

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ปีการศึกษา 2542

การวิเคราะห์ฟอลต์และออกแบบอุปกรณ์ป้องกันโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
FAULTS ANALYSIS AND PROTECTIVE DEVICE DESIGN
BY COMPUTER PROGRAM



โดย
นายชนชนะ สรรพศรี
นายณรงค์ มหัจฉริยวงศ์
นายวีระศักดิ์ แก้วโกลา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว

อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 37019
วัน, เดือน, ปี..... ๖ ๐ ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ฟอลต์และออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

นายชนชนะ สรรพศรี

นายณรงค์ มหัจฉริยวงศ์

นายวีระศักดิ์ แก้วโกศา

รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการสร้างเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์การเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ได้สร้างขึ้นเป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นสูง นั่นคือสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่ต้องการศึกษาระบบและตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้อย่างอิสระ ในส่วนการติดต่อกับผู้ใช้เป็นแบบเสมือนจริงเพื่อความสะดวกในการใช้งาน โปรแกรมที่สร้างขึ้นนี้ยังสามารถทำการเปรียบเทียบผลของการเกิดฟอลต์ ณ ตำแหน่งต่างๆ หรือความรุนแรงของฟอลต์แต่ละชนิด และยังเป็นแนวทางในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าได้

จากการทดสอบการทำงานของโปรแกรม พบว่าผลที่จากการวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วสามารถพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไปได้

FAULTS ANALYSIS AND PROTECTIVE DEVICE DESIGN BY COMPUTER PROGRAM

Chonchana Sappasree

Narong Mahajchariyawong

Weerasak Kaewpoka

Assoc.Prof. Monthon Leelachindaikaileak Advisor

Chai Chompoo-inwai Advisor

Chow Chompoo-inwai Advisor

1999

ABSTRACT

The purpose of this thesis is present the computer aided design for faults analysis in power system. This program design to be high elastic, therefore capable variously the system general, type of faults and the fault occurred position at liberty. The user can contact with program by visualize interfacing so as expediently. This program is designed to feasible comparison the fault is occurred at any bus, any fault types and guideline to protective device selection in power system.

Furthermore, the testing procedures program operated, the resultance of faults calculation is accuracy and rapidly can be developed to application in faults analysis of power system utilized henceforth.


ปริญญาโทปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การวิเคราะห์ฟอลต์และออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผู้จัดทำ

- 
1. นายชนชนะ สรรพศรี
 2. นายณรงค์ มหังกรวิวงศ์
 3. นายวีระศักดิ์ แก้วโกศา


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	2
บทที่ 2 ฟลลท์แบบสมมาตร	6
2.1 ประโยชน์ของการศึกษาการลัดวงจร	6
2.2 สาเหตุของการเกิดลัดวงจร	7
2.2.1 การลัดวงจรในสายส่งแรงสูงเหนือดิน	7
2.2.2 การเกิดลัดวงจรในสายส่งใต้ดิน	8
2.2.3 การเกิดลัดวงจรในสถานีไฟฟ้าย่อย	9
2.3 การจำลองระบบ	9
2.4 กระแสลัดวงจร	12
2.4.1 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจร ตามเวลาเนื่องจาก R, L, C	12
2.4.2 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์	14
2.4.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติ	16
2.4.4 กระแสลัดวงจรและรีเอคแตนซ์ของเครื่องจักร	17
2.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง	18
2.5.1 การหากระแสฟลลท์ด้วยแรงดันภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า	19
2.5.2 การหากระแสฟลลท์ด้วยการใช้ทฤษฎีของเทวินิน	20
2.5.3 การคำนวณกระแสฟลลท์โดยใช้อิมพีแดนซ์เมทริกซ์	22
บทที่ 3 ส่วนประกอบสมมาตร	29
3.1 แนวความคิดของส่วนประกอบสมมาตร	29
3.2 โอเปอเรเตอร์ (Operator)	32
3.2.1 โอเปอเรเตอร์ j	32
3.2.2 โอเปอเรเตอร์ a	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.3 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร	34
3.4 การพิจารณาขั้วและการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง	38
3.5 กำลังไฟฟ้าในเทอมส่วนประกอบสมมาตร	44
3.6 อิมพีแดนซ์อนุกรมที่ไม่สมมาตร	45
3.7 ลำดับของอิมพีแดนซ์และลำดับของวงจรไฟฟ้า	47
3.8 ลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโหลด	48
3.9 วงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบ	51
3.10 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์	52
3.10.1 วงจรที่มีการต่อแบบ วายโดยนิวตรอลไม่ต่อลงดิน หรือไม่ต่อกับจุดนิวตรอลอื่นๆ ในวงจร	52
3.10.2 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลต่อลงดินโดยตรง	52
3.10.3 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอล ต่อผ่านอิมพีแดนซ์ลงดิน	53
3.10.4 วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า	53
3.11 ลำดับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	54
บทที่ 4 ฟอลท์แบบไม่สมมาตร	59
4.1 การเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์กับดินที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด	63
4.2 การเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด	65
4.3 การเกิดฟอลท์ระหว่างสองไลน์กับดินที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด	68
4.4 ฟอลท์แบบไม่สมมาตรของระบบไฟฟ้ากำลัง	71
4.4.1 กระแส	71
4.4.2 แรงดัน	71
4.4.3 ลำดับวงจรไฟฟ้า	72
4.5 การเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์กับดินขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง	73
4.6 การเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์ขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง	74
4.7 การเกิดฟอลท์ระหว่างสองไลน์กับดินขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง	75
4.8 การวิเคราะห์ฟอลท์แบบไม่สมมาตรด้วยการใช้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์	76
4.9 การเกิดฟอลท์ผ่านอิมพีแดนซ์	77
4.9.1 ฟอลท์ 3 เฟสสมดุลผ่านอิมพีแดนซ์	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.9.2 ฟอลท์ระหว่างไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์	78
4.9.3 ฟอลท์ระหว่างสองไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์	80
4.9.4 ฟอลท์ระหว่างไลน์ผ่านอิมพีแดนซ์	80
บทที่ 5 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง	83
5.1 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง	83
5.2 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า	85
5.2.1 ฟิวส์	85
5.2.2 เซอร์คิตเบรกเกอร์	86
5.2.3 รีเลย์ป้องกัน	86
5.3 องค์ประกอบในการเลือกอุปกรณ์การป้องกัน	87
5.3.1 แรงดันไฟฟ้า	87
5.3.2 ความถี่ที่กำหนด	87
5.3.3 พิกัดกระแสต่อเนื่อง	88
5.3.4 พิกัดกระแสโมเมนเทรี	88
5.3.5 พิกัดกระแสช่วงระยะเวลาสั้น	88
5.3.6 พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์	88
5.3.7 พิกัดเวลา	88
5.3.8 รอบทำงาน	89
5.4 การเลือกขนาดพิกัดของเซอร์คิตเบรกเกอร์	89
5.4.1 แฟกเตอร์การคูณ	89
5.4.2 โมเมนเทรีคิวตี้ของเซอร์คิตเบรกเกอร์	90
5.4.3 อินเตอร์รัพต์ติงคาปาซิทีของเซอร์คิตเบรกเกอร์	91
5.5 ระบบป้องกัน	93
5.5.1 การป้องกันสาย	93
5.5.2 การป้องกันบัสบาร์	93
5.5.3 การป้องกันหม้อแปลง	93
5.5.4 การป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการเกิดลัดวงจรที่สายส่งเหนือดินเมื่อเกิด แฟลชโอเวอร์ที่ฉนวนลูกถ้วย	8
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง	10
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแสดงการเขียนวงจรสมมูลรีแอกแตนซ์จาก ไดอะแกรมเส้นเดียว	11
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแสดงการเขียนวงจรสมมูลรีแอกแตนซ์จาก ไดอะแกรมเส้นเดียว	11
รูปที่ 2.5 การเกิดลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.6 กระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังเกิดลัดวงจร	14
รูปที่ 2.8 กระแสลัดวงจรตามเวลา	15
รูปที่ 2.9 กระแสลัดวงจรในระบบที่คิดทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ	16
รูปที่ 2.10 กระแสลัดวงจรส่วนกระแสสลับตามเวลา	17
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายโหลดสมดุล 3 เฟส จำลองการเกิดฟอลต์ 3 เฟส โดยการปิดสวิตช์ S	19
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลเทวินินินของวงจรรูปที่ 2.11 (ข)	21
รูปที่ 2.13 การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสอ้างอิง r ไปยังบัสใหม่ p	23
รูปที่ 2.14 การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสเก่า k ไปยังบัสใหม่ p	23
รูปที่ 2.15 การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสอ้างอิง r ไปยังบัสเก่า k	24
รูปที่ 2.16 การเพิ่มบรานซ์ Z_b ระหว่างสองบัสเก่า k และ m	24
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบ	25
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 2.17	26
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน	31
รูปที่ 3.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a	34
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่กำกับ ด้วยเครื่องหมายมาตรฐานและสมมุติให้ทิศทางการ ไหลของกระแสปฐมภูมิ และ ทุติภูมิเป็นบวก	38

	หน้า
รูปที่ 3.4 การกำกับเครื่องหมายเพื่อแสดงขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า	38
รูปที่ 3.5 เครื่องหมายมาตรฐานและเฟสเซอร์ไคอะแกรมของ แรงดันสำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบ วาย-วาย และแบบ เคลด้า-เคลด้า โดยมีการเลื่อนเฟส = 0 องศา	39
รูปที่ 3.6 เฟสเซอร์ไคอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการ การต่อขดลวดแบบ วาย-เคลด้าด้วยการกำกับเครื่องหมาย มาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30 องศา	40
รูปที่ 3.7 เฟสเซอร์ไคอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการ ต่อขดลวดแบบ เคลด้า-วาย ด้วยการกำกับเครื่องหมาย มาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30 องศา	40
รูปที่ 3.8 เฟสเซอร์ไคอะแกรมลำดับลบ สำหรับหม้อแปลงที่มีการ ต่อแบบวาย-เคลด้า ตามรูป 6.7	41
รูปที่ 3.9 วิธีการสำหรับการกำกับเฟสทางด้านแรงดันของหม้อแปลง ที่มีการต่อแบบวาย-เคลด้า หรือ เคลด้า-วาย	42
รูปที่ 3.10 เฟสเซอร์ไคอะแกรมลำดับบวกและลำดับลบตามการ กำกับเฟสเป็น b-c-a ของรูป 3.10	43
รูปที่ 3.11 อิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบสามเฟสที่มีค่าไม่เท่ากัน	46
รูปที่ 3.12 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้ต่อโหลดและ จุดนิวตรอลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกเตอร์แรงดัน เหนี่ยวนำในแต่ละเฟสคือ E_a , E_b และ E_c	48
รูปที่ 3.13 การไหลของกระแสของแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า (ก), (ข) และ (จ) แสดง การไหลของกระแสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ตาม ลำดับส่วน (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงวงจรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ตามลำดับ	49
รูปที่ 3.14 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลไม่ต่อลงดิน	52
รูปที่ 3.15 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลต่อลงดิน	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 3.16 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย	52
โดยนิวตรอลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน	53
รูปที่ 3.17 วงจรลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า	54
รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของชุดหม้อแปลง 3 เฟส ที่ประกอบด้วย	
ไดอะแกรมการต่อขดลวดและสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพเส้นเดียว	55
รูปที่ 3.19 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลังและวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์	
ที่สอดคล้องกัน	57
รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้าเกิดลัดวงจรเฟส-ดิน	60
รูปที่ 4.2 หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลัดวงจร	62
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมของการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน ที่ขั้วเฟส a ของ	
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิวตรอลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกแตนซ์	63
รูปที่ 4.4 การต่อลำดับของวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้	
จ่ายโหลดเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่าง ไลน์กับดินที่ขั้วของเฟส a	65
รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมของการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ของเฟส b และ	
เฟส c ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่ได้จ่ายโหลด	66
รูปที่ 4.6 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่าย	
โหลดและเกิดฟอลต์ที่ขึ้นระหว่างไลน์ที่ขั้วของเฟส b และเฟส c	68
รูปที่ 4.7 ไดอะแกรมของการเกิดฟอลต์ระหว่างสอง ไลน์กับดินที่ขั้วเฟส b	
และเฟส c ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่ได้จ่ายโหลด	70
รูปที่ 4.8 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลด	
และเกิดฟอลต์ระหว่างสอง ไลน์ที่ขั้วของเฟส b และเฟส c กับดิน	71
รูปที่ 4.9 สายตัวนำของระบบ 3 เฟส ที่แสดงทิศทางการไหลของกระแส	
จากแต่ละเฟสไปยังจุดที่เกิดฟอลต์โดยกระแสนี้อาจจะไหลต่อ	
เชื่อมกันตามชนิดของฟอลต์	72
รูปที่ 4.10 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้า 3 เฟสสมดุล	72
รูปที่ 4.11 วงจรไฟฟ้าลำดับบวก ลบ และลำดับศูนย์ของระบบไฟฟ้า	
3 เฟส และวงจรสมมูลเทวินินของวงจรไฟฟ้าแต่ละลำดับ	
โดยเกิดฟอลต์ในระบบที่จุด F	74

	หน้า
รูปที่ 4.12 การไหลของกระแสเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน ชั้นระหว่างระบบ ไฟฟ้ากำลัง	74
รูปที่ 4.13 การไหลของกระแสเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ขึ้นที่ระบบ ไฟฟ้ากำลัง	75
รูปที่ 4.14 การไหลของกระแสเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินขึ้นที่ ระบบ ไฟฟ้ากำลัง	75
รูปที่ 4.15 การต่อของบัสอิมพีแดนซ์สมมูลตามลำดับวงจรของระบบ 3 เฟส สำหรับจำลองการเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ	76
รูปที่ 4.16 โคอะแกรมแสดงการไหลของกระแส เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ ผ่านอิมพีแดนซ์	77
รูปที่ 4.17 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ 3 เฟสสมดุลผ่านอิมพีแดนซ์	78
รูปที่ 4.18 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ระหว่าง ไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์	79
รูปที่ 4.19 พิจารณาวงจร ไฟฟ้าของฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์	80
รูปที่ 4.20 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ระหว่าง ไลน์ผ่านอิมพีแดนซ์	81
รูปที่ 5.1 เส้นโค้งแฟกเตอร์การคูณที่สอดคล้องกับการลดลงของส่วนประกอบ กระแสตรงตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน X/R ต่าง ๆ กัน	90
รูปที่ 6.1 การทำงานของโปรแกรมหลัก	97
รูปที่ 6.2 การสร้างระบบ ไฟฟ้า	98
รูปที่ 6.3 การตรวจสอบระบบ ไฟฟ้า	99
รูปที่ 6.4 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร	102
รูปที่ 6.5 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร	103
รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดฟอลต์การเกิดฟอลต์	105
รูปที่ 6.7 การเลือกเมนู ไฟล์และเมนูย่อยในเมนูไฟล์	107
รูปที่ 6.8 การเลือกเมนูอิติคและเมนูย่อยในเมนูอิติค	108
รูปที่ 6.9 การเลือกเมนูทูลและเมนูย่อยในเมนูทูล	108
รูปที่ 6.10 การเลือกเมนูวิเคราะห์และเมนูย่อยในเมนูวิเคราะห์	109
รูปที่ 6.11 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	109
รูปที่ 6.12 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า	110
รูปที่ 6.13 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า	110
รูปที่ 6.14 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 6.15 หน้าต่างการสร้างบัสไฟฟ้า	111
รูปที่ 6.16 การกำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้า	112
รูปที่ 6.17 การสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์	113
รูปที่ 6.18 การวิเคราะห์ฟลลท์แบบสมมาตร	114
รูปที่ 6.19 การวิเคราะห์ฟลลท์แบบไม่สมมาตร	115
รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดฟลลท์	116
รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างที่ 1	119
รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างที่ 1	120
รูปที่ 7.3 วงจรสมมูลที่บัสเกิดฟลลท์ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1	121
รูปที่ 7.4 วงจรสมมูลเมื่อแปลงจากเคลค่าเป็นสคาร์ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1	122
รูปที่ 7.5 วงจรสมมูลเมื่อทำการแปลงอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1	122
รูปที่ 7.6 การไหลของกระแสในจุดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1	123
รูปที่ 7.7 สร้างระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 1	124
รูปที่ 7.8 เบสของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1	124
รูปที่ 7.9 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ของตัวอย่างที่ 1	125
รูปที่ 7.10 ผลการคำนวณฟลลท์ในตัวอย่างที่ 1	126
รูปที่ 7.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบฟลลท์แต่ละแบบที่บัสต่าง ๆ	127
รูปที่ 7.12 ระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างที่ 2	128
รูปที่ 7.13 เน็ตเวิร์คลำดับบวกของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2	129
รูปที่ 7.14 เน็ตเวิร์คลำดับลบของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2	129
รูปที่ 7.15 เน็ตเวิร์คลำดับศูนย์ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2	129
รูปที่ 7.16 สร้างระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 2	131
รูปที่ 7.17 เบสของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 2	131
รูปที่ 7.18 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับบวกของตัวอย่างที่ 2	132
รูปที่ 7.19 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับลบของตัวอย่างที่ 2	132
รูปที่ 7.20 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับศูนย์ของตัวอย่างที่ 2	133
รูปที่ 7.21 ผลการคำนวณฟลลท์ในตัวอย่างที่ 2	133
รูปที่ 7.22 กราฟเปรียบเทียบฟลลท์แต่ละแบบที่บัสต่าง ๆ	134
รูปที่ 7.23 สร้างระบบไฟฟ้า จากตารางตัวอย่างที่ 3	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 7.24 เมสของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3	137
รูปที่ 7.25 บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เปอร์ยูนิตของเน็ตเวิร์คลำดับบวก ในตัวอย่างที่ 3	138
รูปที่ 7.26 บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เปอร์ยูนิตของเน็ตเวิร์คลำดับลบ ในตัวอย่างที่ 3	138
รูปที่ 7.27 บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เปอร์ยูนิตของเน็ตเวิร์คลำดับศูนย์ ในตัวอย่างที่ 3	139
รูปที่ 7.28 ผลของฟลทท์ที่บัส 1 ในตัวอย่างที่ 3	139
รูปที่ 7.29 ผลของฟลทท์ที่บัส 4 ในตัวอย่างที่ 3	140
รูปที่ 7.30 โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟลทท์ที่บัสต่าง ๆ	141
รูปที่ 7.31 ระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างที่ 4	142
รูปที่ 7.32 เน็ตเวิร์คบวกและลบของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4	142
รูปที่ 7.33 เน็ตเวิร์คศูนย์ของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4	142
รูปที่ 7.34 สร้างระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4	145
รูปที่ 7.35 เมสของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4	145
รูปที่ 7.36 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับบวกตัวอย่างที่ 4	146
รูปที่ 7.37 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับลบของตัวอย่างที่ 4	146
รูปที่ 7.38 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับศูนย์ของตัวอย่างที่ 4	147
รูปที่ 7.39 ผลการคำนวณฟลทท์ที่บัส 2 ในตัวอย่างที่ 4	147
รูปที่ 7.40 โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟลทท์ที่บัส 2 ในแบบต่าง ๆ	148
รูปที่ 7.41 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง ในตัวอย่างที่ 5	149
รูปที่ 7.42 ลำดับของวงจรไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 7.41	151
รูปที่ 7.43 สร้างระบบไฟฟ้าจากตารางข้อมูลในตัวอย่างที่ 5	153
รูปที่ 7.44 เมสของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 5	153
รูปที่ 7.45 คำนวณหาค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ของระบบในตัวอย่างที่ 5	154
รูปที่ 7.46 ผลของฟลทท์สามเฟสที่บัส 1 ในตัวอย่างที่ 5	154
รูปที่ 7.47 ผลของฟลทท์ไลน์ลงดินที่บัส 1 ในตัวอย่างที่ 5	155
รูปที่ 7.48 โปรแกรมเปรียบเทียบฟลทท์สามเฟสที่แต่ละบัส ในตัวอย่างที่ 5	155
รูปที่ 7.49 โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟลทท์ไลน์ลงดินที่บัสต่าง ๆ ในตัวอย่างที่ 5	156
รูปที่ 7.50 เปรียบเทียบการคำนวณปกติกับ การคำนวณ โดยใช้โปรแกรม	156

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันของโอเปอเรเตอร์ a	33
ตารางที่ 4.1 รูปแบบและ โอกาสของการเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตร	59
ตารางที่ 5.1 แฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับกระแสขั้วทรานเซียนต์เพื่อคำนวณ หาค่ากระแสโมเมนเทรีที่ซอร์สรีกิตเบรคเกอร์ต้องทนทานได้	91
ตารางที่ 7.1 ข้อมูลเครื่องจักรซิง โครนัสสำหรับตัวอย่างที่ 3	135
ตารางที่ 7.2 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 3	135
ตารางที่ 7.3 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 3	135
ตารางที่ 7.4 กระแสและแรงดันฟอลต์ในตัวอย่างที่ 3	136
ตารางที่ 7.5 ข้อมูลของระบบ ไฟฟ้ากำลังสำหรับรูปที่ 7.41	150
ตารางที่ 7.6 แสดงผลของฟอลต์ที่บัสต่าง ๆ โดยเกิดฟอลต์สมมาตรสามเฟส และฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน	152

บทที่ 1 บทนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าที่คืบหน้าไม่ได้หมายถึงระบบที่มีการผลิตและการจ่ายไฟได้อย่างเดียวเมื่อต้องการ โหลดแต่ต้องมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถป้องกันหรือทนต่อเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นได้โดยไม่เสียหายด้วย การเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นเรื่องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้หมดและมีสาเหตุของการเกิดได้หลายประการ เช่น ไฟฟ้าลัดวงจร และสายส่งเกิดแฟลชโอเวอร์ (Flash Over) ที่ฉนวนลูกถ้วย การเกิดคลื่นสวิตชิ่ง และการเกิดอาร์คระหว่างสายกับสาย หรือสายกับเสาส่ง กิ่งไม้พาดสายในระบบจำหน่าย ชาวบ้านยิงลูกถ้วยเล่น เป็นต้น

การเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันประเภทเซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือฟิวส์ควรถueจะสามารถตัดไฟได้อย่างปลอดภัยโดยอุปกรณ์ไม่เสียหาย กรณีที่เลือกขนาดของอุปกรณ์ผิด เมื่อเกิดการลัดวงจรรุนแรงขึ้นอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวอาจเสียหายและไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก ดังนั้นการศึกษาและวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้าก็เพื่อเลือกอุปกรณ์ให้สามารถตัดกระแสลัดวงจรได้อย่างปลอดภัย

การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีทั้งการลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical Fault) หรือเรียกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบสาย-สาย (Line-to-Line Fault) สาย-ดิน (Line-to-Ground Fault) และ สาย-สาย-ดิน (Double Line-to-Ground Fault) การลัดวงจรแบบสมมาตร ไม่ได้รุนแรงกว่า การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรเสมอไป ในระบบสายส่งการลัดวงจรแบบไม่สมมาตรอาจรุนแรงกว่า การลัดวงจรแบบสมมาตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ในระบบ และการต่อขดลวดที่หม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนในระบบจำหน่ายแรงต่ำการลัดวงจรแบบสมมาตรให้กระแสลัดวงจรรุนแรงกว่า การลัดวงจรแบบไม่สมมาตร แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์การเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตรก็ยังคงมีความจำเป็นอยู่เหมือนกัน เพราะการพิจารณาเรื่องอาร์คซึ่งฟอลต์ (Arcing Fault) หรือการป้องกันเพลิงไหม้อันเนื่องมาจากฟอลต์ลงดินก็ยังคงต้องใช้การคำนวณกระแสลัดวงจรลงดินเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากในปัจจุบัน โครงข่ายของระบบไฟฟ้ากำลังมีการขยายตัวอย่างมากเพื่อรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมในประเทศ ดังนั้นการศึกษาทางด้านไฟฟ้ากำลังจึงได้รับความสนใจสูงขึ้น โดยเฉพาะการวิเคราะห์เกี่ยวกับความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง แต่เดิมได้มีการทำโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ลัดวงจรในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบสมมาตรเท่านั้น เพื่อดูว่าความรุนแรงของความผิดปกติมีขนาดมากเพียงใด เพื่อนำไปหาพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ แต่ยังไม่ครอบคลุมถึงฟอลต์อีกแบบคือ ฟอลต์แบบไม่สมมาตร ซึ่งความรุนแรงไม่ได้น้อยกว่าฟอลต์แบบสมมาตรเสมอไป แต่โอกาสในการเกิดฟอลต์แบบสมมาตรมีน้อยกว่า หากแต่การคำนวณฟอลต์แบบไม่สมมาตรมีการคำนวณที่ยุ่ยากเมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

ซึ่งในโครงการเรื่องนี้ได้มีการวิเคราะห์และคำนวณฟอลต์แบบไม่สมมาตรเพื่อหากระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าในการเกิดความผิดปกติเพื่อศึกษาถึงความรุนแรงของฟอลต์ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรและนำมาเปรียบเทียบกันได้ลำดับต่อไป เพื่อใช้ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมมาใช้ได้ รวมทั้งจะเป็นการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้สามารถใช้งานในระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98 ได้และง่ายต่อการศึกษาเรื่องฟอลต์ในระบบไฟฟ้ามากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดการผิดปกติ และการเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ศึกษาวิธีการใช้งาน และนำมาประยุกต์ใช้งาน โปรแกรมคอมพิวเตอรืบอร์แลนด์ เดลไฟ 4.0 (Borland Delphi 4.0)
- 3) นำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอรื เดลไฟ 4.0 มาประยุกต์ใช้กับการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังและเป็นแนวทางในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันในเบื้องต้น
- 4) เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นระบบใหญ่ๆ
- 5) เป็นต้นแบบโปรแกรมสำเร็จรูป การวิเคราะห์ความผิดปกติ (Fault Analysis) สำหรับการศึกษาทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง นำไปใช้งาน หรือ เพื่อการพัฒนาต่อไป
- 6) เพื่อสร้างโปรแกรมทางด้านไฟฟ้ากำลังให้สามารถนำมาศึกษาและใช้งานได้ง่ายสำหรับผู้ที่ต้องการเริ่มต้นศึกษา

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการคำนวณการฟอลท์ในระบบไฟฟ้านี้ จะศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณฟอลท์ ทั้งฟอลท์แบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความผิดปกติของระบบไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ จากการจำลองระบบที่เกิดผิดปกติในลักษณะวิหวล โปรแกรมที่ใช้งานแสดงเป็นกราฟฟิก และสามารถนำค่าที่คำนวณ ไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ฟอล์ทแบบสมมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ฟอลท์แบบสมมาตร

การศึกษาเรื่องการเกิดฟอลท์เป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าแรงสูง ฟอลท์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกันหลายแบบและสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่คือ ฟอลท์แบบสมมาตรและฟอลท์แบบไม่สมมาตร ฟอลท์แบบสมมาตรเป็นที่รู้จักกันดีคือ ฟอลท์สามเฟส ส่วนฟอลท์แบบไม่สมมาตรได้แก่ ฟอลท์ระหว่างเฟส-เฟส เฟส-ดิน หรือเฟส-เฟส-ดิน ในที่นี้จะกล่าวถึงความจำเป็นในการศึกษาเรื่องฟอลท์ สาเหตุของการเกิดฟอลท์ซึ่งจะรวมทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร และจะกล่าวถึงวิธีคำนวณหากระแสฟอลท์ซึ่งจะรวมทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ในระบบไฟฟ้า

2.1 ประโยชน์ของการศึกษาฟอลท์

ฟอลท์ในระบบแรงสูง เป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งจาก ธรรมชาติหรือความผิดพลาดหรือองใจของมนุษย์ทุกครั้งที่เกิดลัดวงจรภายในระบบจะมีกระแสไหลมากผิดปกติและถ้าไม่มีการป้องกันหรือขจัดจุดที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบให้เร็วที่สุดก็จะทำให้ อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบเสียหายได้เนื่องจากกระแสจำนวนมากที่ไหลผ่าน ดังนั้น อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบแรงสูงและแรงต่ำไม่ว่าจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สาย เป็นต้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ หรือเบรกเกอร์

การศึกษาลัดวงจรประกอบด้วยการคำนวณหาขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นว่ามี ความรุนแรงมากน้อยเพียงใด เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม เช่น ฟิวส์หรือเบรกเกอร์ คำว่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวต้องมีความสามารถในการตัดวงจร ออกจากระบบและสามารถป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดความเสียหายโดยสามารถยังนำมาใช้งานได้เหมือนเดิม โดยต้องมีความสามารถในการตัดกระแสลัดวงจรไม่สูงเกินความจำเป็นซึ่งเปลือง เงินลงทุน อุปกรณ์ป้องกันที่สามารถตัดกระแสลัดวงจร ได้สูง ๆ มีราคาแพงมากตามความเร็ว ยิ่งตัด ได้เร็วยิ่งมีราคาแพงมาก ดังนั้น การเลือกอุปกรณ์ในทรศนะของวิศวกรผู้ออกแบบที่ดีคือ ต้องเลือก อุปกรณ์ที่เหมาะสมและประหยัด ไม่ใช่เลือกอุปกรณ์แบบเผื่อมากเกินไป หรือเลือกของที่ดีที่สุดหรือ แพงที่สุดไว้ก่อนซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้องเพราะเกินความจำเป็นไปนั่นเอง

ประโยชน์ของการศึกษาลัดวงจรพอจะกล่าวสรุปได้ดังนี้คือ คำนวณหากระแสลัดวงจร เพื่อให้ประกอบการเลือกอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ เบรกเกอร์ รีเลย์ เป็นต้น อย่างมีประสิทธิภาพคือ เอกสารประกอบแบบคำนวณลัดวงจรป้องกันซึ่งให้ค่าการลัดวงจรเมื่ออยู่ในพื้นที่จริงจะช่วยให้เห็นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนของระบบเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับจุดลัดวงจรออกให้น้อยที่สุดเพื่อไม่ให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องเดือดร้อนในเรื่องดังกล่าว

2.2 สาเหตุของการเกิดลัดวงจร

ฟอลต์เป็นปรากฏการณ์ทางสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่คือ ฟอลต์อนุกรม (series fault) และฟอลต์ขนาน (shunt fault) ฟอลต์อนุกรมเป็นสภาวะผิดปกติในเฟส (phase) ของระบบ เช่น สายส่งขาดหรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือสองเฟส เป็นต้น ส่วนฟอลต์ขนานเป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับกราวด์ (ground) ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบต่าง ๆ ฟอลต์ขนานมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าฟอลต์อนุกรม เพราะกระแสที่เกิดขึ้นในฟอลต์ขนานมีขนาดสูงมากและทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมากในอุปกรณ์ ถ้าหากไม่กำจัดฟอลต์ออกจากระบบ ดังนั้น การวิเคราะห์ระบบส่วนใหญ่จึงเน้นหนักไปทางด้านการลัดวงจรเมื่อพูดถึงเรื่องฟอลต์ แต่ความจริงแล้วควรคำนึงถึงฟอลต์ทั้งสองอย่าง เพราะฟอลต์อนุกรมก็มีผลทำให้การส่งจ่ายไฟทำได้น้อยลงหรือต้องหยุดชะงัก การศึกษาฟอลต์ขนานก็เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรและขนาดของอุปกรณ์ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบการป้องกัน เช่น รีเลย์ต่าง ๆ ส่วนการศึกษาฟอลต์อนุกรมนั้นมีประโยชน์เมื่อต้องกาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

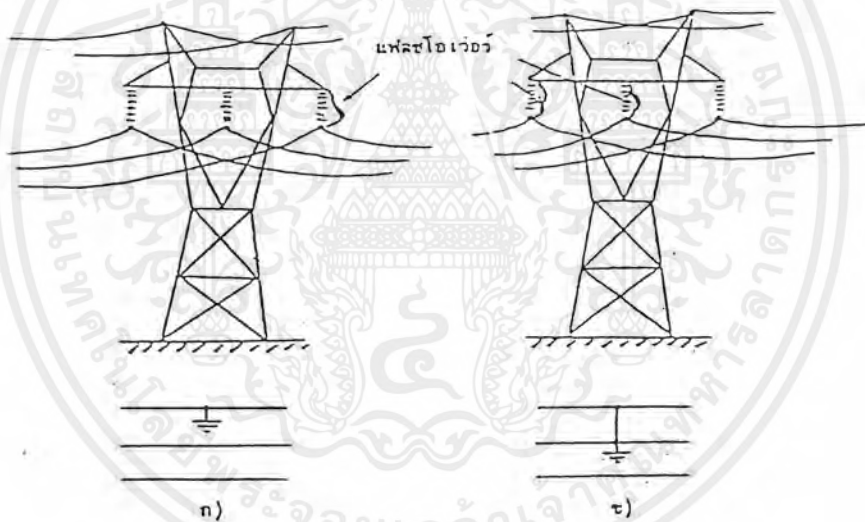
การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดขึ้นในช่วงไหนของระบบก็ได้แต่ส่วนใหญ่เกิดในสายส่งเหนือดิน (overhead) ประมาณ 50-70% นอกนั้นเป็นฟอลต์ในสายส่งใต้ดิน หม้อแปลงสถานีย่อย ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเริ่มแรกเกือบทั้งหมดเป็นฟอลต์แบบขนานหรือการลัดวงจร [9]

2.2.1 การลัดวงจรในสายส่งแรงสูงเหนือดิน

ส่วนใหญ่เกิดเนื่องมาจากฟ้าผ่า หรือการปิดเปิดวงจรซึ่งทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าเกินอัตรา (overvoltage) ขึ้นในสายส่งและถ้าฉนวนลูกถ้วยทนต่อศักดาไฟฟ้าเหล่านี้ไม่ได้ก็เกิดแฟลชโอเวอร์จากสายผ่านฉนวนลูกถ้วยลงดินไปตามเสาส่ง บางท่านอาจสงสัยว่าทำไมไม่ใส่จำนวนลูกถ้วยมากขึ้นไปอีกเพื่อป้องกันการเกิดแฟลชโอเวอร์ที่เกิดจากศักดาไฟฟ้าเกินอัตราสูงมาก ๆ มีจำนวนที่เกิดขึ้นน้อย การออกแบบว่าควรใช้จำนวนลูกถ้วยเท่าใดนั้นที่เป็นอยู่ปัจจุบันก็พยายามที่จะป้องกันศักดาไฟฟ้าเกินอัตราที่เกิดขึ้นมากกว่า 50% จำนวนลูกถ้วยที่ใช้ก็เพิ่มจำนวนขึ้นจนถึงจุดที่ว่าค่าลงทุนจำนวนลูกถ้วยที่เพิ่มและเสาส่งที่ต้องรับน้ำหนักมากเกินไปจนต้องยอมให้อุปกรณ์ในระบบเสียหายบ้างเวลาเกิดศักดาไฟฟ้าเกินอัตราสูงมากจริง ๆ ดังนั้น ในระบบสายส่งที่เป็นอยู่ในปัจจุบันจึงมีการลัดวงจรเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีศักดาไฟฟ้าเกินอัตราสูง ๆ เกิดขึ้น

การลัดวงจรในสายส่งเหนือดินไม่ว่าในระบบไฟฟ้าแรงสูงหรือในระบบจำหน่ายก็เกิดขึ้นมากเนื่องจากฉนวนลูกถ้วยสกปรก เพราะฝุ่นผงเกาะมากหรือคราบเกลือเกาะอยู่ เช่น ในกรณีสายส่งที่เดินใกล้ชายฝั่งทะเล เป็นต้น สาเหตุดังกล่าวทำให้ความทนต่อศักดาไฟฟ้าเกินอัตราของฉนวนลูกถ้วยลดลงมากและเกิดแฟลชโอเวอร์ได้ง่ายขึ้น รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการเกิดลัดวงจรของสายส่งเหนือดินเนื่องจากแฟลชโอเวอร์ที่ฉนวนลูกถ้วย

การเกิดลัดวงจรในสายส่งเหนือดินในระบบจำหน่ายก็มีสาเหตุของการเกิดต่างจากระบบสายส่งแรงสูงเหนือดินบ้างเพราะในระบบจำหน่ายมีระดับศักดาไฟฟ้าของสายไม่สูงมากนัก ระดับสายจึงสูงจากพื้นดินไม่มาก ดังนั้นสาเหตุของการลัดวงจรอื่น ๆ นอกเหนือจากศักดาไฟฟ้าเกินอัตราแล้วก็มี เนื่องจากต้นไม้ไปพาดถูกสายบ้างแล้วเกิดลัดวงจรลงดิน ฉนวนลูกถ้วยแตกเนื่องจากถูกปืนชาวบ้านบ้าง รถเครนหรือปั้นจั่น ไปเกี่ยวเอาสายที่เดินพาดเหนือถนนบ้าง เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการเกิดลัดวงจรที่สายส่งเหนือดินเมื่อเกิดแฟลชโอเวอร์ที่ฉนวนลูกถ้วย

- ก) การลัดวงจรระหว่างเฟสกับกราวด์
- ข) การลัดวงจรระหว่างเฟสกับเฟสลงกราวด์

2.2.2 การเกิดลัดวงจรในสายส่งใต้ดิน (underground)

ส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากความชื้นที่เข้าไปข้างในสายและทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของเคเบิลเสื่อมลงมากจนเกิดการเบรคไดแวนซ์ของฉนวนและลัดวงจรได้ นอกจากนี้รอยต่อ (splicing) ของสายเคเบิลก็เป็นจุดที่มีการเกิดลัดวงจรเกิดขึ้นได้ถ้าหากต่อเข้ากันไม่ดี ความชื้นอาจเกิดขึ้นภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในได้ง่ายหรืออาจเกิดโคโรนาและการเกิดการกระทบของ ไอออนที่เกิดจากดีสชาร์จจนจนจนเกิดเบรคดาวน์

2.2.3 การเกิดลัดวงจรในสถานีไฟฟ้าย่อย

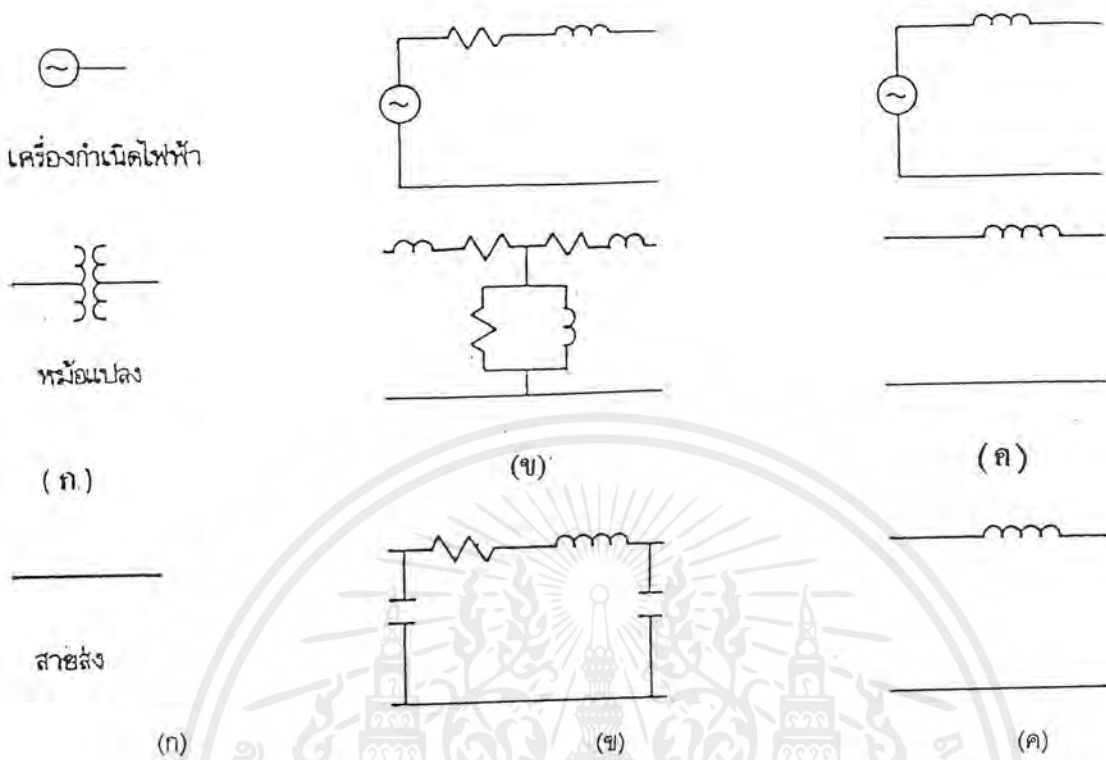
ในระบบหรือในโรงงานเกิดเนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน อาจเกิดเนื่องจากลัดตัว เช่น หมูแมว หรือนกที่เข้าไปในสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วไปพาดระหว่างเฟสของระบบไฟฟ้าหรือระหว่างเฟสกับกราวด์ทำให้เกิดลัดวงจรผ่านตัวลัดตัวได้ สาเหตุอื่นก็อาจเกิดเนื่องจากฝุ่นผงเกาะตามฉนวนลูกถ้วยมากและไม่ได้มีการบำรุงรักษาความสะอาดของลูกถ้วย หรือบางโรงงานอาจมีปล่องระบายความร้อนหรือปล่องควันซึ่งอยู่ใกล้กับสถานีไฟฟ้าย่อยทำให้ฝุ่นผงหรือละอองน้ำตกเข้าไปในสถานีจับตามผิวลูกถ้วยเกิดแฟลชโอเวอร์และลัดวงจรขึ้น

2.3 การจำลองระบบ

การคำนวณกระแสลัดวงจรจำเป็นต้องทราบแบบจำลองของระบบซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่ง โหลด เป็นต้นว่าจะมีรูปร่างของวงจรสมมูลเป็นอย่างไรบ้าง วงจรสมมูลของระบบมีด้วยกันหลายแบบคือ วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ วงจรสมมูลรีแอกแตนซ์ และวงจรสมมูลความต้านทาน

วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แต่ละอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ข) ถ้าหากเรานำวงจรสมมูลนี้ไปใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรจะยุ่งยากมากเนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีพารามิเตอร์ทั้งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุ โดยทั่วไปอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความต้านทานต่ำเมื่อเทียบกับรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำหรือความจุ ดังนั้นในการคำนวณเราอาจไม่คิดค่าความต้านทานโดยเฉพาะความเหนี่ยวนำและความจุเพราะกระแสลัดวงจรที่ต้องการนั้นคือ ขนาดของมันเท่านั้น และการคำนวณโดยไม่คิดความต้านทานจะทำได้มากขึ้น ผลที่ได้จากการคำนวณโดยไม่คิดค่าความต้านทานทำให้กระแสลัดวงจรที่คำนวณออกมาได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย แต่เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันมีอัตรา (rating) ของกระแสลัดวงจรที่ทนได้นั้นค่อนข้างห่างกันมากในแต่ละขั้นดังนั้นผลการคำนวณดังกล่าวที่ไม่คิดค่าความต้านทานจึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าใช้ได้ วงจรสมมูลของระบบที่รีแอกแตนซ์ ส่วนวงจรสมมูลความต้านทานของระบบใช้ในสมัยก่อนที่ยังไม่มีดิจิทัลคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณโดยการจำลองค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบก็ถูกย่อเล็กลงมาด้วยในแง่ไฟเพื่อให้สามารถวัดได้ด้วยมิเตอร์ธรรมดา การจำลองระบบแบบนี้ต้องใช้แรงไฟขนาดใหญ่มากทำให้ไม่สะดวกและเสียเวลาในการจำลองมากและในปัจจุบันนี้ได้เลิกใช้ไปแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

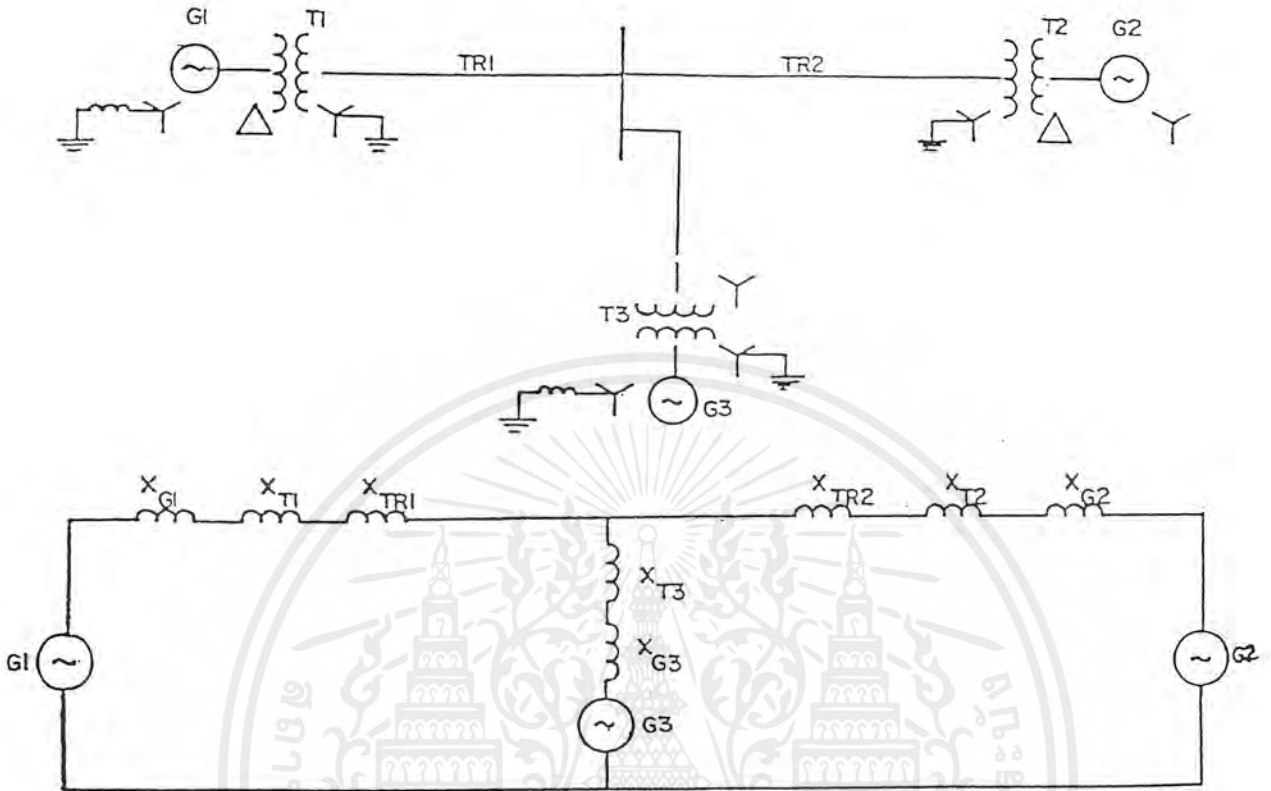


รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

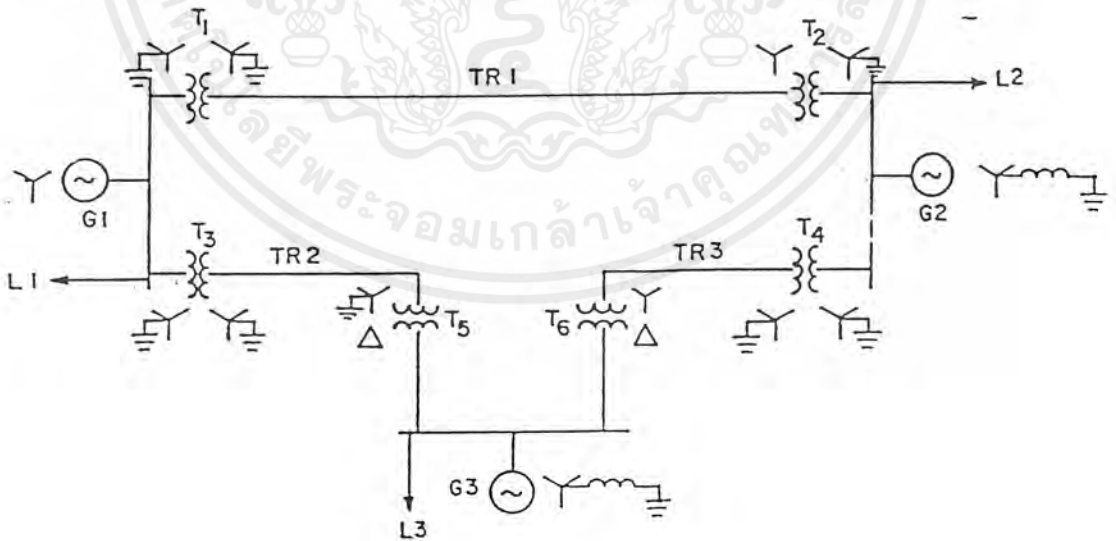
- ก) ไลอะแกรมเส้นเดียวของอุปกรณ์
- ข) วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์
- ค) วงจรสมมูลรีแอกแตนซ์

โหลดของระบบและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีพารามิเตอร์ขนาน (shunt parameter) ไม่ต้องนำมาคิดเพราะขณะคิดคัตวงจรภายในระบบกระแสจะไหลผ่านจุดคัตวงจรเสียส่วนใหญ่โดยมีกระแสน้อยมากที่ไหลผ่านโหลดและพารามิเตอร์ขนาน ดังนั้นวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้คำนวณกระแสคัตวงจรจึงอยู่ในรูปง่าย ๆ ที่ประกอบด้วยรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิด หม้อแปลง และสายส่งเท่านั้นการคำนวณกระแสคัตวงจรจากวงจรสมมูลของระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถทำได้ง่ายขึ้นในกรณีที่สามารถตัดความต้านทานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกรวมทั้งพารามิเตอร์ขนานออก แต่ในการคำนวณด้วยดิจิทัลคอมพิวเตอร์ใช้เวลานานมาก ๆ ดังนั้นถ้าต้องการผลการคำนวณที่ละเอียดก็สามารถที่จะคิดวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลัง คือไม่ตัดค่าความต้านทานของอุปกรณ์ ไม่ตัดโหลดและพารามิเตอร์ขนานของระบบออก

ตัวอย่างแสดงวงจรสมมูลรีแอกแตนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังจากไลอะแกรมเส้นเดียวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4

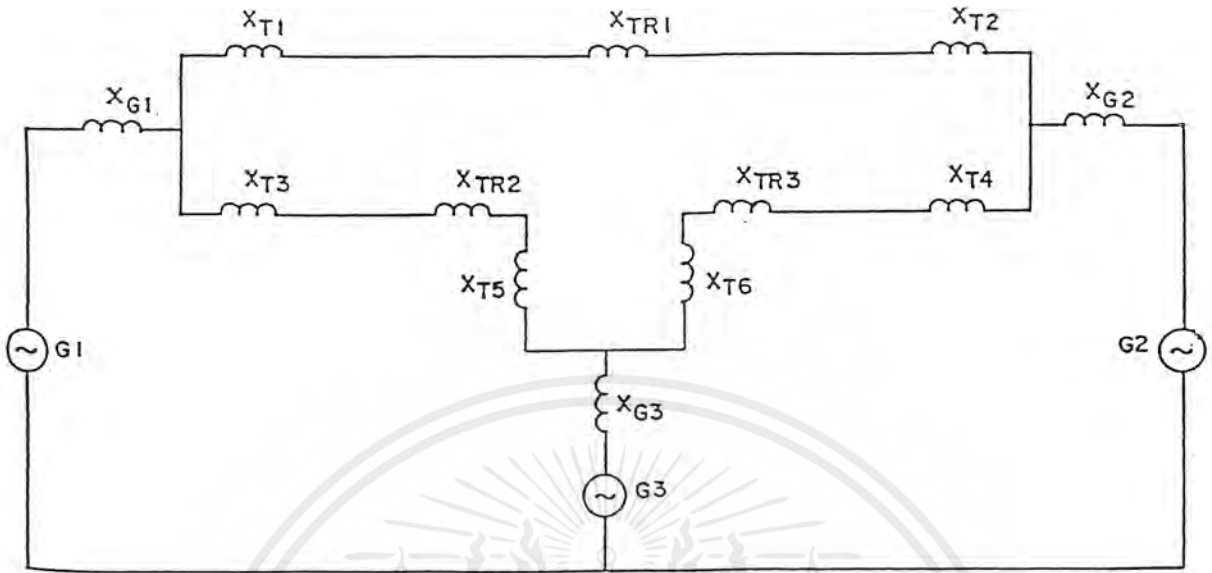


รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแสดงการเขียนวงจรสมมูลรีแอกแตนซ์จากไดอะแกรมเส้นเดียว



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแสดงการเขียนวงจรสมมูลรีแอกแตนซ์จากไดอะแกรมเส้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



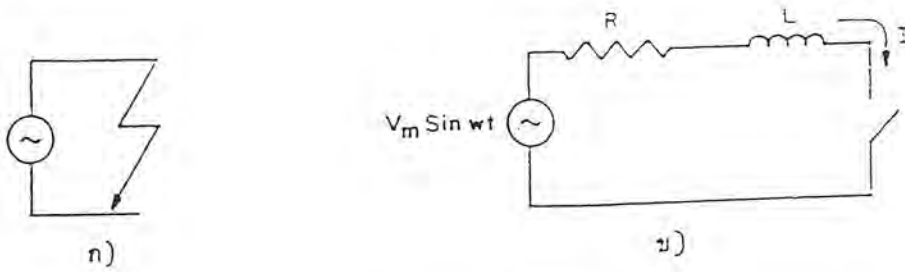
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแสดงการเขียนวงจรสมมูลรีแอกแตนซ์จากโคอะแกรมเส้นเดียว (ต่อ)

2.4 กระแสลัดวงจร

กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลานับตั้งแต่เริ่มเกิดลัดวงจร จนกระทั่งกระแสลัดวงจรเข้าสู่ค่าคงที่ (steady state value) การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นเนื่องจากพลศาสตร์สองประการคือ เนื่องจากพารามิเตอร์ R, L, C ของระบบ และประการที่สอง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลักซ์ในเครื่องจักร (ไม่ว่าเครื่องกำเนิดหรือมอเตอร์) แบบซิงโครนัส (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบซิงโครนัส) หลังจากที่เกิดลัดวงจรขึ้น

2.4.1 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรตามเวลาเนื่องจาก R, L, C

นับตั้งแต่เริ่มเกิดลัดวงจรสามเฟส โดยพิจารณาวงจรง่าย ๆ ในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเกิดลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดและสมมติแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดมีค่าคงที่ $V_m \sin \omega t$



รูปที่ 2.5 การเกิดลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ก) ไลอะแกรมเส้นเดียว

ข) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสลัดวงจร I ในรูปที่ 2.5 ข) สามารถหาได้จากสมการ

$$V_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

α - มุมของสัญญาณศักดาไฟฟ้าขณะเกิดลัดวงจร

และสมการที่ (2.1) สามารถหาค่า I ได้เป็น

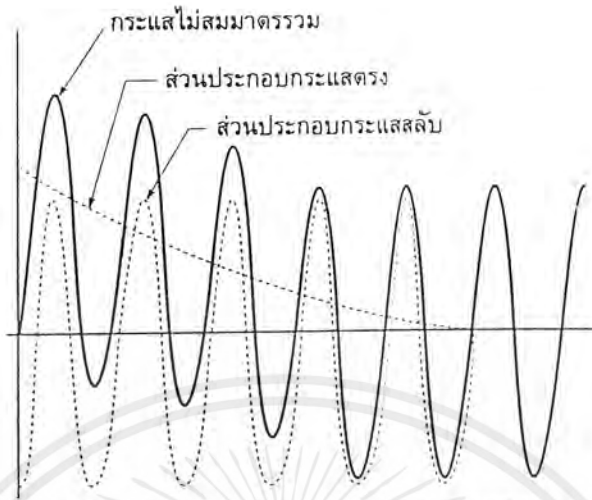
$$i = \frac{V_m}{|Z|} \sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-Ri/L} \sin(\alpha - \theta) \quad (2.2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

สมการที่ (2.2) ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกคือค่าคงที่สัญญาณไซน์ และส่วนที่สองคือค่าที่ลดลงตามเวลา หรือพุด่าง ๆ คือสัญญาณกระแสลัดวงจรประกอบด้วยกระแสลัดวงจรสลับและกระแสลัดวงจรตรง (ac. & dc. Component) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กระแสลัดวงจรเริ่มแรกมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสตรงที่เกิดขึ้น และกระแสที่เกิดขึ้นมีค่ามากน้อยเท่าใดพิจารณาได้จากสมการที่ (2.2) คือ ถ้า $(\alpha - \theta)$ มีค่าเป็น 0 กระแสตรงก็ไม่เกิด ดังนั้นกระแสลัดวงจรก็จะมีเฉพาะกระแสสลับอย่างเดียว แต่ถ้า $(\alpha - \theta) = \pm \pi/2$ กระแสตรงที่เกิดขึ้นก็มีค่าสูงสุด ในระบบ 1 ϕ $(\alpha - \theta)$ มีโอกาสเป็นศูนย์ แต่ในระบบ 3 ϕ $(\alpha - \theta)$ ของทุกเฟสไม่มีโอกาสเป็นศูนย์หมดทั้งสามเฟส ดังนั้นในระบบ 3 ϕ กระแสตรงเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้น

กระแสลัดวงจรที่พิจารณาอยู่นี้เราได้สมมติให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่เท่ากับ $|V_m|$ แต่ในความเป็นจริง $|V_m|$ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วย

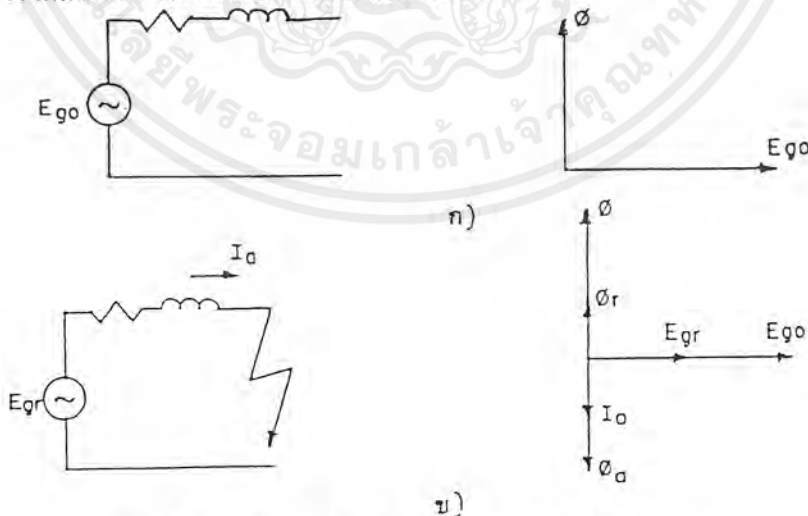
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กระแสตัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4.2 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัดวงจรเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์

ในการพิจารณากระแสตัดวงจรเนื่องจาก R, L, C ของระบบที่ผ่านมานั้นเราได้สมมติแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าคงที่แต่ความเป็นจริงแล้วมันมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหลังจากการเกิดลัดวงจร ในที่นี้จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าเกิดได้อย่างไร และกระแสตัดวงจรที่คิดทั้งหมดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเนื่องจากพารามิเตอร์ R, L, C ของระบบมีค่าเป็นอย่างไร พิจารณารูปที่ 2.7 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังจากเกิดลัดวงจรพร้อมเวกเตอร์ไออะแกรม



รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนและหลังเกิดลัดวงจร

ก) ก่อนเกิดลัดวงจร

ข) หลังเกิดลัดวงจร

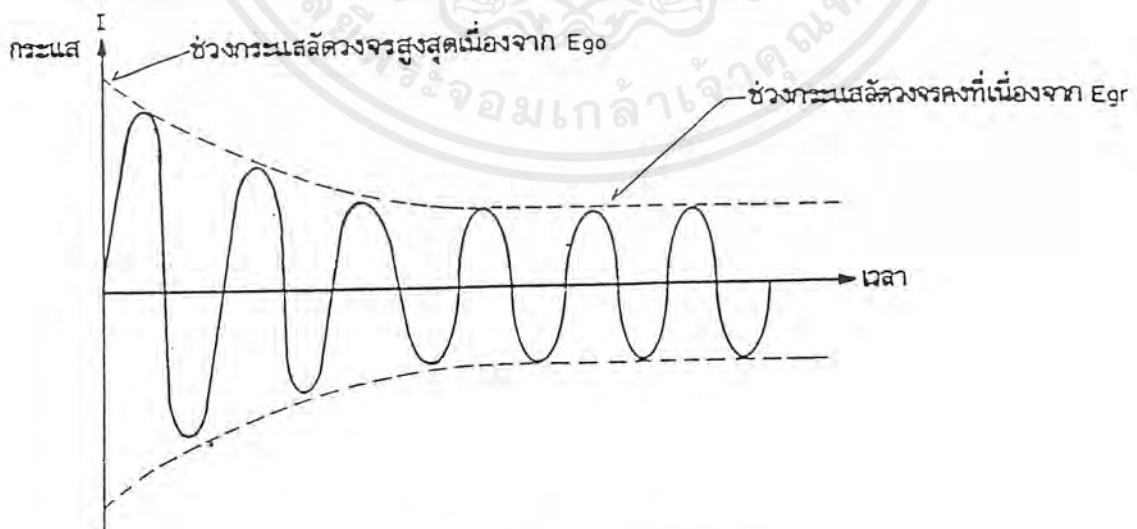
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ คือ ฟลักซ์ที่สร้างจากสนามไฟฟ้ากระแสตรง (dc. Field excitation) และสร้าง E_{g0}

ϕ_2 คือ ฟลักซ์อัมเมอร์รีแอคชั่นเนื่องจาก I_a

ϕ_r คือ ฟลักซ์ลัพท์ที่ไปสร้างศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{gr} : $\phi_r = \phi - \phi_2$

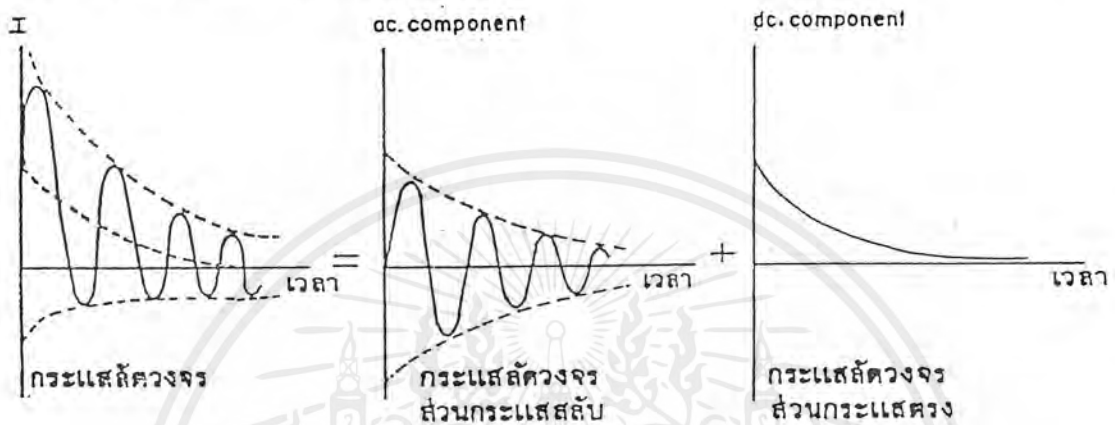
พิจารณารูปที่ 2.7 ก) ซึ่งแสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดลัดวงจร ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น E_{g0} เกิดเนื่องจากฟลักซ์สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่โรเตอร์และเมื่อเกิดลัดวงจรตามรูปที่ 2.7 ข) มีกระแสลัดวงจร I_a ไหลผ่านทำให้สร้างฟลักซ์ ϕ_2 สวนทางกับ ϕ (กระแส I_a ต่างเฟสจาก E_{g0} เกือบ 90° เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรส่วนใหญ่คือ ค่ารีแอคแตนซ์เพราะความต้านทานมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีแอคแตนซ์) ทำให้เกิดฟลักซ์ ϕ_r ขึ้น และฟลักซ์ ϕ_r นี้ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{gr} ขึ้น สรุปได้ว่าศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อนเกิดลัดวงจรมีค่า E_{g0} และหลังจากเกิดลัดวงจรจะเปลี่ยนเป็น E_{gr} แต่เนื่องจากฟลักซ์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้ตามทฤษฎีฟลักซ์คงที่ (ϕ ที่ t ใด ๆ เท่ากับ ϕ ที่ t เสมอ) ดังนั้น พอเริ่มเกิดลัดวงจรขึ้นฟลักซ์ยังคงมีค่าเป็น ϕ จะค่อย ๆ ลดลงและเปลี่ยนไปเป็น ϕ_r นั่นคือ ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลังจากเกิดลัดวงจรจะมีค่าเป็น E_{g0} และค่อย ๆ มีค่าลดลงเปลี่ยนเป็น E_{gr} ดังนั้น กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงมากเนื่องจาก E_{g0} และค่อย ๆ ลดลงจนเป็นกระแสลัดวงจรที่คงที่เนื่องจาก E_{gr} ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากเหตุผลข้างต้นดังกล่าวสรุปได้ว่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงมากและค่อย ๆ ลดลงนั้นมีสาเหตุเนื่องจากอัมเมอร์รีแอคชั่นเกิดขึ้นและ ฟลักซ์ในแกนเหล็กไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดทำให้ศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นลดลงตามเวลา



รูปที่ 2.8 กระแสลัดวงจรตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงกระแสลัดวงจรตามเวลาซึ่งเป็นส่วนของกระแสลัดที่เท่านั้นแต่ถ้าพิจารณาถึงตอนที่เกิดลัดวงจรว่าเกิดในช่วงใดของสัญญาณศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟก็ต้องคำนึงถึงกระแสตรง (dc. component) ที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้น กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจริงต้องประกอบด้วยกระแสตรงและกระแสลัดดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระแสลัดวงจรในระบบที่คิดทั้งกระแสตรงและกระแสลัด

2.4.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติเราสามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรจากวงจรสมมูลจะทำได้อย่างไร เพราะกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งกระแสลัดวงจรส่วนกระแสตรงและกระแสลัดวงจรส่วนกระแสลัดก็ไม่ใช่สัญญาณไซน์ และในส่วนของกระแสลัดวงจรส่วนกระแสตรงมีค่าไม่แน่นอนด้วยขึ้นอยู่กับจังหวะการเกิดลัดวงจรว่าเกิดในช่วงสัญญาณใดของแหล่งจ่ายไฟ และกระแสลัดวงจรส่วนกระแสตรงนี้มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อนาน ๆ ไป วิธีการพิจารณาการคำนวณกระแสลัดวงจรในทางปฏิบัติจึงทำดังนี้

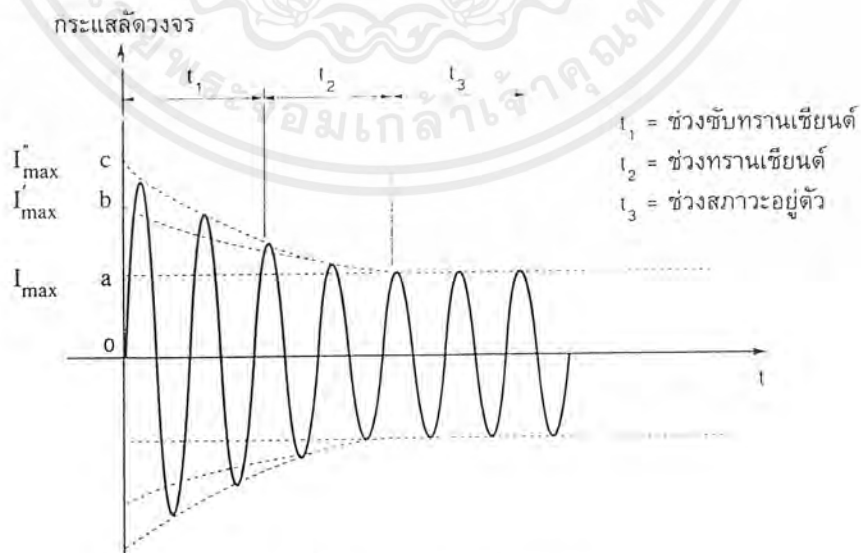
- ก. ในส่วนของกระแสลัดวงจรกระแสตรงให้ใช้แฟคเตอร์คูณแทนที่จะหาค่ากระแสตรงที่แท้จริงซึ่งอาจจะเป็น 1.6, 1.4 หรืออื่น ๆ ก็แล้วแต่ระบบ
- ข. ในส่วนของกระแสลัดวงจรกระแสลัดนั้นค่ากระแสเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาแต่ช่วงที่สำคัญและนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้นมีอยู่ 3 ช่วงเท่านั้นคือ
 - 1) ช่วงเกิดลัดวงจรเริ่มแรก (อุปกรณ์ป้องกัน เช่น เบรกเกอร์ หรือฟิวส์ ยังไม่เปิดวงจรออก) กระแสลัดวงจรมีค่าสูงมากและอุปกรณ์ป้องกันสามารถทนได้ในช่วงเริ่มแรกนี้หรือไม่

- 2) ช่วงวงจรป้องกันเปิดวงจรออก ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดอาร์คที่หน้าสัมผัสของอุปกรณ์ กระแสลัดวงจรในช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าตอนเกิดเริ่มแรกและอุปกรณ์ป้องกันสามารถตัดกระแสลัดวงจรในช่วงนี้ได้หรือไม่
- 3) ช่วงเกิดลัดวงจรคงที่ ถ้าอุปกรณ์ป้องกันไม่เปิดวงจรซึ่งต้องพิจารณาถึงกระแสดังกล่าวเพื่อคว่าก่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบอย่างไร ถ้ามีกระแสลัดวงจรคงที่ขนาดดังกล่าวไหลผ่านตลอดเวลา

ดังนั้น แทนที่จะต้องหาค่ากระแสลัดวงจรกระแสสลับตามเวลาซึ่งเป็นเรื่องที่ยุ่งยากพอสมควรก็เหลือเพียงการหากระแสลัดวงจรใน 3 ช่วงดังกล่าวเท่านั้น ที่จะนำค่ากระแสที่คำนวณมาใช้ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมต่อไป

2.4.4 กระแสลัดวงจรและรีแอกแตนซ์ของเครื่องจักร

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วถึงวิธีการหากระแสลัดวงจร 3 ช่วง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการเลือกอุปกรณ์ป้องกันในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดการหากระแสลัดวงจร 3 ช่วงดังกล่าวว่า มีความสัมพันธ์กับรีแอกแตนซ์ของเครื่องจักรอย่างไร พิจารณากระแสลัดวงจรส่วนกระแสสลับในรูปที่ 2.10 กระแสลัดวงจรมีค่าสูงในช่วงแรกและลดลงจนมีค่าคงที่ (steady state) กระแสลัดวงจรในส่วนที่มีค่าคงที่คือ มีขอดีชญาณ oa และในส่วนช่วงเบรกเกอร์หรือฟิวส์เปิดวงจรออกก็คือ หลังจากเกิดลัดวงจรไปแล้ว 2-3 ไซเคิลซึ่งได้จากการเขียนแนวเส้นเอ็กโปเนนเชียล (exponential) ต่อจากกระแสคงที่ steady state ไปยังแกนกระแสได้ค่าที่จุด b และขอดีชญาณของกระแสลัดวงจรเริ่มแรกคือ oc ดังนั้นกระแส rms ที่แบ่งเป็น 3 ช่วงดังกล่าวมีค่านี้อย่างนี้



รูปที่ 2.10 กระแสลัดวงจรส่วนกระแสสลับตามเวลา

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานขณะไม่มีโหลดก่อนเกิดฟอลต์ที่ 3 เฟสที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเอง จะทำให้มีค่ากระแสและรีแอกแตนซ์ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นตามสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{E_G}{X_d} \quad (2.3)$$

$$I' = \frac{I'_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{E_G}{X'_d} \quad (2.4)$$

$$I'' = \frac{I''_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{E_G}{X''_d} \quad (2.5)$$

เมื่อ

- I คือ กระแสสภาวะอยู่ตัว (rms)
- I' คือ กระแสทรานเซียนต์ (rms) โดยไม่รวมส่วนประกอบกระแสตรง
- I'' คือ กระแสชั้ทรานเซียนต์ (rms) โดยไม่รวมส่วนประกอบกระแสตรง
- I_{\max} คือ กระแสสูงสุดสภาวะอยู่ตัว
- I'_{\max} คือ กระแสสูงสุดสภาวะทรานเซียนต์
- I''_{\max} คือ กระแสสูงสุดสภาวะชั้ทรานเซียนต์
- X_d คือ ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ตามแกนในแนวตรง
- X'_d คือ ทรานเซียนรีแอกแตนซ์ตามแกนในแนวตรง
- X''_d คือ ชั้ทรานเซียนรีแอกแตนซ์ตามแกนในแนวตรง
- E_G คือ แรงดันประสิทธิผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด และเป็นแรง

ดันระหว่างไลน์กับนิวทรอล

2.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

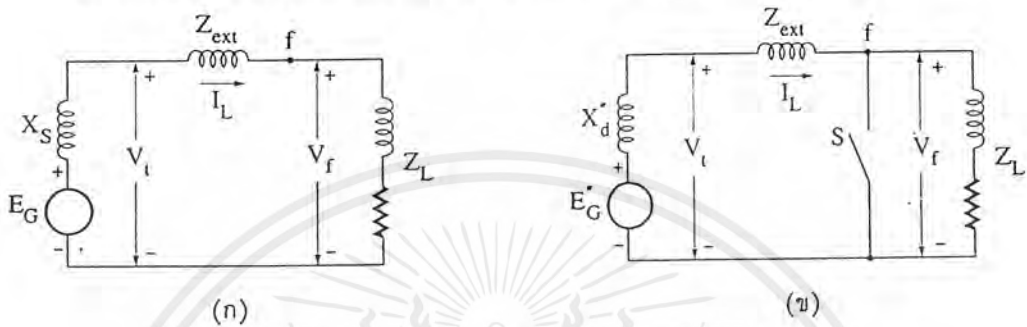
วิธีคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีด้วยกันหลายแบบคือ คือวิธีคิดจากแรงดันภายในเครื่องจักรหรือคิดจากเทวินิน การคำนวณกระแสลัดวงจรนี้สามารถรวมผลเนื่องจากกระแสไหลในระบบก่อนเกิดลัดวงจรด้วย ในตอนท้ายจะกล่าวถึงวิธีคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบใหญ่ ๆ โดยคำนวณอยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งอาศัยหลักการของเทวินิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการของเทวินินเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากในการคำนวณกระแสลัดวงจรเพราะสะดวกและใช้เวลาน้อยนอกจากนี้ยังสามารถใช้กับระบบใหญ่ ๆ ได้โดยอาศัยดิจิทัลคอมพิวเตอร์

2.5.1 การหากระแสฟอลต์ด้วยแรงดันภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโหลดอยู่ในขณะที่เกิดฟอลต์



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายโหลดสมดุล 3 เฟส และจำลองการเกิดฟอลต์ 3 เฟส โดยการปิดสวิตช์ S

(ก) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายโหลดในสภาวะอยู่ตัว

(ข) วงจรสำหรับการคำนวณหากระแสฟอลต์ชั้บทรานเซี่ยนต์ I_f'

จากรูปที่ 2.11 (ก) เป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับโหลด 3 เฟสสมดุลโดยกำหนดให้

E_G คือ แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

V_t คือ แรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

V_f คือ แรงดันก่อนที่จะเกิดฟอลต์ (prefault voltage) ที่จุด f

I_L คือ กระแสที่ไหลในวงจรก่อนเกิดฟอลต์ที่จุด f

Z_{ext} คือ อิมพีแดนซ์ภายนอกที่ต่ออยู่ระหว่างขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจุด f ที่เกิดฟอลต์ (Z_{ext} เป็นอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงสายส่ง เป็นต้น)

จากที่เพิ่งกล่าวแล้วว่า วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะประกอบด้วยแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด E_G ที่มีซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ X_s ต่ออนุกรมอยู่ ถ้าเกิดฟอลต์ 3 เฟสขึ้นที่จุด f ซึ่งจากวงจรสมมูลเราจะเห็นได้ว่าการลัดวงจรระหว่างจุด f กับนิวทรัล โดยสั้นๆ นี้จะไม่สอดคล้องกับการคำนวณค่ากระแสชั้บทรานเซี่ยนต์ ดังนั้นถ้าเราจะคำนวณกระแสชั้บทรานเซี่ยนต์ I_f' ก็จำเป็นต้องใช้รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น X'_d หรือถ้าจะคำนวณกระแสชั้บทรานเซี่ยนต์ I_f' รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ X'_d

วงจรที่แสดงในรูปที่ 2.11 (ข) เป็นวงจรสำหรับคำนวณกระแสฟลตซ์ เมื่อสวิตช์ S เปิดอยู่ วงจรจะมีแรงดัน E_G ต่ออนุกรมกับ X_d'' โดยมีกระแสสถานะอยู่ตัว I_L ไหลในวงจรและเมื่อสวิตช์ S ปิดจะทำให้กระแสลัดวงจรไหลผ่าน X_d'' และ Z_{ext} ถ้าเราสามารถหาค่าแรงดัน E_G'' ได้กระแสที่ไหลผ่าน X_d'' นี้ก็คือ กระแสชัตทรานเซียนต์ I_r'' นั่นเอง

พิจารณาจากรูปที่ 2.11 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อสวิตช์ S เปิดอยู่ จะสามารถเขียนสมการของวงจรได้คือ

$$E_G'' = V_t + jI_L X_d'' \quad (2.6)$$

เมื่อ E_G'' คือ แรงดันชัตทรานเซียนต์ภายใน (subtransient internal voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

และในทำนองเดียวกัน การคำนวณหากระแสชัตทรานเซียนต์ I_r' ที่ไหลผ่าน X_d' จะมีสมการของแรงดันเป็น

$$E_G' = V_t + jI_L X_d' \quad (2.7)$$

เมื่อ E_G' คือ แรงดันชัตทรานเซียนต์ภายใน (subtransient internal voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แรงดัน E_G'' และ E_G' สามารถหาค่าได้ด้วย I_L และแรงดันทั้งสองเท่ากับแรงดันขณะไม่มีโหลด E_G ก็ต่อเมื่อ $I_L = 0$ ถ้าเป็นเช่นนั้น E_G ก็จะมีค่าเท่ากับ V_t

ในกรณีของมอเตอร์ซึ่งโครนัสก็จะมีชนิดของรีแอกแตนซ์เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อมอเตอร์เกิดการลัดวงจรมอเตอร์ก็จะไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่าย แต่สนามแม่เหล็กในตัวมอเตอร์ก็ยังคงมีอยู่และโรเตอร์ก็ยังคงหมุนด้วยความเฉื่อยอยู่ระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นมอเตอร์จะมีคุณลักษณะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจ่ายกระแสกลับเข้าสู่ระบบ โดยการเปรียบเทียบความสอดคล้องของสมการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้สามารถหาแรงดันชัตทรานเซียนต์ภายในและแรงดันชัตทรานเซียนต์ภายในของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$E_G'' = V_t - jI_L X_d'' \quad (2.8)$$

$$E_G' = V_t - jI_L X_d' \quad (2.9)$$

เมื่อ E_G'' คือ แรงดันชัตทรานเซียนต์ภายในของมอเตอร์

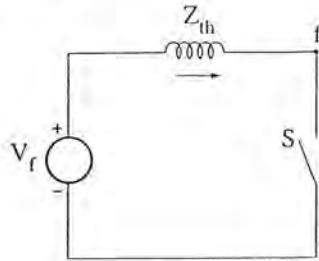
E_G' คือ แรงดันชัตทรานเซียนต์ภายในของมอเตอร์

ระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ภายใต้การจ่ายโหลดสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการใช้ทฤษฎีของเทวินิน หรือโดยการใช้หลักการของแรงดันชัตทรานเซียนต์ภายในหรือแรงดันชัตทรานเซียนต์ภายในก็ได้

2.5.2 การหากระแสฟลตซ์ด้วยการใช้ทฤษฎีของเทวินิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.11 (ข) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเทวินินได้ตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลเทวินินของวงจรรูปที่ 2.11 (ข)

เมื่อ Z_{th} คือ อิมพีแดนซ์สมมูลเทวินิน

โดย

$$Z_{th} = \frac{(Z_{ext} + jX_d'')Z_L}{(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')} \quad (2.10)$$

เมื่อเกิดฟลัทส์สมมาตร 3 เฟสขึ้นที่จุด f โดยการจำลองด้วยการปิดสวิตช์ S สามารถหากระแสขั้วทรานเซียนต์ที่จุดเกิดฟลัทส์ได้จากสมการ

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{th}} = \frac{V_f(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')}{Z_L(Z_{ext} + jX_d'')} \quad (2.11)$$

เมื่อหาค่ากระแส I_f'' ได้แล้วสามารถหาค่าของแต่ละส่วนของวงจรได้ด้วยกฎการแบ่งกระแสดังนี้

$$I_{IG}'' = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')} I_f'' \quad (2.12)$$

$$I_{IL}'' = \frac{(Z_{ext} + jX_d'')}{(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')} I_f'' \quad (2.13)$$

เมื่อ I_f'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์รวมที่จุดเกิดฟลัทส์

I_{IG}'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

I_{IL}'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์จากส่วนของโหลด

สำหรับกระแสขั้วทรานเซียนต์ I_{IG}'' และ I_{IL}'' จะเป็นค่าของกระแสฟลัทส์จากส่วนของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ยังไม่ได้รวมค่ากระแสของโหลดก่อนเกิดฟลัทส์ ดังนั้นกระแสขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบเขียนได้จากส่วนต่าง ๆ ของวงจรเมื่อรวมค่ากระแสไหลลที่ไหลในวงจรก่อนเกิดฟอลต์สามารถหาได้จากสมการ

$$I_G'' = I_{IG}'' + I_L \quad (2.14)$$

$$I_L'' = I_{IL}'' - I_L \quad (2.15)$$

เมื่อ I_G'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

I_L'' คือ กระแสขั้วทรานเซียนต์ในส่วนของ โหลด

2.5.3 การคำนวณกระแสฟอลต์ด้วยอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสม เพราะระบบไฟฟ้ากำลังใหญ่ ๆ เราไม่สามารถเขียนไดอะแกรมเส้นเดียวแล้วนำมาคำนวณโดยใช้หลักการของเทวินินได้ การคำนวณจำเป็นต้องใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาค แต่อย่างไรจึงจะจัดระบบไฟฟ้าและวิธีการคำนวณให้คอมพิวเตอร์ดำเนินการได้ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวก็ยังคงใช้หลักการของเทวินินอยู่เพียงแต่ต้องจัดรูปของระบบให้อยู่ในฟอร์มที่จะใช้คอมพิวเตอร์ได้ คือ จัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ โดยเราต้องแปลงไดอะแกรมของระบบรวมทั้งอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ซึ่งอาจจะเป็น Y_{BUS} , Z_{BUS} , Y_{BRANCH} , Z_{BRANCH} , Y_{LOOP} , Z_{LOOP} แต่เมทริกซ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ Z_{BUS}

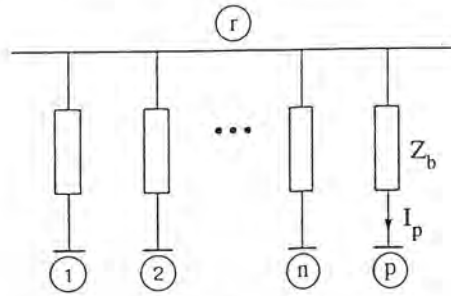
วิธีการคำนวณหา Z_{BUS} จากไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบสามารถทำได้หลายอย่าง แต่มักใช้กันอยู่ 2 อย่างคือ การอินเวิร์ส (inverse) ของ Y_{BUS} และอีกวิธีคือ การเพิ่มอุปกรณ์เข้าไปที่ละอุปกรณ์เพื่อฟอร์ม Z_{BUS} (add branch-add link) ในทางปฏิบัติมักใช้แบบหลังมากเพราะเสียเนื้อที่และเวลาคอมพิวเตอร์น้อยกว่า

การหาค่า Z_{BUS} โดยวิธีการเปลี่ยนแปลง Z_{BUS} (Modifying Z_{BUS})

ระบบไฟฟ้ากำลังอาจมีการขยายหรือเปลี่ยนแปลงให้เป็นระบบที่ใหญ่ขึ้น เช่น การก่อสร้างสายส่งวงจรใหม่ จึงทำให้เกิดบรานซ์เพิ่มขึ้น ถ้าบรานซ์นี้มีอิมพีแดนซ์เป็น Z_b ที่นำเข้ามาเพิ่มในบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ Z_{BUS} เดิมตั้งนั้นเมื่อเพิ่ม Z_b เข้าไปแล้วก็จะทำให้เกิดบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่และการเพิ่มบรานซ์ Z_b เข้าไปในระบบเดิม อาจมีรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งดังต่อไปนี้ เราจึงสามารถนำวิธีนี้มาใช้ในการหา Z_{BUS} ได้ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I. การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสอ้างอิง r ไปยังบัสใหม่ p

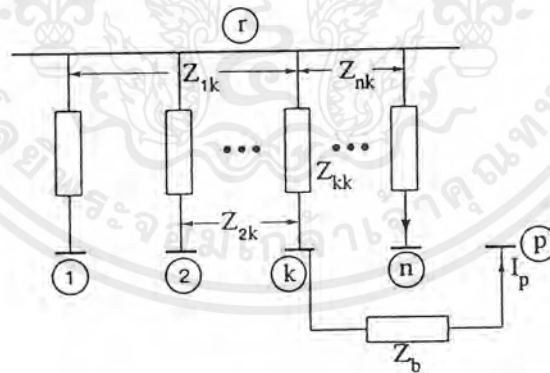


รูป 2.13 การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสอ้างอิง r ไปยังบัสใหม่ p

จากรูป 2.13 ผลจากการเพิ่มบรานซ์ Z_b จะได้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่ดังนี้

$$Z_{bus(\text{ใหม่})} = \begin{bmatrix} & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & Z_{bus} & & \dots \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ \hline 0 & 0 & \dots & 0 & Z_b \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2. การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสเก่า k ไปยังบัสใหม่ p



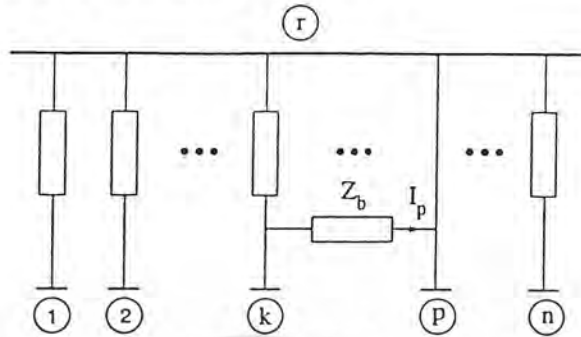
รูป 2.14 การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสเก่า k ไปยังบัสใหม่ p

จากรูป 2.14 ผลจากการเพิ่มบรานซ์ Z_b จะได้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่ดังนี้

$$Z_{bus(\text{ใหม่})} = \begin{bmatrix} & & & & Z_{1k} \\ & & & & Z_{2k} \\ & & Z_{bus} & & \dots \\ & & & & Z_{nk} \\ \hline Z_{1k} & Z_{2k} & \dots & Z_{nk} & Z_{kk} + Z_b \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสอ้างอิง r ไปยังบัสเก่า k

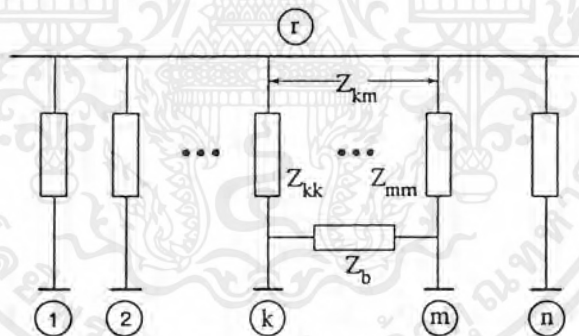


รูป 2.15 การเพิ่มบรานซ์ Z_b จากบัสอ้างอิง r ไปยังบัสเก่า k

จากรูป 2.15 ผลจากการเพิ่มบรานซ์ Z_b จะได้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่ดังนี้

$$Z_{bus(\text{ใหม่})} = Z_{bus} - \frac{1}{Z_{kk} + Z_b} \begin{bmatrix} Z_{1k}^2 & Z_{1k} Z_{2k} & \dots & Z_{1k} Z_{nk} \\ Z_{2k} Z_{1k} & Z_{2k}^2 & \dots & Z_{2k} Z_{nk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{nk} Z_{1k} & Z_{nk} Z_{2k} & \dots & Z_{nk}^2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

4. การเพิ่มบรานซ์ Z_b ระหว่างสองบัสเก่า k และ m



รูป 2.16 การเพิ่มบรานซ์ Z_b ระหว่างสองบัสเก่า k และ m

จากรูป 2.16 ผลจากการเพิ่มบรานซ์ Z_b จะได้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ใหม่ดังนี้

$$Z_{bus(\text{ใหม่})} = Z_{bus} - \frac{1}{Z_b + Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km}} \begin{bmatrix} (Z_{1k} - Z_{1m})^2 & (Z_{1k} - Z_{1m})(Z_{2k} - Z_{2m}) & \dots & (Z_{1k} - Z_{1m})(Z_{nk} - Z_{nm}) \\ (Z_{2k} - Z_{2m})(Z_{1k} - Z_{1m}) & (Z_{2k} - Z_{2m})^2 & \dots & (Z_{2k} - Z_{2m})(Z_{nk} - Z_{nm}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (Z_{nk} - Z_{nm})(Z_{1k} - Z_{1m}) & (Z_{nk} - Z_{nm})(Z_{2k} - Z_{2m}) & \dots & (Z_{nk} - Z_{nm})^2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังด้วยคอมพิวเตอร์นั้น วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้หาบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ สำหรับการวิเคราะห์การลัดวงจร

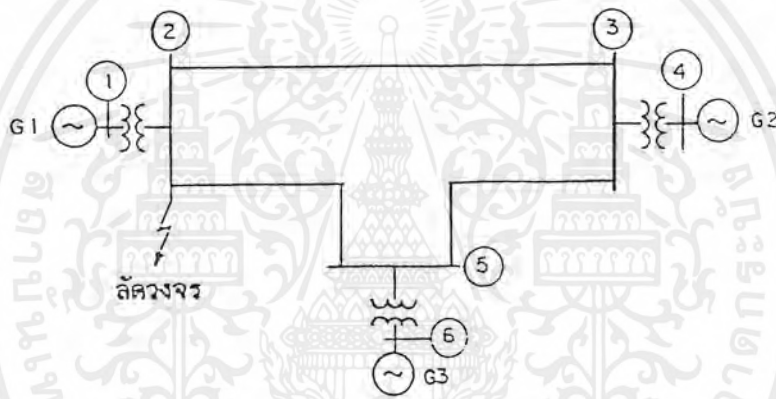
ความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าและกระแสบัสเป็นไปตามสมการที่ (2.20)

$$V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS} \quad (2.20)$$

V_{BUS} คือ ศักดาไฟฟ้าที่บัส

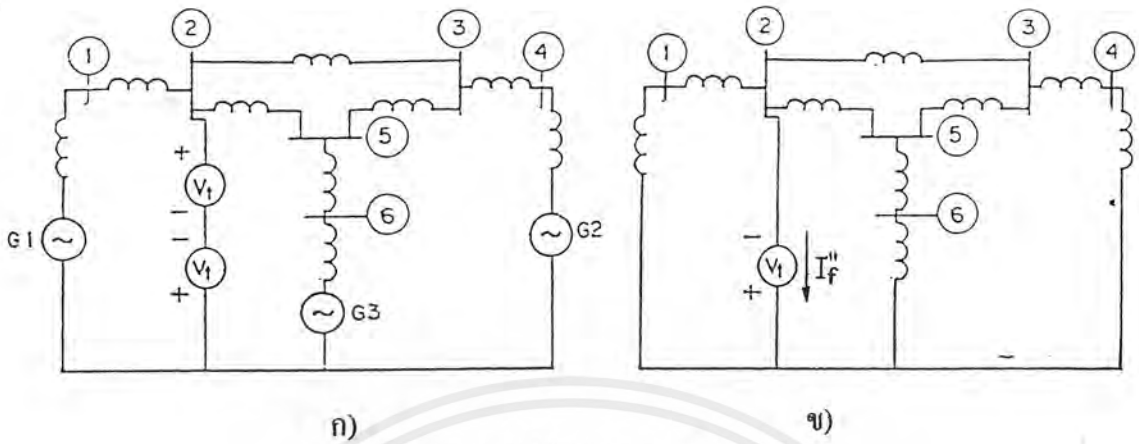
I_{BUS} คือ กระแสจากแหล่งจ่ายไฟเข้าที่บัส บัสใดไม่มีแหล่งจ่ายไฟที่บัสนั้นมี $I = 0$

คราวนี้มาลองพิจารณาหากระแสลัดวงจรจากอิมพีแดนซ์โดยใช้ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบในรูปที่ 2.17 เป็นตัวอย่าง ซึ่งมีทั้งหมด 6 บัส และสมมติว่าเกิดลัดวงจรที่บัส 2



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบ

วงจรสมมูลของระบบขณะเกิดลัดวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ก) และวงจรสมมูลเทวินินแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ข) จะเห็นว่ามีแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวคือ $-V_f$ ที่บัส และกระแสลัดวงจร I_f' ที่ไหลดังในรูปจะปรากฏเป็น $-I_f'$ ในเมทริกซ์ I_{BUS} เพราะสมการที่ (2.20) นั้นกระแสถูกนิยามว่าเป็นกระแสที่ไหลเข้าบัส ส่วนกระแสบัสอื่น ๆ เป็นศูนย์เพราะไม่มีแหล่งจ่ายไฟในวงจรเทวินิน เมื่อใช้สมการที่ (2.20) กับระบบในรูปที่ 2.18 จะได้สมการที่ (2.21)



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 2.17

- ก) วงจรจำลองการลัดวงจรบัสที่ 2
- ข) วงจรเทวินิน

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ -V_t \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & & & \\ \cdot & & Z_{BUS} & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ Z_{61} & \dots & \dots & \dots & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f'' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ในสมการที่ (2.21) ค่าที่ทราบคือ Z_{BUS} และ V_t สิ่งที่ต้องการหาคือ ΔV_i ของบัสต่าง ๆ และ I_f'' จากสมการที่ (2.21) เราสามารถหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$-V_t = -Z_{22} I_f'' \quad (2.22)$$

$$I_f'' = \frac{V_t}{Z_{22}} \quad (2.23)$$

$$\Delta V_1 = -Z_{12} I_f'' = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}} V_t \quad (2.24)$$

$$\Delta V_2 = -V_t \quad (2.25)$$

$$\Delta V_3 = -Z_{32} I_f'' = -\frac{Z_{32}}{Z_{22}} V_t \quad (2.26)$$

$$\vdots$$

$$\Delta V_6 = -Z_{62} I_f'' = -\frac{Z_{62}}{Z_{22}} V_t \quad (2.27)$$

ศักดาไฟฟ้าในสมการที่ (2.22) และ (2.24) ถึง (2.27) เป็นศักดาไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ในระบบของวงจรเทวินิน ในกรณีต้องการหาศักดาไฟฟ้าของระบบขณะเกิดลัดวงจรต้องรวมเข้ากับศักดาไฟฟ้าของระบบสถานะปกติด้วย

$$V_{is} = V_{iN} + \Delta V_i \quad (2.28)$$

$$V_{2s} = V_t - V_t = 0 \quad (2.29)$$

$$V_{3s} = V_{3N} + \Delta V_3 \quad (2.30)$$

$$\vdots$$

$$V_{6s} = V_{6N} + \Delta V_6 \quad (2.31)$$

V_{is} คือ ศักดาไฟฟ้าของบัส i ขณะเกิดลัดวงจร

V_{iN} คือ ศักดาไฟฟ้าของบัส i สภาพจ่ายโหลดปกติ

V_t ของบัส 2 และ ΔV_i คือ ศักดาไฟฟ้าของบัสในวงจรเทวินิน

จากสมการที่ (2.22) ถึง (2.27) ของระบบในรูปที่ 2.17 เราสามารถเขียนสมการในวงจรเทวินินสำหรับระบบไฟฟ้า n bus ที่มีการลัดวงจรที่บัส k และมีศักดาไฟฟ้าบัส k สภาพจ่ายโหลดปกติเท่ากับ V_t

$$\Delta V_i = -\frac{Z_{ik}}{Z_{kk}} V_t \quad (2.32)$$

$$I_f'' = \frac{V_t}{Z_{kk}} \quad (2.33)$$

เมื่อเกิดฟอลท์ที่บัสใด ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังก็ตาม เราสามารถคำนวณหากระแสและแรงดันได้ง่ายและสะดวกโดยการใช้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ส่วนประกอบสมมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ส่วนประกอบสมมาตร

จากที่ได้กล่าวถึงฟอลต์ประเภทต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังมาแล้ว ซึ่งมีทั้งฟอลต์แบบสมมาตรหรือแบบสมดุล และฟอลต์แบบไม่สมมาตรหรือแบบไม่สมดุล ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (power system protection) ให้พ้นอันตรายจากฟอลต์ประเภทต่าง ๆ นั้นมีความจำเป็นต้องทราบขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีเลย์ป้องกัน เซอร์กิตเบรกเกอร์ และฟิวส์ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันและกระแสภายใต้สภาวะที่เกิดฟอลต์ไว้ล่วงหน้า เพื่อจะได้จัดเตรียมแผนการป้องกันระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

ในการวิเคราะห์แบบฟอลต์ไม่สมมาตรนั้นเราสามารถใช่วิธีของส่วนประกอบสมมาตร (symmetrical component) สำหรับการแก้ปัญหาในระบบที่ไม่สมดุลของ n เฟสเซอร์ที่มีความสัมพันธ์กันด้วยระบบ n เฟสเซอร์ ที่สมดุลเรียกว่าส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์เดิม (symmetrical component of the original phasors) โดยแต่ละเฟสของ n เฟสเซอร์ จะมีขนาดและมุมเฟสระหว่างเฟสเซอร์ที่อยู่ใกล้กันเท่ากัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะประยุกต์ใช้กับระบบที่ไม่สมดุลหลายเฟสแต่เราจะพิจารณาเฉพาะระบบสามเฟสเท่านั้น เพราะมีความสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าจริง

3.1 แนวความคิดของส่วนประกอบสมมาตร

ทฤษฎีของส่วนประกอบสมมาตรที่ประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาในระบบ สามเฟสที่ไม่สมดุลด้วยระบบ สามเฟสสมดุลจะประกอบด้วยเฟสเซอร์ของส่วนประกอบดังนี้

1. ส่วนประกอบลำดับบวก (positive-sequence component)

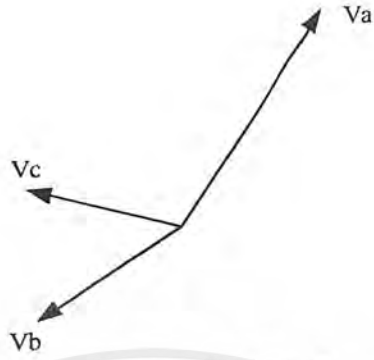
ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมแตกต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส (phase sequence) เหมือนกับเฟสเดิม

2. ส่วนประกอบลำดับลบ (negative-sequence component)

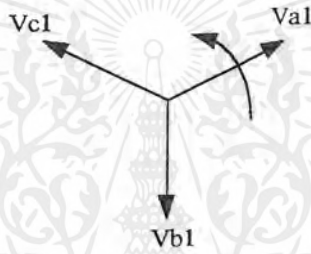
ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมแตกต่างกัน 120° โดยมีลำดับเฟส (phase sequence) ตรงข้ามกับเฟสเดิม

3. ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero-sequence component)

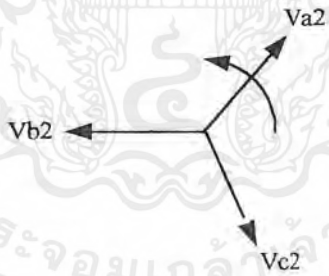
ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสเดียวกัน



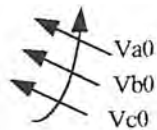
(ก) เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุล



(ข) ส่วนประกอบลำดับบวก



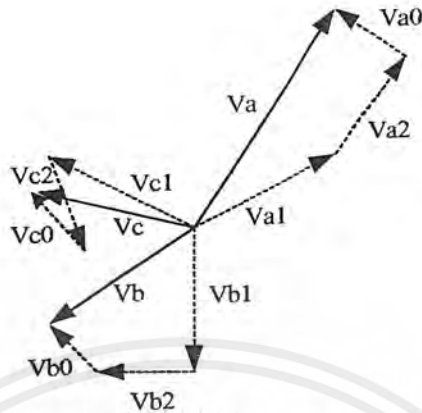
(ค) ส่วนประกอบลำดับลบ



(ง) ส่วนประกอบลำดับศูนย์

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) การรวมส่วนประกอบสมมาตรของรูป (ข) ถึงรูป (ง) เพื่อที่จะได้เฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลตามรูป (ก)

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดัน (ต่อ)

3.2 โอเปอเรเตอร์ (Operator)

โอเปอเรเตอร์คือ จำนวนเชิงซ้อนที่มีขนาดเท่ากับหนึ่งหน่วย โอเปอเรเตอร์จะใช้ในการหมุนเวกเตอร์ไปยังมุมต่าง ๆ โดยไม่มีการเปลี่ยนขนาด โอเปอเรเตอร์ที่คุ้นเคยกันดีคือ -1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1\angle 180$ หมายถึงเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับหนึ่งและหมุนมุมไปยังมุม 180 องศา

3.2.1 โอเปอเรเตอร์ j

กำลังของโอเปอเรเตอร์ j เขียนได้หลายๆ แบบ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 j &= 1\angle 90^\circ = 1\angle -270^\circ = 0 + j = j \\
 j^2 &= 1\angle 180^\circ = 1\angle -180^\circ = -1 + j0 = -1 \\
 j^3 &= 1\angle 270^\circ = 1\angle -90^\circ = 0 - j = -j \\
 j^4 &= 1\angle 360^\circ = 1\angle 0^\circ = 1 + j0 = 1 \\
 j^5 &= 1\angle 450^\circ = 1\angle 90^\circ = 0 + j = j
 \end{aligned}$$

3.2.2 โอเปอเรเตอร์ a

เวกเตอร์ของระบบสามเฟสสมดุลจะต้องมีโอเปอเรเตอร์ที่หมุนเวกเตอร์ไปยังมุม 120 องศา ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณเป็นอย่างมากโดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะใช้ตัวอักษร a แทนโอเปอเรเตอร์นี้ ดังนั้น

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

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถเขียนโอเปอเรเตอร์ 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

$$a^2 = a \times a = 1 \angle (120^\circ + 120^\circ) = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$$

ฟังก์ชันของโอเปอเรเตอร์ a จะนำมาใช้งานมากในเรื่องส่วนประกอบสมมาตร เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจึงได้สรุปค่าของฟังก์ชันโอเปอเรเตอร์ a ไว้ในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a

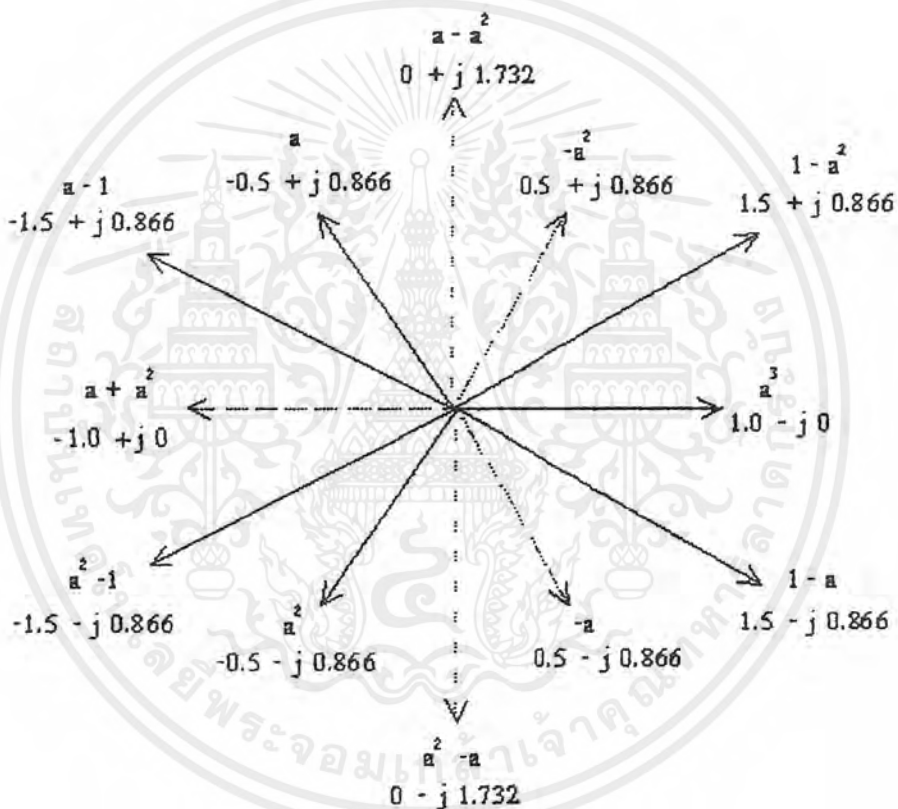
a	$= 1 \angle 120^\circ$	$= -0.5 + j0.866$
a^2	$= 1 \angle 240^\circ$	$= -0.5 - j0.866$
a^3	$= 1 \angle 360^\circ$	$= 1.0 - j0$
a^4	$= 1 \angle 120^\circ$	$= -0.5 + j0.866 = a$
$-a$	$= 1 \angle -60^\circ$	$= 0.5 - j0.866$
$-a^2$	$= 1 \angle 60^\circ$	$= 0.5 + j0.866$
$1 + a + a^2$	$= 0$	
$a + a^2$	$=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

ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันของโอเปอเรเตอร์ a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 1 - a &= \sqrt{3} \angle -30^\circ = 1.5 - j 0.866 \\
 1 - a^2 &= \sqrt{3} \angle 30^\circ = 1.5 + j 0.866 \\
 a - 1 &= \sqrt{3} \angle 150^\circ = -1.5 + j 0.866 \\
 a^2 - 1 &= \sqrt{3} \angle -150^\circ = -1.5 - j 0.866
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันของโอเปอเรเตอร์ a (ต่อ)



รูปที่ 3.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของโอเปอเรเตอร์ a

3.3 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร

(The Symmetrical Component of Unsymmetrical Phasor)

จากรูปที่ 3.1 ได้แสดงให้เห็นว่าเฟสเซอร์เดิมจะมีค่าเท่ากับการรวมส่วนประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์เข้าด้วยกัน ตามที่ระบุไว้ในสมการที่ (3.1) , (3.2) และ (3.3) ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อนี้เราจะแสดงให้เห็นถึงการแก้ปัญหาเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร โดยการใช้ส่วนประกอบสมมาตรว่าทำได้อย่างไร

ถ้าเรากำหนดให้เฟสเซอร์ a เป็นเฟสอ้างอิงและด้วยการใช้โอเปอเรเตอร์ a ดังนั้นส่วนประกอบสมมาตร ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 3.1 (ข) , (ค) และ (ง) ประกอบ)

$$\left. \begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} \\ V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} \\ V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{c0} = V_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

แทนค่าสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) จะได้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.8)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (3.9)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.8) – (3.10) เป็นที่ทราบกันว่าเป็น สมการสังเคราะห์ (synthesis equation) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

หรือ

$$[V_{abc}] = [A] [V_{012}] \quad (3.12)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$[V_{012}] = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

และจากการทำอินเวอร์สมทริกซ์ A จะได้

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

นำค่า A^{-1} ของสมการที่ (3.16) ไปคูณกับสมการที่ (3.11) ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

หรือ

$$[V_{012}] = [A]^{-1} [V_{abc}] \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.17) สามารถเขียนแยกให้อยู่ในรูปของสมการได้คือ

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (3.19)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.20)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (3.21)$$

สมการที่ (3.19) ถึง (3.21) เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นสมการวิเคราะห์ (analysis equation) และถ้าต้องการทราบค่าของส่วนประกอบ V_{b0} , V_{b1} , V_{b2} , V_{c0} , V_{c1} และ V_{c2} สามารถนำค่าจากสมการที่ (3.19) ถึง (3.21) แทนในสมการที่ (3.7)

สำหรับสมการสังเคราะห์และสมการวิเคราะห์ที่อยู่ในทอมเฟสและลำดับกระแส สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.22)$$

$$I_b = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \quad (3.23)$$

$$I_c = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} \quad (3.24)$$

และ
$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.25)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (3.26)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (3.27)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

หรือ
$$[I_{abc}] = [A][I_{012}] \quad (3.29)$$

และ

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

หรือ

$$[I_{012}] = [A]^{-1} [I_{abc}] \quad (3.31)$$

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส ผลรวมของกระแสไลน์จะเท่ากับกระแส I_n ที่ไหลกลับสู่จุดนิว

ทรอลดังนั้น
$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (3.32)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.25) จะได้

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_n \quad (3.33)$$

หรือ

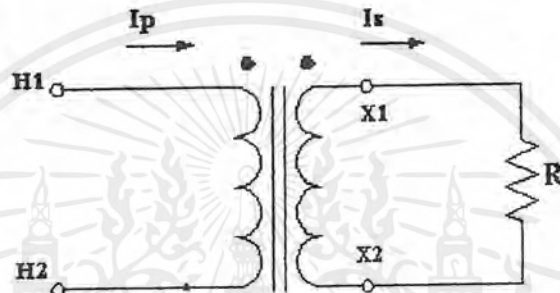
$$I_n = 3I_{a0} \quad (3.33)$$

ในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่มีกระแสไหลผ่านนิวทรอล กระแส I_n มีค่าเป็นศูนย์ และกระแสไลน์จะไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์สำหรับโหนดสามเฟสที่ต่อแบบเดลต้าจะไม่มีส่วนของนิวทรอลดังนั้นกระแสไลน์ที่ไหลผ่านโหนดที่ต่อแบบเดลต้านี้จะไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์เช่นเดียวกัน

3.4 การพิจารณาขั้วและการเลื่อนเฟสของหม้อแปลง

(Transformer Polarity and Phase-Shift Consideration)

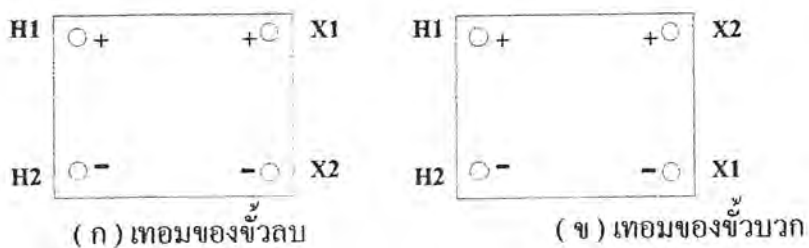
เครื่องหมาย (marking) ตามมาตรฐานของหม้อแปลงหนึ่งเฟสขั้วที่มีจุด (dots) บนขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำจะแทนด้วย H1 และ X1 ตามลำดับโดยที่ปลายขั้วอีกข้างหนึ่งของขดลวดจะแทนด้วย H2 และ X2 ตามลำดับดังรูป (3.4)



รูปที่ 3.3 โค้ดแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่กำกับด้วยเครื่องหมายมาตรฐาน และสมมุติให้ทิศทางการไหลของกระแสปฐมภูมิ และ ทติยภูมิเป็นบวก

จากรูปที่ (3.3) จุดที่กำกับที่ขั้วของขดลวดจะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสไหลจากขั้วที่มีจุดไปยังขั้วที่ไม่มีจุด สำหรับกระแส I_p และ I_s จะมีเฟสเดียวกันและกระแสเป็นบวกเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วที่ไม่มีจุดกำกับ กล่าวคือกระแสไหลเข้าขั้วที่มีจุดของขดลวดหนึ่ง (I_p) และไหลออกจากขั้วที่มีจุดของอีกขดลวดหนึ่ง (I_s) ซึ่งขดลวดทั้งสองอยู่บนแกนหม้อแปลงเดียวกัน

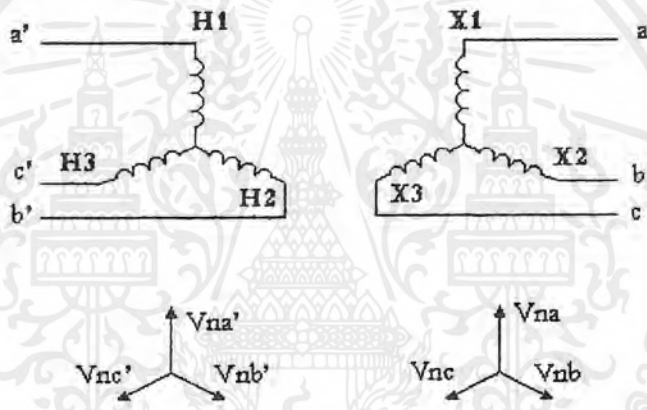
หม้อแปลงจะมีเทอมของขั้วบวก (additive polarity) และขั้วลบ (subtractive polarity) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางกายภาพของตำแหน่งขั้ว H และ X รูปที่ (3.4 ก) แสดงความสัมพันธ์ของขั้วลบ และรูปที่ (3.4 ข) แสดงความสัมพันธ์ของขั้วบวก



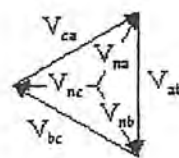
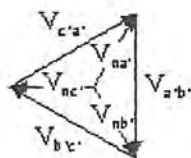
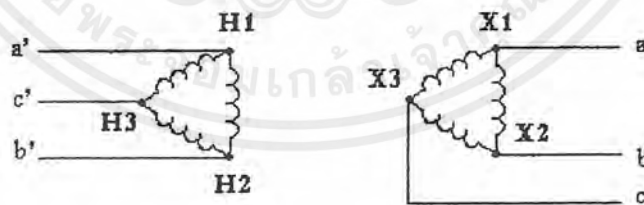
รูปที่ 3.4 การกำกับเครื่องหมายเพื่อแสดงขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตรวจสอบขั้วของหม้อแปลงทำได้โดยการต่อขั้วด้านบน (ระหว่างขั้ว H และขั้ว X) เข้าด้วยกันแล้วป้อนแรงดันที่ขดลวดด้านใดด้านหนึ่ง และวัดแรงดันระหว่างขั้วด้านล่างว่าแรงดันนี้จะเป็นผลบวกหรือผลต่างของขดลวด H และ X ตามรูปที่ (3.4 ก) จะวัดได้เป็นผลต่างของแรงดันระหว่างขั้ว H2 และ X2 ดังนั้นจึงเป็นขั้วลบในทำนองเดียวกันแรงดันระหว่างขั้ว H2 และ X1 ของรูปที่ (3.4 ข) จะวัดได้เป็นผลบวก สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสขั้วทางคั่นแรงสูง จะกำกับด้วยเครื่องหมาย H1, H2 และ H3 และขั้วทางคั่นแรงต่ำจะกำกับด้วยเครื่องหมาย X1, X2 และ X3 และสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อแบบ วาย-วาย และ เกลตต้า-เกลตต้า แรงดันไฟฟ้า ระหว่างไลน์กับนิวตรอลของขั้ว H1, H2 และ H3 จะมีเฟสเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวตรอลของขั้ว X1 X2 และ X3 ตามลำดับดังรูปที่ (3.5)



(ก) หม้อแปลงต่อขดลวดแบบ วาย-วาย



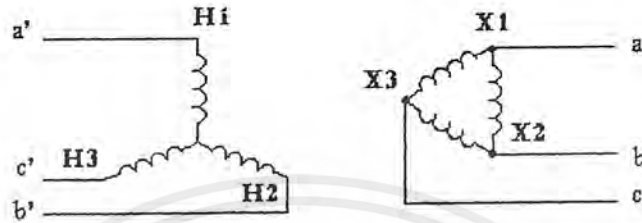
(ข) หม้อแปลงต่อขดลวดแบบเกลตต้า-เกลตต้า

รูปที่ 3.5 เครื่องหมายมาตรฐานและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันสำหรับหม้อแปลง

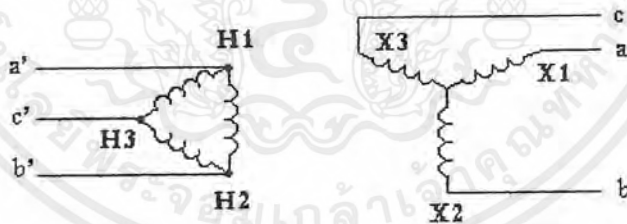
ที่มีการต่อแบบ วาย-วาย และแบบ เกลตต้า-เกลตต้า โดยมีการเลื่อนเฟส = 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ที่มีการต่อขดลวดแบบ วาย-เดลต้า และแบบ เดลต้า-วาย จะมีแรงดันระหว่างไลน์กับนิวตรอลของขั้ว H1 , H2 และ H3 นำหน้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวตรอลของขั้ว X1 , X2 และ X3 ตามลำดับ เป็นมุม 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ (3.6) และ (3.7)



รูปที่ 3.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ วาย-เดลต้าด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30 องศา

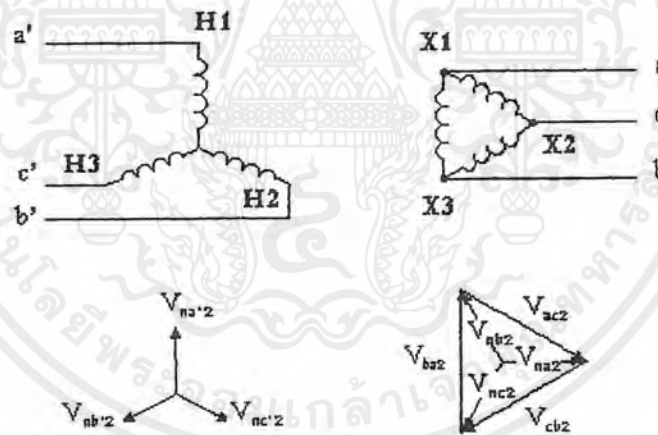


รูปที่ 3.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวก สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ เดลต้า-วาย ด้วยการกำกับเครื่องหมายมาตรฐาน H และ X โดย $V_{na'1}$ นำหน้า V_{na1} เป็นมุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

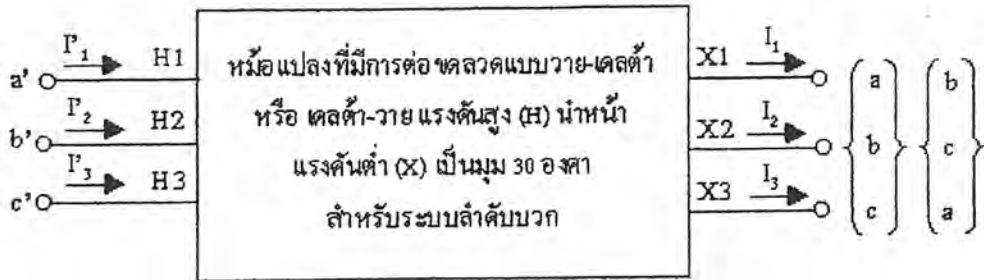
จากรูปที่ (3.6) แสดงการเลื่อนเฟสเป็นมุม 30 องศาสำหรับการต่อขดลวดแบบ วาย-เคลดต้า ในขณะที่รูปที่ (3.7) แสดงการเลื่อนเฟสของการต่อขดลวดแบบ เคลดต้า-วาย เป็นมุม 30 องศาเช่นกัน

เรื่องของการเลื่อนเฟสนี้จะนำไปใช้ในการหากระแสฟอลท์แบบไม่สมมาตร ถ้าทราบค่าของกระแสไลน์ทางด้านวายของหม้อแปลงที่ต่อแบบ วาย-เคลดต้า จะทำให้สามารถหาค่ากระแสไลน์ทางด้านเคลดต้าได้หลายวิธี ซึ่งวิธีหนึ่งก็โดยใช้ส่วนประกอบสมมาตร โดยการเลื่อนเฟสแรงดันไฟฟ้าและกระแสลำดับบวก และลำดับลบด้วยมุมที่พอเหมาะ สำหรับแรงดันลำดับบวกมีการเลื่อนเฟสไป 30 องศาตามที่ได้กล่าวไปแล้วดังเฟสเซอร์ในรูปที่ (3.6) และ (3.7) ส่วนเฟสเซอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทางด้านแรงสูงและแรงต่ำของระบบลำดับลบได้แสดงในรูปที่ (3.8) ตามการใช้หม้อแปลงที่มีการต่อขดลวดแบบ วาย-เคลดต้า ของรูปที่ (3.6) สำหรับไดอะแกรมของรูปที่ (3.8) ได้แสดงแรงดันสูงกำลังแรงดันต่ำเป็นมุม 30 องศาในขณะที่แรงดันลำดับบวกตามรูปที่ (3.6) แรงดันสูงจะนำหน้าแรงดันต่ำเป็นมุม 30 องศา



รูปที่ 3.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับลบ สำหรับหม้อแปลงที่มีการต่อแบบวาย-เคลดต้าตามรูป 6.7

จากการกำกับเฟสตามรูปที่ (3.6) และรูปที่ (3.7) คือ a' , b' และ c' สอดคล้องกับ H1 , H2 และ H3 และสำหรับ a , b และ c สอดคล้องกับ X1 , X2 และ X3 ซึ่งทางด้านแรงต่ำเราจะลำดับเฟสเป็น abc แต่เราก็สามารถเปลี่ยนการลำดับเฟสเป็น bca ได้ดังแสดงดังรูปที่ (3.9)



รูป 3.9 วิธีการสำหรับการกำกับเฟสทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง
ที่มีการต่อแบบวาย-เคลด้า หรือ เคลด้า-วาย

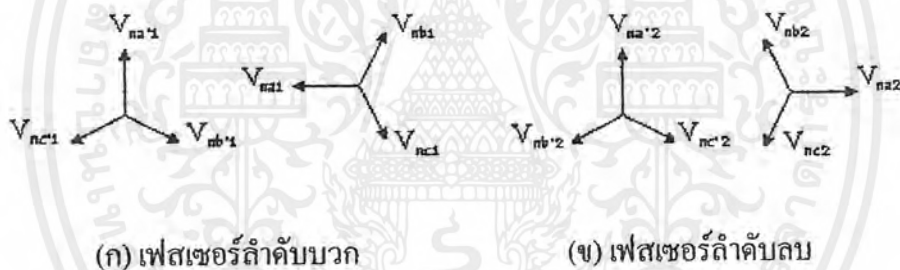
จากการใช้ความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ระหว่างด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำของหม้อแปลงที่กำกับเฟสเป็น a-b-c ตามรูปที่ (3.6) และรูปที่ (3.8) ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสลำดับบวกและลำดับลบตามรูปที่ (3.9) ดังนี้ (การกำกับเฟสด้านแรงต่ำเป็น a-b-c)

$$\begin{aligned}
 V_{na'1} &= V_{na1} \angle 30^\circ \\
 V_{nb'1} &= V_{nb1} \angle 30^\circ \\
 V_{nc'1} &= V_{nc1} \angle 30^\circ \\
 I_{a'1} &= I_{a1} \angle 30^\circ \\
 I_{b'1} &= I_{b1} \angle -30^\circ \\
 I_{c'1} &= I_{c1} \angle 30^\circ
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
 V_{na'2} &= V_{na2} \angle -30^\circ \\
 V_{nb'2} &= V_{nb2} \angle -30^\circ \\
 V_{nc'2} &= V_{nc2} \angle -30^\circ \\
 I_{a'2} &= I_{a2} \angle -30^\circ \\
 I_{b'2} &= I_{b2} \angle -30^\circ \\
 I_{c'2} &= I_{c2} \angle -30^\circ
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำกับเฟสของไลน์ทางด้านแรงต่ำอาจเลือกใช้เป็น b-c-a เพื่อให้มีความง่ายต่อการคำนวณ ขอให้กลับไปพิจารณาเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 3.7 ที่มีการกำกับเฟสเป็น a-b-c ใหม่อีกครั้ง จะเห็นได้ว่าเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้า V_{nc1} จะนำหน้า V_{na1} เป็นมุม 90 องศา ดังนั้นเพื่อให้ง่ายขึ้นในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{na1} กับ V_{nc1} ของรูปที่ 3.7 เราจะใช้ออปอเรเตอร์ $-j$ แทน ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่าง V_{nb1} กับ V_{na1} และ V_{nc1} กับ V_{nb1} ก็ใช้ออปอเรเตอร์ $-j$ ด้วยเช่นกัน เมื่อเป็นเช่นนี้การเปลี่ยนการกำกับเฟสของไลน์ด้านแรงต่ำของรูปที่ 3.10 จาก a-b-c เป็น b-c-a เมื่อ a แทน c , c แทน b และ b แทน a จะทำให้ได้เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวกใหม่ตามรูปที่ 3.11 ก ส่วนเฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับลบสามารถหาได้จากการตรวจสอบรูปที่ 3.9 และแทน c ด้วย a , b ด้วย c และ a ด้วย b ตามรูปที่ 3.10 ข



รูปที่ 3.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรมลำดับบวกและลำดับลบตามการกำกับเฟสเป็น b-c-a ของรูป 3.10

จากรูปที่ 3.10 เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสลำดับบวกและลำดับลบระหว่างด้านแรงสูงและแรงต่ำได้ดังนี้ (การกำกับเฟสด้านแรงต่ำเป็น b-c-a)

$$\left. \begin{aligned}
 V_{na'1} &= -jV_{na1} \\
 V_{nb'1} &= -jV_{nb1} \\
 V_{nc'1} &= -jV_{nc1} \\
 I_{a'1} &= -jI_{1a} \\
 I_{b'1} &= -jI_{1b} \\
 I_{c'1} &= -jI_{1c}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

$$\left. \begin{aligned}
 V_{na'2} &= j V_{na2} \\
 V_{nb'2} &= j V_{nb2} \\
 V_{nc'2} &= j V_{nc2} \\
 I_{a'2} &= j I_{a2} \\
 I_{b'2} &= j I_{b2} \\
 I_{c'2} &= j I_{c2}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

3.5 กำลังไฟฟ้าในเทอมส่วนประกอบสมมาตร (Power in Terms of Symmetrical Components)

ถ้าเราทราบค่าของส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้า และกระแส จะทำให้สามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าสามเฟส ได้โดยตรงจากส่วนประกอบเหล่านี้ โดยกำลังเชิงซ้อนที่ไหลอยู่ในวงจรไฟฟ้าสามเฟสผ่านไลน์เฟส a , b และ c คือ

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (3.41)$$

เมื่อ

V_a , V_b และ V_c คือ แรงดันระหว่างไลน์กับนิวตรอล

I_a , I_b และ I_c คือ กระแสที่ไหลใน ไลน์ a , b และ c ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.41) เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* \quad (3.42)$$

เราสามารถแสดงกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้า และกระแส โดยใช้สมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.13) ดังนี้

$$S = [AV]^T [AI]^* \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

จากกฎรีเวอร์ซัล (reversal law) ของเมทริกซ์ คือ ทราจของผลคูณของสองเมทริกซ์ จะเท่ากับผลคูณของทราจเมทริกซ์ที่กลับลำดับกัน [3]

ดังนั้น

$$S = V^T A^T [AI]^* = V^T A^T A^* I^* \quad (3.45) \text{ และ } (3.46)$$

จะสังเกตได้ว่า $A^T = A$ และ a กับ a^2 จะเป็นค่าคอนจูเกตกัน ดังนั้นสมการที่ (3.46) เราจะได้

$$S = \begin{bmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (3.47)$$

เมื่อ

$$A^T A^* \text{ จะเท่ากับ } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และ

$$S = 3 \begin{bmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (3.48)$$

ดังนั้นกำลังเชิงซ้อนคือ

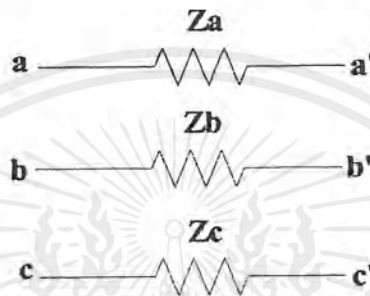
$$V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_0 I_0^* + 3V_1 I_1^* + 3V_2 I_2^* \quad (3.49)$$

เป็นการแสดงให้เห็นว่า กำลังเชิงซ้อนสามารถคำนวณได้จากส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันไฟฟ้า และกระแสของวงจรสามเฟสที่ไม่สมดุล

3.6 อิมพีแดนซ์อนุกรมที่ไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่สภาวะปกติมีความสมดุล แต่เมื่อเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตรขึ้น จะทำให้ระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุลซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์อนุกรมของวงจรไฟฟ้า สามเฟสนี้มีค่าไม่เท่ากันซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ระบบด้วยส่วนประกอบสมมาตร รูปที่ 3.11 แสดงส่วนที่ไม่สมมาตรของระบบด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรม Z_a , Z_b และ Z_c ที่มีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.11 อิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบสามเฟสที่มีค่าไม่เท่ากัน

ถ้าสมมติให้ไม่มีอิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual Inductance) ระหว่างอิมพีแดนซ์ทั้งสามดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในระบบส่วนนี้สามารถแสดงด้วยสมการเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

และแรงดันตกคร่อมที่เขียนในเทอมของส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันและกระแสคือ

$$\begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

เมื่อ A คือเมทริกซ์มีค่าตามสมการที่ (3.13) ถ้านำสมการที่ (3.51) คูณด้วย A^{-1} ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A^{-1}A \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a & Z_b & Z_c \\ Z_a & aZ_b & a^2Z_c \\ Z_a & a^2Z_b & aZ_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2} \\ I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2} \end{bmatrix}$$

ถ้าสามารถทำให้อิมพีแดนซ์ทั้งสามค่ามีค่าเท่ากัน ($Z_a = Z_b = Z_c$) สมการที่ (3.52) จะลดรูปเป็น

$$V_{aa'1} = I_{a1}Z_a \quad V_{aa'2} = I_{a2}Z_a \quad V_{aa'0} = I_{a0}Z_a \quad (3.52)$$

3.7 ลำดับของอิมพีแดนซ์และลำดับของวงจรไฟฟ้า

(Sequence Impedance and Sequence Network)

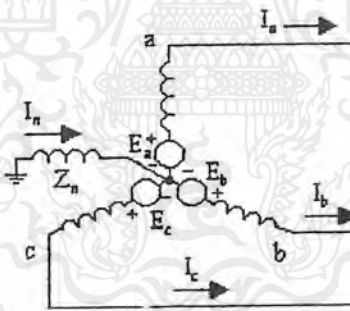
ในวงจรไฟฟ้าใด ๆ เมื่อมีกระแสลำดับบวกเพียงอย่างเดียวไหลผ่านอิมพีแดนซ์ เราจะเรียกอิมพีแดนซ์นี้ว่า อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (positive - sequence impedance) ในทำนองเดียวกันเมื่อมีกระแสลำดับลบไหลผ่านก็จะเรียกอิมพีแดนซ์นี้ว่า อิมพีแดนซ์ลำดับลบ (negative - sequence impedance) และเมื่อกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์นี้ก็จะเรียกว่า อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (zero - sequence - impedance)

การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรด้วยระบบสมมาตรนั้น จะต้องหาส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมดุลที่ไหลในวงจร ส่วนประกอบของกระแสลำดับใดลำดับหนึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่มีลำดับเหมือนกระแสนั้น และจะเป็นอิสระต่อกระแสลำดับอื่น ๆ ในระบบที่สมดุลกระแสลำดับใดลำดับหนึ่งอาจพิจารณาให้ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์กับกระแสลำดับนั้นเพียงอย่างเดียว วงจรสมมูลต่อเฟสที่ประกอบขึ้นด้วยอิมพีแดนซ์กับกระแสของลำดับใดลำดับหนึ่ง เพียงอย่างเดียว เราจะเรียกวงจรสมมูลนี้ว่าเป็นลำดับ

ของวงจรไฟฟ้า (sequence network) สำหรับลำดับนั้นๆ ลำดับของวงจรไฟฟ้าจะรวมแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำใด ๆ ที่มีลำดับเหมือนกันเข้าไว้ด้วย และจะนำมาต่อเชื่อมเพื่อให้มีกระแส I_{a1} , I_{a2} และ I_{a0} ไหลผ่านวงจรไฟฟ้าตามเงื่อนไขของการเกิดฟลตซ์ชนิดต่างๆ ดังนั้นการคำนวณหาผลของฟลตซ์ด้วยการใช้วิธีการของส่วนประกอบสมมาตร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาลำดับของอิมพีแดนซ์และนำมาต่อรวมกันเพื่อสร้างเป็นลำดับของวงจรไฟฟ้า

3.8 ลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีโหลด (Sequence Networks of Unloaded Generators)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จุดนิวตรอลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์และไม่ได้ต่อโหลดไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เมื่อเกิดฟลตซ์ขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีกระแส I_a , I_b และ I_c ไหลในไลน์ a , b และ c ตามลำดับ ถ้าฟลตซ์ที่เกิดขึ้นนั้นเกี่ยวข้องกับดินก็จะเกิดกระแส I_n ไหลเข้าไปสู่จุดนิวตรอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.12 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีต่อโหลด และจุดนิวตรอลต่อลงดิน โดยผ่านรีแอกเตอร์แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสคือ E_a , E_b และ E_c

ลำดับวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเขียนได้ง่าย โดยมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในลำดับบวกเท่านั้น เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกแบบให้จ่ายแรงดันให้กับระบบ 3 เฟส ที่สมมูลดังนั้นลำดับของวงจรจะมีส่วนประกอบดังนี้

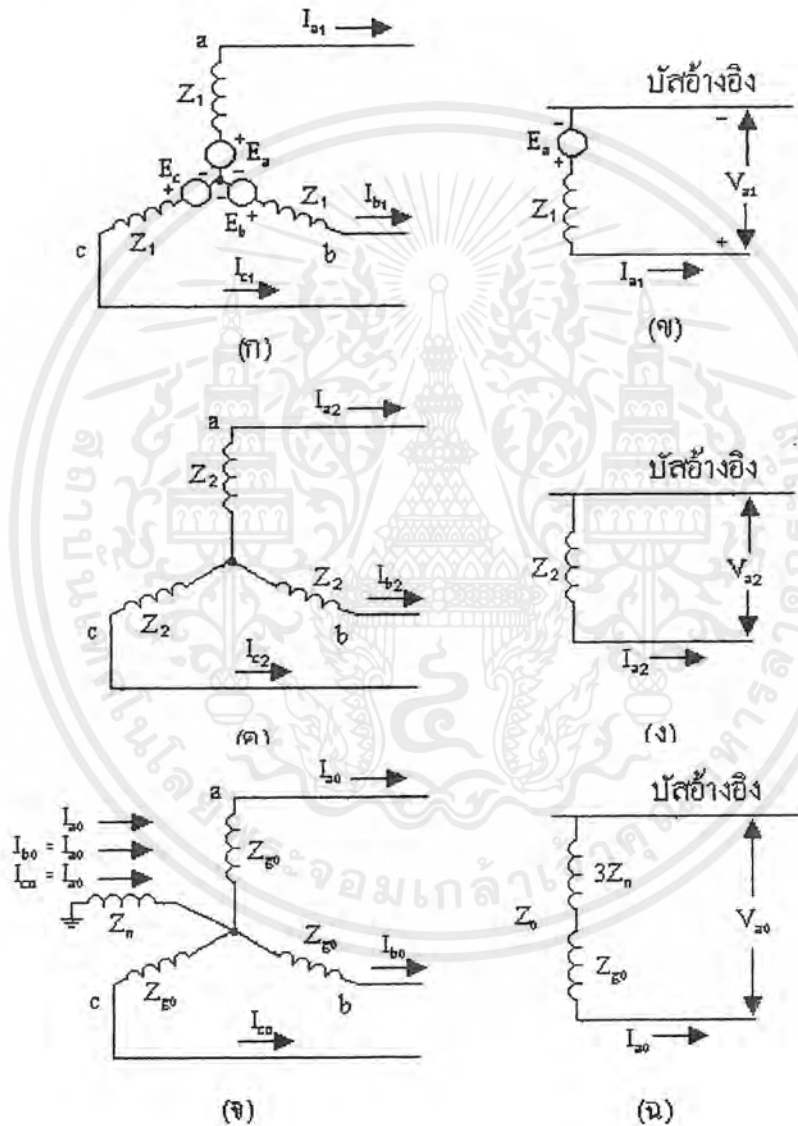
1. วงจรลำดับบวก (positive -sequence network) จะประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในลำดับบวกต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. วงจรลำดับลบ (negative -sequence network) จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มี

เฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วงจรลำดับศูนย์ (zero -sequence network) จะไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำ แต่มีเฉพาะอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีส่วนประกอบของกระแส ได้แสดงในรูปที่ 3.13 กระแสลำดับใดก็จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่มีลำดับเหมือนกันกับกระแสนั้น



รูปที่ 3.13 การไหลของกระแสของแต่ละลำดับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สอดคล้องกับลำดับของวงจรไฟฟ้า (ก), (ข) และ (จ) แสดงการไหลของกระแสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ตามลำดับ ส่วน (ข), (ง) และ (ฉ) แสดงวงจรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับของวงจรไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 3.13 คือวงจรไฟฟ้าสมมูลต่อเฟสของวงจรไฟฟ้าสามเฟสแบบสมมูลที่มีการพิจารณาการไหลของส่วนประกอบสมมาตรของกระแสไม่สมมูล แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรลำดับบวกคือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวทรัลขณะไม่มีโหลดซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันทรานเซียนต์และชั้บทรานเซียนต์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด สำหรับรีแอกแตนซ์ในวงจรลำดับบวก คือ ชั้บทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ ทรานเซียนต์รีแอกแตนซ์ หรือซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ ขึ้นอยู่กับว่าขณะที่ศึกษานั้นวงจรอยู่ในเงื่อนไขของสถานะ ชั้บทรานเซียนต์ ทรานเซียนต์ หรือสภาวะคงตัว

บัสอ้างอิง (reference bus) สำหรับวงจรลำดับบวกและลำดับลบก็คือ จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้ามีการต่อเชื่อมระหว่างจุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับดินก็จะมีส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ที่ต่อระหว่างจุดนิวทรัลกับดินคือ $3I_{a0}$ จากรูปที่ 3.13 จ จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมลำดับศูนย์จากจุด a กับดินคือ

$$-3I_{a0}Z_n - I_{a0}Z_{g0}$$

เมื่อ Z_{g0} คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรลำดับศูนย์จะต้องมีกระแสลำดับศูนย์ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ $3Z_n + Z_{g0}$ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.13 ฉ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม (total zero-sequence impedance) ที่มีกระแส I_{a0} (เป็นกระแสต่อเฟส) ไหลผ่านก็คือ

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \quad (3.53)$$

โดยทั่วไปการเขียนสมการสำหรับลำดับของวงจรไฟฟ้า จะมีส่วนประกอบของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเฟส a สมการสำหรับส่วนประกอบของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจากจุด a กับบัสอ้างอิง (หรือดิน) คือ (ดูรูปที่ 3.13 ประกอบ)

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \quad (3.54)$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \quad (3.55)$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

E_a คือ แรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดลำดับบวกเป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างไลน์กับนิวตรอล

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับบวก

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับลบ

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์รวม (ตามที่กำหนดในสมการที่ (3.54))

สมการข้างต้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆ ที่มีกระแสสมมูลไหลในวงจร และสามารถใช้กับกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่อยู่ภายใต้สภาวะคงตัว แต่เมื่อคำนวณในสภาวะ ทรานเซียนต์ หรือ ชับทรานเซียนต์ สามารถใช้สมการเหล่านี้ได้โดยการแทน E_a ด้วย E'_a หรือ E'_g

3.9 วงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบ

(Positive and Negative Sequence Network)

จุดมุ่งหมายของการทราบค่าลำดับอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังก็เพื่อการไปสร้างลำดับของวงจรไฟฟ้าให้เป็นระบบสมมาตรซึ่งในวงจรไฟฟ้าลำดับใดก็แสดงการไหลของกระแสในระบบ เราได้เคยสร้างวงจรไฟฟ้าลำดับบวกมาบ้างแล้ว การเปลี่ยนวงจรไฟฟ้าลำดับบวกให้เป็นลำดับลบนั้น สามารถทำได้ง่าย ด้วยเหตุที่ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์และมอเตอร์ สามเฟส จะมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเป็นแรงดันดันไฟฟ้า ลำดับบวกเพียงอย่างเดียว เพราะว่าได้ออกแบบมาเพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้าที่สมมูล เมื่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวก และอิมพีแดนซ์ลำดับลบของระบบสมมาตรที่มีค่าเท่ากันทำให้การเปลี่ยนวงจร ไฟฟ้าลำดับบวกให้เป็นวงจร ไฟฟ้าลำดับลบได้โดยการตัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำออก

เมื่อมีกระแสสามเฟสสมมูลไหลในระบบ ไฟฟ้าจะทำให้จุดนิวตรอลทุกจุดของระบบสมมาตร สามเฟส มีศักย์ไฟฟ้า (potential) เท่ากัน จุดนิวตรอลทั้งหมดนี้จะต้องมีศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน สำหรับกระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับลบ ดังนั้นจุดนิวตรอลของระบบสมมาตร สามเฟส จะเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการกำหนดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมทั้งลำดับบวกและลำดับลบ และเป็นบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบด้วย

3.10 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์

(Zero Sequence Network)

วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ สามารถแบ่งการพิจารณาตามลักษณะของการต่อวงจรได้ดังนี้

3.10.1 วงจรที่มีการต่อแบบ วาย โดยนิวตรอลไม่ต่อลงดิน หรือไม่ต่อกับจุดนิวตรอลอื่นๆ ในวงจร (Wye-Connection Ungrounded)

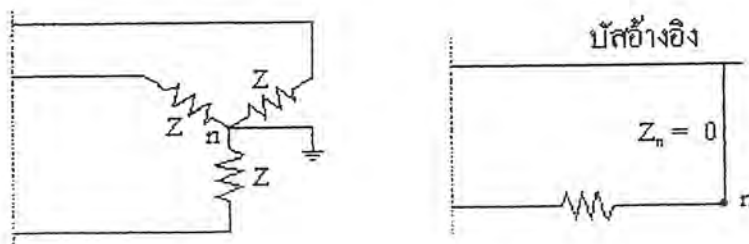
การต่อวงจรลักษณะนี้จะมีผลทำให้ผลรวมของกระแสไหลเข้าไปยังจุดนิวตรอลมีค่าเป็นศูนย์เมื่อผลรวมของกระแสเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์ เสมือนว่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อระหว่างจุดนิวตรอลกับดิน มีค่าสูงมากจึงทำให้กระแสที่ไหลไปสู่ดินมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์สามารถเขียนได้ โดยการเปิดวงจรระหว่างจุดนิวตรอลของวงจรที่ต่อแบบวายกับบัสอ้างอิง (อิมพีแดนซ์ระหว่างจุดนิวตรอลกับดิน = ∞) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลไม่ต่อลงดิน

3.10.2 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลต่อลงดินโดยตรง (Wye- Connection Solidly Grounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้ทำให้จุดนิวตรอลกับบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ต่อถึงกันโดยตรง ดังแสดงในรูป 3.15

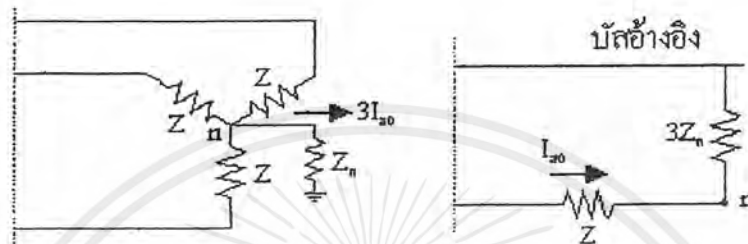


รูป 3.15 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.3 วงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน (Wye-Connection Impedance Grounded)

การต่อวงจรลักษณะนี้ทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $3Z_n$ ต่ออยู่ระหว่างจุดนิวตรอลกับบัสอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 3.16

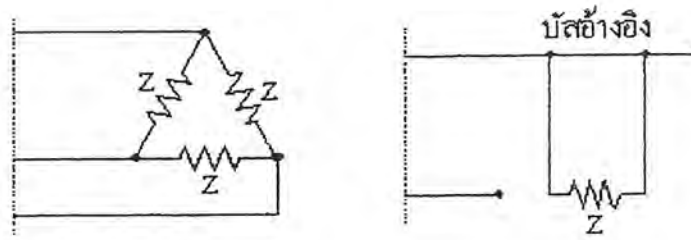


รูปที่ 3.16 วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบวาย โดยนิวตรอลต่อผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ลงดิน

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมลำดับศูนย์เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ เพราะกระแส I_{a0} ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ $3Z_n$ ซึ่งจะเหมือนกับระบบไฟฟ้าจริงที่กระแส $3I_{a0}$ ไหลผ่าน Z_n ตัวอิมพีแดนซ์ Z_n นี้ในทางปฏิบัติอาจใช้ความต้านทานหรือรีแอกแตนซ์ โดยปกติจะต่อระหว่างนิวตรอลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงไฟฟ้ากับดิน เพื่อใช้ในการกำจัดค่ากระแสลำดับศูนย์ระหว่างที่เกิดฟอลท์ลงดิน

3.10.4 วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า (Delta- Connection)

การต่อวงจรลักษณะนี้จะไม่มีเส้นทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ในไลน์เพราะไม่มีการต่อลงดินดังนั้นจึงถือว่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าสูงมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ของวงจรที่ต่อแบบเดลต้ามีการเปิดวงจรทางด้านเดลต้า แต่อีกด้านหนึ่งของการเปิดวงจรนี้จะมีการต่อระหว่างอิมพีแดนซ์ตัวเอง Z กับบัสอ้างอิง เพื่อเป็นการบ่งบอกว่าอาจเป็นไปได้ที่เกิดกระแสลำดับศูนย์ไหลวนภายในวงจรเดลต้า โดยกระแสนี้อาจเกิดขึ้นโดยแรงดันไฟฟ้าลำดับศูนย์หรือโดยการเหนี่ยวนำจากแหล่งจ่ายภายนอก วงจรที่มีการต่อแบบเดลต้ากับวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ได้แสดงในรูปที่ 3.17



รูป 3.17 วงจรลำดับศูนย์ของวงจรที่มีการต่อแบบเดลต้า

3.11 ลำดับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

(Sequence Impedance of Transformers)

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส อาจมีโครงสร้างของหม้อแปลงได้ สองประเภทคือ

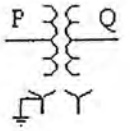
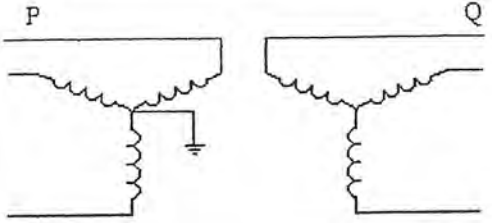
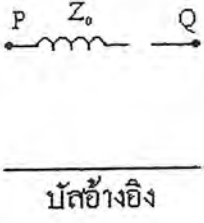
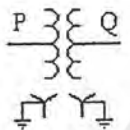
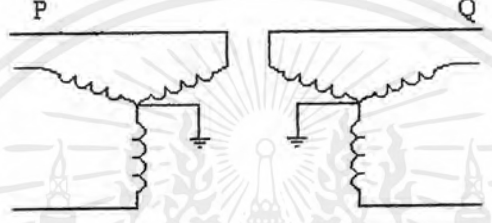


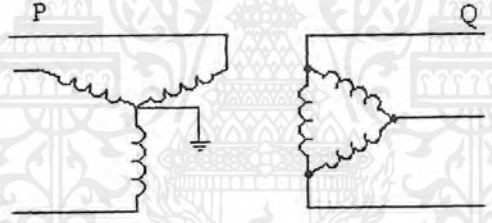

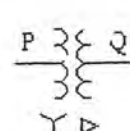
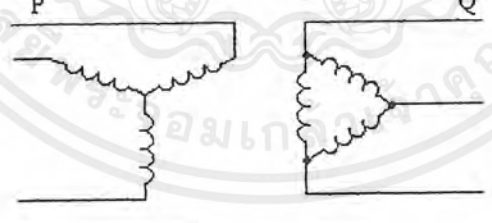

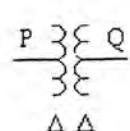
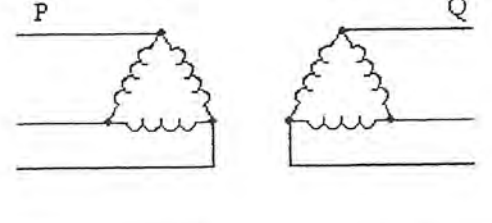
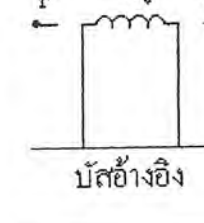
1. หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่มีโครงสร้างการเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสจำนวนสามลูก ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ
2. เป็นหม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างให้เป็นหม้อแปลงสามเฟส โดยมีขดลวดทั้งสามเฟสติดตั้งอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน

หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีอิมพีแดนซ์ลำดับบวก และลำดับลบเหมือนกัน สำหรับอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ จะมีความแตกต่างจากอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบเพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติถือว่าทั้งอิมพีแดนซ์ลำดับบวก อิมพีแดนซ์ลำดับลบ และอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าเท่ากัน ดังสมการ

$$Z_0 = Z_1 = Z_2 = Z_{tx}$$

เมื่อ Z_{tx} คืออิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า (short circuit impedance of transformer)

สำหรับวงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ เนื่องจากการต่อของขดลวดหม้อแปลงทั้งขดลวดแรงสูง และขดลวดแรงต่ำในรูปแบบ วาย และ เดลต้า สามารถทำได้หลายกรณี ซึ่งจะทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยทั่วไปแล้ว การพิจารณาการต่อของขดลวดทั้งสองหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีอยู่ 5 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 3.25 สำหรับลูกสรไนโคอะแกรมการต่อของขดลวด แสดงเส้นทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ และถ้าไม่ปรากฏลูกสรไนโคอะแกรมก็แสดงว่าไม่มีกระแสลำดับศูนย์ไหล

สัญลักษณ์	ไดอะแกรมการต่อขดลวดหม้อแปลง	วงจรสมมูลลำดับศูนย์
		 <p>บัสอ้างอิง</p>
		 <p>บัสอ้างอิง</p>
		 <p>บัสอ้างอิง</p>
		 <p>บัสอ้างอิง</p>
		 <p>บัสอ้างอิง</p>

รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของชุดหม้อแปลง 3 เฟส ที่ประกอบด้วย

ไดอะแกรมการต่อขดลวดและสัญลักษณ์สำหรับแผนภาพเส้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของการเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบในรูปแบบที่ 3.18 สามารถพิจารณาได้จากเหตุผลต่อไปนี้

1. การเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ วาย-วาย ด้านหนึ่งต่อลงดิน

ถ้านิวตรอลด้านใดด้านหนึ่งของการเบงก์แบบ วาย-วาย ไม่ต่อลงดิน จะทำให้กระแสลำดับศูนย์ไม่สามารถไหลในขดลวดด้านนั้นได้ การที่ไม่มีเส้นทางการไหลของกระแสลำดับศูนย์ในขดลวดด้านหนึ่ง จะเป็นการป้องกันการไหลของกระแสลำดับศูนย์ของขดลวดด้านหนึ่งด้วย ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่มีการต่อหม้อแปลงที่มีการเบงก์แบบ วาย-วาย จะไม่ต่อเชื่อมกันสำหรับกระแสลำดับศูนย์จึงทำให้วงจรสมมูลลำดับศูนย์เปิดวงจร

2. การเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ วาย-วาย ที่นิวตรอลต่อลงดินทั้งสองด้าน

เมื่อนิวตรอลทั้งสองของการเบงก์แบบ วาย-วาย ต่อลงดิน จะทำให้เส้นทางการไหลสำหรับกระแสลำดับศูนย์ผ่านขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นวงจรสมมูลลำดับศูนย์จึงมีการต่อเชื่อมทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีนี้จะทำให้วงจรไฟฟ้าลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์มีลักษณะเหมือนกัน

3. การเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ วาย-เดลต้า ที่นิวตรอลของวายต่อลงดิน

ถ้านิวตรอลของการเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ วาย-เดลต้า มีการต่อลงดิน ทำให้กระแสลำดับศูนย์มีเส้นทางการไหลจากขดลวดด้านวายไปสู่ดิน เพราะจะสอดคล้องกับการเหนี่ยวนำที่จะทำให้เกิดกระแสไหลวนในขดลวดด้านเดลต้า และกระแสลำดับศูนย์ที่ไหลวนในขดลวดด้านเดลต้า จะมีความสมดุล ดังนั้นกระแสลำดับศูนย์จึงไม่สามารถที่จะไหลผ่านไปยังด้านเดลต้าได้วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของการเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้า กรณีนี้จึงมีการต่อบัสอ้างอิงกับไลน์ด้านไลน์โดยผ่านอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ และจะมีการเปิดวงจรระหว่างไลน์กับบัสอ้างอิงทางด้านเดลต้า

ถ้านิวตรอลด้านวายต่อลงดิน โดยผ่านอิมพีแดนซ์ Z_n ของวงจรสมมูลลำดับศูนย์จะต้องมีอิมพีแดนซ์ $3Z_n$ ต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ Z_0 ของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วจึงต่อกับบัสอ้างอิง

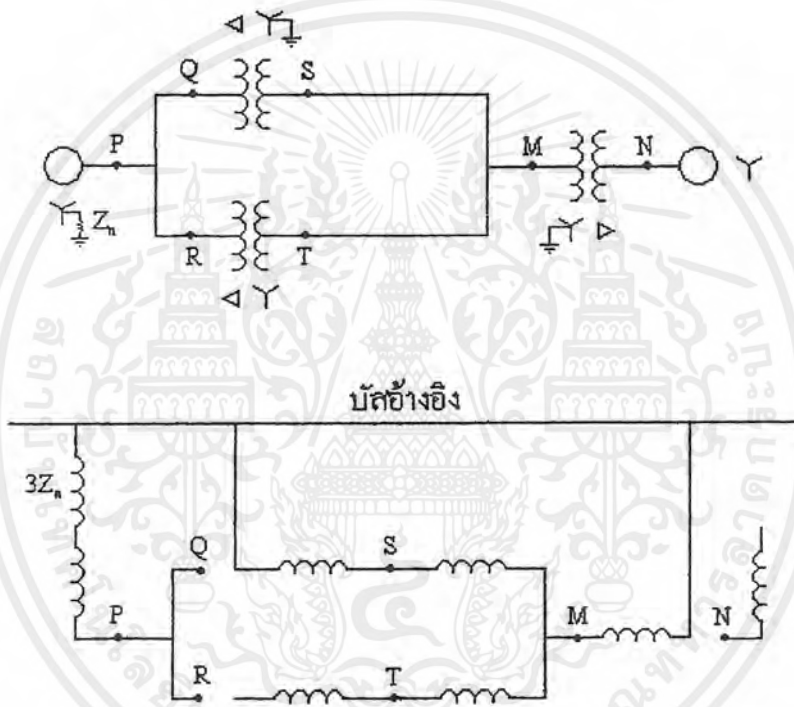
4. การเบงก์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ วาย-เดลต้า ที่นิวตรอลของวายไม่ต่อลงดิน

เมื่อนิวตรอลของวายไม่ต่อลงดินจึงทำให้ดูเหมือนว่าอิมพีแดนซ์ Z_n ระหว่างนิวตรอลกับดินมีค่าสูงมาก ดังนั้นกระแสลำดับศูนย์ไม่สามารถไหลในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ จึงทำให้วงจรสมมูลลำดับศูนย์เปิดวงจรระหว่างด้านวายกับด้านเดลต้า

5. การแบ่งกัหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ เกลด้า-เกลด้า

วงจรเกลด้าไม่มีเส้นทางการไหลกลับของกระแสลัดดับศูนย์ ดังนั้นกระแสลัดดับศูนย์ไม่สามารถไหลผ่านระหว่างขดลวดทั้งสองด้านได้ ถึงแม้ว่าจะมีกระแสลัดดับศูนย์ไหลวนอยู่ภายในของขดลวดที่ต่อเกลด้าก็ตาม

เมื่อทำการต่อวงจรไฟฟ้าลัดดับศูนย์ให้เป็นรูปแบบที่สมบูรณ์ วงจรสมมูลลัดดับศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถที่จะแบ่งระบบไฟฟ้าออกเป็นส่วนๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูป 3.19 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลังและวงจรไฟฟ้าลัดดับศูนย์ที่สอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ฟลอร์ทแบบไม่สมมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ฟอลต์แบบไม่สมมาตร

ฟอลต์แบบไม่สมมาตร หมายถึง การลัดวงจรในระบบแล้วกระแสในสามเฟสมีขนาดไม่เท่ากันและ/หรือมุมของกระแสไม่ห่างกัน 120 องศา กล่าวง่าย ๆ คือ ฟอลต์แบบไม่สมมาตรหมายถึงการลัดวงจรที่ไม่ใช่การลัดวงจรแบบสามเฟสนั่นเอง โดยทั่วไปการเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่มักเป็นแบบไม่สมมาตร เพราะ โอกาสที่จะเกิดลัดวงจรแบบสามเฟสพร้อมกันมีน้อย ขนาดของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสไม่ได้รุนแรงที่สุดเสมอ บางระบบอาจให้กระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรรุนแรงกว่าสามเฟสได้

ฟอลต์แบบไม่สมมาตรทำให้กระแสลัดวงจรในแต่ละเฟสมีขนาดไม่เท่ากันและ/หรือมุมอาจไม่เท่ากันดังนั้นการคำนวณกระแสลัดวงจรจึงไม่สามารถคำนวณจากวงจรสมมูลหนึ่งเฟส (single phase equivalent circuit) ได้ จึงต้องใช้วิธีการขององค์ประกอบสมมาตร (symmetrical component) มาช่วยแปลงระบบลัดวงจรไม่สมมาตรดังกล่าวให้เป็นระบบลัดวงจรสมมาตรจึงสามารถคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ง่าย

สำหรับรูปแบบและ โอกาสของการเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

รูปแบบของการเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตร	โอกาสของการเกิดฟอลต์ (%)
1. ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน (single line-to-ground faults)	70
2. ฟอลต์ระหว่างไลน์ (line-to-line faults)	15
3. ฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดิน (double line-to-ground faults)	10

ตารางที่ 4.1 รูปแบบและ โอกาสของการเกิดฟอลต์แบบไม่สมมาตร

ฟอลต์แบบไม่สมมาตรเป็นต้นเหตุให้กระแสที่ไหลในระบบ ไม่สมดุล ดังนั้นวิธีการของส่วนประกอบสมมาตรจึงมีประโยชน์อย่างมากเมื่อนำมาวิเคราะห์หากกระแสและแรงดันในทุกส่วนของระบบหลังจากได้เกิดฟอลต์ขึ้น ในขั้นตอนแรกนี้เราจะพิจารณาฟอลต์เกิดขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดก่อน แล้วจึงพิจารณาฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของเทวินินเพื่อหากระแสฟอลต์ โดยการแทนระบบทั้งหมดด้วยเครื่องกำเนิดไฟ

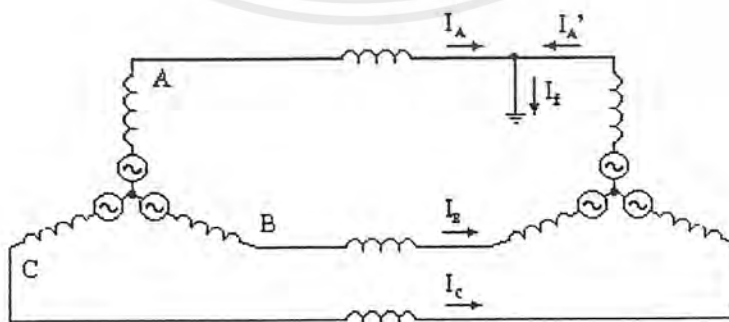
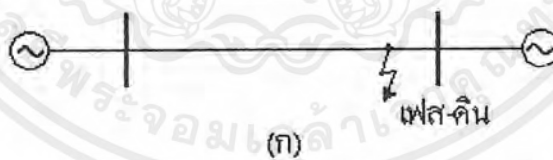
ฟ้า 1 หน่วย และอิมพีแดนซ์อนุกรม และสุดท้ายเราจะศึกษาวิธีการของบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์นำมาวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร

ถ้าไม่คำนึงถึงว่าเกิดฟอลต์ชนิดใดขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เราสามารถใช้สมการเมทริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{s,0} \\ V_{s,1} \\ V_{s,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s,0} \\ I_{s,1} \\ I_{s,2} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการแก้ปัญหาลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

ก่อนพิจารณาหลักการขององค์ประกอบสมมาตร (symmetrical component) เรามาพิจารณาถึงความยากลำบากในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบไม่สมมาตรก่อนพิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 (ก) กรณีที่เกิดลัดวงจรจากเฟสลงดินที่เฟส A วงจรรูปที่ 4.1(ก) แสดงไว้ในรูปที่ 4.1(ข) การหาขนาดของกระแสลัดวงจร I_f และกระแสลัดวงจร I_A, I'_A, I_B, I_C ดังนั้นในรูปไม่ใช่เรื่องง่าย การแก้ปัญหาทำได้คือ ใช้กฎกระแสและศักดาไฟฟ้าของเคอชอฟ (KIRCHOFF current's law and voltage law) และถ้าระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ ๆ การแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นเรื่องยากลำบาก สาเหตุสำคัญที่ทำให้แก้ปัญหาได้ยากคือ ไม่สามารถแทนระบบไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ ดังนั้นวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรที่มีประโยชน์มากและทำให้การคำนวณกระแสลัดวงจร



(ข)

รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้าเกิดลัดวงจรเฟส-ดิน

(ก) โคอะแกรมเส้นเดียว (ข) วงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำได้ง่ายคือ สามารถแปลงระบบไฟฟ้าเดิมให้เป็นระบบไฟฟ้าใหม่สามรูปแบบเรียกว่า เน็ตเวิร์คบวก เน็ตเวิร์คลบ และเน็ตเวิร์คศูนย์ (positive, negative and zero networks) ซึ่งเน็ตเวิร์คแต่ละแบบสามารถเขียนวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรต่างๆ กัน เช่น การลัดวงจรเฟส-ดิน เฟส-เฟส และเฟส-เฟส-ดิน จะมีการต่อของเน็ตเวิร์คสามแบบต่างกัน เมื่อคำนวณกระแสลัดวงจรในเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ได้แล้วก็แปลงโดยวิธีการขององค์ประกอบสมมาตรกลับมาเป็นระบบไฟฟ้าเดิมเฟส A, B, C ก็จะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ พิจารณาหลักการขององค์ประกอบสมมาตรที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรของระบบในรูปที่ 4.2 ซึ่งแต่ละบล็อกในรูปอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

บล็อก 1 ระบบไฟฟ้าไคอะแกรมเส้นเดียวแสดงจุดเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตร

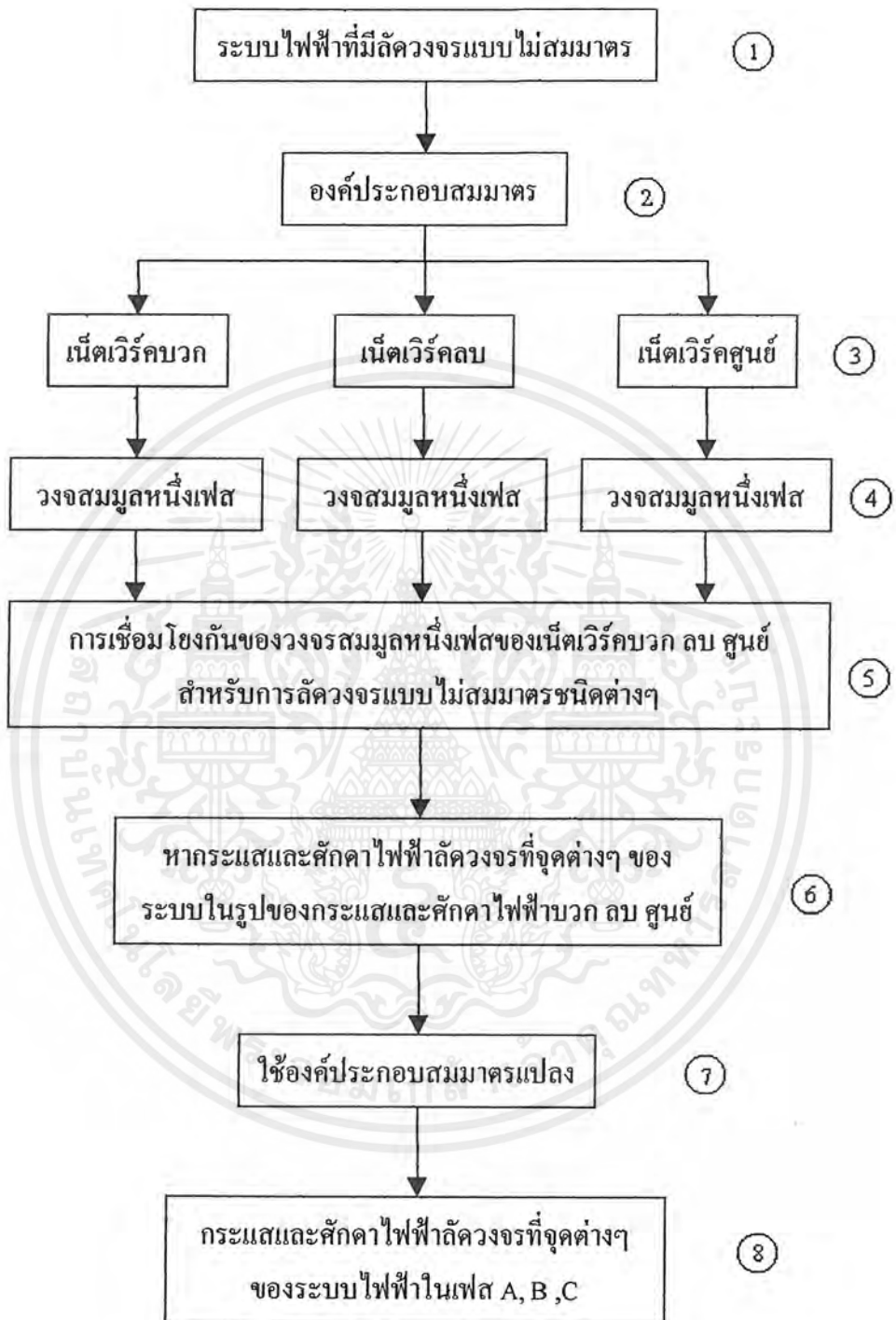
บล็อก 2 แสดงบล็อกขององค์ประกอบสมมาตรซึ่งแปลงระบบไฟฟ้าเดิมออกมาเป็นระบบไฟฟ้าใหม่ 3 ระบบคือ เน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์

บล็อก 3 เน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ เหล่านี้ประกอบด้วย อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบเดิม แต่อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ใช้เน็ตเวิร์คบวกได้แก่อิมพีแดนซ์บวก (positive sequence impedance) ส่วนอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในเน็ตเวิร์คลบก็ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ลบของอุปกรณ์ต่างๆ (negative sequence impedance) และเน็ตเวิร์คศูนย์ก็ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ศูนย์ (zero sequence impedance) มาต่อกันเป็นเน็ตเวิร์ค จะเห็นว่าอุปกรณ์แต่ละชนิดก็มีอิมพีแดนซ์บวก ลบ และศูนย์ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง

บล็อก 4 เน็ตเวิร์คในบล็อก 3 นี้ทั้งเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ ต่างก็เป็นเน็ตเวิร์คที่มีกระแสและศักดาไฟฟ้าในแต่ละเฟสขนาดเท่ากัน และมุมห่างเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ดังในบล็อก 4

บล็อก 5 การเกิดลัดวงจรแบบไม่สมมาตรแต่ละชนิด เช่น การลัดวงจรเฟส-ดิน ก็มีการเชื่อมโยงกันของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์อย่างหนึ่ง การลัดวงจรเฟส-เฟสก็มีการเชื่อมโยงกันของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์อีกแบบหนึ่ง ดังนั้นเมื่อต้องการหากระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรของการลัดวงจรแบบใดก็นำเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์มาเชื่อมโยงกันเพื่อแทนการเกิดลัดวงจรแบบนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 หลักการขององค์ประกอบสมมาตรในการคำนวณกระแสลักษณะวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บล็อกร 6 เมื่อได้รูปการเชื่อมโยงของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์เพื่อแทนการเกิดลัดวงจรแบบที่ต้องการพิจารณาแล้วก็คำนวณหากระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรในเน็ตเวิร์คทั้งสามนั้น

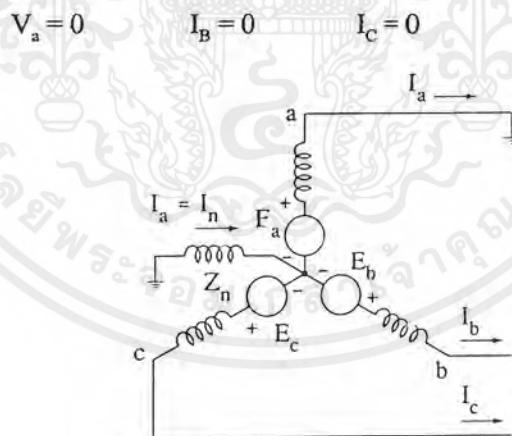
บล็อกร 7 ใช้องค์ประกอบสมมาตรแปลงกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรที่หาได้ในบล็อกร 6 ของเน็ตเวิร์คบวก ลบ และศูนย์ให้เป็นกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรกลับไปเป็นของระบบไฟฟ้าเดิม A, B, C

บล็อกร 8 ผลลัพธ์ของกระแสและศักดาไฟฟ้าลัดวงจรที่ได้ออกมาจากบล็อกรที่ 7

4.1 การเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์กับดินที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

(Single Line – to – Ground Fault on Unloaded Generator)

ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลดและมีการต่อขดลวดแบบวายโดยนิวทรัลต่อลงดินด้วยการผ่านรีแอกแตนซ์ เมื่อเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์กับดินขึ้นที่ขั้วเฟส a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงโคอะแกรมตามรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถเขียนสมการของการเกิดฟอลท์แบบนี้ได้คือ



รูปที่ 4.3 โคอะแกรมของการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน ที่ขั้วเฟส a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์

เมื่อกระแส $I_b = 0$ และ $I_c = 0$ ส่วนประกอบสมมาตรของกระแสคือ

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น I_{a0} , I_{a1} และ I_{a2} จะเท่ากับ $\frac{I_a}{3}$ และ

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.1) เราจะนำค่า I_{a1} ไปแทน I_{a2} และ I_{a0} เราจะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

นำเมทริกซ์แถว $[1 \ 1 \ 1]$ คูณตลอดสมการที่ (4.3) จะได้

$$[1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = [1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - [1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} I_{a1}Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{a1}Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & I_{a1}Z_2 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} &= E_a - I_{a1}Z_0 - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \\ V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} &= -I_{a1}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

เมื่อ $V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0$ เราแก้สมการที่ (4.4) หาค่ากระแส I_{a1} จะได้

$$I_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0) = E_a$$

ดังนั้น

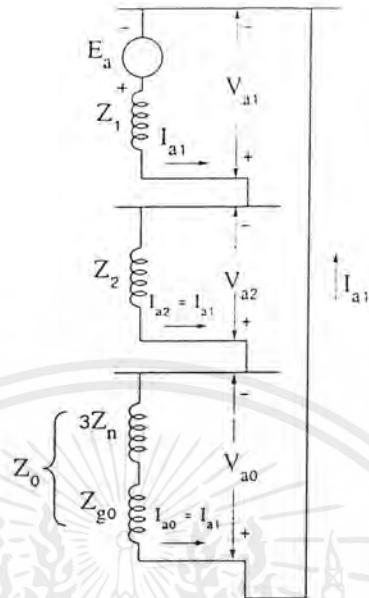
$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (4.5)$$

และ

$$I_a = 3I_{a1}$$

สมการที่ (4.2) และสมการที่ (4.5) เป็นสมการเฉพาะของฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน เรานำมาใช้ร่วมกับสมการที่ (4.1) และความสัมพันธ์ของส่วนประกอบสมมาตร เพื่อหาแรงดันและกระแสทั้งหมดที่จุดเกิดฟอลต์ จากสมการที่ (4.2) จะเห็นได้ว่า กระแส $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$ ดังนั้นถ้าคircuit วงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีกรต่ออนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การต่อลำดับของวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลด
เมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินที่ขั้วของเฟส a

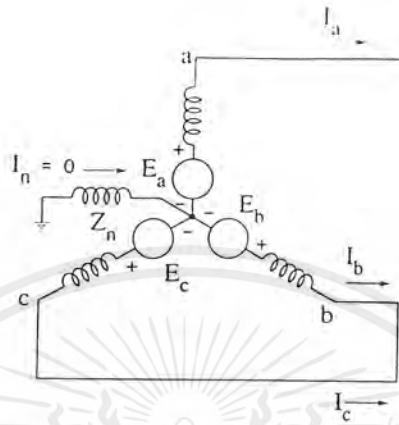
การต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.4 จะมีแรงดัน E_a และลำดับของอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 ต่ออนุกรมกัน ซึ่งสามารถทำให้ง่ายต่อการจดจำสมการสำหรับการแก้ปัญหาของฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน

ถ้านิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้ต่อดิน ก็เหมือนกับว่าวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์เปิดวงจร ($Z_0 = \infty$) ดังนั้นสมการที่ (4.5) จะแสดงค่า $I_{a1} = 0$ เมื่อ $Z_0 = \infty$ และจากสมการที่ (4.2) ค่ากระแส I_{a2} และ I_{a0} ต้องเท่ากับศูนย์ด้วย ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลในสายตัวนำ a เมื่อผลรวมของส่วนประกอบทั้งหมดเพื่อให้ได้ I_a มีค่าเท่ากับศูนย์

4.2 การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

(Line – to – Line Fault on An Unloaded Generator)

เมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขดลวดแบบวายและนิวทรัลต่อดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์ และขณะที่เครื่องไม่ได้จ่ายโหลด ตามไดอะแกรมของรูปที่ 4.5 โดยเกิดฟอลต์ที่ขั้วของเฟส b และ c



รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมของการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ของเฟส b และเฟส c ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่ได้จ่ายโหลด

เงื่อนไขของการเกิดฟอลต์ในรูปแบบนี้ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

เมื่อ $V_b = V_c$ ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันคือ

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

จากสมการเมทริกซ์ข้างต้นเราจะได้

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)$$

ดังนั้น

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (4.6)$$

เมื่อ $I_b = -I_c$ และ $I_a = 0$ ส่วนประกอบสมมาตรของกระแสคือ

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(-I_c + I_c) = 0 \quad (4.7)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(-aI_c + a^2I_c)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(-a^2I_c + aI_c)$$

และ

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (4.8)$$

จากการต่อนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงดินโดยผ่านรีแอกแตนซ์ ดังนั้นจะทำให้ Z_0 มีค่า แต่เมื่อ $I_{a0} = 0$ ดังนั้น

$$V_{a0} = 0 \quad (4.9)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (4.6) ถึง (4.9) ลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{a1} \\ V_{a1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

นำเมทริกซ์แถว $[1 \ 1 \ -1]$ คูณตลอดสมการที่ (4.10) จะได้

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{a1} \\ V_{a1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{a1}Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & -I_{a1}Z_2 \end{bmatrix}$$

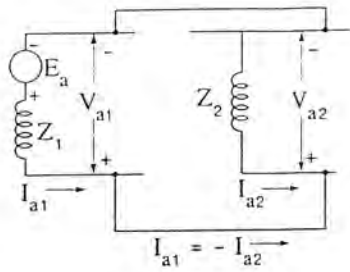
$$0 = E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \quad (4.11)$$

แก้สมการที่ (4.11) เพื่อหาค่ากระแส I_{a1} จะได้

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (4.12)$$

สมการที่ (4.6) สมการที่ (4.8) และสมการที่ (4.12) เป็นสมการของฟอลต์ระหว่างไลน์ เรานำมาใช้ร่วมกับสมการที่ (4.1) และความสัมพันธ์ของส่วนประกอบสมมาตร เพื่อหากระแสและแรงดันทั้งหมดที่จุดเกิดฟอลต์ สมการเฉพาะสมการนี้สามารถบอกได้ว่า มีการต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าเพื่อใช้แสดงการเกิดฟอลต์ได้อย่างไร เมื่อ Z_0 ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับสมการเฉพาะจึงทำให้ไม่ต้องใช้วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ และวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบจะต่อขนานกันเพราะ $V_{a1} = V_{a2}$ เมื่อต่อขนานวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบโดยปราศจากวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์วงจรขนานนี้จึงมีกระแส $I_{a1} = -I_{a2}$ ตามสมการที่ (4.8) การต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าสำหรับการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ได้แสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

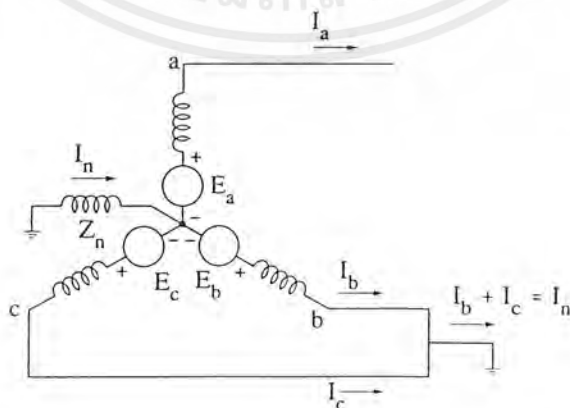


รูปที่ 4.6 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลด และเกิดฟอลต์ขึ้นระหว่างไลน์ที่ขั้วของเฟส b และเฟส c

เมื่อตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับดิน (จะมีศักย์ดินเพียงจุดเดียวเท่านั้นคือ นิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ทำให้กระแสไม่สามารถไหลไปสู่ดินได้ ดังนั้นกระแส $I_{a0} = 0$ และไม่ว่านิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อลงดินหรือไม่ก็ตามจะไม่มีผลต่อกระทบต่อกระแสฟอลต์

4.3 การเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (Double Line – to – Ground Fault An Unloaded Generator)

การเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับดิน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อขดลวดแบบวายและนิวทรัลต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์ การเดินเครื่องนี้ยังไม่ได้จ่ายโหลด ตามไดอะแกรมของรูปที่ 4.7 และฟอลต์นี้เกิดขึ้นที่ขั้วของเฟส b และเฟส c



รูปที่ 4.7 ไดอะแกรมของการเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดิน ที่ขั้วเฟส b และเฟส c ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่ได้จ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขของการเกิดฟอลต์รูปแบบนี้ สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad I_a = 0$$

เมื่อ $V_b = 0$ และ $V_c = 0$ ส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันคือ

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น V_{a0} , V_{a1} และ V_{a2} จะเท่ากับ $\frac{V_a}{3}$ และ

$$V_{a1} = V_{a2} = \frac{V_a}{3} \quad (4.13)$$

เมื่อ

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1$$

และแทนค่า V_{a1} , V_{a2} และ V_{a0} ของสมการที่ (4.1) ด้วย $E_a - I_{a1}Z_1$ จะได้

$$\begin{bmatrix} E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

คูณ $[Z]^{-1}$ ตลอดสมการจะได้

$$[Z]^{-1} \begin{bmatrix} E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \end{bmatrix} = [Z]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - [Z]^{-1} \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$[Z]^{-1} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_2 \end{bmatrix}$$

คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (4.14) ด้วยเมทริกซ์แถว $[1 \ 1 \ 1]$ จะได้

$$\frac{E_a - I_{a1}Z_1}{Z_0} + \frac{E_a - I_{a1}Z_1}{Z_1} + \frac{E_a - I_{a1}Z_1}{Z_2} = \frac{E_a}{Z_1} - (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2})$$

เนื่องจาก $I_a = 0$ ดังนั้น $I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = I_a = 0$ จะได้

$$\frac{E_a}{Z_1} = \frac{E_a}{Z_0} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{E_a}{Z_1} - I_{a1} \frac{E_a - I_{a1}Z_1}{Z_2} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_2} \quad (4.15)$$

เมื่อจัดเทอมของสมการที่ (4.15) ใหม่เราจะได้

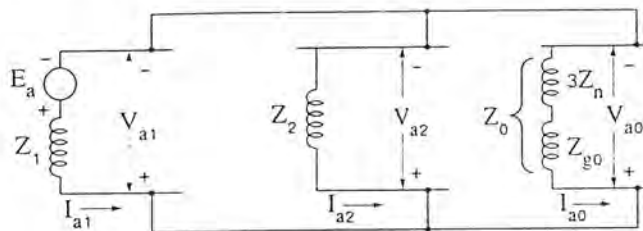
$$I_{a1} + I_{a1} \frac{Z_1}{Z_0} + I_{a1} \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{E_a}{Z_0} + \frac{E_a}{Z_2}$$

$$I_{a1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_1}{Z_2} \right) = \frac{E_a (Z_2 + Z_0)}{Z_2 Z_0} \quad (4.16)$$

และ

$$I_{a1} = \frac{E_a (Z_2 + Z_0)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (4.17)$$

สมการที่ (4.13) และสมการที่ (4.17) เป็นสมการเฉพาะของฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดิน เรานำมาใช้ร่วมกับสมการที่ (4.1) และความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบสมมาตร เพื่อหากระแสและแรงดันทั้งหมดที่จุดเกิดฟอลต์ เนื่องจากแรงดัน $V_{a1} = V_{a2} = V_{a0}$ ตามสมการที่ (4.13) ดังนั้นวงจรไฟฟ้าลำดับลบ และลำดับศูนย์ของฟอลต์แบบนี้จะต้องต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายโหลด

และเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์ที่ขั้วของเฟส b และเฟส c กับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้านิวัตต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ต่อลงดิน กระแสที่จุดฟอลท์ที่ไม่สามารถผ่านไปสู่อินได้ กรณีอย่างนี้มีพีแอนด์แอนด์ค่าสูงมาก ($Z_0 = \infty$) และกระแส $I_{a0} = 0$ ดังนั้นจึงทำให้ผลลัพธ์ของการหากระแสจะเหมือนกับการเกิดฟอลท์ระหว่างไลน์ สมการที่ (4.17) จึงเหมือนกับสมการที่ (4.12) โดยสมการแสดงดังนี้

$$\text{จากสมการที่ (4.17)} \quad I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)}$$

นำค่า $Z_0 \rightarrow \infty$ หาค่าเศษและส่วนของเทอม $[Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)]$ จะได้

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0 / Z_0}{(Z_2 + Z_0) / Z_0}}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad \text{ซึ่งก็คือสมการที่ (4.12)}$$

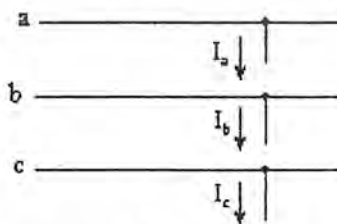
4.4 ฟอลต์แบบไม่สมมาตรของระบบไฟฟ้ากำลัง (Unsymmetrical Fault on Power System)

ก่อนที่จะไปวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรของระบบไฟฟ้ากำลังในแต่ละรูปแบบ เรามาทำความเข้าใจกับสมมติฐานต่าง ๆ ที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ฟอลต์ดังต่อไปนี้

4.4.1 กระแส

เราจะกำหนดกระแส I_a , I_b และ I_c เป็นกระแสที่ไหลระหว่างที่เกิดฟอลท์ของกระแสเฟส a, b และ c ตามลำดับ โดยเราสามารถแสดงภาพการไหลของกระแส I_a , I_b และ I_c ได้ตามรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงไลน์ของระบบ 3 เฟส และทิศทางการไหลในส่วนของวงจรที่เกิดฟอลท์

รูปที่ 4.9 สายค้วนำของระบบ 3 เฟส ที่แสดงทิศทางการไหลของกระแสจากแต่ละเฟส



ไปยังจุดที่เกิดฟอลท์โดยกระแสที่อาจจะไหลต่อเชื่อมกันตามชนิดของฟอลท์

4.4.2 แรงดัน

แรงดันที่จุดเกิดฟอลท์เป็นแรงดันระหว่างไลน์กับนิวัตต์ซึ่งเรากำหนดเป็น V_a , V_b และ V_c

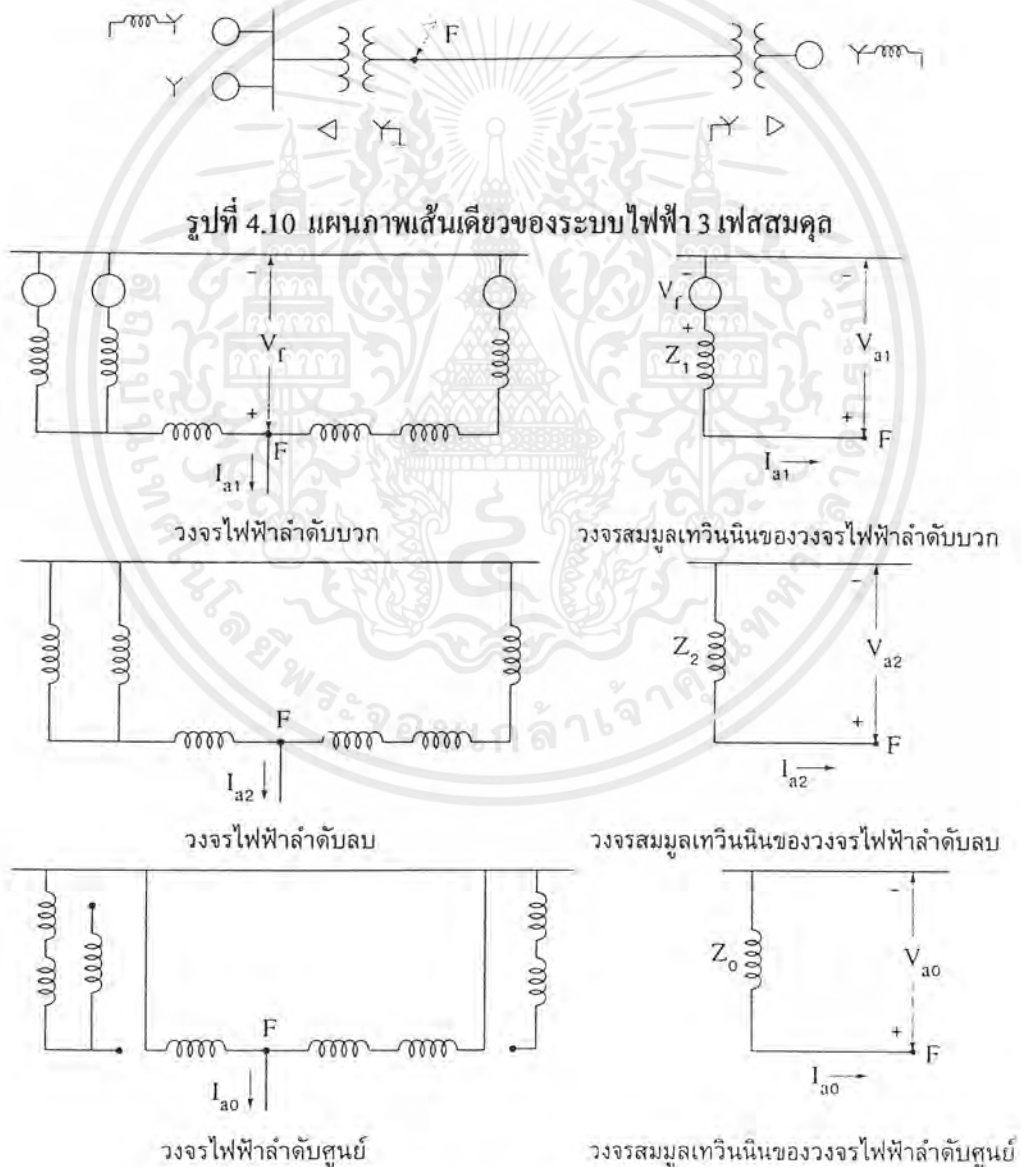
ก่อนเกิดฟอลท์แรงดันระหว่างไลน์กับนิวัตต์ของเฟส a ตรงตำแหน่งที่เกิดฟอลท์ เรียกว่า V_f ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันลำดับบวกโดยสมมติให้เป็นระบบที่สมดุล เราได้เคยพบกับแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ V_f เมื่อครั้งคำนวณหากระแสของระบบไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์แบบสมมาตร

4.4.3 ลำดับวงจรไฟฟ้า

สมมติให้มีระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 4.10 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรกลซิงโครนัส 3 เครื่องถ้าระบบไฟฟ้าเกิดฟอลต์ขึ้นที่จุด F เราสามารถเขียนลำดับของวงจรไฟฟ้าระบบนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยแต่ละลำดับวงจรสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลเทวินิน ซึ่งขั้วทั้งสองของวงจรสมมูลคือ บัสอ้างอิงและจุดของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ขึ้นที่ระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แรงดันภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของวงจรสมมูลสำหรับวงจรไฟฟ้าลำดับบวกคือ แรงดัน V_f ซึ่งเป็นแรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัลที่จุดเกิดฟอลต์ และ V_f เป็นแรงดันก่อนการเกิดฟอลต์

อิมพีแดนซ์ Z_1 ของวงจรสมมูลคือ อิมพีแดนซ์ที่วัดระหว่างจุด F ที่เกิดฟอลต์กับบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับบวก โดยขณะที่วัดอิมพีแดนซ์นี้ต้องทำการลัดวงจรแรงดันเหนี่ยวนำภายในทั้งหมด ค่าของ Z_1 ขึ้นอยู่กับรีแอกแตนซ์ในวงจรไฟฟ้า

ก่อนการเกิดฟอลต์จะไม่มีกระแสลำดับลบและลำดับศูนย์ไหลในระบบไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันก่อนการเกิดฟอลต์ระหว่างจุด F กับบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับลบและลำดับศูนย์จึงมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของวงจรไฟฟ้าลำดับลบและลำดับศูนย์ สำหรับอิมพีแดนซ์ Z_2 และ Z_0 เป็นค่าที่วัดระหว่างจุด F กับบัสอ้างอิงของวงจรไฟฟ้าลำดับลบและลำดับศูนย์ตามลำดับขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ด้วย

เมื่อ I_a คือกระแสที่ไหลจากระบบไฟฟ้าไปยังจุดที่เกิดฟอลต์ ซึ่งมีส่วนประกอบของ I_{a1} , I_{a2} และ I_{a0} ไหลออกจากแต่ละระลำดับของวงจรไฟฟ้าและวงจรสมมูลของวงจรไฟฟ้าไปสู่จุด F ดังแสดงในรูปที่ 4.11 วงจรสมมูลเทวินินของวงจรไฟฟ้าลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของระบบไฟฟ้านี้จะเหมือนกับวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 หน่วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นสมการเมทริกซ์สำหรับส่วนประกอบสมมาตรของแรงดันที่จุดเกิดฟอลต์ต้องเหมือนกับสมการที่ (4.1) เว้นแต่ต้องแทน E_a ด้วย V_f ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

4.5 การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง

(Single Line – to – Ground Fault on A Power System)

การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินจะมีสมมติฐานการต่อของไลน์ 3 เฟส เพื่อแสดงการไหลของกระแสตามรูปที่ 4.12 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ของสมการที่เกิดฟอลต์ดังนี้

$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = 0$$

สมการทั้ง 3 สมการนี้เหมือนกับที่ได้ใช้กับการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อประยุกต์ใช้สมการเหล่านี้ร่วมกับสมการที่ (4.18) และความสัมพันธ์ของส่วนประกอบสมมาตรแล้ว จะต้องได้สมการที่ใช้แก้ปัญหาเพื่อหากระแสและแรงดันที่จุดเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกับในหัวข้อที่ 4.1 เว้นแต่เราต้องแทน E_a ด้วย V_f ดังนั้นสมการของการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินคือ

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (4.19)$$

และ

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (4.20)$$

สมการที่ (4.19) และสมการที่ (4.20) สามารถบอกเราได้ว่า วงจรไฟฟ้าลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ต้องต่ออนุกรมกันผ่านจุดที่เกิดฟอลต์เมื่อจะจำลองการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน



รูปที่ 4.12 การไหลของกระแสเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินขึ้นระหว่างระบบไฟฟ้ากำลัง

4.5 การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง

(Line – to – Line Fault on A Power System)

การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์จะมีสมมติฐานการต่อไลน์ 3 เฟส เพื่อแสดงการไหลของระแสดตามรูปที่ 4.13 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ของสมการที่เกิดฟอลต์ดังนี้

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

สมการข้างต้นเหมือนกับสมการของการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.2 ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้แก้ปัญหาของฟอลต์ชนิดนี้คือ

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (4.21)$$

และ

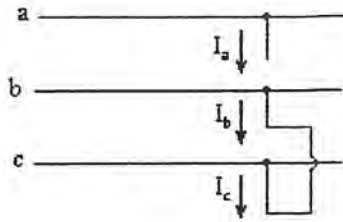
$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (4.22)$$

สมการที่ (4.21) และสมการที่ (4.22) สามารถบอกเราได้ว่า วงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับ

ลบจะต้องต่อขนานกันที่จุดเกิดฟอลต์เมื่อจะจำลองการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การไหลของกระแสเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง

4.7 การเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง

(Double Line – to – Ground Fault on A Power System)

การเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินมีสมมติฐานการต่อไลน์ 3 เฟส เพื่อแสดงการไหลของกระแสตามรูปที่ 4.14 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของสมการที่เกิดฟอลต์ดังนี้

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_a = 0$$

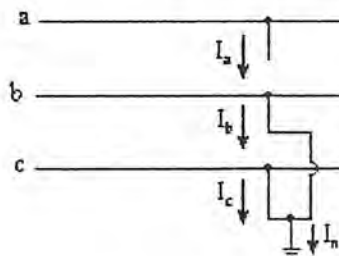
เช่นเดียวกัน สมการข้างต้นเหมือนกับสมการของการเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในหัวข้อที่ 4.3 ดังนั้นสมการที่ใช้แก้ปัญหาของฟอลต์ชนิดนี้คือ

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (4.23)$$

และ

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 Z_0)} \quad (4.24)$$

สมการที่ (4.23) และสมการที่ (4.24) สามารถบอกเราได้ว่า ลำดับของวงจรไฟฟ้าทั้งสามต้องต่อขนานกันที่จุดเกิดฟอลต์เมื่อจำลองการเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดิน



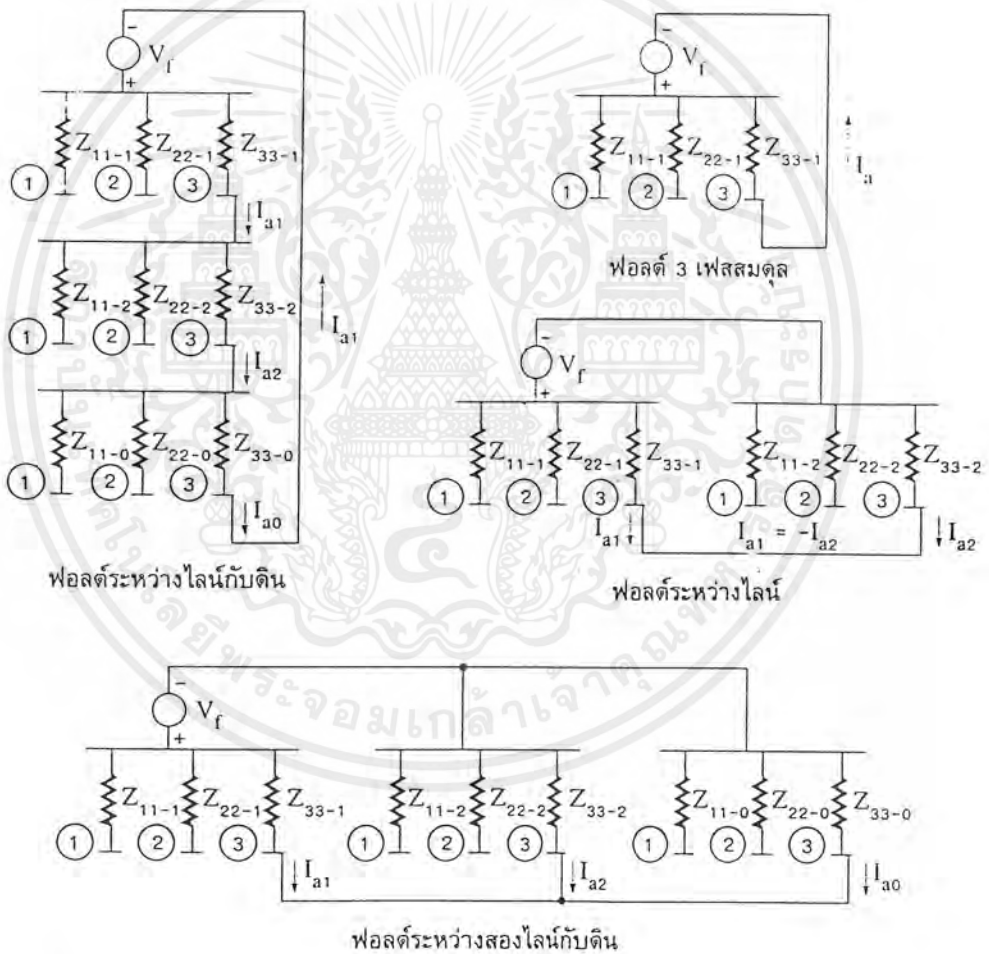
รูปที่ 4.14 การไหลของกระแสเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินขึ้นที่ระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรด้วยการใช้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

(Unsymmetrical Fault Analysis By Using Bus Impedance Matrix)

เราได้เคยใช้บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยบัสอิมพีแดนซ์ลำดับบวก เพื่อให้หากระแสและแรงดันเมื่อเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟสสมดุล วิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตรได้ โดยการเพิ่มวงจรไฟฟ้าลำดับลบและลำดับศูนย์แทนลำดับอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในรูปแบบของบัสอิมพีแดนซ์ ดังในรูปที่ 4.20 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.15

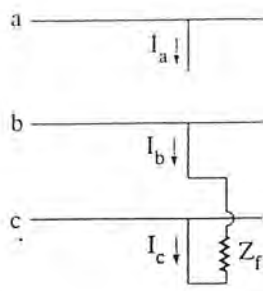


รูปที่ 4.15 การต่อของบัสอิมพีแดนซ์สมมูลตามลำดับวงจรของระบบ 3 เฟส สำหรับจำลองการเกิดฟอลต์ชนิดต่าง ๆ

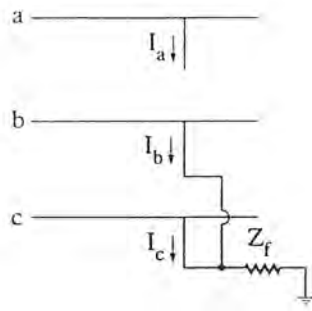
จากรูปที่ 4.15 การต่อวงจรของบัสอิมพีแดนซ์สำหรับระบบไฟฟ้า 3 บัส และตัวห้อย 1, 2

และ 3 ของอิมพีแดนซ์ Z ที่เพิ่มเข้ามา ก็เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงลำดับวงจรไฟฟ้าของบัสอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ฟอลต์ระหว่างไลน์



(ง) ฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดิน

รูปที่ 4.16 โคอะแกรมแสดงการไหลของกระแส เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดต่างๆ ผ่านอิมพีแดนซ์ (ต่อ)

4.9.1 ฟอลต์ 3 เฟสสมดุลผ่านอิมพีแดนซ์

เมื่อเกิดฟอลต์ 3 เฟสสมดุล ขึ้นกับระบบที่สมมาตรจะมีอิมพีแดนซ์ในแต่ละไลน์เท่ากันและมีกระแสลำดับบวกไหลในระบบเท่านั้น เมื่อฟอลท์อิมพีแดนซ์ Z_f ทุกเฟสมีค่าเท่ากัน ดังแสดงตามรูปที่ 4.16 (ก) ค่าแรงดันที่จุดเกิดฟอลท์คือ

$$V_a = I_a Z_f$$

กระแสที่ไหลในระบบจะมีเฉพาะกระแสลำดับบวก ดังนั้น

$$V_{a1} = I_{a1} = V_f - I_{a1} Z_1$$

และ

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \tag{4.26}$$

การต่อของลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ 3 เฟสสมดุล แสดงในรูปที่ 4.17

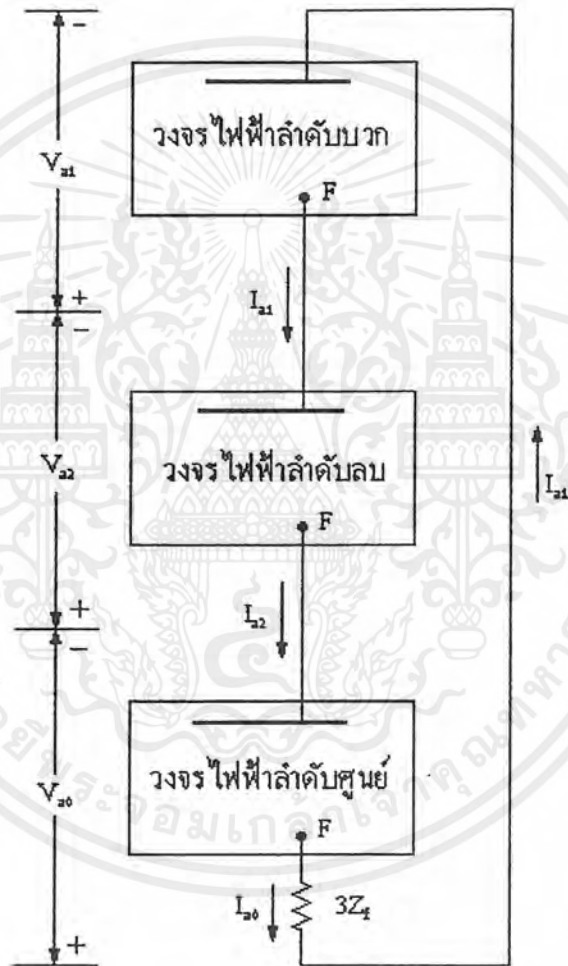


รูปที่ 4.17 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ 3 เฟสสมดุลผ่านอิมพีแดนซ์

4.9.2 ฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์ตามรูปที่ 4.16 (ข) เราจะพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีเกิดฟอลต์ชนิดเดียวกันแต่ไม่ผ่านอิมพีแดนซ์ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิวทรัลต่อลงดิน เมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์ Z_f จะมีผลไม่แตกต่างไปจากการเกิดฟอลต์โดยไม่ผ่านอิมพีแดนซ์ เพียงแต่ต้องมีค่า Z_f ต่ออยู่ระหว่างนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับดิน นั่นก็คือเราจะต้องเพิ่ม $3Z_f$ เข้าไปในวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์ ดังแสดงการต่อลำดับของวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 4.18 พิจารณาสมการของฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์ จะมีสมการส่วนประกอบของกระแส ดังนี้

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

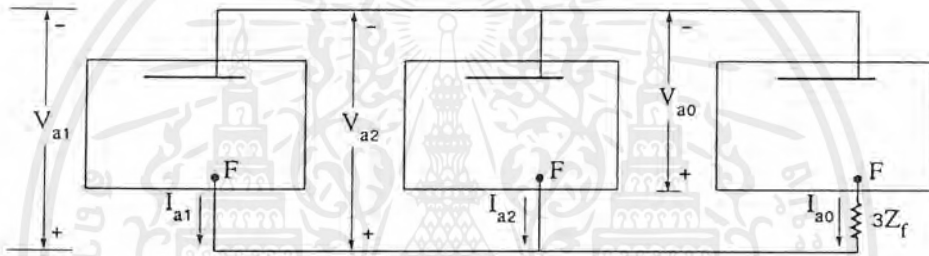
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (4.27)$$

4.9.3 ฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์

การเกิดฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์ ตามรูปที่ 4.16 (ง) เราสามารถพิจารณาด้วยหลักการเดียวกันกับฟอลต์ระหว่างไลน์กับดินโดยไม่ผ่านอิมพีแดนซ์คือ ต้องเพิ่มอิมพีแดนซ์ $3Z_f$ เข้าไปในวงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์เช่นเดียวกัน ดังแสดงการต่อลำดับวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 พิจารณาวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 4.19 พิจารณาสมการของฟอลต์ระหว่างสองไลน์กับดินผ่านอิมพีแดนซ์จะมีค่าดัง

$$V_{a1} = V_{a2}$$

และ

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2(Z_0 + 3Z_f)/(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (4.28)$$

4.9.4 ฟอลต์ระหว่างไลน์ผ่านอิมพีแดนซ์

การเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์ผ่านอิมพีแดนซ์ ตามรูปที่ 4.16 (ค) จะมีเงื่อนไขของการเกิดฟอลต์ ดังสมการต่อไปนี้

$$I_a = 0 \quad I_b = I_c \quad V_c = V_b - I_b Z_f$$

เมื่อ I_a , I_b และ I_c จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันเหมือนกับการเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์โดยไม่ผ่านอิมพีแดนซ์ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

และส่วนประกอบของแรงดันที่ได้คือ

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b - I_b Z_f \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

หรือ

$$3V_{a1} = V_a + (a + a^2) V_b - a^2 I_b Z_f \quad (4.30)$$

$$3V_{a2} = V_a + (a + a^2) V_b - a I_b Z_f \quad (4.31)$$

ดังนั้น

$$3(V_{a1} - V_{a2}) = (a - a^2) I_b Z_f = j\sqrt{3} I_b Z_f \quad (4.32)$$

เมื่อ

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} = (a^2 - a) I_{a1} = -j\sqrt{3} I_{a1} \quad (4.33)$$

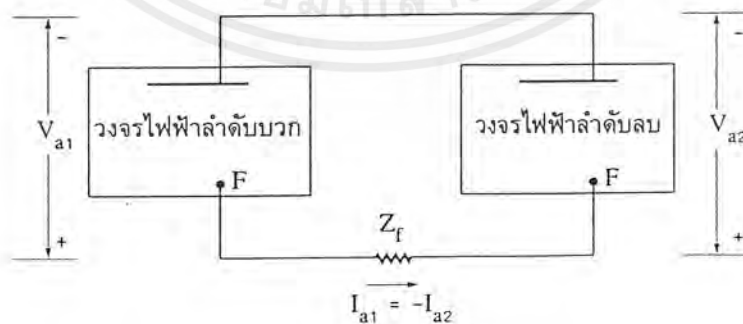
และเมื่อแทนค่า I_b จากสมการที่ (4.33) ลงในสมการที่ (4.32) จะได้

$$3(V_{a1} - V_{a2}) = j\sqrt{3} (-j\sqrt{3} I_{a1}) Z_f = 3I_{a1} Z_f$$

ดังนั้น

$$V_{a1} - V_{a2} = I_{a1} Z_f \quad (4.34)$$

จากสมการที่ (4.34) แสดงให้เห็นว่าต้องเพิ่มอิมพีแดนซ์ Z_f ระหว่างจุดที่เกิดฟอลต์ของวงจรไฟฟ้าลำดับบวกและลำดับลบ ดังแสดงการต่อลำดับวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การต่อลำดับวงจรไฟฟ้าของฟอลต์ระหว่างไลน์ผ่านอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีความจำเป็นมากทั้งนี้ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในระบบ และประการที่สองคือ คัดคอนส่วนหนึ่งของระบบที่มีปัญหาออกจากระบบใหญ่เพื่อยังสามารถจ่ายไฟให้แก่ผู้ใช้ไฟส่วนใหญ่ได้ การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีตั้งแต่การป้องกันแบบง่าย ๆ เช่น การใช้อุปกรณ์ฟิวส์หรือเบรกเกอร์ที่ทำงานด้วยรีเลย์แบบกระแสเกิน ไปจนถึงการป้องกันที่ยุ่งยากที่ต้องใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วย

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังที่จะกล่าวถึงในที่นี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกันภายในระบบ ตั้งแต่หม้อแปลงสัปดาห์ไฟฟาและกระแส รีเลย์ ฟิวส์ เบรกเกอร์ จนกระทั่งถึงการป้องกันแต่ละส่วนของอุปกรณ์หรือระบบได้แก่ การป้องกันบัส หม้อแปลง มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง ทั้งอุปกรณ์ภายในระบบและการป้องกันระบบที่จะกล่าวถึงนี้จะกล่าวเฉพาะพื้นฐานเท่านั้นส่วนรายละเอียดปลีกย่อยต่าง ๆ ซึ่งอยู่นอกเหนือจากการศึกษาการป้องกันเบื้องต้นนี้สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงรวมทั้งศึกษาการทำงานและการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละยี่ห้อจากบริษัทผู้ผลิต

5.1 การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่การจัดหาขนาดและชนิดของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ใน ระบบป้องกัน ได้นั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณกระแสและศักดาไฟฟ้าของระบบในกรณีที่เกิดลัดวงจรแบบต่าง ๆ กันก่อน ทั้งนี้เพื่อให้ทราบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ที่ใดในระบบนั้นมีโอกาสเกิด กระแสลัดวงจรสูงสุดได้นั้นเท่าใด และศักดาไฟฟ้าขณะเกิดลัดวงจรมีค่าเป็นอย่างไร การเลือกใช้ ขนาดของอุปกรณ์ที่ไม่ถูกต้องและไม่สามารถรับกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบได้ก็ทำให้ อุปกรณ์นั้น ๆ เสียหายได้ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์สูงมาก [4]

ก่อนที่จะศึกษารายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบป้องกันรวมทั้งวิธีการป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบควรทำความเข้าใจ 2 ประเด็นที่สำคัญดังนี้ก่อน คือ

- ก. กระแสลัดวงจรทำความเสียหายแก่ระบบอย่างไร
- ข. ระบบป้องกันที่ดีควรมีคุณสมบัติอย่างไร

กระแสลัดวงจรสามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเสียหายได้หลายทางได้แก่

- ก. กระแสลัดวงจรสูงทำให้เกิดความร้อนสูงภายในอุปกรณ์ที่กระแสไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

- ข. เมื่อมีกระแสลัดวงจรทำให้เกิดอาร์คขึ้น อุณหภูมิรอบ ๆ อาร์คมีค่าสูงทำให้เกิดการระเหยของสารบางอย่างและอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายและเกิดไฟไหม้
- ค. การเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบทำให้ศักดาไฟฟ้าทั้งที่จุดลัดวงจรและใกล้เคียงตกลงมาก
- ง. ทำให้ระบบไฟฟ้าสามเฟสเกิดไม่สมดุลได้ ถ้าหากอุปกรณ์ป้องกันเปิดวงจรเฟสหนึ่งเฟสใดออก
- จ. การเกิดกระแสลัดวงจรทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้ คือ อาจเกิดการสูญเสียเชิงโครนิซึมได้ เพราะเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกำลังกลที่ป้อนเข้าเครื่องกำเนิดและกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดและถ้ากระแสลัดวงจรเกิดขึ้นนานความไม่สมดุลดังกล่าวก็มากขึ้นจนกระทั่งเมื่อระบบตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบได้แล้วก็ตาม ความไม่สมดุลดังกล่าวอาจไม่สามารถดึงกลับมาได้

ระบบป้องกันที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ก. สามารถตรวจจับและแยกส่วนที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบให้เร็วที่สุด
- ข. สามารถจ่ายไฟได้ในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เกิดการลัดวงจรหลังจากที่แยกส่วนที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบเรียบร้อยแล้ว
- ค. กระแสลัดวงจรบางครั้งที่เกิดขึ้นแม้มีขนาดไม่สูงมากนักระบบป้องกันที่ดีต้องสามารถแยกออกได้ว่ากระแสที่ไหลออกขณะนั้นปกติหรือเกิดลัดวงจรขึ้น
- ง. ระบบป้องกันที่ดีนอกจากสามารถทำงานได้สมบูรณ์แล้วต้องใช้เวลาลงทุนไม่มากเกินไปจนเกินไป
- จ. ส่วนใหญ่ของการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบมักเป็นการลัดวงจรที่อาร์คดับได้เอง (self-clearing) คือ ไม่ใช่การเกิดลัดวงจรถาวร ดังนั้น ระบบป้องกันที่ดีต้องไม่ตัดส่วนของระบบที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบนานเกินไปทำให้ผู้ใช้ไฟไม่มีไฟใช้

เมื่อได้ทราบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเกิดลัดวงจรว่าเกิดขึ้นได้อย่างไรและคุณสมบัติของระบบป้องกันที่ดีควรประกอบด้วยอะไรบ้างแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็เป็นการศึกษาลงไปรายละเอียดว่าระบบป้องกันนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์อะไรบ้าง และมีการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังอะไรบ้าง คุณสมบัติที่ดีของระบบป้องกันดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นมีความเกี่ยวเนื่องกันหลายประการแต่ในความเป็นจริงแล้วระบบป้องกันอาจมีคุณสมบัติไม่ครบถ้วนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลาย ๆ อย่างภายในระบบเองที่ไม่สามารถได้ระบบป้องกันที่สมบูรณ์ได้เพราะบางครั้งการที่จะให้ได้คุณสมบัติที่ดีบางประการอาจทำให้คุณสมบัติด้านอื่นเลวลงด้วย ดังนั้นในความเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงจึงต้องพิจารณาหลาย ๆ ด้านประกอบกันแต่รวมความแล้วก็คือ ต้องการให้ได้ระบบป้องกันที่ดี และลงทุนไม่สูงเกินความจำเป็น

5.2 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ อุปกรณ์ตรวจจับ และอุปกรณ์ทำงาน อุปกรณ์ตรวจจับในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับว่ามีการเกิดลัดวงจรหรือฟอลท์ขึ้นในระบบหรือไม่ อุปกรณ์ตรวจจับดังกล่าวต้องสามารถแยกได้ออกกว่าระบบไฟฟ้ากำลังขณะนั้นทำงานในสภาวะปกติหรือเกิดฟอลท์ขึ้น เมื่อแน่ใจว่าเกิดฟอลท์ขึ้นในระบบอุปกรณ์ตรวจจับก็จะส่งสัญญาณไปให้อุปกรณ์ตัดส่วนที่มีปัญหาออกจากระบบ ในระบบไฟฟ้ากำลังที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่น ในระบบจำหน่ายหรือระบบไฟฟ้าในบ้านอยู่อาศัยอุปกรณ์ตรวจจับและอุปกรณ์ทำงานอาจอยู่ภายในตัวเดียวกัน เช่น ฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดเล็กที่อาศัยกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นสร้างความร้อนขึ้นภายในอุปกรณ์และเปิดวงจรออกเพื่อตัดจุดลัดวงจรออกจากระบบ แต่ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดแรงดันสูงอุปกรณ์ตรวจจับและอุปกรณ์ทำงานมักเป็นอุปกรณ์แยกต่างหากออกจากกันและมีระบบตรวจจับและการทำงานค่อนข้างยุ่งยากพอสมควร อุปกรณ์ตรวจจับในที่นี้ได้แก่ รีเลย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานที่ศักดาไฟฟ้าและ/หรือกระแสด้านต่ำ ดังนั้นจึงมักใช้ร่วมกับหม้อแปลงศักดาไฟฟ้า PT (potential transformer) และหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า CT (current transformer) อุปกรณ์ทำงานในระบบป้องกันที่เป็นตัวกำจัดหรือแยกจุดลัดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าได้แก่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ส่วนอุปกรณ์ที่มีทั้งอุปกรณ์ตรวจจับและอุปกรณ์ทำงานอยู่ภายในตัวเดียวกันและใช้ในระบบจำหน่ายได้แก่ ฟิวส์

อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน ได้แก่ ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์ป้องกัน

5.2.1 ฟิวส์

เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจร ฟิวส์นี้จะต่ออันดับอยู่กับวงจรไฟฟ้า และจะหลอมละลายเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกินพิกัดหรือลัดวงจร ฟิวส์นี้มีคุณสมบัติที่ตัดกระแสลัดวงจรได้ถึงพิกัดสูงสุด อีกทั้งมีคุณสมบัติสามารถจำกัดค่ากระแสลัดวงจร โดยให้กระแสไหลผ่านฟิวส์ต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่จะขึ้นถึงสูงสุด ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ีการทำงานง่าย และใช้กันอย่างแพร่หลายในสมัยแรกจนถึงปัจจุบันฟิวส์จะทำงานตัดวงจรออกเมื่อกระแสสูงโดยทำให้ความร้อนในรูป $I^2 R$ ภายในเส้นฟิวส์มีค่าสูงมากเกินกว่าเส้นฟิวส์จะทนได้ก็หลอมละลายและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาดออกทำให้เปิดวงจรของระบบไฟฟ้าออกเนื่องจากหลักการทำงานของฟิวส์ใช้ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นเกณฑ์ในการทำงาน กระแสไหลผ่านฟิวส์ยิ่งสูงมากเวลาที่เส้นฟิวส์หลอมละลายใช้เวลาใช้นั้นก็คือฟิวส์จำกัดกระแส

5.2.2 เซอร์คิตเบรกเกอร์

เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจรเช่นเดียวกับฟิวส์ เซอร์คิตเบรกเกอร์นี้จะทำงานด้วยกลไกการตัดวงจรอัตโนมัติเมื่อกระแสไหลเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ เซอร์คิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับตัดตอนเปิดวงจรออกหรือปิดวงจรเข้าไป เซอร์คิตเบรกเกอร์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสัปดาห์ไฟฟ้าสูงเป็นเซอร์คิตเบรกเกอร์ที่ไม่สามารถทำงานโดยการตัดสินใจเองได้ แต่ต้องอาศัยสัญญาณจากรีเลย์ส่งงานเข้ามา กลไกการตัดวงจรก็จะสั่งให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ตัดวงจรออกจากระบบโดยอัตโนมัติ ส่วนการสับเข้าอาจบังคับด้วยมือ (manual operate) หรือสั่งสับเข้าโดยอัตโนมัติด้วยรีเลย์ชนิดสับเข้า (reclosing relay)

5.2.3 รีเลย์ป้องกัน

ในขณะที่ระบบไฟฟ้าเกิดฟอลท์ขึ้น จำเป็นต้องตัดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบด้วยความเร็วสูง ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ป้องกัน พร้อมทั้งค้นหาสภาพผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เพื่อสั่งการให้เซอร์คิตเบรกเกอร์ตัดวงจรด้วยความเร็วสูงโดยอัตโนมัติ เราเรียกอุปกรณ์ควบคุมการป้องกันนี้ว่า “รีเลย์ป้องกัน” รีเลย์เป็นอุปกรณ์หลักในระบบป้องกันเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ตัดสินใจว่าส่งงานให้เซอร์คิตเบรกเกอร์เปิดวงจรออกหรือไม่ รีเลย์รับสัญญาณจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าและ/หรือหม้อแปลงสัปดาห์ไฟฟ้าเพื่อมาพิจารณาว่าสัญญาณที่ได้รับเข้ามานั้นอยู่ในเกณฑ์ปกติหรือไม่ ถ้าหากสัญญาณที่ได้รับเข้ามาไม่ปกติ เช่นกระแสสูงมากกว่าปกติก็อาจสั่งให้เซอร์คิตเบรกเกอร์เปิดวงจรออก การทำงานของรีเลย์เพื่อสั่งให้เซอร์คิตเบรกเกอร์เปิดวงจรออกอาจทำงานโดยใช้รีเลย์ชุดเดียวหรือทำงานร่วมกับรีเลย์อื่น ๆ เป็นต้น รีเลย์เปรียบเสมือนสมองคนโดยหม้อแปลงสัปดาห์ไฟฟ้าและกระแสเปรียบเสมือนตาที่คอยรับสิ่งภายนอกเข้ามาโดยแขนและขาเปรียบเสมือนกับเบรกเกอร์ การทำงานของระบบป้องกันรวมทั้งวิธีการตั้ง (set) การทำงานของรีเลย์ด้วย การทำงานของรีเลย์เพื่อป้องกันอุปกรณ์หนึ่งในระบบต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์กลุ่มอื่นที่ป้องกันอุปกรณ์อื่นด้วย ในบางครั้งเพื่อให้ระบบป้องกันทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง

5.3 องค์ประกอบในการเลือกอุปกรณ์การป้องกัน

ข้อมูลควรทราบเกี่ยวกับขีดความสามารถของอุปกรณ์การป้องกันที่เลือกใช้นั้น มีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้อุปกรณ์การป้องกันได้ถูกต้องตามลักษณะที่ออกแบบไว้โดยไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งาน

5.3.1 แรงดันไฟฟ้า

1. **แรงดันที่กำหนด (rate voltage)** เป็นแรงดันที่กำหนดของอุปกรณ์การป้องกันนั้น อย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันระหว่างเฟสต่อเฟส เช่น 115 kV , 69 kV , 24 kV , 12 kV , 600 V หรือ 240 V ทั้งนี้เพื่อป้องกันฉนวนของอุปกรณ์การป้องกันให้มีความแข็งแรงต่อแรงดัน ไฟฟ้านั้น ๆ
2. **แรงดันที่ระบุ (nominal)** หมายถึงแรงดันระบบ (system voltage) ขึ้นอยู่กับมาตรฐานของการไฟฟ้า เช่น การไฟฟ้านครหลวง 12 kV , 24 kV และ 69 kV หรือการไฟฟ้าภูมิภาค 11 kV , 22 kV และ 33 kV
3. **แรงดันใช้งานสูงสุด (maximum operating voltage)** หมายถึงแรงดันสูงสุดตามที่เป็นจริงของระบบซึ่งจะนำอุปกรณ์การป้องกันไปใช้
4. **แรงดันออกแบบสูงสุด (maximum design voltage)** หมายถึงค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบอุปกรณ์การป้องกัน สำหรับอุปกรณ์การป้องกันแรงดันต่ำนั้น มักจะบอกแต่เพียงแรงดันที่กำหนดเท่านั้น เพราะถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับแรงดันออกแบบสูงสุด
5. **แรงดันใช้งานต่ำสุด (minimum operating voltage)** หมายถึงค่าแรงต่ำสุดของอุปกรณ์การป้องกันที่ยังมีความสามารถที่จะตัดกระแสตามพิกัด MVA นั้นได้ เพราะวอร์กิตเบรกเกอร์ต้องสามารถตัดกระแสที่ค่าแรงดันต่ำกว่าแรงดันระบุได้ แต่ถ้าแรงดันยังต่ำกว่าความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์ (interrupting capacity) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็ยังต่ำลงด้วย จึงต้องกำหนดค่าแรงดันใช้งานต่ำสุดกำหนดไว้ว่า เป็นค่าแรงดันต่ำสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงทำงานได้เต็มพิกัด

5.3.2 ความถี่ที่กำหนด (rate frequency)

การเลือกขนาดความถี่ที่กำหนดของอุปกรณ์การป้องกันนั้นจะต้องเลือกให้เท่ากับความถี่ของระบบ เช่น ความถี่ 50Hz, 60Hz, 400Hz หรือใช้กับ ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 พิกัดกระแสต่อเนื่อง (continuous current rating)

หรือกระแสที่กำหนด (rate current) เป็นปริมาณสูงสุดของกระแสที่อุปกรณ์การป้องกันจะรับได้สม่ำเสมอตลอดเวลา โดยที่อุณหภูมิจะไม่สูงเกินกว่าปกติ

5.3.4 พิกัดกระแสโมเมนทารี (momentary current rating)

ในขณะที่กระแสเกิดลัดวงจรกระแสไฟฟ้าจะพุ่งพรวดขึ้นสูงสุดในครึ่งไมโครวินาทีแรก คือ เวลา 1/100 วินาที ดังรูปที่ 1.3 กระแสนี้เรียกว่า ผลรวมกระแสสมมาตร (total asymmetrical current) ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสประกอบกระแสตรง (DC component) กับกระแสส่วนประกอบสมมาตร กระแสสลับ (AC symmetrical component) ดังนั้นพิกัดกระแสโมเมนทารีจึงเป็นค่า RMS ของผลรวมกระแสสมมาตรในไมโครวินาทีแรก โดยที่อุปกรณ์ป้องกันจะต้องสามารถทนต่อกระแสได้ในช่วงเวลา 1/2 ไมโครวินาทีถึง 1 ไมโครวินาที หรือในเวลา 1/100 วินาที ถึง 1/50 วินาที ได้โดยปลอดภัย หลังจากเกิดฟอลท์ในไมโครวินาทีแรกๆ ผ่านผ่านไปแล้ว กระแสลัดวงจรจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนประกอบกระแสตรงจะสูงสุดในตอนแรกที่เกิดฟอลต์และจะลดลงเป็นศูนย์ในไมโครวินาทีต่อ ๆ มา

5.3.5 พิกัดกระแสช่วงระยะเวลาสั้น (short current rating)

เป็นค่า RMS ของกระแสลัดวงจรที่อุปกรณ์การป้องกันจะทนได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ที่กำหนด เช่น 4 วินาที เป็นต้น

5.3.6 พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (interrupting current rating)

หรือพิกัดกระแสขณะตัดวงจร เป็นค่ากระแสลัดวงจร RMS สมมาตร โดยที่อุปกรณ์การป้องกันสามารถตัดกระแสได้ในเวลาไม่เกิน 8 ไมโครวินาทีภายใต้แรงดันที่กำหนดเป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ หรือ interrupting MVA rating ดังนี้คือ

กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ (MVA) = $\sqrt{3}$ x แรงดันออกแบบสูงสุด (kV) x กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (kA)

5.3.7 พิกัดเวลา (time rating)

1. เวลาขณะอินเตอร์รัพต์ (interrupting time) คือช่วงเวลาที่อุปกรณ์การป้องกันตัดกระแสลัดวงจรและปลิวอาร์กได้ดับสนิทแล้ว ซึ่งใช้เวลาตัดกระแสอย่างช้าไม่เกิน 8 ไมโครวินาที หรือ 8/50 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เวลาสับซ้ำ (reclosing time) คือช่วงเวลาที่อุปกรณ์การป้องกันสับซ้ำค่อเข้าตัววงจรอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้ใช้เวลา 20 ถึง 30 ไซเคิล หรือประมาณ 1/2 วินาที

5.3.8 รอบทำงาน (duty cycle)

เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น และเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ทริปแล้ว รีเลย์สับซ้ำอัตโนมัติ (auto recloser relay) จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สับต่อวงจรอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 20 ถึง 30 ไซเคิล หรือประมาณ 1/2 วินาที แต่ถ้าหากในระบบไฟฟ้าฟอลต์ยังคงมีอยู่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทริปอีก และรีเลย์ก็จะสั่งสับซ้ำใหม่เรื่อย ๆ ถ้าฟอลต์ในระบบยังคงมีอยู่ จนกระทั่งถึงจำนวนครั้งที่ตั้งไว้รีเลย์ก็จะไม่สั่งให้สับซ้ำอีก

5.4 การเลือกขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์

กระแสฟอลต์หรือกระแสลัดวงจรที่ได้พิจารณามาแล้ว นั้นเป็นกระแสชั้บทรานเซียนต์ที่สมมาตร ซึ่งยังไม่ได้รวมผลของส่วนประกอบกระแสตรงเข้าไปด้วยในความเป็นจริงถ้าเกิดฟอลต์ที่จุดใด ๆ ของรูปคลื่นแรงดันที่ไม่ใช่ค่ายอดจะต้องมีส่วนประกอบกระแสตรงรวมอยู่ด้วย จึงทำให้กระแสฟอลต์รวมเป็นกระแสชั้บทรานเซียนต์ไม่สมมาตรและจะมีผลทำให้ค่าประสิทธิผลของกระแสฟอลต์รวมนี้มีค่าสูงกว่ากระแสชั้บทรานเซียนต์สมมาตร

5.4.1 แฟกเตอร์การคูณ (Multiple Factor)

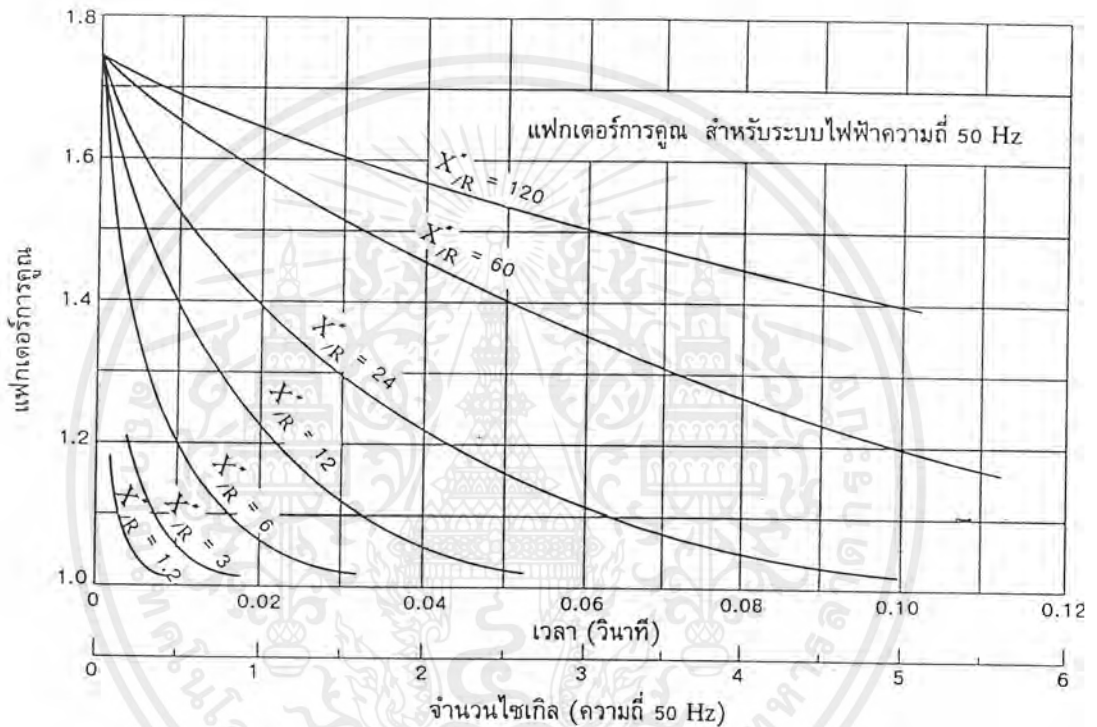
แฟกเตอร์การคูณใช้สำหรับเปลี่ยนค่าประสิทธิผลของรูปคลื่นกระแสระดับสมมาตรเป็นกระแสประสิทธิผลที่ไม่สมมาตร โดยรวมส่วนประกอบกระแสตรงเข้าไปด้วย การเลือกค่าแฟกเตอร์การคูณเพื่อนำมาใช้งานนั้นพิจารณา ดังนี้

1. เป็นกรณีทั่วไปสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันมากกว่า 600 โวลต์ เราสามารถใช้แฟกเตอร์การคูณที่ค่า 1.6 คูณกับค่าประสิทธิผลที่ครึ่ง ไซเคิลแรกของกระแสระดับสมมาตรก็ได้กระแสไม่สมมาตรรวม
2. สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดัน 5000 โวลต์ และน้อยกว่าที่ไม่มีการผลิตไฟฟ้าในท้องถิ่น (local generation) หมายความว่าต้องรับพลังงานไฟฟ้าจากบัสที่ต้องผ่านหม้อแปลงเหนือสายส่งที่ยาว แฟกเตอร์การคูณที่ใช้คำนวณกระแสไม่สมมาตรรวมที่ครึ่ง ไซเคิลแรกสามารถลดลงได้เป็นค่า 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดัน 600 โวลต์และน้อยกว่า แฟกเตอร์การคูณเพื่อคำนวณกระแสไม่สมมาตรรวมที่ครึ่งไซเคิลแรกคือ 1.25

สำหรับการคำนวณกระแสไม่สมมาตรรวมในช่วงเวลาที่ยาวกว่าครึ่งไซเคิลแรก เช่น 3 ถึง 8 ไซเคิล ซึ่งสอดคล้องกับเวลาในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เราสามารถหาแฟกเตอร์การคูณที่ได้จากเส้นโค้งอัตราส่วน X/R (X/R ratio curve) ในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เส้นโค้งแฟกเตอร์การคูณที่สอดคล้องกับการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน X/R ต่าง ๆ กัน

5.4.2 โมเมนตารีคิวตี้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (momentary Duty of Circuit Breakers)

การลัดวงจรเริ่มต้น (ภายในเวลา 1/2 ไซเคิล หรือครึ่งไซเคิลแรกหลังจกลัดวงจร) หรือกระแสชั้ทรานเซียนต์จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้สำหรับหาโมเมนตารีคิวตี้ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ กล่าวคือในการคำนวณหาค่าประสิทธิผลของกระแสลัดวงจรเริ่มต้นที่จุดใด ๆ ของวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังโดยไม่ต้องนำส่วนประกอบกระแสตรงมาคิดด้วยนั้นสามารถทำได้โดยคูณกระแสชั้ทรานเซียนต์นี้ด้วยแฟกเตอร์การคูณเพื่อยกระดับของกระแสชั้ทรานเซียนต์ให้สูงขึ้นเป็นกระแสไม่สมมาตรรวม การทำเช่นนี้เพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทนต่อแรงกระทำทางกลที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลแรกหลังจากเกิดลัดวงจรขึ้น โดยเราจะเรียกระแสลัดวงจรประสิทธิผลเริ่มต้นนี้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสโมเมนเทรี (momentary current) ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นำมาใช้งานต้องสามารถทนทานต่อกระแสโมเมนเทรีนี้ได้

สำหรับทางปฏิบัติแฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับกระแสชั้บทรานเซียนต์จะมีความสอดคล้องกับระดับแรงดันของระบบที่นำเซอร์กิตเบรกเกอร์ไปใช้งาน ดังตารางที่ 5.1

ระดับแรงดันทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์	แฟกเตอร์การคูณสำหรับคำนวณหากระแสโมเมนเทรี
แรงดันมากกว่า 5 kV	1.6
แรงดัน 5 kV และน้อยกว่า	1.5
แรงดัน 600 V และน้อยกว่า	1.25

ตารางที่ 5.1 แฟกเตอร์ที่ใช้คูณกับกระแสชั้บทรานเซียนต์เพื่อคำนวณหาค่ากระแสโมเมนเทรีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องทนทานได้

5.4.3 อินเตอร์รัปติงคาปาซิทีของเซอร์กิตเบรกเกอร์

พิกัดกระแส (interrupting rating) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะกำหนดเป็นหน่วยกิโลโวลต์-แอมแปร์ (kVA) หรือเมกะโวลต์-แอมแปร์ (MVA) โดยพิกัดการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าสมการต่อไปนี้

$$\text{พิกัดการตัดกระแส kVA} = \sqrt{3} \times V_{CB} \times IC \quad (5.1)$$

เมื่อ

V_{CB} คือ ระดับแรงดันของบัสที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต่ออยู่, kV

IC คือ ระดับกระแสที่เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถรับได้เมื่อหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสเราเรียก IC ว่า กระแสอินเตอร์รัปติง (interrupting current)

5.4.3.1 กระแสอินเตอร์รัปติง IC

เซอร์กิตเบรกเกอร์ทั่ว ๆ ไปจะต้องตัดกระแสลัดวงจรที่ไม่สมมาตรคือ ยังมีส่วนประกอบกระแสตรงที่กำลังลดลงรวมอยู่ ซึ่งเป็นกระแสอินเตอร์รัปติงนั่นเอง กระแสอินเตอร์รัปติงจะพิจารณาให้อยู่ในช่วงทรานเซียนต์ ดังนั้นจึงมีค่าต่ำกว่ากระแสโมเมนเทรีและขึ้นอยู่กับความเร็วในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น 1.5, 3, 5 หรือ 8 ไซเคิล ซึ่งความเร็วในการตัดกระแสนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มนับเวลาตั้งแต่การเกิดลัดวงจรขึ้นจนกระทั่งอาร์ก (arc) ที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ดับ (extinction) สำหรับค่าของกระแสอินเตอร์รัปต์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$IC = I_f'' \times MF \quad (5.2)$$

เมื่อ I_f'' คือ กระแสชั้ทรานเซียนต์ที่คำนวณได้จากการศึกษาการลัดวงจร
MF คือแฟกเตอร์การคูณหาได้จากเส้นโค้งในรูปที่ 5.1

การหาแฟกเตอร์การคูณจากรูปที่ 5.1 จะต้องทราบตัวประกอบสองสิ่งคือ อัตราส่วน X/R ของจุดที่เกิดลัดวงจรและความเร็วในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น บัสที่ลัดวงจรมีอัตราส่วน $X/R = 24$ และเบรกเกอร์มีความเร็วในการตัดกระแสที่ 3 ไซเคิล ดังนั้นตามเส้นโค้งในรูปที่ 5.30 จะหาค่าแฟกเตอร์การคูณ $MF = 1.11$

5.4.3.2 การเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยกระแสลัดวงจรสมมาตรที่กำหนด

สำหรับพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบน้ำมัน (oil circuit breakers) ที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง จะกำหนดพิกัดกระแสอินเตอร์รัปต์ของเบรกเกอร์ในเทอมส่วนประกอบกระแสลัดที่ กำหนด (rate symmetrical short-circuit current) แต่ส่วนใหญ่ผู้ที่จะตัดค่าว่าสมมาตรออกไปเหลือเพียงกระแสลัดวงจรที่กำหนด ในการบอกรายละเอียดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่นำมาใช้งานด้วยหลักการดังกล่าวนี้ประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้

1. คลาสของแรงดันที่ระบุ (nominal voltage class) เช่น 69 หรือ 115 kV
2. แรงดันสูงสุดที่กำหนด (rate maximum voltage)
3. แฟกเตอร์ช่วงของแรงดัน K (voltage range factor K)
4. กระแสต่อเนื่องที่กำหนด (rate continuous current)
5. กระแสลัดวงจรที่กำหนด (rate short-circuit current)

5.4.5 การคำนวณกระแสลัดวงจรสมมาตรโดยวิธีแรงดันต่อรีแอกแตนซ์

เมื่อกำหนดค่ารีแอกแตนซ์เพื่อนำไปใช้คำนวณหากระแสลัดวงจรด้วยวิธี E/X เรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงขั้นตอนการเลือกใช้งานเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยสามารถพิจารณาได้ 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีที่ทราบค่าอัตราส่วน X/R ที่จุดลัดวงจร

เมื่ออัตราส่วน X/R มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 และพิกัดกระแสอินเตอร์รัปต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าเท่ากับหรือมากกว่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ถ้าเงื่อนไขตรงตามนี้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีแรงดันตามที่ระบุสอดคล้องกับแรงดันของบัสก็สามารถนำมาใช้งานได้

2. กรณีไม่ทราบค่าอัตราส่วน X/R ที่จุดลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไม่ทราบอัตราส่วน X/R สามารถนำเซอร์กิตเบรกเกอร์ไปใช้งานได้ก็ต่อเมื่อกระแสลัดวงจรที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า 80% ของพิกัดกระแสอินเตอร์รัปติงของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวนั้น

5.5 ระบบป้องกัน (protection system)

ระบบป้องกันที่จะกล่าวถึงในที่นี้ประกอบด้วยระบบป้องกันสาย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือมอเตอร์ หม้อแปลง และบัสบาร์

5.5.1 การป้องกันสาย

ระบบป้องกันสายรวมถึงแต่สายระบบจำหน่ายและสายส่งสำหรับระบบจำหน่ายการป้องกันอาจจะเป็นระบบที่ง่ายเนื่องจากมีเครื่องกำเนิดอยู่ปลายสายหนึ่งและโหลดอยู่อีกปลายสายหนึ่ง ส่วนการป้องกันระบบสายส่งจะยุ่งยากกว่าเนื่องจากเครื่องกำเนิดอาจมีหลายจุดและโหลดก็มีหลายจุดกระจายอยู่ภายในวงจรของระบบการป้องกันในระบบจำหน่าย จะมีวิธีการป้องกันได้หลายอย่าง เช่นการป้องกันด้วยรีเลย์กระแสเกิน (overcurrent relay) รีเลย์กระแสเกินและทิศทาง (overcurrent and directional relay) ใช้รีเลย์ระยะทาง (distance relay) หรือใช้ไฟลิวทรีเลย์ (pilot relay) เพื่อสั่งให้เบรกเกอร์ทำงาน

5.5.2 การป้องกันบัสบาร์

การป้องกันบัสมีไว้ก็เพื่อป้องกันสวิตช์ตัดตอน หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงศักดาไฟฟ้า เบรกเกอร์ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในบัส รวมทั้งตัวบัสบาร์เอง การป้องกันดังกล่าวควรรวดเร็วเชื่อถือได้ เพราะกรณีที่บัสสำคัญถูกแยกออกจากระบบไปจะทำให้การจ่ายไฟหยุดชะงักไปทำให้มีผู้ใช้ไฟไม่มีไฟใช้เป็นจำนวนมาก หลักการทำงานของระบบการป้องกันบัสบาร์ก็คือ กรณีปกติกระแสรวมทั้งหมุดที่บัสหรือ โหนด (node) มีค่าเป็นศูนย์ กรณีที่มีจุดลัดวงจรที่บัสบาร์กระแสรวมทั้งหมุดที่บัสมีค่าไม่เป็นศูนย์ โดยทั่วไปรีเลย์เหมาะสมที่จะใช้สำหรับป้องกันบัสบาร์ได้แก่ ดิฟเฟอเรนเชียลรีเลย์ (differential relay)

5.5.3 การป้องกันหม้อแปลง

การป้องกันหม้อแปลงในที่นี้หมายถึง การป้องกันหม้อแปลงกรณีเกิดลัดวงจรภายในหม้อแปลงเอง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้หลักการของดิฟเฟอเรนเชียล คือ ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงมีค่าเป็นศูนย์ กรณีจ่ายโหลดปกติหรือจุดลัดวงจรเกิดภายนอกหม้อแปลง และผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงมีค่าไม่เป็นศูนย์กรณีเกิดลัดวงจรเกิดขึ้นภายในขดลวดหม้อแปลง โดย การป้องกันจะเป็นลักษณะเป็นวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

5.5.4 การป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์มีโครงสร้างของอุปกรณ์เหมือนกันทุกอย่างต่างกันแต่เพียง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้า แต่มอเตอร์เป็นอุปกรณ์รับกำลังไฟฟ้า การป้องกัน ความเสียหายค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากความเสียหายที่เกิดมีด้วยกันหลายสาเหตุ แต่ที่จะกล่าวถึงคือ สาเหตุจากการลัดวงจรภายใน ซึ่งการลัดวงจรภายในมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดเกิดขึ้นได้หลายแบบ ตั้งแต่การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด เฟส-เฟส เฟส-ดิน การป้องกันความเสียหายดังกล่าวทำได้โดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลรีเลย์ซึ่งสามารถตรวจจับจุดลัดวงจรและทำงานสั่งให้เบรกเกอร์เปิดวงจร ออกได้รวดเร็ว

บทที่ 6 แนวคิดในการออกแบบโปรแกรม และวิธีการใช้งาน โปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

แนวคิดในการออกแบบโปรแกรมและวิธีการใช้งานโปรแกรม

6.1 การออกแบบสร้างโปรแกรม

6.1.1 เครื่องมือ

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้โปรแกรม CPU 486DX4 หรือเทียบเท่าขึ้นไป
เนื้อที่หน่วยความจำอย่างต่ำ 4MB
ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98

6.1.2 การออกแบบโปรแกรม

การออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์ฟอลท์ ได้ทำการออกแบบโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้
ง่ายด้วยการติดต่อกับผู้ใช้งานระบบกราฟฟิก GUI (Graphic User Interface) ซึ่งทำให้ผู้ใช้งาน
สามารถเรียนรู้ทำความเข้าใจการใช้งานได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถเก็บข้อมูลของระบบไฟ
ฟ้าที่ได้สร้างขึ้นเพื่อทำการวิเคราะห์ฟอลต์นั้นไว้ในแฟ้มข้อมูลทำให้สะดวกที่จะเก็บข้อมูลการ
คำนวณเพื่อเปรียบเทียบระหว่างการเกิดฟอลท์แบบต่าง ๆ ในครั้งต่อ ๆ ไปได้

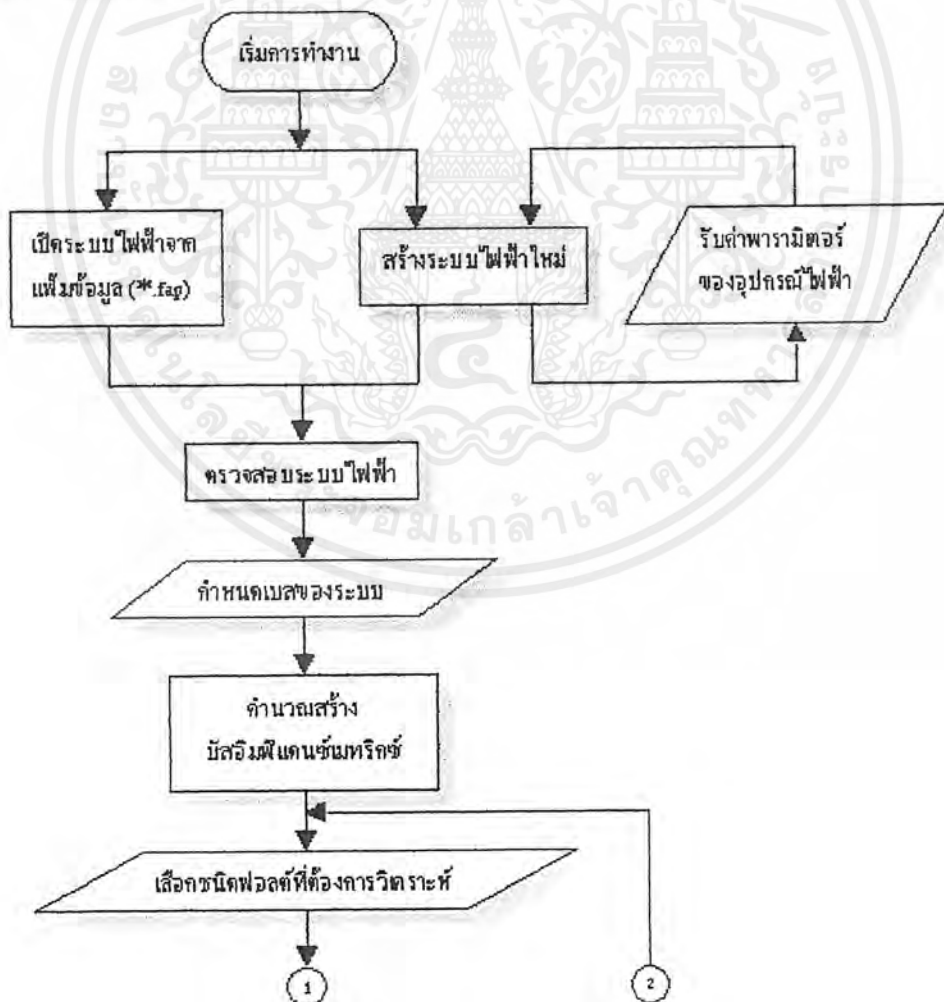
โปรแกรมภาษาที่นำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมเลือกใช้งานโปรแกรมในลักษณะวิซวล
(visual programming) ซึ่งสามารถใช้งานได้สะดวกมากในระบบปฏิบัติการวินโดวส์ และง่ายในการ
ออกแบบพัฒนาแอปพลิเคชัน (application) บนวินโดวส์ ฉะนั้นจึงเลือกใช้งานโปรแกรมภาษาเดลไฟ
(Delphi) ผลิตโดยบริษัทเบอร์แลนด์ ซึ่งใช้พื้นฐานของภาษาปาสคาลในการเขียนโปรแกรม โดย
โปรแกรมที่ได้ทำการเขียนจะพบว่ามีขนาดไม่ใหญ่มาก รวมทั้งการทำงานของโปรแกรมยังมี
ความเร็วสูง ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่น่าพอใจ โดยโปรแกรมวิเคราะห์ฟอลท์ที่ได้ทำการออกแบบนี้จะมี
การคำนวณกระจายอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรม ดังนั้นเพื่อให้โปรแกรมนำไปสู่การคำนวณได้
หลากหลายรูปแบบ การออกแบบการกระทำใด ๆ ที่ส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรมจึงได้ออกแบบ
โปรแกรมในลักษณะเป็น โปรแกรมเชิงวัตถุหรือ OOP (Object – Oriented Programming)

การออกแบบเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุหรือออบเจกต์ และมองการทำงานของโปรแกรมใน
รูปของปฏิบัติการที่เกิดขึ้นกับออบเจกต์เหล่านั้น

การทำงานของโปรแกรม

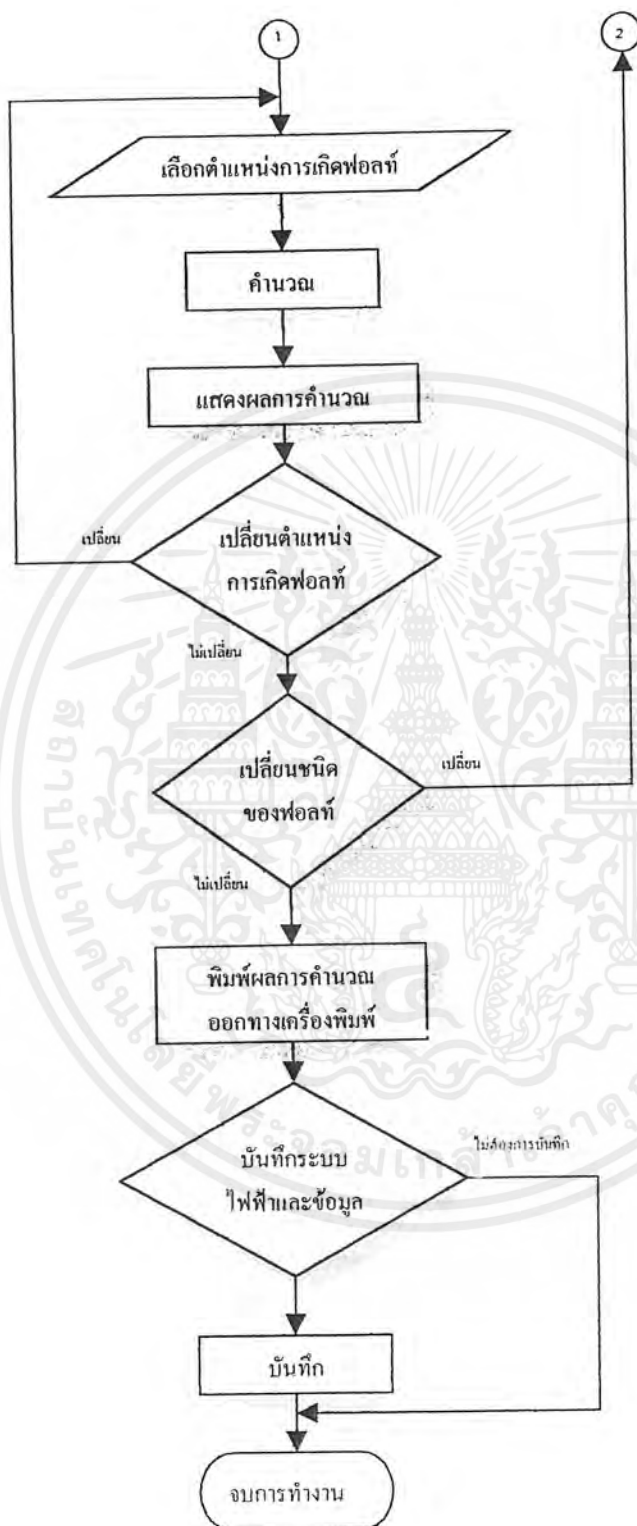
การออกแบบการทำงานของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

- การสร้างระบบไฟฟ้า เป็นขั้นตอนแรกของการใช้งานของโปรแกรม โดยการสร้างระบบไฟฟ้า จะเป็นการนำอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มาวางในตำแหน่งที่เหมาะสมสร้างเป็นระบบไฟฟ้าขึ้นมา และยังรับค่าพิกัดหรือคุณลักษณะของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าไปพร้อม ๆ กันด้วย
- การตรวจสอบคุณลักษณะของระบบไฟฟ้า เป็นการตรวจสอบของระบบไฟฟ้าโดยจะทำการตรวจสอบว่าอุปกรณ์ใดต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ อย่างไรบ้าง เพื่อให้โปรแกรมสามารถเข้าใจระบบและทำการวิเคราะห์เชื่อมโยงระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องเพื่อเป็นประโยชน์ในการคำนวณอันดับต่อไป



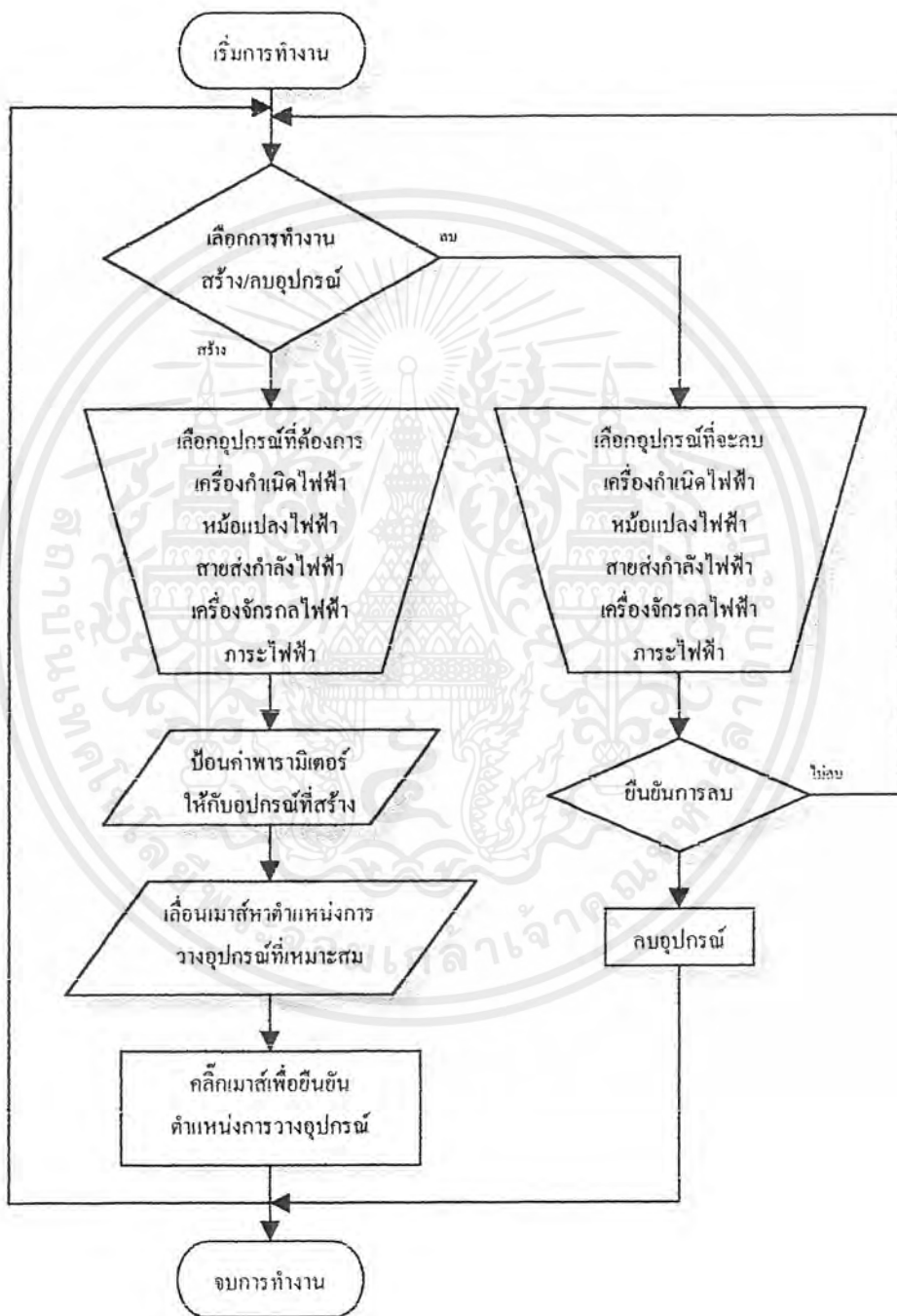
รูปที่ 6.1 การทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



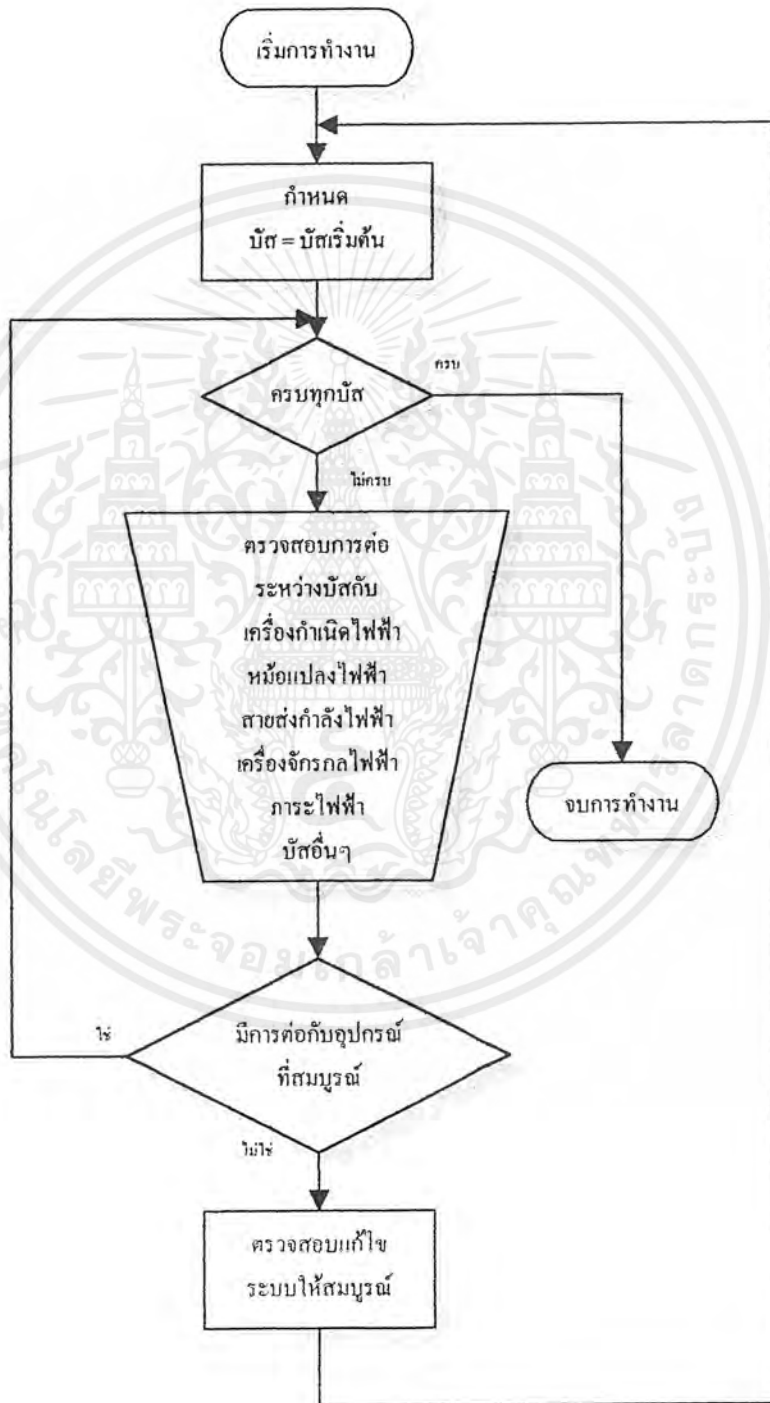
รูปที่ 6.1 การทำงานของโปรแกรมหลัก (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 การสร้างระบบไฟฟ้า

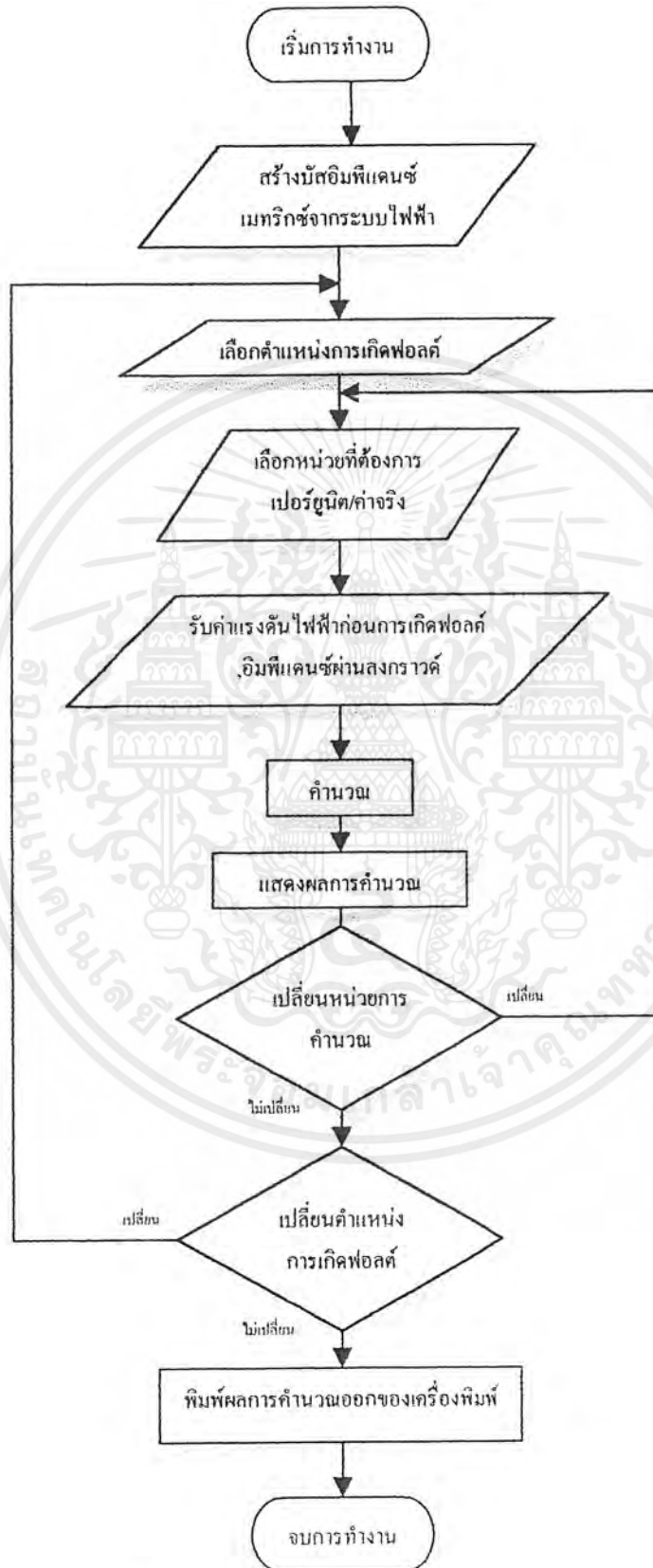
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 การตรวจสอบระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

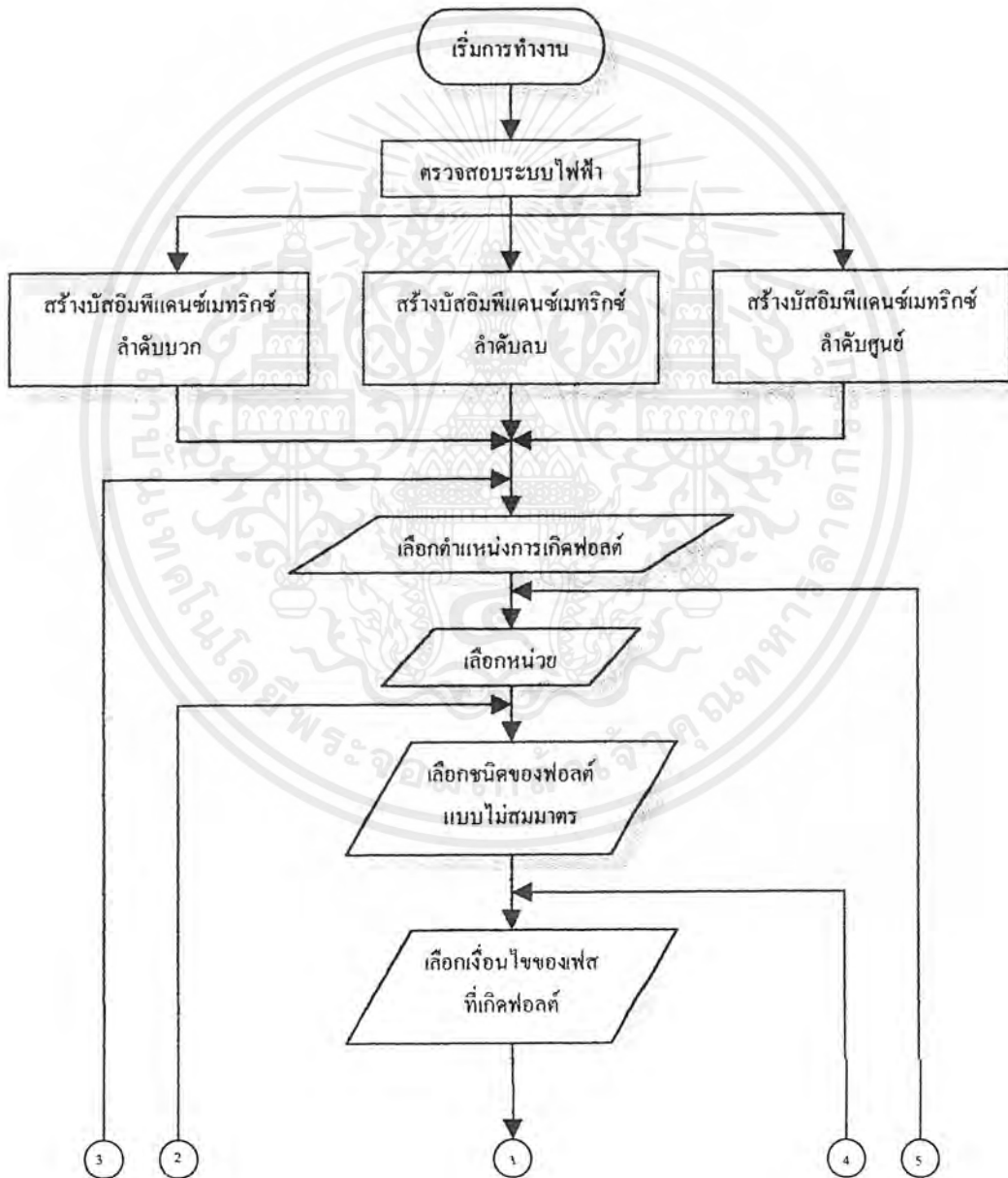
- การกำหนดเบสของระบบไฟฟ้า เป็นการกำหนดเบสอ้างอิงให้กับระบบไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าเบสอ้างอิง ได้แก่ เบสของกำลังไฟฟ้า เบสแรงดันไฟฟ้า เบสกระแสไฟฟ้า และเบสอิมพีแดนซ์ที่บัสต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าเพื่อให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้านั้นสามารถทำได้ง่ายยิ่งขึ้น
- การคำนวณค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ จากที่ได้ทำการสร้างระบบไฟฟ้าและกำหนดเบสอ้างอิงให้กับระบบไฟฟ้าแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์โดยจะทำการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในระบบให้เป็นค่าที่เบสอ้างอิงเดียวกัน หลังจากนั้นจะทำการคำนวณค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ของระบบไฟฟ้า
- การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร จากที่ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบไฟฟ้าและสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์มาแล้วนั้น ทำให้ขณะนี้โปรแกรมมีความพร้อมที่จะทำการวิเคราะห์ฟอลต์ได้ โดยทำการเลือกตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ รับค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ และค่าอิมพีแดนซ์ผ่านลงกราวด์ เมื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณ โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงค่าต่าง ๆ ขณะเกิดฟอลต์ อันได้แก่ กระแสฟอลต์ แรงดันที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละบัส และแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ขณะเกิดฟอลต์และค่ากระแสฟอลต์ที่ใหญ่ระหว่างบัสขณะเกิดฟอลต์



รูปที่ 6.4 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร

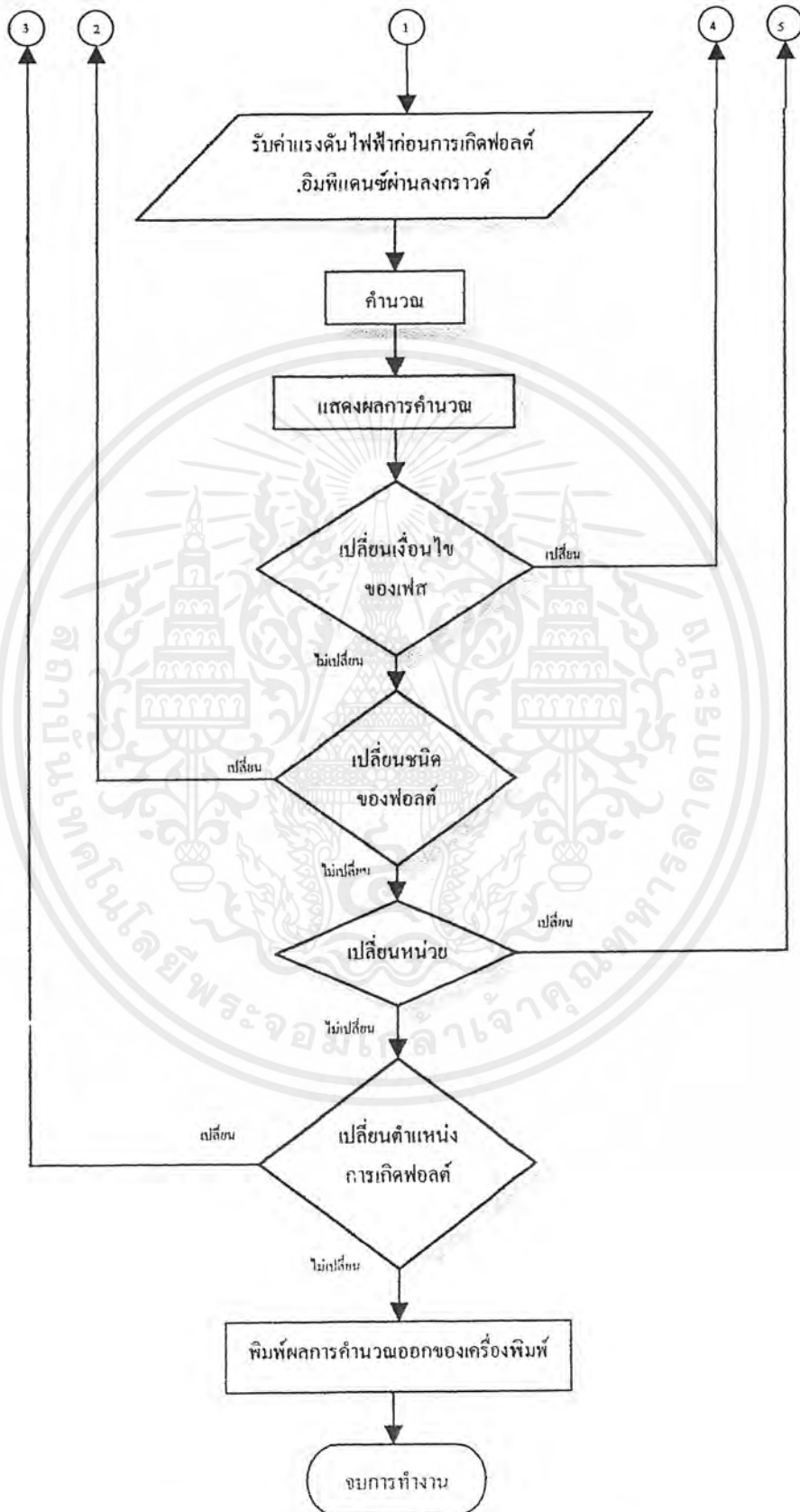
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร และเงื่อนไขของเฟสการเกิดฟอลต์ในแบบต่าง ๆ และรับค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์และอิมพีแดนซ์ผ่านลงกราวด์ โปรแกรมจะทำการคำนวณฟอลต์ค่าต่าง ๆ ที่บัสที่เกิดฟอลต์ ได้แก่ กระแสฟอลต์ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าและกระแสฟอลต์ที่เฟสต่าง ๆ ขณะเกิดฟอลต์



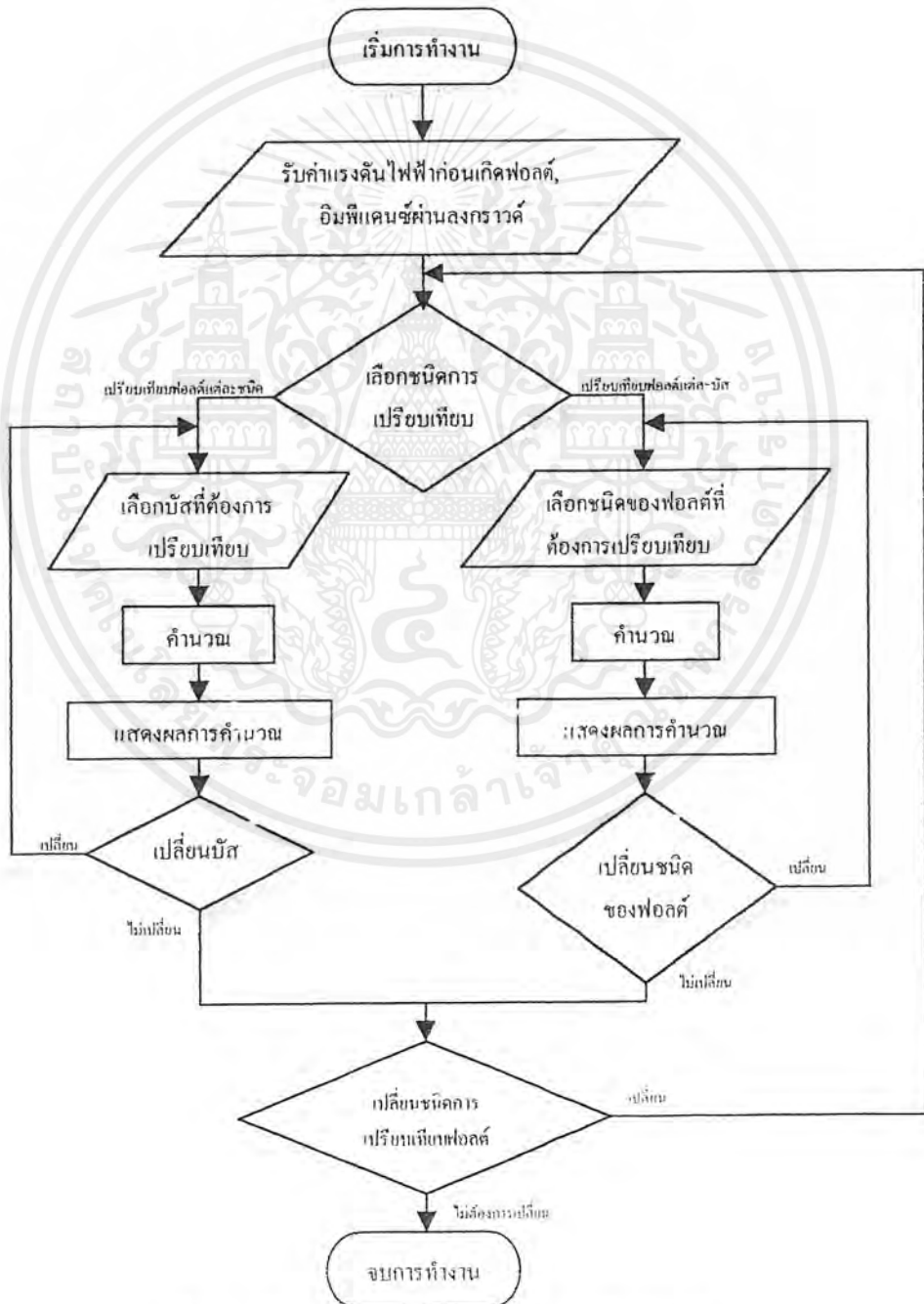
รูปที่ 6.5 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในระบบที่โครงการวิจัยที่ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (ต่อ) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปรียบเทียบการเกิดฟอลต์ เป็นการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นภาพความรุนแรงของฟอลต์แต่ละชนิดของการเกิดฟอลต์ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น และยังได้ออกแบบให้โปรแกรมสามารถทำการเปรียบเทียบฟอลต์ที่เกิดขึ้นที่บัสต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าการเกิดฟอลต์ชนิดเดียวกันหรือเงื่อนไขเดียวกันนั้น ความรุนแรงของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละบัสเป็นอย่างไร ซึ่งทำให้สามารถทราบได้ว่าบัสใดจะเกิดฟอลต์รุนแรงที่สุดหรือต่ำที่สุด



รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 วิธีการใช้งานโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆดังต่อไปนี้
รายการหลัก ซึ่งประกอบด้วย รายการหลักดังนี้ แฟ้ม (File) แก้ไข (Edit) เครื่องมือ (Tools)
วิเคราะห์(Analysis) และช่วยเหลือ (Help)

เมนูแฟ้ม (File) เมื่อทำการเลือกที่เมนู แฟ้ม จะปรากฏเมนูย่อยขึ้นมาประกอบไปด้วยการทำงานต่างๆ ดังนี้

การสร้างระบบไฟฟ้าใหม่ (New) การเปิดระบบไฟฟ้าจากไฟล์ข้อมูล (Open) การบันทึกระบบไฟฟ้า (Save)

การบันทึกเป็น (Save As) พิมพ์ (print) และออกจากโปรแกรม(Exit) โดยที่การเปิดไฟล์ระบบไฟฟ้า โปรแกรมจะทำการเปิดเฉพาะไฟล์ชนิดที่มีนามสกุล (*.fap) เท่านั้น และการบันทึกไฟล์ของระบบไฟฟ้าโปรแกรมก็จะทำการบันทึกเป็นไฟล์ชนิดที่มีนามสกุล (*.fap) ให้เช่นกัน

เมนูแก้ไข (Edit) เมื่อทำการเลือกที่เมนู แก้ไข จะปรากฏเมนูย่อยขึ้นมาประกอบไปด้วยการทำงานต่างๆ ดังนี้

การกำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้า (System Base) การสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้า (Make)สร้างข้อความ (Text) การลบอุปกรณ์ไฟฟ้า (Delete) และการเรียกใช้งานแถบเครื่องมือ (Tools Bar)สำหรับรายละเอียดจะกล่าวในลำดับต่อไป

เมนูเครื่องมือ (Tools) เมื่อทำการเลือกที่เมนูเครื่องมือ จะปรากฏเมนูย่อยขึ้นมาประกอบไปด้วยการทำงานต่างๆ ดังนี้

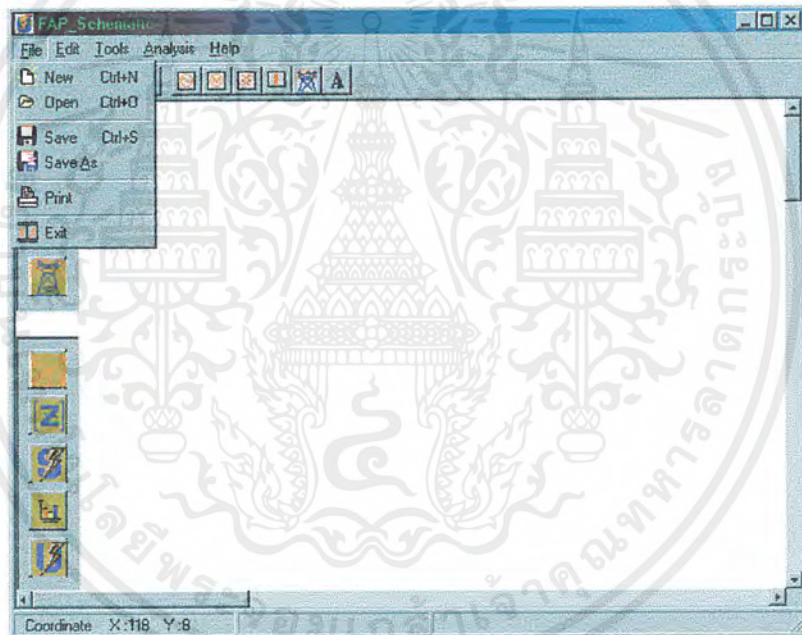
การแก้ไขพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Parameter) การเคลื่อนย้ายตำแหน่งอุปกรณ์ไฟฟ้า (Move) การเรียกใช้เครื่องมือพารามิเตอร์ (Parameter Tool) และการรีเฟรช (Refresh)

เมนูวิเคราะห์ (Analysis) เมื่อทำการเลือกที่เมนู วิเคราะห์ จะปรากฏเมนูย่อยขึ้นมาประกอบไปด้วยการทำงานต่างๆ ดังนี้

การสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ ([ZBus] sequence) การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) การเปรียบเทียบ

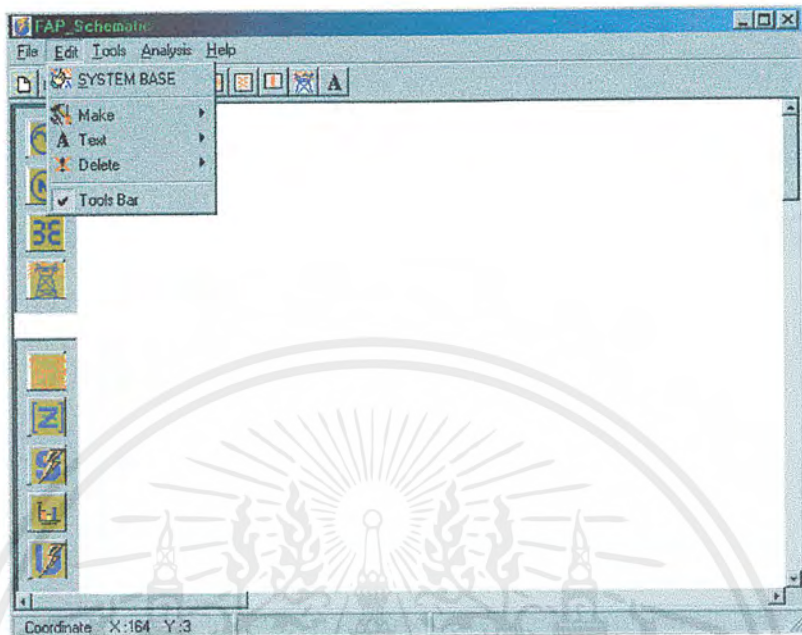
ความรุนแรงของการเกิดฟอลต์(Fault comparison) และการเรียกใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ (Analysis tool)

แถบเครื่องมือ ช่วยทำให้สะดวกในการใช้งานวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ที่ต้องใช้บ่อยๆ สามารถเรียกใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ โดยการ เลือกจากเมนู Edit / Tools Bar

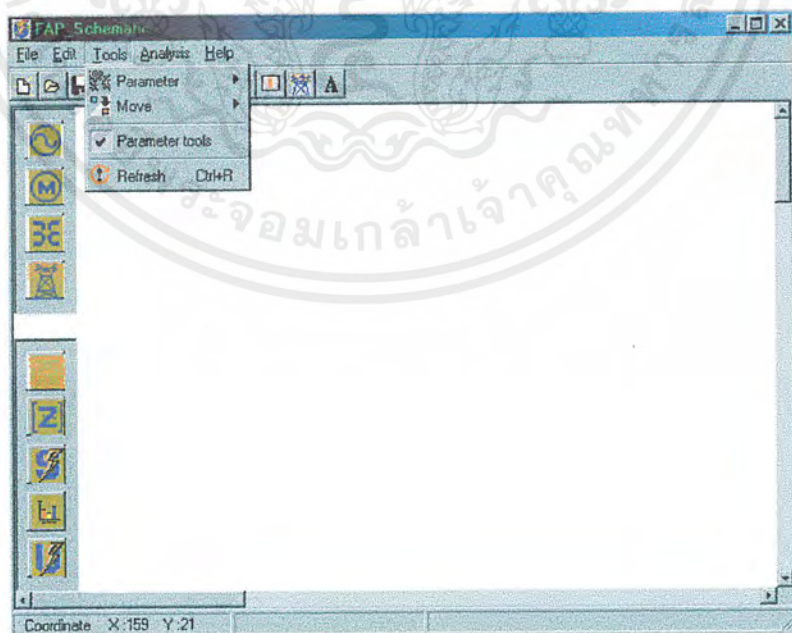


รูปที่ 6.7 การเลือกเมนูเพิ่มและเมนูย่อยในเมนูเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

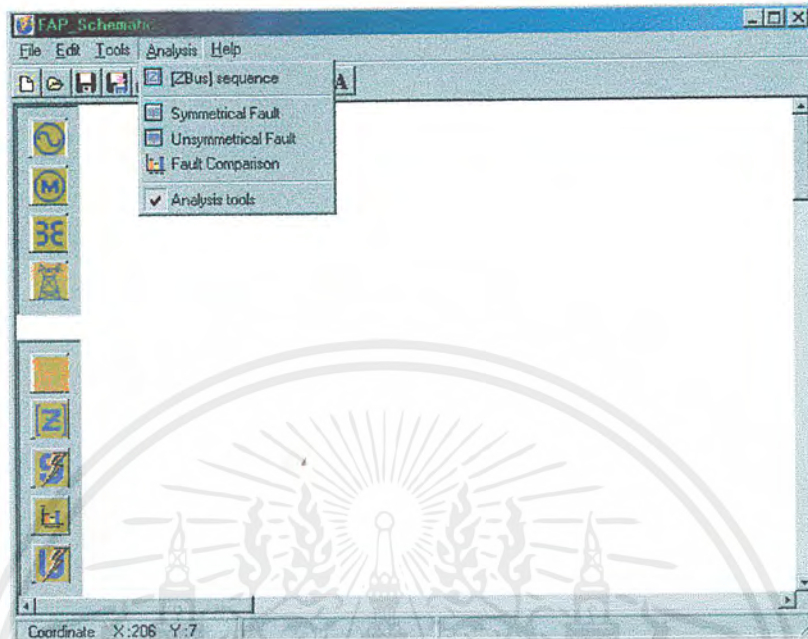


รูปที่ 6.8 การเลือกเมนูแก้ไขและเมนูย่อยในเมนูแก้ไข



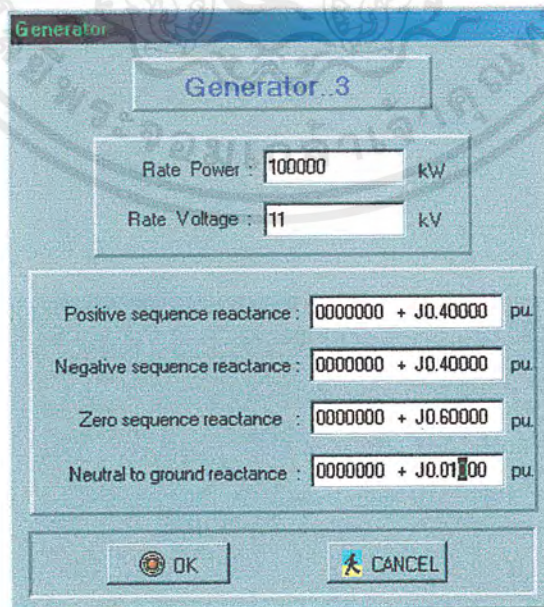
รูปที่ 6.9 การเลือกเมนูเครื่องมือและเมนูย่อยในเมนูเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 การเลือกเมนูวิเคราะห์และเมนูย่อยในเมนูวิเคราะห์

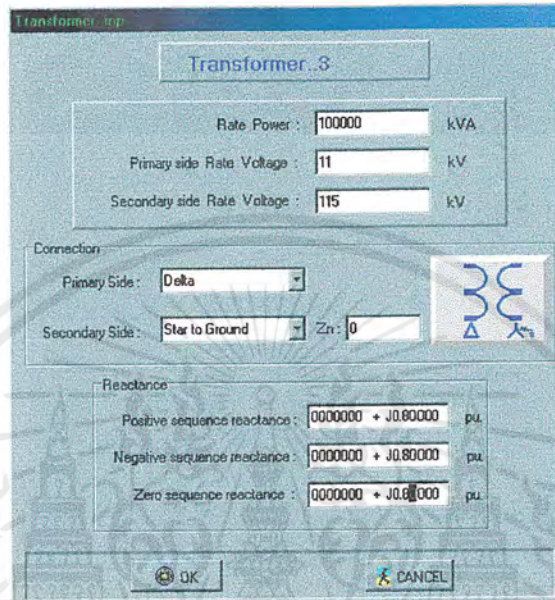
การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเลือกจากเมนูหลัก File / Edit / Make / Generator หรือโดยการใช้แป้นลัด Ctrl+G จะปรากฏหน้าต่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นมาสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

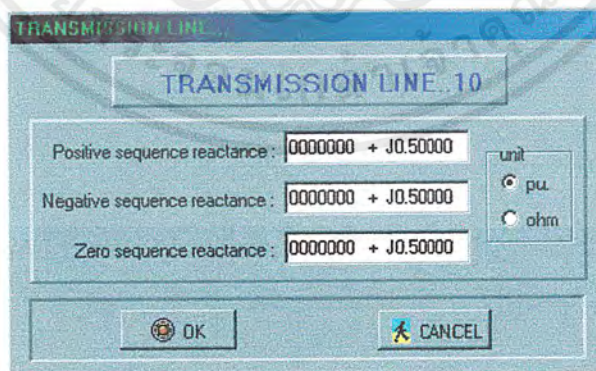
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเลือกจากเมนูหลัก File / Edit / Make / Transformer หรือโดยการใช้แป้นลัด Ctrl+T จะปรากฏหน้าต่างหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นมาสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ และเลือกลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

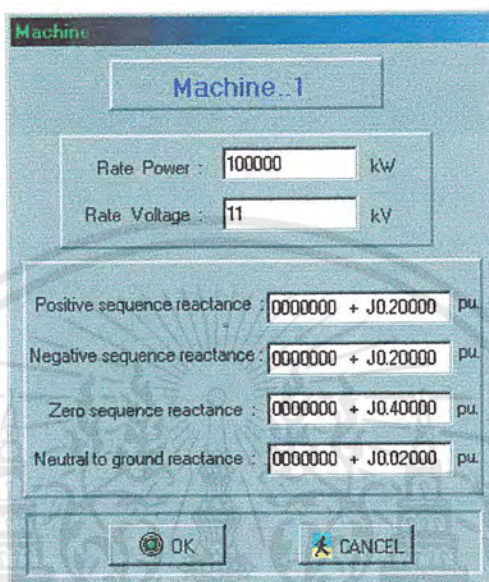
การสร้างสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเลือกจากเมนูหลัก File / Edit / Make / Transmission Line หรือโดยการใช้แป้นลัด Ctrl+L จะปรากฏหน้าต่างสายส่งกำลังไฟฟ้า ขึ้นมาสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ ของสายส่งกำลังไฟฟ้างดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

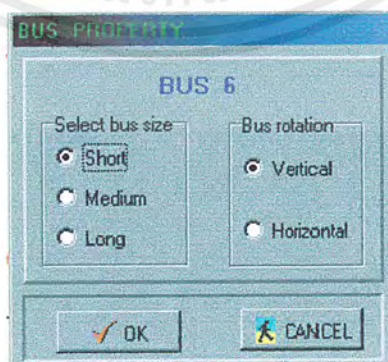
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเลือกจากเมนูหลัก File / Edit / Make / Machine หรือโดยการใช้แป้นลัด Ctrl+M จะปรากฏหน้าต่างเครื่องจักรกลไฟฟ้า ขึ้นมาสำหรับป้อนค่าพิกัดต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้างดรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 หน้าต่างการป้อนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การสร้างบัสไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเลือกจากเมนูหลัก File / Edit / Make / Bus หรือโดยการใช้แป้นลัด Ctrl+B จะปรากฏหน้าต่างบัสไฟฟ้า ขึ้นมาสำหรับเลือกขนาดและลักษณะการวางบัสดังรูปที่ 6.15

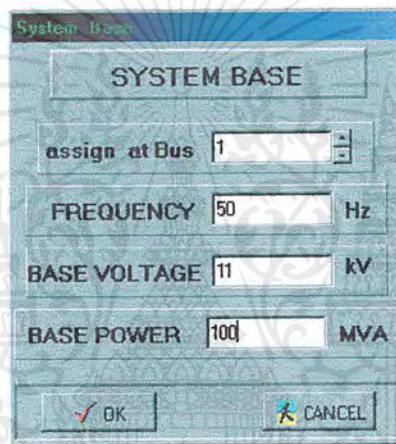


รูปที่ 6.15 หน้าต่างการสร้างบัสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแล้ว ให้ทำการคลิกที่ปุ่มตกลง (OK) จะปรากฏรูปอุปกรณ์ขึ้นมา ให้ทำการเลื่อนเมาส์แล้วคลิกซ้ายที่เมาส์เพื่อวางอุปกรณ์ในตำแหน่งที่เหมาะสม

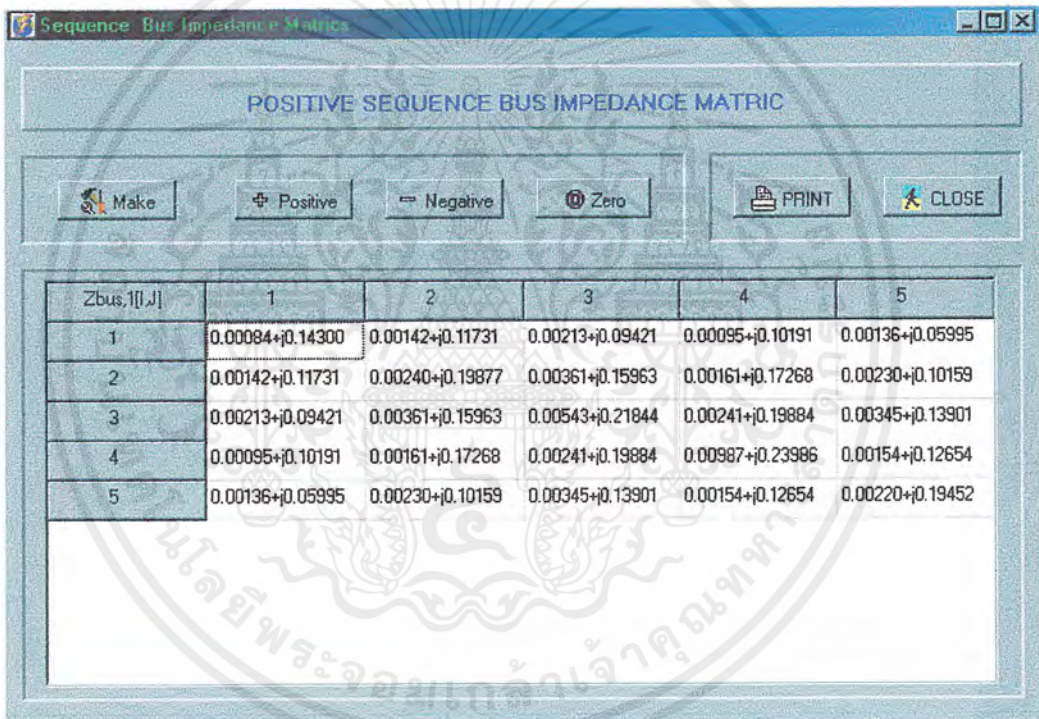
การกำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้า สามารถทำได้โดยเลือกจากเมนูหลัก Edit / System Base จะปรากฏหน้าต่างการกำหนดเบส ขึ้นมา ให้ทำการป้อนค่าเบสของระบบไฟฟ้าที่ต้องการดังรูปที่ 6.16 การกำหนดเบสต้องทำก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 6.16 การกำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้า

การสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ เมื่อได้ทำการสร้างระบบไฟฟ้า และกำหนดเบสให้กับระบบแล้วเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ฟอลต์ต่างๆ จะต้องทำการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เสียก่อน โดยทำการเลือกรายการ Analysis / [Zbus] sequence จะปรากฏหน้าต่างของการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ขึ้นมา คลิกที่ปุ่มสร้าง (Make) โปรแกรมจะทำการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ ลำดับบวก ลำดับลบและลำดับศูนย์ ตามลำดับ

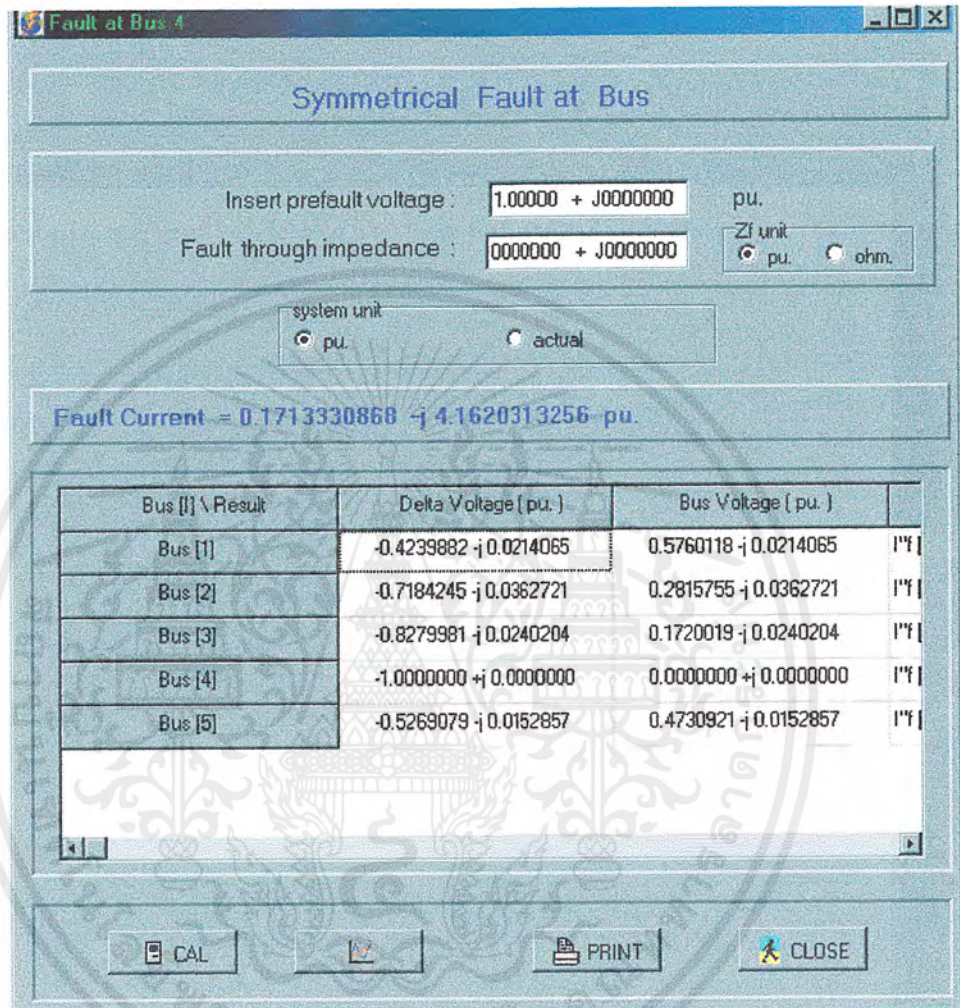
เมื่อต้องการดูผลการคำนวณคลิกที่ปุ่ม Positive , Negative และ Zero โปรแกรมจะแสดงค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับที่ต้องการ คลิกที่ปุ่มพิมพ์ (PRINT) โปรแกรมจะทำการพิมพ์ค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ออกทางเครื่องพิมพ์



Zbus, [I,J]	1	2	3	4	5
1	0.00084+j0.14300	0.00142+j0.11731	0.00213+j0.09421	0.00095+j0.10191	0.00136+j0.05995
2	0.00142+j0.11731	0.00240+j0.19877	0.00361+j0.15963	0.00161+j0.17268	0.00230+j0.10159
3	0.00213+j0.09421	0.00361+j0.15963	0.00543+j0.21844	0.00241+j0.19884	0.00345+j0.13901
4	0.00095+j0.10191	0.00161+j0.17268	0.00241+j0.19884	0.00987+j0.23986	0.00154+j0.12654
5	0.00136+j0.05995	0.00230+j0.10159	0.00345+j0.13901	0.00154+j0.12654	0.00220+j0.19452

รูปที่ 6.17 การสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์

การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร ทำการเลือกจากรายการ Analysis / Symmetrical Fault เลือกบัสที่เกิดฟอลต์โดยทำการคลิกที่บัสนั้นจะปรากฏหน้าต่างของฟอลต์แบบสมมาตรขึ้นมา ให้เลือกหน่วยของระบบและ ป้อนค่าแรงดัน ไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ และค่าอิมพีแดนซ์ผ่านลงดิน หลังจากนั้น ให้คลิกที่ปุ่มคำนวณ เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบสมมาตร

การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร ทำการเลือกจากรายการ Analysis / Unsymmetrical Fault เลือกบัสที่เกิดฟอลต์ โดยทำการคลิกที่บัสนั้นจะปรากฏหน้าต่างของฟอลต์แบบไม่สมมาตรขึ้นมา ให้เลือกหน่วยของระบบ ชนิดของฟอลต์ แบบไม่สมมาตร เส้นใยของเฟสที่เกิดฟอลต์ และป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ และค่าอิมพีแดนซ์ผ่านลงดิน หลังจากนั้นให้คลิกที่ปุ่มคำนวณเพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณดังรูปที่ 6.19

FAULT AT BUS 4

Faults Condition

Single phase to earth fault

phase B to Earth Fault

Fault through impedance Z_f : 0000000 + J 0000000 Z_f unit pu ohm

Prefault Voltage: 1.00000 + J 0000000 pu.

system unit pu actual

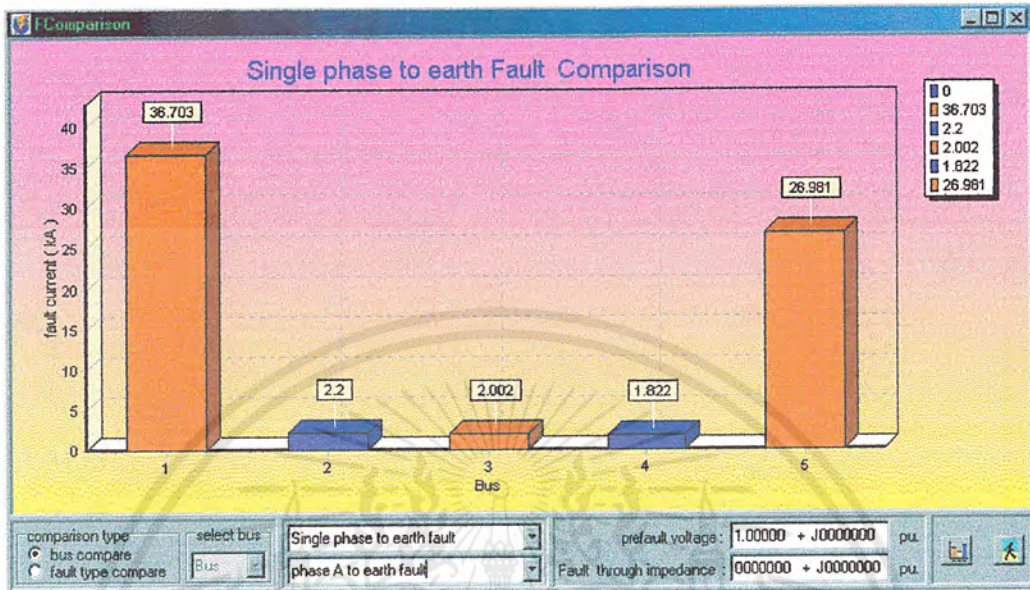
Result	Current []	Voltage []
positive component	0.05711-j1.38734	0.66667-j0.00000
negative component	0.05711-j1.38734	-0.33333-j0.00000
zero component	0.05711-j1.38734	-0.33333-j0.00000
phase a	0.00000+j0.00000	-0.50000+j0.86603
phase b	0.17133-j4.16203	0.00000+j0.00000
phase c	0.00000+j0.00000	-0.50000-j0.86603

CAL PRINT CLOSE

รูปที่ 6.19 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบไม่สมมาตร

การเปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดฟอลต์ ทำการเลือกจากรายการ Analysis / Fault Comparison เลือกชนิดของการเปรียบเทียบ (เปรียบเทียบการเกิดฟอลต์ที่บัสต่างๆ หรือเปรียบเทียบฟอลต์ที่เกิดขึ้นแต่ละชนิด) สำหรับการเปรียบเทียบฟอลต์ที่บัสต่างๆ ให้เลือก ชนิดของฟอลต์ เงื่อนไขของเฟสที่เกิดฟอลต์ และการเปรียบเทียบชนิดของฟอลต์ให้ทำการเลือกบัสที่ต้องการเปรียบเทียบ หลังจากนั้นให้ป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลต์ และค่าอิมพีแดนซ์ผ่านลงดิน หลังจากนั้นให้คลิกที่ปุ่มคำนวณ เพื่อสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณดังรูปที่ 6.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 การทดสอบผลของการวิเคราะห์ฟอลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดสอบผลของการวิเคราะห์ฟอลต์

ทำการทดสอบโปรแกรมเพื่อผลลัพธ์ของการทำงานของโปรแกรมโดยตรวจสอบกับระบบไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้เห็นความแตกต่างระหว่างการเกิดฟอลต์ในแต่ละแบบหรือการเกิดฟอลต์ในบัสหรือจุดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยจะทำการแสดงผลการคำนวณจากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการคำนวณปกติแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ฟอลต์ เพื่อดูผลของการคำนวณและความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรม

ในบทนี้ได้ยกตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลังในลักษณะต่าง ๆ มาพอสมควรเพื่อความครอบคลุมลักษณะการเกิดฟอลต์ในแบบต่าง ๆ กัน ดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 เป็นการคำนวณฟอลต์แบบสมมาตร หรือสามเฟสฟอลต์ และ ทำการเปรียบเทียบฟอลต์แต่ละแบบและแต่ละบัสในตอนท้ายด้วย

ตัวอย่างที่ 2 เป็นการคำนวณฟอลต์แบบไม่สมมาตร ในลักษณะเฟส-เฟส และมีการเปรียบเทียบฟอลต์เช่นกัน

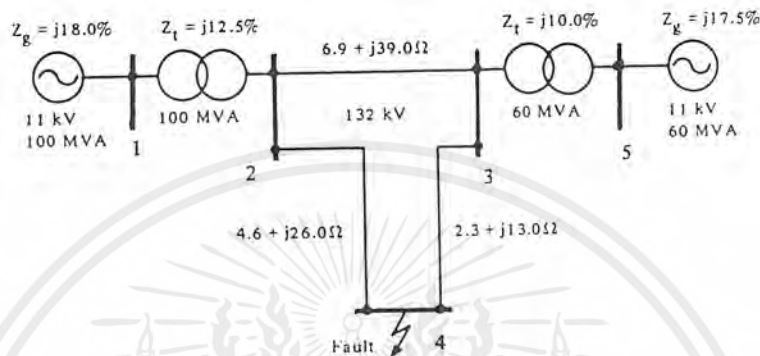
ตัวอย่างที่ 3 เป็นการคำนวณฟอลต์ในลักษณะ 1 เฟส-ลงดิน

ตัวอย่างที่ 4 เป็นการคำนวณฟอลต์แบบ เฟส-เฟส-ลงดิน

ตัวอย่างที่ 5 เป็นการคำนวณฟอลต์ ของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เป็นระบบใหญ่ในลักษณะเปรียบเทียบฟอลต์สามเฟสกับฟอลต์ 1 เฟสลงดิน

ตัวอย่างที่ 1

ระบบไฟฟ้ากำลังแสดงในรูปที่ 7.1 เมื่อเกิดฟอลต์สามเฟส (Three-phase fault) ที่บัส 4 จำนวนกระแสฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault) กำหนดให้แรงดันระหว่างสายก่อนเกิดฟอลต์ (prefault) ณ ตำแหน่งที่เกิด ฟอลต์มีค่า 140 kV [1]



รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างที่ 1

วิธีทำ

กำหนดเบสของระบบเท่ากับ 132 kV 100 MVA

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1

พิกัดกระแส $I = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 11 \text{ kV}} = 5250 \text{ A}$

แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส $V_{LN} = \frac{11 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ V}$

จะได้เบสอิมพีแดนซ์ $Z_{\text{base}} = \frac{6350}{5250} = 1.21 \Omega$

ดังนั้น อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1

$$Z_{g1} = j0.18 \times 1.21 = j0.218 \Omega$$

แปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่เบสของระบบ

$$Z_{g1} = \left(\frac{132}{11} \right)^2 \times j0.218 = j31.4 \Omega$$

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2

พิกัดกระแส $I = \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 11 \text{ kV}} = 3150 \text{ A}$

แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส $V_{LN} = \frac{11 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้เบสอิมพีแดนซ์ $Z_{base} = \frac{6350}{3150} = 2.016 \Omega$

ดังนั้น อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2

$$Z_{g2} = j0.175 \times 2.016 = j0.353 \Omega$$

แปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่เบสของระบบ

$$Z_{g2} = \left(\frac{132}{11} \right)^2 \times j0.353 = j50.9 \Omega$$

พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้า 1

พิกัดกระแส $I_2 = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 132 \text{ kV}} = 473.4 \text{ A}$

แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส $V_{LN} = \frac{132 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 76.21 \text{ V}$

จะได้เบสอิมพีแดนซ์ $Z_{base} = \frac{76.21 \text{ kV}}{473.4} = 174.24 \Omega$

ดังนั้น อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 1

$$Z_{t1} = 174.24 \times j0.125 = j21.8 \Omega$$

พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้า 2

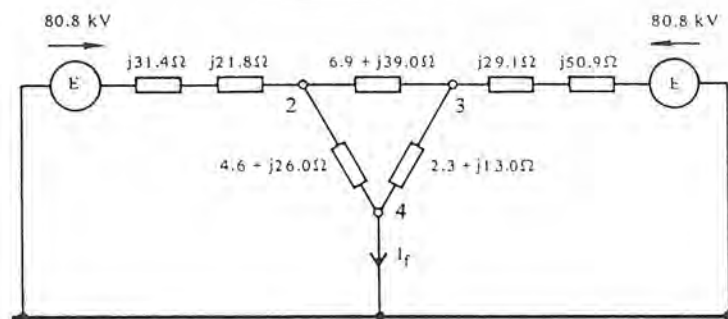
พิกัดกระแส $I_2 = \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 132 \text{ kV}} = 262.4 \text{ A}$

แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส $V_{LN} = \frac{132 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 76.21 \text{ kV}$

จะได้เบสอิมพีแดนซ์ $Z_{base} = \frac{76.21 \text{ kV}}{262.4} = 290.4 \Omega$

ดังนั้น อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า 2 $Z_{t2} = 290.4 \times j0.1 = j29.1 \Omega$

เขียนวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ได้ดังรูปที่ 7.2



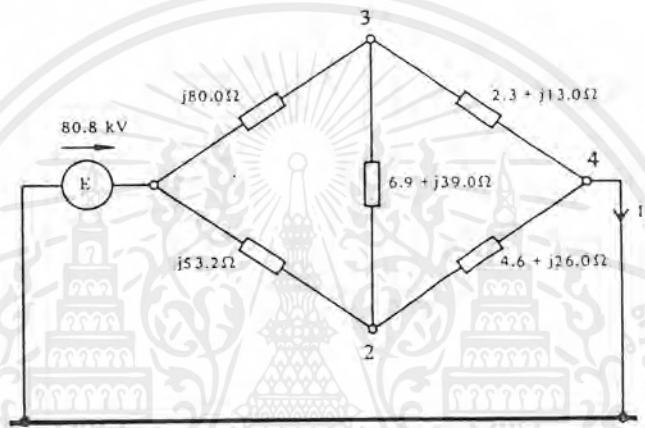
รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าก่อนเกิดฟอลท์ที่จุดเกิดฟอลท์ (บัส 4)

$$E = \frac{140 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 80.829 \text{ kV}$$

จะได้วงจรสมมูลที่บัสเกิดฟอลท์



รูปที่ 7.3 วงจรสมมูลที่บัสเกิดฟอลท์ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างที่ 1

แปลงอิมพีแดนซ์ที่จุด 2-3-4 จากเดลต้าไปเป็นสตาร์ จะได้อิมพีแดนซ์ที่จุดสตาร์ไปยังบัส

จุด 4 คือ

$$\frac{(2.3 + j13.0)(4.6 + j26.0)}{(2.3 + j13.0) + (4.6 + j26.0) + (6.9 + j39.0)} = 0.77 + j4.33 \Omega$$

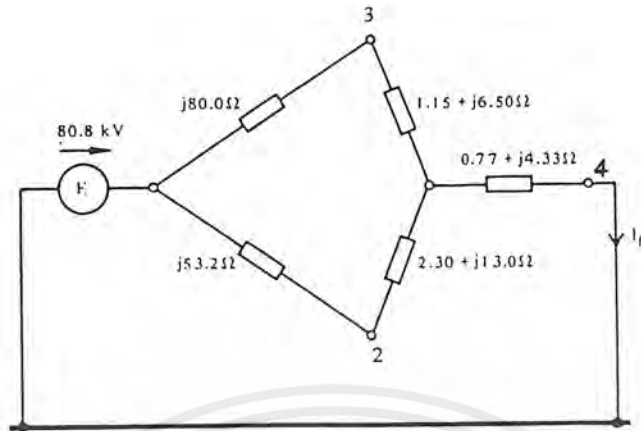
อิมพีแดนซ์ที่จุดสตาร์ไปยังบัสจุด 3 คือ

$$\frac{(2.3 + j13.0)(6.9 + j39.0)}{(2.3 + j13.0) + (4.6 + j26.0) + (6.9 + j39.0)} = 1.15 + j6.50 \Omega$$

และอิมพีแดนซ์ที่จุดสตาร์ไปยังบัสจุด 2 คือ

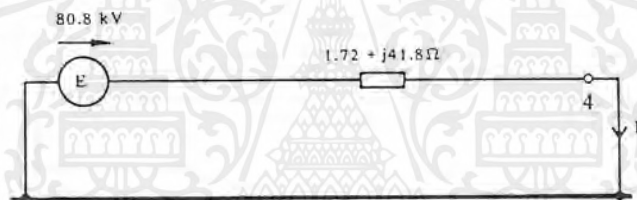
$$\frac{(4.6 + j26.0)(6.9 + j39.0)}{(2.3 + j13.0) + (4.6 + j26.0) + (6.9 + j39.0)} = 2.30 + j13.0 \Omega$$

จะได้วงจรดังรูป



รูปที่ 7.4 วงจรสมมูลเมื่อแปลงจากเคลด้าเป็นสตาร์ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างที่ 1

เมื่อทำการแปลงอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลเสร็จแล้วจะได้วงจรดังรูป



รูปที่ 7.5 วงจรสมมูลเมื่อทำการแปลงอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างที่ 1

หาคะแสฟอลท์สามเฟส ได้เป็น

$$I_f = \frac{E}{Z_{th}} = \frac{80.8 \text{ kV}}{1.72 + j41.8 \Omega} = 79.7 - j1930 \text{ A}$$

$$I_f = 1932 \angle -87^\circ \text{ A}$$

หาคะแสฟอลท์ที่ไหลมาจากแต่ละจุด โดยกระแสไหลมายังบัส 2 จากเครื่องกำเนิด 1 หม้อ
แปลง 1 ด้วยวิธีการแบ่งกระแส (Current Divider) เป็น

$$\begin{aligned} \frac{(1.15 + j86.5 \Omega)(79.7 - j1930 \text{ A})}{(1.15 + j86.5 \Omega) + (2.3 + j66.2 \Omega)} &= 55.3 - j1094 \text{ A} \\ &= 1095 \angle -87^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

แรงดันเฟสที่บัส 2 จะเป็น

$$\begin{aligned} V_2 &= 80.8 \text{ kV} - j53.2 \Omega (55.3 - j1094 \text{ A}) = 22550 - j2944 \text{ V} \\ &= 22.720 \angle -7^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

กระแสฟอลท์ที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิด 2 / หม้อแปลง 2 มายังบัส 3 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(79.7 - j1930 \text{ A}) - (55.3 - j1094 \text{ A}) = 24.4 - j836 \text{ A} \\ = 836 \angle -88^\circ \text{ A}$$

แรงดันเฟสที่บัส 3 จะเป็น

$$V_3 = 80.8 \text{ kV} - j80.0 \Omega (24.4 - j836 \text{ A}) = 13920 - j1952 \text{ V} \\ = 14.05 \angle -7^\circ \text{ kV}$$

และแรงดันเฟสที่บัส 4 มีค่าเป็น 0 ($V_4 = 0$) เนื่องจากเป็นจุดที่เกิดฟอลต์

กระแสที่ไหลจากบัส 2 มายังบัส 4 เป็น

$$\frac{V_2}{Z_{2-4}} = \frac{22550 - j2944 \text{ V}}{4.6 + j26.0} = 38.9 - j860 \text{ A} \\ = 861 \angle -87^\circ \text{ A}$$

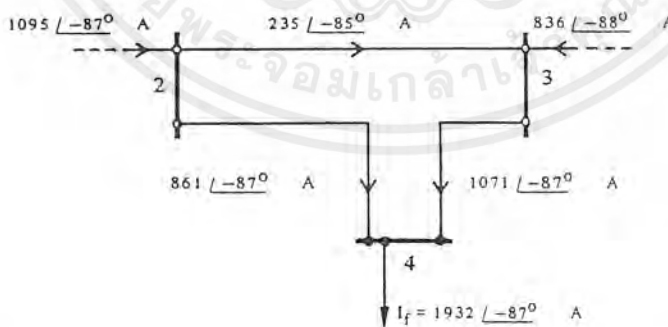
กระแสที่ไหลจากบัส 3 มายังบัส 4 เป็น

$$(55.3 - j1094 \text{ A}) - (38.9 - j860 \text{ A}) = 16.4 - j234 \text{ A} \\ = 1071 \angle -87^\circ \text{ A}$$

และสุดท้าย กระแสไหลจากบัส 2 ไปยังบัส 3 เป็น

$$(55.3 - j1094 \text{ A}) - (38.9 - j860 \text{ A}) = 16.4 - j234 \text{ A} \\ = 235 \angle -85^\circ \text{ A}$$

ดังรูปที่ 7.6

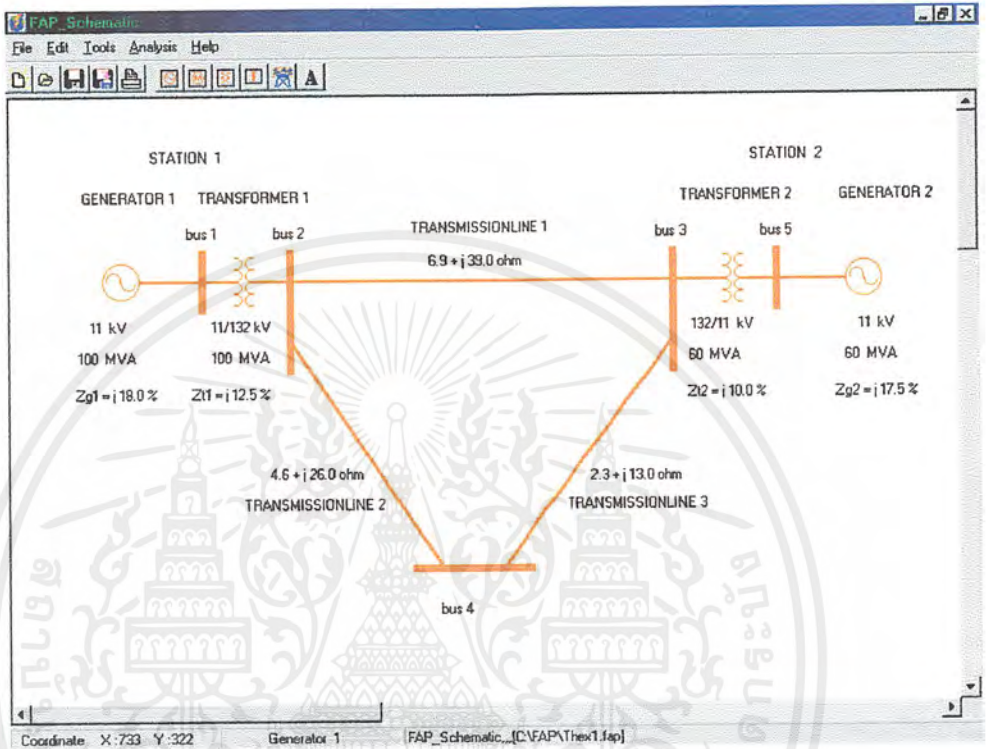


รูปที่ 7.6 การไหลของกระแสในจุดต่างๆ ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม

เข้าสู่โปรแกรม สร้างระบบไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ให้ในตัวอย่างดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 สร้างระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 1

กำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้างดังรูปที่ 7.8

The 'System Base' dialog box contains the following settings:

- SYSTEM BASE**
- assign at Bus: 1
- FREQUENCY: 50 Hz
- BASE VOLTAGE: 11 kV
- BASE POWER: 100 MVA
- Buttons: OK, CANCEL

รูปที่ 7.8 เบสของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ได้เป็นค่าเปอร์ยูนิตที่จุดเกิดฟอลต์ ดังรูปที่ 7.9

Sequence Bus Impedance Matrix

POSITIVE SEQUENCE BUS IMPEDANCE MATRIX

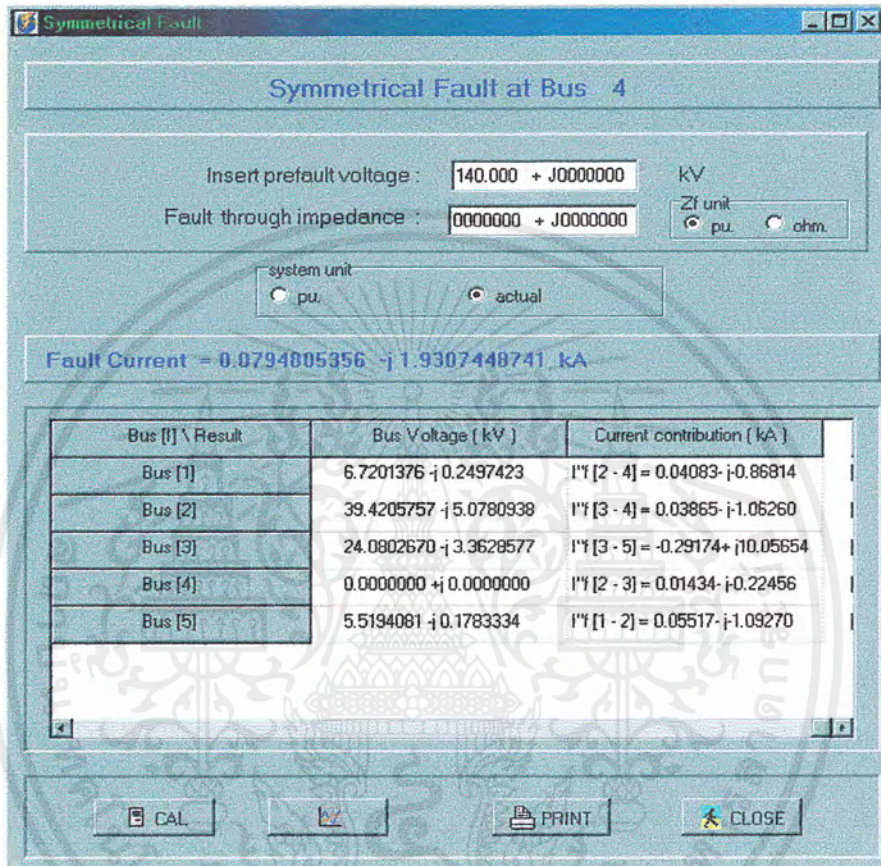
Make Positive Negative Zero PRINT CLOSE

Zbus,1[,J]	1	2	3	4	5
1	0.00084+j0.14300	0.00142+j0.11731	0.00213+j0.09421	0.00095+j0.10191	0.00136+j0.05995
2	0.00142+j0.11731	0.00240+j0.19877	0.00361+j0.15963	0.00161+j0.17268	0.00230+j0.10159
3	0.00213+j0.09421	0.00361+j0.15963	0.00543+j0.21844	0.00241+j0.19884	0.00345+j0.13901
4	0.00095+j0.10191	0.00161+j0.17268	0.00241+j0.19884	0.00987+j0.23986	0.00154+j0.12654
5	0.00136+j0.05995	0.00230+j0.10159	0.00345+j0.13901	0.00154+j0.12654	0.00220+j0.19452

รูปที่ 7.9 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ของตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

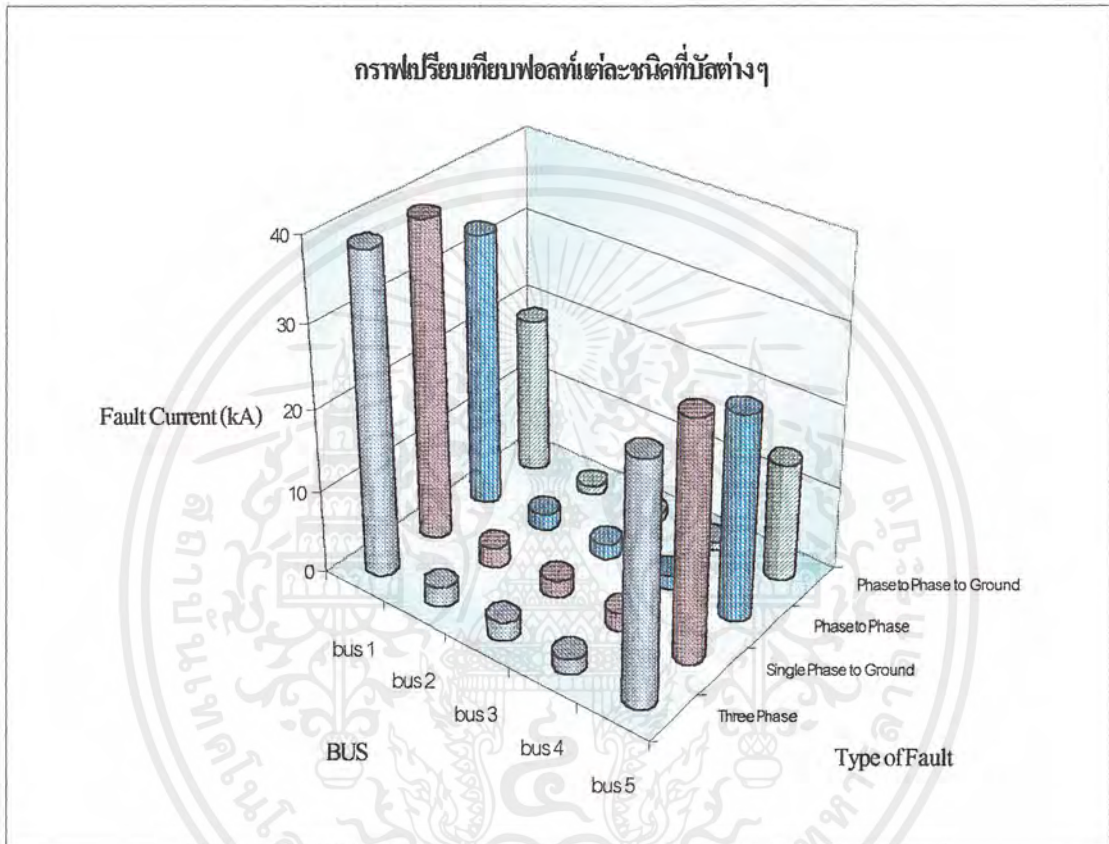
คำนวณหาค่าฟอลท์ที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 ผลการคำนวณฟอลท์ในตัวอย่างที่ 1

ตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากโปรแกรมแล้ว จะเห็นว่าได้ค่าที่ถูกต้อง

เมื่อใช้โปรแกรมคำนวณฟอลต์แต่ละแบบที่บัสต่าง ๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในกราฟ



รูปที่ 7.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบฟอลต์แต่ละแบบที่บัสต่าง ๆ

จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อเกิดฟอลต์ที่บัส 1 และบัส 5 จะมีความรุนแรงมากกว่าฟอลต์ที่บัส 2 บัส 3 และบัส 4 มาก และการฟอลต์สามเฟส และหนึ่งเฟสลงดินจะมีความรุนแรงมากกว่าฟอลต์แบบอื่น ๆ ฟอลต์ทั้ง 2 แบบนี้แบบใดจะรุนแรงกว่าทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าด้วย

ตัวอย่างที่ 2

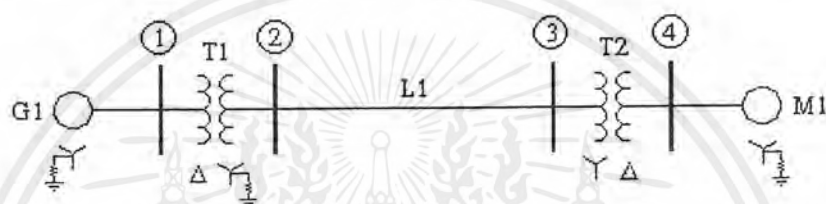
ระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 7.12 มีพิกัดและรีแอกแตนซ์ของเครื่องจักร หม้อแปลง และสายส่งดังนี้
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G_1 : 100 MVA, 20 kV, $X_1 = X_2 = 20\%$, $X_0 = 4\%$, $X_n = 5\%$

มอเตอร์ M_1 : 50 MVA, 20 kV, $X_1 = X_2 = 20\%$, $X_0 = 4\%$, $X_n = 5\%$

หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 : 100 MVA, 20 Δ /345Y kV, $X = 8\%$

หม้อแปลงไฟฟ้า T_2 : 100 MVA, 20 Δ /345Y kV, $X = 8\%$

สายส่ง L_1 : $X_1 = X_2 = 15\%$, $X_0 = 15\%$



รูปที่ 7.12 ระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างที่ 2

จงคำนวณหากระแสลัดวงจรชั่วคราวเส้นลัดที่เกิดลัดวงจร เฟส-เฟส (Line-to-Line Fault) ที่เฟส A กับ B ที่บัส 2 และแรงดันก่อนเกิดฟอลต์ เท่ากับแรงดันพิกัดที่บัส 2 เลือกระดับที่ 100 MVA, 345 kV [6]

วิธีทำ เลือกระดับที่ 100 MVA, 345 kV หาอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิตของวงจรสมมูลที่เบสได้เป็น
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G_1 : $X_1 = X_2 = j0.2$ p.u., $X_0 = 0.04$ p.u., $X_n = 0.05$ p.u.

มอเตอร์ M_1 : $X_1 = X_2 = \frac{j0.2 \times 100}{50} = j0.4$ p.u.

$$X_0 = \frac{j0.04 \times 100}{50} = j0.08 \text{ p.u.}$$

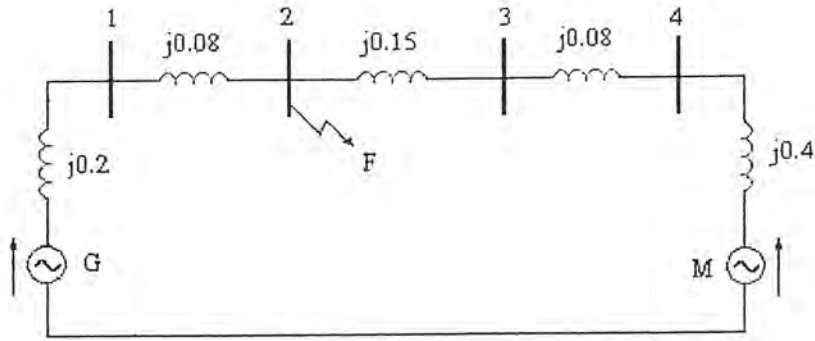
$$X_n = \frac{j0.05 \times 100}{50} = j0.1 \text{ p.u.}$$

หม้อแปลงไฟฟ้า T_1, T_2 : $X_1 = X_2 = X_0 = j0.08$ p.u.

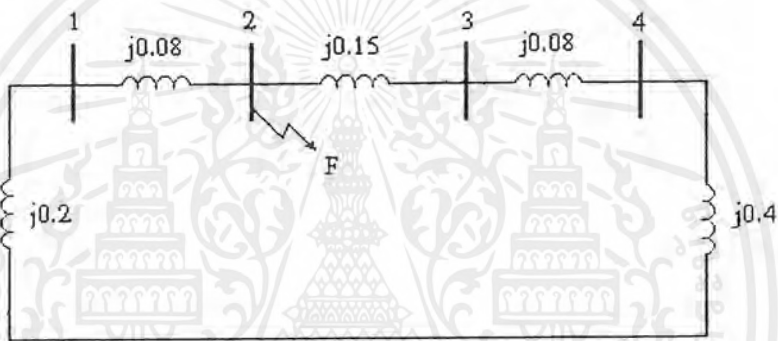
สายส่ง L_1 : $X_1 = X_2 = j0.15$ p.u., $X_0 = j0.5$ p.u.

นำมาเขียนเป็นเน็ตเวิร์คลำดับบวก ลบ และ ศูนย์ ได้ดังรูปที่ 7.13, 7.14 และ 7.15 ตาม

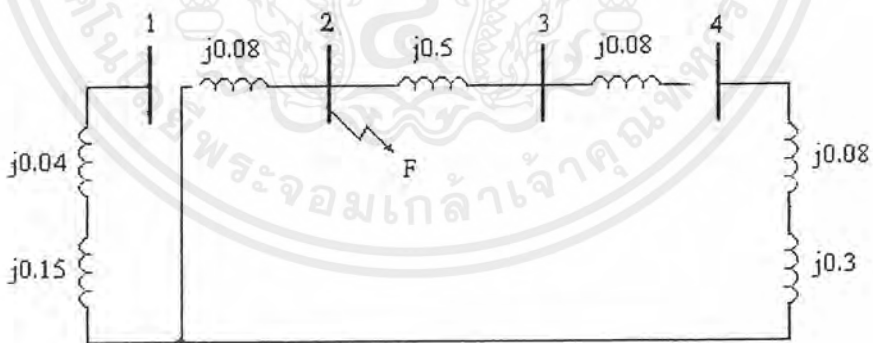
ลำดับ



รูปที่ 7.13 เน็ตเวิร์คลำดับบวกของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 7.14 เน็ตเวิร์คลำดับลบของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 7.15 เน็ตเวิร์คลำดับศูนย์ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2

เมื่อเขียนเน็ตเวิร์คแล้ว หากมีพีแวนซ์ผลลัพธ์รวม โดยมองเข้าไปที่จุดของฟอลท์ในแต่ละเน็ตเวิร์คจะได้เป็น

$$Z_1 = j0.193 \text{ p.u.}$$

$$Z_2 = j0.193 \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = j0.08 \text{ p.u.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสลำดับที่ไหลไปยังจุดเกิดฟอลต์ บัส 2 เมื่อเกิดฟอลต์ เฟส - เฟส

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_2} = \frac{1 + j0}{(j0.193 + j0.193)} = -j2.59 \text{ p.u.}$$

$$I_2 = \frac{-E}{Z_1 + Z_2} = \frac{-(1 + j0)}{(j0.193 + j0.193)} = j2.59 \text{ p.u.}$$

$$I_0 = 0$$

กระแสเฟสเมื่อเกิดฟอลต์

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 - j2.59 + j2.59 = 0$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = j4.486 \text{ p.u.}$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = -j4.486 \text{ p.u.}$$

หาแรงดันลำดับที่จุดเกิดฟอลต์

$$V_1 = \frac{Z_2 E}{Z_1 + Z_2} = \frac{j0.193(1 + j0)}{(j0.193 + j0.193)} = 0.5 \text{ p.u.}$$

$$V_2 = \frac{Z_2 E}{Z_1 + Z_2} = 0.5 \text{ p.u.}$$

$$V_0 = 0$$

แรงดันเฟสที่จุดเกิดฟอลต์

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 0 + 0.5 + 0.5 = 1 \text{ p.u.}$$

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = -0.5 \text{ p.u.}$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 = -0.5 \text{ p.u.}$$

ขณะนี้กระแสเบสที่จุดเกิดฟอลต์คือ

$$\frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 345 \text{ kV}} = 167.35 \text{ A}$$

นำไปคูณค่าฟอลต์เปอร์ยูนิตจะได้ผลของฟอลต์ที่เกิดเป็น

$$I_a = 0$$

$$I_b = j4.486 \times 167.35 = j750.73 \text{ A}$$

$$I_c = (-j4.486) \times 167.35 = -j750.73 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเบสที่จุดฟอลท์คือ 345 kV

ได้แรงดันที่จุดเกิดฟอลท์เป็น

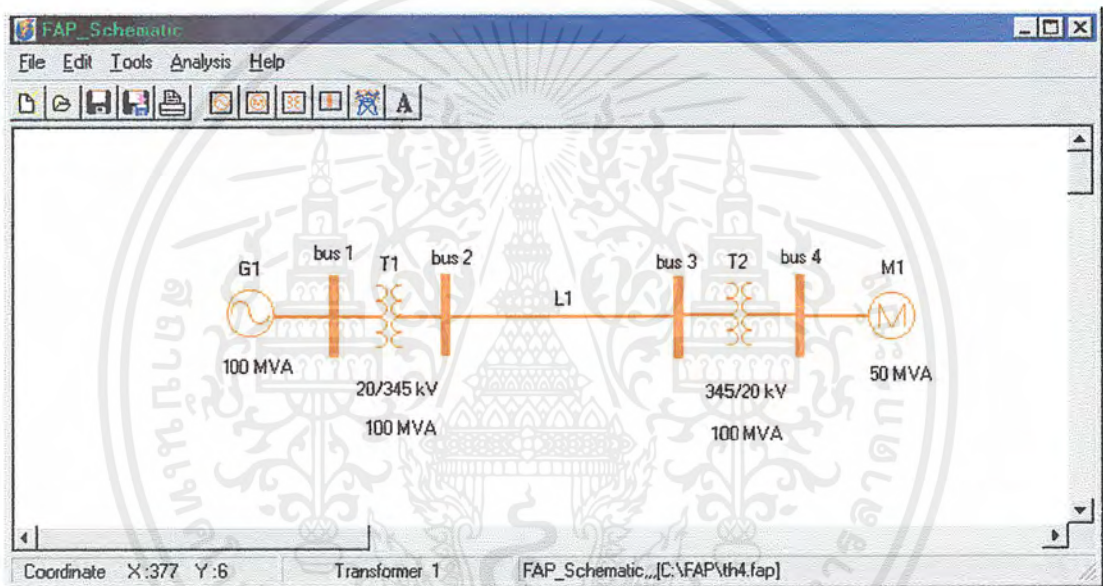
$$V_a = 1 \times 345 \text{ kV} = 345 \text{ kV}$$

$$V_b = (-0.5) \times 345 \text{ kV} = -172.5 \text{ kV}$$

$$V_c = (-0.5) \times 345 \text{ kV} = -172.5 \text{ kV}$$

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม

เข้าสู่โปรแกรม สร้างระบบไฟฟ้าตามข้อมูลของระบบไฟฟ้าในตัวอย่าง ตามรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 สร้างระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 2

กำหนดเบสของระบบไฟฟ้างี้ตามรูปที่ 7.17

รูปที่ 7.17 เบสของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์เน็ตเวิร์คบวก เน็ตเวิร์คลบ และ เน็ตเวิร์คศูนย์ (Z_1, Z_2, Z_0) ได้เป็นค่าเปอร์ยูนิต ดังรูปที่ 7.18 , 7.19 และ 7.20 ตามลำดับ

Zbus,1[i,j]	1	2	3	4
1	0.0000+j0.15604	0.0000+j0.13846	0.0000+j0.10549	0.0000+j0.08791
2	0.0000+j0.13846	0.0000+j0.19385	0.0000+j0.14769	0.0000+j0.12308
3	0.0000+j0.10549	0.0000+j0.14769	0.0000+j0.22681	0.0000+j0.18901
4	0.0000+j0.08791	0.0000+j0.12308	0.0000+j0.18901	0.0000+j0.22418

รูปที่ 7.18 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับบวกของตัวอย่างที่ 2

Zbus,2[i,j]	1	2	3	4
1	0.0000+j0.15604	0.0000+j0.13846	0.0000+j0.10549	0.0000+j0.08791
2	0.0000+j0.13846	0.0000+j0.19385	0.0000+j0.14769	0.0000+j0.12308
3	0.0000+j0.10549	0.0000+j0.14769	0.0000+j0.22681	0.0000+j0.18901
4	0.0000+j0.08791	0.0000+j0.12308	0.0000+j0.18901	0.0000+j0.22418

รูปที่ 7.19 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับลบของตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZERO SEQUENCE BUS IMPEDANCE MATRIX

Buttons: Make, Positive, Negative, Zero, PRINT, CLOSE

Zbus.0 [u]	1	2	3	4
1	0.00000+ <i>j</i> 0.19000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000
2	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.08000	0.00000+ <i>j</i> 0.08000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000
3	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.08000	0.00000+ <i>j</i> 0.58000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000
4	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.38000

รูปที่ 7.20 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับศูนย์ของตัวอย่างที่ 2

คำนวณหาค่าฟอลท์ เฟส-เฟส ได้ค่าดังรูปที่ 7.21

Unsymmetrical Fault at Bus 2

Faults Condition:
 Phase to phase fault
 phase B to phase C Fault
 Fault through impedance Zi: 0.000000 + *j* 0.000000 (Zi unit: pu, ohm)
 Prefault Voltage: 345.000 + *j* 0.000000 kV
 system unit: pu, actual

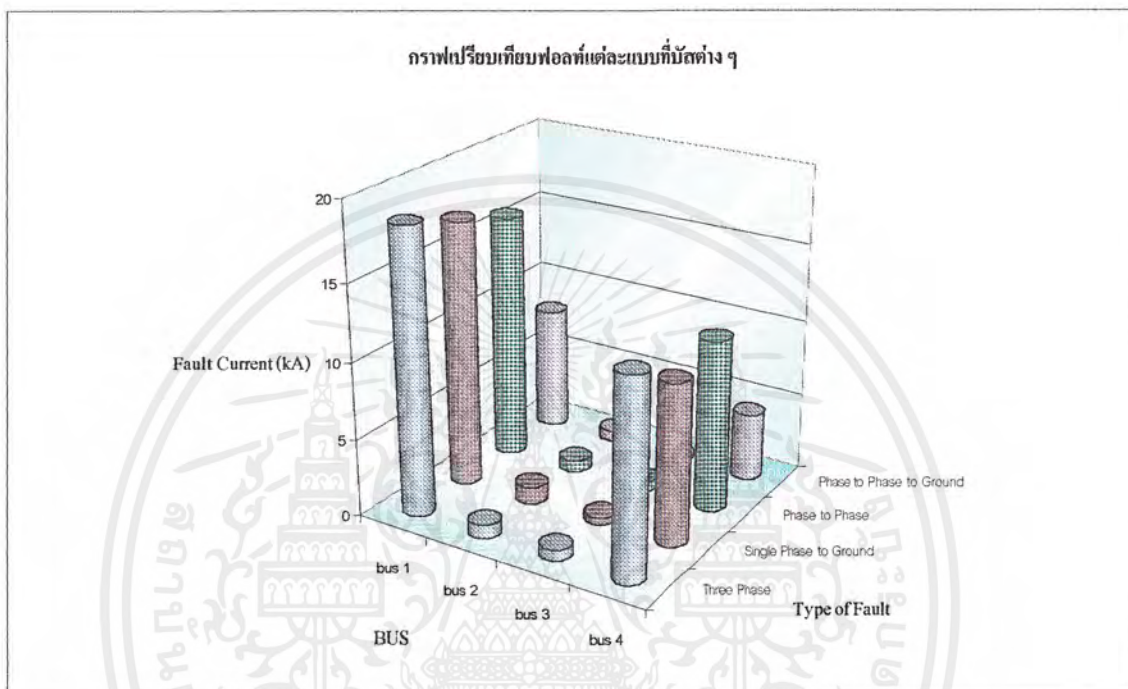
Result	Current (kA)	Voltage (kV)
positive component	0.00000+ <i>j</i> 0.43165	172.50000+ <i>j</i> 0.00000
negative component	0.00000+ <i>j</i> 0.43165	172.50000+ <i>j</i> 0.00000
zero component	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	0.00000+ <i>j</i> 0.00000
phase a	0.00000+ <i>j</i> 0.00000	345.00000+ <i>j</i> 0.00000
phase b	-0.74764+ <i>j</i> 0.00000	-172.50000+ <i>j</i> 0.00000
phase c	0.74764+ <i>j</i> 0.00000	-172.50000+ <i>j</i> 0.00000

Buttons: CALC, PRINT, CLOSE

รูปที่ 7.21 ผลการคำนวณฟอลท์ในตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้โปรแกรมคำนวณฟอลต์แต่ละชนิดที่บัสต่างๆ สามารถทำการเปรียบเทียบการเกิดฟอลต์แสดงได้ดังกราฟ



รูปที่ 7.22 กราฟเปรียบเทียบฟอลต์แต่ละแบบที่บัสต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3

ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส สายส่งกำลังไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า มีข้อมูลต่าง ๆ ดังตาราง เมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างไลน์กับดิน โดยที่กำหนดให้ฟอลต์ที่เฟส A ลงดิน ที่บัสต่าง ๆ คำนวณหาค่ากระแสฟอลต์และแรงดันไฟฟ้าที่เฟสต่าง ๆ ขณะเกิดฟอลต์ กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสก่อนเกิดฟอลต์มีค่า $1.05 \angle 0^\circ$ p.u. [2]

BUS	X_0	X_1	X_2	X_n
	Per unit	Per unit	Per unit	Per unit
1	0.05	0.18	0.18	0
3	0.02	0.09	0.09	0.01

ตารางที่ 7.1 ข้อมูลเครื่องจักรซิงโครนัส สำหรับตัวอย่างที่ 3

BUS-TO-BUS	X_0	X_1
	Per unit	Per unit
2-4	1.2	0.4
2-5	0.6	0.2
4-5	0.3	0.1

ตารางที่ 7.2 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า สำหรับตัวอย่างที่ 3

LOW-VOLTAGE (connection) Bus	HIGH-VOLTAGE (connection) Bus	LEAKAGE REACTANCE Per unit	NEUTRAL REACTANCE Per unit
1 (Δ)	5 (Y-to-Ground)	0.08	0
3 (Δ)	4 (Y-to-Ground)	0.04	0

ตารางที่ 7.3 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับตัวอย่างที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลจะได้ค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ดังนี้

$$Z_{bus1} = j \begin{bmatrix} 0.112 & 0.071 & 0.034 & 0.049 & 0.082 \\ 0.071 & 0.227 & 0.054 & 0.079 & 0.102 \\ 0.034 & 0.054 & 0.073 & 0.065 & 0.049 \\ 0.049 & 0.079 & 0.065 & 0.094 & 0.071 \\ 0.082 & 0.102 & 0.049 & 0.071 & 0.118 \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus2} = j \begin{bmatrix} 0.112 & 0.071 & 0.034 & 0.049 & 0.082 \\ 0.071 & 0.227 & 0.054 & 0.079 & 0.102 \\ 0.034 & 0.054 & 0.073 & 0.065 & 0.049 \\ 0.049 & 0.079 & 0.065 & 0.094 & 0.071 \\ 0.082 & 0.102 & 0.049 & 0.071 & 0.118 \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus0} = j \begin{bmatrix} 0.050 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.435 & 0 & 0.017 & 0.045 \\ 0 & 0 & 0.050 & 0 & 0 \\ 0 & 0.017 & 0 & 0.035 & 0.008 \\ 0 & 0.045 & 0 & 0.008 & 0.063 \end{bmatrix}$$

คำนวณหาค่ากระแสฟอลต์และแรงดันไฟฟ้าที่บัสเมื่อเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน แสดงได้ดัง

ตาราง

$V_F = 1.05 \angle 0^\circ$		แรงดันไฟฟ้าที่บัสขณะเกิดฟอลต์		
บัสฟอลต์	กระแสฟอลต์	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	$0 - j11.505$	$0 + j0$	$-0.28 - j0.91$	$-0.28 + j0.91$
2	$0 - j3.534$	$0 + j0$	$-0.77 - j0.91$	$-0.77 + j0.91$
3	$0 - j16.076$	$0 + j0$	$-0.4 - j0.91$	$-0.4 + j0.91$
4	$0 - j14.018$	$0 + j0$	$-0.25 - j0.91$	$-0.25 + j0.91$
5	$0 - j10.541$	$0 + j0$	$-0.33 - j0.91$	$-0.33 + j0.91$

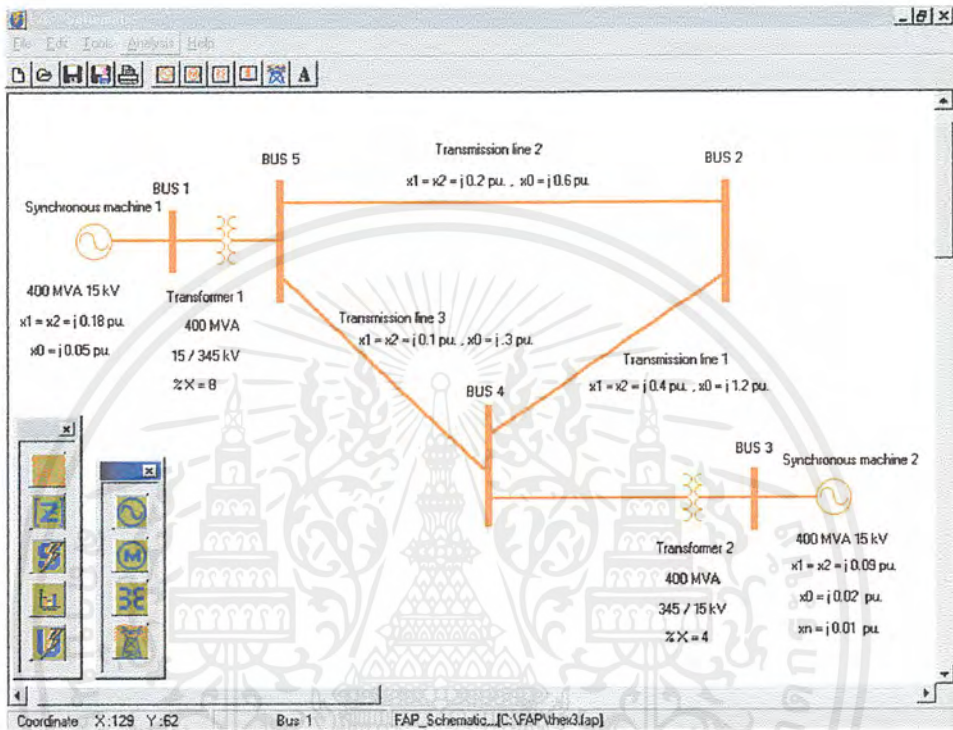
ตารางที่ 7.4 กระแสและแรงดันฟอลต์ ในตัวอย่างที่ 3

กำหนดเบสของระบบเป็น 400 MVA, 15 kV ที่บัส 1,3 และ 345 kV ที่บัส 2,4,5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม

เข้าสู่โปรแกรม สร้างระบบไฟฟ้าจากข้อมูลในตารางของ ตัวอย่างที่ 3 ดังรูปที่ 7.23



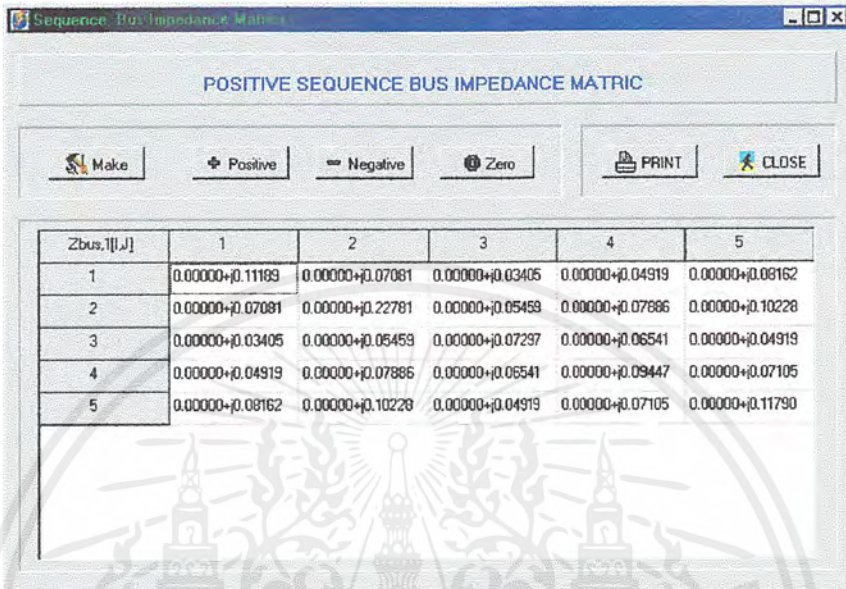
รูปที่ 7.23 สร้างระบบไฟฟ้า จากตารางตัวอย่างที่ 3

กำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้า ดังรูป 7.24

รูปที่ 7.24 เบสของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3

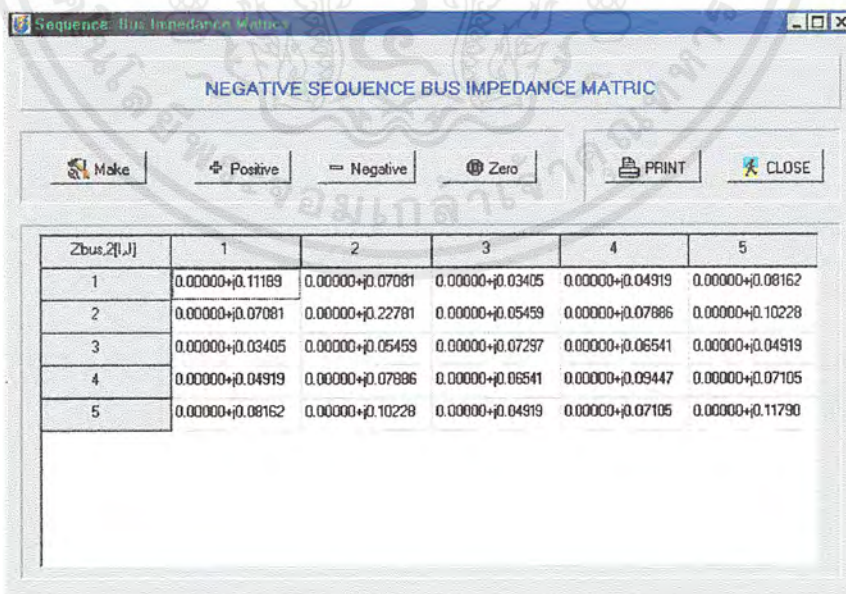
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เป็นเปอร์ยูนิต ทั้งเน็ตเวิร์กลำดับบวก ลบ และศูนย์ ซึ่งค่าที่ได้ เท่ากันกับค่าที่ได้คำนวณไว้ในตอนต้น แสดงดังรูปที่ 7.25 , 7.26 , 7.27 ตามลำดับ



Zbus,1[i,j]	1	2	3	4	5
1	0.0000+j0.11189	0.0000+j0.07081	0.0000+j0.03405	0.0000+j0.04919	0.0000+j0.08162
2	0.0000+j0.07081	0.0000+j0.22781	0.0000+j0.05459	0.0000+j0.07886	0.0000+j0.10228
3	0.0000+j0.03405	0.0000+j0.05459	0.0000+j0.07297	0.0000+j0.06541	0.0000+j0.04919
4	0.0000+j0.04919	0.0000+j0.07886	0.0000+j0.06541	0.0000+j0.09447	0.0000+j0.07105
5	0.0000+j0.08162	0.0000+j0.10228	0.0000+j0.04919	0.0000+j0.07105	0.0000+j0.11790

รูปที่ 7.25 บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เปอร์ยูนิตของเน็ตเวิร์กลำดับบวก ในตัวอย่างที่ 3



Zbus,2[i,j]	1	2	3	4	5
1	0.0000+j0.11189	0.0000+j0.07081	0.0000+j0.03405	0.0000+j0.04919	0.0000+j0.08162
2	0.0000+j0.07081	0.0000+j0.22781	0.0000+j0.05459	0.0000+j0.07886	0.0000+j0.10228
3	0.0000+j0.03405	0.0000+j0.05459	0.0000+j0.07297	0.0000+j0.06541	0.0000+j0.04919
4	0.0000+j0.04919	0.0000+j0.07886	0.0000+j0.06541	0.0000+j0.09447	0.0000+j0.07105
5	0.0000+j0.08162	0.0000+j0.10228	0.0000+j0.04919	0.0000+j0.07105	0.0000+j0.11790

รูปที่ 7.26 บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เปอร์ยูนิตของเน็ตเวิร์กลำดับลบ ในตัวอย่างที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sequence - Zero Impedance Matrix

ZERO SEQUENCE BUS IMPEDANCE MATRIX

Make Positive Negative Zero PRINT CLOSE

Zbus,0[i,j]	1	2	3	4	5
1	0.00000+j0.05000	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000
2	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.43576	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.01758	0.00000+j0.04485
3	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.05000	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000
4	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.01758	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.03576	0.00000+j0.00848
5	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.04485	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00848	0.00000+j0.06303

รูปที่ 7.27 บัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เปอร์ยูนิคของเน็ตเวิร์กลำดับศูนย์ ในตัวอย่างที่ 3
คำนวณหาค่าฟอลท์ที่เกิดขึ้นที่บัสต่าง ๆ แสดงค่าดังรูปที่ 7.28 และ 7.29

Unsymmetrical Faults - Bus 1

Unsymmetrical Fault at Bus 1

Faults Condition

Single phase to earth fault

phase A to Earth Fault

Fault through impedance Zf: 0.000000 + j 0.000000 Zf unit: pu. ohm

Prefault Voltage: 1.05000 + j 0.000000 pu.

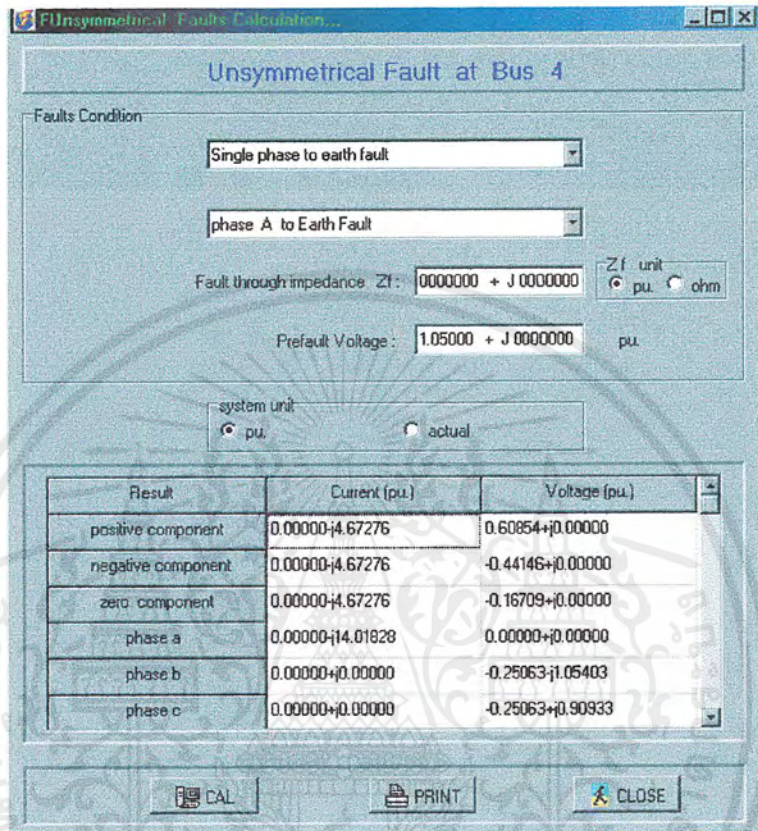
system unit: pu. actual

Result	Current (pu.)	Voltage (pu.)
positive component	0.00000-j3.83514	0.62088+j0.00000
negative component	0.00000-j3.83514	-0.42912+j0.00000
zero component	0.00000-j3.83514	-0.19176+j0.00000
phase a	0.00000-j11.50543	0.00000+j0.00000
phase b	0.00000+j0.00000	-0.28764-j1.07539
phase c	0.00000+j0.00000	-0.28764+j0.90933

CAL PRINT CLOSE

รูปที่ 7.28 ผลของฟอลท์ที่บัส 1 ในตัวอย่างที่ 3

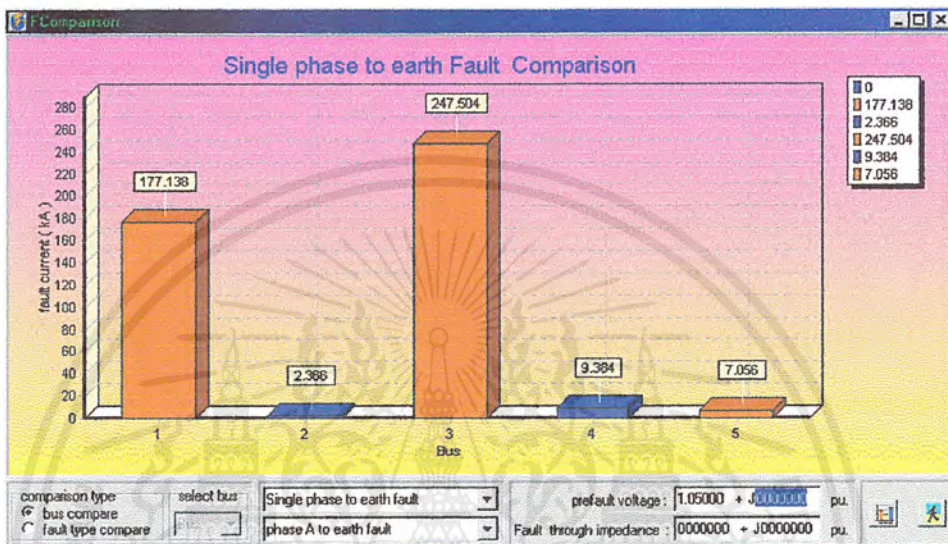
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.29 ผลของฟอลท์ที่บัส 4 ในตัวอย่างที่ 3

ผลของฟอลท์ที่คำนวณ โดย โปรแกรม ถูกต้องมีค่าเท่ากับ ในตารางที่ 7.4 ผลการคำนวณที่บัสอื่นๆ ก็เช่นเดียวกันได้ค่าตรงกับในตารางทั้งหมด

ใช้โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟอลต์ หนึ่งเฟส-ลงดิน พิจารณาความรุนแรง ณ บัสต่าง ๆ
ให้เห็นชัดเจนขึ้น ซึ่งแสดงเป็นค่าจริงดังรูปที่ 7.30



รูปที่ 7.30 โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟอลต์ที่บัสต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4

จากระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 7.31 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

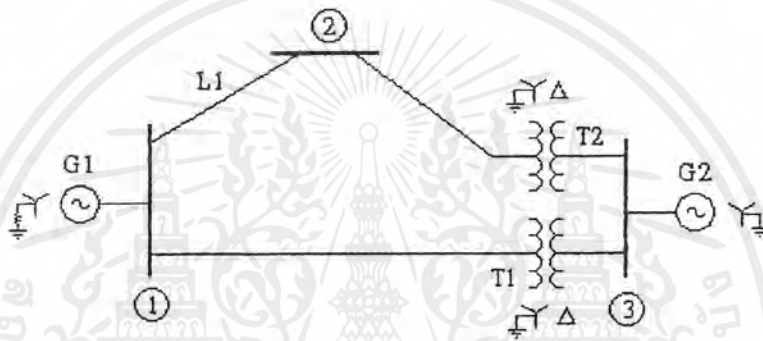
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G_1 : 200 MVA, 13.8 kV, $X_1 = X_2 = 0.2$ p.u., $X_0 = 0.4$ p.u., $X_n = 0.02$ p.u.

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G_2 : 200 MVA, 24 kV, $X_1 = X_2 = 0.25$ p.u., $X_0 = 0.08$ p.u.

หม้อแปลงไฟฟ้า T_1 : 200 MVA, 13.8Y/24 Δ kV, $X_1 = X_2 = 0.4$ p.u., $X_0 = 0.8$ p.u.

หม้อแปลงไฟฟ้า T_2 : 200MVA, 13.8 Y/24 Δ kV, $X_1 = X_2 = 0.5$ p.u., $X_0 = 1$ p.u.

สายส่ง L_1 : $X_1 = X_2 = 0.2$ p.u., $X_0 = 0.4$ p.u.

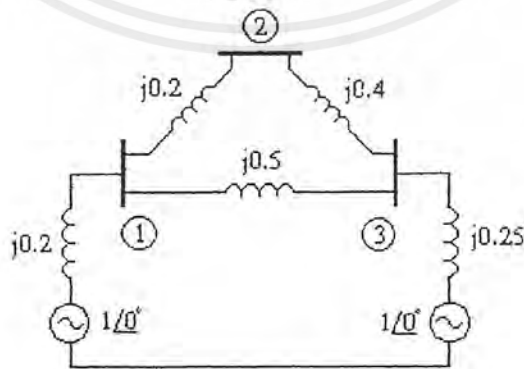


รูปที่ 7.31 ระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างที่ 4

คำนวณหาฟลตที่แบบ เฟส-เฟส-ดิน (Double Line-to-Ground) ที่เฟส B-C เกิดที่บัส 2 กำหนดเบสที่ 200 MVA, 24 kV และแรงดันที่บัส 2 ก่อนเกิดฟลตที่เป็น $1\angle 0^\circ$ p.u.

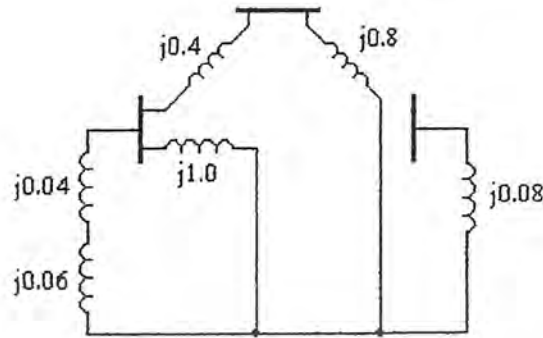
วิธีทำ

นำมาเขียนเน็ตเวิร์คชวท และศูนย์ ดังรูป



รูปที่ 7.32 เน็ตเวิร์คชวทและลบของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.33 เน็ตเวิร์คศูนย์ของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4

หาบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์จากทั้งสามเน็ตเวิร์คได้เป็น

$$Z_{bus}^{(1)} = Z_{bus}^{(2)} = \begin{bmatrix} j0.1447 & j0.1195 & j0.0692 \\ j0.1195 & j0.2465 & j0.1006 \\ j0.0692 & j0.1006 & j0.1635 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$Z_{bus}^{(0)} = \begin{bmatrix} j0.0845 & j0.0563 & j0 \\ j0.0563 & j0.3042 & j0 \\ j0 & j0 & j0.08 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

กระแสลำดับต่าง ๆ ที่จุดเกิดฟอลต์ บัส 2

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{(Z_2 + Z_0)E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \\ &= \frac{(j0.2465 + j0.3042)1}{(j0.2465 \times j0.2465) + (j0.2465 \times j0.3042) + (j0.3042 \times j0.2465)} \\ &= \frac{j0.55}{-0.211} = -j2.61 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{-Z_0 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \\ &= \frac{-(j0.3042)1}{(j0.2465 \times j0.2465) + (j0.2465 \times j0.3042) + (j0.3042 \times j0.2465)} \\ &= \frac{-j0.3042}{-0.211} = j1.44 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_0 = \frac{-Z_2 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} = \frac{-j0.2465}{-0.211} = j1.17 \text{ p.u.}$$

กระแสฟอลท์แต่ละเฟสที่จุดเกิดฟอลท์

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = j1.17 - j2.61 + j1.44 = 0$$

$$\begin{aligned} I_b &= I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \\ &= j1.17 + (-0.5 - j0.866)(-j2.61) + (-0.5 + j0.866)j1.44 \\ &= j1.17 + j1.3 - 2.26 - j0.72 - 1.25 \\ &= -3.51 + j1.75 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c &= I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \\ &= j1.17 + (-0.5 + j0.866)(-j2.61) + (-0.5 - j0.866)j1.44 \\ &= j1.17 + j1.3 + 2.26 - j0.72 + 1.25 \\ &= 3.51 + j1.75 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

แรงดันลำดับต่าง ๆ ที่จุดฟอลท์บัส 2

$$V_0 = V_1 = V_2 = \frac{Z_2 Z_0 E}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} = \frac{(j0.2465 \times j0.3042)1}{-0.211} = 0.355 \text{ p.u.}$$

แรงดันเฟสที่จุดเกิดฟอลท์

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 1.065 \text{ p.u.}$$

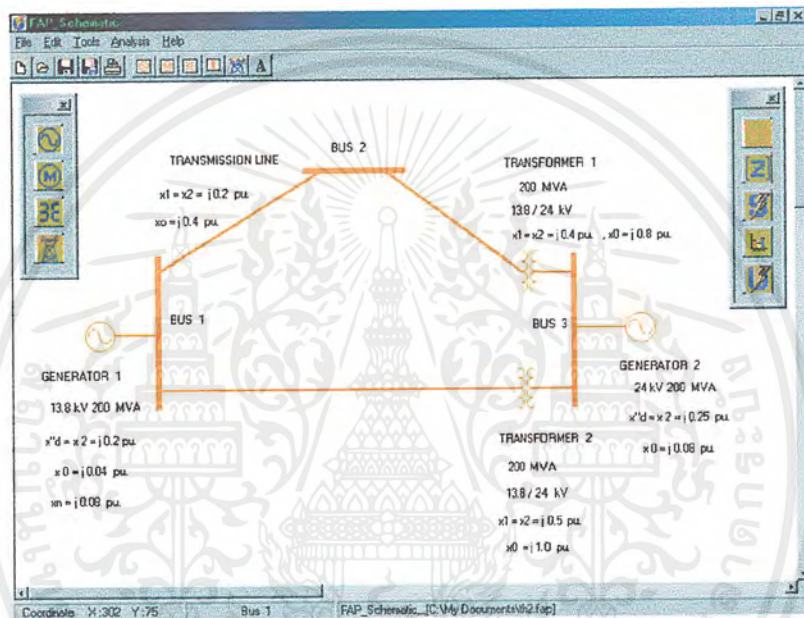
$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = 0$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม

เข้าสู่โปรแกรม สร้างระบบไฟฟ้าตามข้อมูลระบบไฟฟ้าของตัวอย่างที่ 4 ดังรูปที่ 7.34



รูปที่ 7.34 สร้างระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4

กำหนดเบสของระบบไฟฟ้างดังรูปที่ 7.35

รูปที่ 7.35 เบสของระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เน็ตเวิร์คบวก เน็ตเวิร์คลบ และเน็ตเวิร์คศูนย์ (Z_1 , Z_2 , Z_0) ได้เป็นค่าเปอร์ยูนิต ดังรูปที่ 7.36 , 7.37 และ 7.38 ตามลำดับ

Zbus ₁ [p.u.]	1	2	3
1	0.00000+j0.14465	0.00000+j0.11950	0.00000+j0.06918
2	0.00000+j0.11950	0.00000+j0.24654	0.00000+j0.10063
3	0.00000+j0.06918	0.00000+j0.10063	0.00000+j0.16352

รูปที่ 7.36 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับบวกตัวอย่างที่ 4

Zbus ₂ [p.u.]	1	2	3
1	0.00000+j0.14465	0.00000+j0.11950	0.00000+j0.06918
2	0.00000+j0.11950	0.00000+j0.24654	0.00000+j0.10063
3	0.00000+j0.06918	0.00000+j0.10063	0.00000+j0.16352

รูปที่ 7.37 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับลบของตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZERO SEQUENCE BUS IMPEDANCE MATRIX

Make Positive Negative Zero PRINT CLOSE

Zbus,0(I,J)	1	2	3
1	0.00000+j0.09451	0.00000+j0.05634	0.00000+j0.00000
2	0.00000+j0.05634	0.00000+j0.30423	0.00000+j0.00000
3	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.00000	0.00000+j0.08000

รูปที่ 7.38 ผลการคำนวณบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ลำดับศูนย์ของตัวอย่างที่ 4
คำนวณค่าฟอลต์ เฟส-เฟส-ดิน ที่บัส 2 ได้ค่าดังรูปที่ 7.39

FAULT AT BUS 2

Faults Condition

Phase to phase to earth fault

phase B to phase C to Earth Fault

Fault through impedance Zf: 0.000000 + j 0.000000 Zf unit: pu (selected) / ohm

Prefault Voltage: 1.00000 + j 0.000000 pu

system unit: pu (selected) / actual

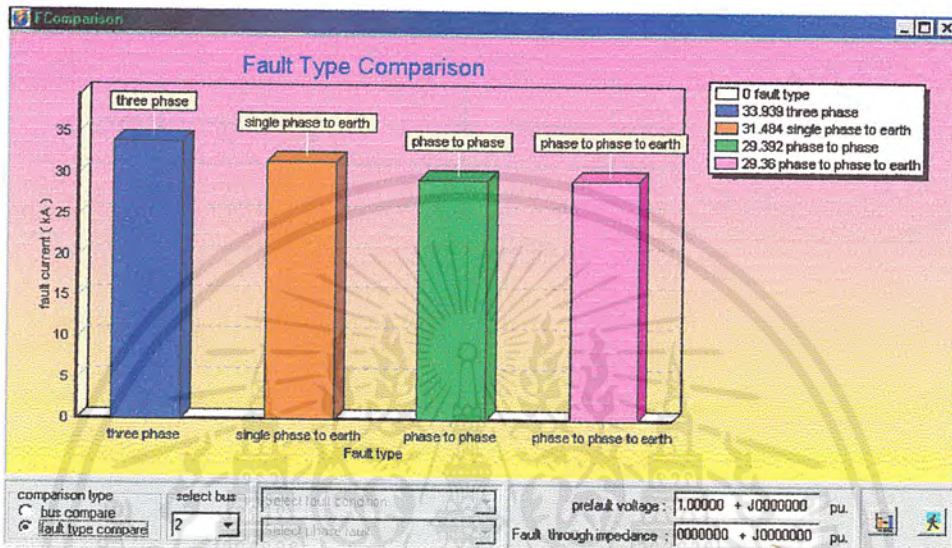
Result	Current (I)	Voltage (V)
positive component	0.00000-j2.61296	0.35582+j0.00000
negative component	0.00000+j1.44326	0.35582+j0.00000
zero component	0.00000+j1.16360	0.35582+j0.00000
phase a	0.00000+j0.00000	1.06747+j0.00000
phase b	-3.51271+j1.75440	0.00000-j0.00000
phase c	3.51271+j1.75440	0.00000+j0.00000

CAL PRINT CLOSE

รูปที่ 7.39 ผลการคำนวณฟอลต์ที่บัส 2 ในตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟอลต์ พิจารณาความรุนแรงของฟอลต์แบบต่าง ๆ ที่เกิดที่ บัส 2 ให้เห็นชัดเจนขึ้น ซึ่งแสดงเป็นค่าจริงดังรูปที่ 7.40



รูปที่ 7.40 โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟอลต์ที่บัส 2 ในแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 5

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบของระบบไฟฟ้า สำหรับใช้จำลองเหตุการณ์การเกิดฟอลต์ที่บัสต่างๆ ตามรูปที่ 7.41 มีข้อมูลรายละเอียดแสดงในตารางที่ 7.5 [7]



รูปที่ 7.41 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง ในตัวอย่างที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

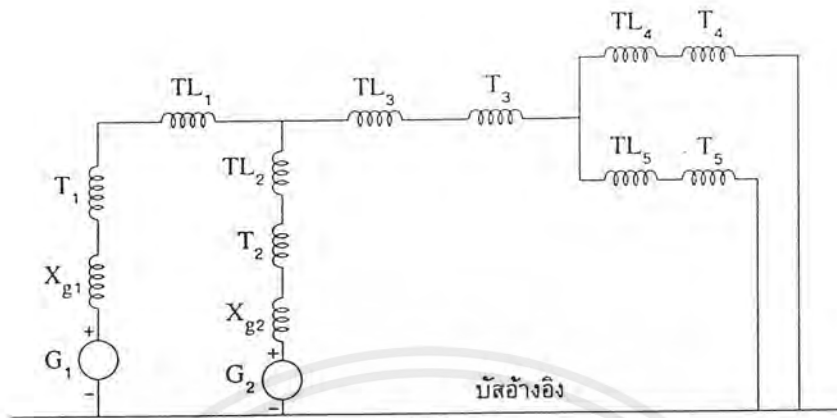
รายการข้อมูล	อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต			
	R_1	X_1	R_0	X_0
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G_1	0.0000	0.1060	0.0000	0.0556
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G_2	0.0000	0.1613	0.0000	0.1383
3. หม้อแปลงกำลัง T_1 (13.8 Δ / 230 Y kV)	0.0000	0.0383	0.0000	0.0383
4. หม้อแปลงกำลัง T_2 (13.8 Δ / 230 Y kV)	0.0000	0.1383	0.0000	0.1383
5. หม้อแปลงกำลัง T_3 (230 Y / 115 Y kV)	0.0004	0.0400	0.0000	0.0400
6. หม้อแปลงกำลัง T_4 (115 Δ / 24 Y kV)	0.0000	0.3162	0.0000	0.3162
7. หม้อแปลงกำลัง T_5 (115 Δ / 24 Y kV)	0.0000	0.3162	0.0000	0.3162
8. สายส่ง 230 kV TL_1	0.0008	0.0072	0.0129	0.0560
9. สายส่ง 230 kV TL_2	0.0028	0.0289	0.0480	0.2038
10. สายส่ง 230 kV TL_3	0.0003	0.0036	0.0057	0.0241
11. สายส่ง 115 kV TL_4	0.0009	0.0053	0.0168	0.0473
12. สายส่ง 115 kV TL_5	0.0046	0.0299	0.0345	0.1599

ตารางที่ 7.5 ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับรูปที่ 7.41

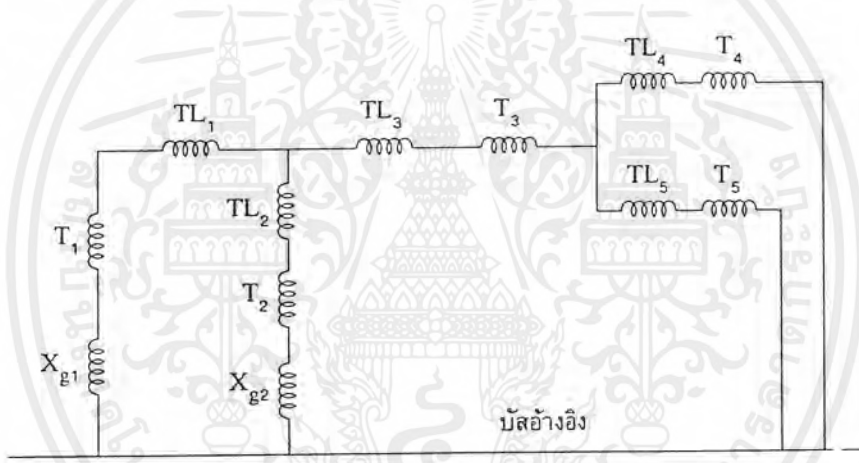
เมื่อเกิดฟอลต์แบบสมมาตรสามเฟส หรือฟอลต์แบบไม่สมมาตร ระหว่างไลน์กับดิน ที่บัสต่าง ๆ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

เขียนลำดับของวงจรไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าเป็นวงจรไฟฟ้าลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ได้ดังรูปที่ 7.42

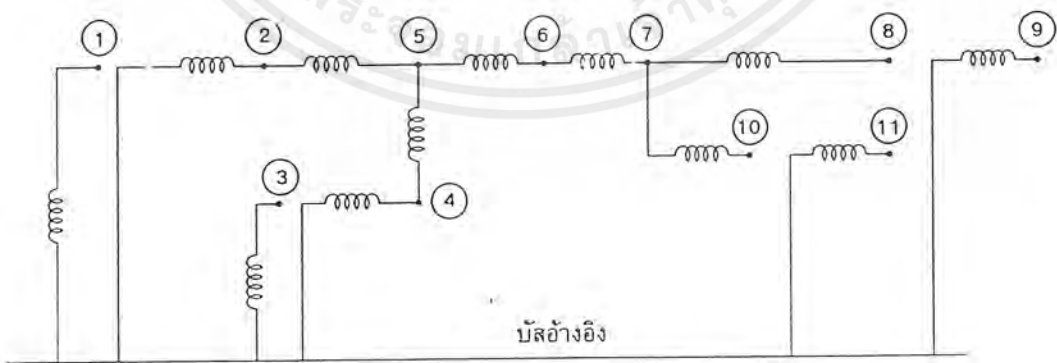
กำหนดเบสของระบบที่ 100 MVA



(ก) วงจรไฟฟ้าลำดับบวก



(ข) วงจรไฟฟ้าลำดับลบ



(ค) วงจรไฟฟ้าลำดับศูนย์

รูปที่ 7.42 ลำดับของวงจรไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 7.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณเมื่อเกิดสามเฟสฟอลท์หรือฟอลท์ระหว่างไลน์กับดินที่บัสต่าง ๆ มีค่าดังตารางที่ 7.6 ดังนี้

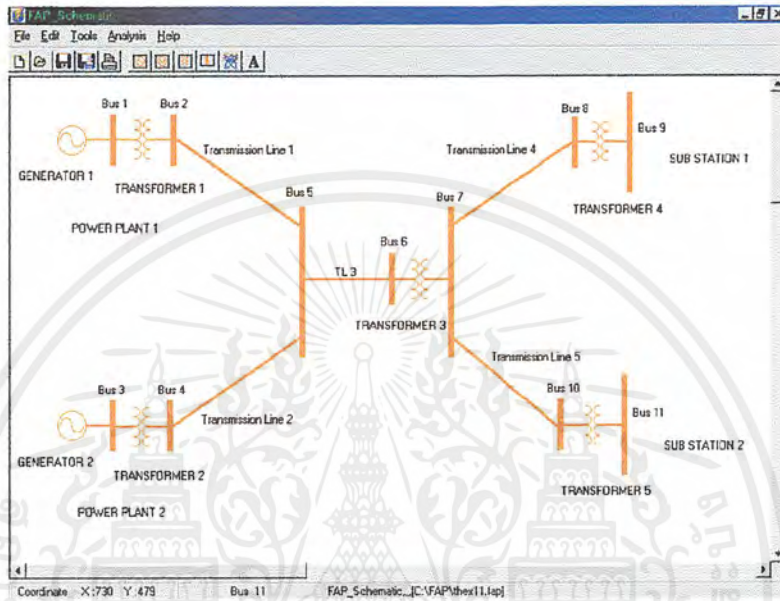
ฟอลท์ที่บัส	สามเฟสฟอลท์	ฟอลท์ระหว่างไลน์กับดิน
บัส 1	50.654	56.847
บัส 2	2.4872	3.18
บัส 3	39.0631	35.606
บัส 4	2.2289	2.3717
บัส 5	2.421	2.678
บัส 6	2.3397	2.4076
บัส 7	3.4085	3.4809
บัส 8	3.2899	3.0638
บัส 9	5.1316	5.756
บัส 10	2.8318	2.2996
บัส 11	4.875	5.5384

ตารางที่ 7.6 แสดงผลของฟอลท์ที่บัสต่าง ๆ โดยเกิดฟอลท์สามเฟสและฟอลท์ระหว่างไลน์กับดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบ การคำนวณโดยใช้โปรแกรม

เข้าสู่โปรแกรมและทำการสร้างระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 7.43 โดยใช้ข้อมูลของระบบไฟฟ้าในตารางที่ 7.5



รูปที่ 7.43 สร้างระบบไฟฟ้าจากตารางข้อมูลในตัวอย่างที่ 5

กำหนดเบสให้กับระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 7.44

รูปที่ 7.44 เบสของระบบไฟฟ้าตัวอย่างที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์เป็นเปอร์ยูนิต ดังรูปที่ 7.45

Sequence Bus Impedance Matrix

POSITIVE SEQUENCE BUS IMPEDANCE MATRIX

Make Positive Negative Zero PRINT CLOSE

Zbus ₁ [i,j]	1	2	3	4	5
1	0.00018+j0.08259	0.00024+j0.07414	0.00027+j0.03562	0.00050+j0.06616	0.00007+j0.07254
2	0.00024+j0.07414	0.00033+j0.10092	0.00036+j0.04849	0.00068+j0.09006	0.00010+j0.09876
3	0.00027+j0.03562	0.00036+j0.04849	0.00041+j0.10710	0.00076+j0.06063	0.00011+j0.05091
4	0.00050+j0.06616	0.00068+j0.09006	0.00076+j0.06063	0.00140+j0.11261	0.00021+j0.09456
5	0.00007+j0.07254	0.00010+j0.09876	0.00011+j0.05091	0.00021+j0.09456	0.00065+j0.10368
6	0.00007+j0.07254	0.00010+j0.09876	0.00011+j0.05091	0.00021+j0.09456	0.00065+j0.10368
7	0.00007+j0.07254	0.00010+j0.09876	0.00011+j0.05091	0.00021+j0.09456	0.00065+j0.10368
8	0.00007+j0.07254	0.00010+j0.09876	0.00011+j0.05091	0.00021+j0.09456	0.00065+j0.10368
9	0.00007+j0.07254	0.00010+j0.09876	0.00011+j0.05091	0.00021+j0.09456	0.00065+j0.10368

รูปที่ 7.45 คำนวณหาค่าบัสอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ของระบบในตัวอย่างที่ 5
คำนวณหาค่าฟอลท์ที่บัสต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.46 และ 7.47

Symmetrical Fault

Symmetrical Fault at Bus: 1

Insert pre-fault voltage: 13.8000 + J0.000000 KV
Fault through impedance: 0.000000 + J0.000000
-Z1 unit: pu (selected), ohm.
system unit: pu, actual

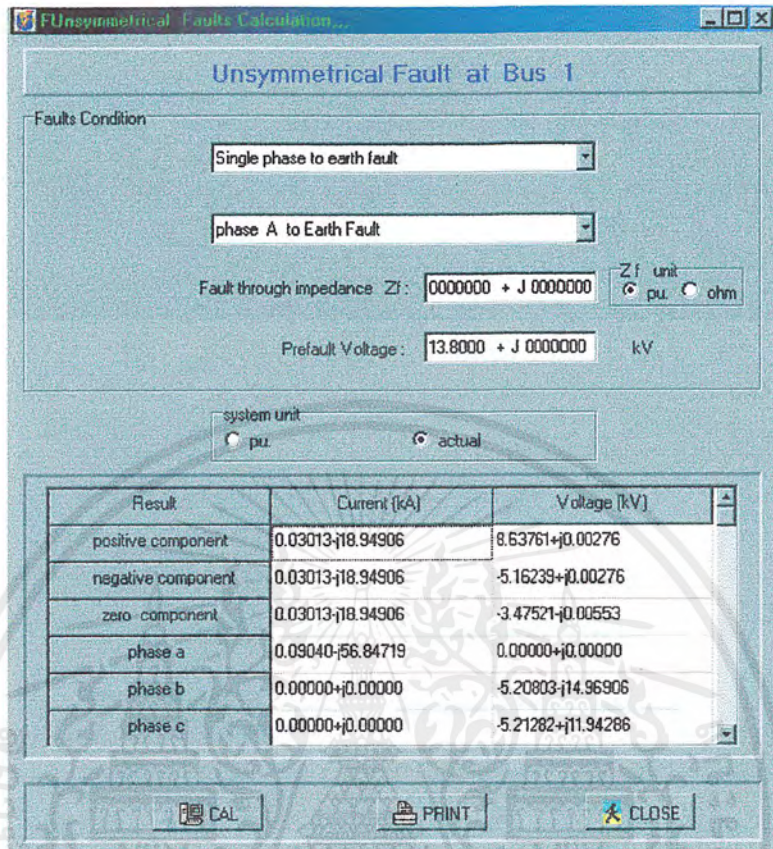
Fault Current = 0.1076661902 -j 50.6541661774 kA

Bus [i] \ Result	Delta Voltage [kV]	Bus Voltage [kV]
Bus [1]	-13.8000000 +j 0.0000000	0.0000000 +j 0.0000000
Bus [2]	-206.4487062 +j 0.2266969	23.5512938 +j 0.2266969
Bus [3]	-5.9511598 -j 0.0572839	7.8488402 -j 0.0572839
Bus [4]	-184.2289199 -j 1.7733265	45.7710901 -j 1.7733265
Bus [5]	-202.0165737 -j 0.2226194	27.9834263 -j 0.2226194
Bus [6]	-202.0165737 -j 0.2226194	27.9834263 -j 0.2226194
Bus [7]	-101.0082669 -j 0.1113097	13.9917131 -j 0.1113097

CAL LV PRINT CLOSE

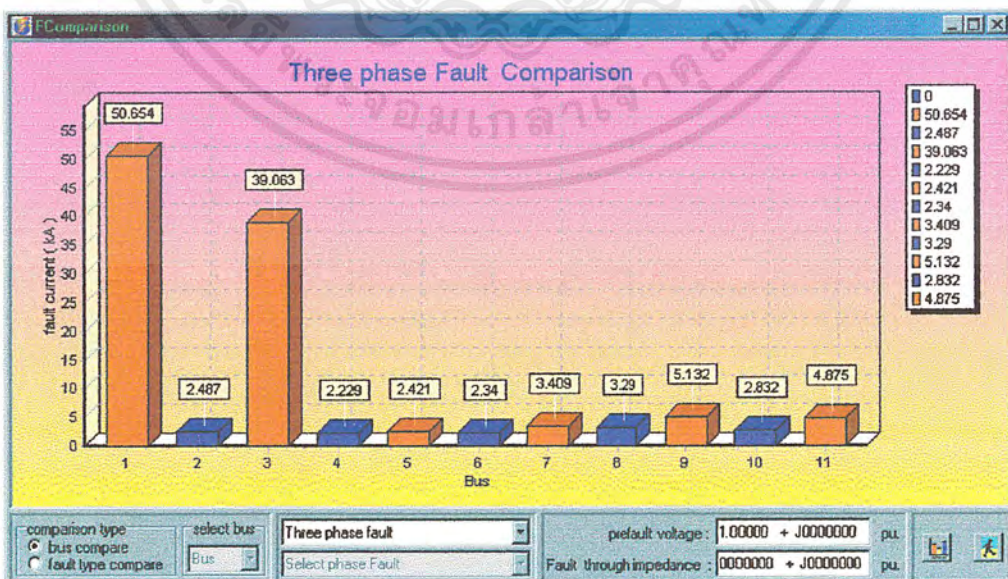
รูปที่ 7.46 ผลของฟอลท์สามเฟสที่บัส 1 ในตัวอย่างที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



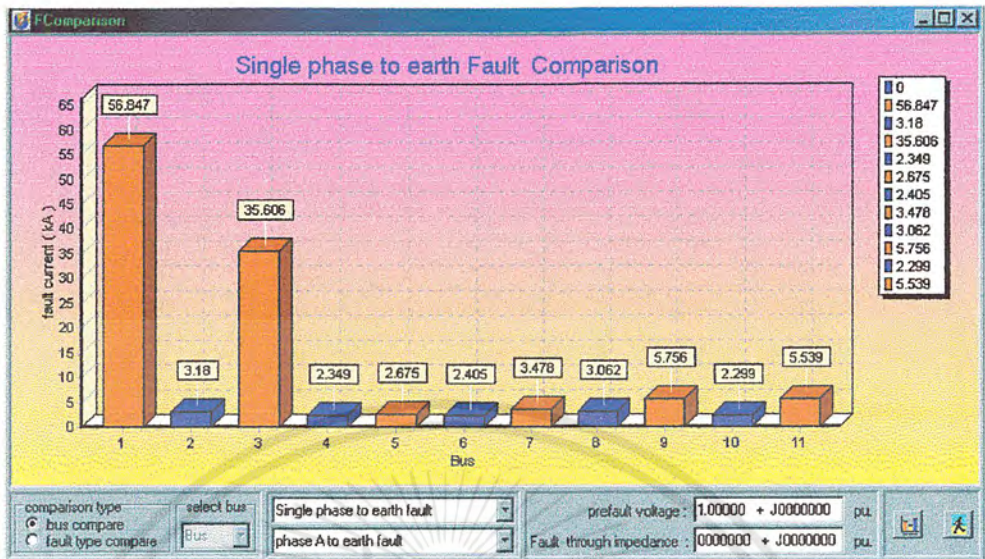
รูปที่ 7.47 ผลของฟอลต์ไลน์-ลงดินที่บัส 1 ในตัวอย่างที่ 5

ใช้โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟอลต์สามเฟสและฟอลต์ไลน์-ลงดินพิจารณาที่บัสต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7.48 และ 7.49

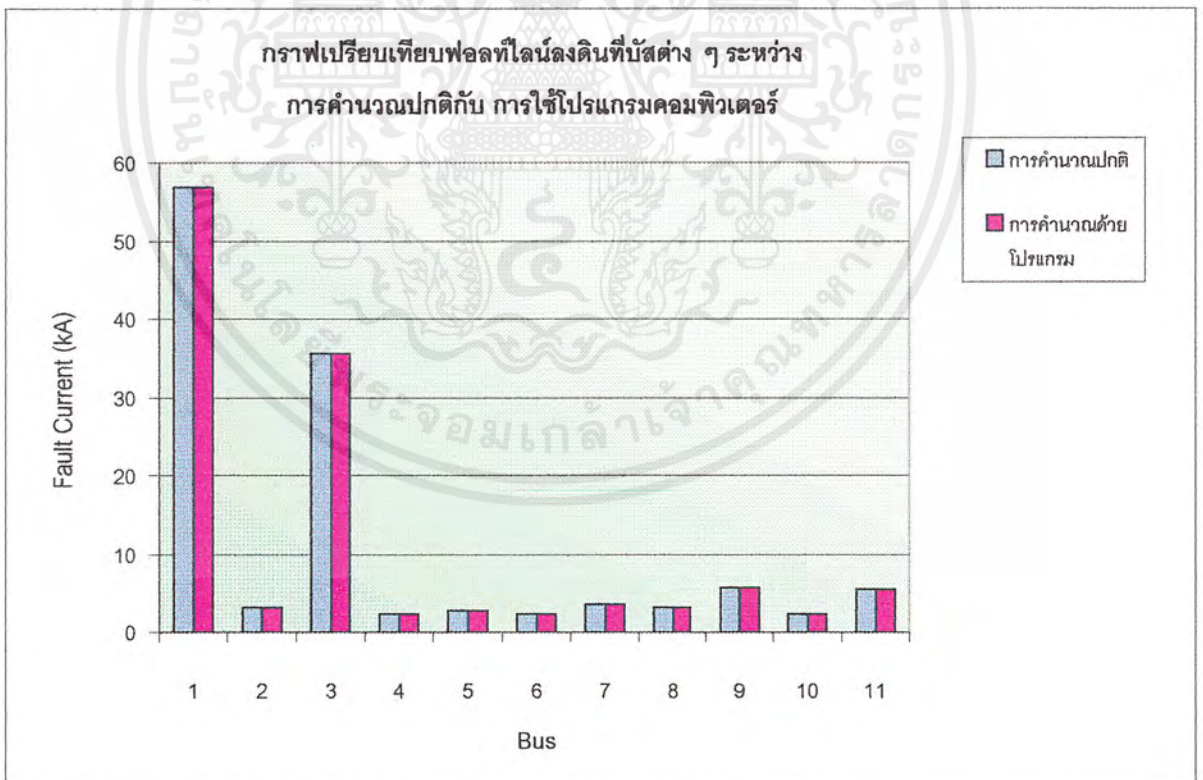


รูปที่ 7.48 โปรแกรมเปรียบเทียบฟอลต์สามเฟสที่แต่ละบัส ในตัวอย่างที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.49 โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฟอลท์ไลน์ลงดินที่บัสต่างๆ ในตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 7.50 เปรียบเทียบการคำนวณปกติกับการใช้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8 สรุปลงและวิจารณ์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

8.1 สรุปผลการใช้งานโปรแกรม

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น กระทำโดยการพิจารณาว่าฟอลต์เกิดที่จุดใดของระบบ และเริ่มคำนวณหาบัสโวลต์และกระแสเมตริกซ์จากการหาบัสโวลต์และกระแสเมตริกซ์ด้วยวิธีการเพิ่ม โครงข่ายของระบบไฟฟ้าเข้าไปทีละอุปกรณ์เพื่อฟอร์ม Z_{BUS} (add branch – add link) ซึ่งสะดวกเมื่อใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ โดยมีการคำนวณที่แยกเป็นเน็ตเวิร์คบวกลบ และศูนย์ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณฟอลต์ได้ทุก ๆ กรณี ที่เดิม โปรแกรมวิเคราะห์ฟอลต์รูปแบบนี้จะสามารถคำนวณได้เพียงฟอลต์แบบสมมาตร แต่ในโปรแกรมนี้สามารถคำนวณได้ทั้งแบบสมมาตรและฟอลต์แบบสมมาตรในลักษณะต่าง ๆ ได้ ซึ่งถือเป็นการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ ซึ่งวิธีการคำนวณฟอลต์ไม่สมมาตรค่อนข้างยากในการนำมาใช้เพื่อเขียน โปรแกรม แต่หลังจากใช้เวลาศึกษาและทดลองเขียน โปรแกรมจนสามารถคำนวณฟอลต์แบบต่าง ๆ ได้ แล้วนำ โปรแกรมมาใช้งาน โดยคำนวณหาผลลัพธ์ของฟอลต์แต่ละแบบที่ต้องการได้ ซึ่งถือว่าการคำนวณได้รวดเร็วและทำให้การวิเคราะห์ฟอลต์ง่ายขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้เมื่ออ้างอิงกับการคำนวณแบบปกตินั้นถูกต้องทุกประการหรือถือว่าใกล้เคียงมาก โปรแกรมวิเคราะห์ฟอลต์นี้จึงสามารถนำไปใช้งานได้ถูกต้องและรวดเร็วกว่าการคำนวณตามปกติ และยังสามารถนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกันเพื่อวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วย

8.2 วิจารณ์ผลการทำงานของโปรแกรม

จากการทำงานโดยทั่วไปของ โปรแกรมนี้ถือว่าอยู่เกณฑ์ที่ใช้งานได้ดี แต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดอยู่บ้างในส่วนของกราฟิก เนื่องจากการนำกราฟิกเข้ามาประยุกต์ ใช้งานในโปรแกรมทางด้าน การคำนวณซึ่งในโปรแกรมนี้ ได้นำการคำนวณบัสโวลต์และกระแสเมตริกซ์ โดยการนำอุปกรณ์มาวางในวินโดว์หรือฟอร์มที่ใช้ในการสร้างระบบไฟฟ้า เพื่อนำบัสโวลต์และกระแสเมตริกซ์ไปใช้คำนวณเมื่อเกิดฟอลต์แต่ละแบบในโปรแกรมต่อไป ทำให้อาจมีการทำงานผิดพลาดของโปรแกรมในการคำนวณเนื่องมาจากการสร้างระบบไฟฟ้าโดยวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ต่อเชื่อมถึงกัน ทำให้โปรแกรมคำนวณไม่ได้หรือคำนวณผิดพลาดไปบ้าง ดังนั้นจึงต้องวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เชื่อมต่อถึงกัน โปรแกรมจึงจะทำงานได้สมบูรณ์ถูกต้อง และถือว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้ค่อนข้างสมบูรณ์เพราะสามารถ

คำนวณฟลตที่ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรได้ทุกแบบ ทั้งในระบบที่ใหญ่ ๆ และยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้นก็สามารถใช้งานได้ด้วย และโปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบ ผลของการเกิดฟลตที่จุดต่าง ๆ หรือแบบต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าหนึ่ง ๆ ได้ด้วย ซึ่งถ้าใช้ในการวิเคราะห์เพื่อการศึกษาหรือใช้งานจริงนั้นก็สมารถใช้งานได้ดีพอสมควร และเนื่องจากการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่สมบูรณ์จริง ๆ นั้นต้องใช้เวลาในการศึกษาค้นคว้า และสร้างโปรแกรมค่อนข้างมากโดยทีมวิศวกรที่มีความสามารถ แต่โปรแกรมสำเร็จรูปโดยทั่วไปที่ใช้งานได้ก็ดีก็ยังมีข้อผิดพลาดในตัวเองอยู่ดี ดังนั้น โปรแกรมในโครงการนี้ก็อาจมีจุดผิดพลาดทั้งที่พบและยังไม่พบอยู่บ้าง ซึ่งจำเป็นต้องมีการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A T Johns and MMT El-Kateb, “Developments in techniques for simulating faults in e.h.v. transmission system”, IEE, 1978.
- [2] Charles A. Gross. ,“Power System Analysis”, John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [3] Evan, “Symmetrical Component”, McGraw-Hill Ltd., 1970.
- [4] P.M. Anderson,“Analysis of Faulted Power Systems”, The Iowa State University Press/Ames, 1973.
- [5] Stagg and El-Abiad, “Computer Method in Power System Analysis”, McGraw-Hill, 1968.
- [6] Stevenson, William D. , “Element of Power System Analysis”, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. 1975.
- [7] IEEE. Recommended Practice for Power System Analysis. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1990.
- [8] โสศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง”, กรุงเทพมหานคร, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2540.
- [9] จำนวน ห่อเกียรติ, “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2528

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีอุปการคุณทุกๆท่าน
โครงการนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากมิได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำ
และข้อมูลอันเป็นประโยชน์จากผู้ทรงคุณวุฒิ ดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์
2. รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล
3. อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว
4. อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว

และกำลังใจจาก พี่ธีรวัฒน์ น้องนัฐพร น้องศิริศักดิ์ และน้องๆ เพื่อนๆทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ฟอลต์และออกแบบอุปกรณ์ป้องกันโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
**FAULTS ANALYSIS AND PROTECTIVE DEVICE DESIGN
BY COMPUTER PROGRAM**

โดย



นายชนชนะ สรรพศรี
7/38 ม.1 ต.สุรนารี อ.เมือง
จ.นครราชสีมา 30000
โทร (044) 214-231



นายณรงค์ มหัจฉริยวงศ์
30/24 ม.4 ต.ปากนคร อ.เมือง
จ.นครศรีธรรมราช 80000
โทร (075) 347-041



นายวีระศักดิ์ แก้วโกตา
769 ม.6 ต.ลาดยาว อ.ลาดยาว
จ.นครสวรรค์ 60150
โทร (056) 271-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้