สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบสายจำหน่ายโดยวิเคราะห์จากแรงดันตกชั่วขณะ

FAULT LOCATION DETECTION OF DISTRIBUTION FEEDER USING VOLTAGE SAG ANALYSIS

โดย

นาย ยอดลักษณ์ แซ่ตุ้ง

นาย ธีรยุทธ อุ่นเรือน

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 62478

วัน,เดือน,ปี 18 ส.ค. 2549

.b 11629797

.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบสายจำหน่ายโดยวิเคราะห์จากแรงดันตกชั่วขณะ

FAULT LOCATION DETECTION OF DISTRIBUTION FEEDER USING VOLTAGE SAG ANALYSIS

โดย

นาย ยอดลักษณ์ แซ่ดุ้ง

นาย ธีรยุทธ อุ่นเรือน

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบสายจำหน่ายโดยวิเคราะห์จาก
แรงดันตกชั่วขณะ

ผู้จัดทำ

1. นาย ยอดลักษณ์ แช่ตุ้ง 46015109
2. นาย ธีรยุทธ อุ่นเรือน 46015142

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาตราจารย์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบสายจำหน่ายโดยวิเคราะห์จากแรงดันตกชั่วขณะ

นาย ยอดลักษณ์ แซ่ดุ้ง
นาย ธีรยุทธ อุ่นเรือน
รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบสายจำหน่ายโดยวิเคราะห์จากแรงดันตกชั่วขณะ โดยอาศัยหลักการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะในพื้นที่ข้างเคียง เมื่อระบบไฟฟ้าเกิดความผิดพร่องขึ้น ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะจะแปรผันตามตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องและชนิดของความผิดพร่อง โดยการใช้โปรแกรม PSCAD เวอร์ชั่น 4.1 ในการจำลองการเกิดความผิดพร่อง และทำการวัดค่าแรงดันตกชั่วขณะเพื่อนำไปใช้ในการหาสมการระบุตำแหน่งความผิดพร่อง และนำสมการระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่ได้ไปเขียนเป็นโปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0 เพื่อใช้คำนวณระยะทางหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง โปรแกรมที่ได้จัดสร้างจะแสดงตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องภายในแผนที่การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจหาตำแหน่งเจอ และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมา สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก และมีความถูกต้องสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FAULT LOCATION DETECTION OF DISTRIBUTION FEEDER USING VOLTAGE SAG ANALYSIS

Yodluck Saetung
Theerayuth Unraun
Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul Advisor
Norasage Pattanadech Advisor
2005

ABSTRACT

This project presents a fault location detection in distribution feeder in power system using voltage sag analysis by detecting the voltage sag analysis in the nearby areas. Whenever the fault occurs, the voltage sag will vary with fault position and fault type. This project used PSCAD program version 4.1 to simulate faults and measure the sag voltage to find an equation to locate the fault position. This equation was developed into a program named Fault Calculation Pro 1.0 to show the fault position in distribution feeder map that field operators can find the fault and solve the problem easier. This developed Fault Calculation Pro 1.0 is easy-to-use with high accuracy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จรุ่งไปด้วยดีก็เนื่องจากความสนับสนุนจากหลายๆ ท่าน อันได้แก่ รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาให้ความรู้และให้คำแนะนำที่สามารถนำมาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ได้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณพี่ๆ ที่การไฟฟ้านครหลวงที่ได้ให้ข้อมูลประกอบการทำปริญญานิพนธ์นี้ ซึ่งได้แก่ คุณเจษฎา แก้วลังกา หัวหน้าศูนย์ SCADA คุณชูเกียรติ ยั่งยืนบางชัน ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า คุณจุมภฏ หิมะเจริญ และคุณอนุชา หริรักษ์ ฝ่ายวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้านครหลวง รวมทั้ง พี่วัชรา นิลวานิช และรุ่นพี่ปริญญาโทหลายๆ ท่านที่ได้ให้คำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา คอยเป็นกำลังใจและช่วยผ่อนคลายความเครียดในการทำงาน

สุดท้ายนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ส่งเสียและเลี้ยงดูมาจนถึงทุกวันนี้ทำให้ผู้จัดทำสามารถทำปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

สารบัญรูป III

สารบัญตาราง IV

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 การจ่ายพลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 1

1.1.1 ระบบเรเดียลแบบธรรมดา 1

1.1.2 ระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมในสภาวะฉุกเฉิน 2

1.1.3 ระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมด้วยอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ 3

1.2 ความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย 4

1.2.1 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) 4

1.2.2 SAIDI (System Average Interruption Duration Index) 5

1.3 ความสำคัญของปัญหา 5

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 8

1.5 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย 8

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 9

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 10

บทที่ 2 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า 11

2.1 สาเหตุของการเกิดลัดวงจร 11

2.2 ประเภทของฟอลต์ 13

2.2.1 ฟอลต์แบบสมมาตร 13

2.2.2 ฟอลต์แบบไม่สมมาตร 14

2.3 การคำนวณกระแสฟอลต์ 17

2.3.1 ปริมาณไฟฟ้าเพอร์ยูนิต 17

2.3.2 ฟอลต์สมมาตร 19

2.3.3 องค์ประกอบสมมาตร 22

2.3.4 องค์ประกอบระบบไฟฟ้ากำลัง 26

2.3.5 สมการฟอลต์ 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 แรงดันตกชั่วขณะ....36
3.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ....36
3.1.1 การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า....36
3.1.2 การสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม....38
3.1.3 เกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นของเหตุการณ์ฟ้าผ่า....39
3.2 คุณลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ....39
3.2.1 ขนาด....39
3.2.2 ระยะเวลา....40
3.2.3 Phase-Angle Jump....40
3.3 การคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล....41
บทที่ 4 การออกแบบการจำลองการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า....52
4.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าที่จำลอง....52
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้า....53
4.3 การเลือกโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า....54
4.4 การจำลองการเกิดฟอลต์ด้วยโปรแกรม PSCAD....55
4.5 การจำลองการเกิดฟอลต์ด้วยโปรแกรม ATP....59
4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองระบบของ PSCAD กับ ATP และการคำนวณ....62
บทที่ 5 การคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์....63
5.1 ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault)....63
5.2 ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault)....69
5.3 ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (Phase to Phase Fault)....75
5.4 ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน (Phase to Phase to Ground Fault)....81
5.5 โปรแกรมคำนวณระยะทางที่เกิดความผิดพร่อง (Fault Calculation Pro 1.0)....87
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ....96
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. การใช้งานโปรแกรม PSCAD
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis)
ภาคผนวก ค. การใช้งานโปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0
กิตติกรรมประกาศ
เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนในอากาศด้วยระบบเรเดียลแบบธรรมดา	2
1.2	การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนในอากาศด้วยระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมในสภาวะฉุกเฉิน	2
1.3	การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนในอากาศด้วยระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมด้วยอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ	3
2.1	Connection Diagram ของฟอลต์สามเฟส	14
2.2	Connection Diagram ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน	15
2.3	Connection Diagram ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส	15
2.4	Connection Diagram ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน	16
2.5	วงจร RL Short Circuit	20
2.6	กราฟกระแสฟอลต์จากวงจร RL Short Circuit	21
2.7	องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์สามเฟสไม่สมดุล	23
2.8	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของตัวดำเนินการ a	23
2.9	(ก) วงจรข่ายลำดับบวก	26
2.9	(ข) วงจรข่ายลำดับลบ	26
2.9	(ค) วงจรข่ายลำดับศูนย์	27
2.10	วงจรข่ายลำดับของสายส่ง	28
2.11	การเกิดฟอลต์แบบสามเฟส	29
2.12	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบสามเฟส	30
2.13	การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน	31
2.14	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน	31
2.15	การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส	33
2.16	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส	33
2.17	การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน	35
2.18	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน	35
3.1	การเกิดแรงดันดกชั่วขณะมีสาเหตุเกิดจากการลัดวงจรลงดินแบบหนึ่งเฟสทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 pu. ของแรงดันปกติ (80%Sag) ในช่วง 3 ไซเคิล	37
3.2	เวลาลำดับขั้นตอนการทำงานปิด-เปิดวงจรของอุปกรณ์รีโคลเซอร์	38
3.3	การเกิดแรงดันดกชั่วขณะจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่	38
3.4	รูปแบบของโวลท์เตจดิไวเดอร์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	แรงดันดกชั่วขณะแบบต่างๆ ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม	41
3.6	วงจรลำดับของวงจรในรูปที่ 3.4	43
3.7	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์สามเฟส ของวงจรในรูปที่ 3.4	45
3.8	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ของวงจรในรูปที่ 3.4	47
3.9	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ของวงจรในรูปที่ 3.4	49
3.10	วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน ของวงจรในรูปที่ 3.4	51
4.1	รูปแบบวงจรที่ใช้ในการจำลองระบบแบบเรเดียล	53
4.2	(ก) วงจรตัวอย่างที่ใช้จำลองระบบไฟฟ้า	55
4.2	(ข) วงจรที่สร้างโดยโปรแกรม SCAD ตามวงจรตัวอย่าง	56
4.3	(ก) แรงดัน ณ จุดที่เกิดฟอลต์ V4	57
4.3	(ข) แรงดันดกที่จุด PCC, V2	57
4.3	(ค) แรงดันดกที่สายป้อนหมายเลข 1, V1	58
4.3	(ง) แรงดันดกที่สายป้อนหมายเลข 3, V3	58
4.4	รูปแบบการจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP	59
4.5	แรงดันที่ Source, จุด S	59
4.6	(ก) แรงที่จุดเกิดฟอลต์, จุด F	60
4.6	(ข) แรงดันที่จุด pcc, จุด X	60
4.6	(ค) แรงดันที่สายป้อน ACS 19 km, จุด Y	61
4.6	(ง) แรงดันที่สายป้อน ACS 23 km, จุด Z	61
5.1	(ก) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส x_{crit}	67
5.1	(ข) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส $New\ x_{crit}$	67
5.1	(ค) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$	67
5.2	(ก) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส x_{crit}	68
5.2	(ข) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส $New\ x_{crit}$	68
5.2	(ค) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$	68
5.3	(ก) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน x_{crit}	73
5.3	(ข) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน $New\ x_{crit}$	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.3 (ค) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$ 73

5.4 (ก) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน x_{crit} 74

5.4 (ข) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน $New\ x_{crit}$ 74

5.4 (ค) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$ 74

5.5 (ก) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส x_{crit} 79

5.5 (ข) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส $New\ x_{crit}$ 79

5.5 (ค) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$ 79

5.6 (ก) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส x_{crit} 80

5.6 (ข) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส $New\ x_{crit}$ 80

5.6 (ค) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$ 80

5.7 (ก) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน x_{crit} 85

5.7 (ข) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน $New\ x_{crit}$ 85

5.7 (ค) ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$ 85

5.8 (ก) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน x_{crit} 86

5.8 (ข) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน $New\ x_{crit}$ 86

5.8 (ค) %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$ 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.9 (ก) กราฟเปรียบเทียบผลต่างระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟส 89

5.9 (ข) กราฟเปรียบเทียบ %Error ระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟส 89

5.10 (ก) กราฟเปรียบเทียบผลต่างระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน 91

5.10 (ข) กราฟเปรียบเทียบ %Error ระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน 91

5.11 (ก) กราฟเปรียบเทียบผลต่างระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส 93

5.11 (ข) กราฟเปรียบเทียบ %Error ระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส 93

5.12 (ก) กราฟเปรียบเทียบผลต่างระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน 95

5.12 (ข) กราฟเปรียบเทียบ %Error ระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน 95

6.1 สายป้อนหนึ่งชุดประกอบด้วยสายตัวนำสองชนิด 97

6.2 สายป้อนหนึ่งชุดมีแท็บแยกไปยังสายป้อนย่อย 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 รายงานเหตุการณ์ที่สำคัญประจำวันในเดือน เมษายน พ.ศ. 2548 ของการไฟฟ้านครหลวง เขตมีนบุรี 6

1.2 ขั้นตอนการดำเนินงานที่วางแผนกับการปฏิบัติงานจริง 9

2.1 ความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติในระบบไฟฟ้า 12

2.2 ความถี่โดยประมาณของการเกิดฟอลต์แต่ละชนิดบนสายส่งในอากาศ 16

4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองระบบ 53

4.2 การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองระบบ 54

4.3 เปรียบเทียบขนาดแรงดันตกชั่วขณะจากการคำนวณกับโปรแกรม 62

5.1 x_{crit} ของฟอลต์สามเฟส 65

5.2 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟส 66

5.3 x_{crit} ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน 71

5.4 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน 72

5.5 x_{crit} ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส 77

5.6 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส 78

5.7 x_{crit} ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน 83

5.8 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน 84

5.9 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์สามเฟส 88

5.10 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน 90

5.11 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส 92

5.12 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน 94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นการจ่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial) ซึ่งระบบเรเดียลนี้มีความเชื่อถือได้ค่อนข้างต่ำดังรายละเอียดที่นำเสนอต่อไป โดยเป็นการแนะนำเรื่องการจ่ายไฟฟ้าในระบบเรเดียลแบบต่างๆ ของการไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย (Reliability in Distribution Systems) รวมทั้งที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์นี้ต่อไป

1.1 การจ่ายพลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย [1]

การจ่ายพลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะเริ่มที่สวิตช์เกียร์แรงดันปานกลางของสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วจ่ายไฟฟ้าออกไปด้วยสายป้อนหลักตามถนนและสายป้อนย่อยตามตรอกหรือซอย เพื่อจ่ายพลังไฟฟ้าให้กับโหลดโดยผ่านหม้อแปลงจำหน่ายและสายแรงต่ำ สำหรับสายป้อนหลักอาจเป็นสายในอากาศ (overhead lines) หรือสายเคเบิลใต้ดิน (underground cables) ก็ได้ โดยรูปแบบการจ่ายพลังไฟฟ้าของสายป้อนหลักที่เป็นสายในอากาศมีดังนี้

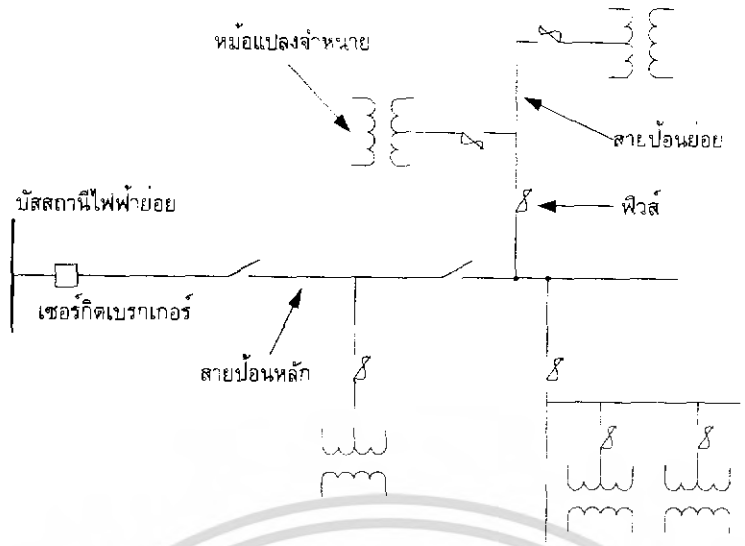
1. วงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (radial-type primary feeder)
2. วงจรสายป้อนหลักแบบลูป (loop-type primary feeder)
3. วงจรสายป้อนหลักแบบตาข่าย (network-type primary feeder)

สายป้อนหลักและสายป้อนย่อยจะจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบ 3 เฟส 3 สาย มีระดับแรงดัน 12 หรือ 24 kV สำหรับการไฟฟ้านครหลวง และ 22 หรือ 33 kV สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

วงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล เป็นการจัดรูปแบบที่ง่ายและมีราคาต่ำสุด ดังนั้นจึงเป็นรูปแบบของวงจรสายป้อนหลักที่ใช้กันโดยทั่วไป และสามารถจัดรูปแบบในการใช้งานได้ 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

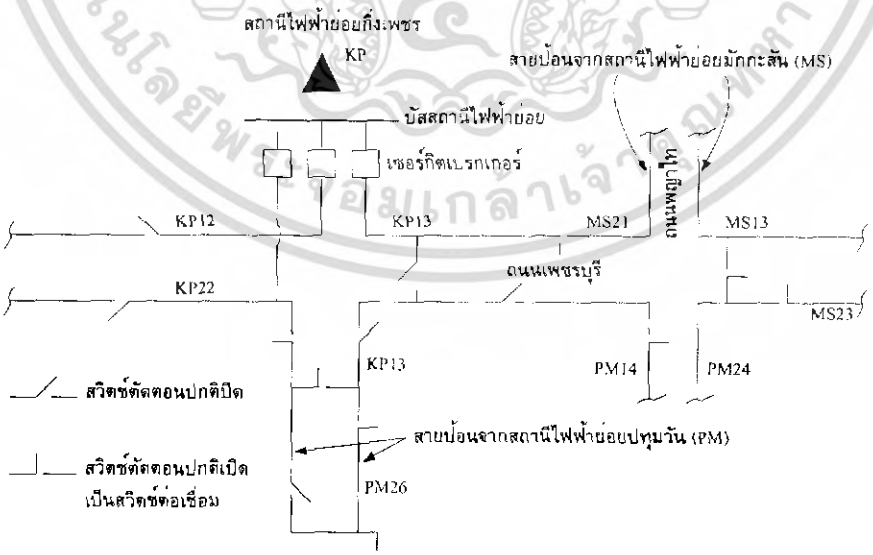
1.1.1 ระบบเรเดียลแบบธรรมดา (simple radial system) การจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบนี้สายป้อนจะออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อนำพลังไฟฟ้าไปจ่ายให้กับโหลด โดยสายป้อนวงจรนี้จะไม่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อนที่มาจากสถานีย่อยอื่น โดยปกติระบบเรเดียลแบบธรรมดาจะใช้สำหรับเป็นสายป้อนย่อยที่รับไฟฟ้าจากสายป้อนหลักเพื่อนำพลังไฟฟ้าไปจ่ายให้กับโหลดที่อยู่ตามตรอกหรือซอย ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ข้อเสียของการจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบเรเดียลแบบธรรมดาคือเมื่อเกิดความผิดพร่องที่สายป้อนใดจะทำให้ไฟฟ้าดับทั้งสายป้อนนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนในอากาศด้วยระบบเรเดียลแบบธรรมดา [1]

1.1.2 ระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมในสภาวะฉุกเฉิน (radial with emergency tie) ระบบนี้จะใช้กับวงจรสายป้อนหลักซึ่งมีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติเหมือนกับระบบเรเดียลแบบธรรมดา แต่ในสภาวะฉุกเฉิน เช่น เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของสายป้อนหลัก เราสามารถปลดสายป้อนส่วนที่มีปัญหาออกเพื่อทำการแก้ไข และให้สับสวิตช์ต่อเชื่อม (tie switch) เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าจากสายป้อนวงจรอื่นที่อยู่ข้างเคียงมาจ่ายแทน จึงทำให้ไฟฟ้าดับเฉพาะส่วนที่เกิดฟอลต์ แต่ส่วนอื่นๆ ของสายป้อนก็ยังคงจ่ายไฟฟ้าได้ และหลังจากแก้ไขส่วนที่เกิดฟอลต์เรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการเปลี่ยนการจ่ายไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะปกติต่อไป ตัวอย่างการจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมในสภาวะฉุกเฉินได้แสดงในรูปที่ 1.2

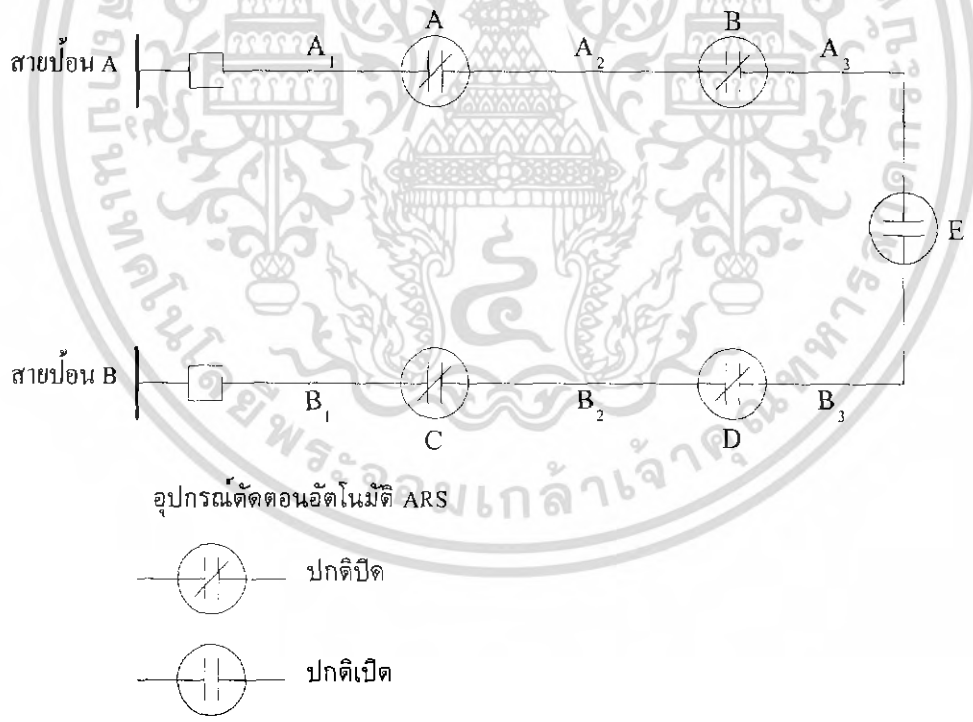


รูปที่ 1.2 การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนในอากาศด้วยระบบเรเดียล
แบบต่อเชื่อมในสภาวะฉุกเฉิน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.3 ระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมด้วยอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ (radial with automatic reclosing sectionalizer ; ARS) การจ่ายไฟฟ้ารูปแบบนี้เป็นการนำสายป้อนหลัก 2 วงจรมาจ่ายไฟฟ้าร่วมกันในสภาวะฉุกเฉิน โดยการแบ่งสายป้อนแต่ละวงจรออกเป็น 3 ส่วน (three sections) ในแต่ละส่วนจะติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ ARS แบบปกติปิด แต่ในส่วนปลายของสายป้อนทั้งสองจะต่อเชื่อมด้วยอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติแบบปกติเปิด ดังแสดงในรูปที่ 1.3

จากรูปที่ 1.3 การจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติสายป้อน A และ B มีการจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบเรเดียลแบบธรรมดา เพราะ ARS (E) ไม่ได้ต่อเชื่อมสายป้อนทั้งสองเข้าด้วยกัน เมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของสายป้อนใดสายป้อนหนึ่งเกิดฟอลต์ขึ้นก็จะมีการปลดส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบแล้วต่อเชื่อมให้อีกสายป้อนหนึ่งเข้ามาช่วยจ่ายไฟฟ้าแทนอย่างอัตโนมัติ จึงทำให้สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดในส่วนของสายป้อนที่ไม่เกิดฟอลต์ได้อย่างต่อเนื่อง เช่น ถ้าเกิดฟอลต์ที่สายป้อนส่วน A_2 จะทำให้มีการปลด ARS (A) และ ARS (B) เพื่อตัดสายป้อนส่วน A_2 ออก และสับสาย ARS (E) เพื่อให้สายป้อน B จ่ายไฟฟ้าในส่วนของ A_3 แทน สำหรับสายป้อน A ก็จะจ่ายไฟฟ้าเฉพาะส่วน A_1 เท่านั้น อย่างไรก็ตามถึงแม้จะไม่เกิดไฟฟ้าดับในสายป้อนส่วนที่เกิดฟอลต์ แต่ก็จะมีไฟกะพริบเกิดขึ้นในขณะที่ ARS ทำการปลดและสับ



รูปที่ 1.3 การจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนในอากาศด้วยระบบเรเดียลแบบต่อเชื่อมด้วยอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย (Reliability in Distribution Systems) *[2]*

การศึกษาในเรื่องการหาความเชื่อถือได้ในอดีตมักไม่ค่อยให้ความสำคัญในการหาค่านี้กับระบบจำหน่ายมากนักเมื่อเทียบกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเหตุผลก็คือในระบบผลิตนั้นใช้เงินลงทุนสูง และถ้าระบบไม่สามารถทำงานได้ ก็จะส่งผลกระทบกับผู้ใช้ไฟมากมาย และยังส่งผลกระทบให้กับสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ในขณะที่ระบบจำหน่ายมีราคาถูกและการขัดข้องในการจ่ายไฟก็มีผลกระทบกับผู้ใช้ไฟบริเวณเล็กๆ เท่านั้น

การหาค่าความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายควรได้รับการพิจารณาในหัวข้อเหล่านี้ด้วย ในการที่จะปรับปรุงวงจรไฟฟ้าโดยการเสริมอุปกรณ์บางอย่างเข้าไปในระบบนั้น ถึงแม้ว่าการลงทุนจะไม่แพงมากนัก แต่ถ้าใช้จำนวนมากก็ทำให้สิ้นเปลืองมากขึ้นได้เช่นกัน นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงความสมดุลของค่าความเชื่อถือได้กับระบบต่างๆ ด้วย เช่น ระบบผลิต ระบบส่งจ่าย และระบบจำหน่าย และสุดท้ายที่ควรคำนึงถึงคือ ควรมีทางเลือกหลายทางเพื่อให้วิศวกรระบบจำหน่าย ได้พิจารณาเพื่อให้ความเชื่อถือที่ยอมรับได้สำหรับผู้ใช้ไฟซึ่งรวมถึงการใช้วงจรที่มีการเสริมระบบให้ดีขึ้นแล้ว การเตรียมอะไหล่ของอุปกรณ์ต่างๆ การปรับปรุงนโยบายในการซ่อมบำรุง และการปรับปรุงนโยบายในการปฏิบัติงาน ซึ่งที่กล่าวถึงนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียในเชิงปริมาณ และจำเป็นต้องใช้ค่าเชิงตัวเลขของความเชื่อถือได้มาพิจารณานั่นเอง

1.2.1 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) ค่า SAIFI นี้เป็นค่าที่บอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งการเกิดไฟดับของผู้ใช้ไฟแต่ละรายในพื้นที่ที่กำหนด โดยมีนิยามคือ

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมดที่เกิดไฟดับ}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมดในพื้นที่ที่กำหนด}}$$

หรือ

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum N_i}{N_T} \qquad (1.1)$$

หน่วย คือ ครั้ง / ผู้ใช้ไฟ 1 ราย / เวลา (เดือน,ปี)

เมื่อ N_i คือ จำนวนผู้ใช้ไฟที่เกิดไฟดับในแต่ละเหตุการณ์ในช่วงระยะเวลาของการบันทึกค่ารายงาน

N_T คือ จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมดในพื้นที่ที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 SAIDI (System Average Interruption Duration Index) ค่า SADI นี้เป็นค่าเฉลี่ยช่วงเวลาการเกิดไฟดับของผู้ใช้ไฟแต่ละรายในพื้นที่ที่กำหนด โดยมีนิยาม คือ

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนช่วงเวลาที่เกิดไฟดับของผู้ใช้ไฟ}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมดในพื้นที่ที่กำหนด}}$$

หรือ

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum r_i N_i}{N_T} \qquad (1.2)$$

หน่วย คือ นาที / ผู้ใช้ไฟ 1 ราย / เวลา (เดือน,ปี)

เมื่อ r_i คือ เวลาที่ใช้ในการนำระบบไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้ดามปกติของการเกิดไฟดับแต่ละเหตุการณ์หรือช่วงเวลาที่เกิดไฟดับในแต่ละเหตุการณ์

1.3 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการแก้ปัญหาไฟฟ้าขัดข้องของการไฟฟ้านครหลวงมีความล่าช้าเนื่องจากเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในสายป้อนของระบบจำหน่ายนั้น อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้านครหลวงจะสามารถตรวจจับและรายงานให้ทราบว่าเกิดความผิดพร่องแบบใดและเกิดขึ้นในสายป้อนชุดใด แต่ไม่ทราบตำแหน่งหรือสถานที่ที่เกิดความผิดพร่อง ในการตรวจสอบหาตำแหน่งความผิดพร่องของการไฟฟ้านครหลวง จะทำโดยใช้เจ้าหน้าที่แก้ไฟฟ้าขัดข้องออกทำการตรวจสอบโดยทำการตรวจสอบชุดของสายป้อนที่ได้รับแจ้งว่าเกิดความผิดพร่องตั้งแต่ต้นทางไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพบจุดที่เกิดความผิดพร่องจึงทำการแก้ไข ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในการหาตำแหน่งความผิดพร่อง และในบางครั้งก็ไม่พบสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องดังในตารางที่ 1.1 จึงไม่สามารถแก้ไขได้ เพราะความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในบางครั้งอาจเป็นความผิดพร่องแบบชั่วคราว (Temporary fault) และจากการศึกษาพบว่าความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในสายป้อนส่วนมากจะเป็นความผิดพร่องแบบชั่วคราวชนิดการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน ที่เกิดจากลมพัดกิ่งไม้ไปกระทบกับสายไฟหรือเกิดจากสัตว์เลื้อยคลานไต่ขึ้นไปบนเสาไฟฟ้าซึ่งจะตรวจพบได้ยาก ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในสายป้อนของระบบจำหน่ายจะมีผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟ โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อเกิดความผิดพร่องทำให้ไฟฟ้าดับในชุดสายป้อนที่เกิดความผิดพร่องและยังส่งผลให้เกิดแรงดันดกชั่วขณะในสายป้อนข้างเคียงด้วย ซึ่งแรงดันดกชั่วขณะนั้นมีผลต่อเครื่องจักรหรืออุปกรณ์บางอย่างที่มีการตอบสนองไว ทำให้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์บางอย่างนั้นหยุดทำงาน กระบวนการผลิตต่างๆ ต้องหยุดชะงักลงส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมได้รับความเสียหาย ยิ่งเกิดความผิดพร่องบ่อยครั้งและเป็นเวลานานเท่าไรก็จะทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้นเท่านั้น สิ่งต่างๆ เหล่านี้ทำให้ดัชนี SAIFI และ SAIDI เพิ่มขึ้น และทำให้ความเชื่อถือได้ของการไฟฟ้านครหลวงลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 รายงานเหตุการณ์ที่สำคัญประจำวันในเดือน เมษายน พ.ศ. 2548 ของการไฟฟ้านครหลวง เขตมีนบุรี

วัน / เดือน / ปี	สวิตช์สายป้อนตก (สายป้อน)	ผลการตรวจสอบ	
		พบสาเหตุ (สายป้อน)	**ไม่พบสาเหตุ** (สายป้อน)
1 / เม.ย. / 2548	6	2	4
2 / เม.ย. / 2548	3	2	1
3 / เม.ย. / 2548	31	21	10
4 / เม.ย. / 2548	6	3	3
5 / เม.ย. / 2548	4	2	2
6 / เม.ย. / 2548	3	2	1
7 / เม.ย. / 2548	3	1	3
8 / เม.ย. / 2548	2	2	-
9 / เม.ย. / 2548	6	5	1
10 / เม.ย. / 2548	3	3	-
11 / เม.ย. / 2548	3	2	1
12 / เม.ย. / 2548	3	2	-
13 / เม.ย. / 2548	5	2	3
14 / เม.ย. / 2548	6	5	1
15 / เม.ย. / 2548	2	1	1
16 / เม.ย. / 2548	6	4	2
17 / เม.ย. / 2548	3	1	2
18 / เม.ย. / 2548	3	3	-
19 / เม.ย. / 2548	14	9	5
20 / เม.ย. / 2548	2	-	2
21 / เม.ย. / 2548	6	2	4
22 / เม.ย. / 2548	1	-	1
23 / เม.ย. / 2548	2	2	-
24 / เม.ย. / 2548	1	1	-
25 / เม.ย. / 2548	4	3	1
26 / เม.ย. / 2548	6	4	2
27 / เม.ย. / 2548	-	-	-
28 / เม.ย. / 2548	5	4	1
29 / เม.ย. / 2548	6	5	1
30 / เม.ย. / 2548	2	-	2
รวม	**147**	**93**	**54**

ที่มา รายงานเหตุการณ์ที่สำคัญประจำวัน ของนายช่างเวร แผนกบำรุงรักษาระบบจำหน่าย การไฟฟ้านครหลวงเขตมีนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีเครื่องมือหรือวิธีการในการระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ และเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับการไฟฟ้านครหลวง เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้ระบุตำแหน่งความผิดพร่องนั้นในปัจจุบันก็มีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้ทฤษฎีฟัซซี่กับเครื่องควบคุมแบบดรรกที่โปรแกรมได้ [3], โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) [4], [5], การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) [5] และรีเลย์แบบระยะทาง (Distance Relay) [6] เป็นต้น แต่ในปริญญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอแนวทางการระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบสายจำหน่ายโดยวิเคราะห์จากแรงดันตกชั่วขณะ [7] ซึ่งเป็นวิธีที่มีไว้รองรับเครื่องมือวัดในอนาคตที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถวัดขนาดของแรงดันตกชั่วขณะได้ แล้วนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง เพราะเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้าย่อมส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นในพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งขนาดของแรงดันตกชั่วขณะนั้นจะแปรผันกับชนิดของความผิดพร่อง และตำแหน่งหรือระยะทางที่เกิดความผิดพร่อง ในอนาคตหากการไฟฟ้านครหลวงมีเครื่องมือวัดที่สามารถวัดแรงดันตกชั่วขณะได้ ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบ GIS (Geographic Information System) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวงเพื่อระบุตำแหน่งความผิดพร่องได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะช่วยลดเวลาในการตรวจสอบสายป้อนทำให้สามารถแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องได้รวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาโปรแกรมการจำลองระบบทางด้าน Power system ที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์แรงดันดกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดพร่อง

2. เพื่อเป็นแนวทางในการนำค่าแรงดันดกชั่วขณะมาคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง

3. เพื่อรองรับเครื่องมือวัดในอนาคตที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถวัดขนาดของแรงดันดกชั่วขณะ

4. เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายแบบทิศทางเดียว (Radial System) และลดค่าดัชนี SAIFI และ SAIDI ของการไฟฟ้านครหลวง

1.5 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. เป็นการศึกษาการหาตำแหน่งของฟอลต์ในสายป้อน ระบบจำหน่าย 24 kV

2. ฟอลต์ที่ศึกษาเป็นฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจรเท่านั้น และให้ความสำคัญกับฟอลต์ระหว่างเฟส-ดินมากที่สุด เพราะฟอลต์ชนิดนี้เกิดขึ้นบ่อยมากและในบางครั้งจะหาสาเหตุไม่พบ

3. การจำลองระบบไฟฟ้า เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าแบบเรเดียลอย่างง่ายที่มีรูปแบบพื้นฐานของวงจรแบบโวลท์เดจดิไวเดอร์

4. เลือกศึกษาในกรณีที่ง่ายๆ เพื่อเป็นแนวทาง เช่น จำลองการเกิดฟอลต์แบบเฟส-ดิน โดยไม่คิดค่ากราวด์อิมพีแดนซ์ Z_G และการคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์จากขนาดของแรงดันดกชั่วขณะโดยไม่คิดมุมที่เปลี่ยนแปลงไป (Phase-Angle Jump)

5. ผลต่างของระยะทางที่คำนวณได้กับระยะทางที่ระบุในโปรแกรม PSCAD ต้องไม่เกิน 1 km

6. สร้างโปรแกรมต้นแบบในการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์จากค่าแรงดันดกชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการดำเนินงานที่วางแผนกับการปฏิบัติงานจริง

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2548						พ.ศ. 2549		
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและโครงงานในอดีตที่เกี่ยวข้อง									
2. ศึกษาและเลือกใช้โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า									
3. ศึกษาค้นคว้าหาสมการแรงดันตกชั่วขณะและสมการระบุตำแหน่งความผิดพร่อง									
4. ทดลองใช้โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับการคำนวณ									
5. สรุปผลจากการจำลองระบบและการคำนวณ									
6. ศึกษาค้นคว้าหาสมการระบุตำแหน่งความผิดพร่องเพิ่มเติม									
7. ศึกษาหาข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการไฟฟ้านครหลวง									
8. ออกแบบโปรแกรมคำนวณหาระยะทางที่เกิดความผิดพร่องจากแรงดันตกชั่วขณะ									
9. เรียบเรียงและจัดทำปริญญานิพนธ์									

การวางแผน การปฏิบัติงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้เรียนรู้การใช้โปรแกรม Simulation และนำไปใช้ประโยชน์ได้
2. นำผลของปริญญานิพนธ์นี้เป็นข้อมูลในการพัฒนาโปรแกรมคำนวณหาระยะทางที่เกิดความผิดพร่องในอนาคต
3. เพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายให้กับการไฟฟ้านครหลวงจากการลดค่าดัชนี SAIFI และ SAIDI
4. ช่วยลดปริมาณความเสียหายในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบชั่วคราว เช่น เกิดจากลมพัดกิ่งไม้แตะกับสายไฟ ก็สามารถตรวจสอบได้ว่าเกิดบริเวณใดและทำการตัดกิ่งไม้ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า
(Fault in Power System)

ความผิดพร่อง (Fault) หรือเรียกง่ายๆ ว่า "ฟอลต์" ในวงจรไฟฟ้าคือความล้มเหลวใดๆ ที่รบกวนการไหลตามปกติของกระแสไฟฟ้า ฟอลต์ของระบบไฟฟ้า [6] อาจเกิดขึ้นได้หลายแบบ คือ

1. การลัดวงจร (Short Circuit) ระหว่างเฟสกับเฟส หรือเฟสกับดิน มีสาเหตุมาจากการเสื่อมของฉนวนไฟฟ้า ภัยธรรมชาติหรืออุบัติเหตุ

2. การเกิดสภาวะแรงดันสูง (Over Voltage) มีสาเหตุเนื่องมาจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าผิดปกติ ฟ้าผ่าหรือสวิตช์ชิ่งเสิร์จ (Switching Surge)

3. การเกิดความถี่ต่ำ (Under Frequency) มีสาเหตุเนื่องจากการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ได้ไม่เพียงพอกับโหลด

4. การเกิด Out Of Step อันเนื่องมาจากสายส่งไม่แข็งแรงพอ หรือเกิดการลัดวงจรที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปอย่างทันท่วงที ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในจุดต่างๆ ไม่สามารถทำงานประสานกันได้

5. การเกิดโหลดเกิน (Over Load) มีสาเหตุมาจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกำลัง

6. การสูญเสียซิงโครนิซึม (Loss Of Synchronism)

เนื่องจากในโครงงานนี้จะทำการศึกษาฟอลต์ที่เป็นแบบลัดวงจรเท่านั้น ดังนั้นจึงขอกล่าวเพียงรายละเอียดของการลัดวงจรดังกล่าว การลัดวงจรในระบบแรงสูงหรือในระบบจำหน่ายเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติหรือความผิดพลาดและหรือการจงใจของมนุษย์ ทุกครั้งที่เกิดลัดวงจรภายในระบบจะมีกระแสไหลมากผิดปกติและถ้าไม่มีการป้องกันหรือขจัดจุดที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบให้เร็วที่สุดก็จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านในปริมาณที่สูง

2.1 สาเหตุของการเกิดลัดวงจร [8]

ฟอลต์เป็นปรากฏการณ์ของสภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 หัวข้อใหญ่ คือ

- ฟอลต์อนุกรม (series fault) เป็นสภาวะผิดปกติในเฟส (phase) ของระบบ เช่น สายส่งขาดหรือไม่สามารถจ่ายไฟได้หนึ่งเฟสหรือสองเฟส เป็นต้น

- ฟอลต์ขนาน (shunt fault) เป็นสภาวะผิดปกติที่เกิดระหว่างเฟสหรือระหว่างเฟสกับกราวด์ (ground) ซึ่งได้แก่การลัดวงจรแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอลต์ขนานมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์มากกว่าฟอลต์อนุกรม เพราะกระแสที่เกิดขึ้นในฟอลต์ขนานมีขนาดสูงมากและทำให้เกิดอุณหภูมิสูงมากในอุปกรณ์ ถ้าหากไม่รีบกำจัดฟอลต์ออกจากระบบ ดังนั้น การวิเคราะห์ระบบส่วนใหญ่จึงเน้นไปทางด้านการลัดวงจรเมื่อพูดถึงเรื่องฟอลต์ แต่ความจริงแล้วควรคำนึงถึงฟอลต์ทั้งสองอย่าง เพราะฟอลต์อนุกรมมีผลทำให้การส่งจ่ายไฟฟ้าทำได้น้อยลงหรือต้องหยุดชะงัก การศึกษาฟอลต์ขนานก็เพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจรและขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และระบบการป้องกัน เช่น ระบบรีเลย์ต่างๆ ส่วนการศึกษาฟอลต์อนุกรมนั้นมีประโยชน์ เมื่อต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดขึ้นช่วงไหนของระบบก็ได้ แต่ส่วนใหญ่เกิดในสายส่งเหนือดินประมาณ 50% นอกนั้นเป็นฟอลต์ในสายส่งใต้ดิน และหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อย ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเริ่มแรกเกือบทั้งหมดเป็นฟอลต์แบบขนานหรือการลัดวงจร ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติในระบบไฟฟ้า [6]

อุปกรณ์ไฟฟ้า	% Fault ทั้งหมด
สายในอากาศ (Overhead Lines)	50
สายเคเบิลใต้ดิน (Cables)	10
สวิตช์เกียร์ (Switchgear)	15
หม้อแปลง (Transformer)	12
หม้อแปลงวัดกระแสและแรงดัน (CTs and VTs)	2
อุปกรณ์ควบคุม (Control Equipment)	3
อื่นๆ (Miscellaneous)	8
รวม	**100**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การลัดวงจรในสายส่งเหนือดิน (overhead) ไม่ว่าในระบบแรงสูงหรือระบบจำหน่ายก็เกิดขึ้นมากเนื่องจากฉนวนลูกถ้วยสกปรกเพราะฝุ่นผงเกาะมากหรือมีคราบเกลือเกาะอยู่ เช่น ในกรณีที่สายส่งเดินใกล้ชายฝั่งทะเล เป็นต้น สาเหตุดังกล่าวทำให้ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าเกินของฉนวนลูกถ้วยลดลงมากและเกิดการวาบไฟตามผิว (flash over) ได้ง่ายขึ้น การเกิดลัดวงจรในสายส่งเหนือดินในระบบจำหน่ายก็มีสาเหตุของการเกิดต่างจากระบบแรงสูงเหนือดินบ้าง เพราะในระบบจำหน่ายมีระดับแรงดันไฟฟ้าของสายไม่สูงมากนัก ระดับสายจึงสูงจากพื้นดินไม่มาก ดังนั้นสาเหตุการลัดวงจรอื่นๆ นอกเหนือจากแรงดันเกินแล้ว ก็ยังมีเนื่องจากต้นไม้ไปพาดถูกสายไฟฟ้าแล้วเกิดลัดวงจรลงดินบ้าง ฉนวนลูกถ้วยแตกเนื่องจากลูกปืนชาวบ้านบ้าง รถเครนหรือปั้นจั่นไปเกี่ยวกับสายที่เดินพาดเหนือถนนบ้าง

2. การเกิดลัดวงจรในสายส่งใต้ดิน (underground) ส่วนใหญ่เกิดจากความชื้นที่เข้าไปข้างในสายและทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของเคเบิ้ลเสื่อมลงมากจนเกิดการเบรกดาวน์ของฉนวนและลัดวงจรได้ นอกจากนี้รอยต่อ (splicing) ของสายเคเบิ้ลก็เป็นจุดที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นได้หากต่อเข้ากันไม่ดี ความชื้นอาจเกิดขึ้นภายในได้ง่าย หรือเกิดโคโรน่าและเกิดการกระทบของไอออนที่เกิดจากการดิสชาร์จกับฉนวนจนเกิดเบรกดาวน์

3. การลัดวงจรในสถานีไฟฟ้าย่อย (substation) ในระบบหรือในโรงงานเกิดเนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกัน โดยอาจเกิดเนื่องจากสัตว์ เช่น หนู แมว หรือนกที่เข้าไปในสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วไปพาดระหว่างเฟสของระบบไฟฟ้าหรือระหว่างเฟสกับกราวด์ ทำให้เกิดการลัดวงจรผ่านตัวสัตว์ได้ สาเหตุอื่นก็อาจเกิดเนื่องจากฝุ่นผงเกาะตามฉนวนลูกถ้วยมากและไม่ได้บำรุงรักษาความสะอาดของลูกถ้วย หรือบริเวณสถานีย่อยอาจมีโรงงานที่มีปล่องระบายความร้อนหรือปล่องควันอยู่ใกล้ๆ ทำให้ฝุ่นผงหรือละอองน้ำ ตกเข้าไปในสถานีไฟฟ้าย่อยแล้วจับตามผิวลูกถ้วยเป็นเหตุให้เกิดการวาบไฟตามผิวและลัดวงจรได้ง่ายขึ้น

จากค่า % Fault ที่เกิดขึ้นในตารางที่ 2.1นั้นจะเห็นได้ว่า ฟอลต์ที่เกิดกับสายในอากาศมีมากกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ถึง 50% ดังนั้นในโครงงานนี้จะพิจารณาถึงการเกิดฟอลต์ที่เป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นกับสายในอากาศเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งในโครงงานนี้จะเรียก "การลัดวงจร" ว่า "ฟอลต์"

2.2 ประเภทของฟอลต์ [6,8]

ฟอลต์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีด้วยกันหลายแบบ และสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ ฟอลต์แบบสมมาตรและฟอลต์แบบไม่สมมาตร

2.2.1 ฟอลต์แบบสมมาตร คือ เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบแล้วกระแสของทั้งสามเฟสยังจะมีขนาดเท่ากันและมีมุมห่างกัน 120 องศา ฟอลต์แบบนี้ ได้แก่

- ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault) ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนัก แต่เป็นฟอลต์ที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นฟอลต์ที่เกิดความรุนแรงที่สุด เกิดขึ้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

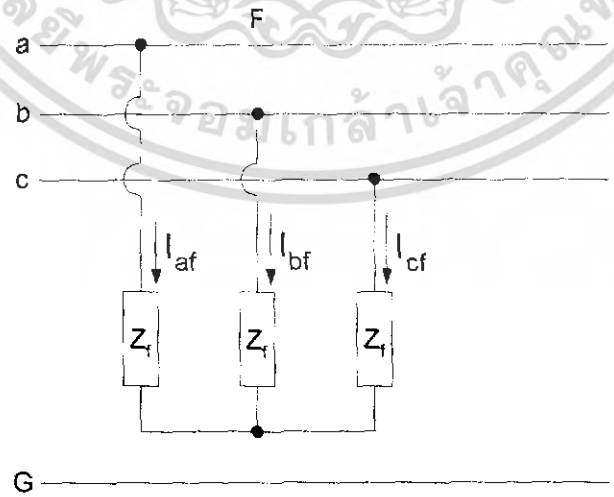
Line ทั้ง 3 เฟส ของระบบถูกลัดวงจรพร้อมกัน ซึ่งมี Connection Diagram ดังรูปที่ 2.1 ฟอลต์สามเฟสนี้ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานเอง โดยเมื่อมีการเข้าไปซ่อมบำรุงบัสบาร์ทั้ง 3 เฟส จะมีการดัดไฟออก รวมทั้งมีทองแดงเปลือยเพื่อ Short Lines ทั้ง 3 เฟส เข้าด้วยกันเพื่อเป็นกราวด์ ให้ประจุที่ยังตกค้างอยู่ใน Lines คายประจุออกไป และเมื่อซ่อมบำรุงเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ปฏิบัติงานมักจะลืมที่จะเอา Line Charging นี้ออกและเมื่อทำการ On Circuit Breaker เพื่อนำไฟเข้ามาจึงเกิดฟอลต์ขึ้น

2.2.2 ฟอลต์แบบไม่สมมาตร คือ เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบแล้วกระแสในสามเฟสมีขนาดไม่เท่ากันและ/หรือมุมของกระแสห่างกันไม่เท่ากับ 120 องศา หรืออาจกล่าวง่ายๆ ว่าฟอลต์แบบไม่สมมาตรคือ ฟอลต์ที่ไม่ใช่ฟอลต์สามเฟสนั่นเอง ซึ่งได้แก่

- ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน (Single Phase to Ground Fault) ฟอลต์ประเภทนี้เกิดเมื่อ Line ใด Line หนึ่งของระบบไฟฟ้าถูกลัดวงจรลงดิน มี Connection Diagram ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากกว่าฟอลต์ประเภทอื่นๆ ฟอลต์ประเภทนี้มักจะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดเพียงชั่วขณะ อันเนื่องมาจากมีสิ่งมาพาดผ่าน เช่น งู กิ่งไม้ และเมื่อสิ่งเหล่านั้นหลุดล่วงไปแล้ว เหตุการณ์ฟอลต์ก็จะยุติลง

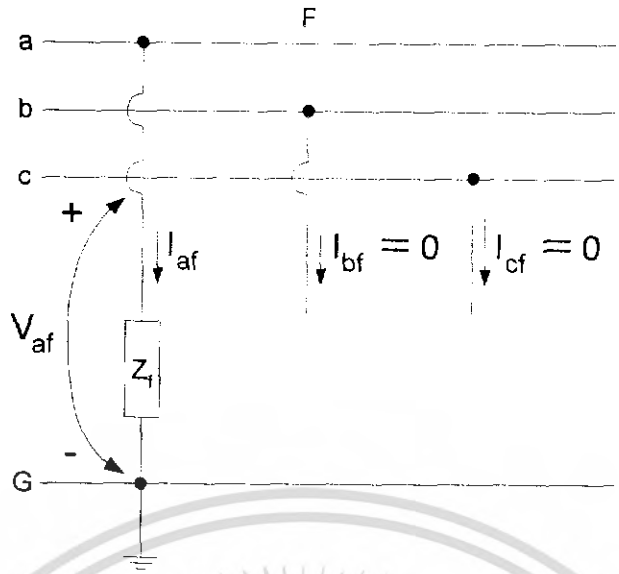
- ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (Phase to Phase Fault) ฟอลต์ประเภทนี้เกิดเมื่อ Line 2 Line คู่ใดคู่หนึ่งของระบบไฟฟ้าลัดวงจรถึงกัน ซึ่งมี Connection Diagram ดังรูปที่ 2.3

- ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน (Phase to Phase to Ground Fault) ฟอลต์ประเภทนี้เกิดเมื่อ Line 2 เส้น คู่ใดคู่หนึ่งของระบบไฟฟ้าถูก Short Circuit ลงดินพร้อมกัน

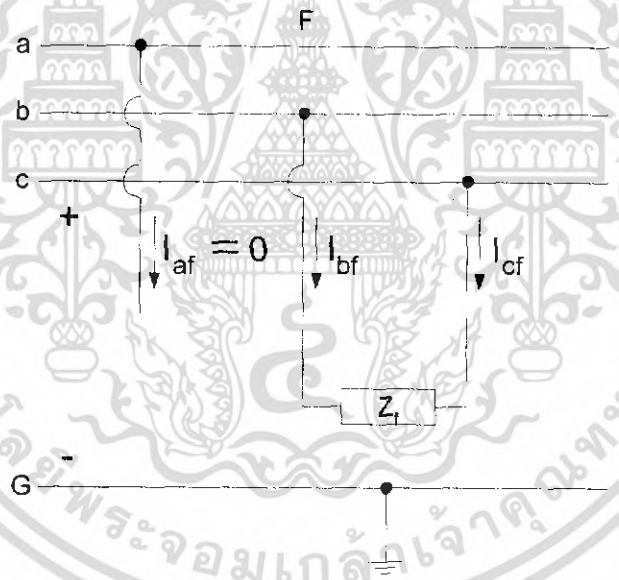


รูปที่ 2.1 Connection Diagram ของฟอลต์สามเฟส [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

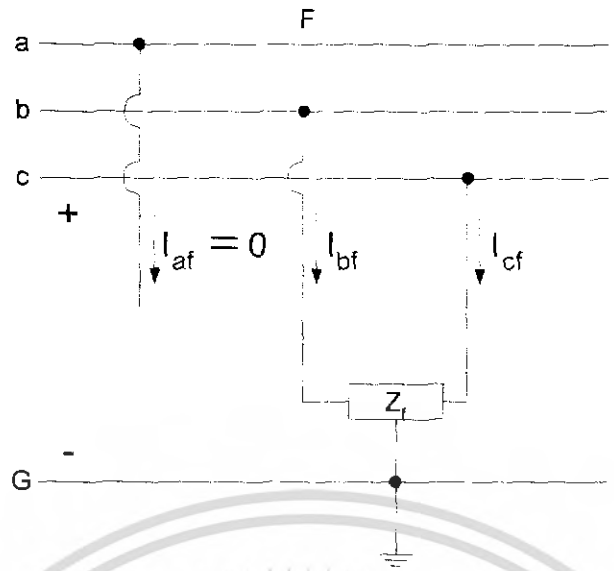


รูปที่ 2.2 Connection Diagram ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน [6]



รูปที่ 2.3 Connection Diagram ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 Connection Diagram ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน [6]

ในตารางที่ 2.2 นี้ เป็นข้อมูลเบื้องต้นของฟอลต์ชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบสายส่ง 3 เฟส ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าฟอลต์ระหว่างเฟส-ดินนั้น เกิดขึ้นมากกว่าฟอลต์ชนิดอื่นๆ และฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ส่วนใหญ่จะเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราว ซึ่งตรวจหาสาเหตุได้ยาก และเป็นปัญหาสำหรับการไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง

ตารางที่ 2.2 ความถี่โดยประมาณของการเกิดฟอลต์แต่ละชนิดบนสายส่งในอากาศ [6]

ชนิดของฟอลต์	% การเกิดฟอลต์
ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน	85
ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส	8
ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน	5
ฟอลต์สามเฟส	2
รวม	**100**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3 การคำนวณกระแสฟอลต์ (Fault Calculation) [6,8-9]

ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลัง จะผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นระบบ 3 เฟสสมดุล และกระแสของโหลดก็ใกล้เคียงกับกระแสพิกัด แต่เมื่อเกิดความผิดพร่อง (Fault) ขึ้นในระบบ ซึ่งฟอลต์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ โดยทั่วไปกระแสฟอลต์จะมีค่าสูงกว่ากระแสพิกัดหลายเท่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตัดส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบโดยเร็วที่สุด ซึ่งจะอาศัยระบบป้องกัน ปริมาณกระแสฟอลต์แปรไปตามตำแหน่งและชนิดของตารเกิดฟอลต์ นอกจากนี้ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะยังแปรไปตามปริมาณกระแสฟอลต์อีกด้วย การคำนวณกระแสฟอลต์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ปริมาณกระแสฟอลต์ที่คำนวณได้ จะสามารถนำไปใช้ในการเลือกขนาดพิกัดอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า (Protection Devices) และการตั้งค่ารีเลย์ (Relay) ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัยในระบบป้องกัน และยังสามารถนำปริมาณกระแสฟอลต์ที่คำนวณได้ไปคำนวณหาค่าแรงดันตกชั่วขณะที่สายป้อนข้างเคียง เพื่อเปรียบเทียบกับการทดลองได้อีกด้วย ซึ่งการคำนวณค่าแรงดันตกชั่วขณะจะกล่าวถึงในบทต่อไป

ในการคำนวณหากระแสฟอลต์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. การคำนวณด้วยเครื่องคำนวณ หรือคำนวณโดยใช้มือ นิยมใช้คำนวณระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น ระบบเรเดียลซึ่งใช้ในระบบแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) ของการไฟฟ้า และตามสถานประกอบการในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งวิศวกรทุกคนควรจะสามารถคำนวณได้ เพื่อใช้ในการหาพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน

2. การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้มากกว่าการคำนวณด้วยมือ และวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ วิธี Bus Impedance Method การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ นิยมใช้กับระบบที่มีความยุ่งยาก เช่น ในระบบวงจรตาข่าย และระบบแรงสูงของการไฟฟ้าตั้งแต่ 69 kV ขึ้นไป

การที่จะคำนวณกระแสฟอลต์ได้ถูกต้องนั้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้หลายส่วนดังต่อไปนี้ ปริมาณไฟฟ้าเพอร์ยูนิต (Per-Unit Quantities : pu.), ฟอลต์สมมาตร (Symmetrical Fault), องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components), องค์ประกอบระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Components), สมการฟอลต์ (Fault Equations)

2.3.1 ปริมาณไฟฟ้าเพอร์ยูนิต (Per-Unit Quantities : pu.)

ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จะมีระดับแรงดันอยู่หลายๆ ระดับ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ระบบ เราจะต้องทำการแปลงค่าต่างๆ ในระบบโดยเทียบกับค่าฐาน (Base Quantities) และเรียกค่าที่คำนวณได้ว่าค่าเพอร์ยูนิต (Per-Unit Quantities : pu.)

ค่าเพอร์ยูนิต (pu.) ก็คือ อัตราส่วนระหว่างค่าของปริมาณทางไฟฟ้าจริงกับค่าฐานของปริมาณไฟฟ้าจริงนั้นๆ อันได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (V), กระแสไฟฟ้า (A), อิมพีแดนซ์ (Ω), และกำลังไฟฟ้า (VA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
62478

$$\text{pu.} = \frac{\text{ค่าที่ใช้จริง (Actual Quantities)}}{\text{ค่าฐาน (Base Quantities)}} \quad (2.1)$$

ค่าฐาน (Base Quantities)

ระบบ 3 เฟส

แรงดันไฟฟ้าฐาน : kV_{base} = แรงดัน Line to Line (kV)

พิกัดกำลังไฟฟ้าฐาน : MVA_{base} = พิกัดกำลังสามเฟส (MVA)

กระแสไฟฟ้าฐาน : $I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3}kV_{base}}$ (kA) (2.2)

อิมพีแดนซ์ฐาน : $Z_{base} = \frac{(kV_{base})^2}{MVA_{base}}$ (Ω) (2.3)

ระบบ 1 เฟส

แรงดันไฟฟ้าฐาน : $kV_{base,L\text{-}n}$ = แรงดัน Line to Neutral (kV)

พิกัดกำลังไฟฟ้าฐาน : $MVA_{base.1\emptyset}$ = พิกัดกำลังหนึ่งเฟส (MVA)

กระแสไฟฟ้าฐาน : $I_{base} = \frac{MVA_{base,1\emptyset}}{kV_{base,L\text{-}n}}$ (kA) (2.4)

อิมพีแดนซ์ฐาน : $Z_{base} = \frac{(kV_{base,L\text{-}n})^2}{MVA_{base,1\emptyset}}$ (Ω) (2.5)

ค่าเพอร์ยูนิต (pu.)

อิมพีแดนซ์เพอร์ยูนิต : $Z_{pu.} = \frac{Z_{act}}{Z_{base}} = Z_{act} \times \frac{MVA_{base}}{(kV_{base})^2}$ (2.6)

แรงดันไฟฟ้าเพอร์ยูนิต : $kV_{pu.} = \frac{kV_{act}}{kV_{base}}$ (2.7)

พิกัดกำลังไฟฟ้าเพอร์ยูนิต : $MVA_{pu.} = \frac{MVA_{act}}{MVA_{base}}$ (2.8)

กระแสไฟฟ้าเพอร์ยูนิต : $I_{pu.} = \frac{I_{act}}{I_{base}}$ (2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นมีความหมายของ subscript ต่างๆ ดังนี้

act = ค่าจริง (Actual)

base = ค่าฐาน (Base)

pu. = ค่าเพอร์ยูนิต (Per-Unit)

L-n = ค่าไลน์ทูนิวทรัล

1Ø = ค่าเพอร์เฟส

การเปลี่ยนแปลงฐานของค่าอิมพีแดนซ์เพอร์ยูนิต (Transferring Impedance Per-Unit)

อิมพีแดนซ์เพอร์ยูนิตเดิม $: Z_{pu.1} = \frac{Z_{act}}{Z_{base\,1}}$

อิมพีแดนซ์เพอร์ยูนิตใหม่ $: Z_{pu.2} = \frac{Z_{act}}{Z_{base\,2}} = Z_{pu.1}\left(\frac{Z_{base\,1}}{Z_{base\,2}}\right)$

$$\therefore Z_{pu.2} = Z_{pu.1}\left(\frac{kV_{base\,1}}{kV_{base\,2}}\right)^2\left(\frac{MVA_{base\,2}}{MVA_{base\,1}}\right) \quad (2.10)$$

$$\therefore Z_{pu.} = \frac{MVA_{base}}{MVA_{act}} \quad (2.11)$$

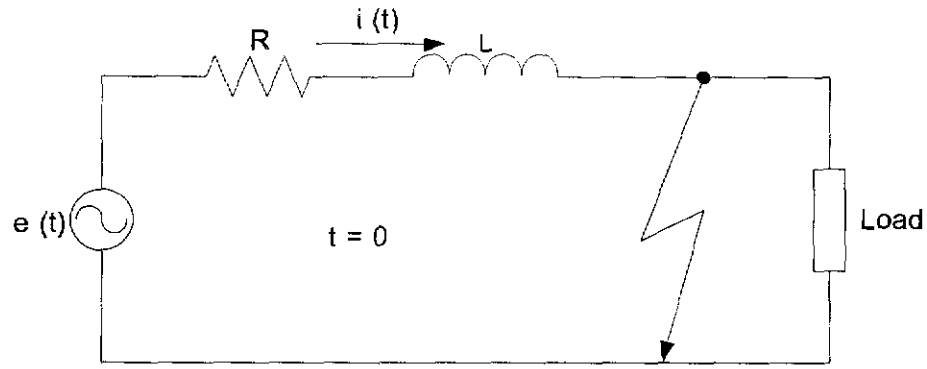
ค่าพิกัดกำลังฐาน (Base MVA) ที่นิยมใช้กันมากในการคำนวณของระบบไฟฟ้า คือ 100 MVA และค่าแรงดันไฟฟ้าฐาน (Base Voltage) ใช้ตามระดับแรงดันพิกัด

2.3.2 ฟอลต์สมมาตร (Symmetrical Fault)

ฟอลต์ประเภทนี้จะไม่ค่อยขึ้นบ่อยนัก แต่เป็นฟอลต์ที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นฟอลต์ที่เกิดความรุนแรงมากที่สุด และจะทำให้เกิดความเสียแก่ระบบไฟฟ้ามากที่สุด เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น เราจึงจำเป็นต้องคำนวณหาค่าของกระแสและแรงดันหลังจากเกิดฟอลต์ เพื่อที่สามารถกำหนดขนาดพิกัดของ เซอร์กิตเบรกเกอร์และตั้งค่าต่างๆ ของรีเลย์ในระบบป้องกันที่ตำแหน่งต่างๆ ของระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัยที่สุด

ในการคำนวณค่าต่างๆ ใน ฟอลต์สามเฟสนั้น จะเหมือนกับการคำนวณค่าต่างๆ ในวงจร RL ที่มีแหล่งจ่ายแรงดันเป็น A.C. Source ตามรูปที่ 2.5 เมื่อวงจรถูก Short Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจร RL Short Circuit [6]

$$e(t) = \sqrt{2}V_{rms}\sin(\omega t + \alpha)$$

$$L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = \sqrt{2}V_{rms}\sin(\omega t + \alpha)$$

หาคำตอบโดยใช้ Laplace Transform จะได้

$$I(t) = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{|Z|}\left[\underbrace{\sin(\omega t + \alpha - \theta)}_{\text{เทอมที่1}} - \underbrace{\sin(\alpha - \theta)e^{-\frac{t}{T}}}_{\text{เทอมที่2}}\right] \quad (2.12)$$

โดยที่ $|z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \tan^{-1}\frac{X}{R}$$

$$T = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi fR}$$

α = มุมของแรงดันสวิตชิ่ง (Switching Voltage) เมื่อเกิดฟอลต์

จากสมการที่ 2.12 กระแสที่ไหลผ่านวงจร RL จะประกอบด้วยกระแส 2 ส่วน ด้วยกัน คือ เทอมที่ 1 องค์ประกอบกระแสสลับ (A.C. Component) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) แปรผันตามเวลา สามารถเรียกกระแสเทอมนี้ว่า Symmetrical Fault Current

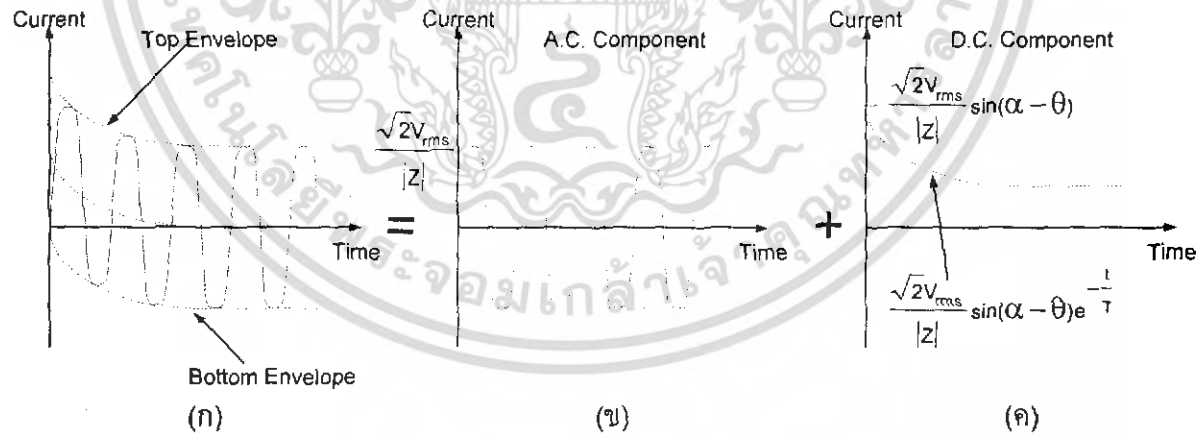
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{ac}(t) = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{|Z|}\sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad (2.13)$$

เทอมที่ 2 องค์ประกอบกระแสตรง (D.C. Component) ซึ่งมีลักษณะ เป็น Non-periodic และ หน่วงลงแบบ Exponential ด้วย Time Constant (T) ซึ่งสามารถเรียกกระแสเทอมที่ 2 นี้ว่า D.C. Offset Current

$$i_{dc}(t) = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{|Z|}\sin(\alpha - \theta)e^{-\frac{t}{T}} \quad (2.14)$$

จากสมการในเทอมของ A.C. และ D.C. Component จะได้กราฟดังรูปที่ 2.6 ในเทอมที่ 1 เป็นค่า Steady State ของกระแสในวงจร RL กระแสฟอลต์เริ่มแรกจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสตรงที่เกิดขึ้น และกระแสตรงที่เกิดขึ้นมีค่ามากหรือน้อยนั้นพิจารณาได้จากสมการที่ (2.14) คือถ้าเกิดฟอลต์ที่มุม $\alpha - \theta = 0, \pi$ ก็จะไม่มีเทอม D.C. Component กระแสตรงก็ไม่เกิดขึ้น ดังนั้นกระแสฟอลต์ก็จะมีเฉพาะกระแสสลับอย่างเดียว แต่ถ้าเกิดฟอลต์ดรงจุดที่ $\alpha - \theta = \pm\pi/2$ กระแสตรงในเทอม D.C. Component จะมีค่าสูงสุด ในระบบ 1 เฟส $\alpha - \theta$ มีโอกาสเป็นศูนย์แต่ในระบบ 3 เฟส $\alpha - \theta$ ของทุกเฟสไม่มีโอกาสเป็นศูนย์หมดทั้ง 3 เฟส ดังนั้นในระบบ 3 เฟส กระแสตรงเกิดขึ้นทุกครั้งที่เกิดฟอลต์ เราสามารถเรียกกระแสรวมของทั้ง 2 เทอมนี้ว่า Asymmetrical Fault Current



รูปที่ 2.6 กราฟกระแสฟอลต์จากวงจร RL Short Circuit [8]
(ก) กระแสฟอลต์ (ข) กระแสสลับคงที่ (ค) กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาองค์ประกอบฟอลต์สมมาตร ในการคำนวณเราจะใช้การคำนวณแบบเฟสเซอร์ (phasor) ดังนั้นจึงใช้ค่า A.C. Fault Current เป็น RMS ซึ่งเรียกว่า Symmetrical Fault Current และสามารถหาค่าขนาดของ RMS A.C. Fault Current ได้จากสมการ

$$I = \frac{E}{|Z|} \qquad (2.15)$$

โดยที่ I : Symmetrical Fault Current (RMS)

E : แรงดันของระบบเมื่อเกิดลัดวงจร

$|Z|$: ขนาดอิมพีแดนซ์รวมของระบบเมื่อเกิดลัดวงจร

2.3.3 องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)

จากทฤษฎีของ C.L. Fortescue ซึ่งกล่าวไว้ว่า ในระบบที่ไม่สมดุลจำนวน n ระบบใดๆ สามารถแสดงออกมาให้เป็น n ระบบที่สมดุลได้เสมอซึ่งจะเรียกว่า "องค์ประกอบสมมาตร" โดยที่เฟสเซอร์ของส่วนประกอบใดๆ จะมีขนาดเท่ากันมีเฟสต่างกันเป็นค่าคงที่ แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าในปัจจุบันจะเกี่ยวข้องกับระบบ 3 เฟส ดังนั้นจึงจะขอกล่าวถึงเฉพาะระบบ 3 เฟส เท่านั้น

ทฤษฎีของ Fortescue นั้นได้แบ่งเฟสเซอร์ 3 เฟส ที่ไม่สมดุลของระบบ 3 เฟส ให้เป็นเฟสเซอร์ 3 ชุด ที่สมดุลซึ่งประกอบด้วย

1. องค์ประกอบลำดับบวก (Positive-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 ตัวที่มีขนาดเท่ากันและมีเฟสต่างกันอยู่ 120° โดยมีลำดับเฟสเหมือนกับตัวเดิม

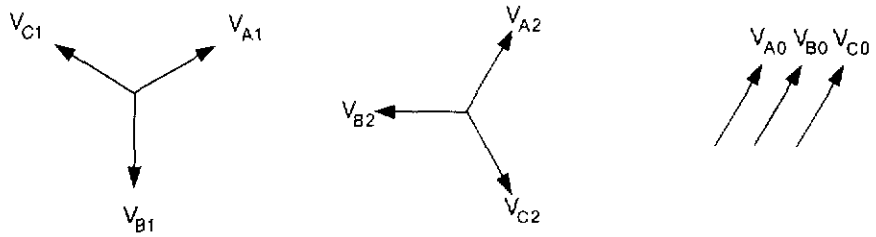
2. องค์ประกอบลำดับลบ (Negative-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 ตัวที่มีขนาดเท่ากัน และมีเฟสต่างกันอยู่ 120° โดยมีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับตัวเดิม

3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 ตัวที่มีเท่ากันและไม่มีความต่างเฟสระหว่างกัน

เนื่องมาจากเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลเดิมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของเฟสเซอร์ในแต่ละลำดับ ดังนั้นจึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\begin{aligned} V_A &= V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \\ V_B &= V_{B0} + V_{B1} + V_{B2} \\ V_C &= V_{C0} + V_{C1} + V_{C2} \end{aligned} \qquad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์สามเฟสไม่สมดุล [6]
(ก) องค์ประกอบลำดับบวก (ข) องค์ประกอบลำดับลบ (ค) องค์ประกอบลำดับศูนย์

จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบของลำดับบวกและลำดับลบนั้นจะมีเฟสเซอร์ที่มีเฟสต่างกันอยู่ 120° ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคิดและการแสดงรูปแบบสมการ จึงได้มีการกำหนดตัวดำเนินการ a ขึ้นมาเพื่อใช้แทนการหมุนเฟสเซอร์ไป 120° ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโดยที่ค่า a ได้กำหนดค่าไว้ดังนี้ ดังนั้นจะพบว่า

$$a = 1\angle 120^\circ = -0.5 + j\,0.866$$

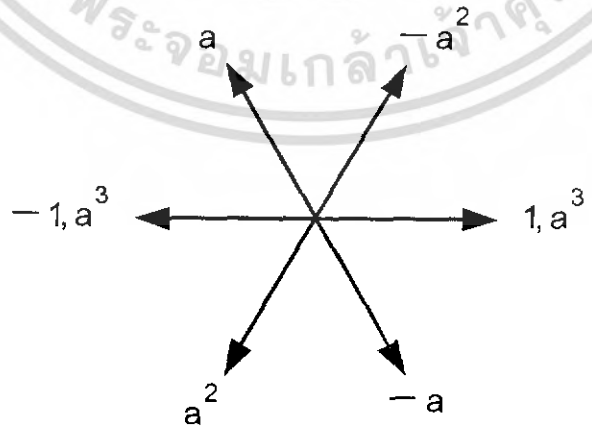
$$a^2 = 1\angle 240^\circ = -0.5 - j\,0.866$$

$$a^3 = 1\angle 360^\circ = 1$$

$$a + a^2 = -1.0$$

$$a - a^2 = -j\,1.732$$

$$1 + a + a^2 = 0$$



รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของตัวดำเนินการ a [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ที่ไม่สมมาตร (Symmetrical Components of Unsymmetrical Phasors) จากสมการที่ (2.16) จะเห็นว่าเราสามารถเขียนเฟสเซอร์ใดๆ ให้ประกอบไปด้วยลำดับบวก, ลำดับลบ และลำดับศูนย์ และจากนิยามของตัวดำเนินการ a เราจึงสามารถเขียนเฟสเซอร์ใดๆ ได้ตามความสัมพันธ์นี้

$$V_{B0} = V_{A0} \quad , \quad V_{C0} = V_{A0}$$

$$V_{B1} = a^2 V_{A1} \quad , \quad V_{C1} = aV_{A1}$$

$$V_{B2} = aV_{A2} \quad , \quad V_{C2} = a^2 V_{A2}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_A &= V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \\ V_B &= V_{A0} + a^2 V_{A1} + aV_{A2} \\ V_C &= V_{A0} + aV_{A1} + a^2 V_{A2} \end{aligned} \tag{2.17}$$

หรือเขียนอยู่ในรูป Matrix ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

และ

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ (2.19) เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ดังกล่าวได้ในอีกรูปแบบหนึ่งก็คือ

$$V_{A0} = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C)$$

$$V_{A1} = \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C)$$

$$V_{A2} = \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C)$$

เช่นเดียวกันกับแรงดันเราก็สามารถเขียนเฟสเซอร์ของกระแสได้ดังนี้

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{A0} + a^2I_{A1} + aI_{A2}$$

$$I_C = I_{A0} + aI_{A1} + a^2I_{A2}$$

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C)$$

หรือเขียนในรูป Matrix ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ในระบบ 3 เฟส ใดๆ ที่มีสายนิวตรอล (Neutral) นั้น เราจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในสายนิวตรอลและกระแสในสายแต่ละเฟสของระบบดังนี้คือ

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (2.22)$$

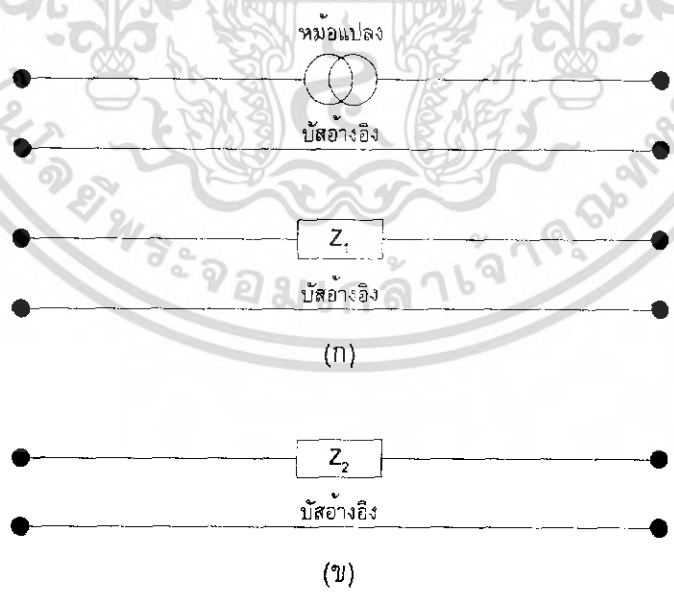
เมื่อแทนค่า I_a, I_b, I_c ในรูปขององค์ประกอบลำดับจะได้

$$I_N = 3I_{A0}$$

2.3.4 องค์ประกอบระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Components)

ในการหาวงจรสมมูลและค่าของอิมพีแดนซ์ในลำดับต่างๆ นั้น ลำดับบวกจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันภายในต่อเข้ากับอิมพีแดนซ์ลำดับบวกตามวงจรของระบบนั้นๆ ส่วนลำดับลบจะมีวงจรสมมูลเหมือนลำดับบวก เพียงแต่เปลี่ยนค่าจากอิมพีแดนซ์ลำดับบวกไปเป็นอิมพีแดนซ์ลำดับลบแต่ไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันภายในในวงจร สำหรับลำดับลบนั้นจะแตกต่างกันไปแล้วแต่การต่อวงจรและการต่อลงดินของส่วนประกอบในวงจร ซึ่งลำดับอิมพีแดนซ์ของส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังต่อไปนี้

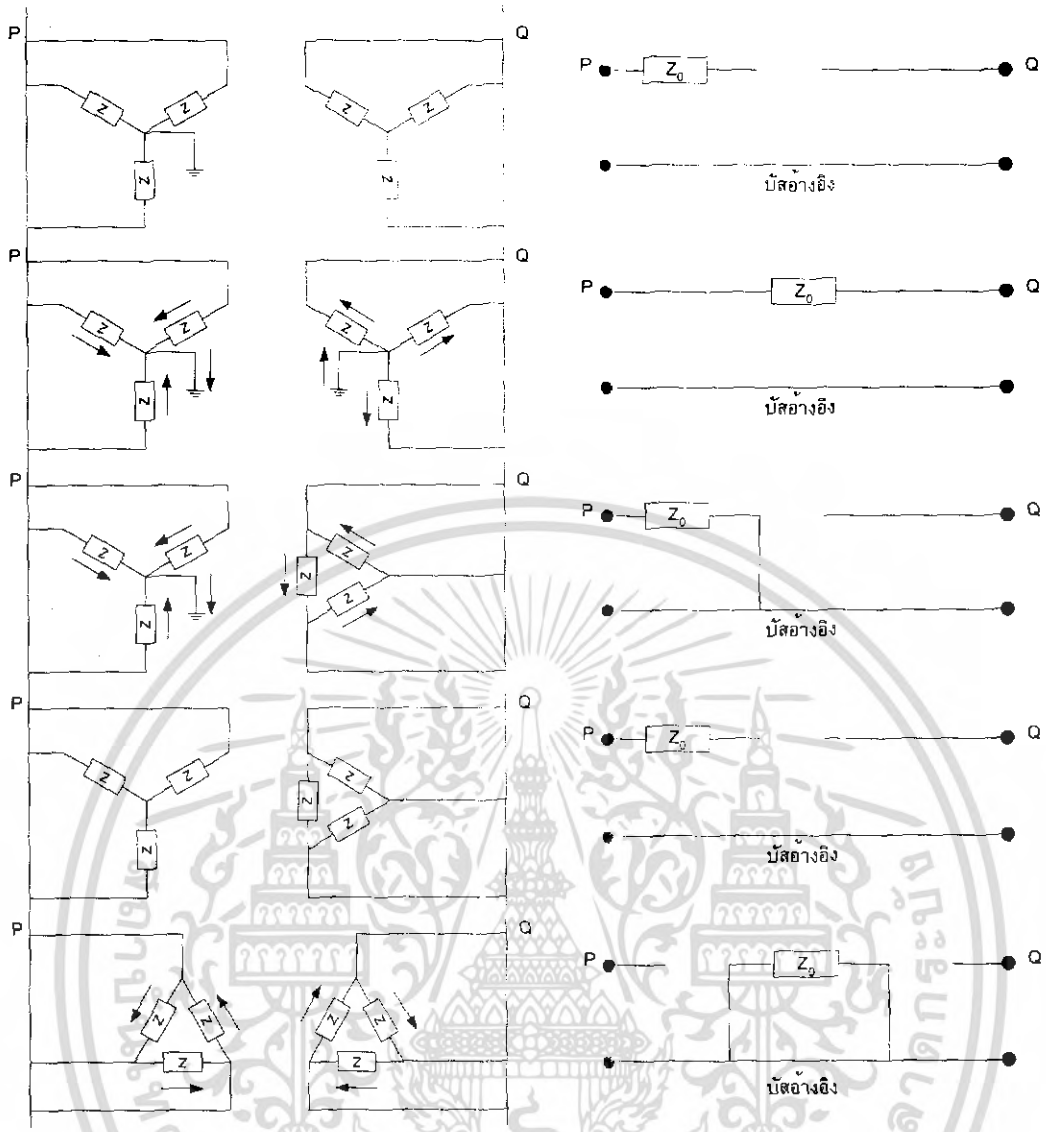
1) วงจรข่ายลำดับของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับวงจรข่ายลำดับในหม้อแปลงไฟฟ้านั้นลำดับบวกและลำดับลบจะเหมือนกันโดยไม่ขึ้นอยู่กับการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนลำดับศูนย์จะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งวงจรข่ายลำดับของหม้อแปลงไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรข่ายลำดับของหม้อแปลง [6]

(ก) วงจรข่ายลำดับบวก (ข) วงจรข่ายลำดับลบ

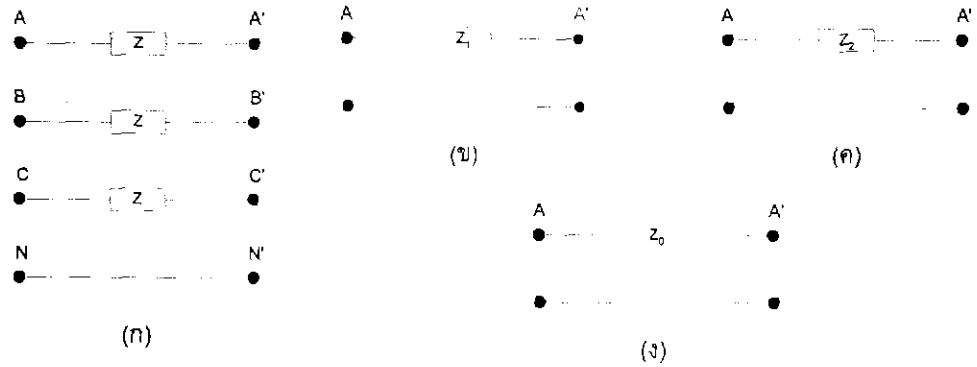
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 (ต่อ) วงจรข่ายลำดับของหม้อแปลง [6] (ค) วงจรข่ายลำดับศูนย์

2) วงจรข่ายลำดับของสายส่งแบบสมดุล สำหรับวงจรข่ายลำดับของสายส่งแบบสมดุลนั้นทุกลำดับจะมีวงจรข่ายเหมือนกันเพียงแต่เปลี่ยนค่าจากอิมพีแดนซ์ตามแต่ละลำดับเท่านั้น ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรข่ายลำดับของสายส่ง [6] (ก) วงจรสมมูลของสายส่งแบบสมดุล (ข) วงจรข่ายลำดับบวก (ค) วงจรข่ายลำดับลบ (ง) วงจรข่ายลำดับศูนย์

2.3.5 สมการฟอลต์ (Fault Equations)

จากหัวข้อที่ 2.2.2 ฟอลต์แบบไม่สมมาตร จะพบว่าฟอลต์ประเภทนี้ทำให้ระบบไฟฟ้าไม่สมดุล ฉะนั้นในการหาค่าต่างๆ เมื่อเกิดฟอลต์จะต้องอาศัยหลักการขององค์ประกอบสมมาตรและวงจรข่ายลำดับของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบไฟฟ้า ตามหัวข้อที่ 2.3.3 และ 2.3.4 ซึ่งการต่อวงจรข่ายลำดับของฟอลต์ประเภทต่างๆ และการคำนวณหาค่าต่างๆ จะแสดงต่อไปส่วนในกรณีฟอลต์แบบ 3 เฟสนั้น ก็สามารถใช้หลักการเดียวกันในการคำนวณได้ ดังนี้

1) ฟอลต์แบบสามเฟส ในระบบไฟฟ้ามีโอกาสเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนัก ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานเอง เช่น การปลดสายกราวด์ไม่หมดหลังจากที่ปฏิบัติงานเสร็จแต่หากเกิดขึ้นแล้วมักจะมีขนาดกระแสฟอลต์ที่รุนแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.11

จากรูปที่ 2.11 จะได้

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_F & 0 & 0 \\ 0 & Z_F & 0 \\ 0 & 0 & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

แทนค่า $I_B = a^2 I_A$ และ $I_C = aI_A$ ในสมการลำดับกระแสจะได้

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B = a^2 I_A \\ I_C = aI_A \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ $I_{A0} = I_{A2} = 0$ และ $I_{A1} = I_A$ ซึ่งทำให้สามารถเขียนวงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟส ได้ดังรูปที่ 2.12

จากรูปที่ 2.12 จะได้

$$V_{A0} = V_{A2} = 0$$

$$V_{A1} = I_{A1}Z_F$$

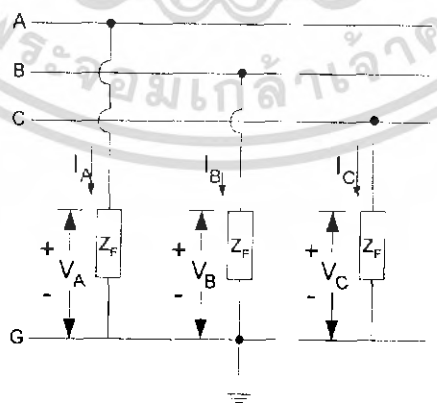
$$I_{A1} = \frac{V_F}{Z_1 + Z_F} = I_A \tag{2.24}$$

$$I_B = \frac{a^2 V_F}{Z_1 + Z_F} \tag{2.25}$$

$$I_C = \frac{aV_F}{Z_1 + Z_F} \tag{2.26}$$

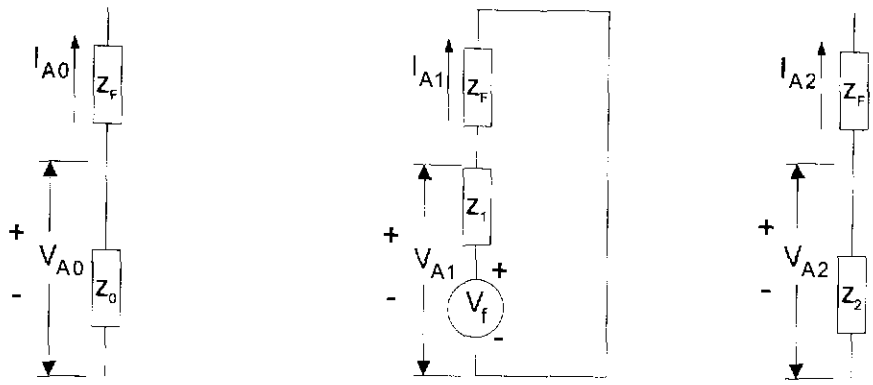
หาแรงดันในแต่ละเฟสได้โดยการแทนค่า $V_{A0} = V_{A2} = 0$ ในสมการลำดับของแรงดัน จะได้

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} = 0 \\ V_{A1} \\ V_{A2} = 0 \end{bmatrix} \tag{2.27}$$



รูปที่ 2.11 การเกิดฟอลต์แบบสามเฟส [6,9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบสามเฟส [6,9]

2) ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ในระบบไฟฟ้ามีโอกาสเกิดขึ้นได้มากกว่าฟอลต์ประเภทอื่นๆ ซึ่งอาจเกิดจากสายไฟฟ้าสัมผัสโครงสร้างบนพื้นดิน รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน

จากรูปที่ 2.13 $I_B = I_C = 0$, $V_A = I_A Z_F$ และหากระแสในแต่ละลำดับได้จาก

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_A \\ I_B = 0 \\ I_C = 0 \end{bmatrix}$$

จะได้ $I_{A0} = I_{A1} = I_{A2} = \frac{I_A}{3}$ ซึ่งทำให้สามารถเขียนวงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบหนึ่งเฟสลงดินได้ดังรูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.14 จะได้

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F}$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \quad I_A = \frac{3V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \qquad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

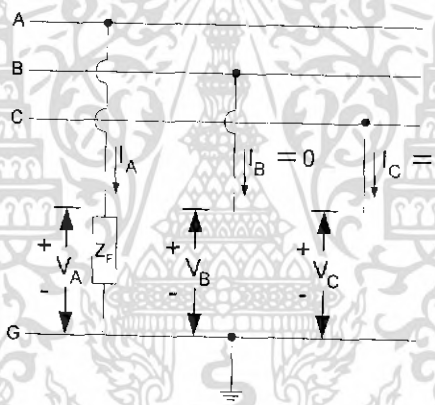
จาก $V_A = V_{A0} + V_{A1} + V_{A2}$

$= Z_F(I_{A0} + I_{A1} + I_{A2})$

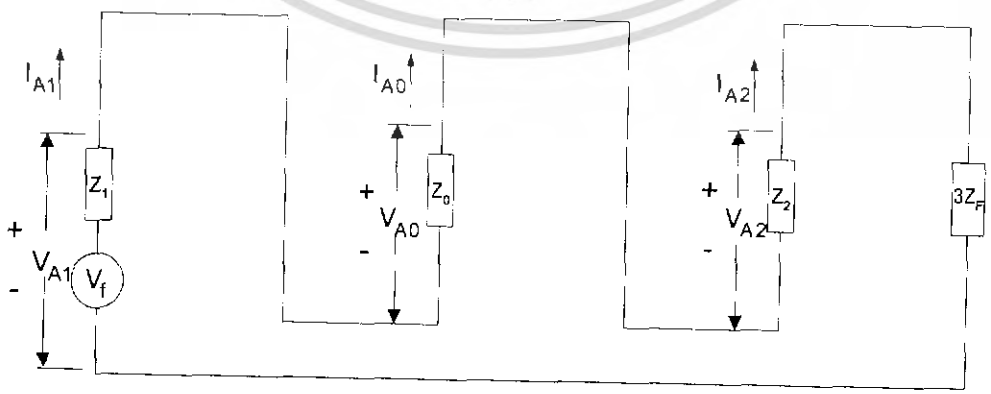
ดังนั้น $V_A = 3Z_F I_{A1}$ (2.29)

สำหรับแรงดัน V_B และ V_C หาได้จาก

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.13 การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน [6,9]



รูปที่ 2.14 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน [6,9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ระหว่างเฟส B กับ C ผ่านฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Z_F) แสดงได้ดังรูปที่ 2.15

จากรูปที่ 2.15 $I_A = 0$, $I_B = -I_C$ และ $V_{BC} = V_B - V_C = I_B Z_F$

แทนค่า $I_A = 0$, $I_C = -I_B$ ในสมการลำดับของกระแส

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_A = 0 \\ I_B \\ I_C = -I_B \end{bmatrix}$$

จะได้ $I_{A0} = 0$, $I_{A1} = -I_{A2}$ ซึ่งทำให้สามารถเขียนวงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบสองเฟสได้ดังรูปที่ 2.16

จากรูปที่ 2.16 $I_{A0} = 0$, $V_{A0} = 0$ และ $I_{A1} = -I_{A2} = \dfrac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$

แทนค่า $I_{A0} = 0$ และ $I_{A2} = -I_{A1}$ ในสมการลำดับของกระแส

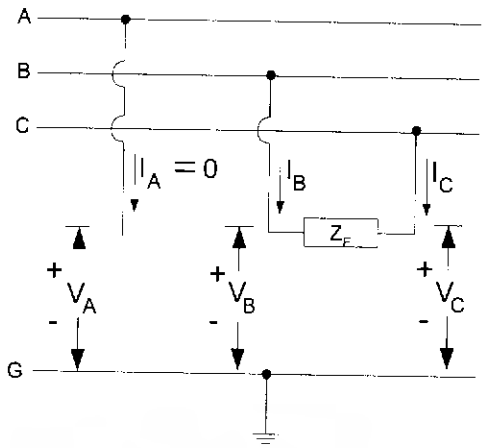
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{A0} = 0 \\ I_{A1} \\ I_{A2} = -I_{A1} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \quad I_B = -I_C = -j\sqrt{3}\frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \qquad (2.31)$$

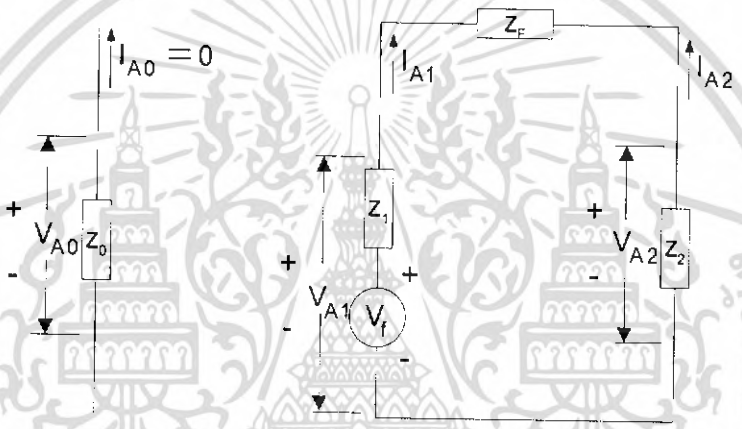
หาแรงดันในแต่ละเฟสได้จาก

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{A0} = 0 \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix} \qquad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส [6,9]



รูปที่ 2.16 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส [6,9]

4) ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน ระหว่างเฟส B กับเฟส C ผ่านฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Z_F) และกราวด์อิมพีแดนซ์ (Z_G) แสดงได้ดังรูปที่ 2.17

จากรูปที่ 2.17 $I_A = 0$

$$V_B = (Z_F + Z_G)I_B + Z_G I_C$$

$$V_C = (Z_F + Z_G)I_C + Z_G I_B$$

เมื่อ $I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} = 0$

ซึ่งสามารถเขียนวงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบสองเฟสลงดินได้ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.18 จะได้

$$I_{A1} = \frac{V_f}{(Z_1 + Z_F) + \dfrac{(Z_2 + Z_F)(Z_0 + Z_F + 3Z_G)}{Z_0 + Z_2 + 2Z_F + 3Z_G}}$$

$$I_{A2} = -\frac{Z_0 + Z_F + 3Z_G}{(Z_2 + Z_F) + (Z_0 + Z_F + 3Z_G)} I_{A1}$$

$$I_{A0} = -\frac{Z_2 + Z_F}{(Z_2 + Z_F) + (Z_0 + Z_F + 3Z_G)} I_{A1}$$

$$V_{A0} = -Z_0 I_{A0}$$

$$V_{A1} = V_f - Z_1 I_{A1}$$

$$V_{A2} = -Z_2 I_{A2}$$

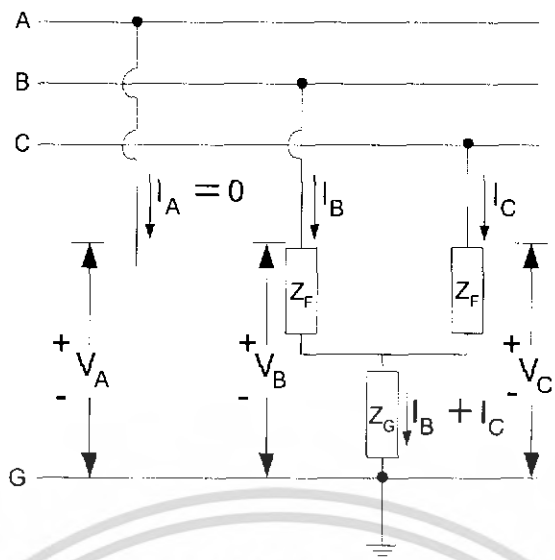
หากระแสในแต่ละเฟสได้จาก

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix}$$

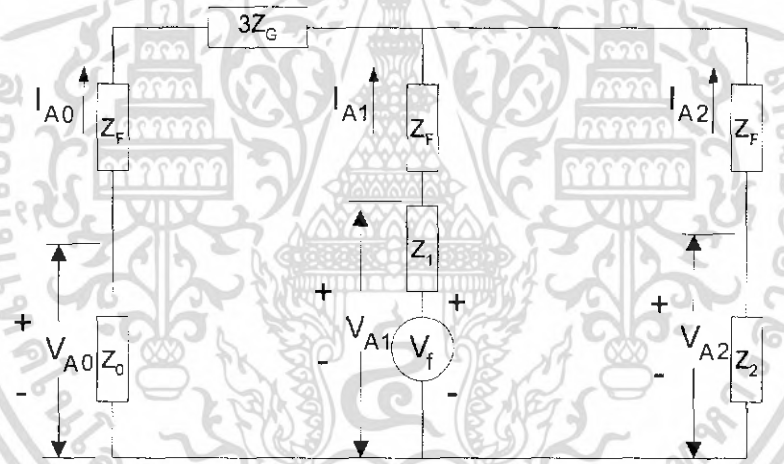
และหาแรงดันในแต่ละเฟสได้จาก

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{A1} \\ V_{A2} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน [6,9]



รูปที่ 2.18 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน [6,9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
แรงดันตกชั่วขณะ

ตามมาตรฐาน IEEE Std.1159-1995 [10] แรงดันตกชั่วขณะ คือปรากฏการณ์ที่ระดับแรงดันมีขนาดของรูปคลื่นลดลงระหว่าง 0.1 pu. ถึง 0.9 pu. ภายในช่วงเวลา 0.5 cycle ถึง 1 นาที หากเกิดขึ้นนานกว่านี้ถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าประเภทอื่น แบ่งตามประเภทของแรงดันตกชั่วขณะได้ดังนี้

- ทันทีทันใด (Instantaneous) : 0.5 cycle - 30 cycle
- ชั่วขณะ (Momentary) : 30 cycle - 3 วินาที
- ชั่วคราว (Temporary) : 3 วินาที - 1 นาที

ในบางครั้งยังเป็นที่สับสนกันอยู่ระหว่างคำว่าแรงดันตกชั่วขณะ และไฟกระพริบสำหรับผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกันอยู่ ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std. 1159-1995 ให้นิยามของไฟกระพริบ (Flicker) คือเป็นเหตุการณ์ที่ตาของเรามีความรู้สึกในการมองที่ไม่สม่ำเสมอของระดับแสงสว่างของหลอดไฟ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากแรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) ซึ่งในบางครั้งการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ตาของเรานั้นจะสังเกตเห็นหลอดไฟกระพริบได้ แต่นั่นไม่ใช่ความหมายของไฟกระพริบ

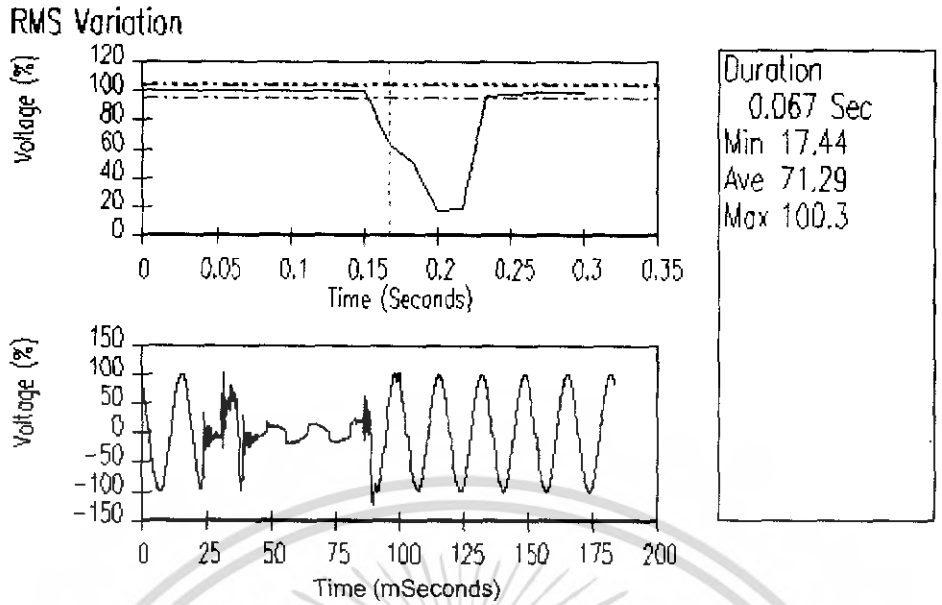
3.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ [7,11]

การเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้ามีสาเหตุเกิดขึ้นจากเหตุการณ์ต่างๆ ดังนี้คือ

3.1.1 การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ ส่วนใหญ่จะเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรลงดินแบบหนึ่งเฟส ในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าฯ หรือฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากระบบอื่นๆ ที่มีการเชื่อมต่อระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบของการไฟฟ้าฯ เช่น ระบบของ SPP (Small Power Producer) และ IPP (Independent Power Producer) หรือของผู้ใช้ไฟฟ้าเอง โดยสาเหตุการเกิดฟอลต์เนื่องจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าฯ นั้น ส่วนใหญ่จะทำการติดตั้งเหนือดิน (Overhead) โดยสายระบบจำหน่ายบางส่วนเป็นสายเปลือย ซึ่งได้ทำการส่งจ่ายไฟฟ้าเกือบทั่วประเทศและมีระยะทางที่ยาว ย่อมเป็นผลทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ ดังนี้ คือ

1) จากเหตุการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ทำให้เกิดแรงดันเกินจากเสิร์จขึ้นในระบบ ในกรณีที่เกินขีดค่าความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่มีอยู่ในระบบไม่สามารถที่จะทำการป้องกันได้ เป็นผลทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดการวาบไฟตามผิว (flash over) ลัดวงจรลงดิน และฟอลต์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นฟอลต์แบบการลัดวงจรลงดินแบบหนึ่งเฟส

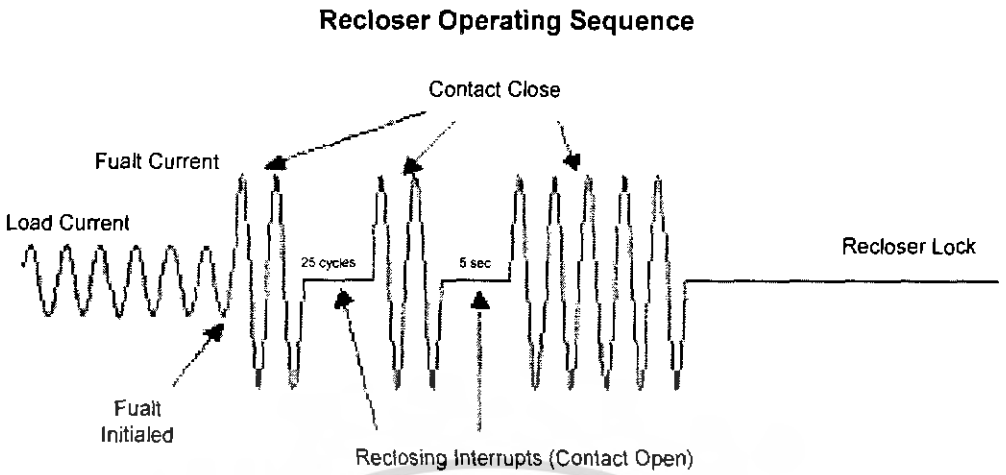
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การเกิดแรงดันตกชั่วขณะมีสาเหตุเกิดจากการลัดวงจรลงดินแบบหนึ่งเฟสทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 pu. ของแรงดันปกติ (80%Sag) ในช่วง 3 ไซเคิล [11]

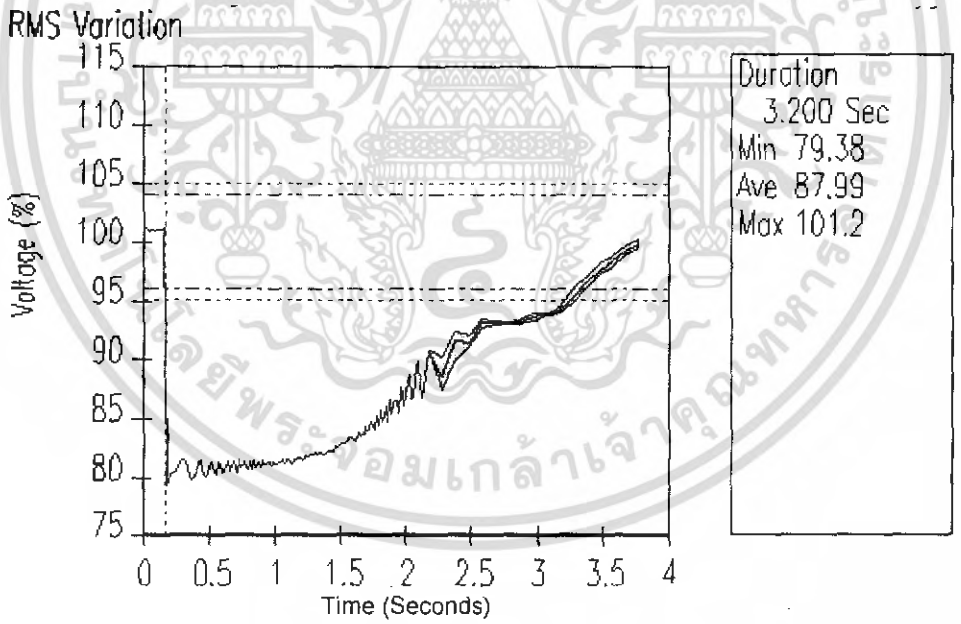
2) จากสภาพของลักษณะภูมิประเทศ เช่น ในพื้นที่มีต้นไม้ใกล้ระบบสายส่งหรือระบบจำหน่าย อาจทำให้เกิดเหตุการณ์กิ่งไม้ไปแตะสายไฟ หรือในพื้นที่มีงูอาจทำให้เกิดเหตุการณ์งูขึ้นเสาไฟฟ้าไปแตะสายไฟ หรือในพื้นที่อยู่ใกล้ทะเล หรือที่มีฝุ่นมาก จะทำให้เกิดการเร่งของค่าความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้ามีค่าลดลง จากผลดังกล่าวทำให้เกิดฟอลต์ขึ้นในระบบได้ และฟอลต์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดฟอลต์ และหากเกิดฟอลต์ดังกล่าวในระบบอุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีโคสเซอร์ และเซอร์กิดเบรกเกอร์ ก็จะทำหน้าที่ปิด-เปิดวงจรที่มีฟอลต์ออกจากระบบไปตามเวลาของขั้นตอนการทำงานที่ตั้งไว้ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เวลาลำดับขั้นตอนการทำงานปิด-เปิดวงจรของอุปกรณ์รีโคลเซอร์ [11]

3.1.2 การสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม มอเตอร์อินดักชันขณะสตาร์ตจะมีกระแสสูง สูงถึง 6-10 เท่าของกระแสโหลดปกติ ซึ่งแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นจะมีขนาดลดลงน้อยกว่าแรงดันตกชั่วขณะจากเหตุการณ์การเกิดฟอลต์ในระบบ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเกิดแรงดันตกชั่วขณะจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นของเหตุการณ์ฟ้าผ่าบริเวณใกล้ระบบสายส่งและระบบจำหน่าย ทำให้เกิดแรงดันดกชั่วขณะ

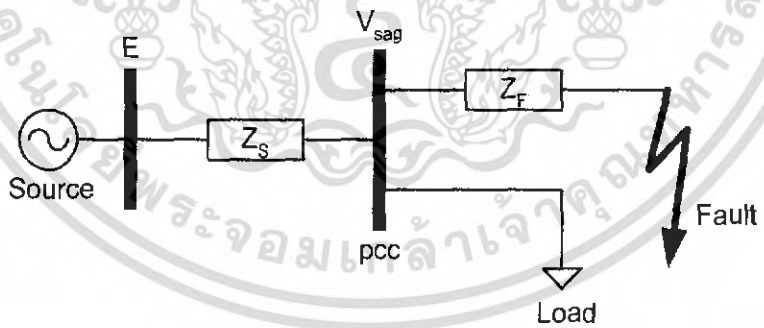
3.2 คุณลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ [7,11]

การเกิดแรงดันดกชั่วขณะ สาเหตุส่วนใหญ่มักมีผลสืบเนื่องมาจากการเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่าย แล้วส่งผลกระทบจนทำให้เกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะไปยังผู้ใช้ไฟในพื้นที่ข้างเคียง โดยความรุนแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะผันแปรโดยตรงกับขนาดของกระแสฟอลต์ ประเภทของฟอลต์ และระยะเวลาในการกำจัดฟอลต์ของอุปกรณ์ป้องกัน

ดังนั้นจะเห็นว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการบ่งชี้ระดับความรุนแรง ซึ่งจะสะท้อนถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้าด้วย อย่างไรก็ตามมาตรฐานต่างๆ ที่กล่าวถึงปัญหาแรงดันตกชั่วขณะนั้น โดยทั่วไปมักจะกล่าวแต่เพียงขนาดแรงดันที่เหลืออยู่ในระบบและระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ผลกระทบจากปัญหาแรงดันดกชั่วขณะที่มีต่ออุปกรณ์ซึ่งมีความไวสูงและไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงนั้น ยังมีส่วนอื่นที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย

องค์ประกอบที่เป็นลักษณะเฉพาะของแรงดันดกชั่วขณะประกอบไปด้วย

3.2.1 ขนาด โดยทั่วไปสามารถคำนวณหาขนาดของแรงดันดกชั่วขณะได้จากหลักการของโวลท์เตจดิไวเดอร์ (Voltage Divider) ดังรูปที่ 3.4 ยกตัวอย่างในกรณีที่เกิดฟอลต์ขึ้นในระบบที่เป็นแบบเรเดียล ขนาดของแรงดันดกชั่วขณะ (V_{sag}) ที่จุดต่อร่วม (Point-of-common coupling) หรือจุด pcc สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการ



รูปที่ 3.4 รูปแบบของโวลท์เตจดิไวเดอร์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} E \quad (3.1)$$

เมื่อ E คือ แรงดันแหล่งจ่าย, (V)

V_{sag} คือ ขนาดแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc เมื่อเกิดฟอลต์, (V)

Z_S คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้นทางของแหล่งจ่าย, (Ω)

Z_F คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด pcc กับจุดที่เกิดฟอลต์, (Ω)

ในกรณีที่ค่า Z_S และ Z_F ซึ่งเป็นค่าจำนวนเชิงซ้อนและมีอัตราส่วนของ X/R ที่เท่ากัน การเกิดฟอลต์ลักษณะเช่นนี้จะไม่มีผลจาก Phase-Angle Jump เข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในความเป็นจริงแล้วกรณีดังกล่าวเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นได้ยากมาก ดังนั้นปัญหาแรงดันตกชั่วขณะโดยส่วนใหญ่จึงต้องนำผลของ Phase-Angle Jump มาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาด้วย ดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2.3

3.2.2 ระยะเวลา จากสถิติของปัญหาแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นนั้น ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์จึงขึ้นอยู่กับการทำงานของอุปกรณ์ที่ติดตั้งป้องกันฟอลต์อยู่ในระบบ ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อมูลทั่วไปได้ดังนี้

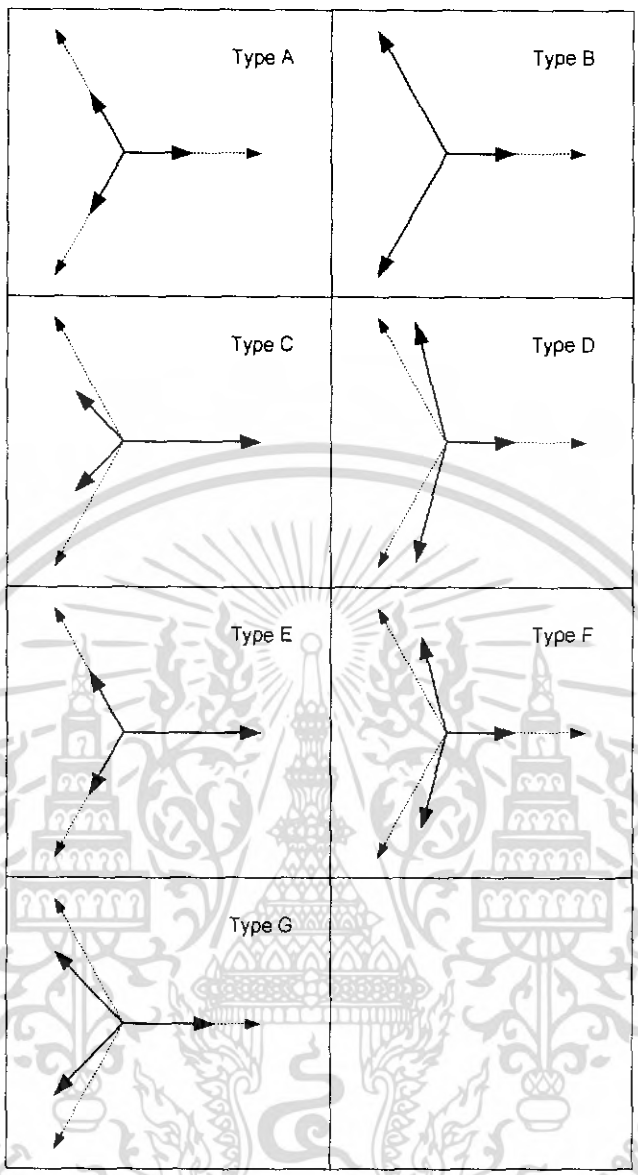
Current-Limiting Fuse	: น้อยกว่า 1 Cycle
Expulsion Fuse	: 10-1,000 ms
Distance Relay with Fast Breaker	: 50-100 ms
Distance Relay in Zone 1	: 100-200 ms
Distance Relay in Zone 2	: 200-500 ms
Differential Relay 3	: 100-300 ms
Over current Relay	: 200-2000 ms

3.2.3 Phase-Angle Jump ปัญหาการเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไม่ได้ทำให้ระดับแรงดันมีขนาดที่ลดลงเท่านั้น แต่ยังเป็นสาเหตุหลักที่สำคัญที่ทำให้เกิดปัญหา Phase-Angle Jump ที่ตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาด้วย

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right) \quad (3.2)$$

การพิจารณาปัญหาแรงดันตกชั่วขณะที่มีสาเหตุมาจากฟอลต์ในระบบ จะจำแนกรูปแบบของแรงดันตกชั่วขณะออกเป็น 7 แบบที่สำคัญตามการเกิดฟอลต์ได้แก่ ฟอลต์สามเฟส (Type A), ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน (Type B, C), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (Type C, D) และ ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน (Type E, F,G) ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แรงดันดกชั่วขณะแบบต่างๆ ในรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม [7,11]

3.3 การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์และระยะทางที่เกิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล [7]

การคำนวณหาขนาดแรงดันดกชั่วขณะ ในโครงงานนี้จะเริ่มจากรูปแบบที่ง่ายๆ ดังรูปที่ 3.4 เป็นระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้หลักการคำนวณพื้นฐานแบบโวลท์เตจดิไวเดอร์ โดยเป็นการคำนวณหาขนาดแรงดันดกชั่วขณะ เมื่อไม่สนใจกระแสของโหลด และสมมติให้แรงดันที่บัสของแหล่งจ่าย (E) เป็นแรงดันฐานมีค่าเป็น 1 pu. เขียนเป็นสมการหาขนาดแรงดันดกชั่วขณะได้ดังสมการที่ (3.3) และจากสมการนี้จะนำไปสู่สมการการหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_S} \tag{3.3}$$

เมื่อ V_{sag} คือ ขนาดแรงดันดกชั่วขณะที่จุด pcc เมื่อเกิดฟอลต์, (pu.)

Z_S คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ด้านทางของแหล่งจ่าย, (Ω)

Z_F คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วม (pcc) กับจุดที่เกิดฟอลต์, (Ω)

กำหนดให้ $Z_F = z\,x_{crit}$ (3.4)

และ $Z_S = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3} \times I_{fault}}$ (3.5)

โดย z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนต่อหน่วยความยาว, (Ω/m)

x_{crit} คือ ระยะทางระหว่างจุด pcc กับจุดที่เกิดฟอลต์, (m)

V_{nom} คือ ค่าแรงดันพิกัด Line to Line ที่แหล่งจ่าย, (V)

I_{fault} คือ ค่ากระแสฟอลต์ที่ไหลจากแหล่งจ่ายไปยังจุดที่เกิดฟอลต์, (A)

เมื่อแทนสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.3) จะได้

$$V_{sag} = \frac{z\,x_{crit}}{z\,x_{crit} + Z_S} \tag{3.6}$$

และเมื่อแทนสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.6) จะได้

$$V_{sag} = \frac{z\,x_{crit}}{z\,x_{crit} + \frac{V_{nom}}{\sqrt{3} \times I_{fault}}} \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) จะเห็นได้ว่า ขนาดของแรงดันดกชั่วขณะนั้นจะแปรเปลี่ยนตามระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x_{crit}) และขนาดของกระแสฟอลต์ (I_{fault}) ซึ่งในโครงงานนี้จะนำขนาดแรงดันตกชั่วขณะมาคำนวณหาระยะทาง ดังนั้นในการหาระยะทางที่เกิดฟอลต์นี้จะไม่สนใจกระแสของฟอลต์ จะนำสมการที่ (3.6) มาทำการหาระยะทางของฟอลต์จะได้

$$x_{crit} = \frac{Z_S}{z} \times \frac{V_{sag}}{1 - V_{sag}} \tag{3.8}$$

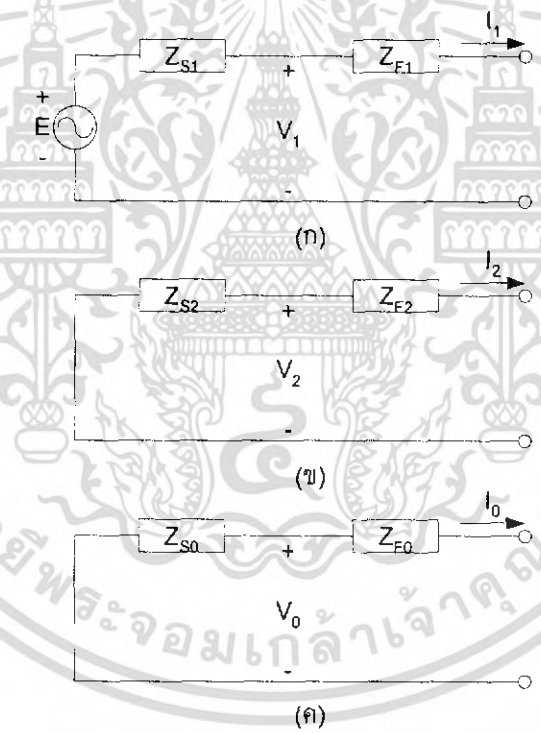
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สมการที่ (3.8) นี้สามารถใช้ได้กับระบบ 1 เฟส เท่านั้น สำหรับในระบบ 3 เฟส จะต้องใช้ค่า Z_S และ z ที่เป็นอิมพีแดนซ์ในลำดับต่างๆ ของวงจรดังสมการที่ (3.9) และ (3.10) ตามลักษณะการเกิดฟอลต์ซึ่งวงจรลำดับของการเกิดฟอลต์แบบต่างๆ สามารถดูได้ในหัวข้อที่ 2.3.5 เช่น ถ้าเป็นฟอลต์สามเฟสก็ใช้ค่า Z_S และ z ที่เป็นอิมพีแดนซ์ในลำดับบวกเท่านั้น ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน จะใช้ค่า Z_S และ z ที่เป็นอิมพีแดนซ์ในลำดับบวก, ลบ และศูนย์ เป็นต้น

$$Z_F = Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0} = \left(z_1 + z_2 + z_0\right) x_{crit} \quad (3.9)$$

$$Z_S = Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0} \quad (3.10)$$

ในระบบ 3 เฟส วงจรลำดับของรูปที่ 3.4 แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และเมื่อเกิดฟอลต์ วงจรลำดับจะต่อกันตามลักษณะการเกิดฟอลต์แต่ละชนิด ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 3.6 วงจรลำดับของวงจรในรูปที่ 3.4 [7]
(ก) วงจรลำดับบวก (ข) วงจรลำดับลบ (ค) วงจรลำดับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์สามเฟส ฟอลต์สามเฟสจะมีลักษณะการต่อของวงจรลำดับดังรูปที่ 3.7 ซึ่งมีเฉพาะองค์ประกอบลำดับบวกเท่านั้น และเมื่อให้ E = 1 pu. สามารถหาค่าแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc ในลำดับต่างๆ โดยใช้หลักการพื้นฐานของโวลท์เตจดิไวเดอร์ได้ดังสมการที่ (3.11) ถึง (3.13)

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}}{Z_{F1} + Z_{S1}} \tag{3.11}$$

$$V_2 = 0 \tag{3.12}$$

$$V_0 = 0 \tag{3.13}$$

จากสมการที่ (3.11) ถึง (3.13) และ (2.17) สามารถหาค่าแรงดันตกชั่วขณะในแต่ละเฟสที่จุด pcc ได้ดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{aligned} V_A &= 1 - \frac{Z_{S1}}{Z_{F1} + Z_{S1}} \\ V_B &= a^2 - \frac{a^2 Z_{S1}}{Z_{F1} + Z_{S1}} \\ V_C &= a - \frac{aZ_{S1}}{Z_{F1} + Z_{S1}} \end{aligned} \tag{3.14}$$

เมื่อคิดเฉพาะขนาดของแรงดันตกชั่วขณะในกรณีของฟอลต์สามเฟส แรงดันตกชั่วขณะทั้งสามเฟสจะมีขนาดเท่ากันเพราะเกิดฟอลต์ขึ้นทั้งสามเฟส นั่นคือ

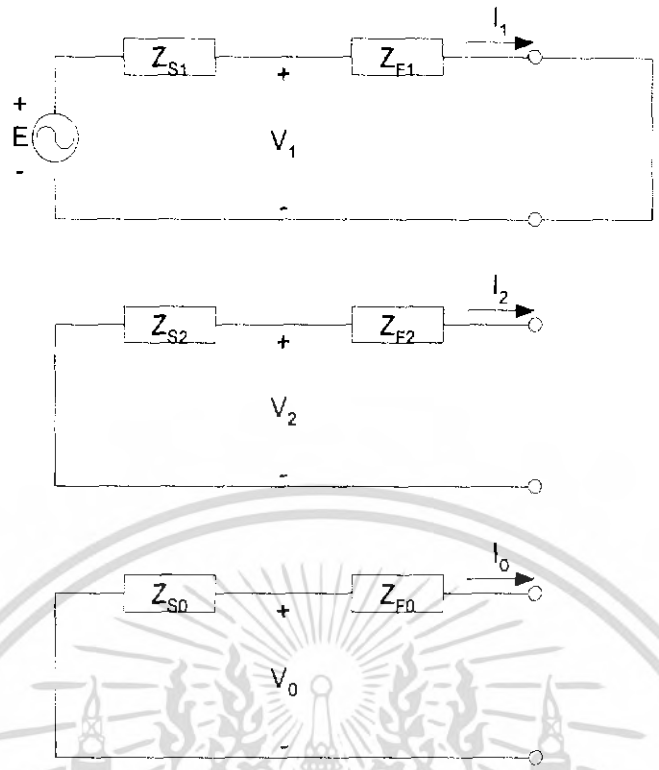
$$V_A = V_B = V_C = V_{sag}$$

$$V_{sag} = 1 - \frac{Z_{S1}}{Z_{F1} + Z_{S1}} \tag{3.15}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.15) ระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x_{crit}) ของฟอลต์สามเฟสสามารถหาได้เช่นเดียวกับระบบ 1 เฟส ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (3.16)

$$x_{crit} = \frac{Z_{S1}}{z_1} \times \frac{V_{sag}}{1 - V_{sag}} \tag{3.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์สามเฟส ของวงจรในรูปที่ 3.4

- แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดินจะมีลักษณะการต่อของวงจรลำดับดังรูปที่ 3.8 ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบลำดับบวก, ลบ และศูนย์ เมื่อให้ E = 1 pu. สามารถหาค่าแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc ในลำดับต่างๆ โดยใช้หลักการพื้นฐานของโวลท์เตจดิไวเดอร์ได้ดังสมการที่ (3.17) ถึง (3.19)

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}}{(Z_{F1}+Z_{F2}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})} \quad (3.17)$$

$$V_2 = -\frac{Z_{S2}}{(Z_{F1}+Z_{F2}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})} \quad (3.18)$$

$$V_0 = -\frac{Z_{S0}}{(Z_{F1}+Z_{F2}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.17) ถึง (3.19) และ (2.17) สามารถหาค่าแรงดันตกชั่วขณะในแต่ละเฟสที่จุด pcc ได้ดังสมการที่ (3.20)

$$V_A = 1-\frac{(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})}{(Z_{F1}+Z_{F2}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})}$$

$$V_B = a^2-\frac{(a^2Z_{S1}+aZ_{S2}+Z_{S0})}{(Z_{F1}+Z_{F2}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})} \quad (3.20)$$

$$V_C = a-\frac{(aZ_{S1}+a^2Z_{S2}+Z_{S0})}{(Z_{F1}+Z_{F2}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{S2}+Z_{S0})}$$

เมื่อคิดเฉพาะขนาดของแรงดันตกชั่วขณะในกรณีของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน และโดยปกติแล้วอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_S) และสายป้อน (Z_F) ในลำดับบวกและลบจะใกล้เคียงหรือเท่ากัน นั่นคือ $Z_{S1} = Z_{S2}$ และ $Z_{F1} = Z_{F2}$ สมมุติเกิดฟอลต์ที่เฟส A จะได้แรงดันตกชั่วขณะดังสมการที่ (3.21) ส่วนอีกสองเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์จะมีขนาดแรงดันเท่ากับระบบ

$$V_B = V_C = E$$

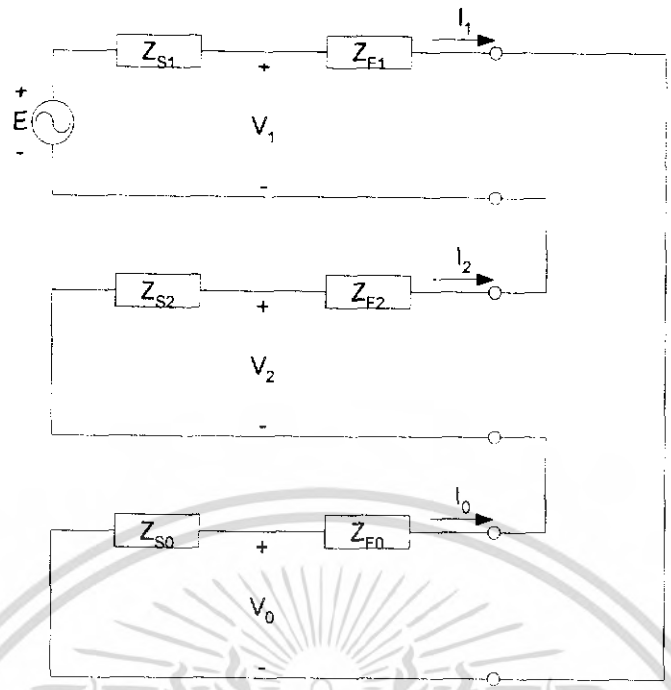
$$V_A = V_{sag}$$

$$V_{sag} = 1-\frac{(2Z_{S1}+Z_{S0})}{(2Z_{F1}+Z_{F0})+(2Z_{S1}+Z_{S0})} \quad (3.21)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.21) สามารถหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x_{crit}) ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ได้ดังสมการที่ (3.22)

$$x_{crit} = \frac{2Z_{S1}+Z_{S0}}{2z_1+z_0}\times\frac{V_{sag}}{1-V_{sag}} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ของวงจรในรูปที่ 3.4 [7]

- แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟสจะมีลักษณะการต่อของวงจรลำดับดังรูปที่ 3.9 ซึ่งมีเฉพาะองค์ประกอบลำดับบวกและลบเท่านั้น ส่วนองค์ประกอบลำดับศูนย์ไม่มีเพราะไม่ได้ต่อลงดิน เมื่อให้ E = 1 pu. สามารถหาค่าแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc ในลำดับต่างๆ โดยใช้หลักการพื้นฐานของโวลท์เดจดิไวเดอร์ได้ดังสมการที่ (3.23) ถึง (3.25)

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (3.23)$$

$$V_2 = \frac{Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (3.24)$$

$$V_0 = 0 \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.23) ถึง (3.25) และ (2.17) สามารถหาค่าแรงดันดกชั่วขณะในแต่ละเฟสที่จุด pcc ได้ดังสมการที่ (3.26)

$$V_A = 1 - \frac{Z_{S1} - Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})}$$

$$V_B = a^2 - \frac{a^2 Z_{S1} - aZ_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})} \quad (3.26)$$

$$V_C = a - \frac{aZ_{S1} - a^2 Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{S2})}$$

เมื่อคิดเฉพาะขนาดของแรงดันดกชั่วขณะในกรณีของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส และโดยปกติแล้วอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_S) และสายป้อน (Z_F) ในลำดับบวกและลบจะใกล้เคียงหรือเท่ากัน นั่นคือ $Z_{S1} = Z_{S2}$ และ $Z_{F1} = Z_{F2}$ ดังนั้นแรงดันดกชั่วขณะของเฟสที่เกิดฟอลต์ทั้งสองเฟสจะมีขนาดเท่ากัน ส่วนอีกเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์จะมีขนาดแรงดันเท่ากับระบบ สมมุติเกิดฟอลต์ที่เฟส B กับเฟส C จะได้

$$V_A = E$$

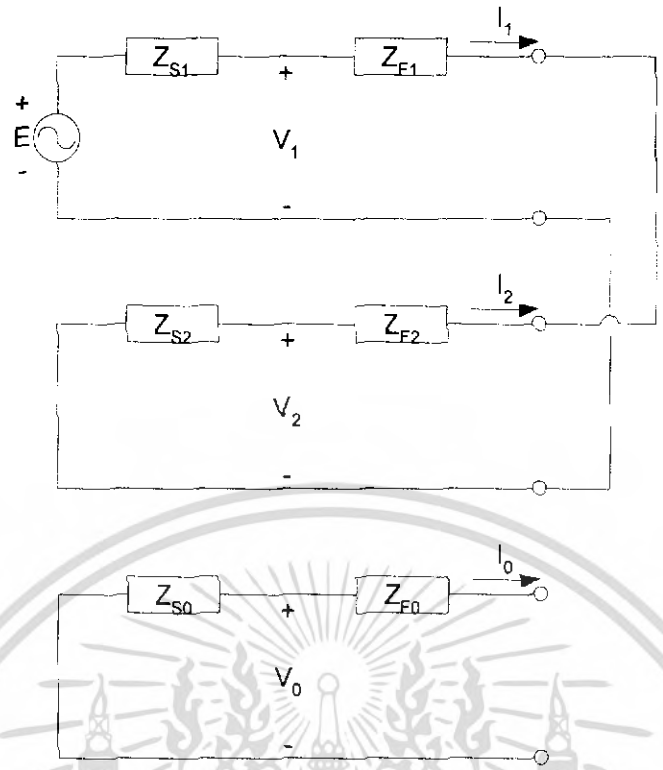
$$V_B = V_C = V_{sag}$$

$$V_{sag} = 1 - \frac{Z_{S1}}{2Z_{F1} + 2Z_{S1}} \quad (3.27)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.27) สามารถหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x_{crit}) ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ได้ดังสมการที่ (3.28)

$$x_{crit} = \frac{Z_{S1}}{2z_1} \times \frac{2V_{sag} - 1}{1 - V_{sag}} \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ของวงจรในรูปที่ 3.4 [7]

- แรงดันดกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน จะมีลักษณะการต่อของวงจรลำดับดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบลำดับบวก, ลบและศูนย์ เมื่อให้ E = 1 pu. สามารถหาค่าแรงดันดกชั่วขณะที่จุด pcc ในลำดับต่างๆ โดยใช้หลักการพื้นฐานของโวลท์เตจดิไวเดอร์ได้ดังสมการที่ (3.29) ถึง (3.31)

$$V_1 = 1 - \frac{Z_{S1}\left(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0}\right)}{\left(Z_{S2}+Z_{F2}\right)\left(Z_{S0}+Z_{F0}\right)+\left(Z_{S1}+Z_{F1}\right)\left(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0}\right)} \quad (3.29)$$

$$V_2 = \frac{Z_{S2}\left(Z_{S0}+Z_{F0}\right)}{\left(Z_{S2}+Z_{F2}\right)\left(Z_{S0}+Z_{F0}\right)+\left(Z_{S1}+Z_{F1}\right)\left(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0}\right)} \quad (3.30)$$

$$V_0 = \frac{Z_{S0}\left(Z_{S2}+Z_{F2}\right)}{\left(Z_{S2}+Z_{F2}\right)\left(Z_{S0}+Z_{F0}\right)+\left(Z_{S1}+Z_{F1}\right)\left(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0}\right)} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.29) ถึง (3.31) และ (2.17) สามารถหาค่าแรงดันตกชั่วขณะในแต่ละเฟสที่จุด pcc ได้ดังสมการที่ (3.32)

$$V_A = 1-\frac{(Z_{S1}-Z_{S0})(Z_{S2}+Z_{F2})+(Z_{S1}-Z_{S2})(Z_{S0}+Z_{F0})}{(Z_{S2}+Z_{F2})(Z_{S0}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{F1})(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0})}$$

$$V_B = a^2-\frac{(a^2Z_{S1}-Z_{S0})(Z_{S2}+Z_{F2})+(a^2Z_{S1}-aZ_{S2})(Z_{S0}+Z_{F0})}{(Z_{S2}+Z_{F2})(Z_{S0}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{F1})(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0})} \quad (3.32)$$

$$V_C = a-\frac{(aZ_{S1}-Z_{S0})(Z_{S2}+Z_{F2})+(aZ_{S1}-a^2Z_{S2})(Z_{S0}+Z_{F0})}{(Z_{S2}+Z_{F2})(Z_{S0}+Z_{F0})+(Z_{S1}+Z_{F1})(Z_{S2}+Z_{F2}+Z_{S0}+Z_{F0})}$$

เมื่อคิดเฉพาะขนาดของแรงดันตกชั่วขณะในกรณีของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน และโดยปกติแล้วอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_S) และสายป้อน (Z_F) ในลำดับบวกและลบจะใกล้เคียงหรือเท่ากัน นั่นคือ $Z_{S1} = Z_{S2}$ และ $Z_{F1} = Z_{F2}$ ดังนั้นแรงดันตกชั่วขณะของเฟสที่เกิดฟอลต์ทั้งสองเฟสจะมีขนาดเท่ากัน ส่วนอีกเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์จะมีขนาดแรงดันเท่ากับระบบ สมมุติเกิดฟอลต์ที่เฟส B กับเฟส C จะได้

$$V_A = E$$

$$V_B = V_C = V_{sag}$$

$$V_{sag} = 1-\frac{Z_{S1}(3Z_{S1}+Z_{F1}+Z_{F0})}{3Z_{S1}^2+Z_{S1}(4Z_{F1}+2Z_{F0})+Z_{F1}(Z_{F1}+2Z_{F0})} \quad (3.33)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.33) สามารถหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x_{crit}) ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน ได้ดังสมการที่ (3.34)

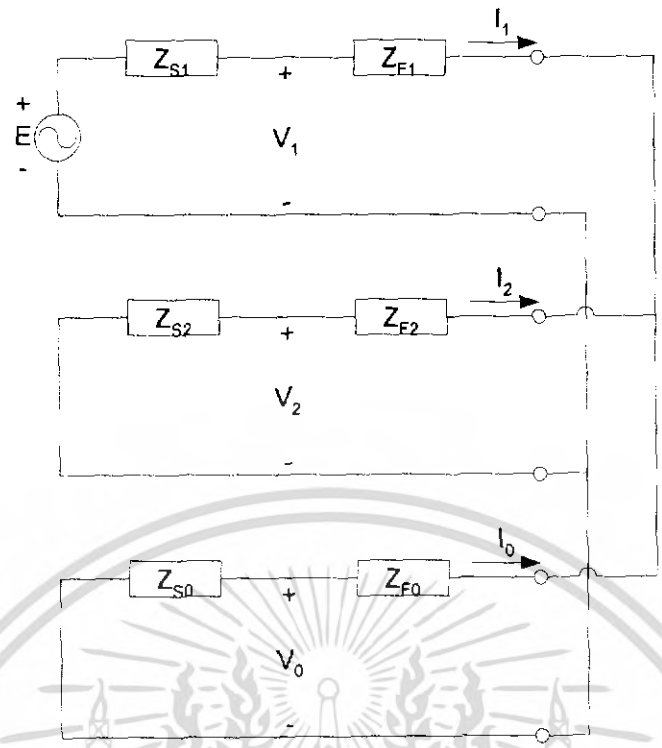
$$x_{crit} = \frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \quad (3.34)$$

โดย $a = (z_1^2+2z_1z_0)(1-V_{sag})$

$b = (3z_1+z_0)Z_{S1}-(4z_1+2z_0)Z_{S1}V_{sag}$

$c = -3Z_{S1}^2V_{sag}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรลำดับของการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน ของวงจรในรูปที่ 3.4 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบและการจำลองการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า

ในบทนี้เป็นการออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อจำลองการเกิดฟอลต์โดยใช้โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงรูปแบบของระบบไฟฟ้าที่จำลองขึ้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้า การเลือกใช้โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าและ การศึกษาใช้งานโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้าที่สามารถแก้ปัญหาที่ต้องการศึกษา ตามวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์นี้

4.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าที่จำลอง

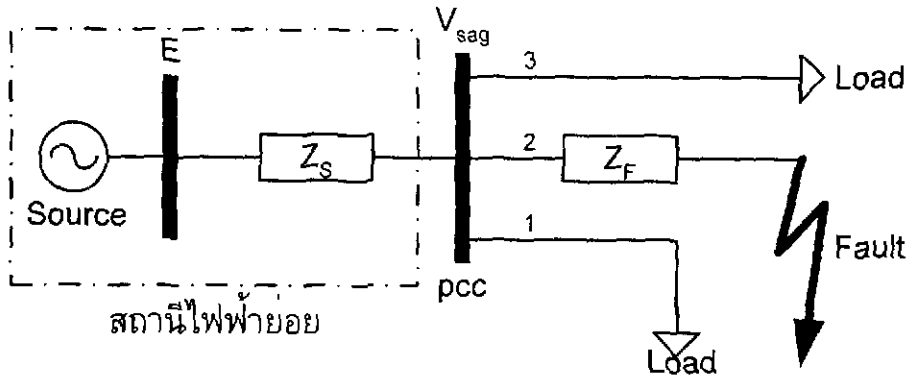
จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 1 แล้วว่ารูปแบบการจ่ายพลังไฟฟ้าของสายป้อนในระบบจำหน่ายมีอยู่ 3 แบบ ซึ่งได้แก่

1. วงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (radial-type primary feeder)
2. วงจรสายป้อนหลักแบบลูป (loop-type primary feeder)
3. วงจรสายป้อนหลักแบบตาข่าย (network-type primary feeder)

และในปริญญานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาระบบไฟฟ้าที่เป็นแบบเรเดียล ดังนั้นในการออกแบบการจำลองระบบไฟฟ้าจึงจำลองระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล โดยจำลองเป็นชุดสถานีไฟฟ้าย่อยเพียง 1 ชุด ซึ่งเป็นระบบเรเดียลอย่างง่ายมีรูปแบบวงจรดังรูปที่ 4.1

โดย
- Source คือ สถานีไฟฟ้าย่อย
- E คือ พิกัดแรงดันของสถานีไฟฟ้าย่อย (kV)
- Z_s คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยรวม (Ω)
- pcc คือ บัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าย่อย
- 1,2,3 คือ สายป้อนชุดที่ 1,2,3 ตามลำดับ
- Z_F คือ อิมพีแดนซ์ของสายป้อน (Ω)
- Fault คือ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบวงจรที่ใช้ในการจำลองระบบแบบเรเดียล

4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับโปรแกรมการจำลองระบบไฟฟ้าว่าต้องการค่าอะไรบ้าง ในการจำลองระบบรูปแบบใด และในปริญญานิพนธ์นี้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่โปรแกรมจำลองระบบต้องการคือ ค่าพารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย (Source) หรือสถานีไฟฟ้าย่อยนั่นเอง และค่าพารามิเตอร์ของสายป้อน ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยอ้างอิงจากเวิร์คช็อปการประยุกต์ใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในการวิเคราะห์ทรานเซี้ยนในระบบไฟฟ้า ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย[12]

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการจำลองระบบ [12]

แหล่งจ่ายขนาดพิกัด 24 kV (MVA Fault = 250)	R_S = 1.43 Ω X_S = 14.33 Ω
สายส่งชนิด Space Aerial Cable (ASC) ขนาด 185 mm^2	R_{F1} = 0.201 Ω/km R_{F0} = 0.603 Ω/km X_{F1} = 0.227 Ω/km X_{F0} = 0.681 Ω/km C_1 = 0.01638 μF/km C_0 = 0.00819 μF/km

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเลือกโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า

ในการเลือกโปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้านั้นจะต้องคำนึงถึงจุดประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน โดยในปริญญานิพนธ์นี้โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบไฟฟ้าต้องมีความสามารถในการทำงานได้ดังนี้

1. สามารถทำการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในระบบ 12, 22, 24 และ 33 kV ได้

2. สามารถจำลองการเกิดฟอลต์ในสายป้อนแบบชั่วคราวได้ โดยสามารถเลือกชนิดของการเกิดฟอลต์ได้หลายชนิด เช่น ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน และฟอลต์สามเฟส เป็นต้น

3. สามารถวัดค่าแรงดันดกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในสายป้อนข้างเคียงได้ และค่าแรงดันดกชั่วขณะที่วัดได้ในโปรแกรมต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการแรงดันดกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์ในบทที่ 3

4. ค่าแรงดันดกชั่วขณะต้องสามารถแสดงเป็นกราฟได้เพื่อให้เห็นผลการจำลองได้อย่างชัดเจน

5. มีอุปกรณ์ในการจำลองระบบไฟฟ้าให้เลือกได้หลากหลาย และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง

จากการที่ได้ทำการศึกษาโปรแกรมจำลองระบบทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆ ได้แก่ ATPDraw, ETAP version 4.0, PSS/Adept และ PSCAD version 4.1 ในกรณีที่ต้องการวัดค่าแรงดันดกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์ในระบบไฟฟ้า ทำให้ได้ผลการเปรียบเทียบของโปรแกรมต่างๆ ดังตารางที่ 4.2 และจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าโปรแกรมที่มีความสามารถตามความต้องการข้างต้นนั้นมีอยู่สองโปรแกรมคือ โปรแกรม ATPDraw และ PSCAD version 4.1 ดังนั้นจึงนำโปรแกรมทั้งสองทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลแรงดันดกชั่วขณะของแต่ละโปรแกรม โดยจะแสดงการจำลองเป็นฟอลต์ระหว่างเฟส-ดินแบบง่ายๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบโปรแกรมจำลองระบบ

โปรแกรมจำลองระบบไฟฟ้า	มีความสามารถในการทำงานตามข้อ...	ข้อเสีย
ATPDraw	1, 2, 3, 4 และ 5	- มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนชนิดของฟอลต์ - การรันโปรแกรมใช้เวลานาน
ETAP version 4.0	1, 3, 4 และ 5	- ไม่สามารถจำลองการเกิดฟอลต์ตามที่ต้องการได้
PSS/Adept	1, 2, 3 และ 5	- ไม่สามารถแสดงผลในรูปกราฟได้
PSCAD version 4.1	1, 2, 3, 4 และ 5	- ลักษณะของอุปกรณ์ในการจำลองทำให้ดูซับซ้อน

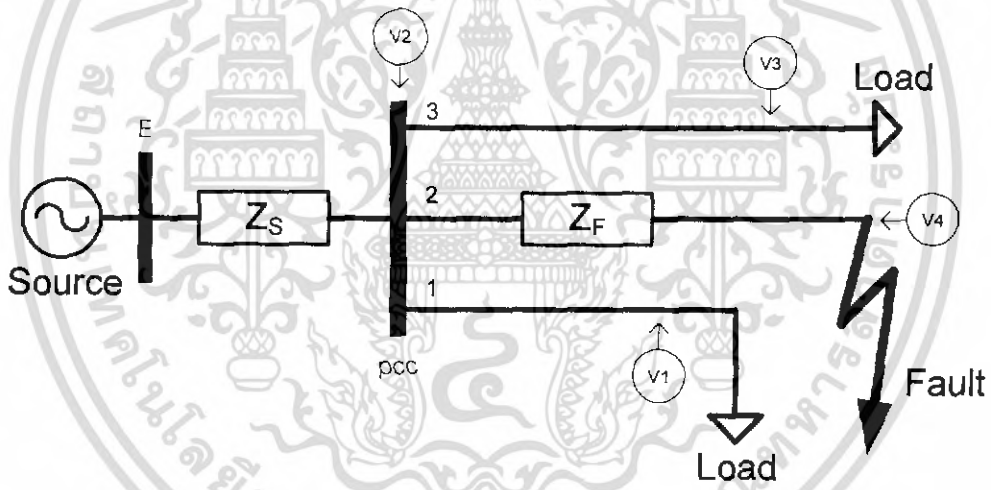
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การจำลองการเกิดฟอลต์ด้วยโปรแกรม PSCAD

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า 24 kV ซึ่งเป็นการจำลองให้เกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ตามลักษณะวงจรตัวอย่างดังรูปที่ 4.2 (ก) และจะได้วงจรในโปรแกรม PSCAD ดังรูปที่ 4.2 (ข) แล้วทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันตกชั่วขณะกับค่าที่วัดได้ในการจำลองระบบ โดยที่จุด pcc ให้มีการต่อสายป้อนจำนวน 3 ชุด กำหนดให้เกิดฟอลต์ขึ้นที่สายป้อนชุดที่ 2 เฟส C มีระยะทาง 15 km จากจุด pcc และมีจุดวัดค่าแรงดัน 4 ตำแหน่ง คือ

1. ณ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ (V4)
2. ที่จุด pcc (V2)
3. ที่ปลายสายป้อนชุดที่ 1 (V1) เป็นระยะทาง 23 km
4. ที่ปลายสายป้อนชุดที่ 3 (V3) เป็นระยะทาง 19 km

กำหนดให้เกิดฟอลต์เป็นเวลา 150 mSec โดยเริ่มเกิดขึ้นที่เวลา 0.2 Sec นับจากการเริ่มต้นการทำงานของระบบ และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

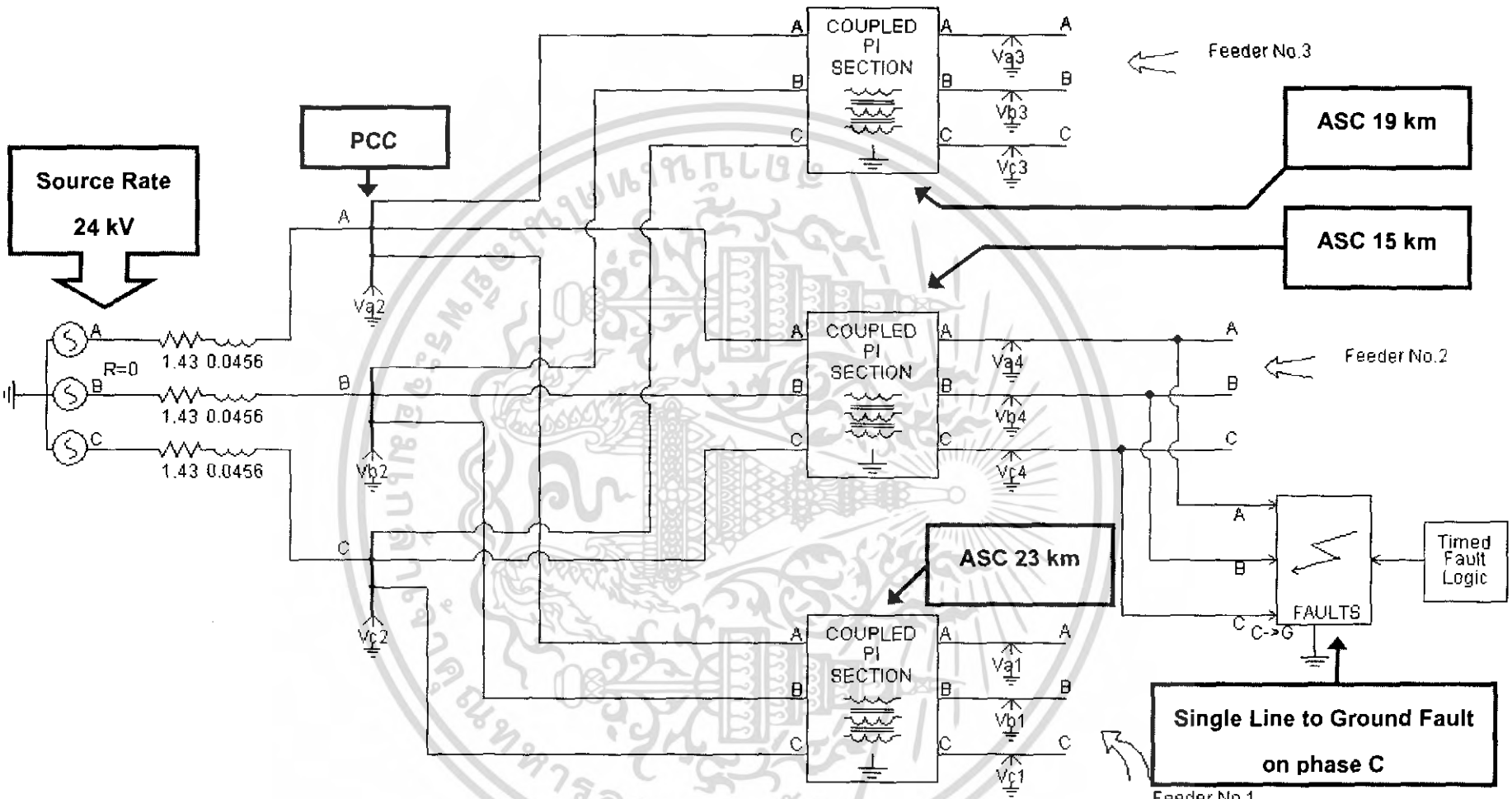


(ก)

รูปที่ 4.2 รูปแบบวงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ

(ก) วงจรตัวอย่างที่ใช้จำลองระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



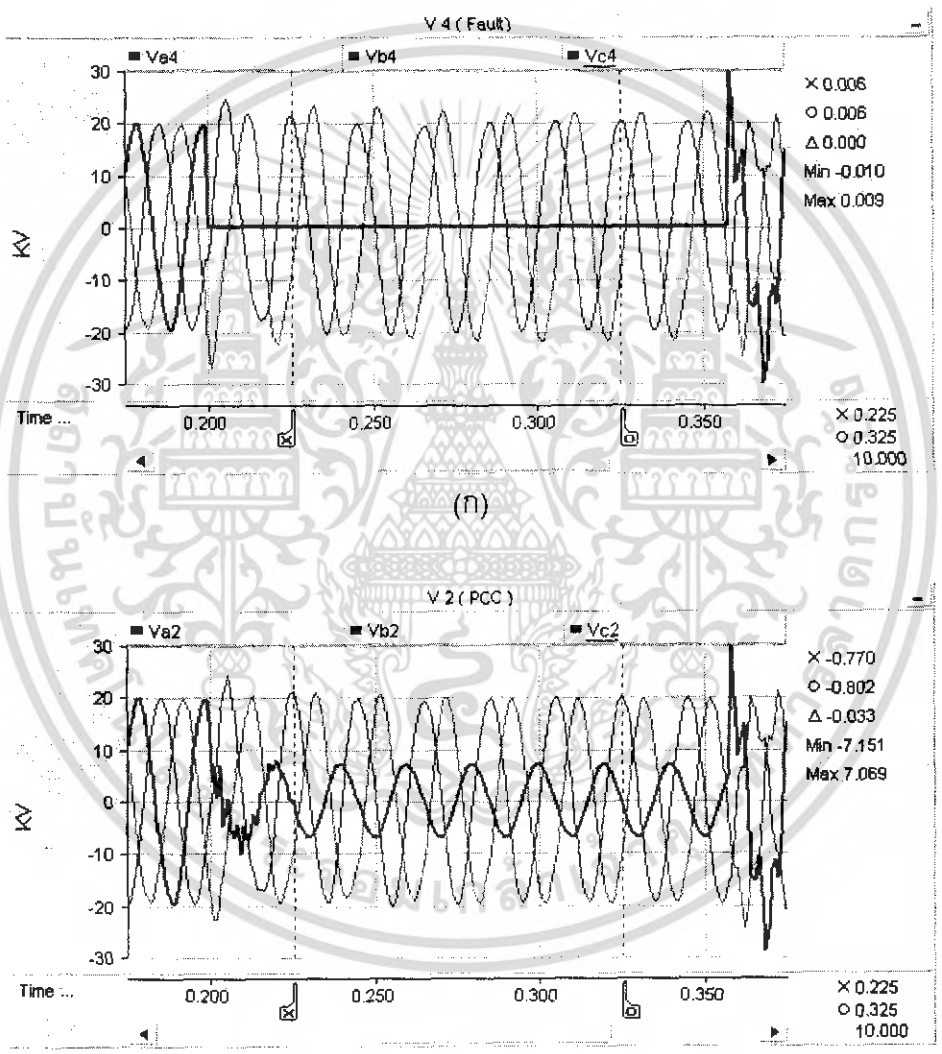
(ข)

รูปที่ 4.2 (ต่อ) รูปแบบวงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ

(ข) วงจรที่สร้างโดยโปรแกรม PSCAD ตามวงจรตัวอย่าง

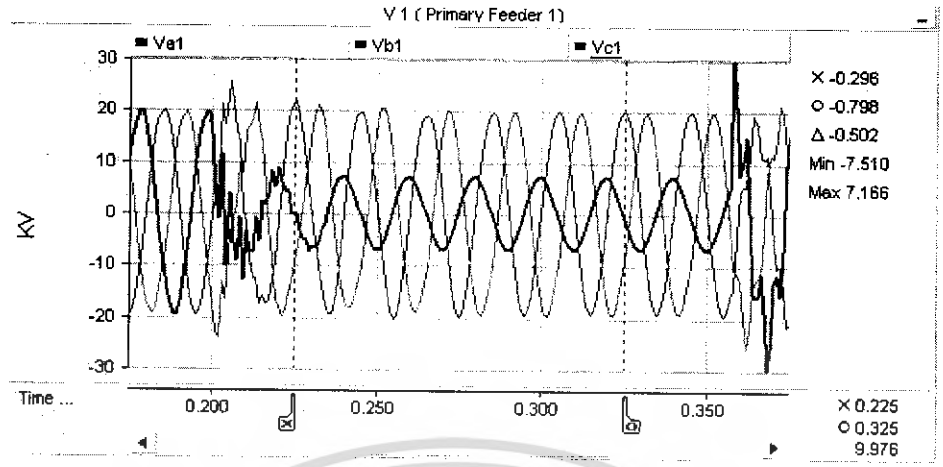
ขั้นตอนในการใช้โปรแกรม PSCAD เพื่อจำลองการเกิดฟอลต์นั้นสามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ก. ส่วนผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่าแรงดันตกชั่วขณะที่วัดได้จากจุดวัดทั้ง 4 ตำแหน่งในวงจรจำลองระบบ

จากผลการจำลองการเกิดฟอลต์แบบเฟส-ดิน จะเห็นได้ว่าที่สายป้อนที่เกิดฟอลต์ (V4) แรงดันของเฟส C ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดฟอลต์ จะมีค่าเป็นศูนย์ในช่วงเวลาของการเกิดฟอลต์ ส่วนที่สายป้อนข้างเคียงทั้งสอง (V1 และ V3) และจุด pcc (V2) ค่าแรงดันเฟส C จะลดลงเหลือประมาณ 7 kV ส่วนเฟส A และเฟส B ในแต่ละจุดยังคงมีค่าแรงดันใกล้เคียงกับค่าแรงดันปกติ

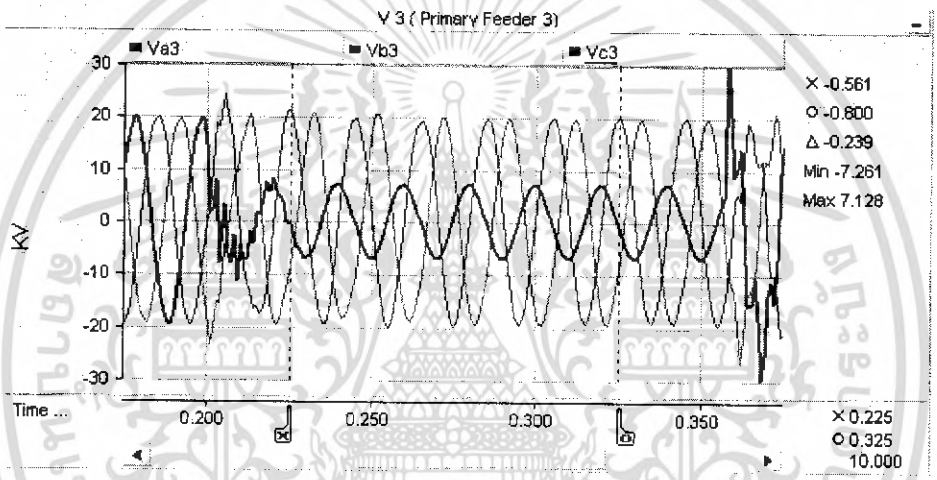


รูปที่ 4.3 ลักษณะของแรงดันตกที่วัดได้ในเฟส C ที่เกิดฟอลต์ ของ PSCAD
(ก) แรงดัน ณ จุดที่เกิดฟอลต์, V4 (ข) แรงดันตกที่จุด PCC, V2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

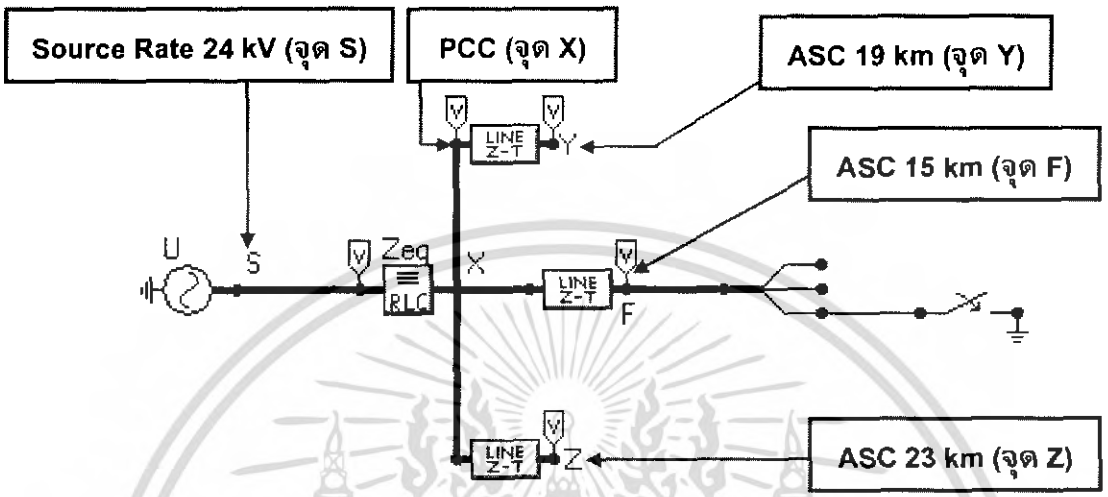
รูปที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแรงดันตกที่วัดได้ในเฟส C ที่เกิดฟอลต์ ของ PSCAD

(ค) แรงดันที่สายป้อน ASC 23 km, V1 (ง) แรงดันที่สายป้อน ASC 19 km, V3

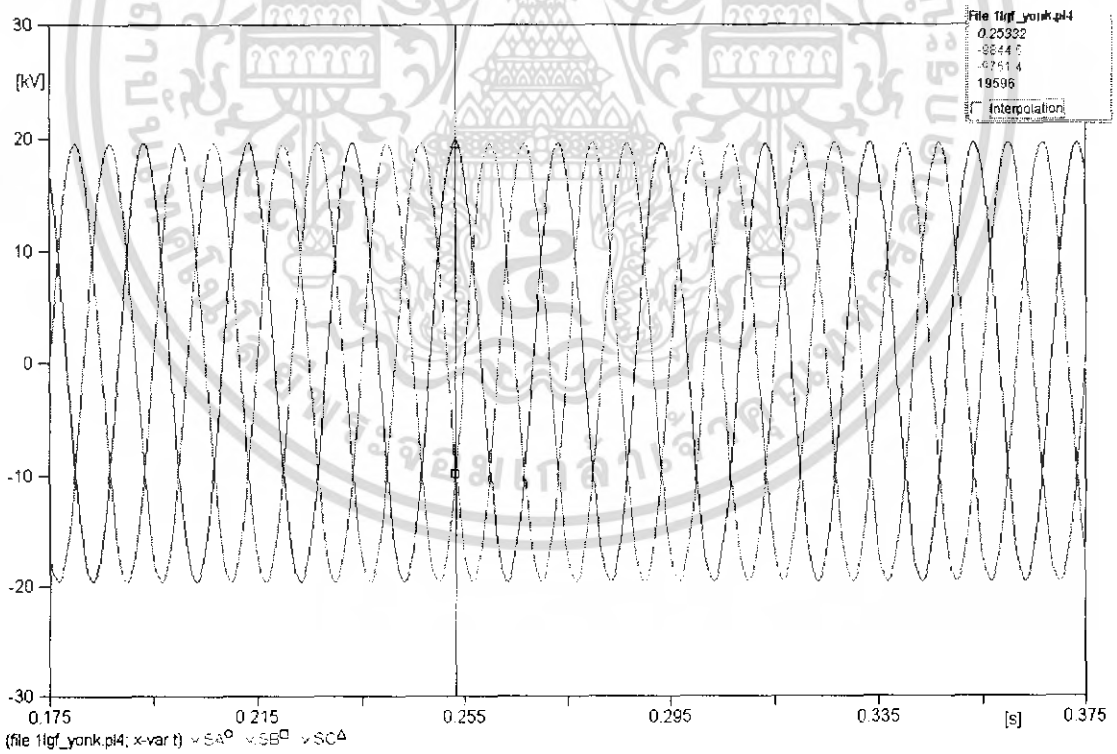
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การจำลองการเกิดฟอลต์ด้วยโปรแกรม ATP

การจำลองด้วยโปรแกรม ATP นี้ เป็นการจำลองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบ และรูปแบบการจำลองที่เหมือนกับโปรแกรม PSCAD เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลอง ซึ่งผลการจำลองของโปรแกรม ATP มีดังนี้

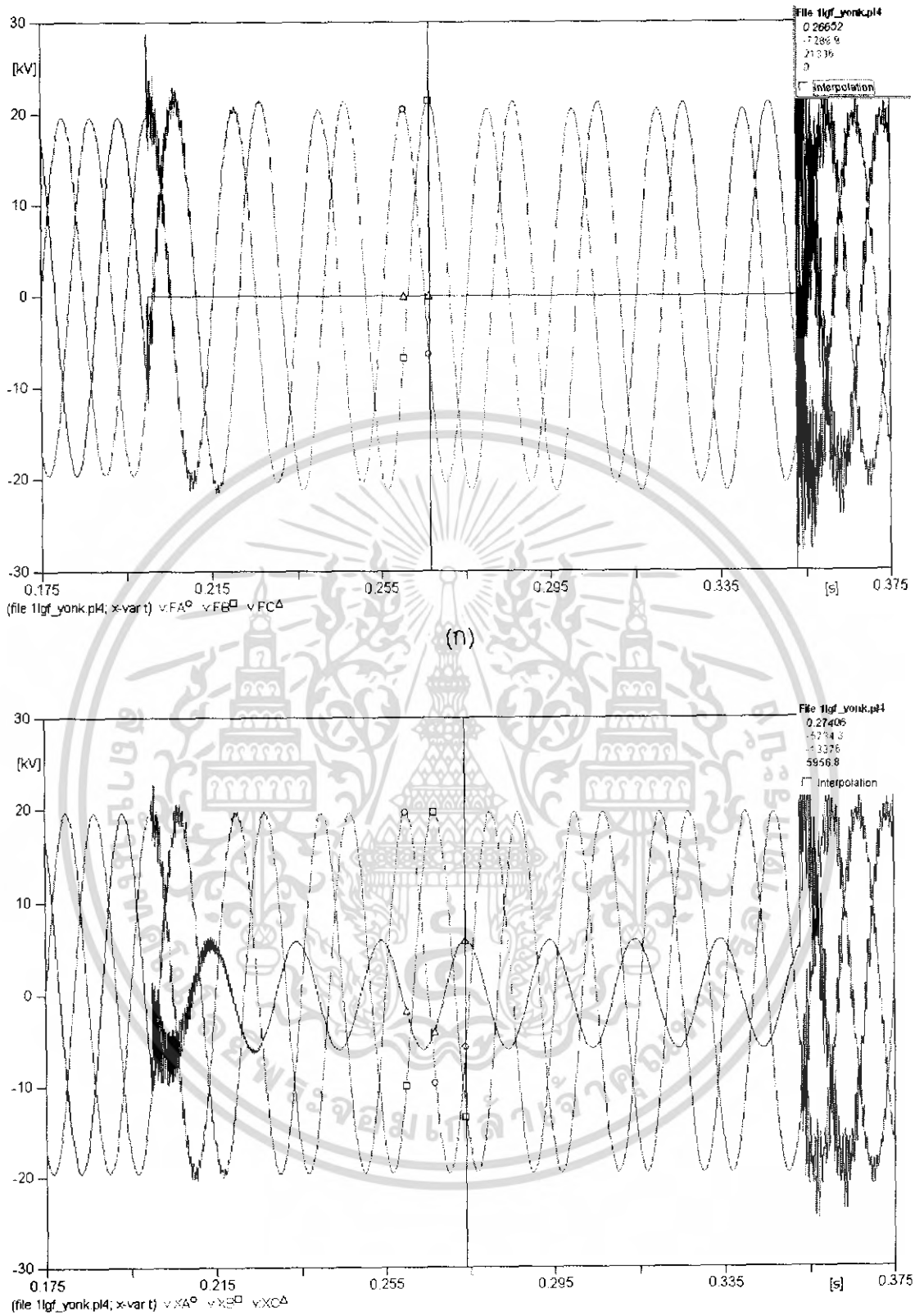


รูปที่ 4.4 รูปแบบการจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP



รูปที่ 4.5 แรงดันที่ Source, จุด S

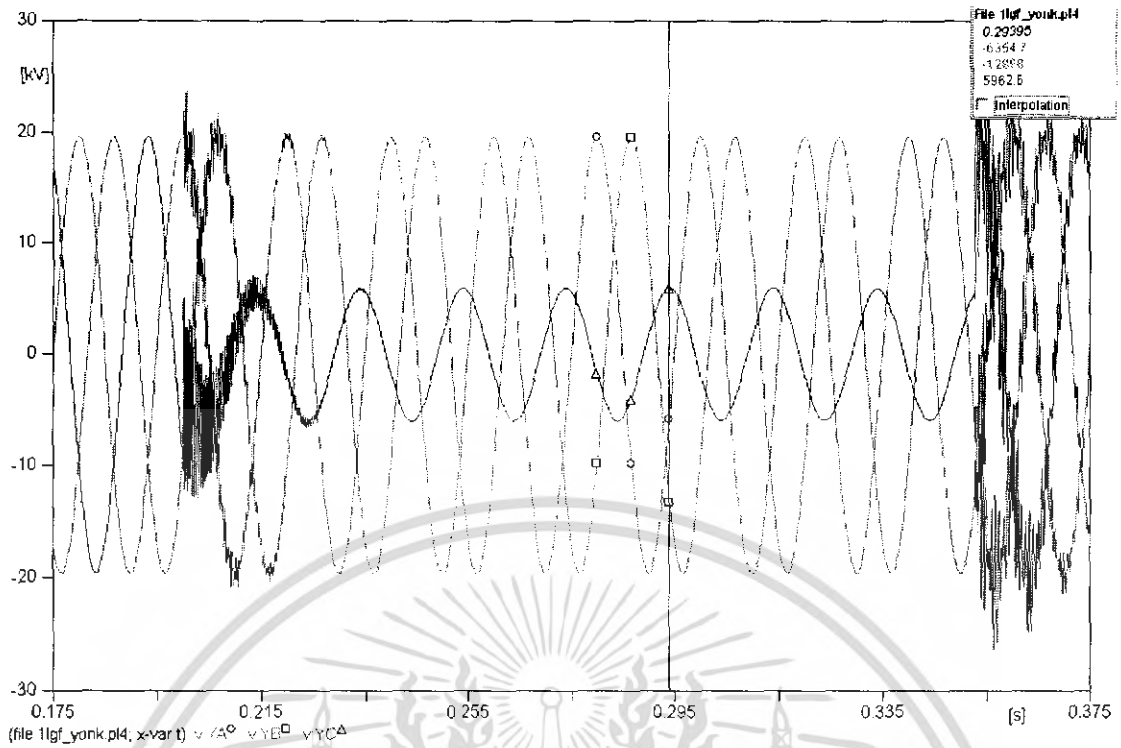
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



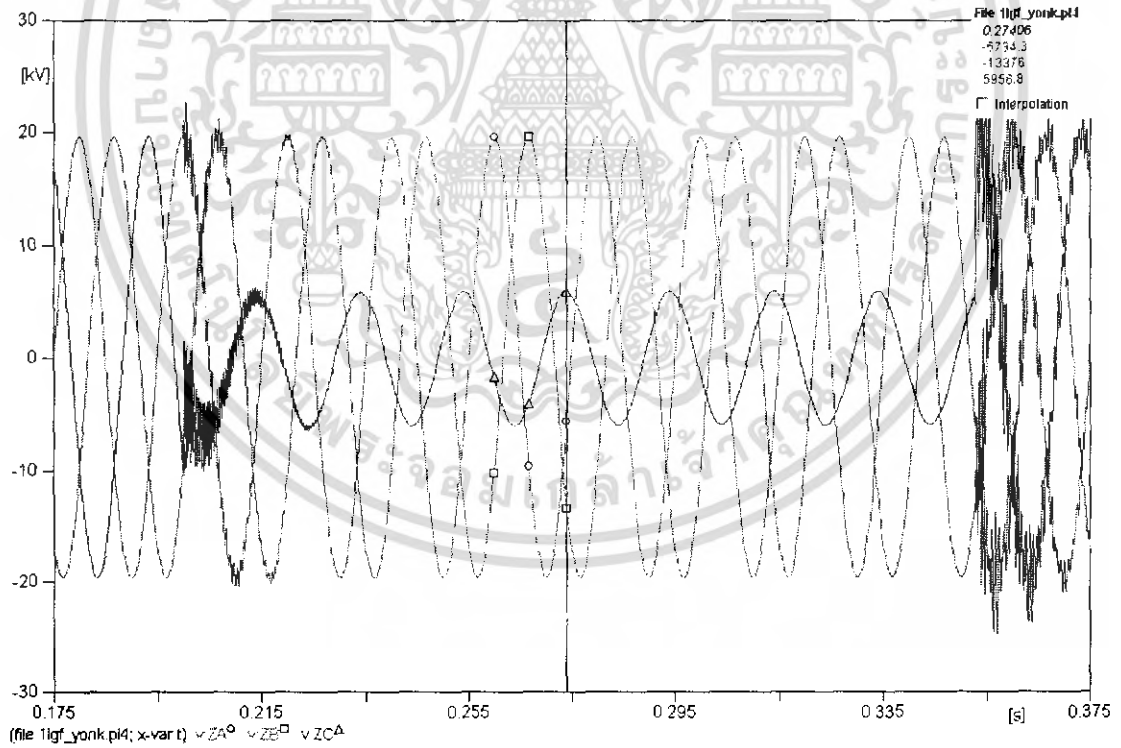
รูปที่ 4.6 ลักษณะของแรงดันตกที่วัดได้ในเฟส C ที่เกิดฟอลต์ ของ ATP

(ก) แรงที่จุดเกิดฟอลต์, จุด F (ข) แรงดันที่จุด pcc, จุด X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 (ต่อ) ลักษณะของแรงดันตกที่วัดได้ในเฟส C ที่เกิดฟอลต์ ของ ATP

(ค) แรงดันที่สายป้อน ASC 19 km, จุด Y (ง) แรงดันที่สายป้อน ASC 23 km, จุด Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองระบบของ PSCAD กับ ATP และการคำนวณ

จากข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc ได้จากสมการที่ (3.21) ซึ่งแรงดันตกชั่วขณะที่วัดได้ในโปรแกรมจำลองระบบนั้นเป็นค่ายอดของแรงดันเฟส-นิวตรอล ($V_{peak,\ L\text{-}N}$) ดังนั้นในการคำนวณแรงดันตกชั่วขณะจึงใช้ค่าแรงดันพิกัด (E) เป็นค่ายอดของแรงดันเฟส-นิวตรอล ($E_{peak,\ L\text{-}N}$) เพื่อให้ได้ผลของแรงดันตกชั่วขณะ ($V_{peak,\ L\text{-}N}$) เช่นเดียวกับการจำลองระบบ สำหรับฟอลต์ระหว่างเฟส-ดินนั้น แรงดันในเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลกระทบใดๆ เลย ดามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าแรงดันตกชั่วขณะที่วัดได้ในการจำลองระบบของทั้งสองโปรแกรมกับการคำนวณจะแสดงเพียงค่าแรงดันของเฟสที่เกิดฟอลต์เท่านั้นดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบค่าแรงดันตกชั่วขณะระหว่างโปรแกรมจำลองระบบทั้งสองโปรแกรมกับการคำนวณจากสมการที่ (3.21) จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันตกชั่วขณะของโปรแกรม PSCAD มีค่าน้อยกว่าโปรแกรม ATP ดังนั้นจึงเลือกโปรแกรม PSCAD ในการจำลองระบบเพื่อศึกษาหาสมการระบุตำแหน่งฟอลต์ และจะเห็นได้ว่าแรงดันตกชั่วขณะที่สายป้อนข้างเคียงทั้งสองชุดกับแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสนใจเพียงแรงดันตกชั่วขณะที่จุด pcc เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการหาแรงดันตกชั่วขณะดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบขนาดแรงดันตกชั่วขณะจากการคำนวณกับโปรแกรม

ตำแหน่งที่วัด	V_{sag} จากการคำนวณ	PSCAD		ATP	
		V_{sag} จากการจำลองระบบ	% Error	V_{sag} จากการจำลองระบบ	% Error
จุด pcc (V2)	6.757 kV	7.069 kV	4.617 %	5,956.8 V	11.843 %
สายป้อนชุดที่ 1 (V1)		7.166 kV	6.053 %	5,956.8 V	11.843 %
สายป้อนชุดที่ 3 (V3)		7.128 kV	5.491 %	5,962.6 V	11.757 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์

บทนี้เป็นการจำลองการเกิดฟอลต์ทั้งสี่ชนิดคือฟอลต์สามเฟส, ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน, ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส และฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน โดยจำลองระยะที่เกิดฟอลต์ตั้งแต่ 1 km ถึง 30 km เพื่อนำผลของแรงดันดกชั่วขณะมาคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์จากสมการที่ได้ศึกษามาในบทที่ 3 และเปรียบเทียบระยะทางที่เกิดฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณ (x_{crit}) กับระยะทางที่เกิดฟอลต์ที่ระบุในการจำลองระบบ (x) เพื่อดูค่าผลต่างของระยะทางที่คำนวณได้จากสมการ และหาทางลดค่าผลต่างให้น้อยลงไม่เกิน 1 km เพื่อนำไปสร้างโปรแกรมคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

5.1 ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault)

ในกรณีที่แรงดันพิกัด (E) มีค่าเป็น 1 pu. ฟอลต์สามเฟสมีสมการหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ x_{crit} ดังสมการที่ (3.16) แต่เมื่อแทน E เป็นค่าใดๆ ก็จะได้สมการ x_{crit} ดังสมการที่ (5.1) ซึ่งสมการนี้จะใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับการจำลองระบบ จากการจำลองการเกิดฟอลต์สามเฟส แรงดันดกชั่วขณะของทั้งสามเฟสมีค่าต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นแรงดันดกชั่วขณะที่ใช้ในการคำนวณ (V_{sag}) จะใช้แรงดันเฉลี่ยของทั้งสามเฟส ($V_{เฉลี่ย}$) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1

$$x_{crit} = \frac{Z_{S1}}{z_1} \times \frac{V_{sag}}{E - V_{sag}} \qquad (5.1)$$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x) เพิ่มมากขึ้นผลต่างของระยะทาง (y) ก็จะเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงค่าความผิดพลาดของสมการคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงหาวิธีลดค่าความผิดพลาด โดยการหาสมการของค่าความผิดพลาดหรือผลต่าง y เพื่อจะมาหักล้างกับผลต่างที่เกิดขึ้นของสมการ x_{crit} ซึ่งการลดค่าความผิดพลาดทำได้ดังนี้

1. นำข้อมูลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับการจำลองระบบในตารางที่ 5.1 ไปคำนวณด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในโปรแกรม Excel ดังภาคผนวก ข. โดยให้ข้อมูลของ x_{crit} เป็นตัวแปรต้น และข้อมูลของ y เป็นตัวแปรตาม จะได้เป็นสมการเส้นตรงของ y

$$y = -0.29256 + 0.074378\, x_{crit}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำสมการ y ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยไปบวกหรือลบกับสมการ x_{crit} เพื่อให้ได้สมการใหม่เป็น $New\,x_{crit}$ โดยดูจากผลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับค่า x

- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่ามากกว่าค่า x จะได้ $New\,x_{crit} = x_{crit} - y$
- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่าน้อยกว่าค่า x จะได้ $New\,x_{crit} = x_{crit} + y$

ในกรณีของฟอลต์สามเฟส x_{crit} มีค่ามากกว่าค่า x จะได้

$$New\,x_{crit} = x_{crit} - y$$

$$New\,x_{crit} = 0.29256+0.925622\,x_{crit}$$

หรือ

$$New\,x_{crit} = 0.29256+0.925622\left(\frac{Z_{S1}}{z_1}\times\frac{V_{sag}}{E-V_{sag}}\right)$$

ซึ่งผลการคำนวณของสมการ $New\,x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟสแสดงดังตารางที่ 5.2

จากกราฟรูปที่ 5.1 (ค) จะเห็นว่าผลต่างของระยะที่เกิดฟอลต์ของสมการ $New\,x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟสที่ระยะ 4 km ขึ้นไป จะมีค่าลดลงและมีผลต่างไม่เกิน 1 km ส่วนในระยะ 3 km แรก ผลต่างมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิน 1 km ดังนั้นผลต่างของระยะทางที่เกิดฟอลต์หรือค่าความคลาดเคลื่อนนี้ ถือว่าเป็นผลที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 x_{crit} ของฟอลต์สามเฟส (* คือ V_{sag} ที่นำมาคำนวณหา x_{crit})

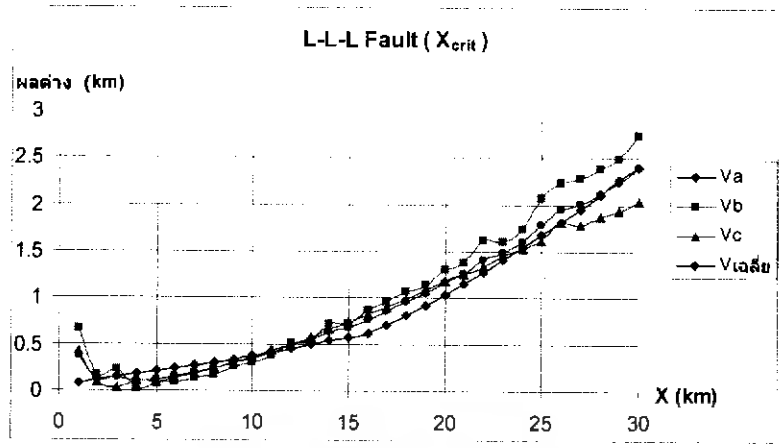
ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)				x_{crit} (km)	ผลต่างระยะทาง $y = \lvert x - x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
	V_A	V_B	V_C	$V_{เฉลี่ย}$*			
1	0.431	0.661	0.568	0.553	1.381	0.381	38.0156
2	0.836	0.857	0.824	0.839	2.126	0.126	6.22772
3	1.218	1.247	1.177	1.214	3.139	0.139	4.56201
4	1.583	1.528	1.559	1.557	4.101	0.101	2.46709
5	1.935	1.89	1.899	1.908	5.126	0.126	2.47051
6	2.274	2.225	2.242	2.247	6.155	0.155	2.52898
7	2.6	2.557	2.575	2.577	7.197	0.197	2.75815
8	2.915	2.876	2.897	2.896	8.241	0.241	2.9583
9	3.219	3.197	3.208	3.208	9.303	0.303	3.30828
10	3.512	3.494	3.51	3.505	10.35	0.353	3.4724
11	3.796	3.785	3.801	3.794	11.41	0.411	3.67209
12	4.07	4.086	4.083	4.08	12.5	0.496	4.06953
13	4.335	4.345	4.356	4.345	13.54	0.541	4.10226
14	4.591	4.635	4.621	4.616	14.64	0.643	4.53318
15	4.839	4.872	4.877	4.863	15.69	0.685	4.50847
16	5.079	5.135	5.125	5.113	16.78	0.778	4.80127
17	5.322	5.377	5.364	5.354	17.87	0.868	5.04247
18	5.56	5.614	5.597	5.59	18.97	0.969	5.32481
19	5.79	5.834	5.822	5.815	20.06	1.055	5.49212
20	6.014	6.069	6.045	6.043	21.19	1.189	5.88191
21	6.233	6.277	6.253	6.254	22.28	1.279	6.02808
22	6.445	6.508	6.457	6.47	23.43	1.426	6.41882
23	6.651	6.688	6.66	6.666	24.5	1.503	6.4734
24	6.852	6.886	6.85	6.863	25.61	1.614	6.66178
25	7.047	7.113	7.038	7.066	26.8	1.8	7.14004
26	7.237	7.305	7.237	7.26	27.97	1.967	7.50446
27	7.421	7.473	7.394	7.429	29.02	2.02	7.41965
28	7.602	7.646	7.566	7.605	30.14	2.139	7.57811
29	7.778	7.813	7.73	7.774	31.25	2.249	7.69461
30	7.947	7.997	7.893	7.946	32.41	2.412	7.97917

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

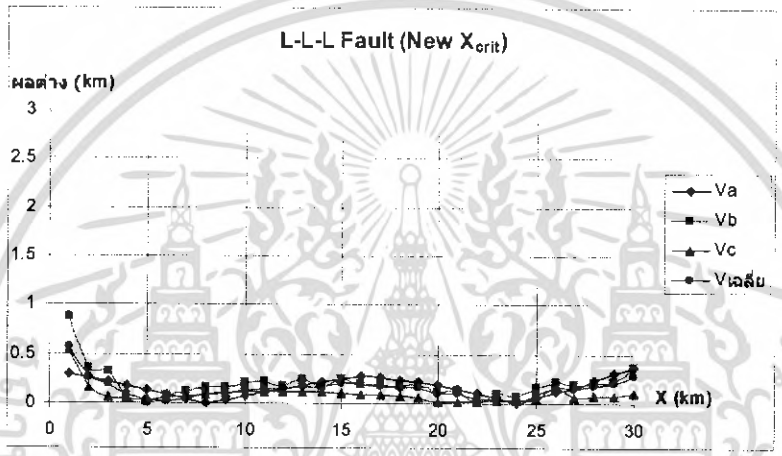
ตารางที่ 5.2 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟส

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)				$New\ x_{crit}$ (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x - New\ x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
	V_A	V_B	V_C	$V_{เฉลี่ย}$*			
1	0.431	0.661	0.568	0.553	1.570063	0.570063	57.00645
2	0.836	0.857	0.824	0.839	2.259094	0.259094	12.95478
3	1.218	1.247	1.177	1.214	3.196107	0.196107	6.536944
4	1.583	1.528	1.559	1.557	4.086392	0.086392	2.159829
5	1.935	1.89	1.899	1.908	5.035008	0.035008	0.700186
6	2.274	2.225	2.242	2.247	5.986745	0.013255	0.220897
7	2.6	2.557	2.575	2.577	6.950624	0.049376	0.705346
8	2.915	2.876	2.897	2.896	7.916597	0.083403	1.042515
9	3.219	3.197	3.208	3.208	8.898758	0.101242	1.124894
10	3.512	3.494	3.51	3.505	9.870193	0.129807	1.29805
11	3.796	3.785	3.801	3.794	10.84829	0.151712	1.379184
12	4.07	4.086	4.083	4.08	11.85205	0.147955	1.23294
13	4.335	4.345	4.356	4.345	12.81927	0.180726	1.39018
14	4.591	4.635	4.621	4.616	13.83871	0.16129	1.152058
15	4.839	4.872	4.877	4.863	14.80286	0.19714	1.31425
16	5.079	5.135	5.125	5.113	15.81358	0.186423	1.165129
17	5.322	5.377	5.364	5.354	16.82159	0.178405	1.049427
18	5.56	5.614	5.597	5.59	17.84093	0.159068	0.883698
19	5.79	5.834	5.822	5.815	18.84527	0.154733	0.814368
20	6.014	6.069	6.045	6.043	19.89388	0.106115	0.530562
21	6.233	6.277	6.253	6.254	20.90236	0.097637	0.464923
22	6.445	6.508	6.457	6.47	21.96335	0.036648	0.166567
23	6.651	6.688	6.66	6.666	22.96001	0.039993	0.17387
24	6.852	6.886	6.85	6.863	23.9874	0.012604	0.052504
25	7.047	7.113	7.038	7.066	25.08535	0.085354	0.341428
26	7.237	7.305	7.237	7.26	26.16477	0.164768	0.633735
27	7.421	7.473	7.394	7.429	27.13866	0.138656	0.513554
28	7.602	7.646	7.566	7.605	28.17403	0.174027	0.621536
29	7.778	7.813	7.73	7.774	29.20106	0.201064	0.693337
30	7.947	7.997	7.893	7.946	30.27693	0.276928	0.923105

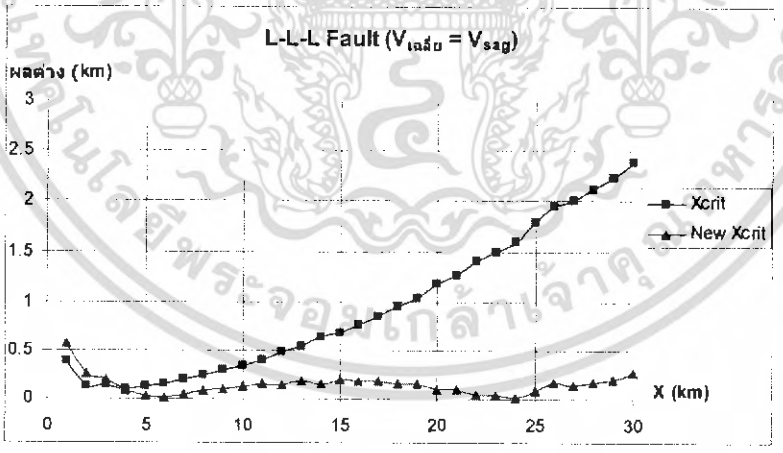
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



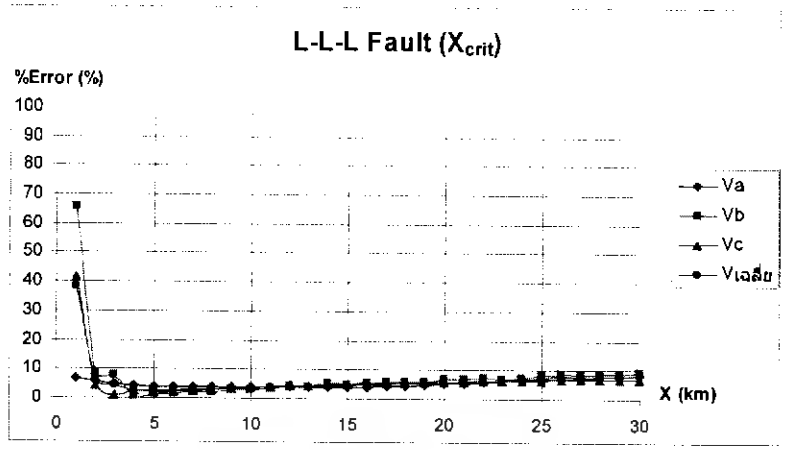
(ข)



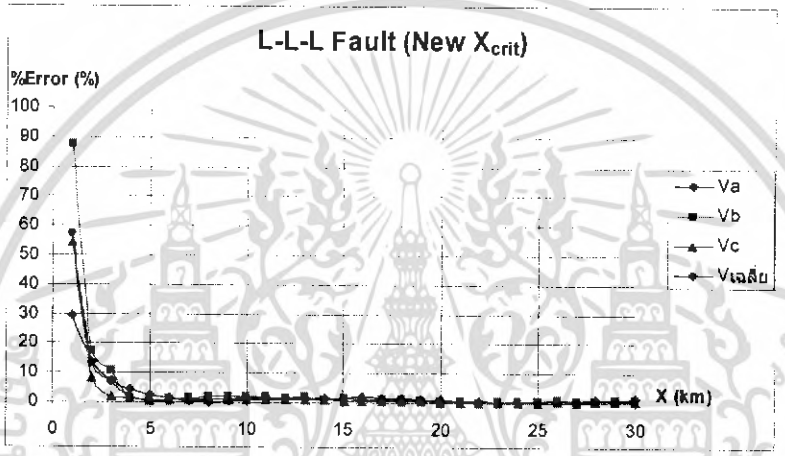
(ค)

รูปที่ 5.1 ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส
(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

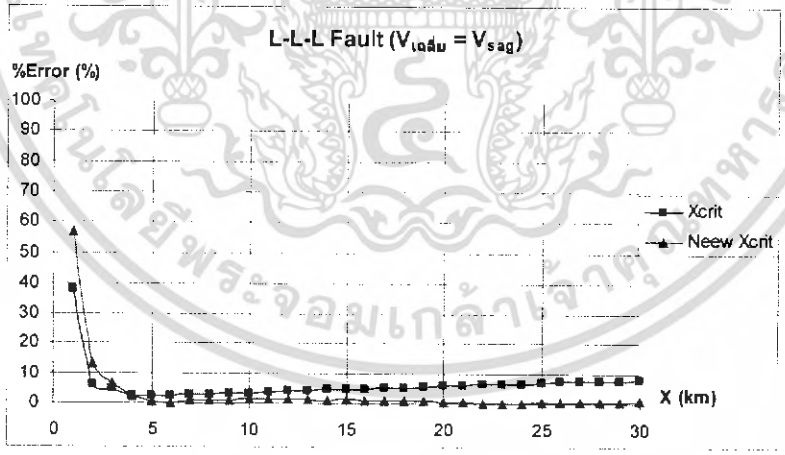
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.2 %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์สามเฟส

(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน (Single Line to Ground Fault)

ในกรณีที่แรงดันพิกัด (E) มีค่าเป็น 1 pu. ฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน มีสมการหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ x_{crit} ดังสมการที่ (3.22) แต่เมื่อแทน E เป็นค่าใดๆ ก็จะได้สมการ x_{crit} ดังสมการที่ (5.2) ซึ่งสมการนี้จะใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับการจำลองระบบ จากการจำลองการเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน แรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ในการคำนวณ (V_{sag}) จะใช้แรงดันของเฟสที่เกิดฟอลต์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.3

$$x_{crit} = \frac{2Z_{S1} + Z_{S0}}{2z_1 + z_0} \times \frac{V_{sag}}{E - V_{sag}} \qquad (5.2)$$

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x) เพิ่มมากขึ้นผลต่างของระยะทาง (y) ก็จะเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงค่าความผิดพลาดของสมการคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงหาวิธีลดค่าความผิดพลาด โดยการหาสมการของค่าความผิดพลาดหรือผลต่าง y เพื่อจะมาหักล้างกับผลต่างที่เกิดขึ้นของสมการ x_{crit} ซึ่งการลดค่าความผิดพลาดทำได้ดังนี้

1. นำข้อมูลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับการจำลองระบบในตารางที่ 5.3 ไปคำนวณด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในโปรแกรม Excel ดังภาคผนวก ข. โดยให้ข้อมูลของ x_{crit} เป็นตัวแปรต้น และข้อมูลของ y เป็นตัวแปรตาม จะได้เป็นสมการเส้นตรงของ y

$$y = -0.45912 + 0.115301\, x_{crit}$$

2. นำสมการ y ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยไปบวกหรือลบกับสมการ x_{crit} เพื่อให้ได้สมการใหม่เป็น $New\, x_{crit}$ โดยดูจากผลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับค่า x

- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่ามากกว่าค่า x จะได้ $New\, x_{crit} = x_{crit} - y$
- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่าน้อยกว่าค่า x จะได้ $New\, x_{crit} = x_{crit} + y$

ในกรณีของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน x_{crit} มีค่ามากกว่าค่า x จะได้

$$New\, x_{crit} = x_{crit} - y$$

$$New\, x_{crit} = 0.45912 + 0.884699\, x_{crit}$$

หรือ

$$New\, x_{crit} = 0.45912 + 0.884699 \left(\frac{2Z_{S1} + Z_{S0}}{2z_1 + z_0} \times \frac{V_{sag}}{E - V_{sag}} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการคำนวณของสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน แสดงดังตารางที่ 5.4

จากกราฟรูปที่ 5.3 (ค) จะเห็นว่าผลต่างของระยะที่เกิดฟอลต์ของสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน ที่ระยะ 4 km ขึ้นไป จะมีค่าลดลงและมีผลต่างไม่เกิน 1 km ส่วนในระยะ 3 km แรก ผลต่างมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิน 1 km เช่นเดียวกับฟอลต์สามเฟส ดังนั้นผลต่างของระยะทางที่เกิดฟอลต์หรือค่าความคลาดเคลื่อนนี้ ถือว่าเป็นผลที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 x_{crit} ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน

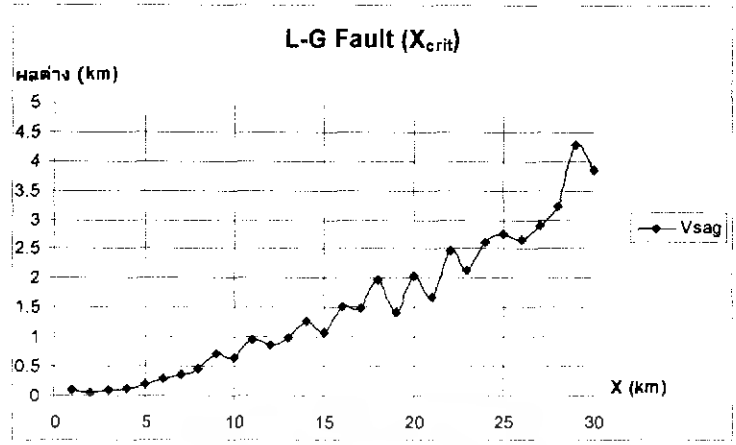
ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc) V_A *	x_{crit} (km)	ผลต่างระยะทาง $y = \lvert x - x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
1	0.731	1.1045	0.1045	10.428474
2	1.307	2.037	0.037	1.8300922
3	1.914	3.0854	0.0854	2.8276232
4	2.478	4.1262	0.1262	3.1356461
5	3.021	5.1951	0.1951	3.8837668
6	3.537	6.2779	0.2779	4.6130384
7	4.024	7.3657	0.3657	5.2049179
8	4.479	8.4453	0.4453	5.5470179
9	4.985	9.7249	0.7249	8.0346868
10	5.326	10.638	0.638	6.3647427
11	5.791	11.957	0.957	8.6788348
12	6.091	12.856	0.856	7.1108017
13	6.446	13.972	0.972	7.4587293
14	6.839	15.281	1.281	9.1280808
15	7.069	16.085	1.085	7.2111983
16	7.458	17.514	1.514	9.4399203
17	7.711	18.493	1.493	8.7634814
18	8.071	19.961	1.961	10.875199
19	8.177	20.411	1.411	7.4070599
20	8.543	22.031	2.031	10.133831
21	8.682	22.674	1.674	7.9535783
22	9.05	24.46	2.46	11.162585
23	9.181	25.126	2.126	9.2253341
24	9.463	26.619	2.619	10.89196
25	9.667	27.751	2.751	10.985618
26	9.824	28.655	2.655	10.192504
27	10.032	29.898	2.898	10.714549
28	10.246	31.235	3.235	11.53347
29	10.557	33.29	4.29	14.773769
30	10.639	33.856	3.856	12.833351

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

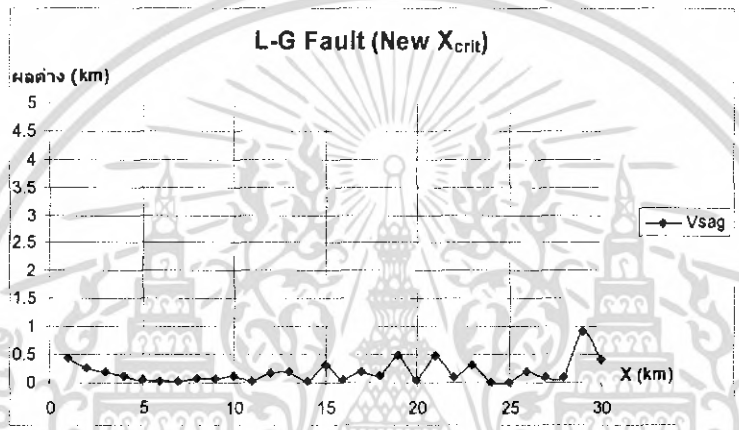
ตารางที่ 5.4 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc) V_A *	$New\ x_{crit}$ (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x - New\ x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
1	0.731	1.436	0.436	43.60804
2	1.307	2.2608	0.261	13.04501
3	1.914	3.1882	0.188	6.275505
4	2.478	4.1088	0.109	2.722003
5	3.021	5.0543	0.054	1.088259
6	3.537	6.0121	0.012	0.203041
7	4.024	6.9743	0.026	0.366469
8	4.479	7.9293	0.071	0.883673
9	4.985	9.0611	0.061	0.679497
10	5.326	9.8688	0.131	1.308035
11	5.791	11.036	0.036	0.321856
12	6.091	11.831	0.169	1.4132
13	6.446	12.818	0.182	1.399697
14	6.839	13.976	0.024	0.175088
15	7.069	14.687	0.313	2.089581
16	7.458	15.951	0.049	0.309134
17	7.711	16.817	0.183	1.076373
18	8.071	18.115	0.115	0.641822
19	8.177	18.514	0.486	2.560683
20	8.543	19.946	0.054	0.269133
21	8.682	20.515	0.485	2.307314
22	9.05	22.095	0.095	0.432313
23	9.181	22.684	0.316	1.372306
24	9.463	24.005	0.005	0.018982
25	9.667	25.006	0.006	0.025321
26	9.824	25.806	0.194	0.74698
27	10.032	26.905	0.095	0.350529
28	10.246	28.088	0.088	0.313239
29	10.557	29.906	0.906	3.123385
30	10.639	30.406	0.406	1.353927

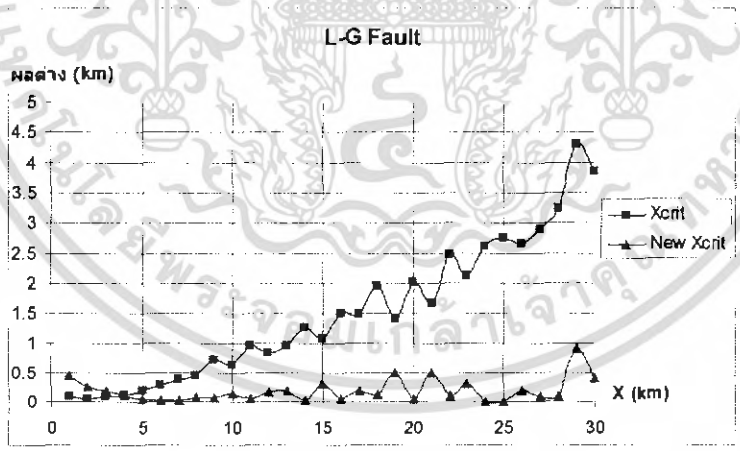
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

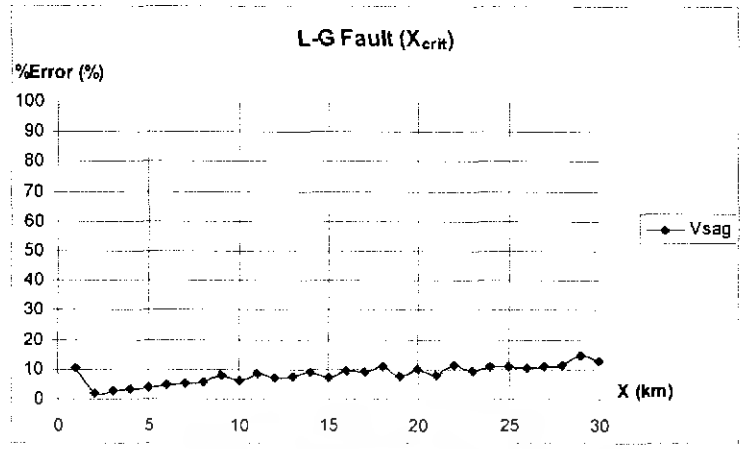


(ค)

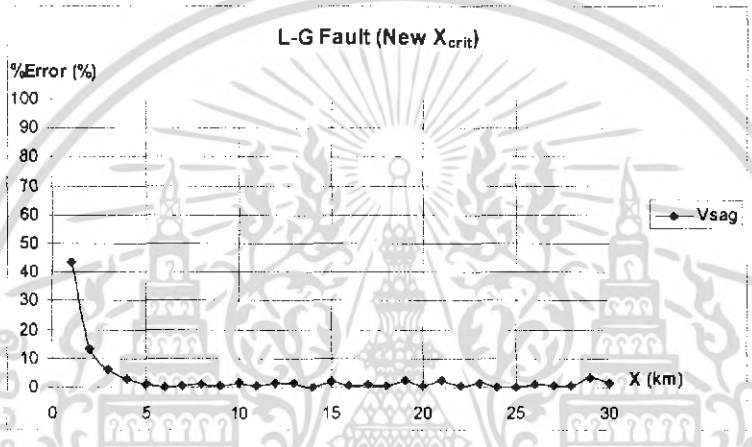
รูปที่ 5.3 ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน

(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

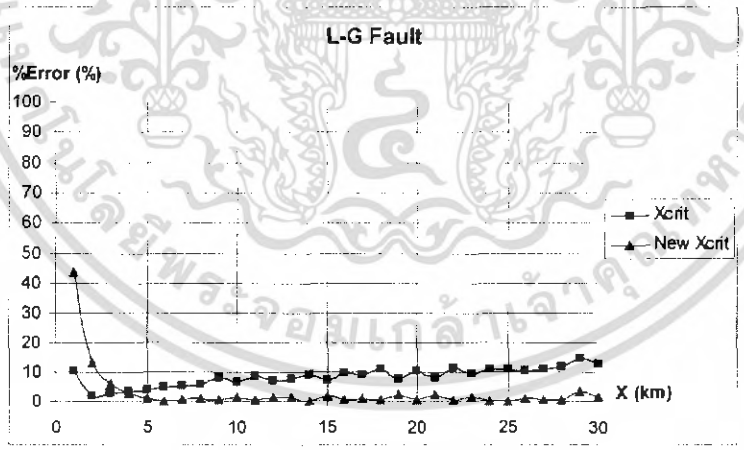
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.4 %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน

(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (Phase to Phase Fault)

ในกรณีที่แรงดันพิกัด (E) มีค่าเป็น 1 pu. ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส มีสมการหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ x_{crit} ดังสมการที่ (3.28) แต่เมื่อแทน E เป็นค่าใดๆ ก็จะได้สมการ x_{crit} ดังสมการที่ (5.3) ซึ่งสมการนี้จะใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับการจำลองระบบ จากการจำลองและการคำนวณเปรียบเทียบของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส แรงดันดกชั่วขณะของเฟสที่เกิดฟอลต์ทั้งสองเฟสมีค่าแตกต่างกัน โดยเฟส B มีค่าแรงดันดกชั่วขณะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เกิดฟอลต์ ซึ่งแรงดันตกชั่วขณะของเฟสนี้มากกว่าเฟส C ซึ่งมีค่าแรงดันดกชั่วขณะลดลงเล็กน้อยแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็นรูปพาราโบลาหงาย ดังนั้นค่าแรงดันดกชั่วขณะที่ใช้ในการคำนวณ (V_{sag}) จะใช้แรงดันของเฟสที่มีค่าแรงดันตกชั่วขณะมากกว่าระหว่างเฟสที่เกิดฟอลต์ทั้งสอง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.5

$$x_{crit} = \frac{Z_{S1}}{2z_1} \times \frac{2V_{sag} - E}{E - V_{sag}} \qquad (5.3)$$

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x) เพิ่มมากขึ้นผลต่างของระยะทาง (y) ก็จะเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงค่าความผิดพลาดของสมการคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงหาวิธีลดค่าความผิดพลาด โดยการหาสมการของค่าความผิดพลาดหรือผลต่าง y เพื่อจะมาหักล้างกับผลต่างที่เกิดขึ้นของสมการ x_{crit} ซึ่งการลดค่าความผิดพลาดทำได้ดังนี้

1. นำข้อมูลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับการจำลองระบบในตารางที่ 5.5 ไปคำนวณด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในโปรแกรม Excel ดังภาคผนวก ข. โดยให้ข้อมูลของ x_{crit} เป็นตัวแปรต้น และข้อมูลของ y เป็นตัวแปรตาม จะได้เป็นสมการเส้นตรงของ y

$$y = -0.108802 + 0.118346\, x_{crit}$$

2. นำสมการ y ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยไปบวกหรือลบกับสมการ x_{crit} เพื่อให้ได้สมการใหม่เป็น $New\, x_{crit}$ โดยดูจากผลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับค่า x

- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่ามากกว่าค่า x จะได้ $New\, x_{crit} = x_{crit} - y$
- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่าน้อยกว่าค่า x จะได้ $New\, x_{crit} = x_{crit} + y$

ในกรณีของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส x_{crit} มีค่ามากกว่าค่า x จะได้

$$New\, x_{crit} = x_{crit} - y$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$New\ x_{crit} = 0.108802 + 0.881564\, x_{crit}$$

หรือ

$$New\ x_{crit} = 0.108802 + 0.881564\left(\frac{Z_{S1}}{2z_1} \times \frac{2V_{sag} - E}{E - V_{sag}}\right)$$

ซึ่งผลการคำนวณของสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส แสดงดังตารางที่ 5.6

จากกราฟรูปที่ 5.5 (ค) จะเห็นว่าผลต่างของระยะที่เกิดฟอลต์ของสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส ที่ระยะ 9 km ขึ้นไป จะมีค่าลดลงและมีผลต่างไม่เกิน 1 km ส่วนในช่วงระยะ 5 km ถึง 8 km ผลต่างมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิน 1 km และที่ระยะ 1km มีความคลาดเคลื่อนของระทางที่เกิดฟอลต์เกิน 1 km เล็กน้อย แต่ที่ระยะทาง 1km เป็นระยะที่สามารถทำการตรวจหาจุดที่เกดฟอลต์ได้เร็ว ดังนั้นผลต่างของระยะทางที่เกิดฟอลต์หรือค่าความคลาดเคลื่อนนี้ ถือว่าเป็นผลที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 x_{crit} ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส

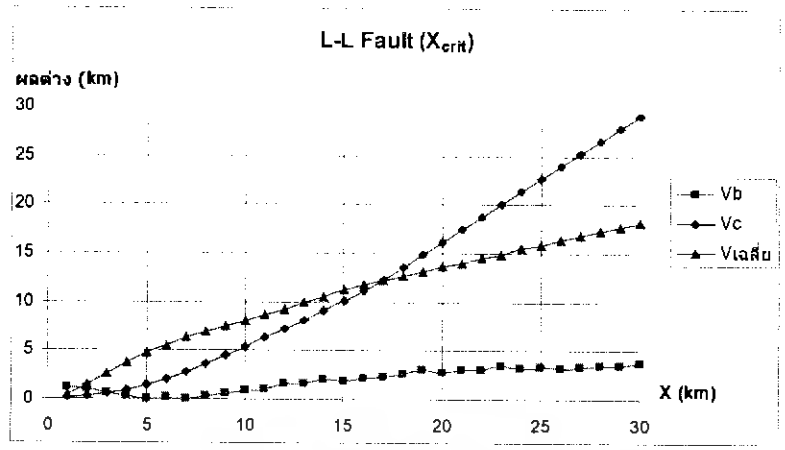
ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)			x_{crit} (km)	ผลต่างระยะทาง $y = \lvert x - x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
	V_B*	V_C	$V_{เฉลี่ย}$			
1	10.225	9.608	9.9165	2.16551801	1.165518	116.426876
2	10.388	9.438	9.913	3.0451351	1.045135	52.1689205
3	10.48	9.282	9.881	3.55549377	0.555494	18.4480889
4	10.619	9.102	9.8605	4.34642105	0.346421	8.59784196
5	10.723	8.991	9.857	4.95440055	0.045599	0.96915121
6	10.915	8.903	9.909	6.11509602	0.115096	1.85947209
7	11.058	8.832	9.945	7.01349123	0.013491	0.13493244
8	11.249	8.791	10.02	8.2614611	0.261461	3.20869017
9	11.434	8.758	10.096	9.52591216	0.525912	5.78240922
10	11.628	8.747	10.1875	10.9149469	0.914947	9.08650276
11	11.779	8.72	10.2495	12.0438192	1.043819	9.42610299
12	11.97	8.689	10.3295	13.5357674	1.535767	12.7329907
13	12.103	8.675	10.389	14.6195855	1.619586	12.3934751
14	12.261	8.667	10.464	15.9582093	1.958209	13.9214522
15	12.374	8.662	10.518	16.9515041	1.951504	12.9448336
16	12.503	8.664	10.5835	18.1241302	2.12413	13.2104669
17	12.629	8.73	10.6795	19.3114072	2.311407	13.5309814
18	12.755	8.792	10.7735	20.5424197	2.54242	14.0587174
19	12.898	8.874	10.886	21.9956304	2.99563	15.6996924
20	12.971	8.926	10.9485	22.7616664	2.761666	13.7426778
21	13.094	9.003	11.0485	24.0912925	3.091293	14.6542605
22	13.173	9.067	11.12	24.9721376	2.972138	13.4442345
23	13.303	9.149	11.226	26.4697692	3.469769	15.0195619
24	13.358	9.205	11.2815	27.1221736	3.122174	12.9438637
25	13.455	9.29	11.3725	28.3012571	3.301257	13.1397224
26	13.524	9.369	11.4465	29.1629163	3.162916	12.1003566
27	13.611	9.416	11.5135	30.2776744	3.277674	12.0748434
28	13.707	9.487	11.597	31.5459768	3.545977	12.5992089
29	13.778	9.556	11.667	32.510917	3.510917	12.0419379
30	13.864	9.626	11.745	33.7117313	3.711731	12.3076118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

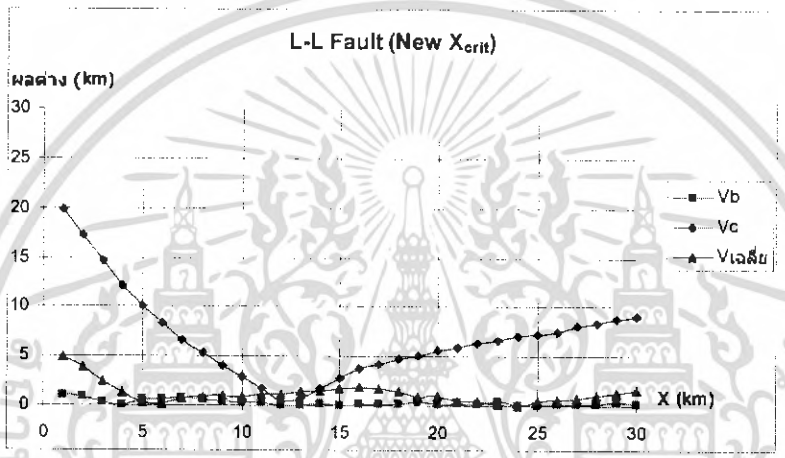
ตารางที่ 5.6 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)			$New\ x_{crit}$ (km)	$\lvert x - New\ x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
	V_B*	V_C	$V_{เฉลี่ย}$			
1	10.225	9.608	9.9165	2.0175	1.018	101.693814
2	10.388	9.438	9.913	2.7926	0.793	39.600437
3	10.48	9.282	9.881	3.2422	0.242	8.0569655
4	10.619	9.102	9.8605	3.9391	0.061	1.53422631
5	10.723	8.991	9.857	4.4748	0.525	10.5130137
6	10.915	8.903	9.909	5.4976	0.502	8.38181907
7	11.058	8.832	9.945	6.2892	0.711	10.1613183
8	11.249	8.791	10.02	7.3888	0.611	7.64561623
9	11.434	8.758	10.096	8.5029	0.497	5.52759996
10	11.628	8.747	10.1875	9.7268	0.273	2.73542332
11	11.779	8.72	10.2495	10.721	0.279	2.53492411
12	11.97	8.689	10.3295	12.036	0.036	0.29818125
13	12.103	8.675	10.389	12.991	0.009	0.07089878
14	12.261	8.667	10.464	14.171	0.171	1.21646727
15	12.374	8.662	10.518	15.046	0.046	0.30361716
16	12.503	8.664	10.5835	16.079	0.079	0.49247972
17	12.629	8.73	10.6795	17.125	0.125	0.73506196
18	12.755	8.792	10.7735	18.21	0.21	1.16478642
19	12.898	8.874	10.886	19.49	0.49	2.5797453
20	12.971	8.926	10.9485	20.165	0.165	0.82570337
21	13.094	9.003	11.0485	21.337	0.337	1.60349883
22	13.173	9.067	11.12	22.113	0.113	0.51312427
23	13.303	9.149	11.226	23.432	0.432	1.88051577
24	13.358	9.205	11.2815	24.007	0.007	0.03075752
25	13.455	9.29	11.3725	25.046	0.046	0.18530353
26	13.524	9.369	11.4465	25.805	0.195	0.74779627
27	13.611	9.416	11.5135	26.788	0.212	0.78578889
28	13.707	9.487	11.597	27.905	0.095	0.33787172
29	13.778	9.556	11.667	28.755	0.245	0.84259123
30	13.864	9.626	11.745	29.814	0.186	0.62086464

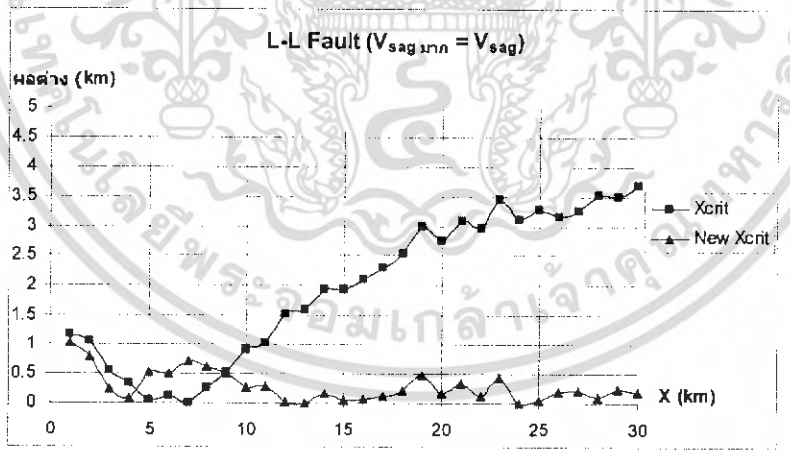
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

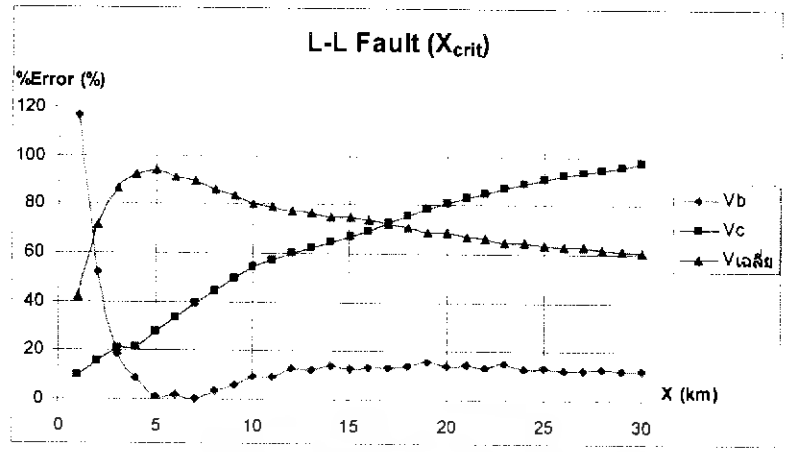


(ค)

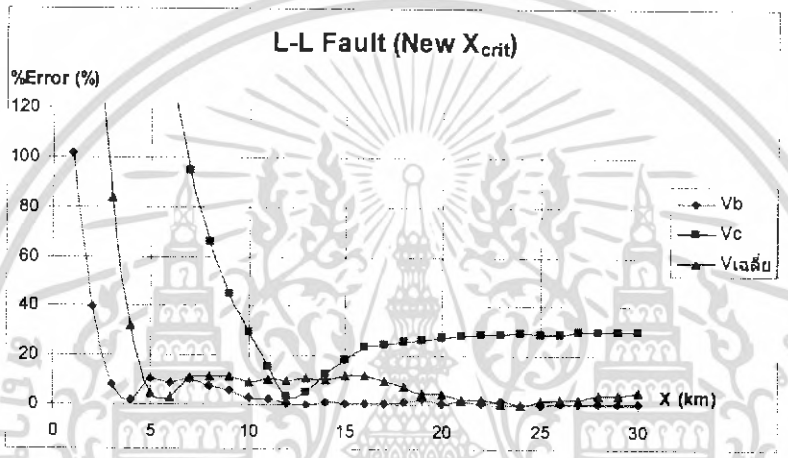
รูปที่ 5.5 ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส

(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

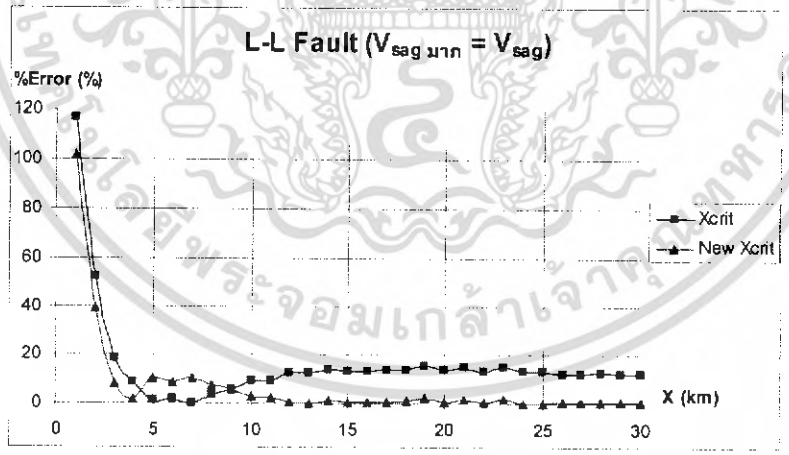
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.6 %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส
(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน (Phase to Phase to Ground Fault)

ในกรณีที่แรงดันพิกัด (E) มีค่าเป็น 1 pu. ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน มีสมการหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ x_{crit} ดังสมการที่ (3.34) แต่เมื่อแทน E เป็นค่าใดๆ ก็จะได้สมการ x_{crit} ดังสมการที่ (5.4) ซึ่งสมการนี้จะใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับการจำลองระบบ จากการจำลองแรงดันตกชั่วขณะของเฟสที่เกิดฟอลต์ทั้งสองเฟสมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นค่าแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ในการคำนวณ (V_{sag}) จะใช้แรงดันจะใช้แรงดันเฉลี่ยของทั้งสองเฟส ($V_{เฉลี่ย}$) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.7

$$x_{crit} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{5.4}$$

โดย $a = \left(z_1^2 + 2z_1z_0\right)\left(E - V_{sag}\right)$

$b = \left(3z_1 + z_0\right)Z_{S1}E - \left(4z_1 + 2z_0\right)Z_{S1}V_{sag}$

$c = -3Z_{S1}^2V_{sag}$

จากตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x) เพิ่มมากขึ้นผลต่างของระยะทาง (y) ก็จะเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงค่าความผิดพลาดของสมการคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงหาวิธีลดค่าความผิดพลาด โดยการหาสมการของค่าความผิดพลาดหรือผลต่าง y เพื่อจะมาหักล้างกับผลต่างที่เกิดขึ้นของสมการ x_{crit} ซึ่งการลดค่าความผิดพลาดทำได้ดังนี้

1. นำข้อมูลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับการจำลองระบบในตารางที่ 5.7 ไปคำนวณด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในโปรแกรม Excel ดังภาคผนวก ข. โดยให้ข้อมูลของ x_{crit} เป็นตัวแปรต้น และข้อมูลของ y เป็นตัวแปรตาม จะได้เป็นสมการเส้นตรงของ y

$$y = -0.04712 + 0.36937\,x_{crit}$$

2. นำสมการ y ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยไปบวกหรือลบกับสมการ x_{crit} เพื่อให้ได้สมการใหม่เป็น $New\,x_{crit}$ โดยดูจากผลของการคำนวณค่า x_{crit} เปรียบเทียบกับค่า x

- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่ามากกว่าค่า x จะได้ $New\,x_{crit} = x_{crit} - y$
- ถ้าค่า x_{crit} โดยรวมมีค่าน้อยกว่าค่า x จะได้ $New\,x_{crit} = x_{crit} + y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน x_{crit} มีค่าน้อยกว่าค่า x จะได้

$$New\ x_{crit} = x_{crit} + y$$

$$New\ x_{crit} = -0.04712 + 1.36937\, x_{crit}$$

หรือ

$$New\ x_{crit} = -0.04712 + 1.36937\left(\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}\right)$$

ซึ่งผลการคำนวณของสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน แสดงดังตารางที่ 5.8

จากกราฟรูปที่ 5.7 (ค) จะเห็นว่าผลต่างของระยะที่เกิดฟอลต์ของสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน ตั้งแต่ที่ระยะ 2 km ขึ้นไป จะมีค่าลดลงและมีผลต่างไม่เกิน 1 km ดังนั้นผลต่างของระยะทางที่เกิดฟอลต์หรือค่าความคลาดเคลื่อนนี้ ถือว่าเป็นผลที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 x_{crit} ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน

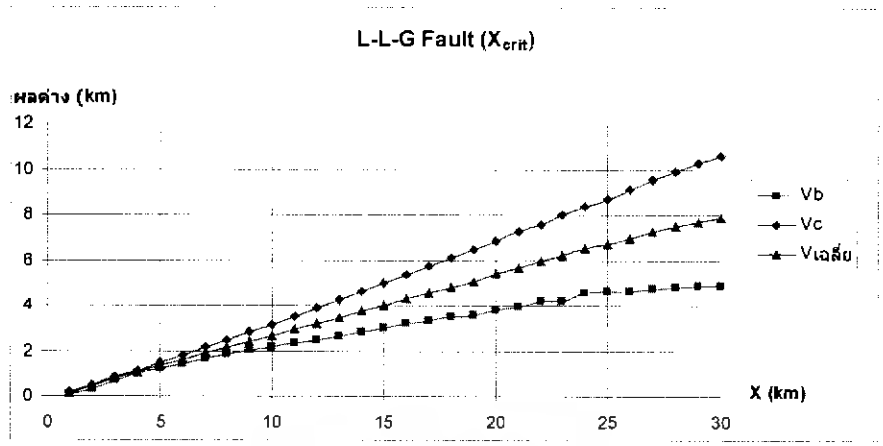
ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)			x_{crit} (km)	ผลต่างระยะทาง $y = \lvert x - x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
	V_B	V_C	$V_{เฉลี่ย}$*			
1	0.745	0.643	0.694	0.87479	0.12521	12.54316
2	1.276	1.157	1.2165	1.580672	0.419328	20.98678
3	1.726	1.615	1.6705	2.230168	0.769832	25.68053
4	2.203	2.1	2.1515	2.958143	1.041857	26.06612
5	2.668	2.508	2.588	3.657215	1.342785	26.87547
6	3.119	2.913	3.016	4.381172	1.618828	27.00052
7	3.556	3.294	3.425	5.1115	1.8885	26.99892
8	3.976	3.654	3.815	5.845761	2.154239	26.94864
9	4.38	3.992	4.186	6.581232	2.418768	26.89616
10	4.776	4.313	4.5445	7.328794	2.671206	26.73334
11	5.13	4.618	4.874	8.050203	2.949797	26.83784
12	5.505	4.911	5.208	8.817456	3.182544	26.54306
13	5.828	5.187	5.5075	9.538427	3.461573	26.64956
14	6.15	5.451	5.8005	10.27599	3.724011	26.62241
15	6.434	5.704	6.069	10.98169	4.018306	26.81121
16	6.721	5.947	6.334	11.70794	4.292061	26.8481
17	6.999	6.187	6.593	12.44806	4.551938	26.79906
18	7.261	6.416	6.8385	13.17898	4.821021	26.80662
19	7.544	6.627	7.0855	13.94497	5.055026	26.62884
20	7.751	6.829	7.29	14.60374	5.396258	27.00479
21	7.998	7.031	7.5145	15.35403	5.645972	26.90932
22	8.198	7.232	7.715	16.04936	5.950637	27.07222
23	8.447	7.411	7.929	16.81927	6.18073	26.89686
24	8.607	7.594	8.1005	17.45803	6.541968	27.28235
25	8.831	7.793	8.312	18.27386	6.726138	26.92902
26	9.057	7.944	8.5005	19.02848	6.971519	26.83821
27	9.24	8.104	8.672	19.73876	7.261238	26.91829
28	9.431	8.266	8.8485	20.49454	7.505463	26.83023
29	9.626	8.43	9.028	21.29025	7.70975	26.61061
30	9.818	8.595	9.2065	22.11003	7.88997	26.32544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

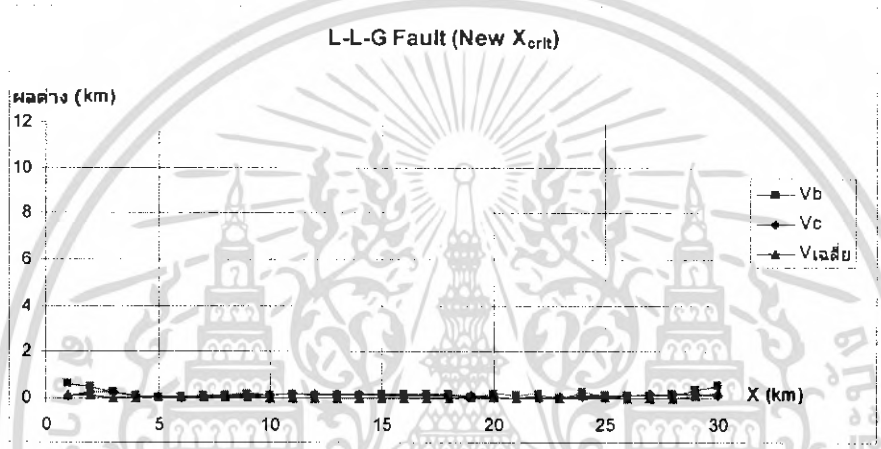
ตารางที่ 5.8 $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)			$New\ x_{crit}$ (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x - New\ x_{crit} \rvert$ (km)	% Error
	V_B	V_C	$V_{เฉลี่ย}$*			
1	0.745	0.643	0.694	1.150869	0.150869	15.04913
2	1.276	1.157	1.2165	2.117142	0.117142	5.84254
3	1.726	1.615	1.6705	3.00623	0.00623	0.200352
4	2.203	2.1	2.1515	4.002746	0.002746	0.064971
5	2.668	2.508	2.588	4.959698	0.040302	0.807741
6	3.119	2.913	3.016	5.950714	0.049286	0.821916
7	3.556	3.294	3.425	6.950452	0.049548	0.707542
8	3.976	3.654	3.815	7.955573	0.044427	0.554554
9	4.38	3.992	4.186	8.962349	0.037651	0.41725
10	4.776	4.313	4.5445	9.985678	0.014322	0.141942
11	5.13	4.618	4.874	10.97321	0.026793	0.242208
12	5.505	4.911	5.208	12.02349	0.02349	0.197151
13	5.828	5.187	5.5075	13.01042	0.010418	0.081515
14	6.15	5.451	5.8005	14.02006	0.020058	0.144585
15	6.434	5.704	6.069	14.98609	0.013911	0.091509
16	6.721	5.947	6.334	15.98024	0.019763	0.122394
17	6.999	6.187	6.593	16.99338	0.006617	0.037922
18	7.261	6.416	6.8385	17.99393	0.006074	0.03287
19	7.544	6.627	7.0855	19.04249	0.042488	0.224348
20	7.751	6.829	7.29	19.94427	0.055732	0.278071
21	7.998	7.031	7.5145	20.97132	0.028676	0.136115
22	8.198	7.232	7.715	21.92316	0.07684	0.348985
23	8.447	7.411	7.929	22.97708	0.022923	0.099541
24	8.607	7.594	8.1005	23.85147	0.148529	0.618888
25	8.831	7.793	8.312	24.96825	0.031749	0.12719
26	9.057	7.944	8.5005	26.00124	0.00124	0.004408
27	9.24	8.104	8.672	26.97353	0.026466	0.098536
28	9.431	8.266	8.8485	28.00811	0.008106	0.028272
29	9.626	8.43	9.028	29.09735	0.097347	0.334828
30	9.818	8.595	9.2065	30.21953	0.219534	0.730748

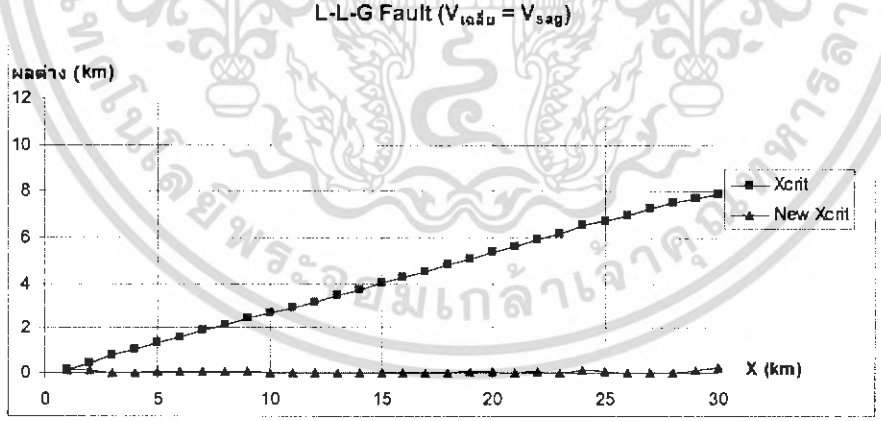
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

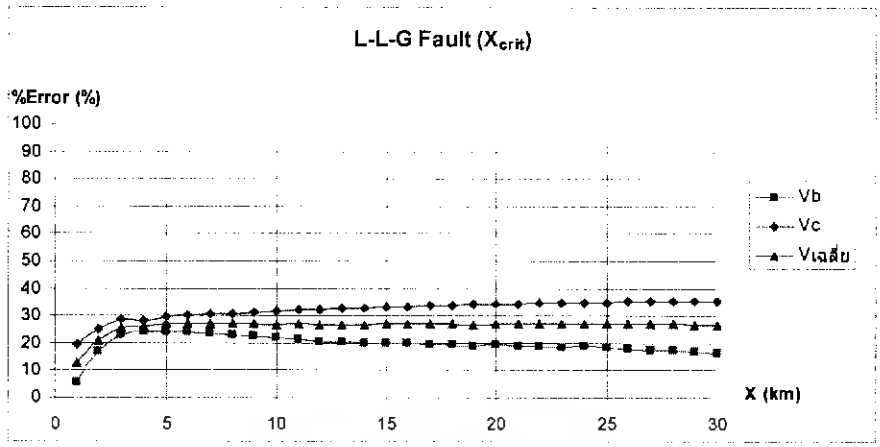


(ค)

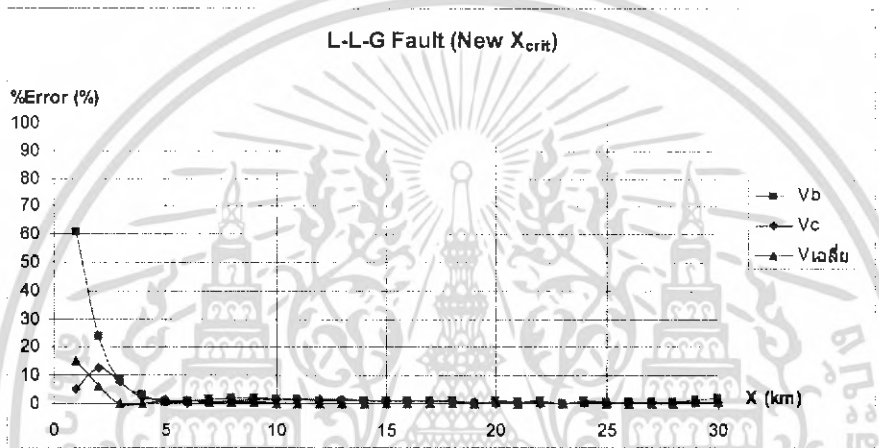
รูปที่ 5.7 ผลต่างของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน

(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

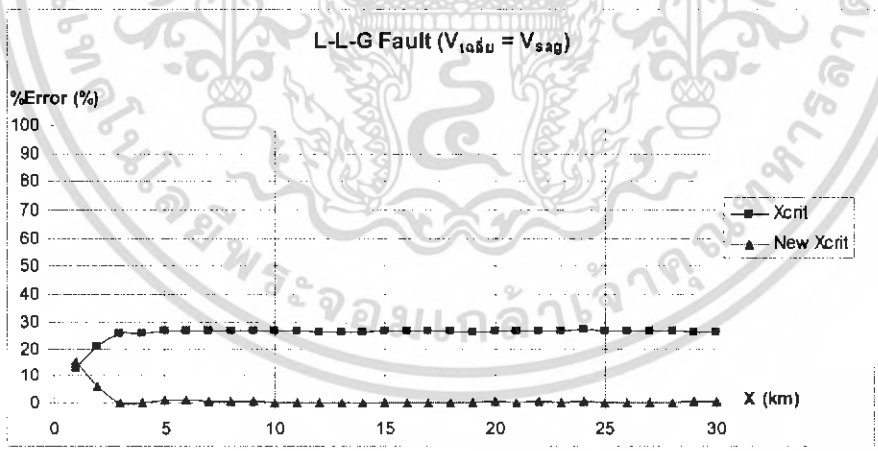
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.8 %Error ของการคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน
(ก) x_{crit} (ข) $New\ x_{crit}$ (ค) เปรียบเทียบ x_{crit} กับ $New\ x_{crit}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 โปรแกรมคำนวณระยะทางที่เกิดความผิดพร่อง (Fault Calculation Pro 1.0:FCP 1.0)

จากหัวข้อที่ 5.1 ถึง 5.4 เมื่อได้สมการ $New\,x_{crit}$ ของฟอลต์แต่ละชนิดแล้ว จึงนำสมการ $New\,x_{crit}$ ของฟอลต์แต่ละชนิด มาสร้างโปรแกรมคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเป็นโปรแกรมต้นแบบและตั้งชื่อโปรแกรมว่า "Fault Calculation Pro 1.0" (FCP 1.0) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ค. จากนั้นลองป้อนค่าแรงดันตกชั่วขณะของฟอลต์แต่ละชนิดที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม PSCAD เพื่อเปรียบเทียบผลต่างของระยะทางที่เกิดฟอลต์ ซึ่งผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 แสดงดังตารางที่ 5.9 ถึงตารางที่ 5.12 และกราฟรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.12

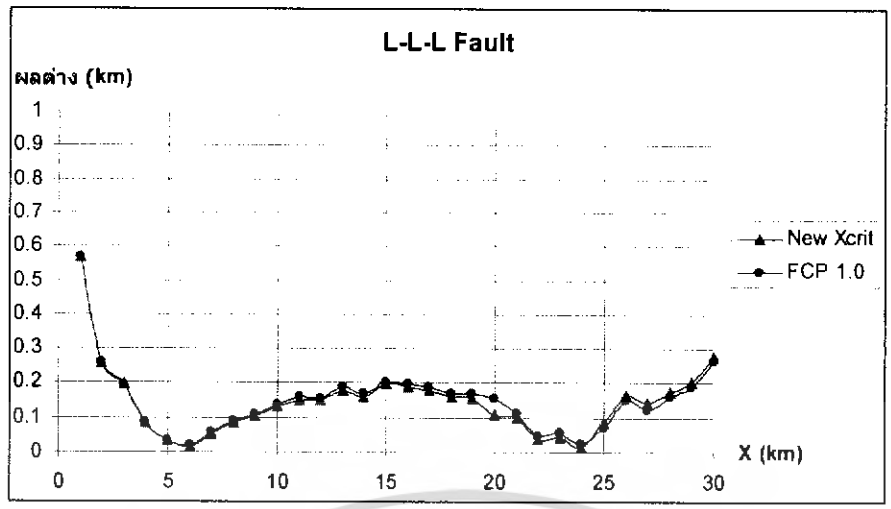
จากผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ในตารางที่ 5.9 ถึงตารางที่ 5.12 และจากกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลต่างและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\,x_{crit}$ ในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณของโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับสมการ $New\,x_{crit}$ มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

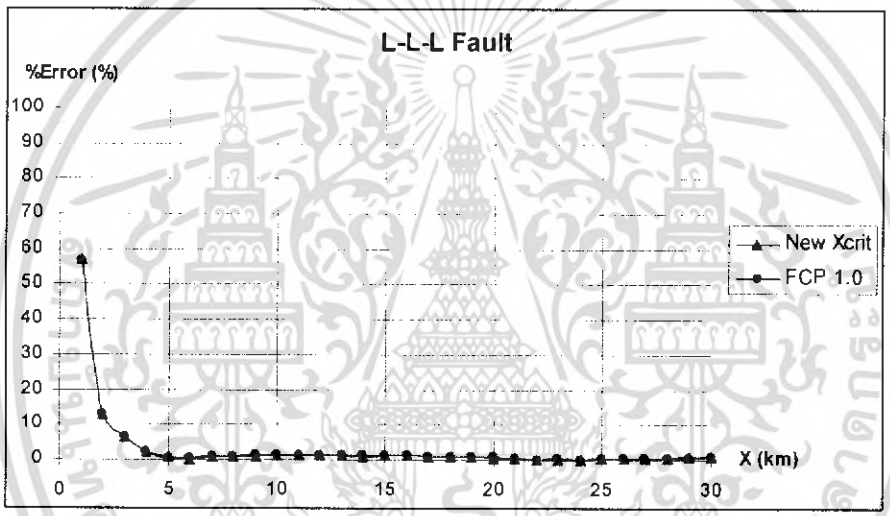
ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์สามเฟส

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)				FCP 1.0 (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x$ - FCP 1.0$\rvert$ (km)	% Error
	V_A	V_B	V_C	$V_{เฉลี่ย}$*			
1	0.431	0.661	0.568	0.553	1.569	0.569	56.900
2	0.836	0.857	0.824	0.839	2.258	0.258	12.900
3	1.218	1.247	1.177	1.214	3.194	0.194	6.467
4	1.583	1.528	1.559	1.557	4.085	0.085	2.125
5	1.935	1.89	1.899	1.908	5.032	0.032	0.640
6	2.274	2.225	2.242	2.247	5.983	0.017	0.283
7	2.6	2.557	2.575	2.577	6.946	0.054	0.771
8	2.915	2.876	2.897	2.896	7.912	0.088	1.100
9	3.219	3.197	3.208	3.208	8.894	0.106	1.178
10	3.512	3.494	3.51	3.505	9.864	0.136	1.360
11	3.796	3.785	3.801	3.794	10.842	0.158	1.436
12	4.07	4.086	4.083	4.08	11.847	0.153	1.275
13	4.335	4.345	4.356	4.345	12.811	0.189	1.454
14	4.591	4.635	4.621	4.616	13.832	0.168	1.200
15	4.839	4.872	4.877	4.863	14.796	0.204	1.360
16	5.079	5.135	5.125	5.113	15.805	0.195	1.219
17	5.322	5.377	5.364	5.354	16.811	0.189	1.112
18	5.56	5.614	5.597	5.59	17.829	0.171	0.950
19	5.79	5.834	5.822	5.815	18.833	0.167	0.879
20	6.014	6.069	6.045	6.043	19.844	0.156	0.780
21	6.233	6.277	6.253	6.254	20.889	0.111	0.529
22	6.445	6.508	6.457	6.47	21.951	0.049	0.223
23	6.651	6.688	6.66	6.666	22.945	0.055	0.239
24	6.852	6.886	6.85	6.863	23.975	0.025	0.104
25	7.047	7.113	7.038	7.066	25.071	0.071	0.284
26	7.237	7.305	7.237	7.26	26.152	0.152	0.585
27	7.421	7.473	7.394	7.429	27.121	0.121	0.448
28	7.602	7.646	7.566	7.605	28.16	0.16	0.571
29	7.778	7.813	7.73	7.774	29.186	0.186	0.641
30	7.947	7.997	7.893	7.946	30.262	0.262	0.873

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

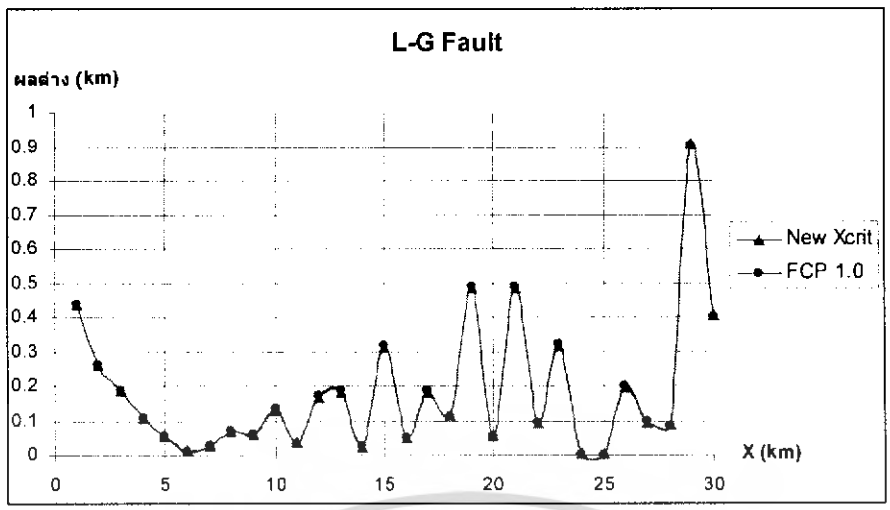
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์สามเฟส
(ก) ผลต่าง (ข) %Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

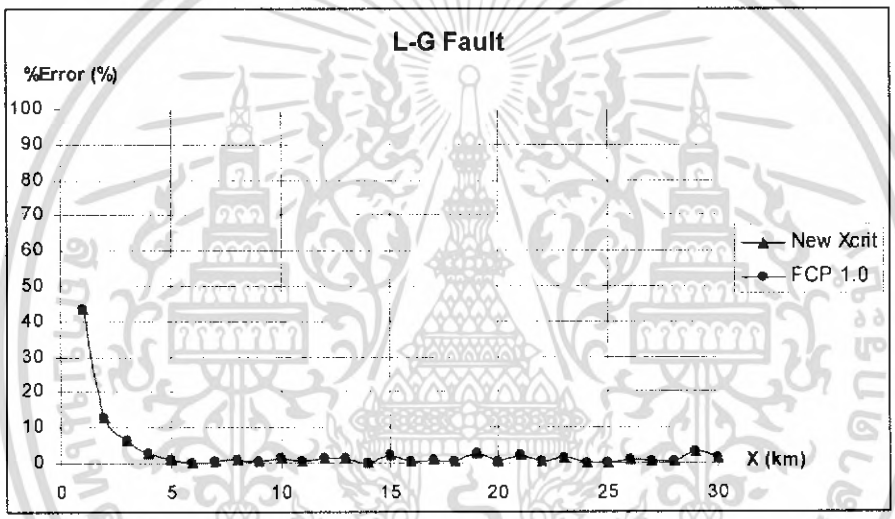
ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc) V_A *	FCP 1.0 (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x$ - FCP 1.0 $\rvert$ (km)	% Error
1	0.731	1.436	0.436	43.600
2	1.307	2.26	0.26	13.000
3	1.914	3.188	0.188	6.267
4	2.478	4.108	0.108	2.700
5	3.021	5.054	0.054	1.080
6	3.537	6.011	0.011	0.183
7	4.024	6.973	0.027	0.386
8	4.479	7.928	0.072	0.900
9	4.985	9.06	0.06	0.667
10	5.326	9.867	0.133	1.330
11	5.791	11.033	0.033	0.300
12	6.091	11.828	0.172	1.433
13	6.446	12.816	0.184	1.415
14	6.839	13.973	0.027	0.193
15	7.069	14.684	0.316	2.107
16	7.458	15.948	0.052	0.325
17	7.711	16.814	0.186	1.094
18	8.071	18.112	0.112	0.622
19	8.177	18.51	0.49	2.579
20	8.543	19.943	0.057	0.285
21	8.682	20.512	0.488	2.324
22	9.05	22.091	0.091	0.414
23	9.181	22.68	0.32	1.391
24	9.463	24	0	0.000
25	9.667	25.002	0.002	0.008
26	9.824	25.801	0.199	0.765
27	10.032	26.901	0.099	0.367
28	10.246	28.083	0.083	0.296
29	10.557	29.901	0.901	3.107
30	10.639	30.401	0.401	1.337

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

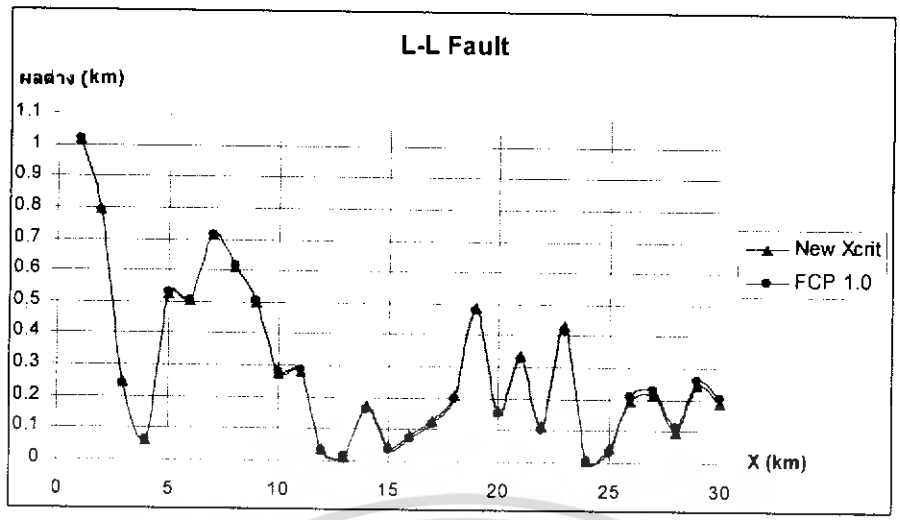
รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-ดิน
(ก) ผลต่าง (ข) %Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

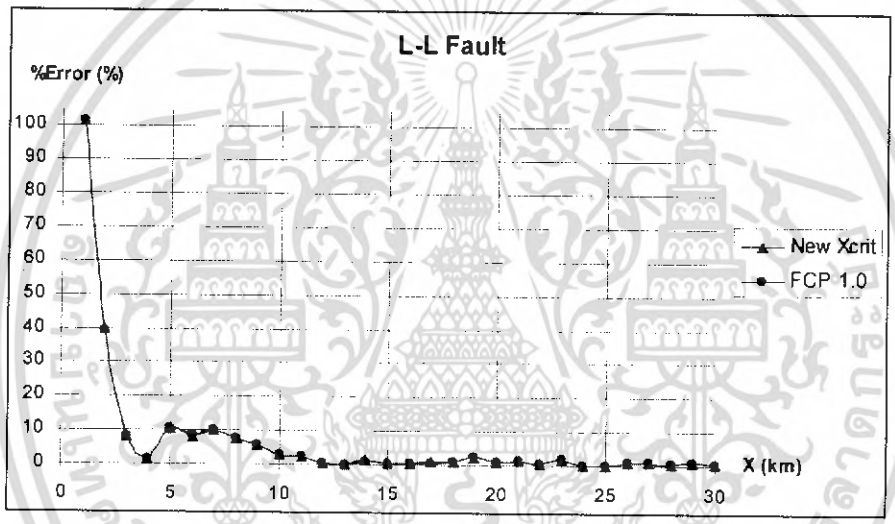
ตารางที่ 5.11 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)			FCP 1.0 (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x$ - FCP 1.0 $\rvert$ (km)	% Error
	V_B*	V_C	$V_{เฉลี่ย}$			
1	10.225	9.608	9.9165	2.016	1.016	101.600
2	10.388	9.438	9.913	2.791	0.791	39.550
3	10.48	9.282	9.881	3.24	0.24	8.000
4	10.619	9.102	9.8605	3.937	0.063	1.575
5	10.723	8.991	9.857	4.472	0.528	10.560
6	10.915	8.903	9.909	5.494	0.506	8.433
7	11.058	8.832	9.945	6.286	0.714	10.200
8	11.249	8.791	10.02	7.385	0.615	7.688
9	11.434	8.758	10.096	8.498	0.502	5.578
10	11.628	8.747	10.1875	9.721	0.279	2.790
11	11.779	8.72	10.2495	10.715	0.285	2.591
12	11.97	8.689	10.3295	12.029	0.029	0.242
13	12.103	8.675	10.389	12.984	0.016	0.123
14	12.261	8.667	10.464	14.162	0.162	1.157
15	12.374	8.662	10.518	15.037	0.037	0.247
16	12.503	8.664	10.5835	16.07	0.07	0.438
17	12.629	8.73	10.6795	17.115	0.115	0.676
18	12.755	8.792	10.7735	18.199	0.199	1.106
19	12.898	8.874	10.886	19.479	0.479	2.521
20	12.971	8.926	10.9485	20.154	0.154	0.770
21	13.094	9.003	11.0485	21.325	0.325	1.548
22	13.173	9.067	11.12	22.1	0.1	0.455
23	13.303	9.149	11.226	23.419	0.419	1.822
24	13.358	9.205	11.2815	23.994	0.006	0.025
25	13.455	9.29	11.3725	25.032	0.032	0.128
26	13.524	9.369	11.4465	25.791	0.209	0.804
27	13.611	9.416	11.5135	26.772	0.228	0.844
28	13.707	9.487	11.597	27.889	0.111	0.396
29	13.778	9.556	11.667	28.739	0.261	0.900
30	13.864	9.626	11.745	29.796	0.204	0.680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส

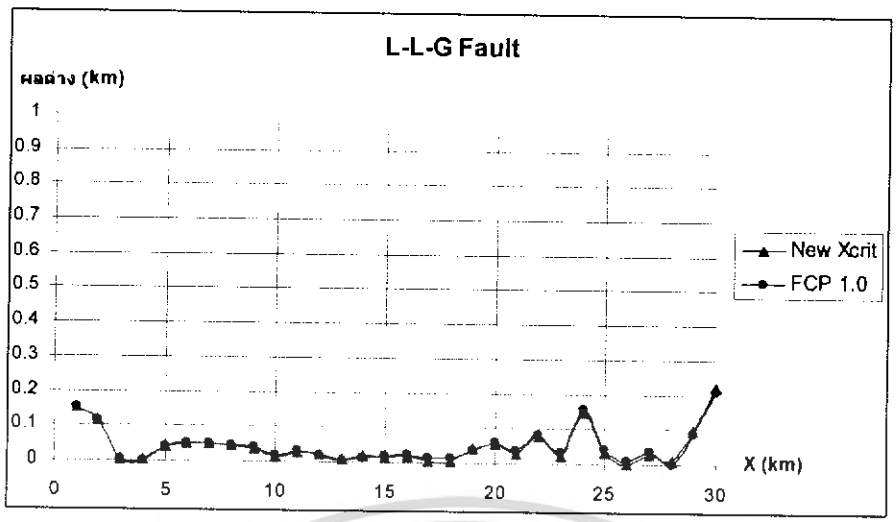
(ก) ผลต่าง (ข) %Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

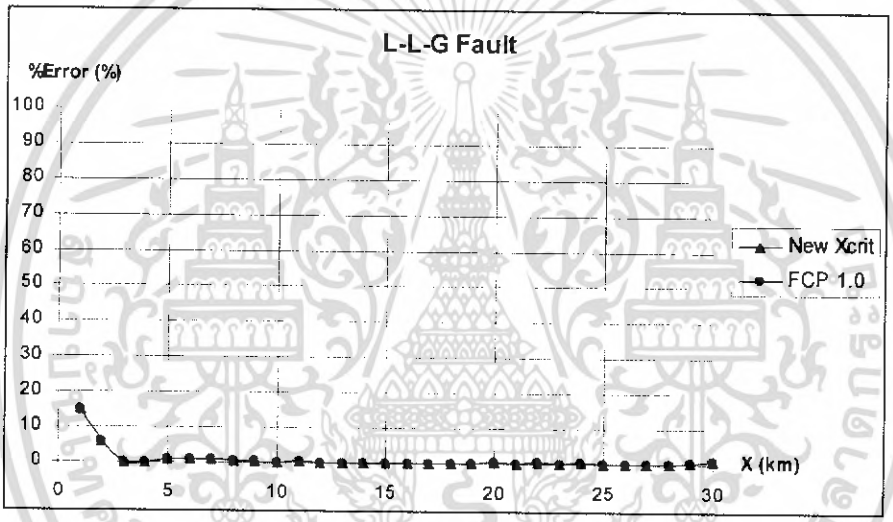
ตารางที่ 5.12 ผลการคำนวณของโปรแกรม FCP 1.0 ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน

ระยะที่เกิดฟอลต์ x (km)	V_{sag} (จุด pcc)			FCP 1.0 (km)	ผลต่างระยะทาง $\lvert x$ - FCP 1.0 $\rvert$ (km)	% Error
	V_B	V_C	$V_{เฉลี่ย}$*			
1	0.745	0.643	0.694	1.151	0.151	15.100
2	1.276	1.157	1.2165	2.117	0.117	5.850
3	1.726	1.615	1.6705	3.005	0.005	0.167
4	2.203	2.1	2.1515	4.002	0.002	0.050
5	2.668	2.508	2.588	4.958	0.042	0.840
6	3.119	2.913	3.016	5.949	0.051	0.850
7	3.556	3.294	3.425	6.949	0.051	0.729
8	3.976	3.654	3.815	7.953	0.047	0.587
9	4.38	3.992	4.186	8.96	0.04	0.444
10	4.776	4.313	4.5445	9.983	0.017	0.170
11	5.13	4.618	4.874	10.97	0.03	0.273
12	5.505	4.911	5.208	12.02	0.02	0.167
13	5.828	5.187	5.5075	13.005	0.005	0.038
14	6.15	5.451	5.8005	14.016	0.016	0.114
15	6.434	5.704	6.069	14.981	0.019	0.127
16	6.721	5.947	6.334	15.975	0.025	0.156
17	6.999	6.187	6.593	16.988	0.012	0.071
18	7.261	6.416	6.8385	17.988	0.012	0.067
19	7.544	6.627	7.0855	19.036	0.036	0.189
20	7.751	6.829	7.29	19.938	0.062	0.310
21	7.998	7.031	7.5145	20.965	0.035	0.167
22	8.198	7.232	7.715	21.916	0.084	0.382
23	8.447	7.411	7.929	22.969	0.031	0.135
24	8.607	7.594	8.1005	23.844	0.156	0.650
25	8.831	7.793	8.312	24.96	0.04	0.160
26	9.057	7.944	8.5005	25.992	0.008	0.031
27	9.24	8.104	8.672	26.964	0.036	0.133
28	9.431	8.266	8.8485	27.999	0.001	0.004
29	9.626	8.43	9.028	29.087	0.087	0.300
30	9.818	8.595	9.2065	30.209	0.209	0.697

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม FCP 1.0 กับสมการ $New\ x_{crit}$ ของฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส-ดิน

(ก) ผลต่าง (ข) %Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

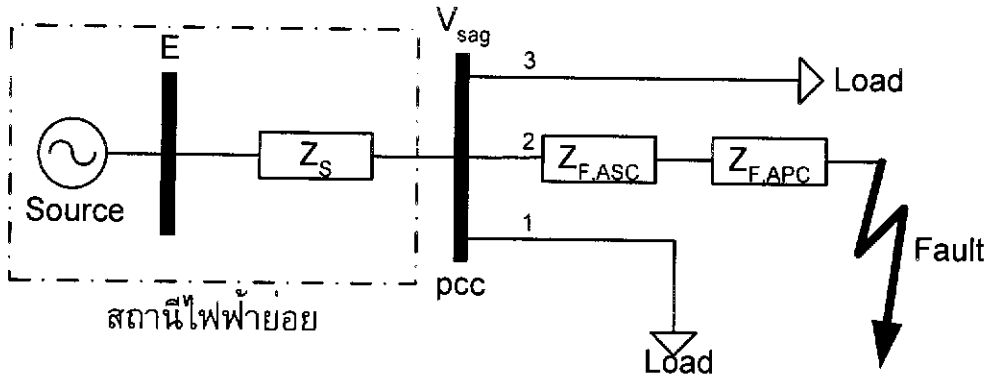
บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

แนวทางในการสร้างโปรแกรมคำนวณระยะทางที่เกิดความผิดพร่องในระบบจำหน่ายโดยวิเคราะห์จากแรงดันดกชั่วขณะ (Fault Calculation Pro 1.0 : FCP 1.0) เป็นการนำความรู้เกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังและแรงดันดกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดพร่องมาประยุกต์ใช้ในการหาสมการคำนวณหาตำแหน่งความผิดพร่องโดยอาศัยสมการขนาดแรงดันดกชั่วขณะ ซึ่งขนาดของแรงดันดกชั่วขณะจะแปรตามชนิดของความผิดพร่องและระยะทางที่เกิดความผิดพร่องดังรายละเอียดในบทที่ 2 และบทที่ 3 ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองการเกิดความผิดพร่องในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อวัดขนาดของแรงดันดกชั่วขณะโดยใช้โปรแกรม PSCAD version 4.1 ดังรายละเอียดในบทที่ 4 และนำขนาดของแรงดันดกชั่วขณะมาคำนวณหาระยะทางที่เกิดความผิดพร่องด้วยโปรแกรม FCP 1.0 แล้วลองทำการเปรียบเทียบระหว่างระยะทางที่เกิดความผิดพร่องที่ระบุไว้ในโปรแกรม PSCAD version 4.1 กับระยะทางที่เกิดความผิดพร่องที่คำนวณด้วยโปรแกรม FCP 1.0 เพื่อดูค่าผลต่างของระยะทางที่เกิดฟอลต์หรือค่าความผิดพลาดของโปรแกรมดังรายละเอียดในบทที่ 5

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นเพียงจุดเริ่มต้นในการนำขนาดของแรงดันดกชั่วขณะมาคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องจากการจำลองระบบไฟฟ้าที่เป็นรูปแบบง่ายๆ ซึ่งเป็นการจำลองระบบเรเดียลอย่างง่ายโดยสายป้อนแต่ละชุดมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนเพียงชนิดเดียวดังรูปที่ 4.1 ดังนั้นเมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้าจริงแล้ว ยังมีปัญหาอีกมากในการที่จะระบุตำแหน่งที่ชัดเจนของฟอลต์ ปัญหาต่างๆ ที่พบพอสรุปได้ได้ดังนี้

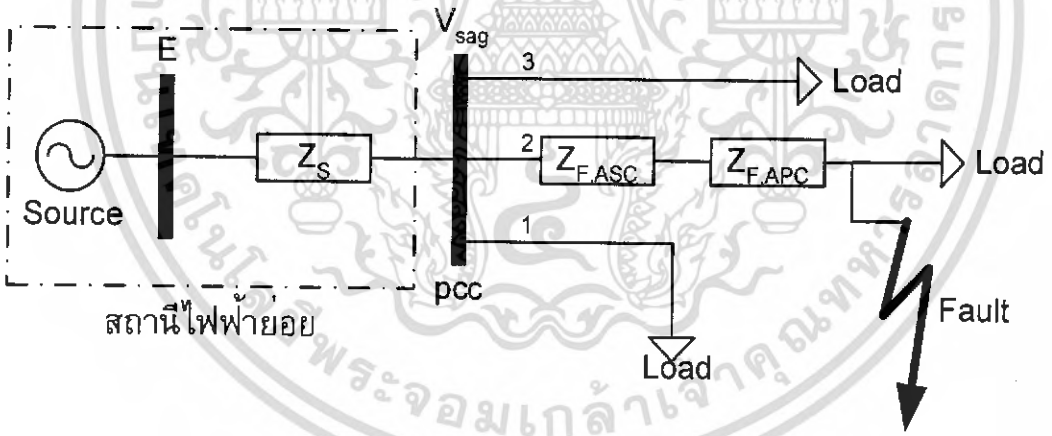
1. เนื่องจากในระบบไฟฟ้าจริงยังไม่มีข้อมูลการบันทึกขนาดของแรงดันดกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์เปรียบเทียบกับระยะทางที่เกิดฟอลต์จริง ดังนั้นสมการและโปรแกรมคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ในปริญญานิพนธ์นี้จึงยังไม่สามารถยืนยันได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนกี่เปอร์เซ็นต์
2. ในระบบไฟฟ้าจริง สายป้อนหนึ่งชุดอาจประกอบด้วยสายตัวนำมากกว่าหนึ่งชนิด เช่น ในสายป้อนชุดหนึ่งประกอบด้วยสายสแปซเอเรียลเคเบิล (space aerial cable : ASC) และสายหุ้มฉนวนบาง (partially insulated conductor : APC) ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน ดังนั้นในสายป้อนชุดหนึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์สองตัวต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 7.1 และสายตัวนำทั้งสองชนิดมีความยาวไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้สมการการคำนวณหาระยะทางที่เกิดฟอลต์ (x_{crit}) เปลี่ยนแปลงไปและซับซ้อนยิ่งขึ้นเนื่องจากจำนวนชนิดของสายตัวนำและความยาวของสายตัวนำแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 สายป้อนหนึ่งชุดประกอบด้วยสายตัวนำสองชนิด

3. ในระบบไฟฟ้าจริง สายป้อนชุดหนึ่งจะมีแท็บแยกไปยังสายป้อนย่อย ซึ่งจะทำให้ยากต่อการระบุตำแหน่งฟอลต์ ในกรณีที่ฟอลต์เกิดหลังแท็บแยกดังรูปที่ 6.2 เนื่องจากไม่สามารถระบุได้แน่นอนว่าฟอลต์เกิดขึ้นที่สายป้อนย่อยเส้นใด
4. จากข้อ 2. และข้อ 3. ในแต่ละชุดสายป้อนมีจำนวนชนิดของสายตัวนำและจำนวนแท็บแยกต่างกัน ดังนั้นสมการระบุตำแหน่งความผิดพร่องของสายป้อนแต่ละชุดอาจแตกต่างกัน



รูปที่ 6.2 สายป้อนหนึ่งชุดมีแท็บแยกไปยังสายป้อนย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางในการพัฒนา

ทำการเก็บข้อมูลของระยะทางที่เกิดฟอลต์และวัดแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากฟอลต์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าจริงเพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม และทำการแก้ไขสมการจากปัญหาที่พบที่ได้กล่าวไปแล้ว ถ้าหากสมการคำนวณหาระยะทางที่เกิดความผิดพร่องสามารถแก้ไขได้จนค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้า ก็สามารถนำไปสร้างโปรแกรมคำนวณระยะทางที่เกิดความผิดพร่องและประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดในอนาคตที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถวัดขนาดของแรงดันตกชั่วขณะได้

อย่างไรก็ตามผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูลต่างๆ ในปริญญานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และผู้ที่สนใจศึกษาในเรื่องของการระบุตำแหน่งความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] โดศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, **การผลิต การส่งและจ่ายไฟฟ้า**, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2544.

[2] ดฤน แสงสุวรรณ, **การหาค่าความเชื่อถือได้**, กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาตร์, 2546.

[3] ยุทธพงศ์ ทัพผตุง, "การประมาณระยะทางของตำแหน่งกระแสลัดวงจรแบบฟัซซี่โดยเครื่องควบคุมแบบตรรกที่โปรแกรมได้," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

[4] พุฒิขจร บุญมี, "การหาตำแหน่งของฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

[5] อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล, "การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่ง," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

[6] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, **การป้องกันระบบไฟฟ้า**, กรุงเทพฯ, เอ็มแอนด์อี, 2545.

[7] Math H. J. Bollen, **Understanding power quality problems : voltage sags and interruptions**, New York, IEEE Press, 2000.

[8] ชำนาญ ห่อเกียรติ **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[9] เชาวฤทธิ์ ธรรมเพียร, "การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PSS/E," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

[10] IEEE Std. 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", June, 1995.

[11] ศักดิ์ชัย นรสิงห์. สิงหาคม 2545. "แรงดันตกชั่วขณะ (1)." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://industrial.se-ed.com/itr99/itr99_96.asp

[12] Dr.Channarong Banmongkol, Mr.Praditpong Suksirithaworngul, **Workshop on application of ATP-EMTP for Power System Transients**, Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, March, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การใช้งานโปรแกรม PSCAD

ก.1 การใช้งานโปรแกรม PSCAD เบื้องต้น

การใช้งานโปรแกรม PSCAD เบื้องต้น มีขั้นตอนในการใช้งานดังต่อไปนี้

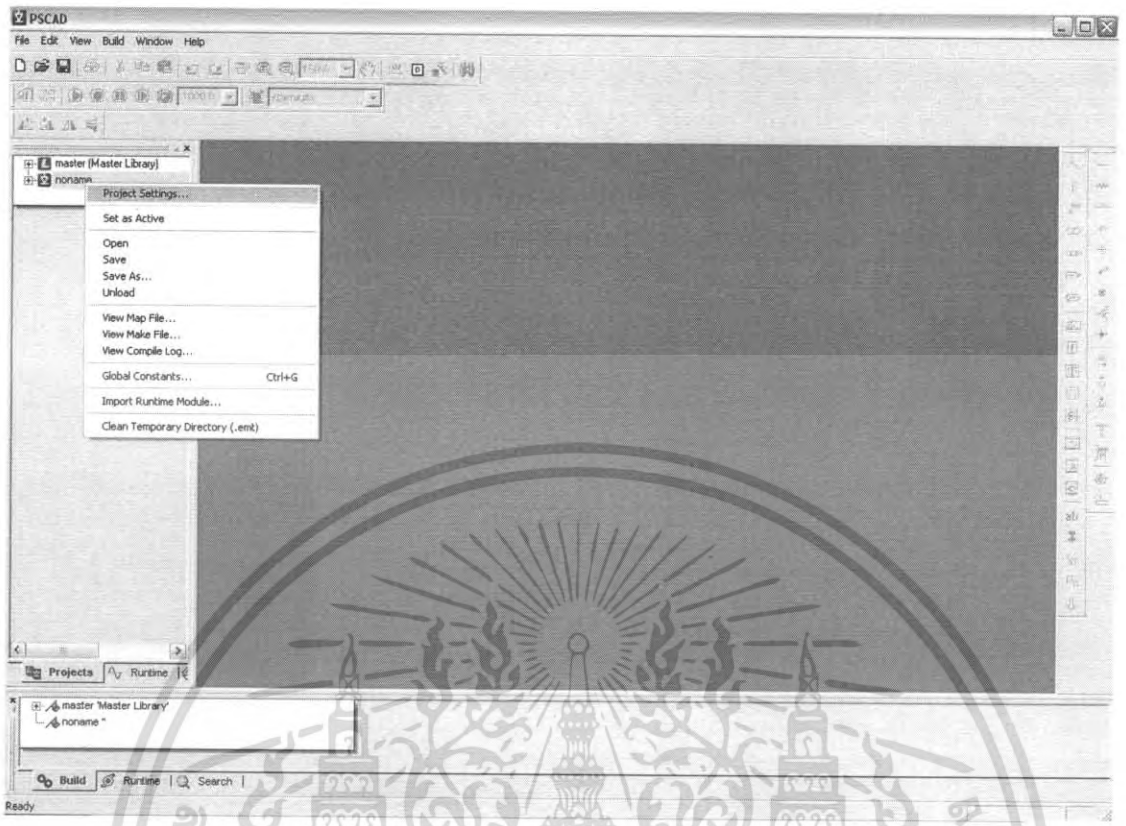
1. เมื่อเข้าโปรแกรม คลิกที่ File เลือก New คลิก Case ตามที่แสดงในรูปที่ ก.1

2. คลิกขวาที่ไฟล์ชื่อ noname ที่สร้างขึ้น เลือก Project settings... ตามที่แสดงในรูปที่ ก.2

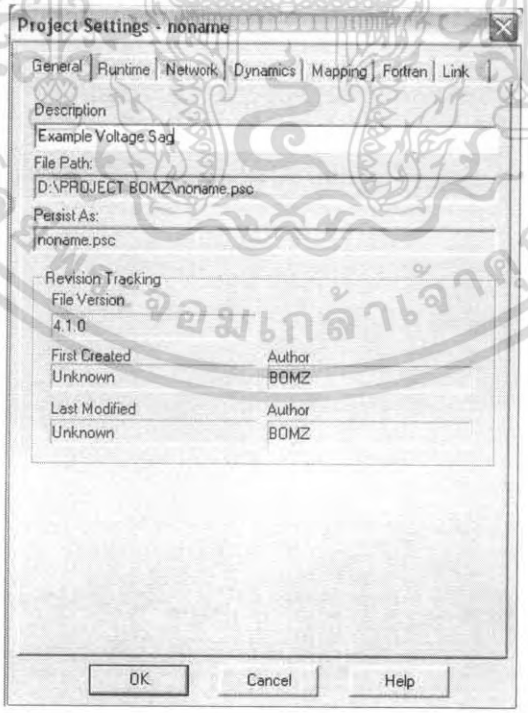
3. เมื่อคลิกแล้วจะปรากฏหน้าต่างให้เลือกที่แถบ General แล้วทำการตั้งชื่อในช่อง Description กด OK ดังที่แสดงในรูปที่ ก.3

รูปที่ ก.1 หน้าต่างโปรแกรม PSCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



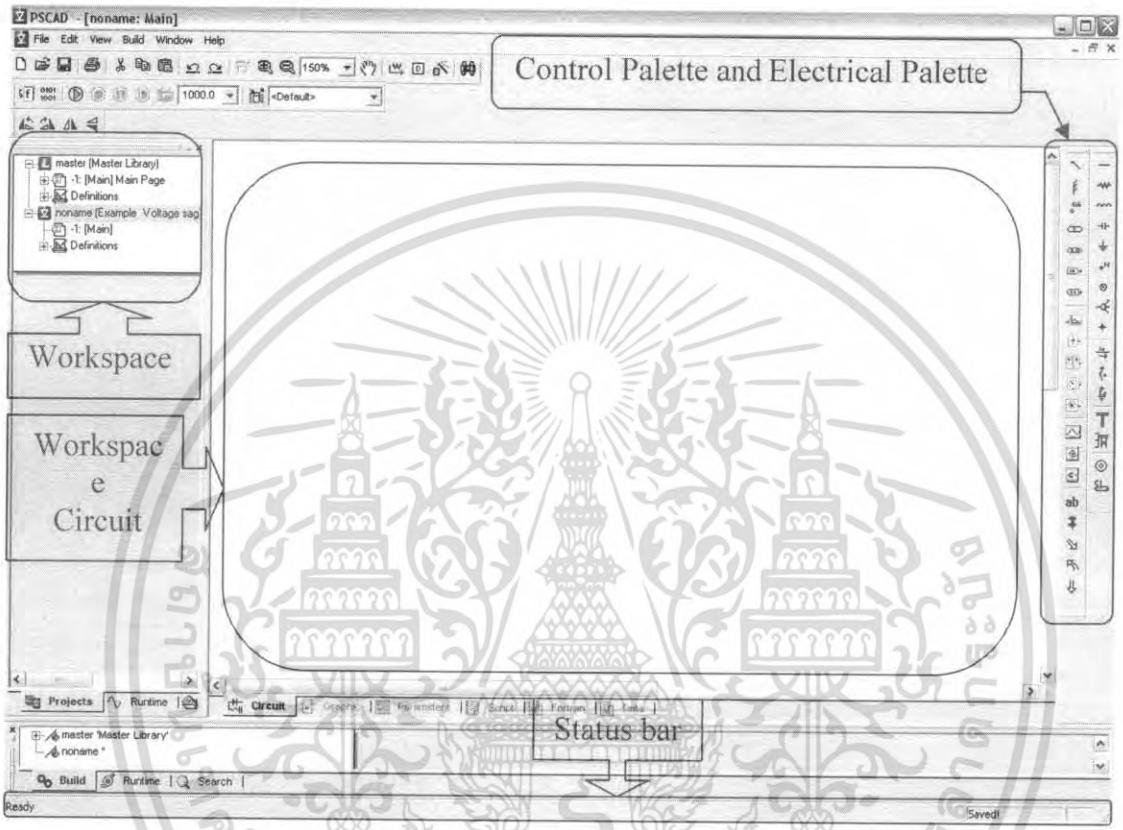
รูปที่ ก.2 เริ่มใช้งานในขั้นตอนที่ 2



รูปที่ ก.3 หน้าต่าง Project Settings ที่ปรากฏขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

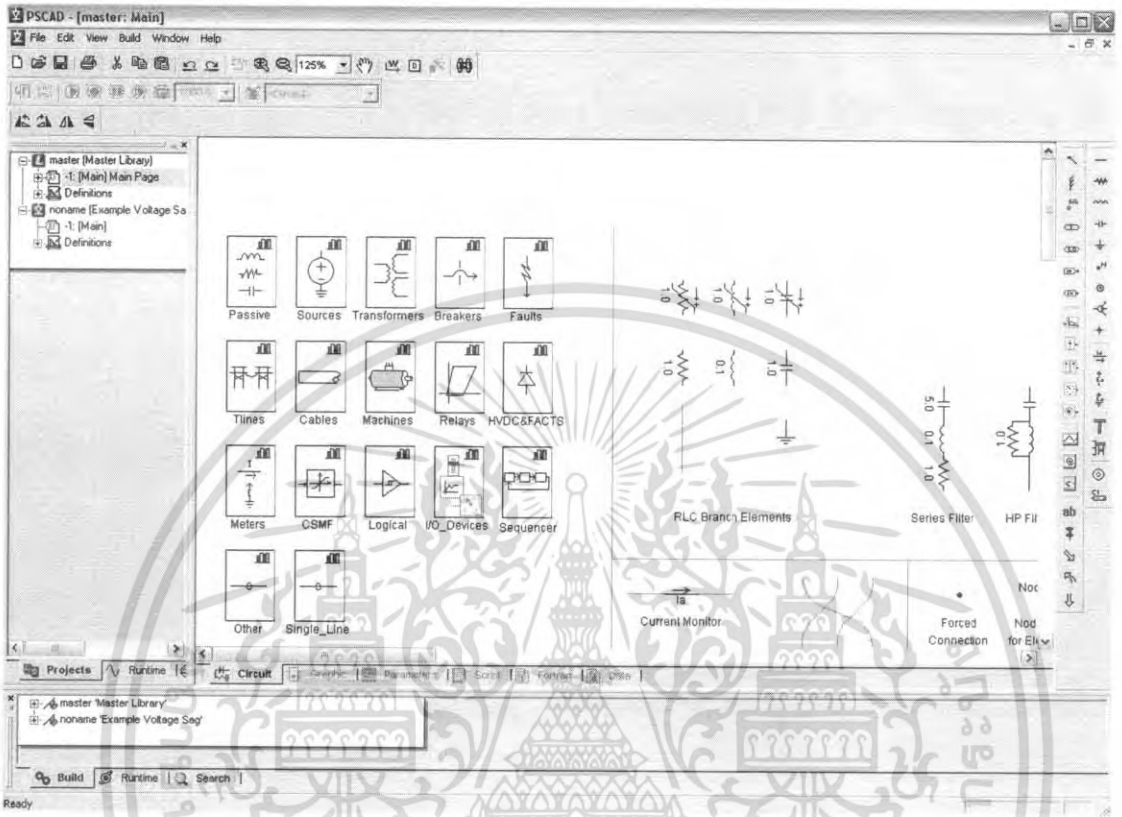
4. ดับเบิ้ลคลิกที่ไฟล์ที่ได้ทำการตั้งชื่อไว้ จะได้ Workspace Circuit ขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างวงจร และสามารถนำอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในโปรแกรมนำมาใช้ จาก Control Palette และ Electrical Palette ทางขวามือของโปรแกรม โดยโปรแกรมจะแสดงสถานะว่าอยู่ในกรณีใดๆ บ้างในแถบ Status Bar ด้านล่างของโปรแกรม ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 รายละเอียดส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

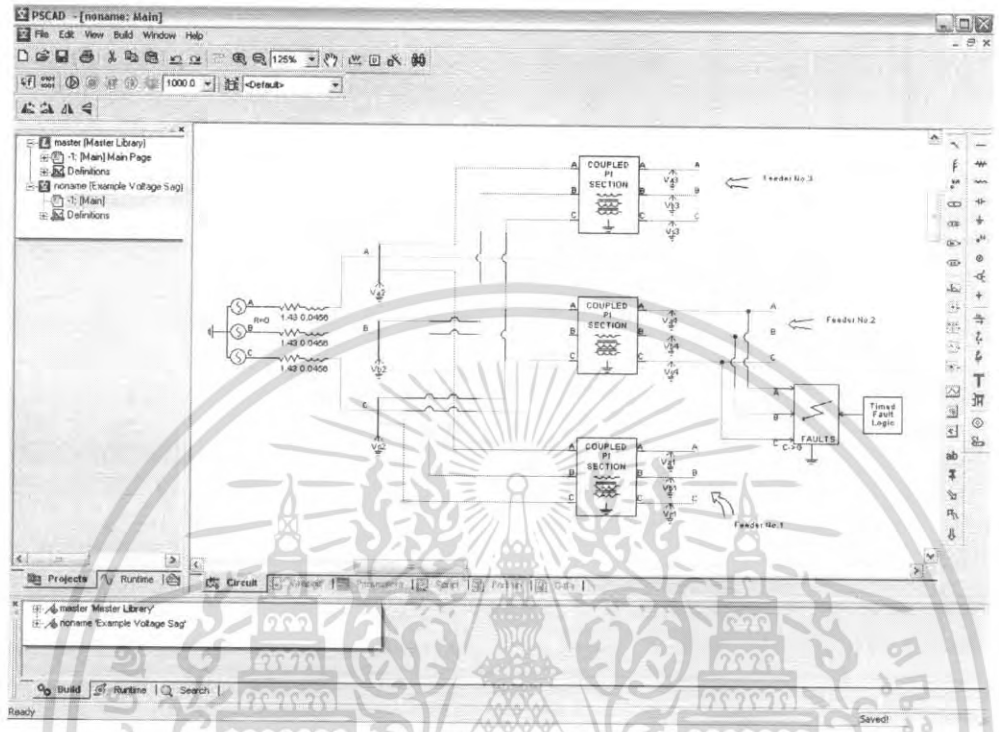
5. หรือสามารถเลือกฟังก์ชั่นต่าง ๆ ที่เป็นรูปภาพ ได้จาก Master (Master Library) ที่อยู่ด้านบนของไฟล์ที่ได้สร้างขึ้นในส่วน Workspace แล้วดับเบิ้ลคลิกที่ (Main) Main Page ดังรูปที่ ก.5



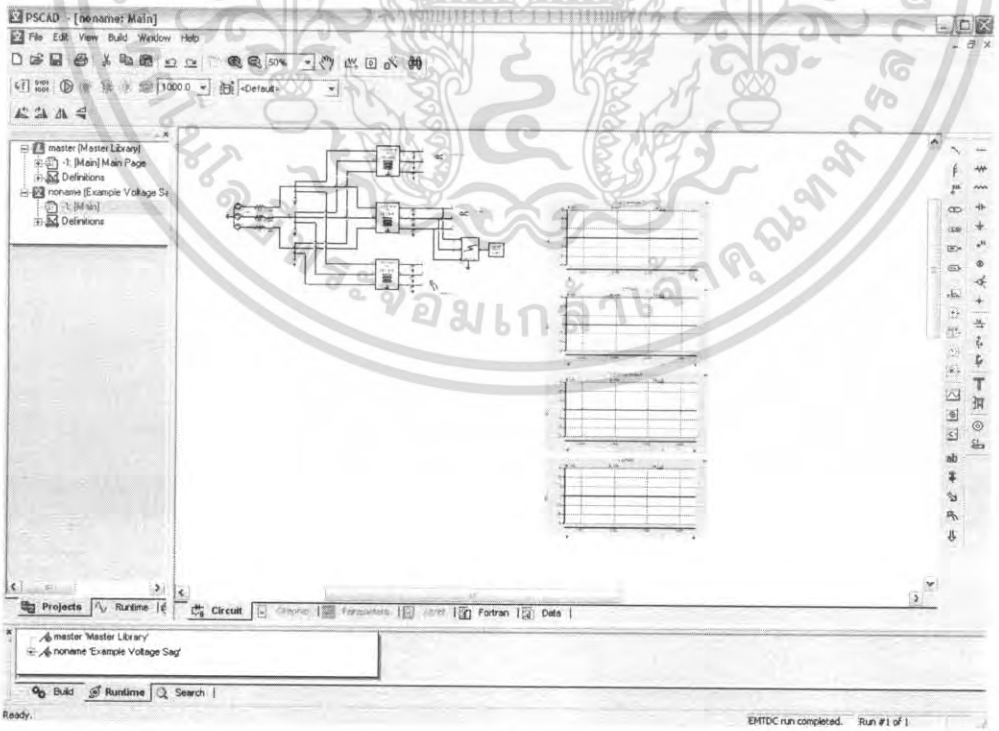
รูปที่ ก.5 ฟังก์ชั่นต่าง ๆ ที่ใช้ใน Master (Master Library) ที่ใช้ในการสร้างวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่อสร้างวงจรโดยการใช้ฟังก์ชั่นจาก Control Palette, Electrical Palette และ Master (Master Library) ตามรูปแบบของวงจรจำลองระบบที่กำหนดไว้จะได้ดังรูปที่ ก.6 และ ก.7



รูปที่ ก.6 วงจรจำลองระบบสายป้อนสร้างโดยโปรแกรม PSCAD

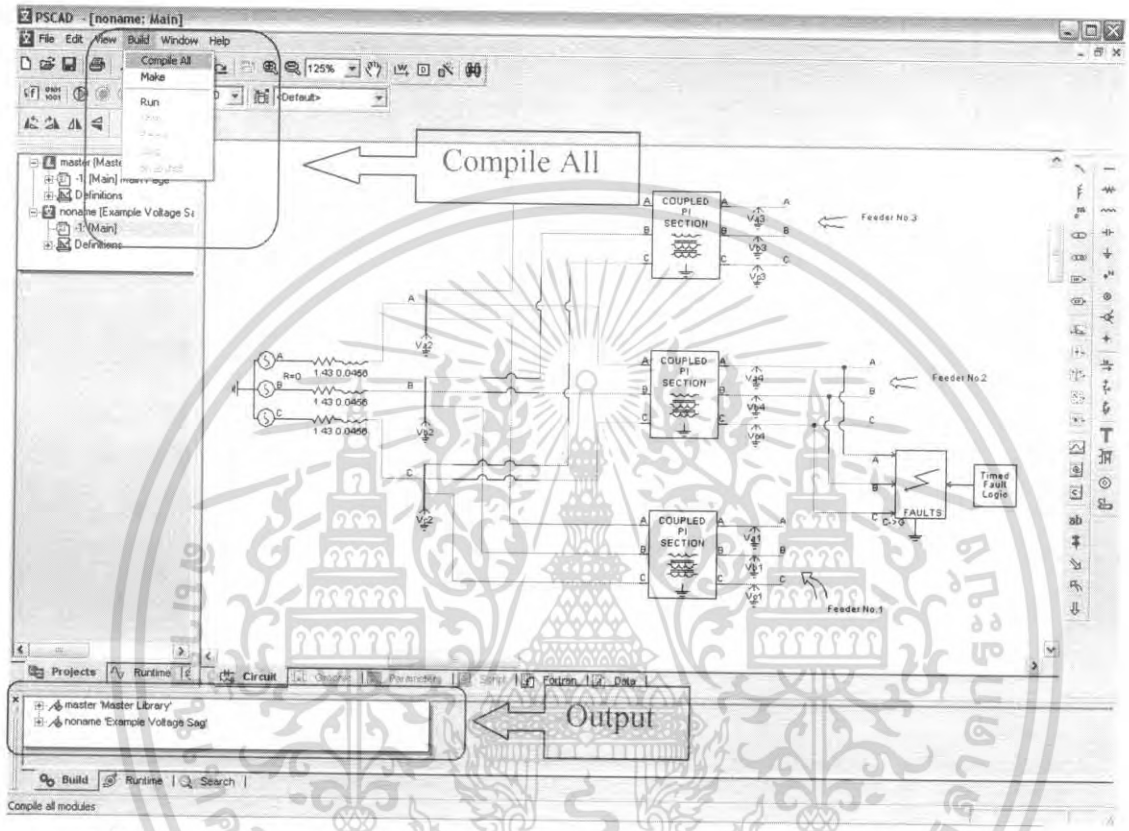


รูปที่ ก.7 ลักษณะวงจรและผลลัพธ์ที่จะแสดงออกมาเป็นกราฟแรงดัน

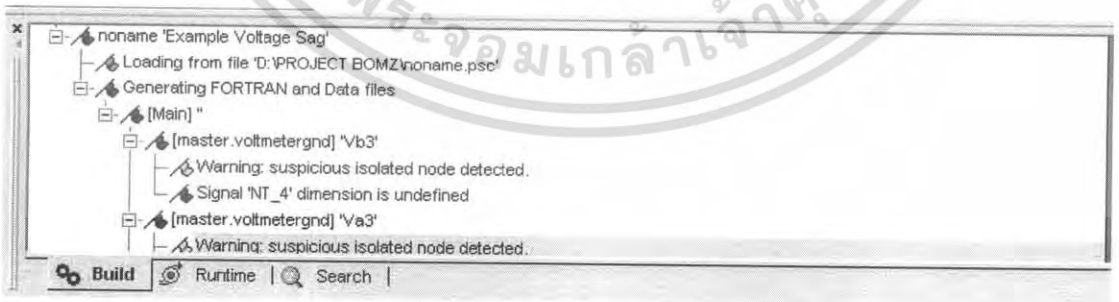
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อได้ทำการสร้างวงจรเรียบร้อยขั้นตอนต่อไปต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องวงจร โดยการคลิกที่ Build เลือก Compile All ตามรูปที่ ก.8

หากวงจรที่สร้างขึ้นถูกต้องหน้าต่าง Output ด้านล่างจะปรากฏเป็นธงสีเขียวทั้งหมดดังรูปที่ ก.8 แต่หากวงจรไม่ถูกต้องหรือมีข้อผิดพลาดจะปรากฏเป็นธงสีเหลืองหรือแดง ซึ่งจะต้องทำการตรวจสอบตามที่ได้ระบุไว้ใน Output ดังรูปที่ ก.9



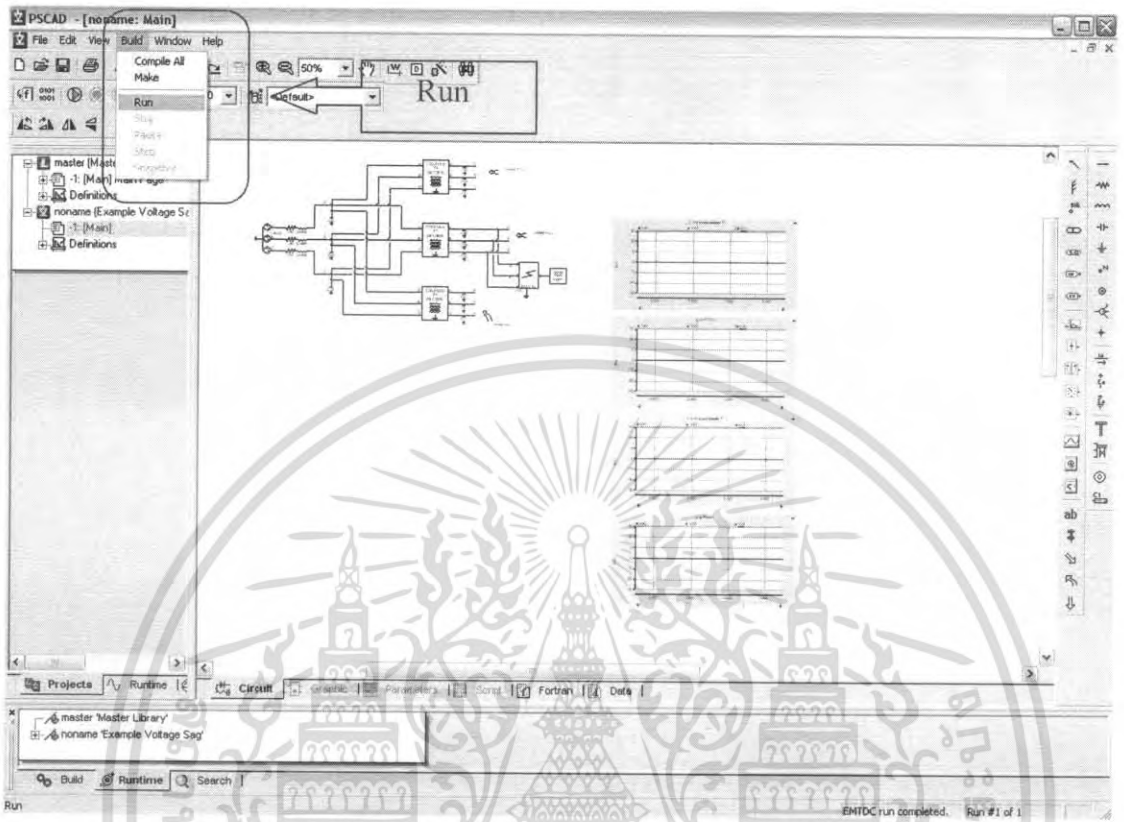
รูปที่ ก.8 การตรวจสอบความถูกต้องของวงจร และผลการตรวจสอบที่แสดงใน Output



รูปที่ ก.9 หน้าต่าง Output จะแจ้งความผิดพลาดหากวงจรไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

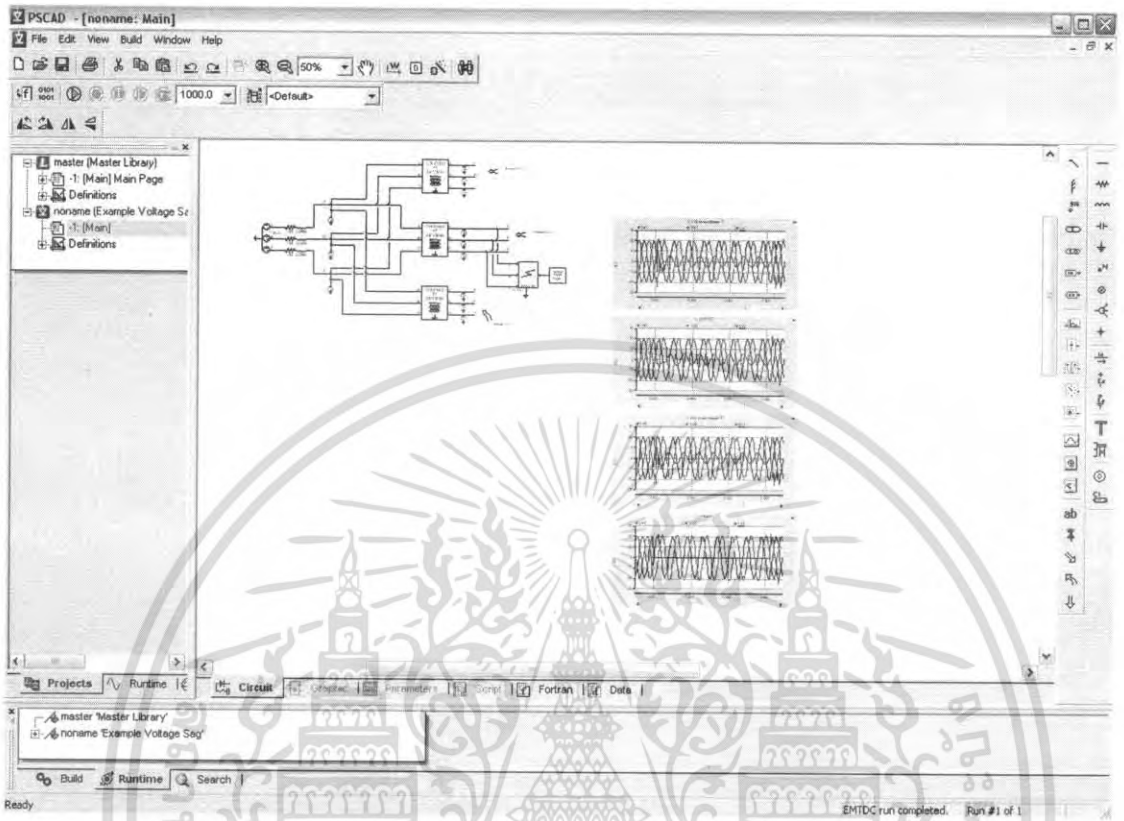
8. เริ่มต้นการทำงานของระบบโดยการคลิกที่ Build เลือก Run ดังแสดงดังรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.10 เริ่มการทำงานของวงจรจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ผลที่ได้จากการทดลองจะแสดงออกมาในรูปกราฟแรงดัน ดังรูปที่ ก.11 ซึ่งจะแสดงค่าแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามจุดที่ได้กำหนดไว้ ในช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์



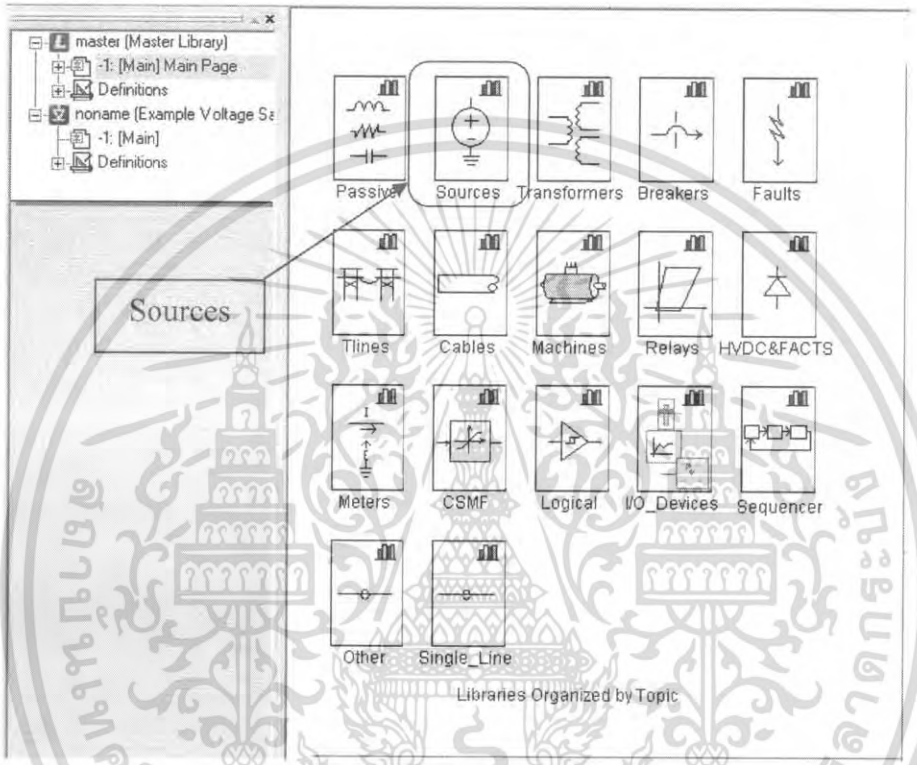
รูปที่ ก.11 ลักษณะของกราฟที่แสดงแรงดันทั้ง 3 เฟส ในจุดที่ได้กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การใช้งานโปรแกรม PSCAD เพื่อจำลองการเกิดฟอลต์

ขั้นตอนการจำลองการเกิดฟอลต์ในโปรแกรม PSCAD จะต้องทำตามขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม PSCAD เบื้องต้น ในหัวข้อที่ ก.1 ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 เสียก่อน แล้วจึงทำตามขั้นตอนต่อไป ดังนี้

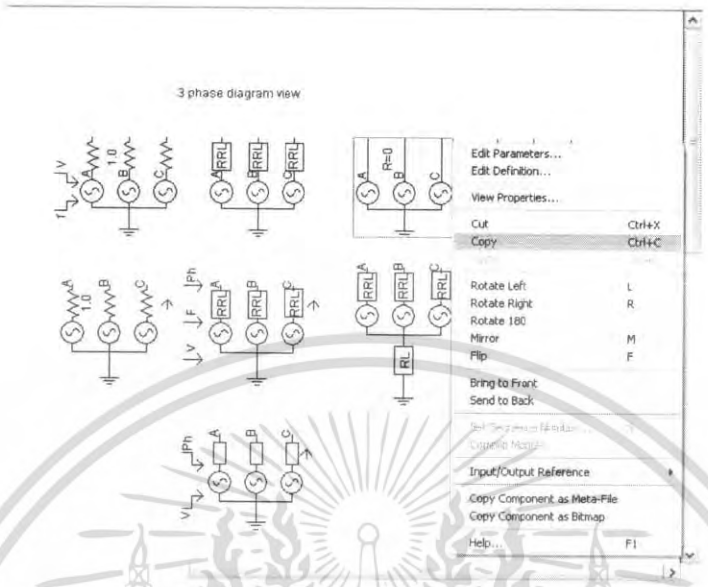
1. เลือกแหล่งจ่ายโดยการดับเบิ้ลคลิกที่ฟังก์ชั่น Sources ในหน้าต่างของ [Main] Main Page ดังรูปที่ ก.12



รูปที่ ก.12 ฟังก์ชั่น Source

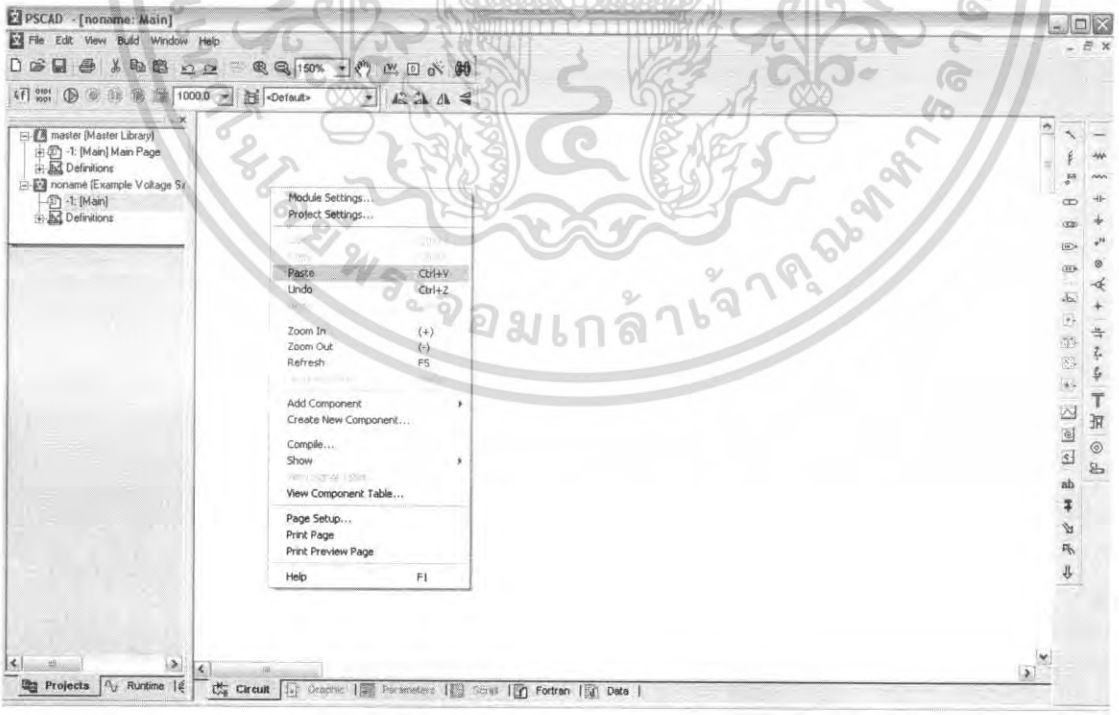
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อหาชนิดแหล่งจ่ายตามที่ต้องการได้แล้ว คลิกขวาในแหล่งจ่ายที่ต้องการ เลือกคำสั่ง Copy ดังรูปที่ ก.13 หรือกดปุ่ม Ctrl+C บน Keyboard



รูปที่ ก.13 เลือกฟังก์ชั่น Source

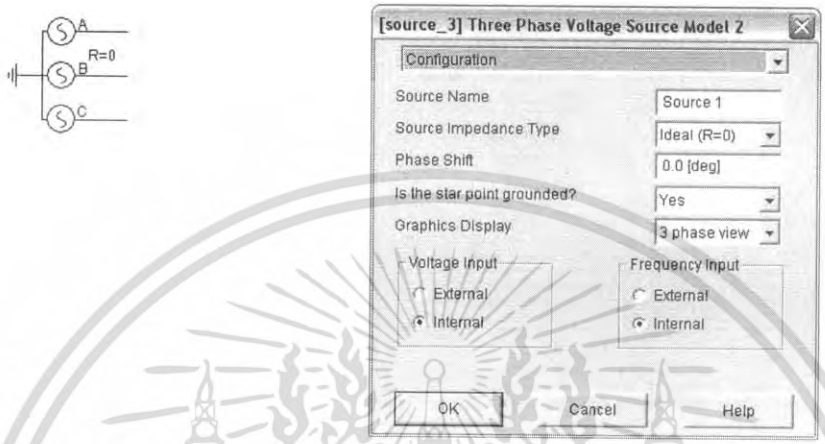
3. ดับเบิ้ลคลิกที่หัวข้อ [Main] ของหน้าต่าง Workspace ของไฟล์ที่สร้างขึ้น ทำการวางแหล่งจ่ายที่ต้องการโดยคลิกขวาในพื้นที่ Workspace Circuit เลือก Paste ดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.14 ทำการติดตั้งฟังก์ชั่น Source ลงใน Workspace Circuit

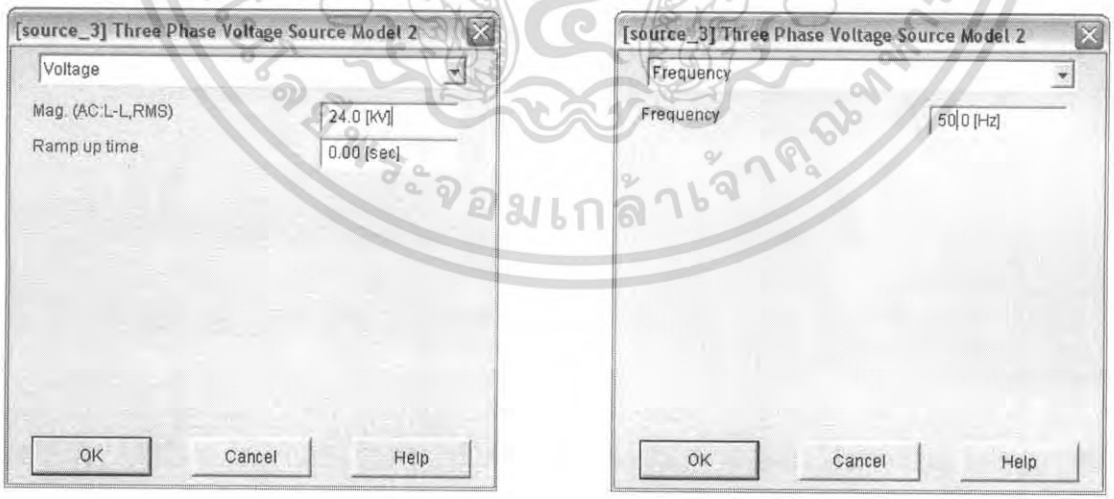
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อได้แหล่งจ่ายแล้ว ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ตรงตามที่จะใช้งานโดยการดับเบิ้ลคลิกที่รูปแหล่งจ่าย จะปรากฏฟังก์ชั่น Three Phase Voltage Source Model 2 จากนั้นในหมวดฟังก์ชั่น Configuration หัวข้อ Source Impedance Type กำหนดเป็น Ideal (R=0) (เนื่องจากจะทำการเลือกเป็นค่าพารามิเตอร์ R และ L แบบภายนอกจึงเลือก impedance type เป็น Ideal) ดังรูปที่ ก.15



รูปที่ ก.15 หน้าต่างพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายที่ใช้ปรับแต่งค่า

5. ทำการตั้งค่าแรงดันโดยเลือกหมวดฟังก์ชั่น Voltage ในหัวข้อ Mag. (AC;L-L,RMS) เปลี่ยนค่าแรงดันเป็น 24 kV หรือตามที่ต้องการส่วนฟังก์ชั่น Ramp up time ปรับเป็น 0.00 ดังรูปที่ ก.16 (ก) และปรับความถี่โดยเลือกฟังก์ชั่น Frequency ปรับความถี่เป็น 50 Hz แล้วกด OK ดังรูปที่ ก.16 (ข)



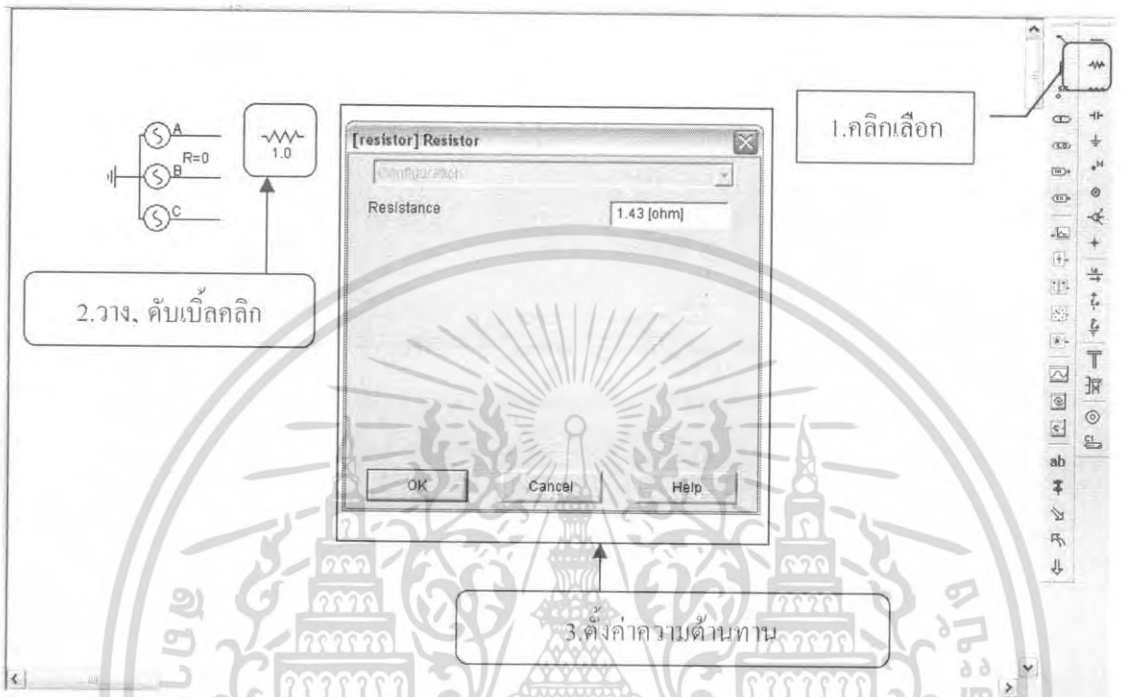
(ก) (ข)

รูปที่ ก.16 หน้าต่างปรับแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่าย

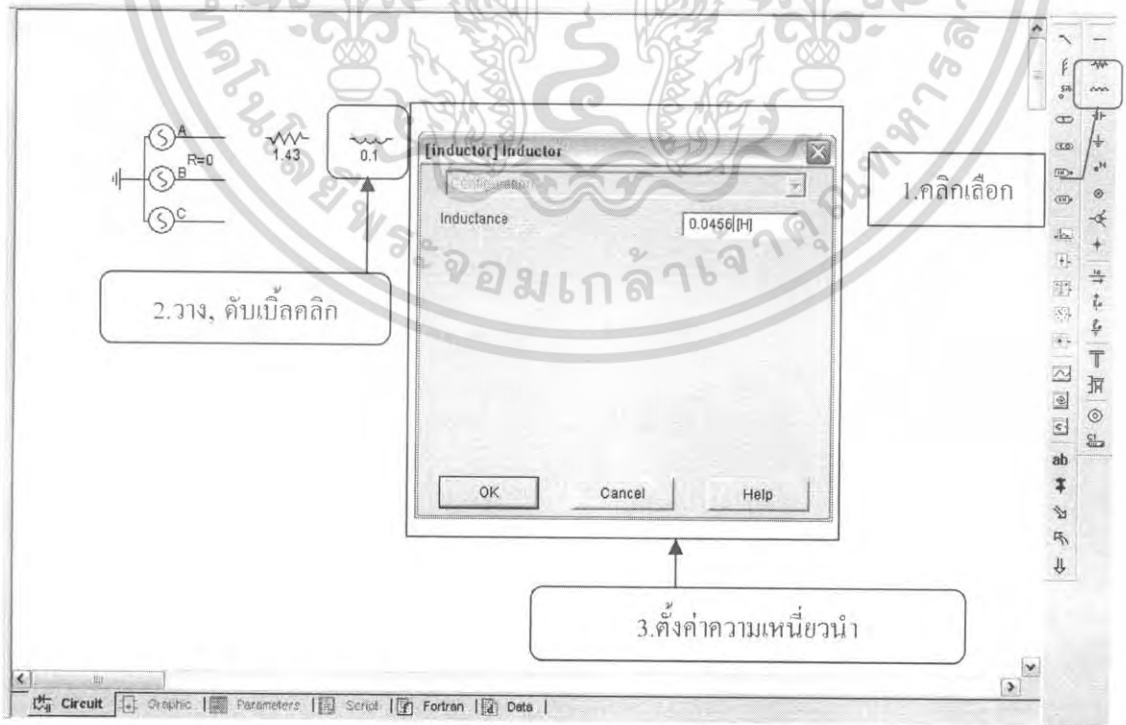
(ก) ปรับค่าแรงดัน (ข) ปรับค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ติดตั้งค่าพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายโดยการต่อ R และ L โดยคลิกเลือกอุปกรณ์ได้จาก Electrical Palette ด้านขวามือแล้วกดคลิกวางใน Workspace Circuit แล้วทำการกำหนดค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำโดยดับเบิ้ลคลิกที่ตัวอุปกรณ์นั้นๆ แล้วป้อนค่าลงไปแล้วกด OK ดังรูปที่ ก.17 และ ก.18



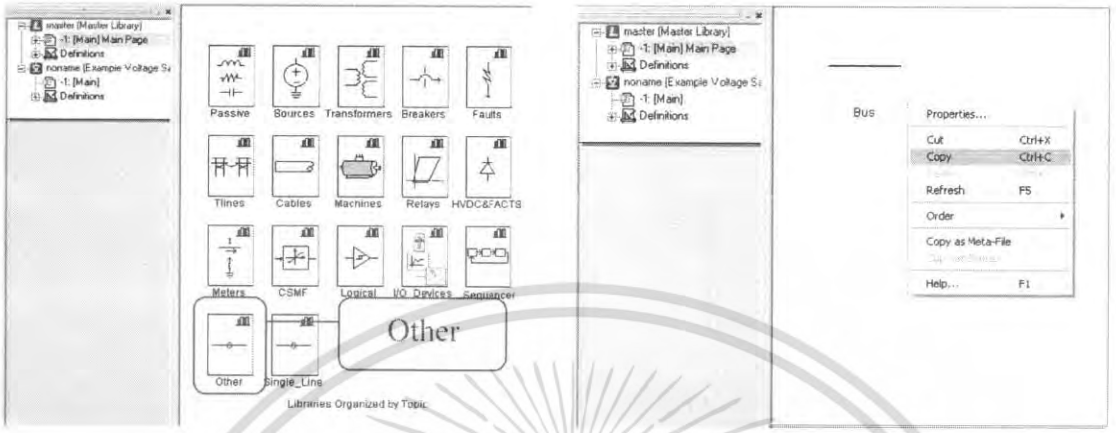
รูปที่ ก.17 การวางตัวต้านทานและการกำหนดค่า



รูปที่ ก.18 การวางตัวเหนี่ยวนำและการกำหนดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

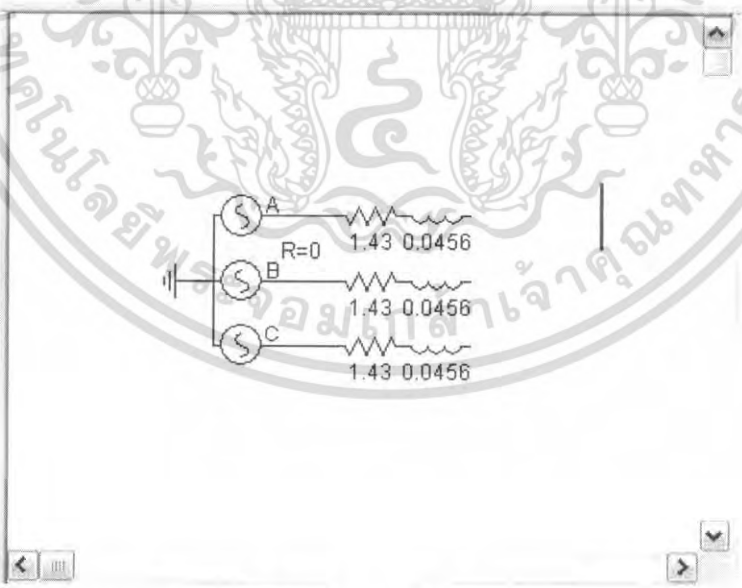
7. เลือก Bus มาใช้ในวงจรโดยดับเบิ้ลคลิกฟังก์ชั่น Other ใน [Main] Main Page ใน Master (Master Library) แล้วคลิกขวาที่ Bus เลือกคำสั่ง Copy ดังรูปที่ ก.19 (ก) และ (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ ก.19 การเลือก Bus (ก) ดับเบิ้ลคลิกที่ Other (ข) คลิกขวาที่ Bus แล้วเลือก Copy

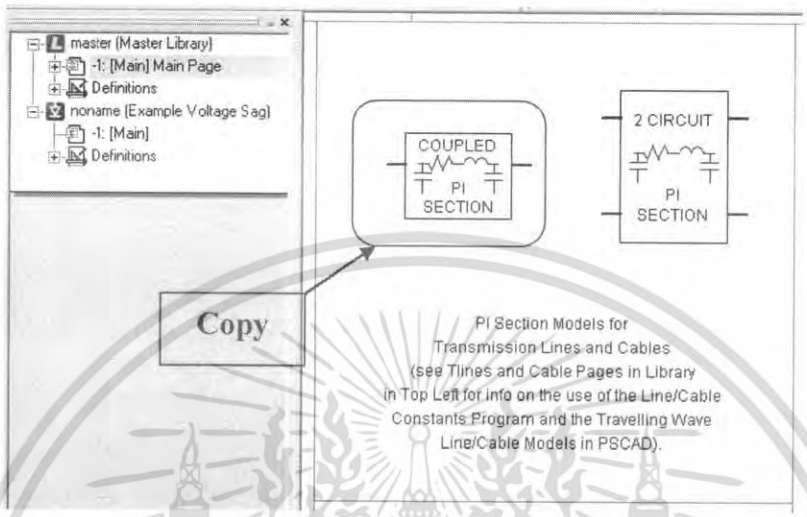
8. ทำการวาง Bus โดยคลิกขวาใน Workspace เลือก Paste จะได้ Bus ดังรูปที่ ก.20 รูปจะอยู่ในลักษณะแนวนอนสามารถปรับให้อยู่ในแนวตั้งได้โดยการคลิกซ้ายที่ตัว Bus 1 ครั้ง แล้วกด L หรือ R เพื่อให้รูปหมุนไปซ้ายหรือขวาตามต้องการ



รูปที่ ก.20 การจัด Bus ให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อสะดวกในการต่อวงจร

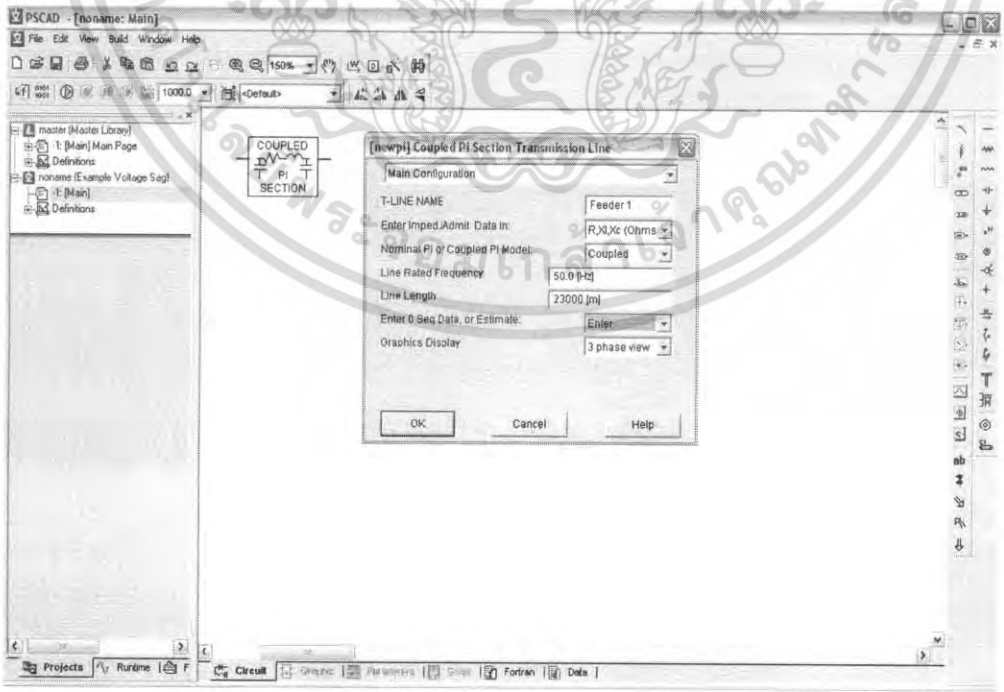
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ในการกำหนดระยะทางของสายป้อนจะใช้ฟังก์ชั่น Coupled Pi Section Transmission Line และเป็นตัวกำหนด ค่าพารามิเตอร์ของตัวสายป้อน โดยเลือกใน [Main] Main Page เลื่อนหน้าต่างมาบริเวณกลางของหน้า Workspace Circuit แล้ว Copy ตัว Coupled Pi Section Transmission Line ไว้ ดังรูปที่ ก.21



รูปที่ ก.21 ฟังก์ชั่น Coupled Pi Section Transmission Line ที่ใช้ในการออกแบบสายป้อน

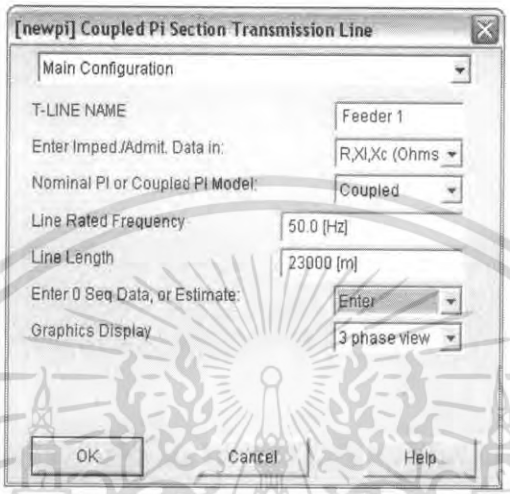
10. นำฟังก์ชั่น Coupled Pi Section Transmission Line ที่ได้ Paste ลงใน [Main] ของ Workspace Circuit แล้วทำการกำหนดค่าโดยดับเบิ้ลคลิก จะแสดงปรากฏหน้าต่างขึ้นให้ปรับค่าต่างๆ ดังรูปที่ ก.22



รูปที่ ก.22 การปรับตั้งค่าฟังก์ชั่น Coupled Pi Section Transmission Line

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เมื่อปรากฏหน้าต่างขึ้นมาหมวดฟังก์ชั่นแรกที่ทำการปรับคือ Main Configuration ดังรูปที่ ก.23 โดยช่องแรกเป็นการตั้งชื่อ ในช่องที่ 2 เป็นการเลือกการป้อนค่าพารามิเตอร์ เลือกเป็น R,XI,Xc (Ohms) ช่องที่ 4 ความถี่ที่ใช้กับสายส่งเลือกเป็น 50 Hz ช่องที่ 5 ระยะทางความยาวของสายป้อน ช่องที่ 7 เลือกการแสดงของรูปอุปกรณ์เป็น 3 Phase View



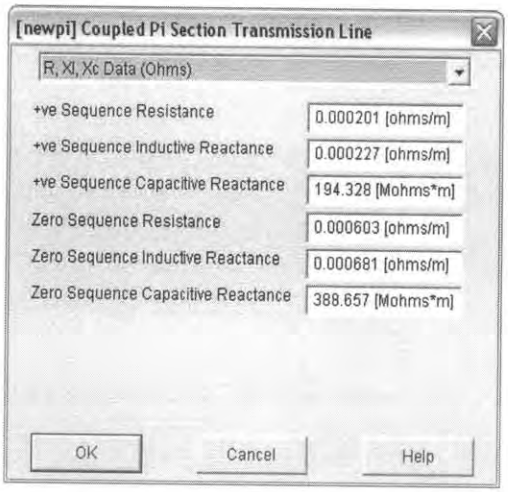
รูปที่ ก.23 การปรับค่า ความถี่ และ ความยาว และพารามิเตอร์อื่นๆ

12. จากนั้นเลือกหมวดฟังก์ชั่น R,XI,Xc Data (Ohms) เพื่อป้อนค่าพารามิเตอร์ของสาย เนื่องจากค่าที่ใช้ในโปรแกรมมีหน่วยเป็น ohms/km และ μF/km แต่ในการป้อนค่าให้กับโปรแกรมต้องใช้หน่วยเป็น ohms/m และ Mohms*m จึงต้องทำการแปลงค่าก่อนการป้อนค่าโดยค่าที่ป้อน เป็นพารามิเตอร์ของสาย Space Aerial Cable (ASC) มีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ ก.1 แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปใส่ในฟังก์ชั่น R,XI,Xc Data (Ohms) ดังรูปที่ ก.24 แล้วกด OK

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของสาย ASC ที่นำมาแปลงเพื่อให้ใช้ในโปรแกรมได้

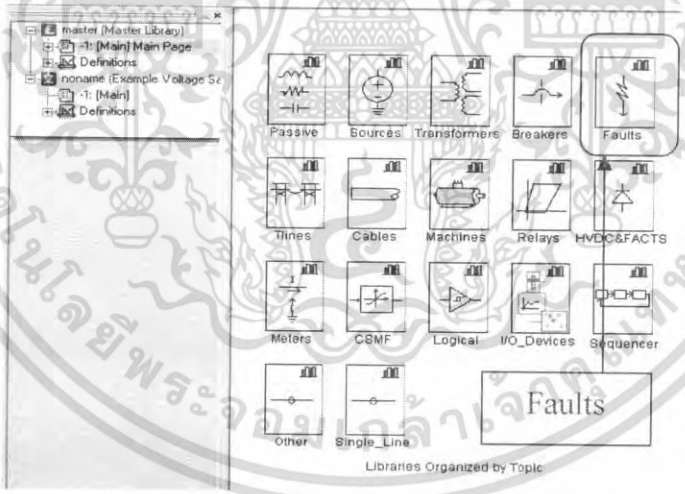
ค่าพารามิเตอร์ของสาย ASC	ค่าพารามิเตอร์ ASC ที่แปลง
R_1= 0.201 Ω/km	R_1= 0.000201 Ω/m
R_0= 0.603 Ω/km	R_0= 0.000603 Ω/m
X_1= 0.227 Ω/km	X_1= 0.000227 Ω/m
X_0= 0.681 Ω/km	X_0= 0.000681 Ω/m
C_1= 0.01638 μF/km	C_1= 194.328 Mohms*m
C_0= 0.00819 μF/km	C_0= 388.657 Mohms*m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.24 ป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแปลงค่าของสาย ASC

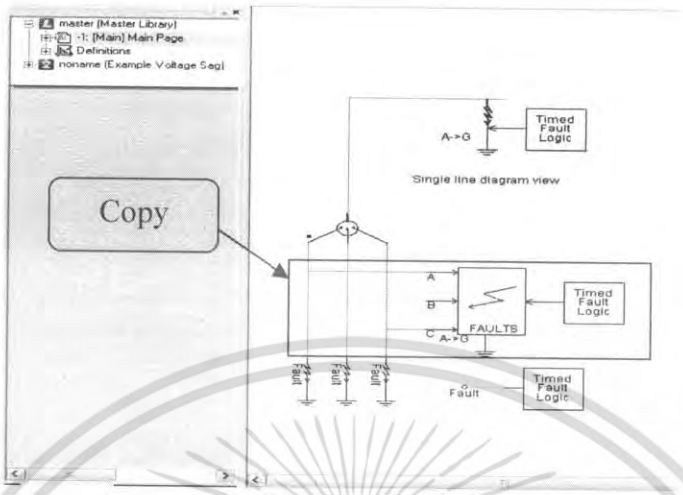
13. ฟอลต์ที่จะสร้างขึ้นในระบบจำลองจะใช้ฟังก์ชั่น Thee Phase Fault ในการสร้างและฟังก์ชั่น Time Fault Logic ในการกำหนดเวลาเกิดและช่วงระยะเวลาเกิด โดย ดับเบิ้ลคลิกที่ Faults ใน [Main] Main Page ดังรูปที่ ก.25



รูปที่ ก.25 ฟังก์ชั่น Faults

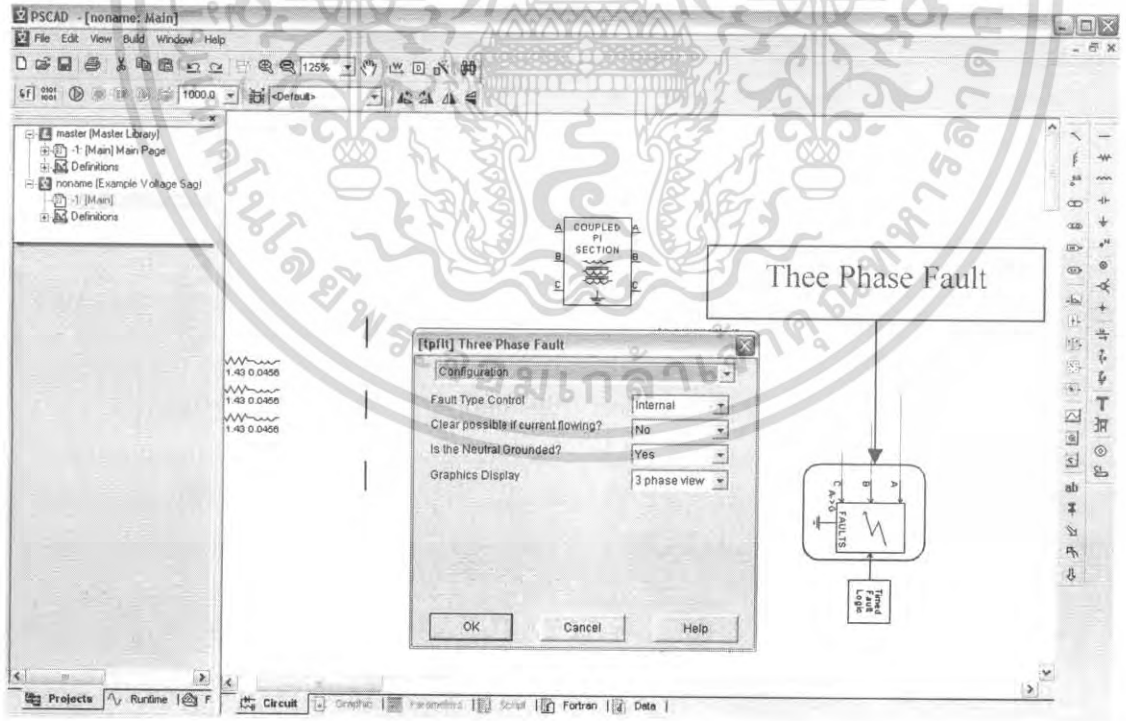
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกอุปกรณ์โดยการคลิกซ้ายแล้วป้ายพื้นที่ ที่ครอบคลุมอุปกรณ์นั้นแล้วทำการ Copy ดังรูปที่ ก.26



รูปที่ ก.26 การนำฟังก์ชั่น Faults ไปใช้

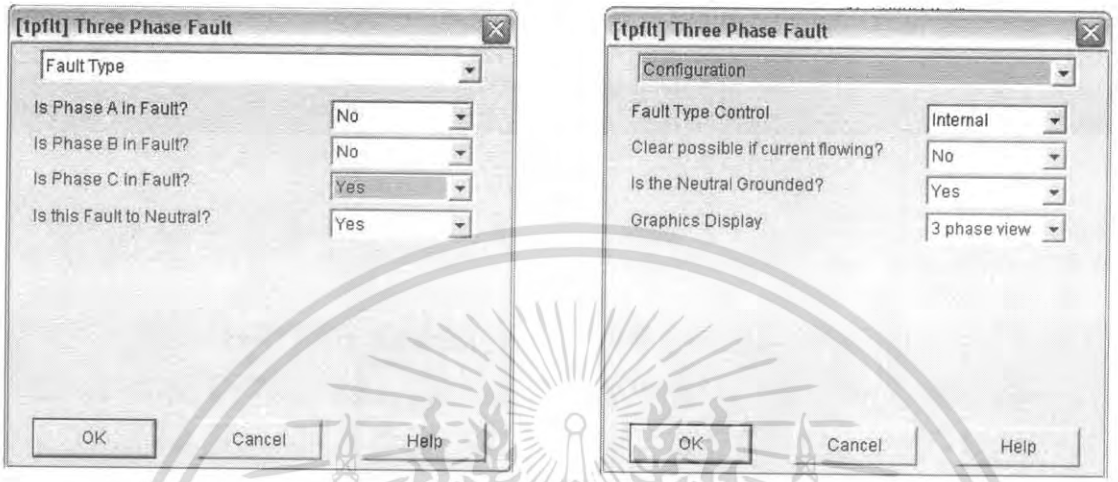
14. ทำการวางอุปกรณ์โดยเลือก Paste ลงใน Workspace Circuit แล้วทำการปรับค่าต่างโดยการดับเบิ้ลคลิกที่ตัวฟังก์ชั่น Three Phase Fault จะปรากฏหน้าต่าง Configuration ดังรูปที่ ก.27



รูปที่ ก.27 การเข้าสู่ฟังก์ชั่นปรับตั้งลักษณะรูปแบบเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าต่างที่ปรากฏขึ้นจะอยู่ในหมวดฟังก์ชั่น Configuration ซึ่งจะปรับให้เป็นลักษณะควบคุมการเกิดฟอลต์แบบภายใน ดังรูปที่ ก.28 (ก) และเลือกหมวดฟังก์ชั่น Fault Type เพื่อตั้งค่าการเกิดฟอลต์ ซึ่งจะทำให้เกิดฟอลต์จากเฟส C ลง Ground ให้เลือก ช่องที่ 3 และ 4 เป็น Yes ดังรูปที่ ก.28 (ข)

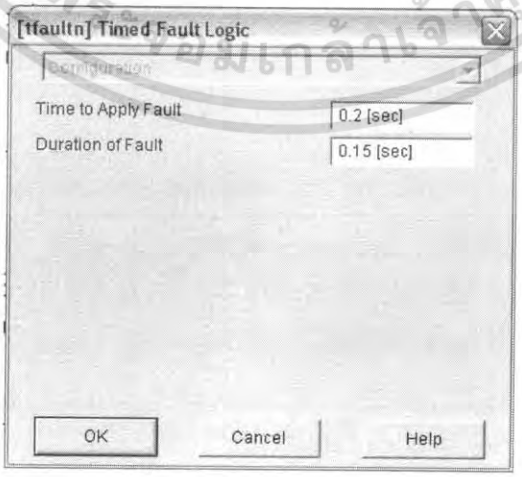


(ก) (ข)

รูปที่ ก.28 เลือกชนิดการเกิดฟอลต์

(ก) การปรับให้เป็นแบบควบคุมฟอลต์ภายใน (ข) เลือกลักษณะรูปแบบการเกิด

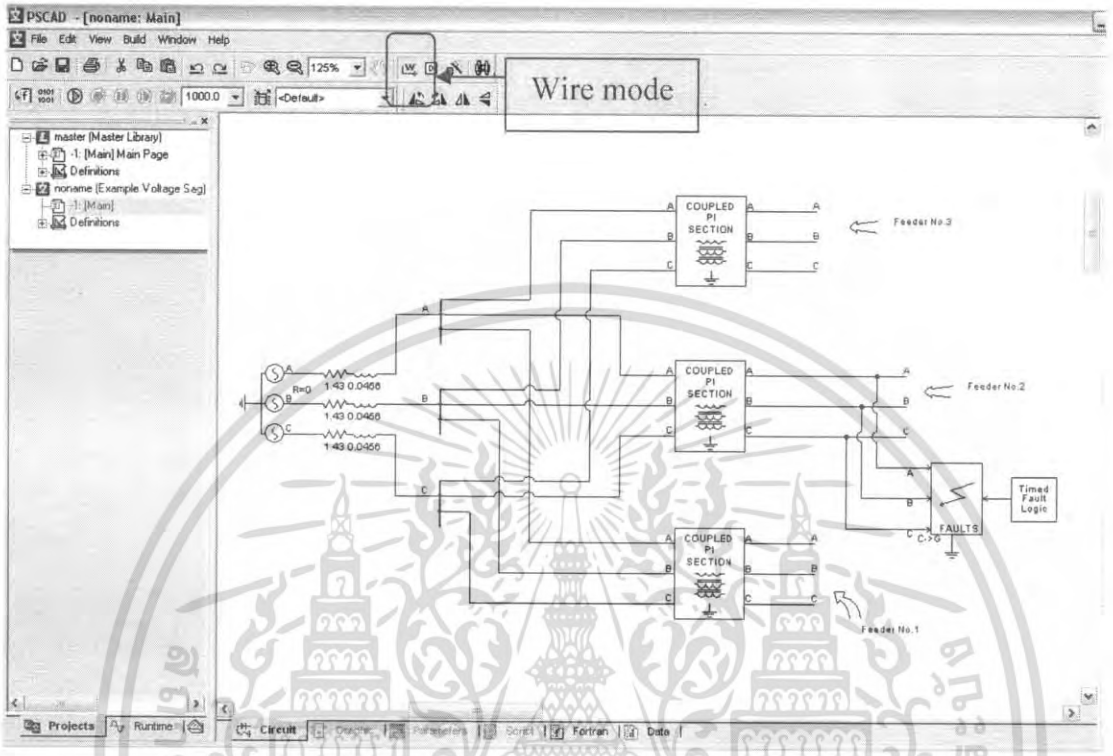
ในส่วนของการกำหนดเวลาที่เกิด และ ช่วงระยะเวลา ในการเกิดนั้นจะกำหนดโดยฟังก์ชั่น Timed Fault Logic ในการกำหนดทำได้โดยดับเบิ้ลที่ตัวฟังก์ชั่น แล้วทำการตั้งค่าดังรูปที่ ก.29 ซึ่งค่าในช่องแรกเป็นการกำหนดเวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์ และในช่องที่ 2 เป็นการกำหนดระยะเวลาที่เกิดฟอลต์ จากการจำลองให้เกิดขึ้นที่ 0.2 Sec และมีระยะเวลาในการเกิด 150 mSec หรือ 0.15 Sec



รูปที่ ก.29 การปรับตั้งเวลา และช่วงระยะเวลาที่เกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

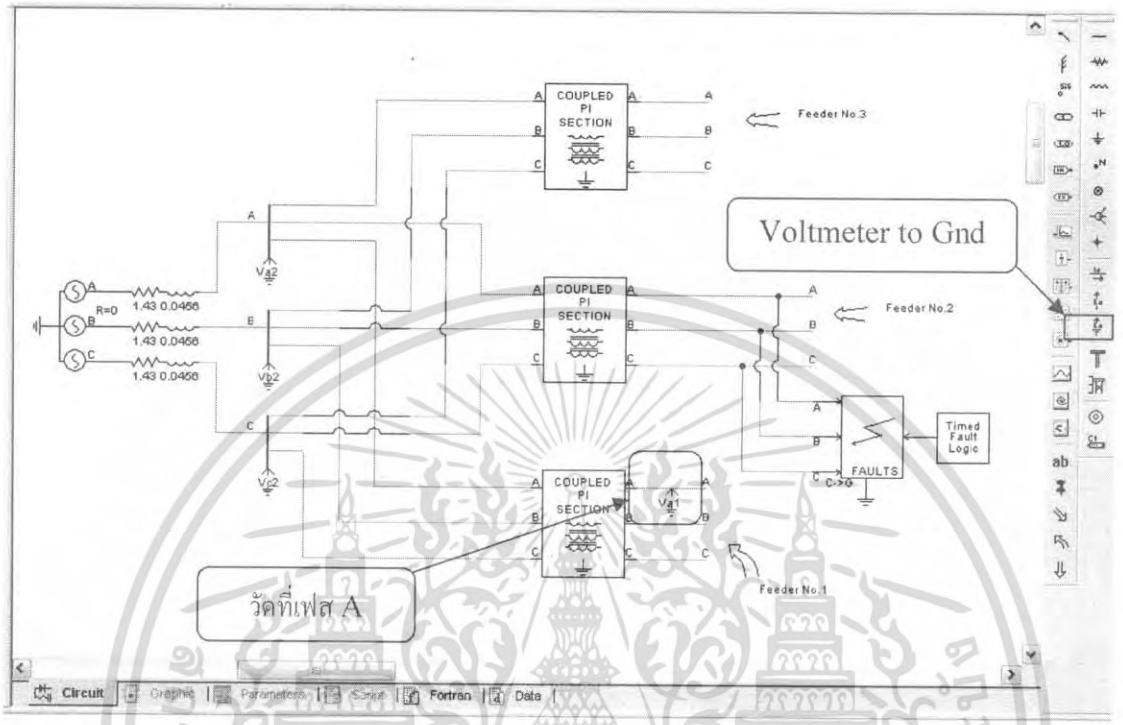
15. ทำการเชื่อมวงจรในส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันโดยใช้ฟังก์ชั่น Wire mode ที่อยู่ใน Main Toolbar ด้านบน แล้วทำการเชื่อมวงจรตามแบบระบบจำลองที่กำหนดไว้ ซึ่งจะได้ดังรูปที่ ก.30



รูปที่ ก.30 ใช้ฟังก์ชั่น Wire mode ในการเชื่อมต่อฟังก์ชั่นต่างๆ เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ในส่วนของการแสดงค่าแรงดัน ณ จุดต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้จะใช้ฟังก์ชั่น Voltmeter to Gnd ที่อยู่ใน Electrical Palette คลิกแล้วนำมาวางในตำแหน่งที่ต้องการวัดดังรูปที่ ก.31 แล้วทำการตั้งชื่อตัววัดแรงดันโดยดับเบิ้ลคลิกที่ตัวฟังก์ชั่น ดังรูปที่ ก.32 แล้วกด OK

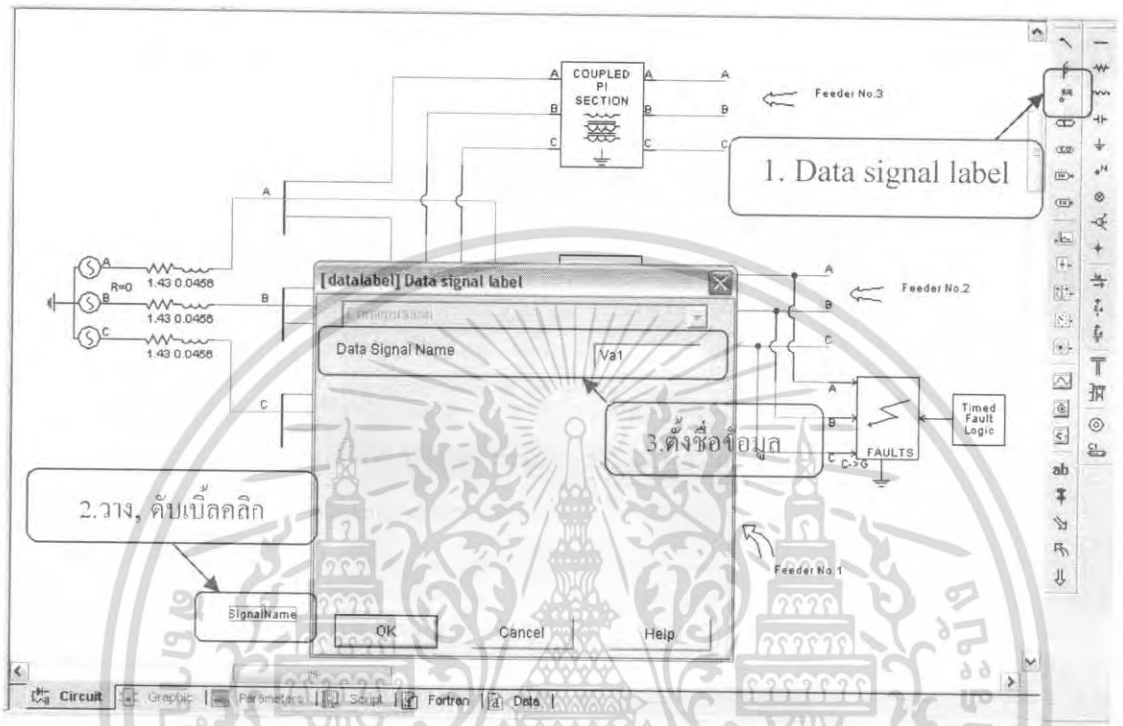


รูปที่ ก.31 เลือกและวางฟังก์ชั่น Voltmeter ในจุดที่ต้องการวัด

รูปที่ ก.32 ทำการตั้งชื่อตัวฟังก์ชั่น Voltmeter

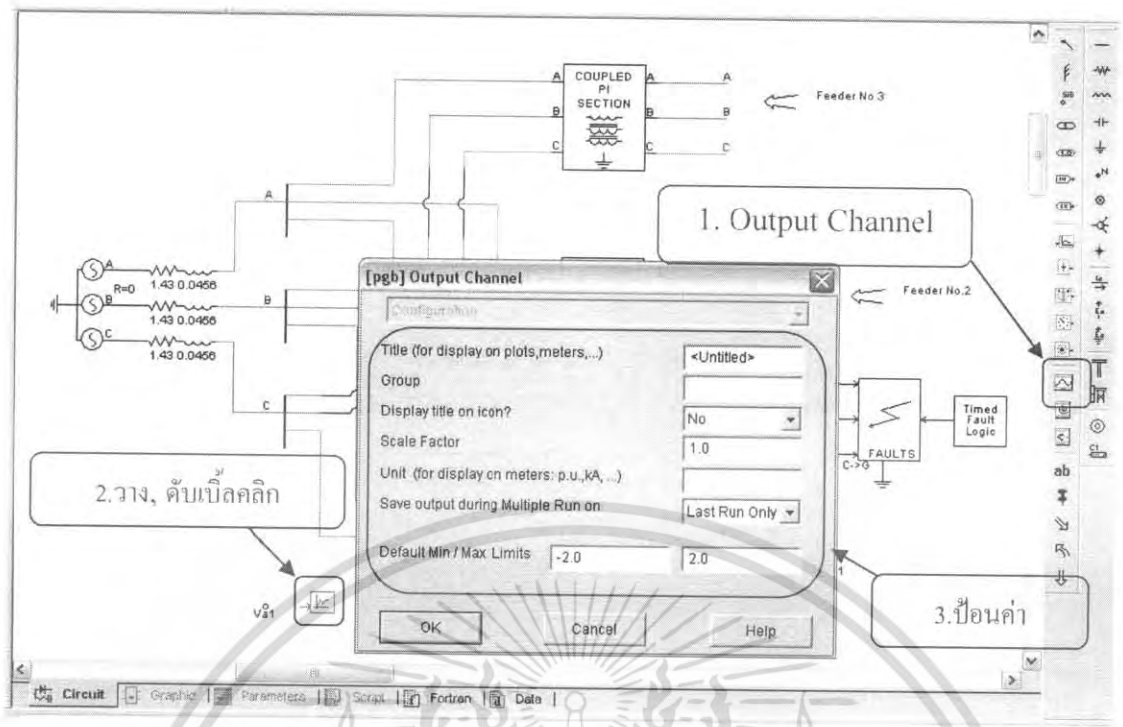
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เมื่อได้ทำการติดตั้งฟังก์ชั่น ที่ทำหน้าที่วัดระดับแรงดันแล้ว ค่าที่ได้จากการวัดจะแสดงผลได้ต้องติดตั้งฟังก์ชั่น 2 ตัว เพื่อนำค่าสัญญาณที่วัดได้จาก Voltmeter ไปแสดงผลในรูปของกราฟ คือฟังก์ชั่น Data signal label และ Output Channel ที่อยู่บน Control Palette แล้วทำการปรับค่าให้ตรงกับ Voltmeter ที่ได้ติดตั้งไว้ ดังรูปที่ ก.33 และ ก.34



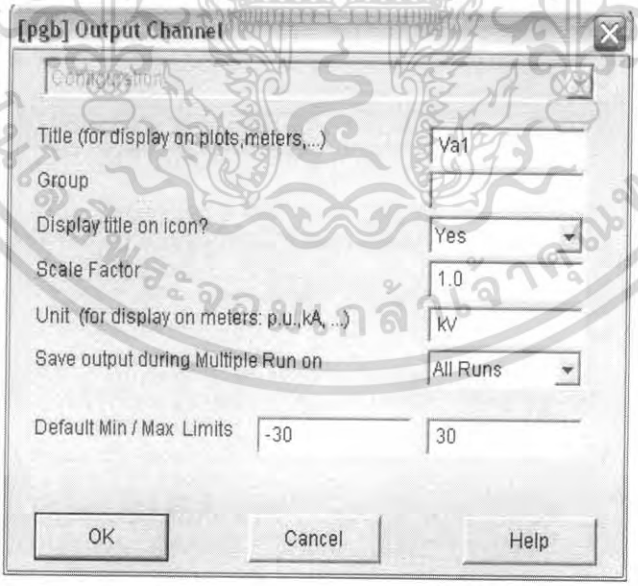
รูปที่ ก.33 การปรับค่าฟังก์ชั่น Data signal label

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.34 การติดตั้งฟังก์ชั่น Output Channel

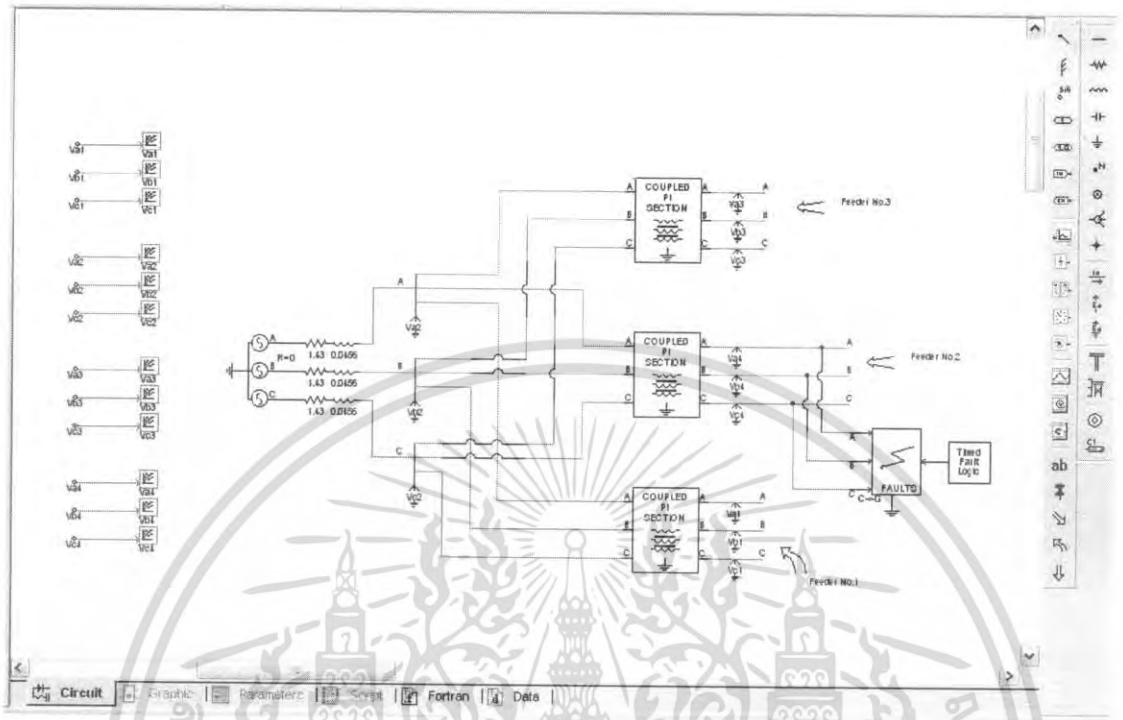
ป้อนค่าในฟังก์ชั่น Output Channel โดยในช่องแรกให้ป้อนชื่อตาม Voltmeter ที่ได้ตั้งไว้ดังรูปที่ ก.35 คือ Va1, ช่องที่ 3 เลือกเป็น Yes, ช่องที่ 5 ป้อนค่าหน่วยที่ใช้ในการวัด, ช่องสุดท้ายป้อนค่าช่วงระดับแรงดันที่ต้องการให้แสดง จากนั้นกด OK



รูปที่ ก.35 การปรับตั้งค่า Output Channel ที่จะให้แสดงผลในกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

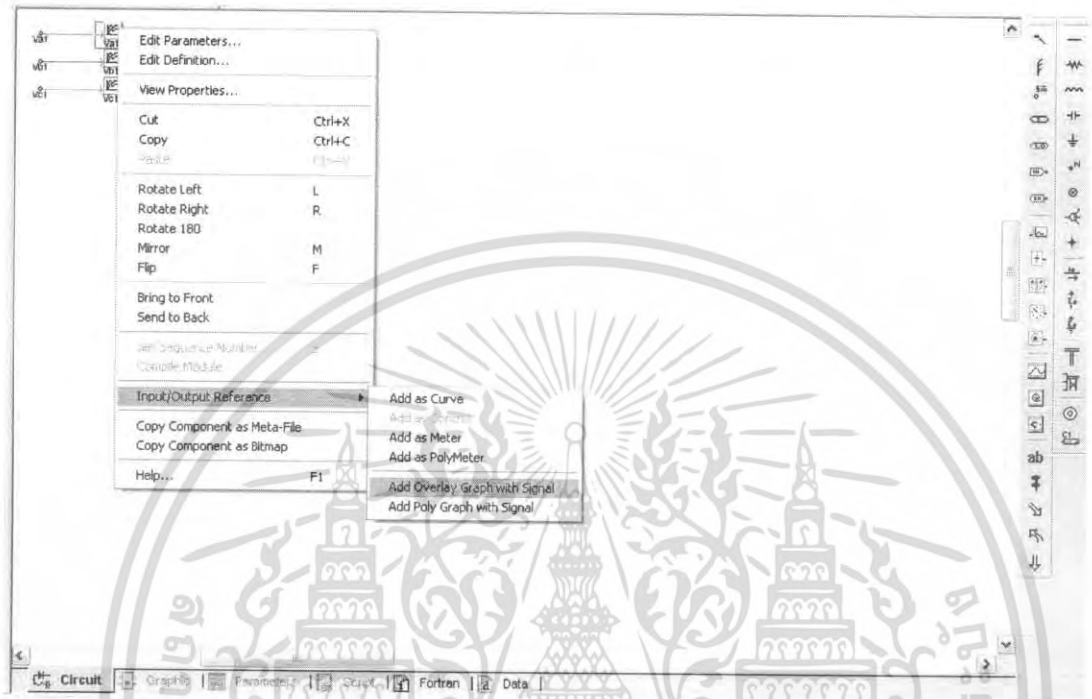
ทำการติดตั้งฟังก์ชั่น Voltmeter, Data signal label และ Output Channel ตามจุดที่ได้ระบุไว้ตามแบบจำลองระบบดังรูปที่ ก.36



รูปที่ ก.36 ทำการติดตั้งฟังก์ชั่นที่ทำการวัดและแสดงผลในตำแหน่งทั้งหมดที่ต้องการทราบค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. เมื่อต้องการให้ค่าแรงดันของแต่ละเฟสแสดงผลร่วมกันในกราฟ จะต้องทำการตั้งค่าที่ Output Channel ของแต่ละตัว แล้วค่อยนำค่าของแต่ละเฟสในสายป้อนเดียวกันมารวมกัน โดยให้คลิกขวาที่ Output Channel เลือก Input/Output Reference เลือกคลิกที่ Add Overlay Graph with Signal ดังรูปที่ ก.37 และจะได้หน้าต่างกราฟแสดงผลดังรูปที่ ก.38

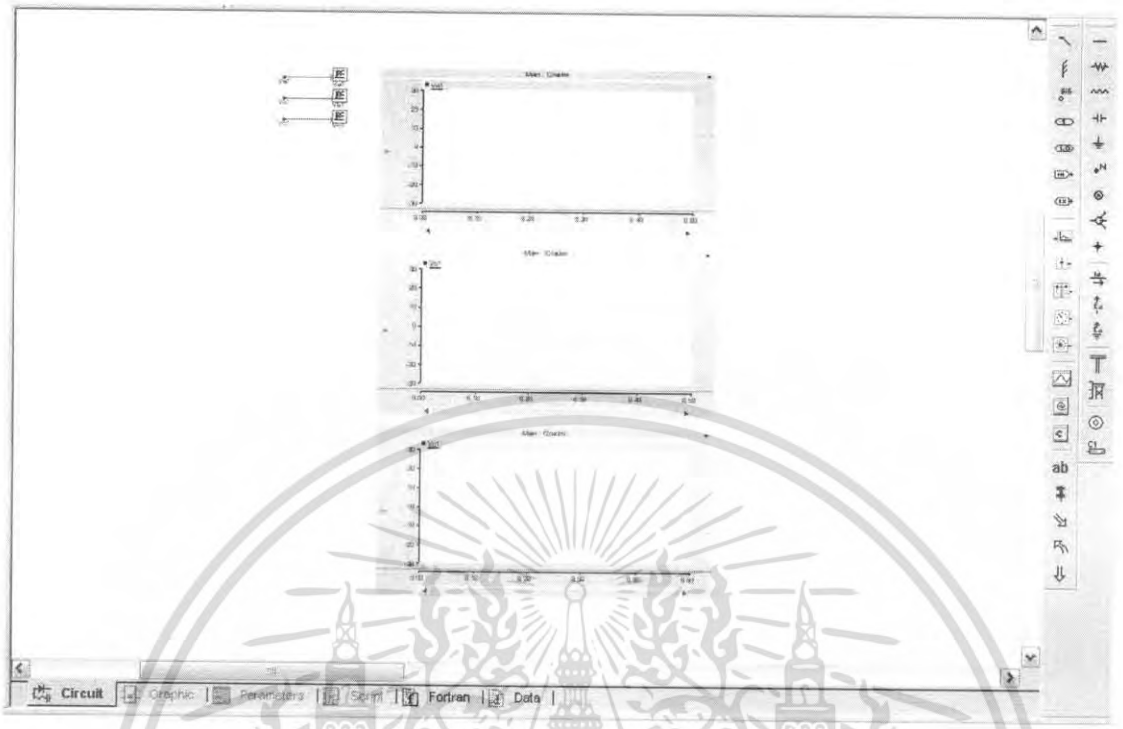


รูปที่ ก.37 การเลือกที่จะให้ฟังก์ชัน Output Channel แสดงผล

รูปที่ ก.38 หน้าต่างกราฟแสดงผลที่ได้จากการกำหนดโดย Output Channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

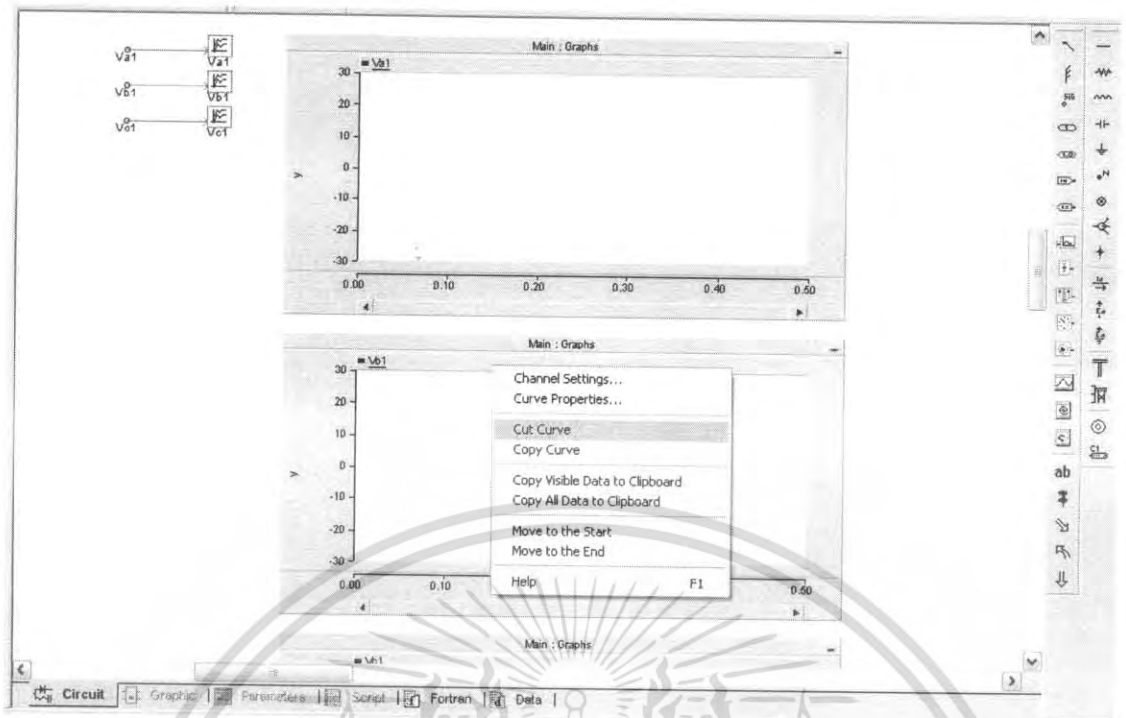
ทำการตั้งค่าให้ครบทั้ง 3 เฟสในสายป้อนเดียวกัน ดังรูปที่ ก.39



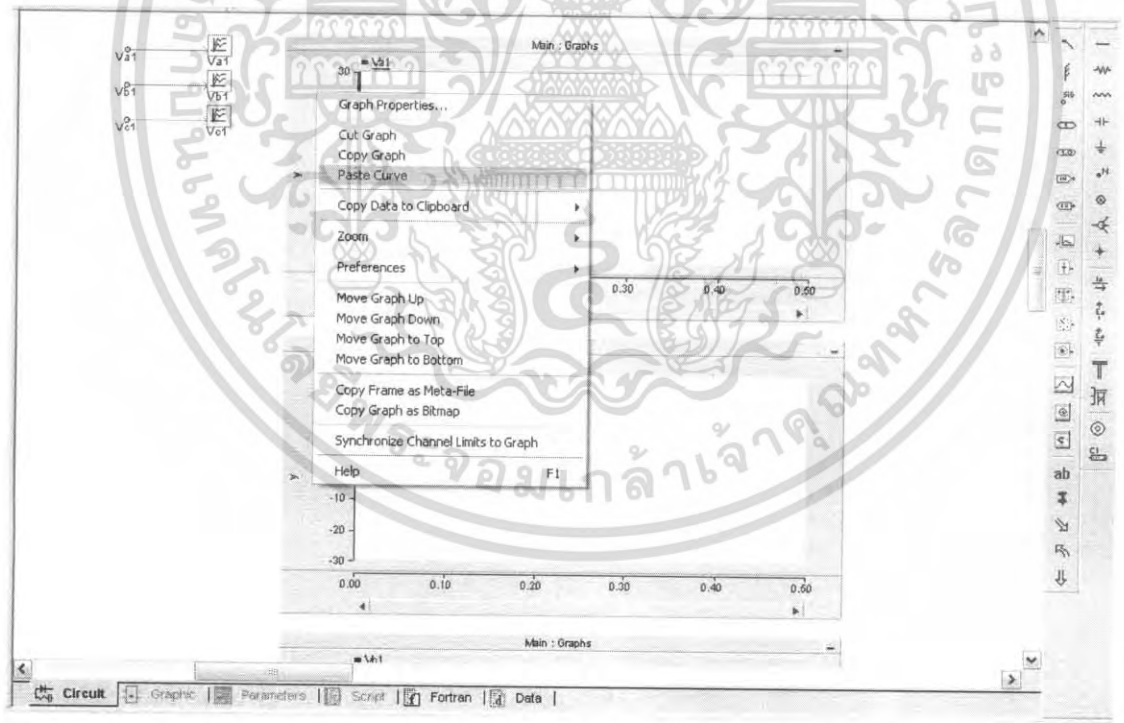
รูปที่ ก.39 กราฟแสดงผลของทั้ง 3 เฟส

ในกราฟที่ 2 ที่แสดงผลของแรงดันเฟส B ในสายป้อนชุดที่หนึ่งให้คลิกขวาบริเวณแถบด้านบนที่ติดกับหน้าต่างกราฟ แล้วเลือก Cut Curve ดังรูปที่ ก.40 จากนั้นให้คลิกขวาบริเวณแถบแนวตั้งด้านหน้าของหน้าต่างกราฟที่แสดงผลแรงดันเฟส A แล้วเลือก Paste Curve ดังรูปที่ ก.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



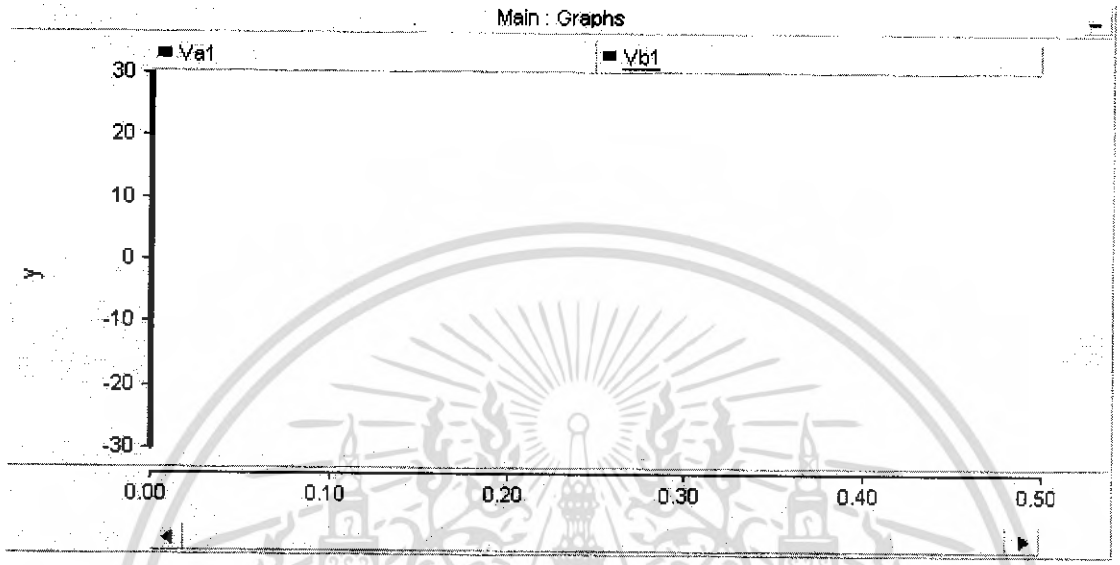
รูปที่ ก.40 การนำข้อมูลกราฟออกจากเฟส B เพื่อนำไปแสดงผลร่วมในกราฟเฟสอื่นๆ โดยใช้ฟังก์ชั่น Cut Curve



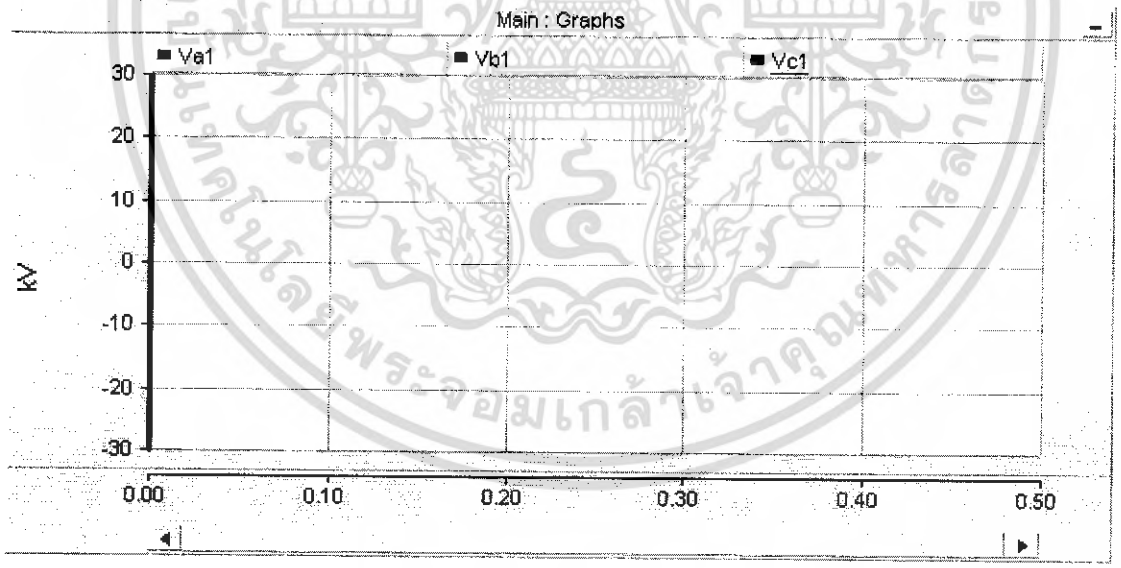
รูปที่ ก.41 การเพิ่มข้อมูลกราฟเฟส B เพื่อแสดงผลร่วมกันในเฟส A โดยการใช้ฟังก์ชั่น Paste Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าต่างกราฟแสดงผลแรงดันของเฟส B จะแทรกเพิ่มเข้าไปในหน้าต่างกราฟของเฟส A ดังรูปที่ ก.42 ทำให้มีการแสดงผลร่วมกันระหว่างเฟส A และ B ในส่วนของ เฟส C ก็ทำการ Cut Curve ในส่วนของเฟส C แล้วนำมา Paste Curve ในเฟส A จะได้หน้าต่างกราฟในลักษณะแสดงผลร่วมกันระหว่าง เฟส A เฟส B และ เฟส C ดังรูปที่ ก.43



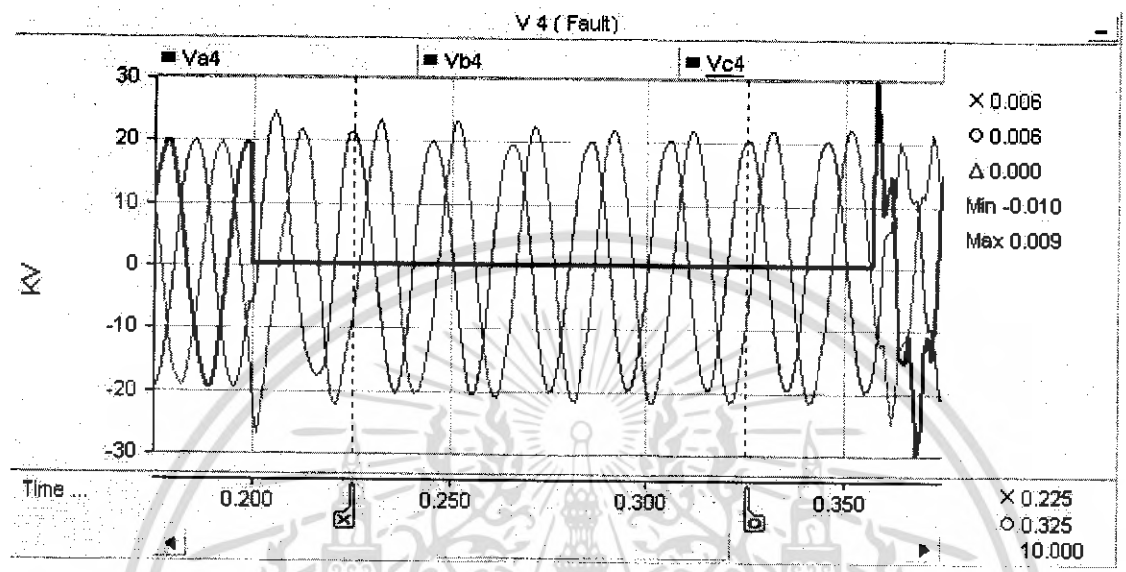
รูปที่ ก.42 ลักษณะหน้าต่างกราฟที่จะแสดงผลระหว่างเฟส A และ B



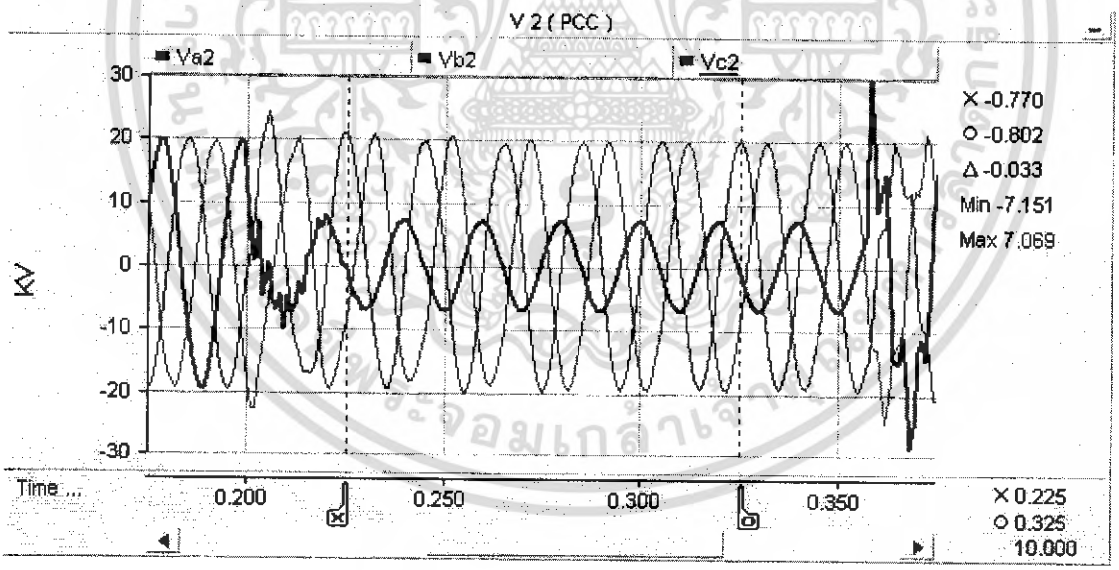
รูปที่ ก.43 หน้าต่างกราฟที่จะแสดงผลทั้ง 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในส่วนนี้จะให้แสดงออกในรูปกราฟของแรงดันทั้ง 3 เฟส ณ จุดต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ รูปแบบของผลลัพธ์แสดงในรูปที่ ก.44 โดยในส่วนของการแสดงผลจะแสดงค่าแรงดัน ณ ช่วงเวลา 0.175 Sec ถึง 0.375 Sec ซึ่งฟอลต์จะเกิดในช่วง 0.2 Sec ถึง 0.35 Sec ในช่วงแรงดัน -30 kV ถึง 30 kV



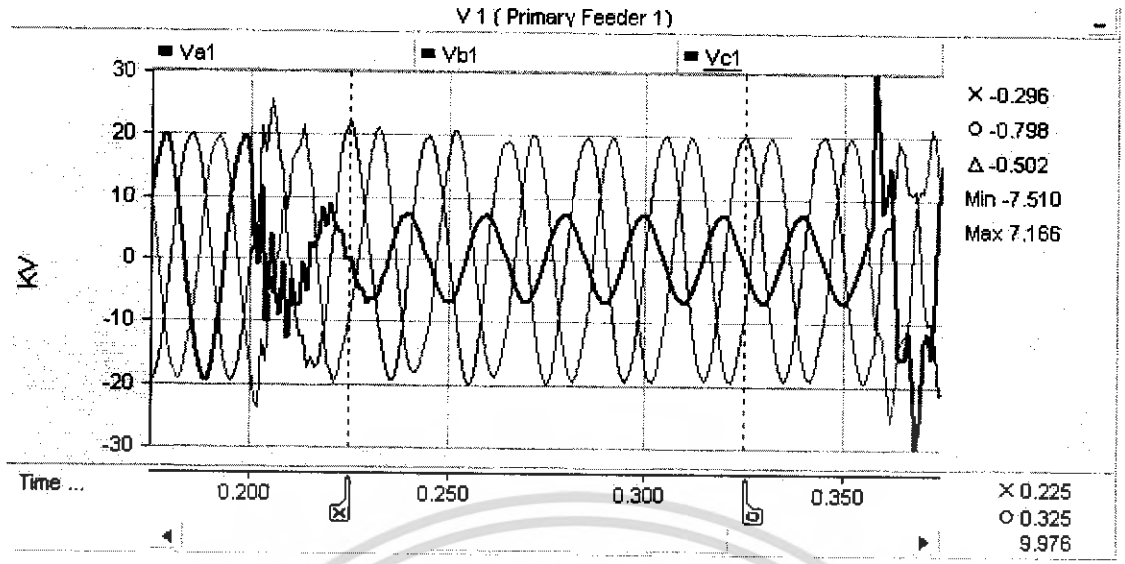
(ก)



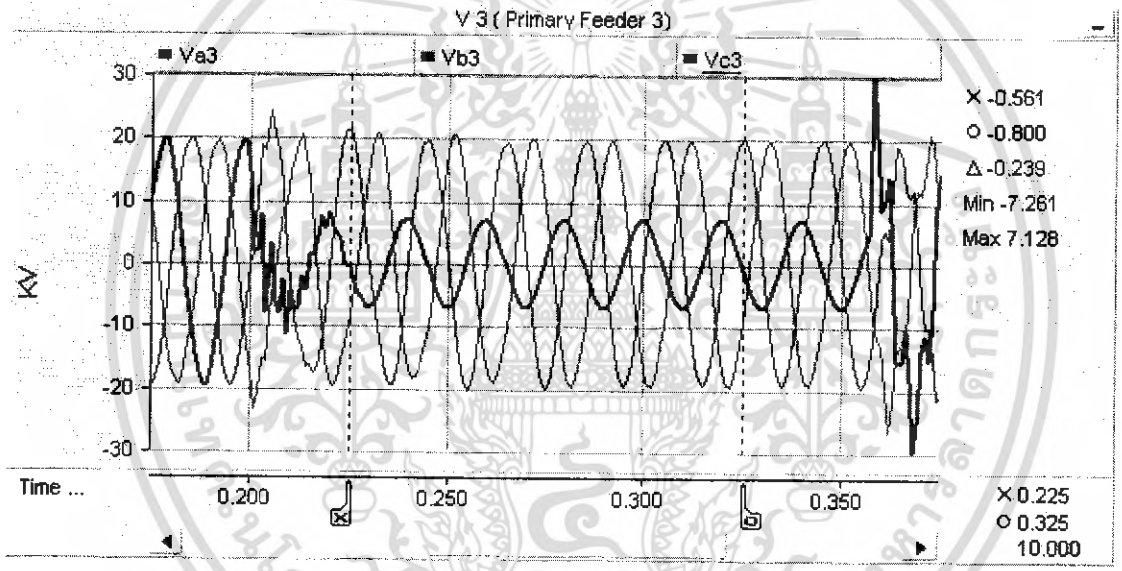
(ข)

รูปที่ ก.44 ลักษณะของแรงดันดกที่วัดได้ในเฟส C ที่เกิดฟอลต์ ของ PSCAD
(ก) แรงดัน ณ จุดที่เกิดฟอลต์, V4 (ข) แรงดันดกที่จุด PCC, V2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ ก.44 (ต่อ) ลักษณะของแรงดันตกที่วัดได้ในเฟส C ที่เกิดฟอลต์ ของ PSCAD
(ค) แรงดันตกที่สายป้อนหมายเลข 1, V1 (ง) แรงดันดกที่สายป้อนหมายเลข 3, V3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis)

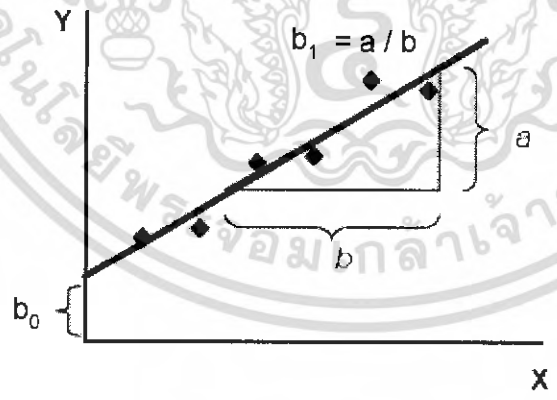
เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหนึ่งตัวหรือหลายตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว ใช้วิธีพล็อตค่าของตัวแปรตามบนแกนตั้งและตัวแปรต้นบนแกนนอนของกราฟ เพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร แล้วหาเส้นความสัมพันธ์ที่เหมาะที่สุดกับข้อมูล เส้นความสัมพันธ์นี้ใช้ในการหาค่าของตัวแปรต้นที่จะทำนายค่าของตัวแปรตามได้ดีที่สุด การวิเคราะห์ถดถอยที่มีตัวแปรต้นเพียงตัวเดียวเรียกว่า "การถดถอยอย่างง่าย" (simple regression) และการวิเคราะห์ถดถอยที่มีตัวแปรต้นสองตัวขึ้นไปเรียกว่า "การถดถอยพหุ" (multiple regressions)

การถดถอยอย่างง่าย (simple regression) หรือ การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหนึ่งตัวและตัวแปรตามหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (X) และตัวแปรตาม (Y) อยู่ในรูปเชิงเส้นตรง ซึ่งความสัมพันธ์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Y = b_0 + b_1X$$

เมื่อ b_0 คือ ส่วนตัดของแกน Y (intercept) หรือค่าของ Y เมื่อ X เท่ากับ 0

b_1 คือ ความชัน (slope) ของเส้นตรง แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วย

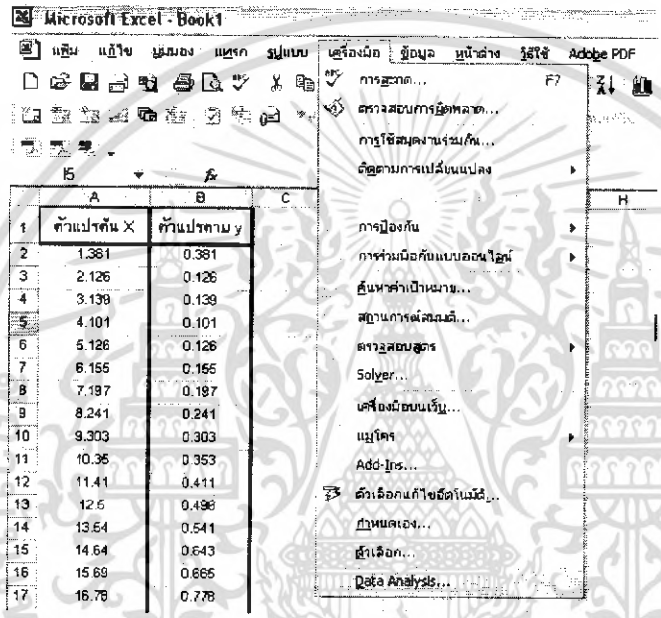


รูปที่ ข.1 กราฟการถดถอยเชิงเส้น

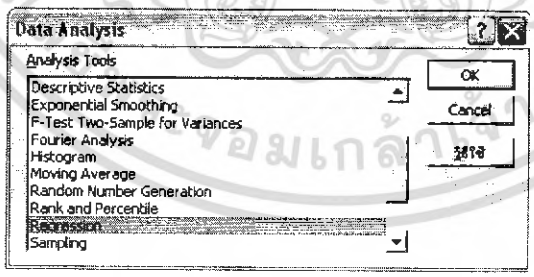
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการหาสมการถดถอย

1. กำหนดข้อมูลเป็นตัวแปรต้นและตัวแปรตาม เช่น ตารางที่ 5.1 ให้ x_{crit} เป็นตัวแปรต้น และให้ y เป็นตัวแปรตาม
2. นำข้อมูลไปใส่ในโปรแกรม Excel แล้วเลือกแถบเครื่องมือ คลิกที่ Data Analysis... ดังรูปที่ ข.2 จะปรากฏ Dialog Box ดังรูปที่ ข.3
   - กรณีที่ไม่มี Data Analysis... ให้เลือกแถบเครื่องมือ คลิกที่ Add Ins... ดังรูปที่ ข.4 และจะปรากฏ Dialog Box ดังรูปที่ ข.5 แล้วคลิกที่ช่อง ☐Analysis ToolPak

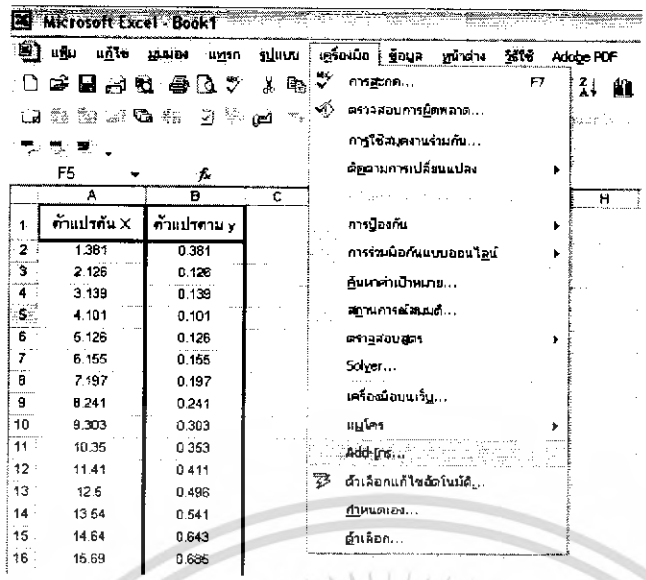


รูปที่ ข.2 การเลือก Data Analysis



รูปที่ ข.3 Dialog Box ของ Data Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 การเลือก Add Ins

รูปที่ ข.5 Dialog Box ของ Add Ins

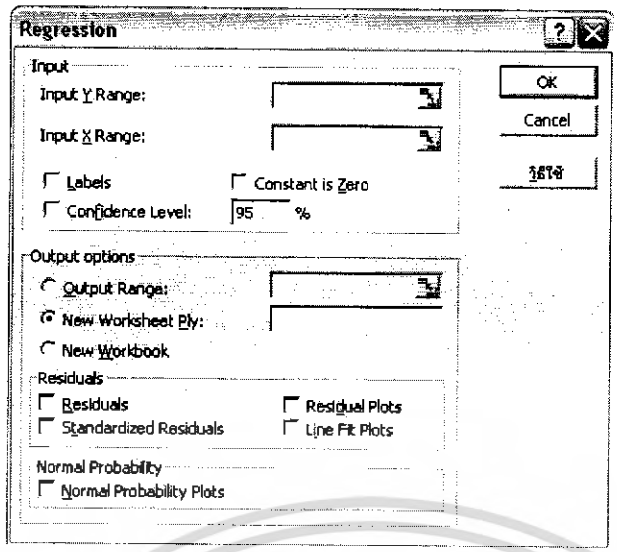
3. เมื่อได้ Dialog Box ดังรูปที่ ข.3 แล้วเลือกคลิกที่ Regression จะได้ Dialog Box ดังรูปที่ ข.6

   - ที่ช่อง Input Y Range: คลิกที่ ↘ แล้วเลือกคอลัมน์ข้อมูลของตัวแปรตามดังรูปที่ ข.7 แล้วกด Enter

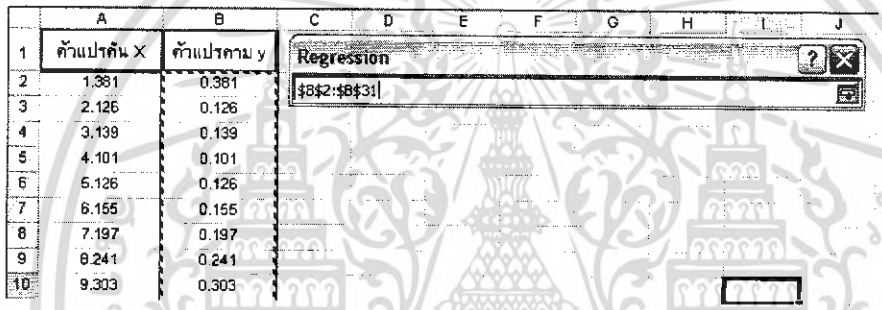
   - ที่ช่อง Input X Range: คลิกที่ ↘ แล้วเลือกคอลัมน์ข้อมูลของตัวแปรต้นดังรูปที่ ข.8 แล้วกด Enter

   จากนั้นคลิก OK จะได้ผลลัพธ์ของ Regression ดังรูปที่ ข.9

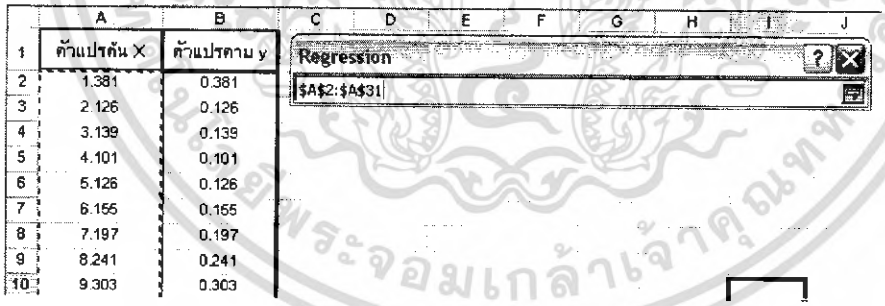
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 Dialog Box ของ Regression



รูปที่ ข.7 เลือกข้อมูลของตัวแปรตาม



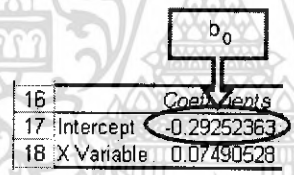
รูปที่ ข.8 เลือกข้อมูลของตัวแปรต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

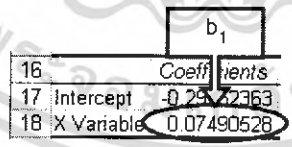
4. จากผลลัพธ์ของ Regression จะได้ค่า b_0 และ b_1 ดังรูปที่ ข.10 และรูปที่ ข.11 ตามลำดับ
5. ดังนั้นจะได้สมการ Regression เป็น Y = -0.29252363 + 0.07490528X

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	SUMMARY OUTPUT								
2									
3	*Regression Statistics*								
4	Multiple R	0.96895763							
5	R Square	0.93887889							
6	Adjusted F	0.936696							
7	Standard E	0.18505619							
8	Observatio	30							
9									
10	ANOVA								
11		*df*	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*			
12	Regressior	1	14.72935126	14.72935	430.1069	1.5629E-18			
13	Residual	28	0.958882206	0.034246					
14	Total	29	15.68823347						
15									
16		*Coefficients*	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
17	Intercept	-0.29252363	0.068315302	-4.28196	0.000196	-0.4324613	-0.1525859	-0.43246134	-0.15258592
18	X Variable	0.07490528	0.003611804	20.73902	1.56E-18	0.06750682	0.08230373	0.06750682	0.08230373

รูปที่ ข.9 ผลลัพธ์ของ Regression



รูปที่ ข.10 ค่า b_0



รูปที่ ข.11 ค่า b_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การใช้งานโปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0

ค.1 วัตถุประสงค์ในการสร้างและการใช้งานโปรแกรม

โปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0 สร้างขึ้นเป็นโปรแกรมตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางและแสดงจุดที่เกิดความผิดพร่องในสายป้อน โดยการใช้ค่าแรงดันตกชั่วขณะและค่าพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายและสายป้อนในการคำนวณ แล้วแสดงผลที่ได้ออกมาในรูปแบบตัวเลขและแผนที่ เพื่อบอกระยะทางและตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง ซึ่งการแสดงตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องบนแผนที่ในโปรแกรมเป็นลักษณะแผนที่จำลองที่กำหนดระยะทางและแนวทางเดินสายป้อนขึ้นเองเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย โปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0 สร้างโดย Visual Studio.NET 2003 ใช้ Visual C#.NET การเลือกใช้ Visual C#.NET สร้างโปรแกรมคำนวณระยะทาง เนื่องจากตัวโปรแกรมที่ใช้สร้างเป็นภาษาที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ในตระกูล .NET ของ Microsoft ซึ่งเป็นภาษาที่ผู้ศึกษาสามารถเข้าใจได้ง่ายและเหมาะสำหรับผู้เริ่มใช้และผู้พัฒนาซอฟแวร์ที่เริ่มต้น ที่ไม่เคยใช้งานและมีพื้นฐานภาษาใดมาก่อน หรือ ผู้ที่มีพื้นฐานภาษา C หรือ Visual Basic มาก่อนสามารถใช้งานได้สะดวกเข้าใจง่าย โปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0 สามารถพัฒนาต่อไปได้ตามความต้องการของผู้ที่สนใจศึกษาในหัวข้อปริญญานิพนธ์นี้ต่อไป

ค.2 ขอบเขตความสามารถของโปรแกรม

เนื่องจากโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมต้นแบบจึงยังมีขีดความสามารถต่ำ ซึ่งขอบเขตความสามารถของโปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0 ของปริญญานิพนธ์นี้ มีดังนี้

1. ใช้ได้กับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียลอย่างง่ายดังรูปที่ 4.1 เท่านั้น
2. ใช้ได้กับระบบสายจำหน่ายที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและแหล่งจ่ายตามตารางที่ 4.1 เท่านั้น

หากต้องนำไปใช้กับระบบจำหน่ายแบบเรเดียลที่มีค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างจากนี้ ต้องทำการจำลองระบบเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปลดค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ x_{crit} ด้วยวิธี Regression ก่อน ซึ่งจะได้เป็นสมการ $New\,x_{crit}$ จากนั้นจึงนำสมการ $New\,x_{crit}$ ที่ได้ใหม่ไปแทนสมการ $New\,x_{crit}$ ในโปรแกรมเดิม

ค.3 ความต้องการขั้นต่ำของโปรแกรม

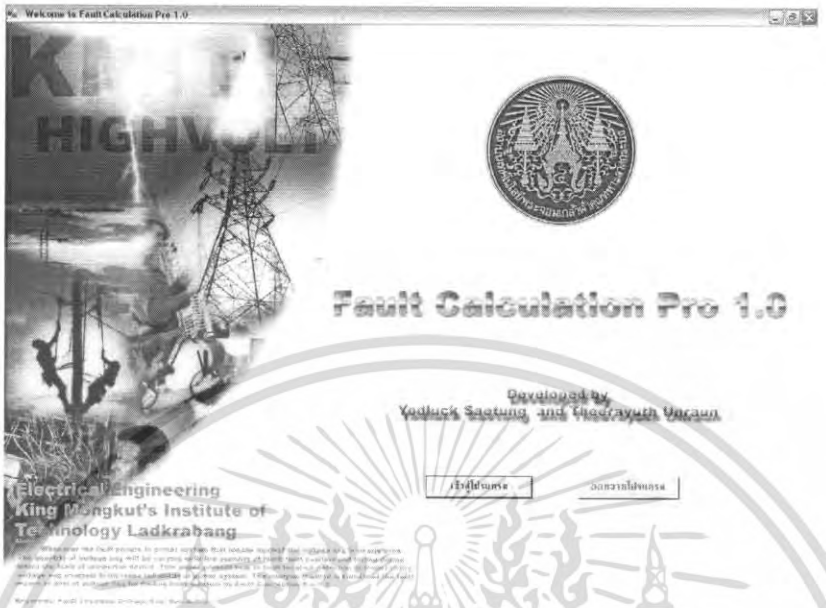
ความต้องการขั้นต่ำของโปรแกรมมีดังนี้

- ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Windows XP
- ติดตั้ง Microsoft.NET Framework 1.1 หรือสูงกว่า
- ความละเอียดในการแสดงภาพ 1152 × 864 pixels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 การใช้งานโปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0 คำนวณ

1. เปิดโปรแกรม แล้วคลิกที่ เข้าสู่โปรแกรม ดังรูป ค.1 เพื่อเริ่มการคำนวณ



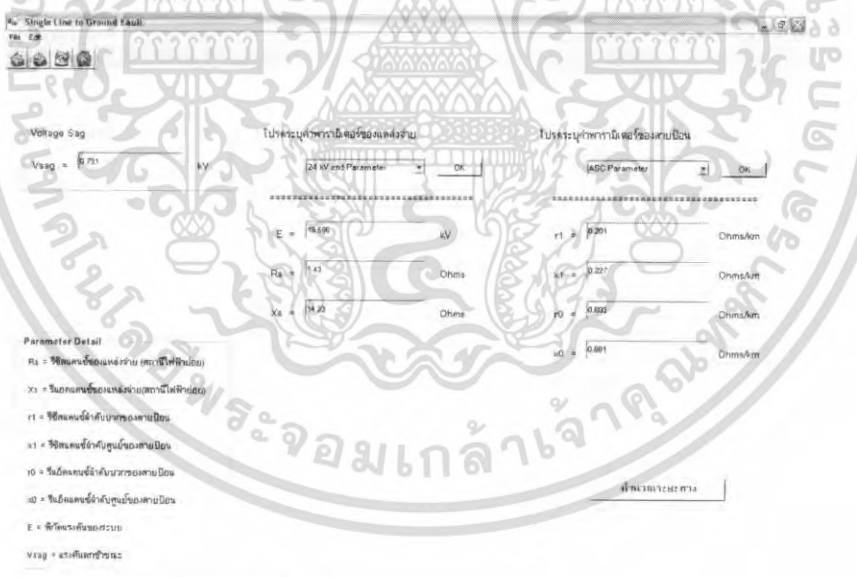
รูปที่ ค.1 หน้าต่างแรกของโปรแกรม Fault Calculation Pro 1.0

รูปที่ ค.2 หน้าต่าง Main Menu Please Select

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อคลิกแล้วจะเข้าสู่หน้าต่าง Main Menu Please Select เพื่อทำการเลือกชนิดของความผิดพร่องที่จะคำนวณ ซึ่งประกอบไปด้วยความผิดพร่องทั้ง 4 ชนิด ดังรูปที่ ค.2 เมื่อทำการคลิกเลือกชนิดของความผิดพร่องแล้ว ให้คลิกที่ ทำรายการต่อไป หรือ ปุ่มลูกศรเขียว บน Menu bar เพื่อเข้าสู่หน้าต่างถัดไป

3. หลังจากเลือกชนิดของความผิดพร่องแล้ว (จากตัวอย่างทำการเลือกความผิดพร่องชนิด Single Line to Ground Fault) จะเข้าสู่หน้าต่าง ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะใช้คำนวณดังรูปที่ ค.3 ซึ่งโปรแกรมได้ทำการออกแบบมาให้สามารถพิมพ์ได้เฉพาะตัวเลขเท่านั้นไม่สามารถพิมพ์ข้อความตัวอักษรได้ ยกเว้นเครื่องหมายลบและจุดทศนิยมที่สามารถพิมพ์ได้ครั้งเดียวเท่านั้น ในส่วนของค่าพารามิเตอร์แหล่งจ่ายและสายป้อน ได้ทำการสร้าง Select Menu เพิ่มเติม เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้การคำนวณจำลองบ่อยครั้ง จึงสร้างขึ้นเพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการทดลองคำนวณ หากค่าที่พิมพ์ป้อนลงไปผิดพลาดทั้งหมด สามารถคลิกที่ปุ่มลูกศรชี้วนสีฟ้า เพื่อทำการลบและพิมพ์ป้อนข้อมูลใหม่ และหากในการพิมพ์ข้อมูลผิดพลาดหรือไม่ครบถ้วนโปรแกรมจะเตือน ดังรูปที่ ค.4 เมื่อทำการพิมพ์ป้อนค่าต่างๆ ครบแล้ว ให้คลิกที่ คำนวณระยะทาง หรือปุ่มลูกศรสีเขียวที่ชี้ไปทางขวา เพื่อทำการคำนวณระยะทาง



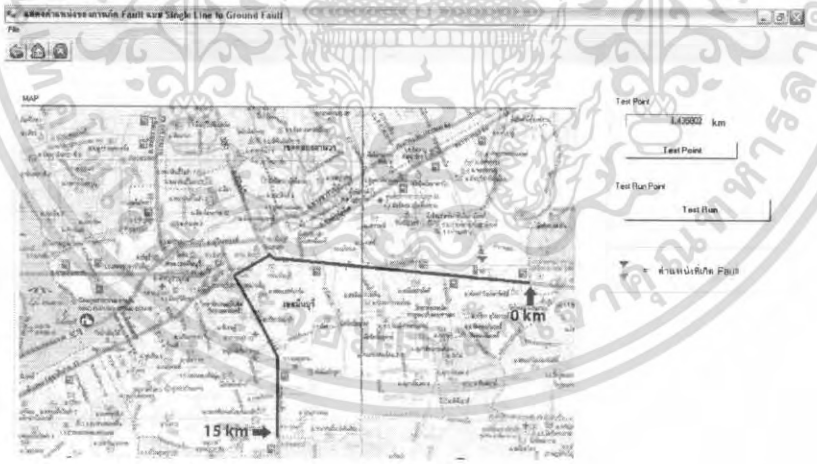
รูปที่ ค.3 หน้าต่างพิมพ์ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

รูปที่ ค.4 ข้อความเตือนเมื่อพิมพ์ข้อมูลไม่ถูกต้องหรือไม่ครบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โปรแกรมจะทำการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยที่โปรแกรมจะแสดงค่าระยะทางของความผิดพร่องเป็นตัวเลขที่มีทศนิยม 3 ตำแหน่งเท่านั้น ดังรูปที่ ค.5 และถ้าต้องการแสดงตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องในแผนที่ให้คลิกที่ แสดงบนแผนที่

รูปที่ ค.5 หน้าต่างแสดงผลการคำนวณ



รูปที่ ค.6 หน้าต่างแสดงตำแหน่งการเกิดฟอลต์ในแผนที่

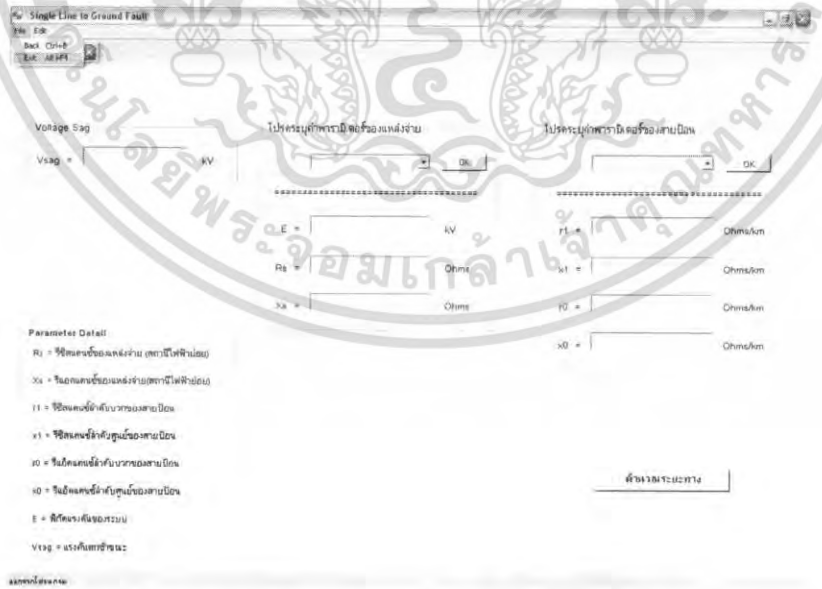
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในหน้าต่างแสดงตำแหน่งของการเกิดความผิดพร่อง โปรแกรมจะแสดงตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง ที่ห่างจากระยะทางจากจุดที่เริ่มต้น ดังรูปที่ ค.6 ในลักษณะลูกศรสีแดง เหลือง ส้ม กระพริบสลับกัน โดยที่แผนที่ที่ได้แสดงไว้กำหนดให้มีความยาวของสายป้อนเป็นระยะทาง 15 กิโลเมตร ตามแนวทางเดินเส้นสีดำ

ในส่วนต่างๆ ของหน้าต่างนี้จะประกอบไปด้วย Test Point เพื่อทำการป้อนตัวเลข 1-15 เพื่อให้ทดสอบว่าระยะทาง ณ จุดต่างๆ มีความห่างเท่ากัน และอีกส่วนคือ Test Run Point เพื่อทดสอบการวิ่งตามระยะทาง จากจุดเริ่มต้น ถึง จุดสิ้นสุดเพื่อให้เห็นว่าแนวทางเดินและระยะทางต่างๆ มีความถูกต้องและสัมพันธ์กัน

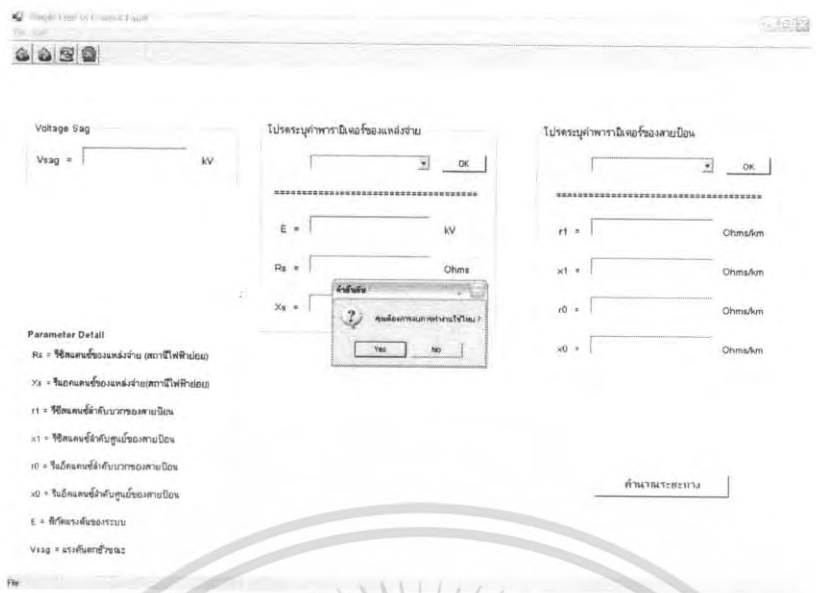
6. หากต้องการทำการเริ่มคำนวณใหม่ให้คลิกที่ ลูกศรสีเขียวที่ชี้ไปด้านซ้าย เพื่อพิมพ์ค่าและคำนวณใหม่ หรือหากต้องการเปลี่ยนลักษณะรูปแบบการเกิดความผิดพร่องให้คลิกที่ปุ่มบ้าน เพื่อกลับสู่หน้า Main Menu Please Select และเลือกรูปแบบการเกิดความผิดพร่องต่อไป ซึ่งลักษณะการพิมพ์ข้อมูลต่างๆ มีลักษณะเหมือนกันกับที่ได้แสดงไปแล้วดังตัวอย่าง

7. เมื่อต้องการปิดโปรแกรมสามารถคลิกที่ File แล้วเลือก Exit หรือ คลิกที่ ปุ่มกากบาทสีแดง บน Menu Bar หรือ ปุ่มปิด ที่มุมบนขวาสุดของโปรแกรมได้ดังรูปที่ ค.7 หลังจากคลิกปิดแล้ว โปรแกรมจะทำการถามยืนยันการปิดอีกครั้งให้คลิก Yes ดังรูปที่ ค.8



รูปที่ ค.7 แสดงตำแหน่งของปุ่มที่คลิกเพื่อปิดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.8 แสดงการยืนยันการปิดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้