3} = -j2.0817\text{pu}$$

สำหรับกระแสในบรานซ์อื่น ๆ ก็นสามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่บัสใดๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังก็ตาม เราสามารถคำนวณหากระแสและแรงดันได้ง่ายและสะดวกโดยการใช้บัสอิมพีแดนซ์

2.12 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร

ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนมากแล้วจะเป็นฟอล์ตแบบไม่สมมาตรหรือแบบสมดุล ซึ่งฟอลต์ประเภทนี้ประกอบด้วย

1. การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (unsymmetrical short circuit) เป็นการลัดวงจรของตัวนำนอกเหนือจากการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล
2. ฟอลต์แบบไม่สมมาตรผ่านอิมพีแดนซ์ (unsymmetrical fault through impedance) ฟอลต์ส่วนมากที่เกิดขึ้นบนวงจรของสายส่งมักเป็นฟอลต์ระหว่างตัวนำกับดิน
3. สายตัวนำขาดออกจากกัน (open conductor) เมื่อวงจรของระบบไฟฟ้าควบคุมด้วยฟิวส์หรืออุปกรณ์ใด ๆ ที่ไม่สามารถเปิดวงจรพร้อมกันทั้ง 3 เฟส โดยฟิวส์เฟสหนึ่งหรือสองเฟสอาจจะขาดและเปิดวงจรแต่ในขณะที่ฟิวส์เหลืออีกเฟสหนึ่งยังไม่ขาด

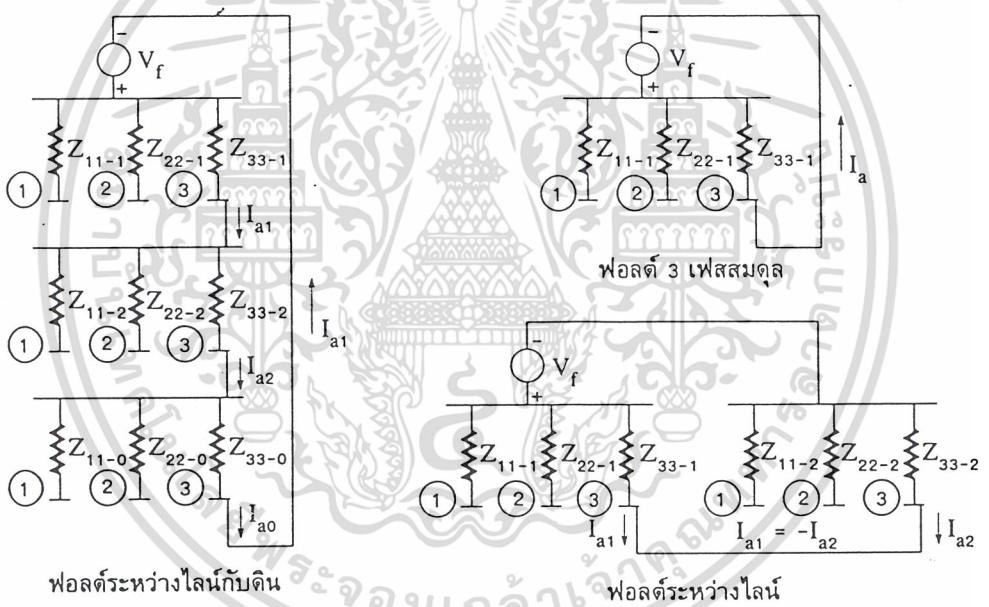
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอลต์แบบไม่สมมาตรเป็นต้นเหตุให้กระแสที่ไหลในระบบไม่สมดุล ดังนั้นวิธีการของส่วนประกอบสมมาตรจึงมีประโยชน์อย่างมากเมื่อนำมาวิเคราะห์หากระแสและแรงดันในทุกส่วนของระบบหลังจากได้เกิดฟอลต์ขึ้น

2.12.1 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรด้วยการใช้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

(Unsymmetrical Faults Analysis By Using Bus Impedance Matrix)

การใช้อิมพีแดนซ์เมทริกซ์จะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ลำดับบวกในการหาฟอลต์แบบ 3 เฟสสมดุลสามารถนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์การหาฟอลต์แบบไม่สมดุลได้ โดยการเพิ่มวงจรไฟฟ้าลำดับลบและลำดับศูนย์ และแทนลำดับอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในรูปของบัสอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การต่อของบัสอิมพีแดนซ์สมมูลตามลำดับวงจรของระบบ 3 เฟส สำหรับจำลองการเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.30 การต่อวงจรของบัสอิมพีแดนซ์สำหรับระบบไฟฟ้า 3 บัส และตัวห้อง 1,2และ3 ของอิมพีแดนซ์ Z ที่เพิ่มเข้ามาก็เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงลำดับวงจรไฟฟ้าของบัสอิมพีแดนซ์ ถ้าเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินที่ บัส จากรูปที่ 2.30 จะได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_{33-1} + Z_{33-2} + Z_{33-0}} \qquad \text{.....(2.51)}$$

2.13 การคำนวณหากระแสลัดวงจร

2.13.1 รายละเอียดของการคำนวณหากระแสลัดวงจร

โดยปกติทั่ว ๆ ไปการหากระแสลัดวงจรจะมาจาก I = E / Z หรือ I = E / X

โดยที่

E คือแรงดันไฟฟ้า

Z หรือ X คือค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดลัดวงจร

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร ซึ่งจะรวมไปถึงการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกี่ยวข้องจากจุดที่เกิดการลัดวงจรจึงถึงแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระแสลัดวงจร คือ

1. ขั้นตอนการคำนวณ (Step - by - step procedure) เป็นการพิจารณาการคำนวณหากระแสลัดวงจรในระบบที่ง่าย ๆ โดยจะประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนได้แก่

1.1 เตรียมวันไลน์ไดอะแกรม

1.2 หาตำแหน่งที่เกิดการผิดปกติและวิเคราะห์ถึงลักษณะการผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นพื้นฐานต่อไปในการที่จะเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ โดยจะพิจาณาถึงระบบที่มีอยู่และจำนวนของบัสบาร์ในระบบ

1.3 เตรียมการจากวันไลน์ไดอะแกรมและนำไปหาอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมในระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 600 โวลต์ ถ้าจะพิจาณาถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้จะต้องคำนึงถึงอินเตอร์รับติ้งและโมเมนทารีดิวตี้ด้วย ซึ่งจะต้องพิจารณาค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรไฟฟ้ามาประกอบการคำนวณเพื่อที่จะหากระแสลัดวงจรต่อไป

1.4 แก้ปัญหาการเกิดการผิดปกติ โดยพิจารณาจากตำแหน่งที่เกิดการผิดปกติและเงื่อนไขของระบบไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งจะสามารถหากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้จาก E / Z หรือ E / X

2. เขียนอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมของระบบเพื่อที่จะใช้คำนวณหากระแสลัดวงจร โดยจะต้องประกอบกับวันไลน์ไดอะแกรม

3. ค่าอิมพีแดนซ์ (Component impedance value) ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 โอห์ม / เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เปอร์เซ็นต์บนพิกัด KVA หรือเทียบกับ KVA เบส

3.3 เพอร์ยูนิตบน KVA เบส

4. ค่าความต้านทานที่ตัดทิ้ง (neglect resistance) ในระบบไฟฟ้าทั่ว ๆ ไปวงจรไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ Z โดยค่า Z นี้จะต้องประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน R และ ค่ารีแอกแตนซ์ X

2.13.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยวิธีเฟอร์ยูนิต

การคำนวณกระแสลัดวงจรโดยวิธีเพอร์ยูนิตนี้มีขั้นตอนในการคำนวณ 7 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. เขียนวันไลน์ไดอะแกรม แสดงแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจรทั้งหมดและค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดของวงจร ซึ่งในวันไลน์ไดอะแกรมจะต้องประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ ซิงโครนัสมอเตอร์ และค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ารีแอกแตนซ์ เคเบิลบัส เซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นต้น
2. เลือกฐานของ KVA ตามความเหมาะสม เช่น 1000,10,000 หรือ 100,000 เป็นต้น
3. กำหนดรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ และเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ให้อยู่ในค่าของเพอร์ยูนิต
4. เขียนรีแอกแตนซ์ไดอะแกรมแทนอุปกรณ์ทั้งหมด โดยเปลี่ยนจากวันไลน์ไดอะ แกรมมาเป็นรีแอกแตนซ์ไดอะแกรม
5. รวมค่ารีแอกแตนซ์ต่าง ๆ ให้เหลือเพียงค่าเดียว เพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรและ KVA ที่จุดเกิดการผิดปกติ
6. หาค่ากระแสลัดวงจรแบบสมมาตรหรือ KVA
7. หาค่ากระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตร หรือ KVA โดยใช้ค่าตัวคูณ

หลักการในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรจะต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

1. อิมพีแดนซ์ที่ถูกพิจารณา ในหลักการคำนวณหากระแสลัดวงจรนั้นจะต้องรู้ข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในวงจรทั้งหมด และจะต้องทำค่าเหล่านั้นให้ไปสู่ค่าเพอร์ยูนิตและทำการรวมเพอร์ยูนิตที่ได้โดยการยุบแบบวงจรขนานหรือวงจรอนุกรม ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถหาได้จากบริษัทผู้ผลิต และในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร อาจจะพิจารณาเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียวก็ได้ (ยกเว้นพวกสายเคเบิล สายเปลือย บัสบาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ค่า X/R ในวงจรมีค่ามากกว่า 5 แล้ว การพิจารณาเฉพาะค่า X เพียงอย่างเดียวในวงจรนั้น จะไม่ต้องกังวลถึงค่าความผิดพลาดเลย เพราะการหาหากระแสลัดวงจรในกรณีพิจารณาแต่เพียงค่า X อย่างจะได้ค่ามากกว่าถ้าพิจารณาทั้งค่า R และ X

2. ปริมาณเพอร์ยูนิตบนเบสที่เลือก ในระบบเพอร์ยูนิตจะมีค่าเบสอยู่ 4 ค่า คือ กำลังเบส (KVA) แรงดันเบส (V) อิมพีแดนซ์เบส (Ω) กระแสเบส (A) ความสัมพันธ์ระหว่างเบส (เพอร์ยูนิต) และปริมาณค่าจริง (actual quantities) คือ

$$\text{ค่าเพอร์ยูนิต} = \frac{\text{ปริมาณค่าจริง}}{\text{ค่าเบสที่พิจารณา}}$$

$$\text{ปริมาณค่าจริง} = \text{ค่าเพอร์ยูนิต X ค่าเบสที่พิจารณา}$$

โดยทั่ว ๆ ไปจะเลือกค่ากำลังเบส (KVA) ส่วนค่าแรงดันเบสจะพิจารณาที่แต่ละระดับแรงดันไฟฟ้า และจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรอบของหม้อแปลง โดยปกติค่ากำลังเบสที่นิยมใช้คือ 10,000 KVA ส่วนแรงดันเบสจะใช้ค่าแรงดันไลน์ (KV)

$$I_b = \frac{KVA_b}{\sqrt{3}KV_b}$$

$$Z_b = \frac{KV_b x1000}{\sqrt{3}I_b} = \frac{(KV_b)^2 x1000}{KVA_b} = \frac{(KV_b)^2}{MVA_b} \quad \text{.....(2.52)}$$

โดยที่

I_b	คือ	กระแสเบส (A)
KV_b	คือ	แรงดันเบส (KV) เป็นค่าไลน์ (Line – to – line)
KVA_b	คือ	กำลังเบส (KVA)
MVA_b	คือ	กำลังเบส (MVA)
Z_b	คือ	เบสอิมพีแดนซ์ (โอห์ม / เฟส)
		(ส่วนมากค่าอิมพีแดนซ์จะแสดงในค่าของรีแอกแตนซ์ : X_b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรโดยมากจะเป็นค่าจริงและมีหน่วยเป็นโอห์ม หรือเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัด นอกจากนี้สายตัวนำจะมีหน่วยเป็นโอห์ม ดังนั้นจึงพอที่จะสรุปได้ว่า

$$X_{pu} = \frac{X_a x KVA_b}{1000 KV_b^2}$$

$$X_{pu} = \frac{X\% x KVA_b}{100 x KVA_e}\left(\frac{KV_e}{KV_b}\right)^2 \qquad \text{.....(2.53)}$$

$$X_{pu} = \frac{X_{PUe} x KVA_b}{KVA_e}\left(\frac{KV_e}{KV_b}\right)^2$$

โดยที่ Xpu คือ ค่าเพอร์ยูนิตรีแอกแตนซ์ในกรณีที่เลือก KVA เป็นเบส

Xpue คือ ค่าเพอร์ยูนิตรีแอกแตนซ์ใน KVA พิกัด

Xa คือ ค่ารีแอกแตนซ์จริง (โอห์ม)

X% คือ เปอร์เซนต์รีแอกแตนซ์ในกรณีอ้างอิงพิกัด KVA

KVAe คือ พิกัดกำลังจริง (KVA)

Kve คือ พิกัดแรงดัน (KV)

3. อิมพีแดนซ์ไดอะแกรม ขั้นตอนที่จะต้องเริ่มทำ คือ เปลี่ยนค่าจากวันไลน์ไดอะแกรมไปยังอิมพีแดนซ์ไดอะแกรม หรือไดอะแกรม โดยที่อิมพีแดนซ์ไดอะแกรมนี้จะหมายถึงค่า R หรือ X หรือทั้ง R,X ก็ได้ ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ไดอะแกรมนี้จะนิยมใช้เนื่องจากพิจารณา X เพียงอย่างเดียว หลังจากได้รีแอกแตนซ์ไดอะแกรมแล้วก็รวมค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทานไปยังจุดที่เกิดการผิดปกติ

4. การหาค่ากระแสลัดวงจร กระแสลัดวงจรนี้โดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะพิจารณาจาก

ก. ซิมเมตริคอลเรตเตดฟิวส์ (symmetrically rated Fuse) และเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ (Low voltage circuit breaker)

ข. อะซิมเมตริคอลเรตเตดฟิวส์ (asymmetrically rated Fuse)

ค. อุปกรณ์รีเลย์ (relaying device)

โดยที่กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จะเกี่ยวข้องกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่าสูงสุดในไซเคิลแรก (Maximum first cycle)
2. ค่าสูงสุดในช่วง 30 ไซเคิล (maximum approximately 30 cycle)
3. ค่าต่ำสุดในช่วง 30 ไซเคิล (minimum approximately 30 cycle)

ค่าอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมที่ใช้สำหรับหาค่าดังกล่าวข้างบนนี้จะแตกต่างกันบ้างก็จะเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของพวกเครื่องจักรไฟฟ้าและการต่อ

1. Maximum first-cycle duties for symmetrically fuses and low voltage-circuit breaker ในวงจรที่จะใช้คำนวณค่ากระแสลัดวงจรจะใช้ของซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์ทุก ๆ เครื่องจักรไฟฟ้าที่มีในวงจร กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จะนำมาพิจารณาหาค่าของฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ

2. First cycle duties for asymmetrically rated fuses โดยปกติส่วนมากค่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันจะกล่าวถึงค่ากระแสที่เป็น RMS และกระแสนี้ส่วนมากจะเป็นกระแสลัดวงจรชนิดสมมาตร ดังนั้นในกรณีที่จะหาขนาดของฟิวส์ที่ช่วงไม่สมมาตรในไซเคิลแรกก็จะนำค่าตัวคูณมาคูณกับกระแสสมมาตรนั่นเอง

3. อุปกรณ์รีเลย์ ค่ากระแส RMS ของกระแสลัดวงจรที่ไซเคิลแรก ๆ หลักจากเกิดการลัดวงจรขึ้นนั้น จะนำไปหาค่าสูงสุดของการปรับของอินสแตนทีเนียสรีเลย์ (instantaneous relay) ค่าตัวคูณที่จะใช้เพื่อจะหาค่ากระแสที่อะซิมเมตริคอลเฟิร์สไซเคิล (asymmetrical first cycle) คือ 1.6 ดังนั้น

$$I_{IC} = 1.6\frac{V_{pu}}{X_{pu}}I_b \qquad \text{.....(2.54)}$$

โดยที่ I_{IC} คือ กระแสไม่สมมาตรในไซเคิลแรก

PU คือ ค่าเพอร์ยูนิต

สำหรับในกรณีที่จะพิจารณารีเลย์หน่วงเวลา (time delay relay) นั้นซึ่งอุปกรณ์ป้องกันตัวนี้จะทำงานเมื่อเกิน 6 ไซเคิลไปแล้ว ซึ่งในลักษณะเช่นนี้ค่าในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสเตติกอิควิปเมนต์ (static equipment) จะเป็นค่าทรานเซียนต์อิมพีแดนซ์ ส่วนมอเตอร์จะไม่นำมาพิจารณาเลย

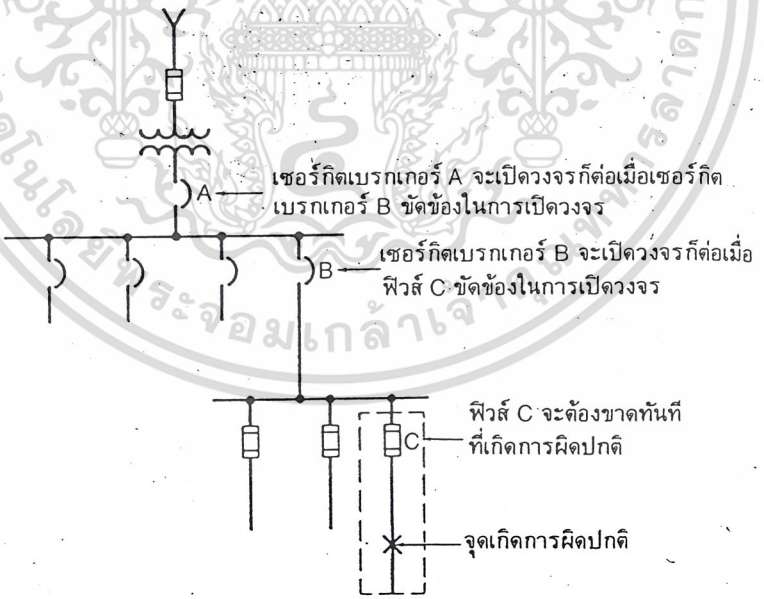
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน

2.14.1 วัตถุประสงค์พื้นฐานในการนำอุปกรณ์ป้องกันไปใช้งาน

ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบอุดมคตินั้น จะเป็นระบบแบบมีการทำงานร่วมกัน (selective) เพราะว่าจะต้องเลือกกันตั้งแต่อุปกรณ์ป้องกัน ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการทำงานร่วมกัน (Coordinated) ของอุปกรณ์ป้องกันภายในระบบไฟฟ้านั้น โดยการทำงานร่วมกันจะหมายถึงเมื่อกรณีที่เกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ใกล้ที่จุดเกิดการผิดปกติที่สุดจะต้องทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต้องทำงานก่อนอุปกรณ์ป้องกันตัวอื่น ๆ

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้านั้นจำเป็นที่จะต้องเลือกอุปกรณ์ป้องกันมาทำการป้องกันในกรณีที่เกิดการผิดปกติขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดการทนต่อกระแสลัดวงจร และคุณสมบัติของเวลาและกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์จะมีคุณสมบัติคงที่ คือจะสามารถปรับคุณสมบัติการทำงานได้ก็ต่อเมื่อเปลี่ยนขนาดและชนิดเท่านั้น หรือกรณีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดอากาศจะมีชนิดของการป้องกันกระแสเกินที่แตกต่างกันอยู่มากในการใช้งาน หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโมลเคสจะมีคุณสมบัติที่คงที่ทำให้แทบจะไม่มีปัญหาในการเลือกใช้เลย

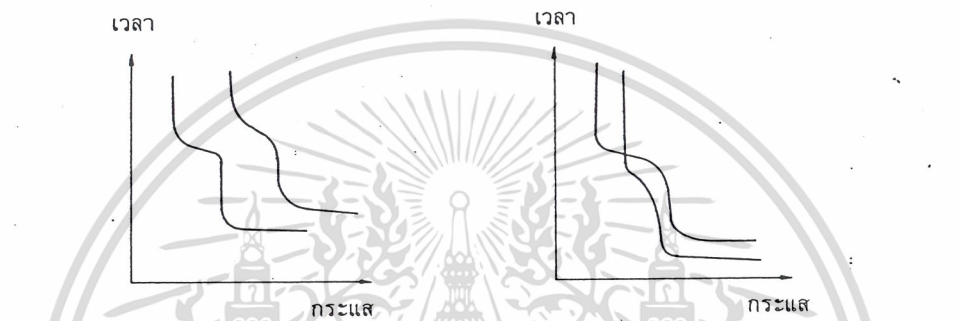


รูปที่ 2.31 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดการผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.31 เมื่อเกิดการผิดปกติขึ้น ฟิวส์ C จะต้องตัดวงจรออกทันที โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ A,B ไม่ควรทำงาน ซึ่งเราเรียกว่า เป็นแบบมีการทำงานร่วมกัน

การเลือกอุปกรณ์ป้องกันจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเวลาและกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน ดังรูปที่ 2.32 จะแสดงถึงการมีการทำงานร่วมกันและแบบไม่มีการทำงานร่วมกัน



(ก) แบบมีการทำงานร่วมกัน (selective) (ข) แบบไม่มีการทำงานร่วมกัน (nonselective)

รูปที่ 2.32 (ก) การทำงานร่วมกันแบบมีการทำงานร่วมกัน
(ข) การทำงานร่วมกันแบบไม่มีการทำงานร่วมกัน

การเลือกอุปกรณ์ป้องกันเพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีการทำงานร่วมกันนั้นทำได้ง่าย ถ้าใช้อุปกรณ์ที่ผลิตมาจากแหล่งเดียวกันและเป็นชนิดและแบบเดียวกัน (แต่มีขนาดกระแสไม่เท่ากัน) แต่ถ้าเลือกใช้อุปกรณ์ที่ผลิตมาจากหลายแหล่ง การออกแบบให้มีการทำงานร่วมกันนั้นจะทำได้ยาก

2.14.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการป้องกันระหว่างฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์

ในระบบไฟฟ้านั้นอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบอาจจะมีหลายประเภท ซึ่งการใช้งานย่อมขึ้นกับความเหมาะสมและคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละประเภท ดังนั้นจึงพอที่จะจำแนกรายละเอียดของการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกันได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่2.1 การเปรียบเทียบของอุปกรณ์ระหว่างฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์กับการใช้ฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมกัน

ต้องการป้องกัน	อุปกรณ์ป้องกัน	ชนิดของการป้องกัน	
		กรณีโหลดเกิน	กรณีลัดวงจร
สายตัวนำและบัสบาร์	ฟิวส์	พอใช้ได้	ดีมาก
	เซอร์กิตเบรกเกอร์	ดี	ดี
	ฟิวส์รวมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์	ดี	ดีมาก
มอเตอร์	เซอร์กิตเบรกเกอร์	ดี	ดีมาก
	ฟิวส์รวมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์	ดี	ดีมาก

2.14.3 การจัดลำดับของการป้องกัน

เมื่อเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินจะต้องตัดหรือเปิดวงจรส่วนที่ผิดปกติทันทีในเวลาอันรวดเร็ว และส่วนที่ถูกต้องนั้นจะต้องตัดออกให้น้อยที่สุด แต่ความปลอดภัยและความเชื่อถือจะต้องมีมากที่สุด

2.14.3.1 การจัดลำดับการป้องกันในระบบไฟฟ้าแบบราก จะสามารถติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันตามลำดับการไหลของกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ใช้อาจเป็น

ก. ฟิวส์แมนกับฟิวส์ย่อย

ข. เมนเซอร์กิตเบรกเกอร์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อย

ค. เมนเซอร์กิตเบรกเกอร์กับฟิวส์ย่อย

ง. ฟิวส์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อย

จ. ใช้สายป้อนที่ขนานกันหลายจุด พร้อมกับมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อย

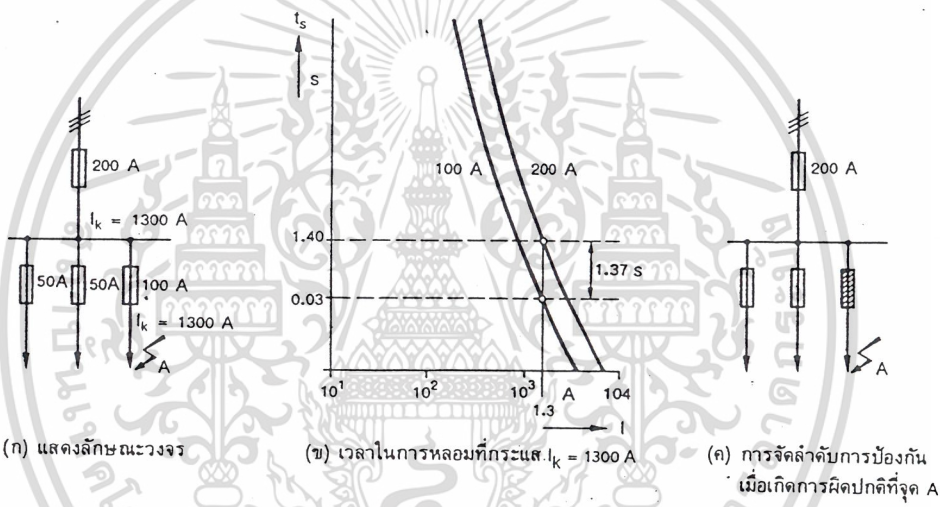
ฉ. ฟิวส์แรงสูงกับฟิวส์แรงต่ำย่อย

2.14.3.2 การจัดลำดับการทำงานในกรณีที่มีฟิวส์ต่ออนุกรมกัน ในรูปที่ 33 เป็นการแสดงถึงระบบไฟฟ้าที่ประกอบได้เป็นส่วนเข้า (Incoming) และส่วนออก (Outgoing Feedes) (จากบัสบาร์) จะสังเกตเห็นว่ากระแสและพื้นที่หน้าตัดของวงจรต่าง ๆ อาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นฟิวส์ที่ใช้จึงมีขนาดพิกัดต่าง ๆ กัน แต่อย่างไรก็ตามในกรณีเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบ กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านฟิวส์ทุกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการในการเลือกใช้ฟิวส์ก็คือ เมื่อนำฟิวส์มาต่อนุกรมกันนี้ คุณสมบัติของการตอบสนองของฟิวส์ต่าง ๆ กัน (หมายถึงการหลอมของฟิวส์เพื่อให้ฟิวส์เปิดวงจรนั้น) จะต้องเป็นส่วนที่มีช่วงกว้าง โดยจะต้องไม่มีคุณสมบัติประจำตัวของฟิวส์แต่ละตัวตัดกัน และค่าจะต้องพอเพียงเมื่อฟิวส์ทำงาน

ส่วนในกรณีที่กระแสลัดวงจรมีขนาดสูงมาก เงื่อนไขข้างต้นยังไม่พอเพียงมากนัก การที่จะพิจารณาการจัดลำดับของการป้องกันในประเด็นนี้จะต้องคำนึงถึงค่า I^2t_S ขณะที่ฟิวส์หลอม และขณะที่เกิดการอาร์กของฟิวส์ตัวย่อยนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า I^2t_S ของฟิวส์ตัวงเมน



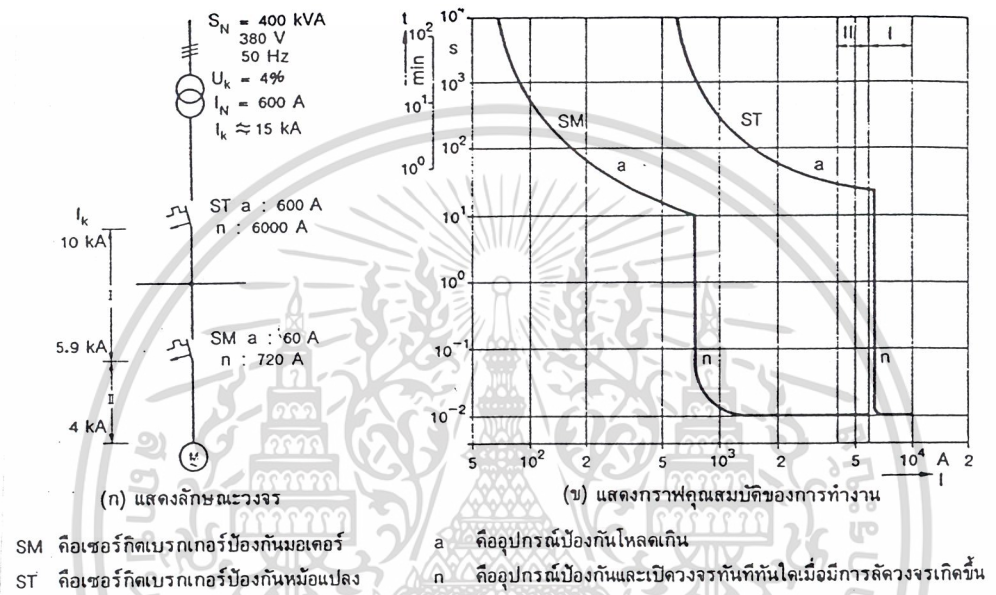
รูปที่ 2.33 ลักษณะของการจัดลำดับของการป้องกันในกรณีต่อฟิวส์อนุกรม

2.14.3.3 การจัดลำดับการทำงานในกรณีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต่ออนุกรมกัน จากรูปที่ 2.34 จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสลัดวงจรจะเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาเมื่อมีความยาวของระยะทางเกิดขึ้น ดังนั้นการปรับค่าเปิดวงจรหรือทริปของ n ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวใด ๆ ในบริเวณโซนที่ครอบคลุมนั้นจะต้องมีค่ามากกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่มีค่าสูง อาจจะเกิดขึ้นในบริเวณโซนนั้น

ในกรณีของรูปที่ 2.34 นี้เป็นการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เป็นแบบมีระบบการป้องกันหรือเปิดวงจร กรณีที่กระแสเกินเกิดขึ้นเป็นแบบอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ถ้าในการพิจารณา รูปที่2.35 จะเป็นลักษณะที่แสดงความแตกต่างของระดับกระแสลัดวงจร ซึ่งคล้ายกับรูปที่ 2.34 แต่เซอร์กิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรกเกอร์ที่ใช้ในรูปที่2.35จะเป็นแบบอาศัยหลักการเปิดวงจรแบบแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นแบบหน่วงเวลาสั้น

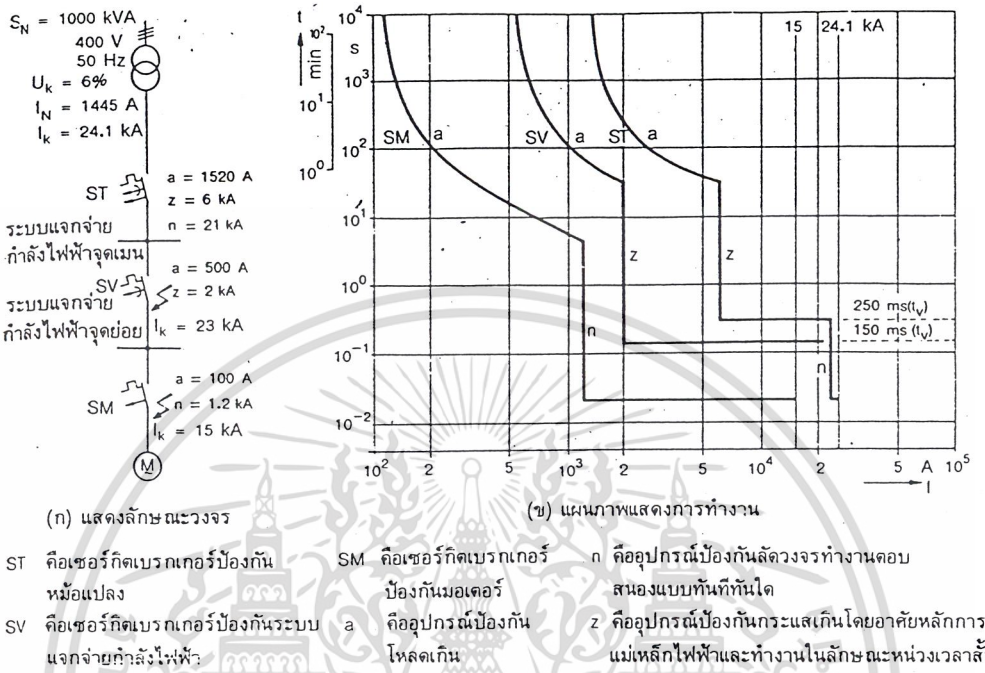


รูปที่ 2.34 ลักษณะของการจัดลำดับของการป้องกันเซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ชุด โดยต่ออนุกรมกัน และแสดงถึงค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าแตกต่างกันเมื่อมีความยาวมาเกี่ยวข้อง

ในรูปที่ 2.35 นี้ ค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ณ ที่ความยาวแตกต่างกัน (นั่นคืออิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป) กระแสลัดวงจรก็จะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมเมนทั้งหมดเป็นลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน โดยอาศัยหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าและทำงานลักษณะหน่วงเวลาสั้นซึ่งจะมีคุณสมบัติในการเปิดวงจร(เมื่อมีปัญหาในวงจรไฟฟ้า) ในแบบหน่วงเวลา เพื่อที่จะให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวอื่น ๆสามารถที่จะเปิดวงจรออกได้ก่อนเมื่อมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้น

และโดยทั่ว ๆ ไปในกรณีของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินโดยอาศัยหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า และทำงานในลักษณะหน่วงเวลาสั้นนั้น จะสามารถปรับค่าไว้ที่ไม่น้อยกว่า 1.25 เท่าของกระแสเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แสดงลักษณะวงจร (ข) แผนภาพแสดงการทำงาน

ST คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันหม้อแปลง

SV คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันระบบแจกจ่ายกำลังไฟฟ้า

SM คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันมอเตอร์

a คืออุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน

n คืออุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรทำงานตอบสนองแบบทันทีทันใด

z คืออุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินโดยอาศัยหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าและทำงานในลักษณะหน่วงเวลาสั้น

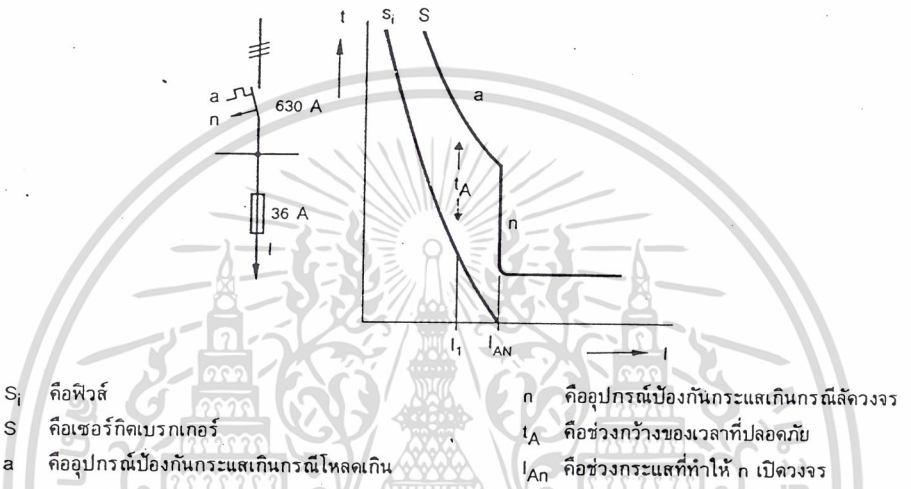
รูปที่ 2.35 ระบบแจกจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ป้องกันในระบบและต่ออนุกรมกัน

ในกรณีที่จะต้องการลดความเค้นของอุปกรณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อกรณีที่มีการลัดวงจรที่ค่าสูงสุดเกิดขึ้น สามารถทำได้โดยเซอร์กิตเบรกเกอณีที่เลือกใช้ควรเป็นแบที่มีลักษณะการทำงานป้องกันกระแสเกินแบบตอบสนองทันทีทันใดจะถูกปรับตั้งไว้ เพื่อให้เปิดวงจรเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรสูงสุด แต่จะไม่มีผลต่อการเปิดวงจรในกรณีอื่น ๆ

ในรูปที่ 2.35 เป็นลักษณะของวงจรที่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ 3 ชุด ในกรณีที่เกิดลัดวงจรขึ้น เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจรออกก็ต่อเมื่อกระแสลัดวงจรนั้นมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าปรับตั้งของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น (โดยที่ค่าปรับตั้งนี้หมายถึงค่าลักษณะแบบตอบสนองทันทีทันใดและจะใช้เวลาในการเปิดวงจรน้อยมาก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

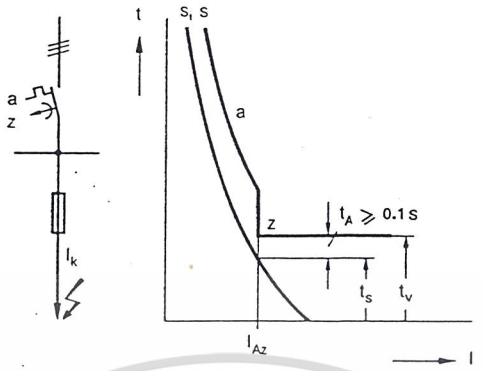
2.14.3.4 การจัดลำดับการทำงานในกรณีที่ประกอบด้วยเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ย่อย ในรูปที่15 จะเห็นได้ว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ประกอบไปด้วยจการทำงานแบบตัดวงจรเมื่อเกิดกรณีโหลดเกินและลัดวงจรขึ้น โดยจะทำงานตอบสนองแบบทันทีทันใดเมื่อมีกระแสเกินเกิดขึ้น คุณสมบัติของฟิวส์ที่แสดงในรูปที่ 2.36 นั้นะสังเกตได้ว่าไม่มีการตัดกันกับเส้นคุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์เลย



รูปที่ 2.36 แผนภาพระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ โดยเป็นการแสดงให้เห็นถึงในช่วงป้องกันโหลดเกินจะไม่มีการตัดกันของคุณสมบัติฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์เลย

ในรูปที่ 2.37 ถ้าในวงจรไฟฟ้านั้นเกิดการลัดวงจรขึ้นและกระแสลัดวงจรนี้อาจมีค่าเท่ากันหรือมากกกว่าค่าปรับตั้งการทำงานตอบสนองแบบทันทีทันใดเมื่อมีกระแสเกินเกิดขึ้น ดังนั้นฟิวส์ก็จะทำหน้าที่จำกัดกระแสลัดวงจรนี้ทันที โดยที่กระแสที่ผ่านเข้าไปในฟิวส์สูงสุดก่อนที่ฟิวส์จะขาดที่ไหลผ่านฟิวส์จะไม่มีค่าสูงถึงค่าทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์เลย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในกรณีเช่นนี้พิกัดของฟิวส์จะต้องมีค่าต่ำกว่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



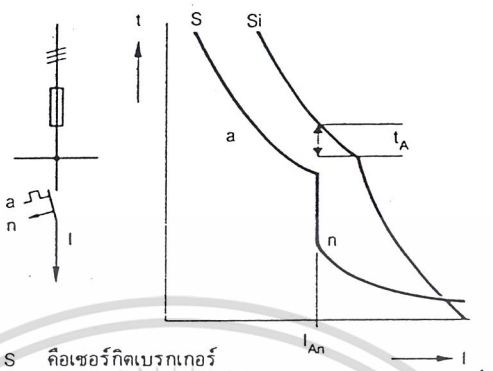
a	คืออุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน	I_{Az}	คือกระแสที่ตอบสนองต่อการทำงานของ z
Z	คืออุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและทำงานแบบหน่วงเวลาสั้น	t_S	คือเวลาการหลอมของฟิวส์
t_A	คือช่วงกว้างของเวลาที่ปลอดภัย	t_v	คือช่วงหน่วงเวลาของ z

รูปที่ 2.37 แผนภาพลำดับการทำงานระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ในช่วงลัดวงจร

2.14.3.5 การจัดลำดับการทำงานระหว่างเมนฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อย ในประเด็นนี้จะพิจารณาได้จากรูปที่ 2.37 ซึ่งในช่วงการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในช่วงการทำงานเปิดวงจรเนื่องจากโหลดเกินและการทำงานในกรณีลัดวงจร จะไม่ตัดกันกับคุณสมบัติของฟิวส์เลย

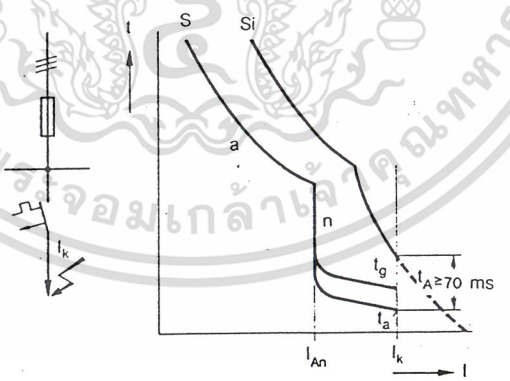
แต่ในกรณีที่วงจรไฟฟ้าเกิดการลัดวงจร กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านวงจรจะทำให้ฟิวส์เกิดความร้อนขึ้นและเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะเกิดการอาร์กขึ้นด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติจะนิยมให้คุณสมบัติของเวลาการหลอมละลายของฟิวส์ต่อกระแสของฟิวส์อยู่ห่างจากการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดชุดการเปิดวงจรอย่างทันทีทันใดเมื่อกระแสเกินไหลผ่านอยู่ 70 ms ดังแสดงในรูปที่ 2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



S คือเซอร์กิตเบรกเกอร์
S_i คือฟิวส์
a คืออุปกรณ์ป้องกันโหลดเกิน
n คืออุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินกรณีลัดวงจร
t_A คือช่วงกว้างของเวลาที่ปลอดภัย
I_{An} คือกระแสตอบสนองต่อการทำงานของ n

รูปที่ 2.38 แผนภาพของลำดับการทำงานระหว่างฟิวส์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อยในช่วงการป้องกันโหลดเกิน



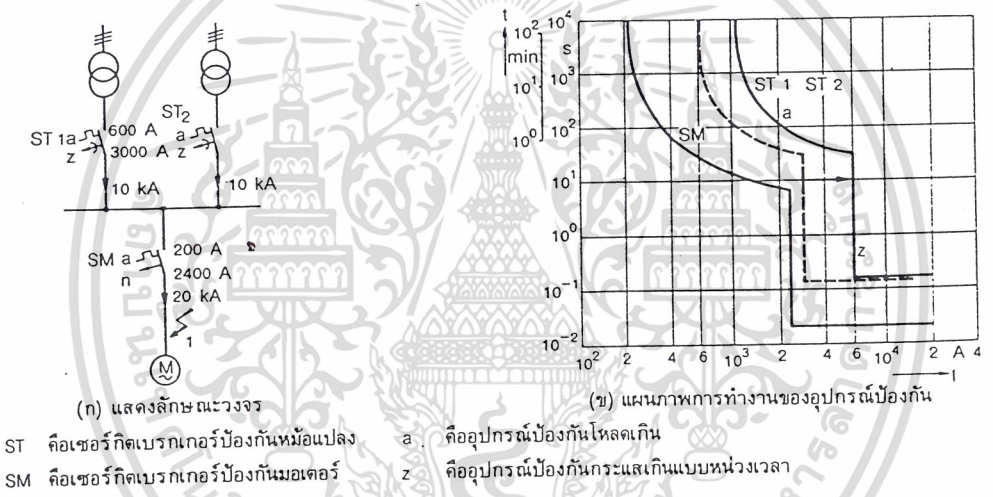
t_a คือค่าเวลาตอบสนองของเซอร์กิตเบรกเกอร์
t_g คือเวลาทั้งหมดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องใช้ในการเปิดวงจร

รูปที่ 2.39 แผนภาพของลำดับการทำงานระหว่างฟิวส์กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ย่อยในช่วงป้องกันการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.3.6 การจัดลำดับการทำงานในกรณีที่อินพุตมีหลายชุดขนานกัน ด้วยเหตุที่ว่าในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 2 ชุดขนานกัน และถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้น ณ ตำแหน่งที่ไม่อยู่ในช่วงแหล่งจ่ายไฟทั้งสองแล้ว กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งลัดวงจรนี้ จะเกิดจากแบ่งกระแสที่เท่ากันของแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึง

1. ในกรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 ชุดเหมือนกัน จากรูปที่ 2.40(ก) สมมติให้เกิดการลัดวงจรขึ้นที่จุด 1 และให้กระแสลัดวงจรมีค่าเท่ากับ 20 kA ดังนั้นในกรณีนี้กระแสที่ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ ST1 และ ST2จะมีค่าเท่ากับ 10 KA



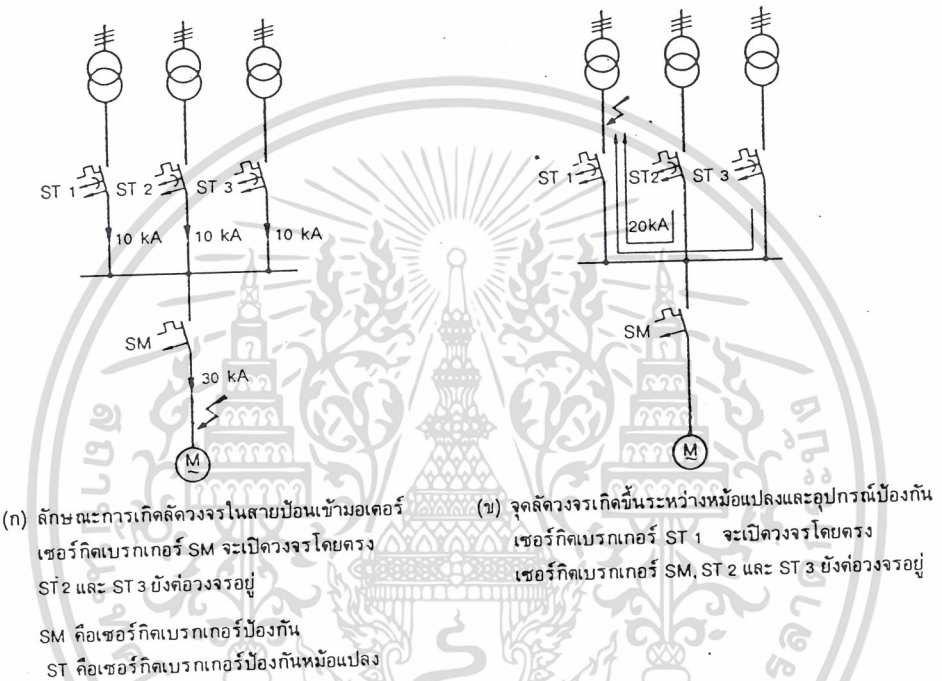
รูปที่ 2.40 ระบบไฟฟ้าชนิดที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน2ตัวต่อขนานกัน

ในรูปที่ 2.40(ข) นั้นคุณสมบัติการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ST1 และ ST2 จะเป็นสิ่งอ้างอิงของกระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ SM ดังนั้นในกรณีที่กระแสลัดวงจรจะเกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้ง 2 ชุดเท่า ๆ กันแล้ว คุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ST1 และ ST2 สามารถจะเลื่อนออกไปทางขวาด้วยจำนวนตัวประกอบตัวคูณเท่ากับ 2

2. ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 ชุดเหมือนกัน ถ้าหม้อแปลงมีมากกว่า 2 ชุด ถูกต่อขนานกันเพื่อที่จะจ่ายให้แก่วงจรไฟฟ้านั้น ดังรูปที่ 2.41 เซอร์กิตเบรกเกอร์ ST1,ST2,ST3 ควรจะเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีชุดป้องกันของลักษณะแบบตอบสนองทันทีทันใด และลักษณะแบบหน่วงเวลาแบบสั้น โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าปรับตั้งของลักษณะแบบตอบสนองทันทีทันใดจะต้องไม่มากกว่ากระแสลัดวงจร I_K ที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลง



รูปที่ 2.41 ระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 3 ชุด โดยแต่ละชุดมีขนาดเท่ากัน

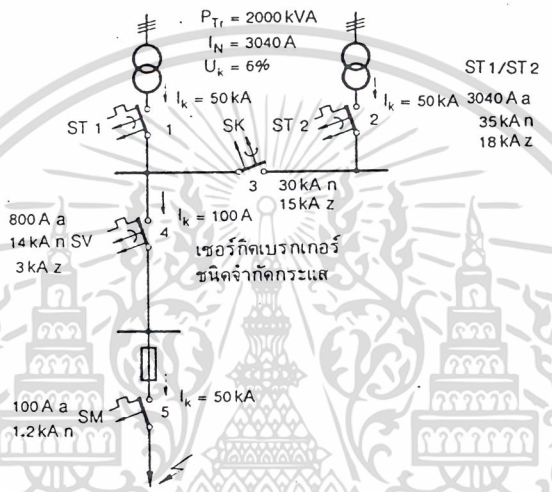
ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรขึ้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่อยู่หน้าจุดที่เกิดการผิดปกติจะตัดวงจรออก เช่นรูปที่ 2.41(ก) เซอร์กิตเบรกเกอร์ SM จะต้องเปิดวงจรออก ส่วนรูปที่ 2.41(ข) เซอร์กิตเบรกเกอร์ ST1 จะต้องเปิดวงจรออก ส่วนเซอร์กิตเบรกเกอร์ ST2,ST,SM จะต้องทำงานปกติโดยไม่มีการเปิดวงจร

3. ในกรณีที่มีหม้อแปลงขนานกัน 2 ชุด และประกอบไปด้วยบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Bus tie breaker) การเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่จะควบคุมโหลดทั้งหมดของหม้อแปลง ไม่ว่าจะเป็นการเปิดวงจรหรือเป็นการปรับคุณสมบัติของการเปิดวงจรก็ตามจะต้องมีความสัมพันธ์กันกับบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น อาจเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดจำกัดกระแสหรือไม่จำกัดกระแสก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซอร์กิตเบรกเกอร์ของบัสไทร์ในกรณีที่เป็นชนิดจำกัดกระแสนั้น จะช่วยป้องกันอันตรายอันอาจเกิดจากกระแสลัดวงจรที่มีค่าสูงสุดได้และเป็นการประหยัดต่อการใช้ระบบดังกล่าว

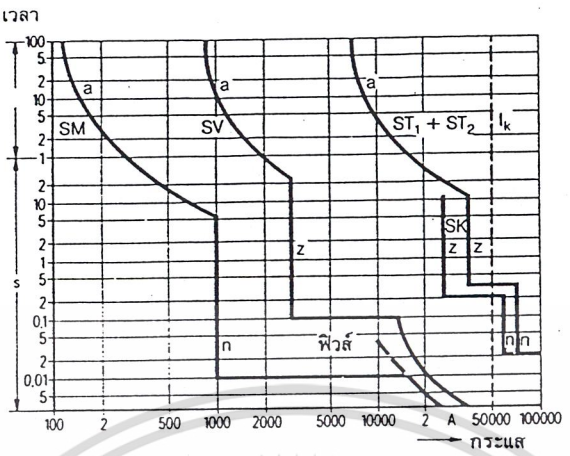
เซอร์กิตเบรกเกอร์ SV ในรูปที่ 42 สมมติให้เป็นแบบจำกัดกระแสที่มีพิกัด 1000 A. แต่สามารถที่จะปรับการทำงานให้อยู่ที่ 800 A. ได้ และสมมติให้กระแสลัดวงจรมีขนาด 100 KA ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ SV นี้



รูปที่ 2.42 ระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 2 ชุดและประกอบไปด้วย
บัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์

ในแผนภาพแสดงการทำงานในรูปที่2.43นั้นคุณสมบัติการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ST1,ST2 และ SK สามารถที่จะเคลื่อนที่ไปทางขวามือได้ด้วยตัวประกอบตัวคูณเท่ากับ 2 ทั้งนี้เนื่องจากผลรวมของกระแสลัดวงจรทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กันโดยแต่ละส่วนจะเกิดมาจากหม้อแปลงแต่ละตัวนั่นเอง

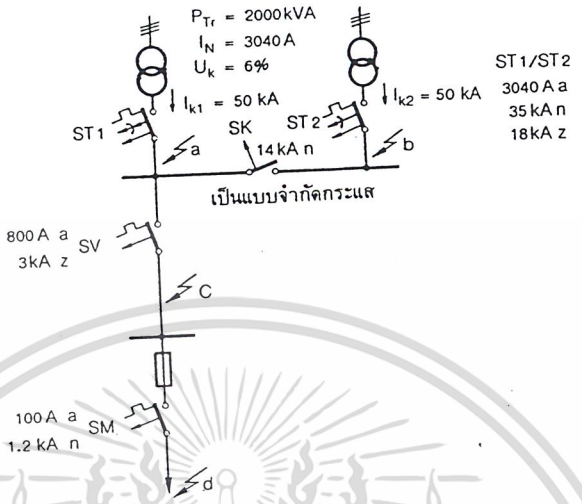
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



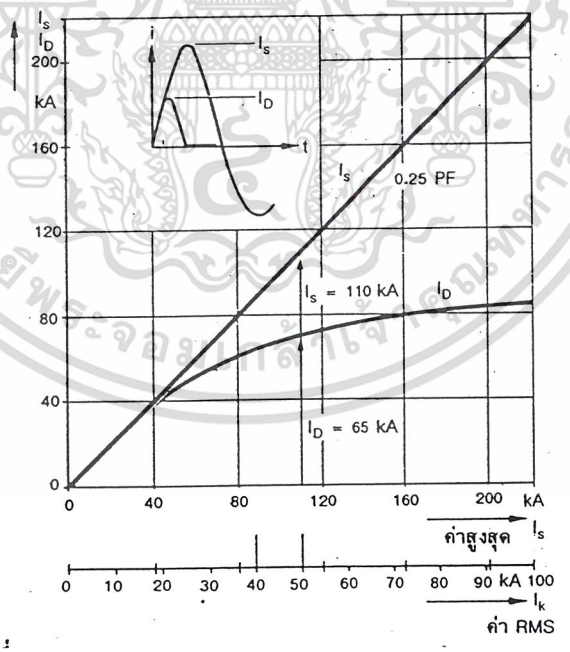
รูปที่ 2.43 การทำงานสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 2 ชุด
และบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ SK

ในรูปที่ 2.44 นั้นจะคล้าย ๆ กับรูปที่ 2.42 เพียงแต่ว่าบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ SK นั้นเป็นชนิดกัดกระแสที่มีพิกัด 1000 A. ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้นที่จุด a และ b กระแสลัดวงจร I_K 50 KA จะต้องไหลผ่านบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ SK ตลอด ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด I_S จะมีค่าเท่ากับ 110 KA ($I_S = X\sqrt{2}I_K$) ซึ่งคุณสมมติให้คุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดจำกัดกระแสที่มีพิกัด 1000 A สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.44 ระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลง 2 ชุดและ
บัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เป็นชนิดจำกัดกระแส



รูปที่ 2.45 กระแสตัด (Cut of Current) I_D ของเซอร์กิตเบรกเกอร์
ชนิดจำกัดกระแสที่มีพิกัด 1000 A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากรูปที่ 2.45 จะเห็นได้ว่ากระแสสูงสุดที่จะเกิดบนเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดจำกัดกระแส (I_D)มีค่า 65 KA ส่วนในกรณีที่เกิดการผิดปกติขึ้นที่จุด C ค่ากระแสลัดวงจร I_{K1}ที่เกิดจากหม้อแปลงตัวที่ 1 และกระแสลัดวงจรที่มีขนาดจำกัด I_{K2} จากหม้อแปลงตัวที่ 2 จะไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ SV ซึ่งภายในเวลาประมาณ 7 ms จะทำให้ให้ค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจรทั้งหมดมีค่ามากกว่ากระแสสูงสุดของกระแสลัดวงจร I_S ในแต่ละหม้อแปลงได้ ดังนั้นเซอร์กิตเบรกเกอร์ SV จะต้องทนต่อผลของการเคลื่อนที่ของกระแสสูงสุดนี้ได้ ส่วนบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ SK นั้นจะต้องเปิดวงจรหลังจากที่กระแสลัดวงจรผ่านตัวมันประมาณ 10 ms ส่วนเซอร์กิตเบรกเกอร์ SV จะต้องไม่เปิดหน้าสัมผัสจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 20 ms แล้วจึงจะเปิดหน้าสัมผัสได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ SV เปิดหน้าสัมผัสช้านั้นก็เพื่อป้องกันกระแสลัดวง I_{K1} ที่เกิดจากหม้อแปลงตัวที่1 นั่นเอง นั่นคือเซอร์กิตเบรกเกอร์ SV จะมีค่าขนาดการทนได้ของกระแสลัดวงจร 50 KA ก็เป็นที่ยอมรับแล้วว่าใช้งานได้

ส่วนบัสไทร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ SK นั่น ไม่ได้เพียงแต่ทำการบรรเทาความรุนแรงดันเป็นผลเนื่องจากกระแสลัดวงจรสูงสุด (I_S)แต่เพียงอย่างเดียว แต่ตัวมันเองยังจำกัดผลของความเค้นที่จะขึ้นอุปกรณ์การติดตั้ง อันเป็นผลมาจากการะแสลัดวงจรทั้งหมดได้ โดยตัวมันจะจำกัดไม่ให้เกิดความเสียหายเกินกว่าเวลาประมาณ 10 ms ได้ (เท่ากับเวลาที่ใช้ในการเปิดวงจรทั้งหมดของเซอร์กิตเบรกเกอร์)

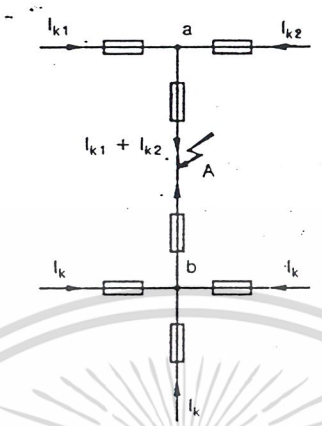
2.14.4 การจัดลำดับการป้องกันในระบบไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าแบบนี้จะสามารถพิจารณาถึง

1. เฉพาะการลัดวงจรที่ปรากฏหรือเกิดบนสายตัวนำเท่านั้น จะสามารถพิจารณาแยกออกจากวงจรไฟฟ้าทั้งหมดได้
2. ถ้าพิจารณาการลัดวงจรขึ้นบนขั้วหม้อแปลงแล้ว จะสามารถพิจารณาแยกออกจากวงจรไฟฟ้าทั้งหมดได้

2.14.4.1 ฟิวส์ ณ จุดต่อ ในระบบแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำทั่ว ๆ ไปแล้วสายตัวนำจะมีขนาดใกล้เคียงกัน และจะสามารถใช้ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ในการป้องกันตัวนำเหล่านี้ได้ สมมติให้เป็นฟิวส์ชนิด gL (ตามมาตรฐานของประเทศเยอรมัน) ฟิวส์เหล่านี้สามารถติดตามจุดต่อของวงจรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

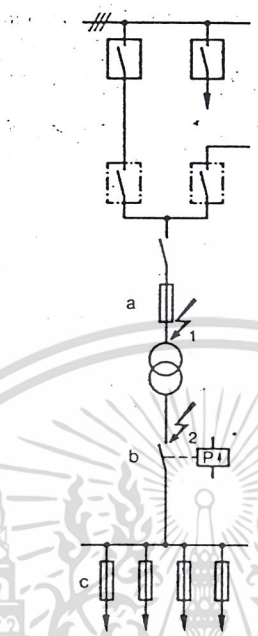


รูปที่ 2.46 การเกิดลัดวงจรบนสายตัวนำ

ถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้นที่จุด A กระแสลัดวงจร I_{K1} และ I_{K2}จะไหลมารวมที่จุด a เพื่อไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจรขึ้น ค่ากระแสนี้จะขึ้นอยู่กับความต้านทานของสายตัวนำ

2.14.4.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบวงจรตาข่ายเมชและฟิวส์ ณ จุดต่อ ในรูปที่ 2.47 นั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นบนด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า (จุดที่1) หรือระหว่างหม้อแปลงกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันวงจรตาข่ายเมช (จุดที่2) ในกรณีที่พิจารณาทางด้านแรงดันสูงฟิวส์จะต้องทำหน้าที่ในการเปิดวงจรถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้น ส่วนทางด้านแรงดันต่ำ ถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้นจะต้องมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งไหลป้อนกลับจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันวงจรตาข่ายเมชไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจรขึ้น ดังนั้นชั้นรีลิช(shunt release) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะได้รับคำสั่งเปิดวงจรจากรีเลย์ป้องกันวงจรตาข่ายเมช (mesh network relay) และเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะแยกจุดที่เกิดการลัดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a คือฟิวส์แรงสูง
b คือเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบวงจรตาข่ายเมช
ซึ่งมีรีเลย์ป้องกันวงจรตาข่ายเมชประกอบอยู่
c คือฟิวส์ป้องกันจุดต่อ

รูปที่ 2.47 การเกิดลัดวงจรของระบบแรงดันต่ำของวงจรตาข่ายเมช

2.14.5 การจัดลำดับการป้องกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์และการปรับตั้ง

จะสามารถจำแนกออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จะต้องคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร

ขั้นตอนที่ 2 เลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโมลเคสที่เพียงพอที่จะรับกระแสลัดวงจรได้โดยไม่เป็นอันตราย

ขั้นตอนที่ 3 หาคุณสมบัติของเวลา – กระแส ของ MCCB ที่จะเลือกใช้งาน

ขั้นตอนที่ 4 ประกอบคุณสมบัติของ MCCB แต่ละตัวลงในแผ่นงานมาตรฐาน (Standard work sheet) โดยแผ่นใช้งานมาตรฐานนี้ในแนวแกนนอนจะหมายถึงกระแส(ส่วนคุณสมบัติของ MCCB แต่ละตัวที่ปรากฏอยู่บนคุณสมบัติของเวลา – กระแส นั้น ในแนวแกนนอนจะหมายถึงเปอร์เซนต์ของพิกัด (percent of rating) แต่ไม่เป็นการยกเลยที่จะเขียนคุณสมบัติของ MCCB แต่ละตัวลงบนแผ่นมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 นำคุณสมบัติของ MCCB ตัวที่ไกลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ามากที่สุดมาลงบนแผ่นงานมาตรฐาน โดยให้แกนของเวลาอยู่ในตำแหน่งทันกันพอดี

ขั้นตอนที่ 6 เลื่อนแผ่นงานมาตรฐานไปในแนวระนาบ จนกระทั่งพิกัดการเปิดวงจรของ MCCB ทับกับพิกัดของกระแสบนแผ่นงานมาตรฐาน คือหมายถึง 100 % ของพิกัดกระแสบนแผ่นคุณสมบัติของ MCCB แต่ละตัว ทับกับกระแสพิกัดของ MCCB บนแผ่นงานมาตรฐานเอง

ขั้นตอนที่ 7 ทำซ้ำกับขั้นตอนที่ 6 แต่เป็นของ MCCB ตัวอื่นๆ โดยไล่มาจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวสุดท้าย ในขั้นตอนนี้จะสามารถเลือกกราฟและการเปิดวงจรแบบทันทีทันใดได้

ขั้นตอนที่ 8 จะสามารถออกแบบหรือเปลี่ยน MCCB ให้มีคุณสมบัติการเปิดวงจรที่ดีกว่าระบบเดิมได้

2.15 การออกแบบระบบไฟฟ้าในส่วนที่เกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานร่วมกัน

ในอุปกรณ์ส่วนที่เกี่ยวกับการป้องกันทางระบบไฟฟ้านั้นจะต้องพิจารณาเป็นอย่างมากเพราะในกรณีที่ระบบไฟฟ้าเกิดปัญหาขึ้น อาจจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทุกอย่างหยุดทำงานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาสาเหตุที่จะทำให้เกิดการลัดวงจร เวลา และการปรับแต่งกระแสของอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ และโดยส่วนมากแล้วในแง่ของความจริง มีความต้องการที่จะให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้ทำงานได้ตลอดเวลาและมากที่สุด ซึ่งถ้าเกิดปัญหาการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าแล้ว อุปกรณ์ป้องกันจำเป็นที่จะต้องเปิดวงจรส่วนที่เกิดปัญหานั้นออก แต่จะต้องให้น้อยที่สุดและจำเป็นที่สุด

การเกิดการผิดปกติในระบบ 3 เฟส นั้น มีกรณีใหญ่ ๆ อยู่ด้วยกันดังนี้ คือ

1. ทรีเฟสฟอลต์ (3 Phase fault)
2. เฟสทูเฟสฟอลต์ (phase to phase fault)
3. ทูเฟสทูกราวด์ฟอลต์ (2 Phase to ground fault)
4. วันเฟสทูกราวน์ฟอลต์ (1 Phase to ground fault)
5. การเกิดอาร์ก (arcing)

การนำอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าไปใช้งานนั้นจำเป็นจะต้องใช้คุณสมบัติประจำตัวของเวลาและกระแสของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งอาจจะเป็นแบบปรับแต่งได้หรือปรับแต่งไม่ได้มาประกอบกันทั้งนี้เพื่อป้องกันในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันตัวที่ตั้งอยู่ใกล้จุดการเกิดผิดปกติไม่ทำงาน จะได้ให้อุปกรณ์ป้องกันตัวถัดไปทำงานแทนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแต่งการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องปรับแต่งที่ตำแหน่งกระแสที่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อจะได้แบ่งแยกกระแส 2 ชนิด ได้อย่างชัดเจน กระแสดังกล่าวก็คือ กระแสที่โหลดปกติสูงสุดและกระแสลัดวงจร นอกจากนี้อาจจะนำอุปกรณ์รีเลย์และเซอร์กิตเบรกเกอร์มาใช้ร่วมกันก็ได้

อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าที่สำคัญอาจจะประกอบไปด้วยฟิวส์ที่มีการทำงานเปิดวงจรโดยตรง เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ปรับแต่งการทำงานได้ รีเลย์ กลไกเปิดวงจร สวิตช์ตัดแยกขณะมีกระแสหรือโหลด เบรกสวิตช์ สวิตช์แยกวงจร คอนแทรกเตอร์ และอื่น ๆ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ควรที่จะต้องรู้ถึงคุณสมบัติประจำตัวของมันเองเพื่อสะดวกในการใช้อุปกรณ์เหล่านี้

2.15.1 การเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับการลัดวงจรในการที่จะนำอุปกรณ์ป้องกันมาทำการป้องกันร่วมกัน

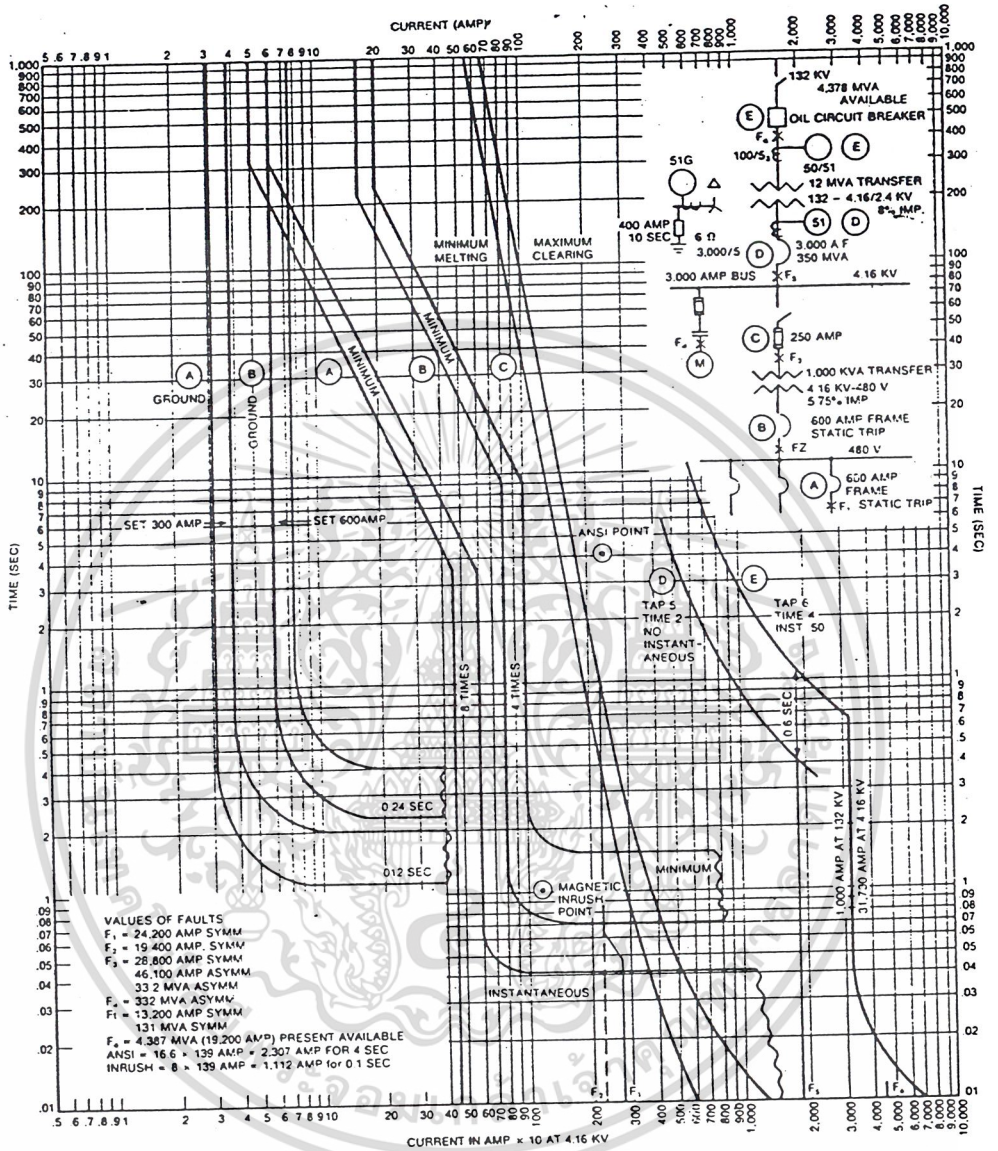
การเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับการลัดวงจรในการที่จะนำอุปกรณ์ป้องกันมาทำการป้องกันร่วมกันจะต้องประกอบด้วยข้อมูลต่อไปนี้ โดยข้อมูลเหล่านี้จะเป็นพื้นฐานของการออกแบบระบบป้องกันแบบให้มีการทำงานร่วมกันอย่างดีได้

2.15.1.1 การป้องกันกับการทำงานร่วมกัน ในหลักการเบื้องต้นของการออกแบบป้องกันระบบไฟฟ้าก็คือ ต้องมีความปลอดภัยและให้มีราคาต่ำสุด แต่ในการออกแบบขั้นตอนสุดท้ายโดยวิศวกรไฟฟ้านั้นจะพยายามให้เป็นการป้องกันแบบง่าย ๆ แต่มีความปลอดภัย มีความเชื่อถือ และประหยัด ดังนั้นจึงอาจมีการเพิ่มหรือลดอุปกรณ์ป้องกันจากที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ดั้งเดิมไว้

ดังนั้นในการที่จะให้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าทำงานได้ตามเป้าหมาย จึงต้องนำอุปกรณ์ป้องกันเหล่านี้มาทำการป้องกันร่วมกันก่อน ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงลักษณะของเวลาและกระแสของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกัน โดยจะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 36 ซึ่งในรูปที่ 36 นั้นเป็นการแสดงแน่ชัดว่าถ้าเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าจะมีการเปิดวงจรเฉพาะส่วนที่ผิดปกติเท่านั้น

2.15.1.2 การทำงานร่วมกันในกรณีของอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร จะขึ้นอยู่กับการศึกษาที่เกี่ยวกับเรื่องการลัดวงจร กล่าวคือในช่วงหลักจากที่เกิดการลัดวงจรหรือเกิดการผิดปกติขึ้นประมาณไซเคิลแรกเล็กน้อย หรือประมาณ 0.1 วินาที ค่ากระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าซับทรานเซียนรีแอกแตนซ์ (X_d")แต่หลังจากช่วงเวลาดังกล่าวผ่านไปแล้วกระแสลัดวงจรจะพิจารณาจากค่าทรานเซียนรีแอกแตนซ์(X_d') โดยค่ากระแสลัดวงจรค่านี้ก็คือ I_d' และกระแส I_d' นี้จะมีค่าประมาณ 2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ เซอร์กิตเบรกเกอร์ A และเซอร์กิตเบรกเกอร์ B เป็นแบบสเตติกในกรณีที่ไม่ใช่สเตติกทริป

รูปที่ 2.48 การป้องกันร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงสุดท้ายของกระแสลัดวงจรหรือ I_d' นั้น กระแสลัดวงจรช่วงสุดท้ายนี้จะเริ่มเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) ซึ่งจะพิจารณาจากซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (X_d) ดังนั้นการปรับแต่งของอุปกรณ์หรืออุปกรณ์ป้องกันที่ไม่สามารถปรับแต่งได้ ถ้าจะนำมาป้องกันระบบไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงช่วงเวลาที่จะป้องกันและขนาดของกระแสลัดวงจรที่จะเกิดขึ้นด้วย ทำให้ต้องพิจารณาถึงค่า X_d", X_d', X_d นั่นเอง

การศึกษาถึงการทำงานร่วมกัน จำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณสมบัติและการปรับแต่งของอุปกรณ์ป้องกันที่จะใช้ทุกตัวด้วย

วันไลน์ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าจะแสดงถึง

1. ตำแหน่งและฟังก์ชั่นของอุปกรณ์แต่ละตัวเช่น ฟิวส์ รีเลย์ และอุปกรณ์เปิดวงจรชนิดทำงานโดยตรง เป็นต้น
2. กำลังงานปรากฏ (apparent power) พิกัดแรงดันค่าอิมพีแดนซ์ ค่าพิกัดของหม้อแปลง เป็นต้น
3. ชนิด ผู้ผลิต และอัตราส่วนของอุปกรณ์หม้อแปลงทุกตัวที่จะใช้ร่วมกับรีเลย์
4. แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร อันได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมอเตอร์ และมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ
5. อุปกรณ์ที่ใช้ทุกตัว เช่น หม้อแปลง สายเคเบิล เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ รีแอกเตอร์
6. อุปกรณ์ฉุกเฉิน
7. ค่ากระแสเวลาของรีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ
8. แผ่นป้ายประจำเครื่อง ซึ่งจะแสดงพิกัดของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อิมพีแดนซ์ไดอะแกรมจะแสดงถึง

1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
2. บัสอิมพีแดนซ์
3. หม้อแปลง และ / หรือรีแอกเตอร์อิมพีแดนซ์
4. สายเคเบิลอิมพีแดนซ์
5. ระดับแรงดันไฟฟ้า

2.15.2 ค่ากระแสลัดวงจรที่จะพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรไฟฟ้าถ้าเกิดปัญหาเกี่ยวกับการลัดวงจรขึ้นในวงจร กระแสลัดวงจรค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นอาจจะไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือฟิวส์ที่มีไว้สำหรับป้องกันอันตรายทางไฟฟ้า และค่ากระแสลัดวงจรค่าสูงสุดนี้ เป็นค่าขนาดของการทนต่อกระแสลัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้านั่นเอง สำหรับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่เป็นพวกนอนอินเตอร์รับตั้ง (noninterrupting) อันได้แก่ สายเคเบิล บัสดัก และสวิตช์แยกวงจร จะต้องสามารถที่จะทนความร้อนและความเค้นได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือฟิวส์จะต้องสามารถรับกระแสปกติที่ผ่านตัวมันเองได้ และต้องทนต่อกระแสลัดวงจรที่จะไหลผ่านตัวมันเองได้อีกด้วย

ในสภาวะปกติกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ แต่ในสภาวะที่เกิดการลัดวงจรแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้จะจ่ายให้แก่วงจรที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำลง จึงทำให้กระแสมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับขนาดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอีกด้วย เมื่อเป็นลักษณะเช่นนี้อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าดังได้กล่าวมาแล้วจะต้องสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรค่าสูงสุดได้ จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ว่าถึงแม้วงจรที่มีโหลดต่อชนิดเดียวกัน แต่ทำไมอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าจึงจะต้องมีค่าการทนต่อกระแสลัดวงจรต่างกัน

2.15.3 คุณสมบัติพื้นฐานของเซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์

การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันนั้น หลักการพื้นฐานที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ค่ากระแสลัดวงจร ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ป้องกันจะขึ้นอยู่กับพื้นฐานของกระแสลัดวงจร เช่น

- ขณะไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจรสูงสุด จะเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ระบบแรงดันไฟฟ้าต่ำและฟิวส์
- กระแสลัดวงจรจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 ไซเคิล (0.6วินาที)

กระแสช่วงนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับรีเลย์ชนิดหน่วงเวลาและฟิวส์ชนิดไม่จำกัดกระแส โดยค่ากระแสที่ต่ำสุดจะต้องเป็นสิ่งที่แน่ใจว่าอุปกรณ์ป้องกันจะทำงานเปิดวงจรได้แน่นอน ทั้งนี้เพราะเมื่อเริ่มเกิดการลัดวงจรขึ้น เวลาที่รีเลย์จะเริ่มเปิดวงจร จะเกิดขึ้นหลังจากที่กระแสลัดวงจรสูงสุดผ่านไปแล้วเซอร์กิตเบรกเกอร์ในช่วงสั่งเปิดหน้าสัมผัสนั้นเป็นช่วงที่เป็นกลไกทางกล ทำงานเพื่อให้หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร ซึ่งจะเกิดการอาร์กขึ้นที่หน้าสัมผัสดังกล่าว การอาร์นี้จะเกิดขึ้นในอาร์กแชมเบอร์ (arc chamber) ดังนั้น ค่าความเค้นทางกลสูงสุดก็จะเกิดขึ้นต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวกับการลัดวงจร โดยค่าสูงสุดนี้จะปรากฏในช่วง ½ ไซเคิลแรก ทั้งนี้เพราะองค์ประกอบกระแสตรงยังปรากฏอยู่ในช่วงดังกล่าว

จากช่วงเริ่มแรกของการเกิดลบัดวงจรจนกระทั่งถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์มีหน้าสัมผัสห่างจากกัน (เปิดวงจร) ค่ากระแสจะมีขนาดลดลงเรื่อย ๆ โดยการลดลงเนื่องจากค่าองค์ประกอบกระแสตรงและเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ของมอเตอร์ ดังนั้นค่ากระแสที่ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรก็จะอยู่ที่ตำแหน่งไซเคิลที่ 4 ,5 , หรือ 8 หลังจากเกิดการผิดปกตินั่นเอง โดยกระแสช่วงนี้จะมีค่าน้อยกว่าในช่วง ½ ไซเคิลแรก

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้งานกับแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่า 600 โวลต์ จะคำนึงถึงค่าพิกัดในชั่วขณะหนึ่งซึ่งจะเป็นช่วงที่ต้องพิจารณาถึงว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถรับค่าความเค้นทางกลแคละความร้อนที่จะเกิดขึ้นเมื่อกระแสลัดวงจรสูงสุดไหลผ่าน โดยช่วงที่พิจารณาก็คือช่วง ½ ไซเคิลแรกของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั่นเอง ส่วนสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกค่าก็คือ พิกัดของการทนได้ต่อกระแสลัดวงจร โดยเป็นการพิจารณาในช่วงไซเคิลที่ 4, 5 และ 8 ตามลำดับ

โดยส่วนมากเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ จะมีพิกัดที่แสดงในความหมายของพิกัดความสมมาตร โดยเป็นตามมาตรฐานของ ANSI C37.06 และ IEEE ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แรงดัน กระแส และขนาดของการทนต่อกระแสลัดวงจรประกอบอีกด้วย

2.16 สรุปหลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้า

หลักการของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้า เพื่อให้มีการทำงานร่วมกันในระบบไฟฟ้าจะต้องประกอบไปด้วย

1. วันไลน์ไดอะแกรม โดยจะระบุถึงชนิดและพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันทุกชนิดที่ใช้ในระบบไฟฟ้า ข้อมูลโหลด ข้อมูลหม้อแปลง ข้อมูลสายตัวนำ และค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น

2. อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าชนิดพิเศษ โดยในแต่ละวงจรไฟฟ้าอาจจะมีการหาอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มเติมชนิดพิเศษขึ้น

3. การเลือกสเกล โดยในการเลือกสเกลเพื่อเป็นประโยชน์ในการเขียนคุณสมบัติประจำตัวของอุปกรณ์ป้องกันลงในแผ่นสเกลนั้น

4. จุดคงที่ โดยในกระดาษสเกลซึ่งเป็น log-log นั้นอุปกรณ์ป้องกันจะมีคุณสมบัติประจำตัวที่แสดงด้วยจุดที่คงที่ได้

5. การเริ่มทำการออกแบบ โดยทั่ว ๆ ไปจะเริ่มต้นจากอุปกรณ์ป้องกันของวงจรย่อยไล่เรื่อย ๆ ไปจนถึงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

6. คุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างกัน จะต้องหาความสัมพันธ์ของระดับแรงดันไฟฟ้าเหล่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เลือกพิกัดและการปรับของอุปกรณ์ป้องกัน โดยปกติจะเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่ค่าต่ำสุดก่อน

2.16.1 ข้อมูลที่จำเป็นที่จะใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกัน ของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ข้อมูลที่จำเป็นที่จะใช้ในการศึกษาถึงการทำงานร่วมกัน ของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย

1. ข้อมูลโหลด เช่น กระแสโหลดสูงสุดไหลในวงจร
2. หม้อแปลง ข้อมูลที่จำเป็นเช่น พิกัด KVA ,แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ การต่อวงจรว่าเป็นแบบใด ฯลฯ
3. มอเตอร์ ข้อมูลที่จำเป็นเช่น แรงม้า กระแสพิกัด กระแสล็อกโรเตอร์ ค่าเซอร์-วิสแฟคเตอร์ฯลฯ
4. บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น พิกัด ชนิด การปรับ
5. กระแสลัดวงจร ซึ่งส่วนมากจะพิจารณาถึงกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีลัดวงจรแบบ 3 เฟส และกระแสลัดวงจรควรจะทราบค่า ณ ทุก ๆ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน
6. คุณสมบัติของกระแส - เวลาของอุปกรณ์ป้องกัน
7. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ประกอบด้วยชนิด บริษัทผู้ผลิต ขนาดเฟรม เป็นต้น
8. รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ประกอบด้วย ชนิด บริษัทผู้ผลิต ค่าการปรับกระแสเปิดวงจร เป็นต้น
9. ฟิวส์ ประกอบด้วย ชนิด บริษัทผู้ผลิต พิกัดกระแสต่อเนื่อง
10. สายเคเบิลหรือสายตัวนำ ประกอบด้วย จำนวนตัวนำต่อเฟส เดินในท่อหรือเดินลอย เป็นต้น
11. บัสเวย์ ประกอบด้วย ขนาดกระแสสูงสุด
12. แผงย่อย สวิตซ์บอร์ด ประกอบด้วย ขนาดกระแส

2.16.2 อุปกรณ์และหลักการของการป้องกันทางไฟฟ้าที่ใช้กันทั่วๆไปในการออกแบบให้อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานร่วมกัน

สามารถแยกออกเป็นหลักการได้ดังนี้

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ ตามหลักการของการทำงานร่วมกันแล้ว ควรที่จะให้คุณสมบัติประจำตัวของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีการโอเวอร์แล็ปน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

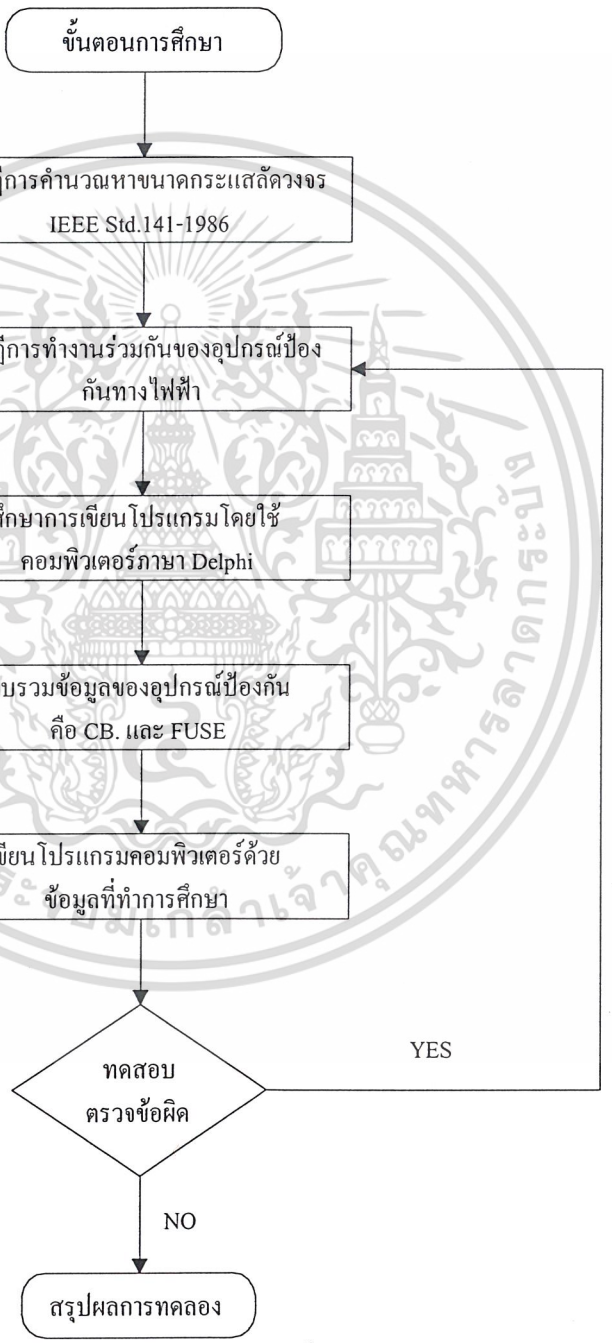
2. ฟิวส์ ตามหลักการของการทำงานร่วมกันของฟิวส์แล้ว จะสามารถตรวจสอบโดยใช้ตาราง หรือแสดงด้วยกราฟ หรือเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลายกับพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการเคลียร์วงจรสำหรับที่เวลาน้อยกว่า 0.01 วินาที
3. รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือแบบหน่วงเวลาและการทำงานแบบทันทีทันใด
4. ปรับค่าหน่วงเวลา หรือไทม์ไดแอล (time dial)
5. ปรับค่ากระแสต่ำสุดที่จะทำให้รีเลย์ทำงาน หรือกระแสพิคอัพ หรือการแท็ปของกระแส (Current pick up)
6. พิกัดการเลือก และ / หรือการปรับแต่งของอุปกรณ์ป้องกันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทำงานและการทำงานของซอฟแวร์

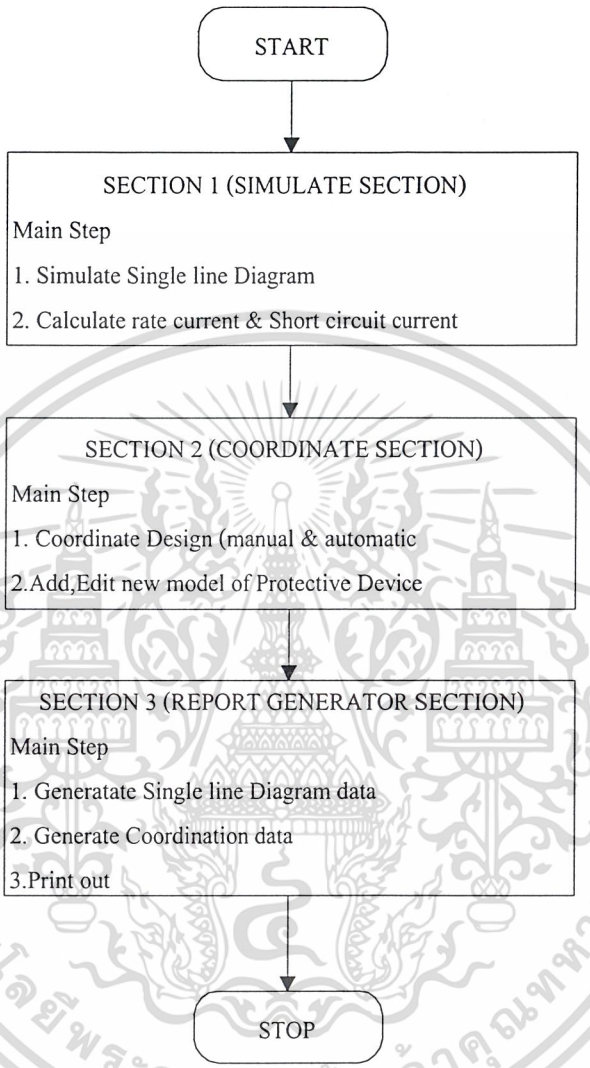
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการทำงาน

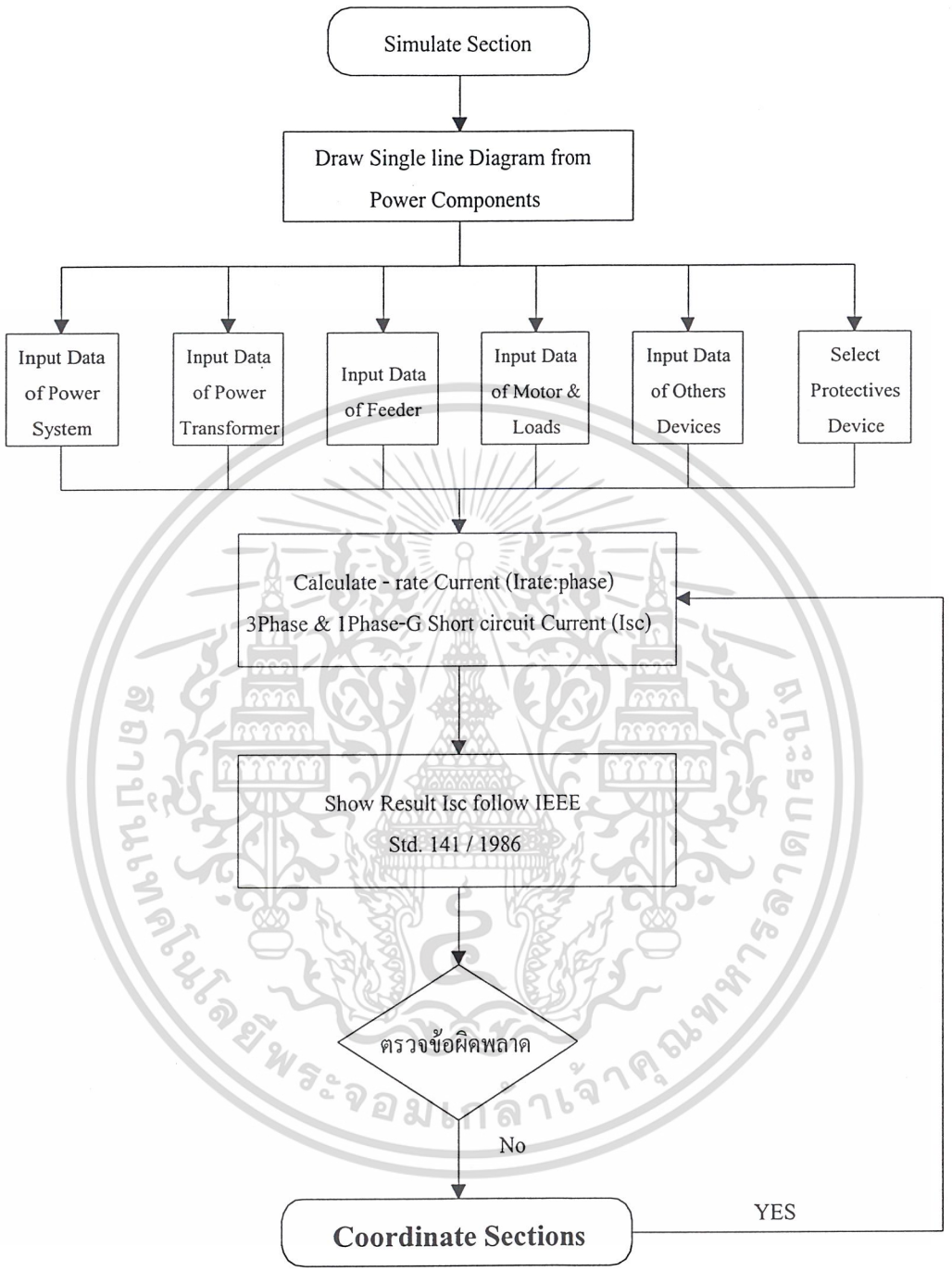
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการออกแบบ



รูปที่ 3.2 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนในการออกแบบ

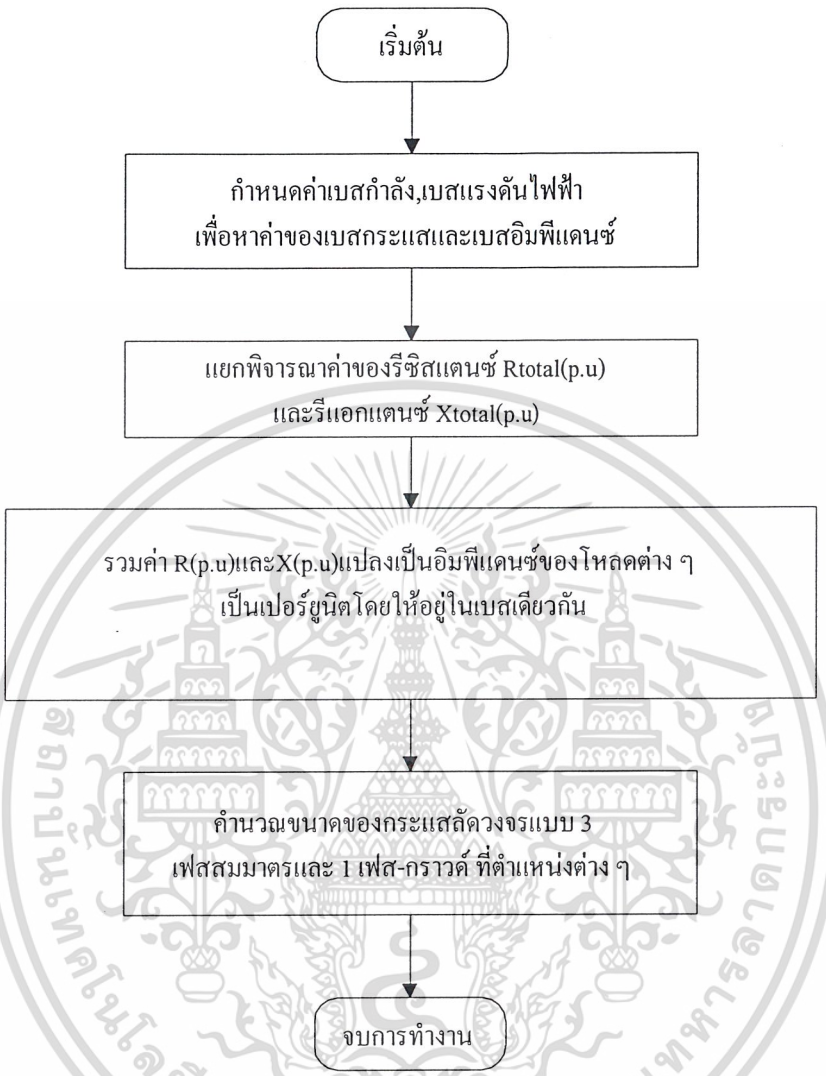
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในส่วนที่ 1

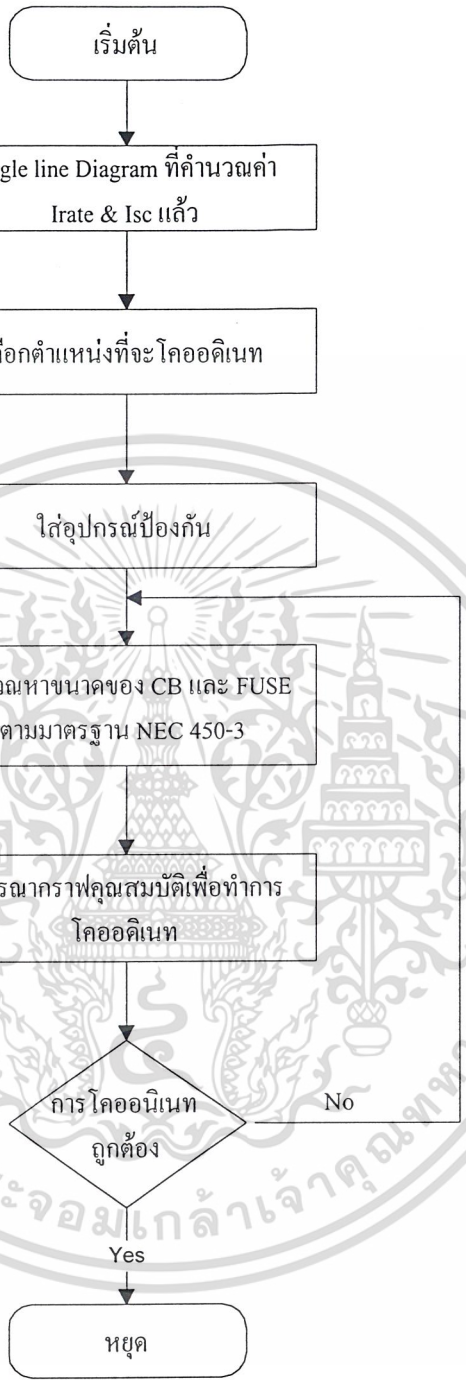
Simulate Section

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



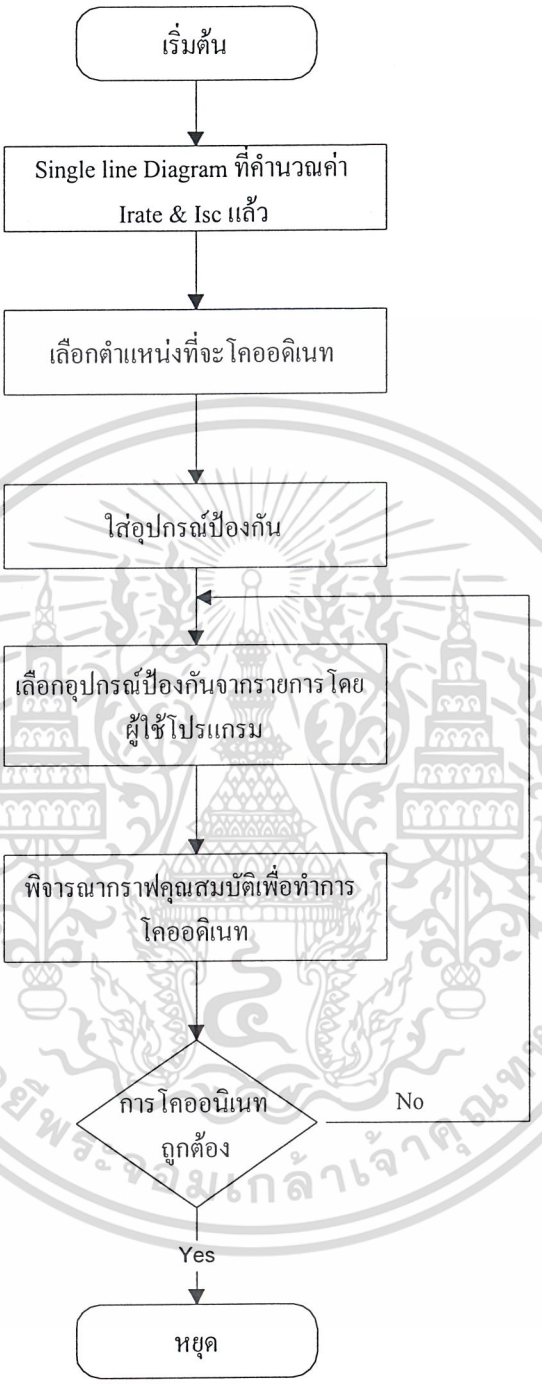
รูปที่ 3.4 โฟลว์ชาร์ทแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการคำนวณหากระแสลัดวงจร ตามมาตรฐาน ANSI / IEEE Std. 141/1986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมการโคออดิเนทของอุปกรณ์ป้องกันแบบอัตโนมัติ (Automatic Coordinate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

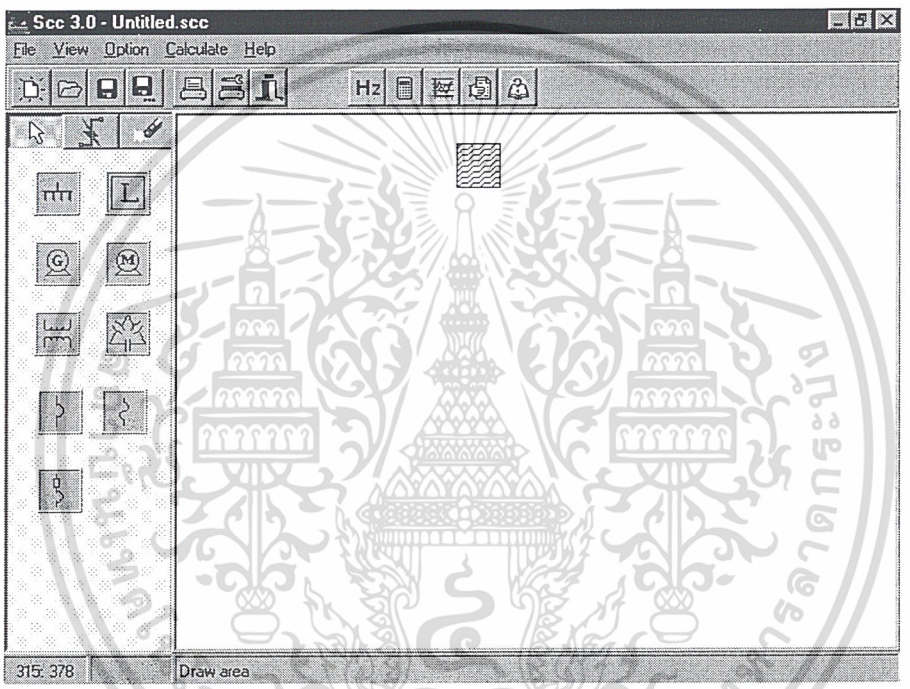


รูปที่ 3.6 โฟลว์ชาร์ทแสดงการใช้โปรแกรมการโคออดิเนทของอุปกรณ์ป้องกันแบบผู้ใช้เลือกเอง (Manual Coordinate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ซอฟแวร์เดลไฟ (Delphi)

เดลไฟคือ Borland Delphi for Windows ซึ่งเป็นทั้งคอมพายเลอร์ภาษาปาสคาล เอดิเตอร์ และประกอบด้วยยูทิลิตี้ต่าง ๆ เพื่อการโปรแกรมกับวินโดว์ด้วยวิธีวิชวล (visual programming) คือด้วยการกำหนดคอมโปเนนต์(component)แล้ว เสริมด้วยโปรแกรมในภาษาปาสคาล



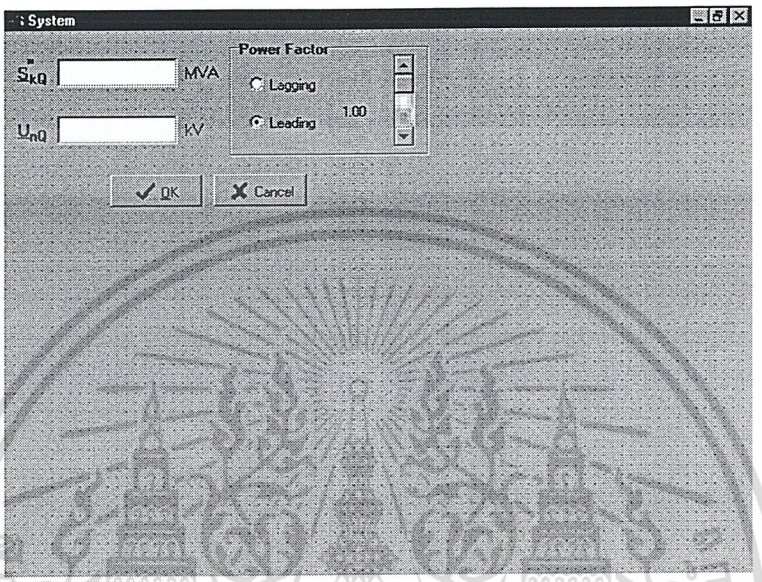
รูปที่ 3.7 พื้นที่ที่ใช้งานในการเขียนวงจรเพื่อหาค่ากระแสลัดวงจร

1.3.1 ลำดับขั้นตอนในการใช้ในการใช้ซอฟแวร์เพื่อหาค่ากระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกัน มีดังนี้

1. จากรูปที่ 43 วาดวันไลน์ไดอะแกรม
2. ใส่ข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ครบ
3. กดเครื่องหมายคำนวณ
4. นำหัวลูกศรไปวางที่จุดต่าง ๆ ที่ต้องการทราบเมื่อคำนวณเรียบร้อยแล้ว

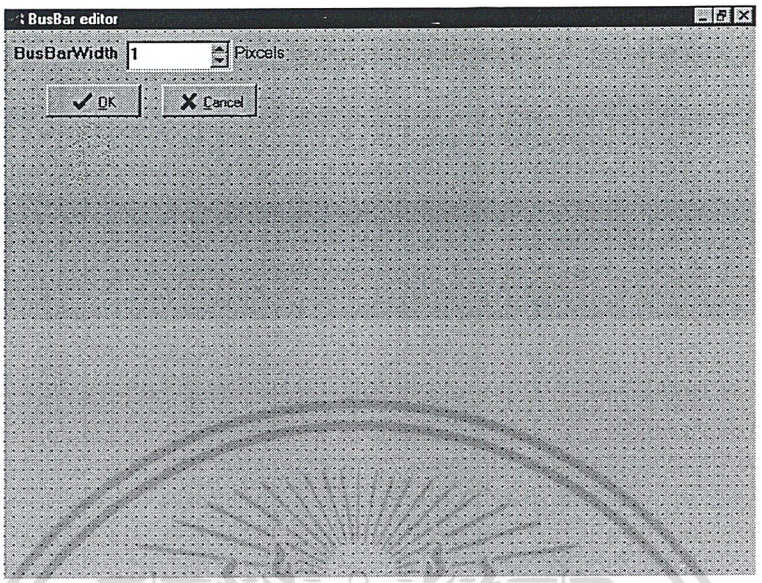
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการโคออดิเนชั่นโดยการกดปุ่มแสดงการทำงานร่วมกันก็จะทราบลักษณะการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ซึ่งมี2แบบคือแบบให้เลือกเองกับแบบอัตโนมัติ

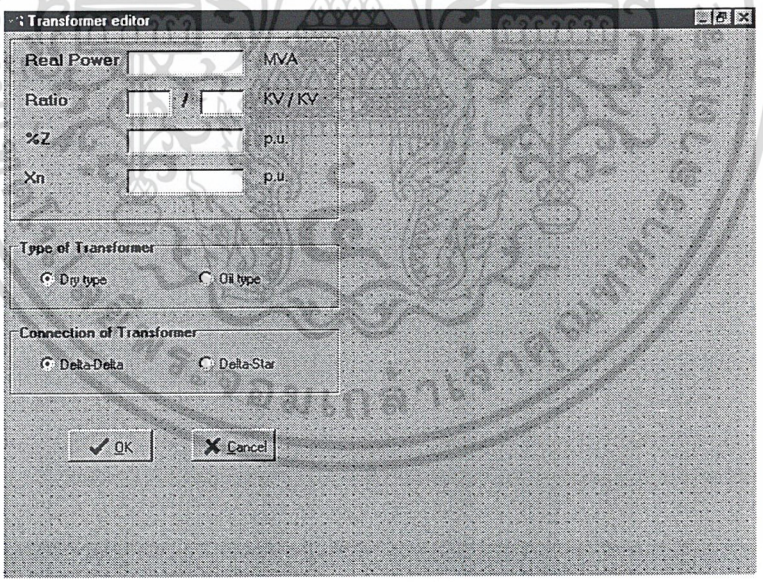


รูปที่ 3.8 หน้าจอที่ใช้ในการป้อนค่าของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

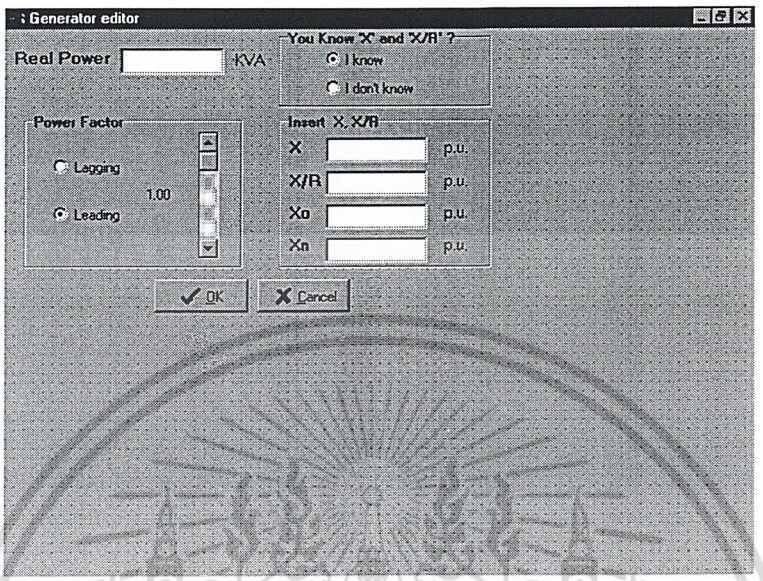


รูปที่ 3.9 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของบัสบาร์

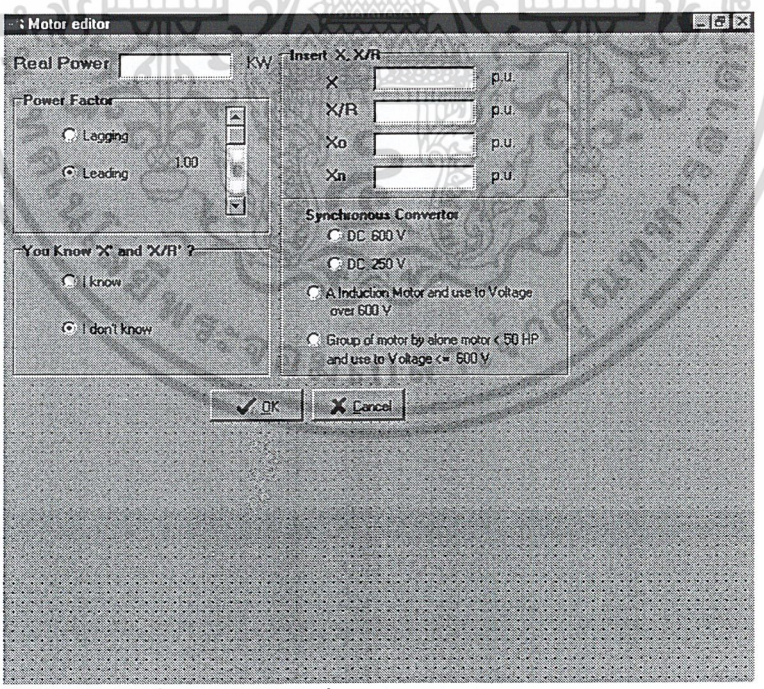


รูปที่ 3.10 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

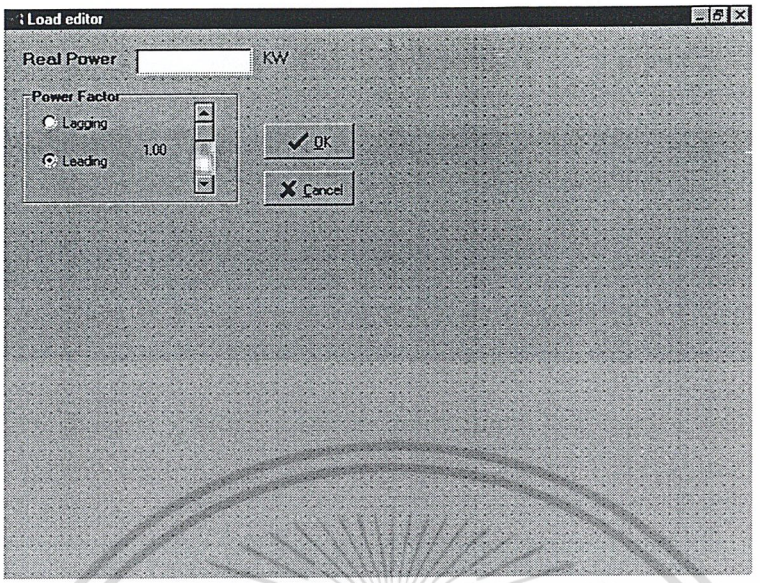


รูปที่ 3.11 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.12 หน้อจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 หน้าจอที่ใช้ในการใส่ข้อมูลของโหลด

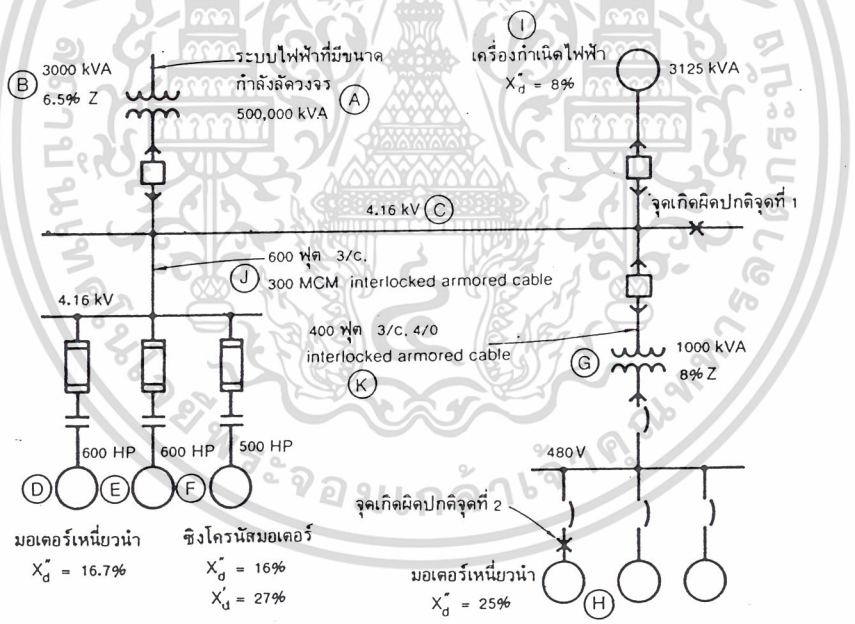
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองจะนำรูปวงจรจากเอกสารอ้างอิงของ IEEE Transactions on Industry Applications และจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 7 มาใช้ในการทดสอบโปรแกรมและหาค่าเปอร์เซนต์ความแตกต่าง ดังนี้

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 7 หน้า184



รูปที่ 4.1 ระบบ Sample System ที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม

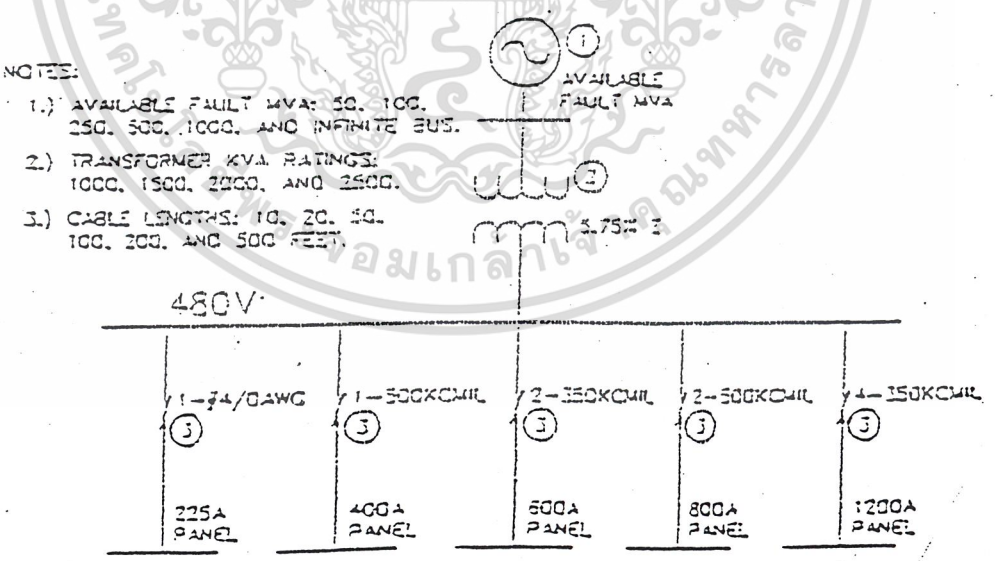
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 1

คำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

ตำแหน่งที่เกิด Fault	ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตร (kA)		% ความแตกต่าง	ค่ากระแสลัดวงจร 1 เฟส-กราวด์(kA)
	จากเอกสารอ้างอิง	จากโปรกแกรม		
F1	-	6.4	-	0
F2	13.2	15.3	16.3	13.2
F3	13.2	15.3	16.3	13.2
F4	-	15.03	-	12.9
F5	-	15.03	-	12.9
F6	-	15.03	-	12.9
F7	-	15.04	-	0
F8	17	18.06	6.3	18.4

ตัวอย่างที่2 จากเอกสารอ้างอิง IEEE Transactions on Industry Applications vol.32,No.2March/April 1996 (ซึ่งเป็นตัวอย่าง Single Line Diagram ที่ใช้ในงานระบบจริง)



รูปที่ 4.2 ระบบ Sample System ที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างทดสอบโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 2

คำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

2000 KVA Transformer High Side with Infinite Bus					
บัสต่างๆ ที่เกิดฟอลต์	ระยะห่างของจุดฟอลต์กับหม้อแปลง	ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตร (KA)			ค่ากระแสลัดวงจร1เฟส-กราวด์ (kA)
		จากเอกสาร	โปรแกรม	% ความแตกต่าง	
Transformer Secondary	-	41.8	41.83	-	-
225 A.Panel (1-#4/0 AWG)	100ft.	22.3	23.36	5.8	23.2
	200ft.	14.7	15.44	5	15.4
	500ft.	7.0	7.8	11	7.7
400 A.Panel (1-500Kcmil)	100ft.	26.5	27.29	3	26.99
	200ft.	19.1	20.13	5.4	19.48
	500ft.	10.3	11.08	7.6	10.9
600 A.Panel (2-350Kcmil)	100ft.	31.8	32.85	3.3	32.16
	200ft.	25.2	24.59	2.4	24.12
	500ft.	15.2	16.37	7.6	15.87
800 A.Panel (2-500Kcmil)	100ft.	32.6	33.62	3.1	32.89
	200ft.	26.5	28.11	6.1	27.49
	500ft.	16.7	17.55	5.1	16.89
1200 A.Panel (4-350Kcmil)	100ft.	36.3	34.41	5.2	33.87
	200ft.	31.8	30.92	7.6	30.12
	500ft.	22.8	23.86	2.3	22.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3 จากตัวอย่างที่ 2 ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 1000 HP ที่ 1200 A. Panel ที่ตำแหน่ง 100 ft.

ตาราง 4.3 บันทึกผลการทดลอง จากตัวอย่างที่ 2

คำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

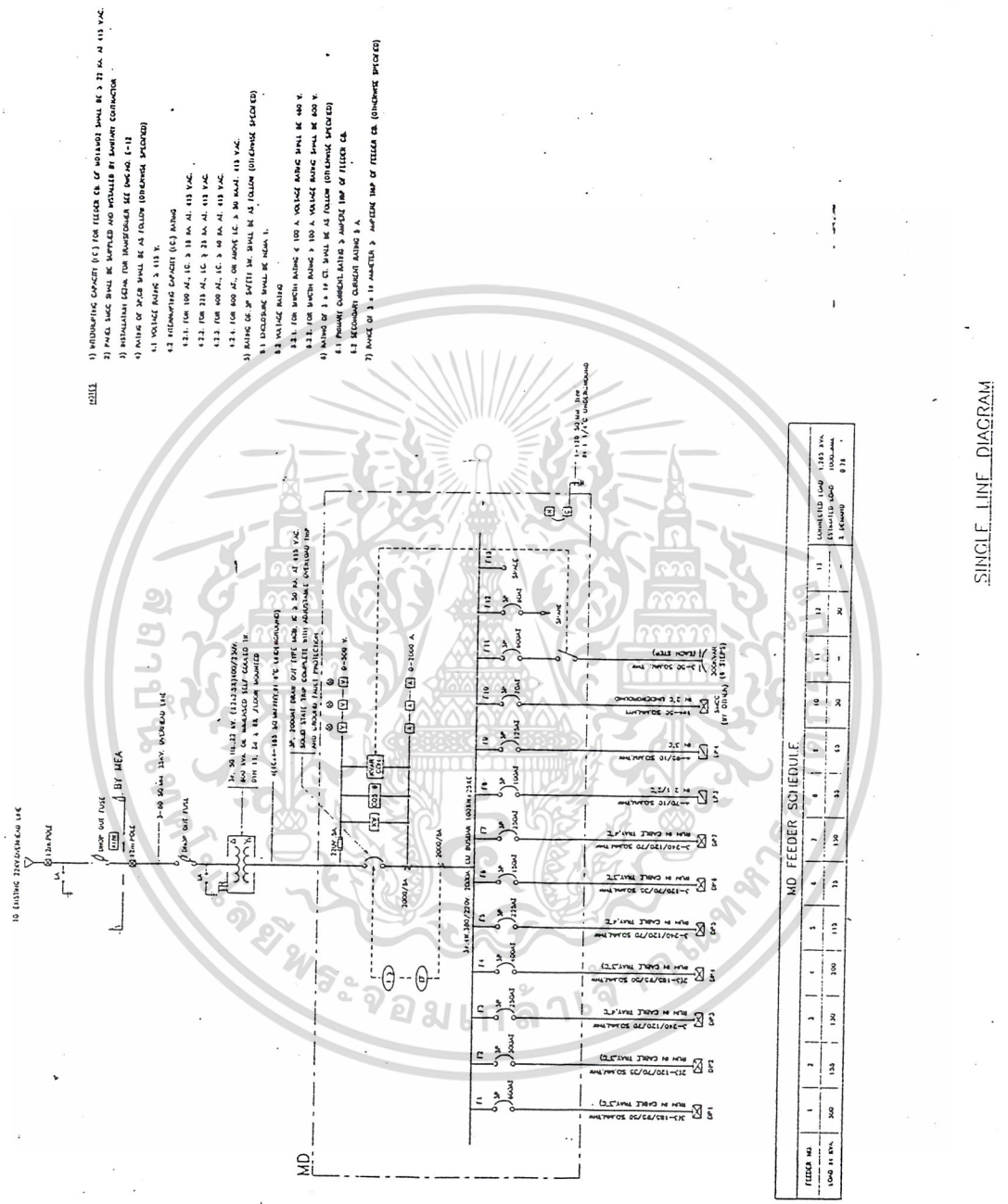
2000 KVA Transformer High Side with Infinite Bus with 1000 HP Motor Contribution,Locate at 100 ft. from 1200 A. Panel					
บัสต่างๆ ที่เกิดฟอลต์	ระยะห่างของจุดฟอลต์กับหม้อแปลง	ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมมาตร (kA)			ค่ากระแสลัดวงจร1เฟส-กราวด์ (kA)
		จากเอกสาร	โปรแกรม	% ความแตกต่าง	
Transformer Secondary	-	41.8	41.83	-	40.97
225 A.Panel	100ft.	24.0	25.79	7.4	24.89
(1-#4/0 AWG)	200ft.	15.2	16.6	9.2	15.92
	500ft.	7.1	7.6	7	7.1
400 A.Panel	100ft.	28.6	27.89	2.5	27.21
(1-500Kcmil)	200ft.	20.1	21.63	7.6	20.75
	500ft.	10.5	10.98	4.6	10.32
600 A.Panel	100ft.	35.0	36.38	3.9	35.46
(2-350Kcmil)	200ft.	27.1	28.42	4.8	27.57
	500ft.	15.8	16.54	4.7	15.48
800 A.Panel	100ft.	36.0	37.52	4.2	36.56
(2-500Kcmil)	200ft.	28.6	31.11	8.7	30.24
	500ft.	17.5	18.47	5.5	17.25
1200 A.Panel	100ft.	42.2	44.61	5.7	43.26
(4-350Kcmil)	200ft.	N/A	30.55	-	29.28
with 1000 HP.	500ft.	N/A	26.32	-	25.77

Remark

N/A หมายถึง Not Available

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ตัวอย่างที่ 4</u> จากเอกสารอิง ซึ่งเป็นตัวอย่าง Single Line Diagram ที่ใช้งานในระบบจริง



SINGLE LINE DIAGRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.4 บันทึกผลการทดลองจากตัวอย่างที่ 4

คำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

ตำแหน่ง	ขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์ใช้งาน	
	จากเอกสาร AT(A) , IC (kA)	โปรแกรม AT/AF (A) , IC (kA)
Transformer Secondary	2000 , 50	1600/2000,42
F1	600,50	600/600,35
F2	300,25	300/400,22
F3	250,25	250/250,22
F4	400,40	400/400,22
F5	225,25	225/250,22
F6	150,18	150/250,22
F7	250,25	250/250,22
F8	100,18	110/250,22
F9	125,18	125/250,22
F10	70,18	60/100,18
F11	600,50	600/600,35
F12	60,18	60/100,18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 บทสรุป

จากผลการศึกษาถึงผลกระทบของการเกิดการลัดวงจรในระบบกำลังไฟฟ้านั้นทำให้ทราบว่าเมื่อเกิดการลัดวงจรจะส่งผลเสียหายให้กับอุปกรณ์ในระบบดังนั้นการที่ได้ทราบค่ากระแสลัดวงจรตลอดจนรู้วิธีในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันก็จะทำให้ระบบมีความปลอดภัยมากขึ้นและยังสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย ในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันให้ตรงตามขนาด จากการศึกษาและทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์หาขนาดกระแสลัดวงจรจะพิจารณาที่
   1.1 ระดับแรงดันน้อยกว่า 24 KV
   1.2 การหาขนาดกระแสลัดวงจรคิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสฟอลต์
   1.3 การหาขนาดกระแสลัดวงจรคิดการลัดวงจรแบบ 1เฟส-กราวด์ ฟอลต์
   1.4 อ้างอิงมาตรฐานของ ANSI/IEEE Std.141-1986 ในการคำนวณ
2. การใช้โปรแกรมในส่วนการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันพิจารณา
   2.1 อุปกรณ์ป้องกันที่นำมาใช้ในโปรแกรม คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์
   2.2 อ้างอิงมาตรฐานของ NEC 450-3 ในการนำค่าตัวคูณมาเลือกขนาด
3. ผลการคำนวณจากทั้งสองส่วนของโปรแกรมพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงซึ่งส่วนที่คลาดเคลื่อนเนื่องมาจากผู้ป้อนไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริงของวงจร
4. จากผลการทดลองจึงพอสรุปได้ว่าโปรแกรมสามารถช่วยให้ผู้ออกแบบทำงานได้รวดเร็วและมีความถูกต้องได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

โปรแกรมในการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรและการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ไฟฟ้าตัวโปรแกรมมีข้อจำกัดอยู่บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จากการทดสอบโปรแกรมสามารถต่ออุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้มากที่สุด 19 ไลน์(feeder) ในบรานซ์เดียวกันถ้ามากกว่านี้โปรแกรมจะไม่ส่งค่าไปยังส่วนของการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าแต่ยังสามารถคำนวณกระแสลัดวงจร กระแสที่พิกัดได้
2. ในการคำนวณกระแสลัดวงจรใช้วิธีแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ซึ่งขนาดของเมทริกซ์จะมีจำนวนมากเมื่อบัสบาร์และหม้อแปลงมีจำนวนมากจึงทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนาน

ข้อเสนอแนะนี้เป็นแนวทางให้ผู้สนใจจะสามารถใช้งานโปรแกรมให้ถูกต้องมากขึ้นและพัฒนาโปรแกรมให้ทำงานได้ดีขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สามารถสำเร็จ ผ่านลุล่วงไปได้ ทางกลุ่มผู้จัดทำขอขอบทุกท่านที่มีรายนามตามข้างล่างนี้เป็นอย่างสูง

1. รศ.ศุลี บรรจงจิตร อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. คุณชาญวิทย์ ครูแก้ว หัวหน้าแผนกทดสอบเครื่องวัด กองทดสอบอุปกรณ์เครื่อง ฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง
4. คุณวิเชียร โยพันดุง วิศวกรไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. กนก กุสุมาลย์นุกูล และ ไกรวุฒิ มั่นเสถียรสิน, "คู่มือการเขียนโปรแกรม Delphi 4",บริษัทซัคเซส มีเดีย จำกัด, 2541, หน้า 428.
2. โตศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, "การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง", บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน),2540 , หน้า 648.
3. นุกูล กระจาย, "การเขียนแอปพลิเคชั่นในวินโดวส์ด้วยบอร์แลนด์ปาสคาล", บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2539, หน้า 464.
4. บุญเลิศ เอี่ยมทัศนา, "Delphi", บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2539, หน้า 376.
5. ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, "การคำนวณกระแสผิดพร่อง(Fault Calculation)", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 145.
6. มงคล เดชนครินทร์, "คณิตศาสตร์วิศวกรรมไฟฟ้า", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538 , หน้า 730.
7. ศุลี บรรจงจิตร, "หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง", บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2540, หน้า 1000.
8. Donald E. Scott, "An Introduction to Circuit Analysis: A System Approach", McGraw-Hill , Inc., 1987, P 738.
9. Geneva G. Belford and C. L. Liu, "Pascal", MaGraw-Hill, Inc., 1984, P 334.
10. I. J. Nagrath and D. P. Kothari, " Modern Power System Analysis", Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1980, P 474.
11. John J. Grainger and William D. Stevenson, Jr., "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc., 1994, P 788.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

1. นายไกรเวทย์ อุณหก้องไตรภพ
ที่อยู่ 5/4 ม.6 บางหว้า ภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160
โทร. 467-2731

2. นายมงคล กานดำรงรักษ์
ที่อยู่ปัจจุบัน 11 ซ.อาทิตย์ ถนนวุฒากาศ แขวงบางค้อ เขตจอมทอง
กรุงเทพฯ 10150
โทร. 875-5178

3. นายวีรกร วันทอง
ที่อยู่ปัจจุบัน 7/516 ม.4 ต.บางรักพัฒนา อ.บางบัวทอง
จ.นนทบุรี 11110
โทร. 921-1586

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้