

การระบุตำแหน่งผิดพร่องบนสายจำหน่ายไฟฟ้าโดยพิจารณาผลของโหลดแบบปรับค่าได้

นายปรีดา เชาว์มั้น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FAULT LOCATION ON DISTRIBUTION LINES BY CONSIDERING ADAPTIVE LOADS

Mr. Preeda Chaomon

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การระบุตำแหน่งผิดพร่องบนสายจำหน่ายไฟฟ้า |
| | โดยพิจารณาผลของโหลดแบบปรับค่าได้ |
| โดย | นายปรีดา เชาวรัตน์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรฤกษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชานูณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุ่นเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จักรเพชร มีทราช)

ปรีดา เชาว์มณี : การระบุตำแหน่งผิดพลาดบนสายจำหน่ายไฟฟ้าโดยพิจารณาผลของ
 โหลดแบบปรับค่าได้. (FAULT LOCATION ON DISTRIBUTION LINES BY
 CONSIDERING ADAPTIVE LOADS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
 ผศ. ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์, 114 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดบนสายจำหน่ายไฟฟ้า วิธีการที่
 นำเสนอเป็นวิธีการผสมผสาน โดยนำวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมกับวิธีการใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัด
 ไปเมื่ออุปกรณ์ป้องกันทำงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งผิดพลาด เนื่องจากโหลดใน
 ระบบจำหน่ายนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา วิธีการที่นำเสนอจึงนำกำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบไป
 ชดเชยให้กับฐานข้อมูลโหลด ประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอได้ทดสอบกับเหตุการณ์ผิด
 พว่องที่จำลองในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems โดยใช้ข้อมูลจากระบบจริงของการ
 ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งผิด
 พว่อง ความต้านทานผิดพลาด การเปลี่ยนแปลงของโหลด และอัตราการสุ่มสัญญาณของข้อมูล
 กระแสและแรงดันอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5270677021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FAULT LOCATION / POWER SYSTEM PROTECTION / RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM / VARIATION OF LOADS

PREEDA CHAOMON: FAULT LOCATION ON DISTRIBUTION LINES BY

CONSIDERING ADAPTIVE LOADS. ADVISOR:

ASST. PROF. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 114 pp.

This thesis studies how to determine fault location on distribution lines. The proposed method is a hybrid method which combines an impedance-based method and interrupted load data to improve an efficiency to locate faults. Due to load variations in distribution systems, the proposed method also utilizes the system apparent power in order to compensate load information from the load database. The robustness of the proposed method is verify with an actual system of Provincial Electricity Authority (PEA) using MATLAB/SimPowerSystems. Moreover, this thesis also studies effects of fault distance, fault resistance, load variations and sampling rate of voltage and current data.

Department : Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชชชัย เตชัสอนันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้ให้เห็นข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์จะกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล(ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ (กรรมการ) และดร.จักรเพชร มัทราช หัวหน้าแผนกวิจัยคุณภาพไฟฟ้าอุตสาหกรรม กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

หน้า

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| 1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ | 3 |
| บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัย | 5 |
| 2.1 วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ [2-8]..... | 6 |
| 2.1.1 วิธีการที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับ [2]..... | 7 |
| 2.1.2 วิธีการที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบเฟส [3-6] | 13 |
| 2.1.3 วิธีการที่ใช้ข้อมูลของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพลาด [7]..... | 19 |
| 2.1.4 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ [8]..... | 23 |
| 2.2 วิธีการใช้การเคลื่อนที่ของสัญญาณและส่วนประกอบความถี่สูง [9,10] | 30 |
| 2.3 วิธีการใช้ฐานความรู้ [11, 12] | 30 |
| 2.4 วิธีการผสมผสาน [13,14]..... | 31 |
| บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 35 |
| 3.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า [15] | 35 |
| 3.1.1 ระบบส่งไฟฟ้าย่อย (Subtransmission system) | 35 |
| 3.1.2 ระบบจำหน่าย (Distribution system)..... | 36 |
| 3.1.3 ระบบการใช้กำลังไฟฟ้า (Utilization system) | 36 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.4 สถานีไฟฟ้าย่อย (Distribution substation) | 38 |
| 3.1.5 การจัดเรียงวงจรสายส่งไฟฟ้าย่อย..... | 38 |
| 3.1.6 การจัดเรียงวงจรสายป้อนปฐมภูมิ..... | 40 |
| 3.2 อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า..... | 43 |
| 3.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ [17]..... | 45 |
| 3.2.2 รีเลย์ [16, 17, 18]..... | 49 |
| 3.2.3 รีโคสเซอร์ [18] | 54 |
| 3.2.4 ฟิวส์ [18] | 58 |
| 3.3 การคำนวณกำลังไหลแบบถอยหลัง เดินหน้าสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล | 61 |
| 3.4 วงจรสมมูลของสายย่อยและโหลด | 63 |
| 3.4.1 สายย่อย (Line sections)..... | 63 |
| 3.4.2 โหลด (Loads)..... | 64 |
| บทที่ 4 กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอ | 66 |
| 4.1 กระบวนการคำนวณก่อนเกิดความผิดพลาด (Pre-fault calculation) | 66 |
| 4.2 กระบวนการคำนวณหลังเกิดความผิดพลาด (Post-fault calculation) | 69 |
| 4.2.1 กระบวนการคำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณผิดพลาด | 70 |
| 4.2.2 กระบวนการชดเชยกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลด..... | 71 |
| 4.2.3 กระบวนการคำนวณกำลังไหลก่อนเกิดความผิดพลาด | 71 |
| 4.2.4 กระบวนการคำนวณอิมพีแดนซ์ทางแยกและอิมพีแดนซ์จุดต่อโหลด | 71 |
| 4.2.5 กระบวนการคำนวณกำลังไหลขณะเกิดความผิดพลาด..... | 75 |
| 4.2.6 กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในแต่ละสายย่อย | 77 |
| 4.2.7 กระบวนการวิเคราะห์ตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัด | 80 |
| บทที่ 5 การทดสอบและการวิเคราะห์ผล | 83 |
| 5.1 ระบบทดสอบ..... | 83 |
| 5.2 ขั้นตอนการทดสอบ | 83 |
| 5.3 การจำลองเหตุการณ์ผิดพลาด | 85 |
| 5.4 ผลการทดสอบ | 85 |
| 5.4.1 การวิเคราะห์ตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลโหลดตัด | 85 |

| | |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 5.4.2 ผลกระทบของระยะมืดพร้อม | 102 |
| 5.4.3 ผลกระทบของความต้านทานมืดพร้อม | 103 |
| 5.4.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของโหลด | 105 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ | 108 |
| รายการอ้างอิง..... | 109 |
| ภาคผนวก..... | 111 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 114 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตารางที่ 2.1 | ตัวแปร V_{select} และ I_{select} ของความผิดพร่องแต่ละประเภท..... | 13 |
| ตารางที่ 2.2 | รูปวงจรมุมูลของความผิดพร่องประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ [6]..... | 16 |
| ตารางที่ 2.3 | สูตรการหาตำแหน่งผิดพร่องตามประเภทความผิดพร่อง [6] | 17 |
| ตารางที่ 2.4 | ค่าคงที่ n_p หรือ n_q กับพฤติกรรมของโหลด | 18 |
| ตารางที่ 2.5 | วงจรมุมูลของความผิดพร่องประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ | 21 |
| ตารางที่ 2.6 | ตำแหน่งผิดพร่องประเภทเฟสต่อเฟสและเฟสต่อเฟสลงดิน | 22 |
| ตารางที่ 2.7 | ตำแหน่งผิดพร่องของความผิดพร่องแบบสามเฟส | 22 |
| ตารางที่ 2.8 | รูปวงจรมุมูลของความผิดพร่องประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ | 28 |
| ตารางที่ 2.9 | สรุปข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการหาตำแหน่งผิดพร่องโดยวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ . | 29 |
| ตารางที่ 2.10 | สรุปข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการหาตำแหน่งผิดพร่องโดยใช้วิธีการต่างๆ | 34 |
| ตารางที่ 4.1 | ข้อมูลอิมพีแดนซ์และลักษณะการต่อวงจร | 68 |
| ตารางที่ 4.2 | ข้อมูลกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลด | 68 |
| ตารางที่ 4.3 | ฐานข้อมูลที่ได้จากกระบวนการคำนวณก่อนเกิดความผิดพร่อง | 69 |
| ตารางที่ 5.1 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 1..... | 89 |
| ตารางที่ 5.2 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 2..... | 90 |
| ตารางที่ 5.3 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 3..... | 91 |
| ตารางที่ 5.4 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 4..... | 92 |
| ตารางที่ 5.5 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 5..... | 93 |
| ตารางที่ 5.6 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 6..... | 94 |
| ตารางที่ 5.7 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 7..... | 95 |
| ตารางที่ 5.8 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 8..... | 96 |
| ตารางที่ 5.9 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 9..... | 97 |
| ตารางที่ 5.10 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 10... .. | 98 |
| ตารางที่ 5.11 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 11... .. | 99 |
| ตารางที่ 5.12 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 12. | 100 |
| ตารางที่ 5.13 | ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่องของตำแหน่งผิดพร่องตำแหน่งที่ 13. | 101 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตารางที่ 1 รูปวงจรมุมูลของความผิดพร่องประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ [6]..... | 112 |
| ตารางที่ 2 สูตรการหาตำแหน่งผิดพร่องตามประเภทความผิดพร่อง [6]..... | 113 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพที่ 1.1 วงจรสายป้อนตัวอย่างในระบบจำหน่าย [1] | 2 |
| ภาพที่ 2.1 แผนผังของวิธีการหาตำแหน่งผิดพ่วงในระบบจำหน่าย | 6 |
| ภาพที่ 2.2 วงจรสายป้อนที่แสดงตำแหน่งผิดพ่วงที่อาจเกิดขึ้นได้หลายตำแหน่ง | 7 |
| ภาพที่ 2.3 วงจรสายป้อนตัวอย่างในระบบจำหน่ายไฟฟ้า | 9 |
| ภาพที่ 2.4 วงจรตัวอย่างการคำนวณแรงดันที่แต่ละบัสและกระแสที่แต่ละสายย่อย | 9 |
| ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของความผิดพ่วงประเภทเฟส a ลงดิน | 10 |
| ภาพที่ 2.6 วงจรส่วนประกอบลำดับที่จุดเกิดความผิดพ่วงประเภทเฟส a ลงดิน | 10 |
| ภาพที่ 2.7 วงจรสมมูลของความผิดพ่วงประเภทเฟสเอลงดิน | 14 |
| ภาพที่ 2.8 วงจรสมมูลของความผิดพ่วงประเภทเฟส a ลงดินและมีโหลดต่ออยู่ | 18 |
| ภาพที่ 2.9 วงจรสมมูลของความผิดพ่วงแบบเฟส a ลงดิน | 19 |
| ภาพที่ 2.10 เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส | 23 |
| ภาพที่ 2.11 วงจรสายป้อนตัวอย่างที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่ง | 23 |
| ภาพที่ 2.12 วงจรสมมูลของสายย่อยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพ่วง | 24 |
| ภาพที่ 2.13 วงจรสายป้อนตัวอย่างที่มีแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว | 26 |
| ภาพที่ 2.14 วงจรสายป้อนตัวอย่างการวิเคราะห์ความผิดพ่วง | 31 |
| ภาพที่ 2.15 กระแสขณะกระบวนการกำจัดความผิดพ่วงโดยรีโคสเซอร์ | 32 |
| ภาพที่ 2.16 กระแสขณะกระบวนการกำจัดความผิดพ่วงโดยฟิวส์ | 32 |
| ภาพที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด | 36 |
| ภาพที่ 3.2 ระบบการใช้กำลังไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ของกฟน. | 36 |
| ภาพที่ 3.3 ระบบการใช้กำลังไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย ของกฟภ. | 37 |
| ภาพที่ 3.4 ระบบการใช้กำลังไฟฟ้า 1 เฟส 3 สาย ของกฟภ. | 37 |
| ภาพที่ 3.5 วงจรระบบส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบเรเดียล | 39 |
| ภาพที่ 3.6 วงจรระบบส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบวงรอบ | 40 |
| ภาพที่ 3.7 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล | 41 |
| ภาพที่ 3.8 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงรอบ | 42 |
| ภาพที่ 3.9 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย | 43 |

ภาพที่ 3.10 วงจรการต่อของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆที่ต้นสายป้อน [16]..... 44

ภาพที่ 3.11 วงจรกระแสตรงของวงจรทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ [16] 44

ภาพที่ 3.12 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดน้ำมันที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 138 กิโลโวลต์ 46

ภาพที่ 3.13 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด SF₆ ที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 345 กิโลโวลต์ 47

ภาพที่ 3.14 การป้องกันบัสและสายของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังที่ไม่มีไฟ 48

ภาพที่ 3.15 การป้องกันบัสและสายของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังที่มีไฟ 48

ภาพที่ 3.16 วงจรรีเลย์ประเภทไม่เคลื่อนที่ที่ทำงานแบบกระแสเกินทันทีทันใด 53

ภาพที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆของวงจรรีเลย์ภาพที่ 3.21..... 54

ภาพที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์เวลา กระแสของรีโคสเซอร์ 55

ภาพที่ 3.19 สัญญาณกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ตู้กิริโคสเซอร์พยายามตัดวงจร 56

ภาพที่ 3.20 กราฟคุณสมบัติเฉพาะเวลา กระแสของฟิวส์ประเภท 200K (a) 59

ภาพที่ 3.21 วงจรสมมูลสายส่งระยะสั้น 63

ภาพที่ 3.22 วงจรสมมูลของโหลดที่ต่อแบบวางลงดิน..... 64

ภาพที่ 4.1 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าตัวอย่าง 67

ภาพที่ 4.2 สัญญาณกระแสผิดปกติ 70

ภาพที่ 4.3 ทางแยกที่ 1 ถึงทางแยกที่ 5 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง 72

ภาพที่ 4.4 ทางแยกที่ 6 และทางแยกที่ 7 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง 72

ภาพที่ 4.5 ทางแยกที่ 8 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง 73

ภาพที่ 4.6 การตรวจสอบจำนวนทางแยกจากตารางข้อมูลขาเข้า..... 73

ภาพที่ 4.7 จุดต่อโหลดที่ 1 และจุดต่อโหลดที่ 2 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง 74

ภาพที่ 4.8 การตรวจสอบจำนวนจุดต่อโหลดจากตารางข้อมูลขาเข้า 75

ภาพที่ 4.9 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าตัวอย่าง 76

ภาพที่ 4.10 วงจรสมมูลของสายย่อยใดๆที่เกิดความผิดปกติประเภทเฟสเอลงดิน 78

ภาพที่ 4.11 วงจรตัวอย่างในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติโดยใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัด..... 81

ภาพที่ 4.12 แผนผังกระบวนการระบุตำแหน่งผิดปกติที่นำเสนอ 82

ภาพที่ 5.1 วงจรสายป้อนสถานีไฟฟ้าย่อยบางมูลนาคและตำแหน่งผิดปกติที่จำลอง 84

ภาพที่ 5.2 ช่วงของสัญญาณผิดปกติที่นำมาวิเคราะห์ 85

ภาพที่ 5.3 คำตอบที่ได้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดปกติที่ 5..... 86

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพที่ 5.4 คำตอบที่ได้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดพลาดที่ 3..... | 87 |
| ภาพที่ 5.5 คำตอบที่ได้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดพลาดที่ 6..... | 88 |
| ภาพที่ 5.6 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพลาด 10E-6 โอห์ม..... | 102 |
| ภาพที่ 5.7 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพลาด 20 โอห์ม..... | 102 |
| ภาพที่ 5.8 ผลการทดสอบความต้านทานผิดพลาด 40 โอห์ม..... | 103 |
| ภาพที่ 5.9 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทเฟสเอลงดิน..... | 104 |
| ภาพที่ 5.10 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทเฟสบีต่อเฟสซี..... | 104 |
| ภาพที่ 5.11 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดิน..... | 105 |
| ภาพที่ 5.12 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดิน..... | 105 |
| ภาพที่ 5.13 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดินเมื่อขาดเซย์โหลดแล้ว..... | 106 |
| ภาพที่ 5.14 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดินเมื่อขาดเซย์โหลดแล้ว..... | 106 |
| ภาพที่ 5.15 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดินเมื่อขาดเซย์โหลดแล้ว..... | 107 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

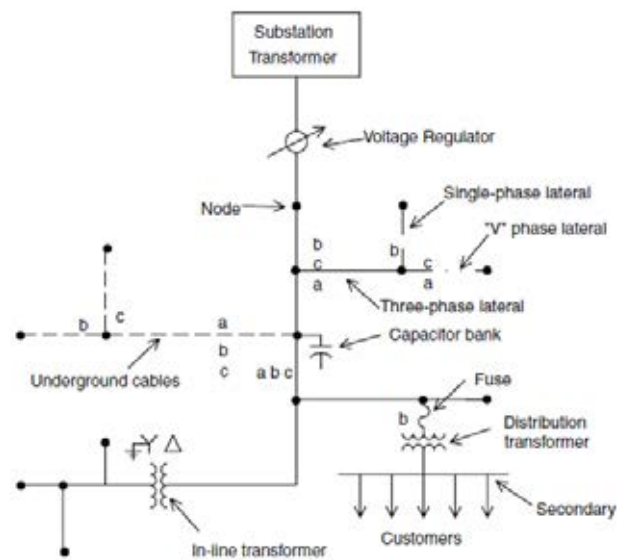
การเกิดปัญหาความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากเมื่อเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นบ้าน ที่อยู่อาศัย การไม่มีไฟฟ้าใช้อาจส่งผลให้ผู้ใช้ขาดความสะดวกสบาย แต่ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นโรงงานอุตสาหกรรม ก็อาจจะส่งผลกระทบต่อผลประกอบการ ทำให้เกิดผลเสียต่อธุรกิจของผู้ใช้ไฟฟ้า ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าขัดข้องเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงกับผลประกอบการของผู้ใช้ไฟฟ้า กล่าวคือ ยิ่งระยะเวลาของไฟฟ้าขัดข้องนาน ก็จะมีส่งผลกระทบต่อธุรกิจหรือผลประกอบการของผู้ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้นการแก้ไขไฟฟ้าให้กลับมาสู่ภาวะปกติ จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมากของผู้ให้บริการไฟฟ้า โดยสาเหตุของการเกิดความผิดปกตินั้นมีมากมาย เช่น ภัยธรรมชาติและสัตว์ต่างๆ เป็นต้น

เนื่องจากในอดีตการหาดำแหน่งผิดปกติในระบบจำหน่ายจะใช้วิธีการขอให้ผู้เสียหายโทรมาแจ้งกับผู้ใช้บริการ จากนั้นจึงส่งเจ้าหน้าที่ซ่อมแซมไปยังตำแหน่งของผู้เสียหาย ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะรับรองว่าจะหาดำแหน่งผิดปกติที่ถูกต้องได้และใช้เวลานาน จึงได้มีการทำวิจัยเกี่ยวกับการหาดำแหน่งผิดปกติเพื่อที่จะหาดำแหน่งผิดปกติที่ถูกต้องและรวดเร็ว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งผิดปกติในอดีตส่วนใหญ่จะทำกับระบบส่งเพราะว่า จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกผลกระทบเมื่อเกิดความผิดปกติมีมากกว่าระบบจำหน่าย แต่เนื่องจากการเกิดความผิดปกติส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ระบบจำหน่าย เพราะสายไฟของระบบจำหน่ายนั้น อยู่ไม่สูง จึงมีโอกาสที่จะถูกต้นไม้เกี่ยว หรือสัตว์ไปทำลายได้มากกว่า ดังนั้นการหาดำแหน่งผิดปกติในระบบจำหน่ายจึงมีความสำคัญเช่นกัน

เนื่องจากลักษณะวงจรและอุปกรณ์ป้องกันของระบบส่งแตกต่างจากระบบจำหน่าย วิธีการหาดำแหน่งผิดปกติจึงแตกต่างกัน โดยระบบจำหน่ายมีลักษณะดังภาพที่ 1.1 และมีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

- 1) ความไม่สมดุล เนื่องจากสายไม่ได้ถูกจัดให้สมดุล (Transposition) โหลดและสายไฟฟ้ามี่ทั้งแบบ เฟสเดียว สองเฟส และสามเฟส
- 2) สายไฟฟ้าในระบบมีหลายประเภท เช่น สายเหนือหัว สายใต้ดิน เป็นต้น
- 3) มีสายแยก (Lateral) หลายสาย

- 4) มีการต่อโหลด (Load tap) หลายจุด
- 5) โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตลอด



ภาพที่ 1.1 วงจรสายป้อนตัวอย่างในระบบจำหน่าย [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งผิดพลาดด้วยวิธีใช้อิมพีแดนซ์ข้อมูลที่ได้จากการจำลอง
- 2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งผิดพลาด เมื่อพิจารณาข้อมูลโหลดที่ถูกตัด (Interrupted load)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลเท่านั้น
- 2) ศึกษาค่าความผิดพลาดที่เกิดบนสายไฟฟ้าจำหน่ายเท่านั้น
- 3) ศึกษาค่าความผิดพลาด 4 ชนิด คือ ความผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสลงดิน ความผิดพลาดแบบเฟสต่อเฟส ความผิดพลาดแบบเฟสต่อเฟสลงดิน และความผิดพลาดแบบสามเฟสลงดิน

- 4) ไม่พิจารณาถึงเหตุการณ์ที่เกิดความผิดปกติอย่างซ้ำซ้อนในเวลาเดียวกัน (Simultaneous faults)
- 5) ไม่พิจารณาความผิดปกติแบบค่าอิมพีแดนซ์สูง (High impedance fault)
- 6) ชนิดของความผิดปกติ (Fault type) ต้องทราบล่วงหน้า

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณความผิดปกติ การระบุตำแหน่งและประเภทความผิดปกติ
- 2) ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ได้ทำมาแล้ว
- 3) ศึกษาการจำลองความผิดปกติของโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems
- 4) พัฒนาระบบการระบุตำแหน่งผิดปกติด้วยวิธีของงานวิจัยที่ได้ทำมาแล้วและวิธีการที่นำเสนอ
- 5) พัฒนาระบบการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของความผิดปกติโดยใช้ข้อมูลไหลดที่ถูกต้อง
- 6) ทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้าจำลองในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
- 8) เรียบเรียงผลการวิจัยและจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำกระบวนการหาตำแหน่งผิดปกติที่พัฒนามาประยุกต์ใช้กับระบบการวิเคราะห์หาตำแหน่งของความผิดปกติในทางปฏิบัติได้
- 2) สามารถหาตำแหน่งผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ

1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงการศึกษาวิจัยในอดีต ซึ่งประกอบไปด้วยการระบุตำแหน่งผิดพ่วงวิธีการต่างๆ แต่เนื่องจากวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ไม่ต้องการอุปกรณ์เพิ่มเติม และมีกระบวนการที่ง่ายจึงจะแสดงกระบวนการหาคำตอบของวิธีการนี้โดยละเอียด

บทที่ 3 อธิบายความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบจำหน่ายไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า วงจรสมมูลของสายย่อยและโหลด และกระบวนการคำนวณกำลังไหลแบบถอยหลัง เดินหน้าสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

บทที่ 4 กล่าวถึงกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพ่วงที่น่าเสนอ ซึ่งเป็นวิธีการผสมผสานที่ใช้หลักการคำนวณอิมพีแดนซ์ที่ตรวจวัดได้ที่ต้นสายป้อน จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์สายป้อนเพื่อระบุตำแหน่งผิดพ่วง และใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัดไปเพื่อระบุตำแหน่งผิดพ่วงที่ถูกต้องที่สุด

บทที่ 5 นำเสนอการทดสอบสมรรถนะของกระบวนการกับความผิดพ่วงที่จำลองขึ้นในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่จำลองนั้นเป็นข้อมูลจริงที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยอธิบายถึงข้อมูลที่ใช้การทดสอบ แล้วจึงแสดงผลการทดสอบรวมถึงการวิเคราะห์ผลต่อไป

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะต่างๆ

บทที่ 2

ทบทวนงานวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบจำหน่ายที่ได้มีการศึกษามาแล้ว งานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตจะหาตำแหน่งผิดพลาดในระบบส่งไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อเกิดไฟฟ้าขัดข้องในระบบส่งไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก และระบบส่งไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและแรงดันอยู่ทั้งสองด้านของสายส่ง ทำให้การหาตำแหน่งผิดพลาดของระบบนี้ทำได้ง่ายกว่า แต่ลักษณะวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นไม่เหมือนกับระบบไฟฟ้าซึ่งระบบจำหน่ายโดยทั่วไปจะมีลักษณะที่สำคัญ

- 1) มีจุดตรวจวัดหนึ่งจุดเท่านั้น คือ ที่ต้นสายป้อนหรือที่สถานีไฟฟ้าย่อย
- 2) เป็นระบบที่ไม่สมดุล (Unbalanced system) เนื่องจากระบบมีทั้งโหลด 3 เฟส 2 เฟส และ 1 เฟส รวมอยู่
- 3) สายไฟฟ้าในระบบมีหลายประเภท หลายชนิด เช่น สายเหนือหัว สายใต้ดิน เป็นต้น
- 4) ระบบมีสายแยก (Lateral) มากมาย
- 5) มีจุดต่อโหลด (Load tap) หลายจุด
- 6) โหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ทำให้วิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบส่งนั้นไม่สามารถนำมาใช้กับระบบจำหน่ายได้โดยตรง หลักการระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบจำหน่าย สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการใหญ่ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.1

- 1) วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance based method)
- 2) วิธีการใช้ส่วนประกอบความถี่สูงและการเคลื่อนที่ของสัญญาณ (High frequency components and travelling wave based method)
- 3) วิธีการใช้ฐานความรู้ (Knowledge based method)
- 4) วิธีการผสมผสาน (Hybrid method)



ภาพที่ 2.1 แผนผังของวิธีการหาตำแหน่งผิดปกติในระบบจำหน่าย

2.1 วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ [2-8]

วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์นี้ จะใช้หลักการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ปรากฏที่คำนวณได้จากแรงดันและกระแสที่วัดได้ที่ต้นสายป้อน โดยจะถูกรวบรวมจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น รีเลย์ เครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล (Digital fault recorder) เป็นต้น จากนั้นจึงนำค่าอิมพีแดนซ์ปรากฏนี้ไปเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ของสายไฟเพื่อหาตำแหน่งผิดปกติต่อไป การหาตำแหน่งผิดปกติในระบบส่งนั้นจะสามารถละเอียดกระแสไหลดได้ เนื่องจากกระแสผิดปกติมีค่าสูงกว่ากระแสไหลดมาก แต่การหาตำแหน่งผิดปกติในระบบจำหน่ายนั้นต่างไป กล่าวคือ ต้องพิจารณากระแสไหลดในการหาตำแหน่งผิดปกติด้วยเพื่อเพิ่มความแม่นยำ เนื่องจากกระแสผิดปกติในระบบจำหน่ายนั้น มีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับกระแสของไหลด

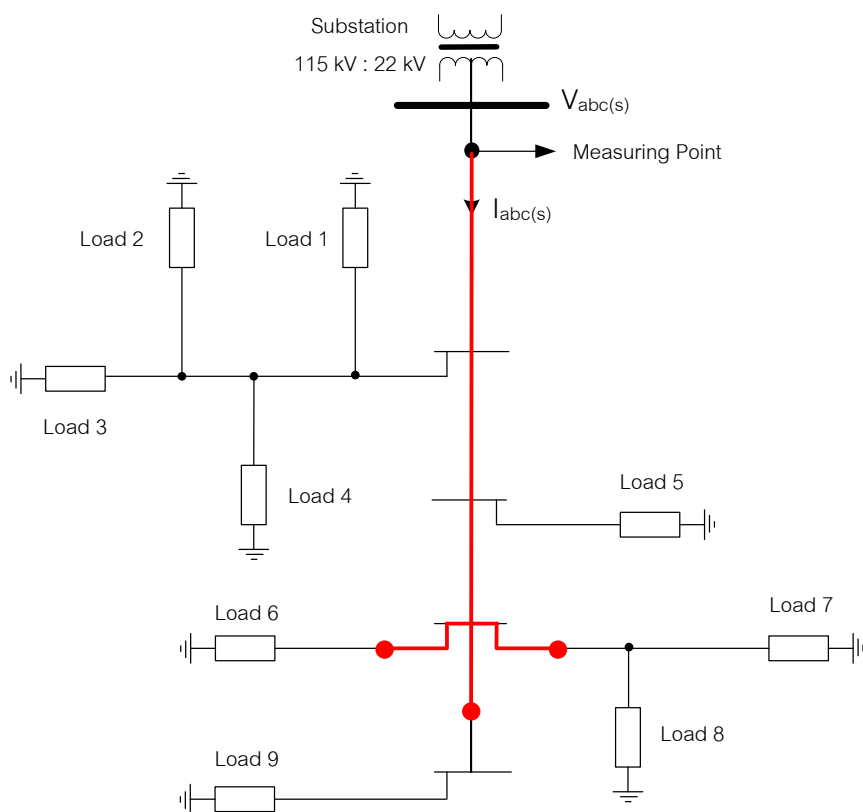
ข้อดีของวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ มีดังนี้

- 1) ไม่ต้องการอุปกรณ์เพิ่มเติมในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติ ทำให้ประหยัด
- 2) กระบวนการหาตำแหน่งผิดปกติไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย

ข้อเสียของวิธีนี้ มีดังนี้

- 1) ตำแหน่งผิดปกติที่ได้จะมีได้หลายตำแหน่ง เพราะจากระบบจำหน่ายมีสายแยกได้มากกว่าหนึ่งสาย

ภาพที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของตำแหน่งผิดปกติที่ได้จากวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งผิดปกติมีโอกาสเกิดขึ้นได้ 3 ตำแหน่ง เพราะทั้งสามจุดมีค่าอิมพีแดนซ์จากสถานีไฟฟ้าย่อยเท่ากัน



ภาพที่ 2.2 วงจรสายป้อนที่แสดงตำแหน่งผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้หลายตำแหน่ง

โดยวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์

จากการศึกษางานวิจัยที่ได้ทำมาแล้ว วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์นี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการย่อย ได้แก่

- 1) วิธีที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับ
- 2) วิธีที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบเฟส
- 3) วิธีที่วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพลาด
- 4) วิธีที่วิเคราะห์โดยใช้บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

2.1.1 วิธีการที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับ [2]

วิธีการนี้จะวิเคราะห์ตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ส่วนประกอบลำดับ (Sequence component) และสามารถระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ทั้ง 4 ประเภท ดังนี้

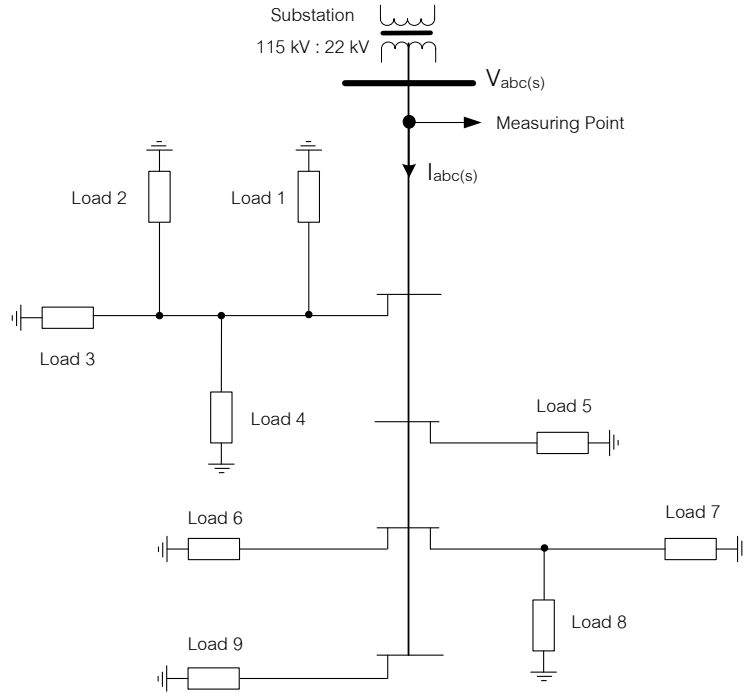
- 1) หนึ่งเฟสลงดิน (Single phase to ground fault)
- 2) เฟสต่อเฟสลงดิน (Double phase to ground fault)

- 3) เฟสต่อเฟส (Phase to phase fault)
- 4) สามเฟส (Three phase fault)

หลักการในการระบุตำแหน่งผิดพลาดนี้ เริ่มจากการแบ่งสายทั้งหมดออกเป็นสายย่อยๆ จากนั้นจึงทำการหาตำแหน่งผิดพลาดในแต่ละสายย่อยจนครบทุกสายย่อย ถ้าค่าตำแหน่งผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าความยาวของสายย่อยนั้น แสดงว่าเกิดความผิดพลาดบนสายย่อยนั้น แต่ถ้าค่าตำแหน่งผิดพลาดที่ได้มีค่ามากกว่าความยาวของสายย่อยแสดงว่า ความผิดพลาดไม่ได้เกิดบนสายย่อยนั้น จากนั้นทำการหาตำแหน่งผิดพลาดในสายย่อยถัดไป ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ การละเลยกระแสของไหลทำให้ตำแหน่งผิดพลาดที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น เนื่องจากความผิดพลาดประเภทนี้เกิดขึ้นบ่อยที่สุด

2.1.1.1 การหาค่ากระแสและแรงดันของแต่ละสายย่อย

เนื่องจากข้อมูลกระแสและแรงดันที่มีในระบบจำหน่ายจะมีแค่หนึ่งจุด คือ ที่ต้นสายป้อนหรือที่สถานีไฟฟ้า แต่กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดนี้จะหาตำแหน่งผิดพลาดไปทุกๆสายย่อย ซึ่งในการระบุตำแหน่งในแต่ละสายย่อยนั้นต้องใช้ค่ากระแสและแรงดันที่ต้นสายของแต่ละสายย่อย ดังนั้น จึงต้องมีข้อมูลเพิ่มเติมในการหาค่ากระแสและแรงดันนี้ ซึ่งก็คือ พารามิเตอร์ของสายไฟ ลักษณะการต่อวงจรของสายป้อน และค่าอิมพีแดนซ์ของไหลซึ่งสามารถหาได้จากโปรแกรมกำลังไหล

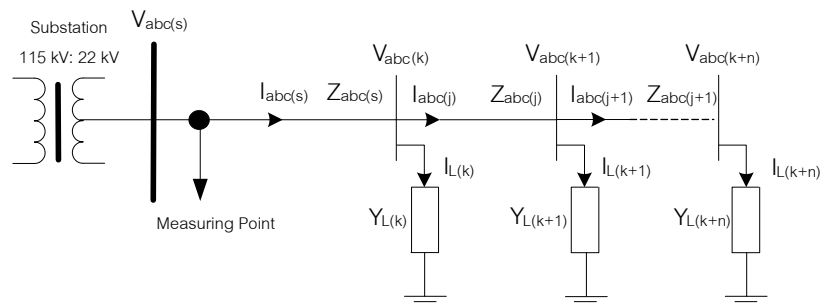


ภาพที่ 2.3 วงจรสายป้อนตัวอย่างในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ในการที่จะหาค่ากระแสและแรงดันที่ต้นสายของแต่ละสายย่อยจะต้องดัดแปลงวงจรสายป้อนก่อน สายป้อนตัวอย่างของระบบจำหน่ายดังภาพที่ 2.3 จะต้องทำการรวมอิมพีแดนซ์ของสายแยก (Laterals) ให้เป็นอิมพีแดนซ์แบบจุดต่อโหลด (Load taps) ดังภาพที่ 2.4 ก่อน จากนั้นจึงจะสามารถคำนวณแรงดันและกระแสของแต่ละสายย่อยได้ แรงดันที่แต่ละบัสสามารถหาได้จาก

$$[V_{abc(i)}] = [V_{abc(s)}] - \sum_{j=1}^i [Z_{abc(j)}] \cdot [I_{abc(j)}] \quad (2.1)$$

- โดยที่
- $[V_{abc(s)}]$ คือ เมตริกซ์ของแรงดันวัดที่ต้นสายป้อน
 - $[Z_{abc(j)}]$ คือ เมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์สายย่อย j
 - $[I_{abc(j)}]$ คือ เมตริกซ์ของกระแสที่สายย่อย j



ภาพที่ 2.4 วงจรตัวอย่างการคำนวณแรงดันที่แต่ละบัสและกระแสที่แต่ละสายย่อย

และกระแสในแต่ละสายย่อยสามารถหาได้จาก

$$[I_{abc(i)}] = [I_{abc(s)}] - \sum_{k=1}^i [I_{L(k)}] \quad (2.2)$$

โดยที่ $[I_{abc(s)}]$ คือ เมตริกซ์ของกระแสที่วัดที่ต้นสายป้อน

$[I_{L(k)}]$ คือ เมตริกซ์ของกระแสของโหลดที่บัส k

และกระแสของจุดต่อโหลดสามารถหาได้จาก

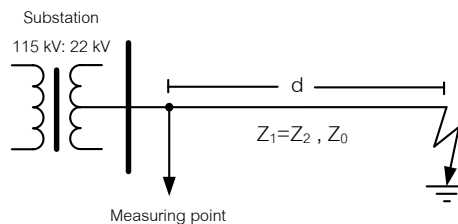
$$[I_{L(k)}] = [Y_{L(k)}] \cdot [V_{abc(k)}] \quad (2.3)$$

โดยที่ $[Y_{L(k)}]$ คือ เมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของโหลดที่บัส k

$[V_{abc(k)}]$ คือ เมตริกซ์ของแรงดันสามเฟสที่บัส k

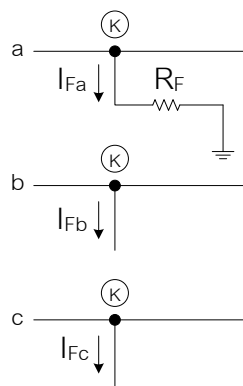
2.1.1.2 กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในสายย่อยหนึ่งๆ

กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดจะแสดงเฉพาะความผิดพลาดแบบเฟส a ลงดิน เท่านั้น พิจารณาภาพที่ 2.5 ซึ่งเกิดความผิดพลาดประเภทเฟส a ลงดินบนสายย่อยหนึ่งๆ ที่อยู่ติดต้นสายป้อนหรือสถานีไฟฟ้าย่อย



ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทเฟส a ลงดิน

ภาพที่ 2.6 แสดงวงจรส่วนประกอบลำดับของความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดิน จะเห็นว่าไม่มีกระแสผิดพลาดที่เฟส b และ c ทำให้กระแสผิดพลาดทั้งสองเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 2.6 วงจรส่วนประกอบลำดับที่จุดเกิดความผิดพลาดประเภทเฟส a ลงดิน

ดังนั้น จะหาค่ากระแสส่วนประกอบลำดับได้ว่า

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยที่ $I_{fa}^{(0)}$ คือ กระแสส่วนประกอบลำดับศูนย์ของเฟส a

$I_{fa}^{(1)}$ คือ กระแสส่วนประกอบลำดับหนึ่งเฟส a

$I_{fa}^{(2)}$ คือ กระแสส่วนประกอบลำดับสองเฟส a

ดังนั้น สมการกระแสส่วนประกอบลำดับแต่ละค่า คือ

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{I_{fa}}{3} \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.5) จะได้ว่า

$$I_{fa} = 3I_{fa}^{(0)} \quad (2.6)$$

เพราะฉะนั้นแรงดันที่จุดเกิดความผิดพลาด คือ

$$V_{fa} = 3I_{fa}^{(0)} R_F \quad (2.7)$$

$$V_{fa} = V_{fa}^{(0)} + V_{fa}^{(1)} + V_{fa}^{(2)} \quad (2.8)$$

และแรงดันที่จุดเกิดความผิดพลาดทั้ง 3 ลำดับ จะได้ว่า

$$V_{fa}^{(0)} = V_a^{(0)} - I_{fa}^{(0)} Z_0 \quad (2.9)$$

$$V_{fa}^{(1)} = V_a^{(1)} - I_{fa}^{(1)} Z_1 \quad (2.10)$$

$$V_{fa}^{(2)} = V_a^{(2)} - I_{fa}^{(2)} Z_2 \quad (2.11)$$

และ

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (2.12)$$

โดยที่ V_a คือ แรงดันเฟส a ที่ต้นสายป้อนหรือที่สถานีไฟฟ้าย่อย

$V_a^{(0)}$ คือ แรงดันส่วนประกอบลำดับศูนย์ของเฟส a ที่ต้นสายป้อนหรือที่สถานีไฟฟ้าย่อย

$V_a^{(1)}$ คือ แรงดันส่วนประกอบลำดับหนึ่งของเฟส a ที่ต้นสายป้อนหรือที่สถานีไฟฟ้าย่อย

$V_a^{(2)}$ คือ แรงดันส่วนประกอบลำดับสองของเฟส a ที่ต้นสายป้อนหรือที่สถานีไฟฟ้าย่อย

เมื่อนำสมการ (2.9), (2.10), (2.11) และ (2.12) แทนลงในสมการ (2.8) จะได้ว่า

$$V_{fa} = V_a - (I_{fa}^{(1)} + I_{fa}^{(2)}) Z_1 - I_{fa}^{(0)} Z_0 \quad (2.13)$$

สามารถเขียนสมการ (2.13) ใหม่เป็น

$$V_{fa} = V_a - (I_{fa} + kI_{fa}^{(0)}) Z_1 \quad (2.14)$$

โดยที่

$$k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (2.15)$$

นำสมการ (2.7) มาแทนใน (2.14) จะได้

$$V_a = (I_{fa} + kI_{fa}^{(0)})Z_1 + 3I_{fa}^{(0)}R_F \quad (2.16)$$

นำค่า $(I_a + kI_{fa}^{(0)})$ มาหารสมการ (2.16) จะได้

$$\frac{V_a}{(I_{fa} + kI_{fa}^{(0)})} = Z_1 + \frac{3I_{fa}^{(0)}R_F}{(I_{fa} + kI_{fa}^{(0)})} \quad (2.17)$$

กำหนดให้

$$V_a = V_{select} \quad (2.18)$$

$$(I_{fa} + kI_{fa}^{(0)}) = I_{select} = I_{S1} + jI_{S2} \quad (2.19)$$

$$Z_{app} = \frac{V_a}{(I_{fa} + kI_{fa}^{(0)})} = R_{app} + jX_{app} \quad (2.20)$$

$$I_{comp} = 3I_{fa}^{(0)} = I_d + jI_q \quad (2.21)$$

$$Z_1 = d \cdot (R_1 + jX_1) \quad (2.22)$$

เมื่อนำสมการ (2.19) (2.20) (2.21) และ (2.22) ไปแทนในสมการ (2.17) จะได้ว่า

$$R_{app} + jX_{app} = d \cdot (R_1 + jX_1) + \frac{(I_d + jI_q)R_F}{(I_{S1} + jI_{S2})} \quad (2.23)$$

สามารถเขียนสมการ (2.23) ใหม่เป็น

$$R_{app} + jX_{app} = \left(dR_1 + \frac{R_F(I_d I_{S1} + I_q I_{S2})}{I_{S1}^2 + I_{S2}^2} \right) + j \left(dX_1 + \frac{R_F(I_q I_{S1} - I_d I_{S2})}{I_{S1}^2 + I_{S2}^2} \right) \quad (2.24)$$

แยกส่วนจริงของสมการ (2.24) มาเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$R_{app} = dR_1 + \frac{R_F(I_d I_{S1} + I_q I_{S2})}{I_{S1}^2 + I_{S2}^2} \quad (2.25)$$

แยกส่วนจินตภาพของสมการ (2.24) มาเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$X_{app} = dX_1 + \frac{R_F(I_q I_{S1} - I_d I_{S2})}{I_{S1}^2 + I_{S2}^2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) สามารถหาตำแหน่งมิตพ่วงและความต้านทานมิตพ่วง ในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} d \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & M \\ X_1 & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_{app} \\ X_{app} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

โดยที่

$$L = \frac{(I_d I_{S1} + I_q I_{S2})}{I_{S1}^2 + I_{S2}^2} \quad (2.28)$$

$$M = \frac{(I_q I_{S1} - I_d I_{S2})}{I_{S1}^2 + I_{S2}^2} \quad (2.29)$$

ตัวแปรในการระบุตำแหน่งผิดพ่วงตามความผิดพ่วงประเภทอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวแปร V_{select} และ I_{select} ของความผิดพ่วงแต่ละประเภท

| ประเภทความผิดพ่วง | V_{select} | I_{select} | I_{comp} |
|-------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| AG | V_a | $I_a + kI_{fa}^{(0)}$ | $3I_{fa}^{(0)}$ |
| AB or ABG | $V_a - V_b$ | $I_a - I_b$ | $\Delta I_a - \Delta I_b$ |
| ABC or ABCG | $V_a - V_b$ or $V_b - V_c$ or $V_c - V_a$ | $I_a - I_b$ or $I_b - I_c$ or $I_c - I_a$ | $\Delta I_a - \Delta I_b$ or $\Delta I_b - \Delta I_c$ or $\Delta I_c - \Delta I_a$ |

โดยที่ ΔI_a คือ ผลต่างระหว่างกระแสก่อนเกิดความผิดพ่วงกับกระแสขณะเกิดความผิดพ่วงของเฟส a

ΔI_b คือ ผลต่างระหว่างกระแสก่อนเกิดความผิดพ่วงกับกระแสขณะเกิดความผิดพ่วงของเฟส b

ΔI_c คือ ผลต่างระหว่างกระแสก่อนเกิดความผิดพ่วงกับกระแสขณะเกิดความผิดพ่วงของเฟส c

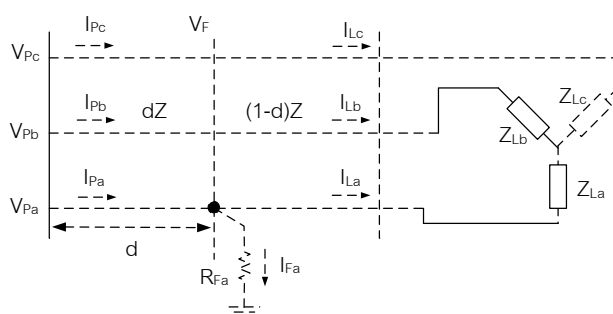
2.1.2 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบเฟส [3-6]

วิธีการนี้จะวิเคราะห์การระบุตำแหน่งผิดพ่วงโดยใช้ส่วนประกอบเฟส (Phase Component) โดยจะสามารถระบุตำแหน่งผิดพ่วงได้ทั้ง 4 ประเภท และมีขั้นตอนเบื้องต้นเหมือนกับวิธีที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับ คือ เริ่มจากแบ่งสายทั้งหมดออกเป็นสายย่อยๆ จากนั้นจึงทำการหาตำแหน่งผิดพ่วงในแต่ละสายย่อยจนครบทุกสายย่อย ดังนั้นข้อมูลที่ต้องการเพิ่มเติมของวิธีการนี้จึงเหมือนกับวิธีที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับ ได้แก่ พารามิเตอร์ของสายป้อน ลักษณะการต่อวงจรของสายป้อน และค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดซึ่งสามารถหาได้จากโปรแกรมโหลดไฟว์ โดยการระบุตำแหน่งผิดพ่วงในแต่ละสายย่อยนี้จะเริ่มต้นจากการสมมติให้กระแสโหลดขณะเกิดความผิดพ่วงมีค่าเท่ากับกระแสโหลดก่อนเกิดความผิดพ่วง แล้วคำนวณ

แบบวนซ้ำเพื่อทำการปรับค่ากระแสไหลลดจนกระทั่งได้ตำแหน่งผิดพลาด ในที่นี้จะแสดงวิธีการระบุตำแหน่งสำหรับความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น

2.1.2.1 กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในสายย่อยหนึ่ง ๆ [4]

ภาพที่ 2.7 แสดงความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดินในสายย่อยหนึ่ง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นที่เฟสเอ และห่างจากต้นสายย่อยเท่ากับ d หน่วย



ภาพที่ 2.7 วงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทเฟสเอลงดิน

ขั้นตอนที่ 1 สมมติให้กระแสไหลลดขณะเกิดความผิดพลาดมีค่าเท่ากับกระแสไหลลดก่อนเกิดความผิดพลาด

$$I_{La} = I_{La(\text{prefault})} \quad (2.30)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณกระแสผิดพลาดจากสูตรต่อไปนี้

$$I_{Fa} = I_{Pa} - I_{La} \quad (2.31)$$

โดยที่ I_{Pa} คือ กระแสเฟสเอที่ต้นสายย่อยขณะเกิดความผิดพลาด

I_{Fa} คือ กระแสผิดพลาดที่เฟสเอ

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อทราบค่ากระแสความผิดพลาด จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเฟสที่เกิดความผิดพลาดได้ว่า

$$V_{Pa} = d \times (Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ac}I_c) + R_{Fa}I_{Fa} \quad (2.32)$$

ตำแหน่งผิดพลาดสามารถหาได้โดยการแก้สมการของแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการที่ (2.32) ซึ่งจะได้ว่า

$$d = \frac{V_{Pa}I_{Fa} - V_{Pa}I_{Far}}{A \cdot I_{Fa} - B \cdot I_{Far}} \quad (2.33)$$

โดยที่ V_{Pa} คือ แรงดันเฟสเอที่ต้นสายย่อยขณะเกิดความผิดพลาด

d คือ ตำแหน่งผิดพลาดที่วัดจากต้นสายย่อย

$$A = Z_{aar}I_{ar} - Z_{aai}I_{ai} + Z_{abr}I_{br} - Z_{abi}I_{bi} + Z_{acr}I_{cr} - Z_{aci}I_{ci}$$

$$B = Z_{aar}I_{ai} + Z_{aai}I_{ar} + Z_{abr}I_{bi} + Z_{abi}I_{br} + Z_{acr}I_{ci} + Z_{aci}I_{cr}$$

ขั้นที่ตอน 4 คำนวณค่าแรงดันที่จุดเกิดความผิดพลาดโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Pa} \\ V_{Pb} \\ V_{Pc} \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณกระแสไหลคืนใหม่จากแรงดันที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ขั้นตอนที่ 6 กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2 ด้วยค่ากระแสผิดพลาดใหม่ (I_{Fa}) จากนั้นทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 จนกระทั่ง ตำแหน่งผิดพลาด (d) นั้นลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

ตารางที่ 2.2 แสดงรูปวงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทอื่นๆ ที่เกิดขึ้นบนสายย่อยหนึ่งๆ นอกจากความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดิน และตารางที่ 2.3 แสดงสูตรการคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาดและความต้านทานผิดพลาดของความผิดพลาดประเภทอื่นๆ นอกจากความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดิน

ตารางที่ 2.2 รูปวงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ [6]

| ประเภทความผิดพลาด | วงจรสมมูลของความผิดพลาด |
|----------------------|-------------------------|
| เฟสต่อเฟส (AB) | |
| เฟสต่อเฟสลงดิน (ABG) | |
| สามเฟสลงดิน (ABCG) | |

ตารางที่ 2.3 สูตรการหาดำแหน่งผิดพลาดตามประเภทความผิดพลาด [6]

| ประเภทความผิดพลาด | สูตรการหาดำแหน่งและความต้านทานผิดพลาด |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เฟสต่อเฟส (AB) | $\begin{bmatrix} d \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_3 & I_{Far} \\ K_4 & I_{Fai} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Par} - V_{Pbr} \\ V_{Pai} - V_{Pbi} \end{bmatrix}$ |
| เฟสต่อเฟสลงดิน (ABG) | $\begin{bmatrix} d \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1a} & I_{Far} & 0 & I_{Far} + I_{Fbr} \\ K_{2a} & I_{Fai} & 0 & I_{Fai} + I_{Fbi} \\ K_{1b} & 0 & I_{Fbr} & I_{Far} + I_{Fbr} \\ K_{2b} & 0 & I_{Fbi} & I_{Fai} + I_{Fbi} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Par} \\ V_{Pai} \\ V_{Pbr} \\ V_{Pbi} \end{bmatrix}$ |
| สามเฟสลงดิน (ABCG) | $\begin{bmatrix} d \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fc} \\ R_{Fabc} \\ X_{Fabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1a} & I_{Far} & 0 & 0 & I_{Fabc} & -I_{Fabc} \\ K_{2a} & I_{Fai} & 0 & 0 & I_{Fabc} & I_{Fabc} \\ K_{1b} & 0 & I_{Fbr} & 0 & I_{Fabc} & -I_{Fabc} \\ K_{2b} & 0 & I_{Fbi} & 0 & I_{Fabc} & I_{Fabc} \\ K_{1c} & 0 & 0 & I_{Fcr} & I_{Fabc} & -I_{Fabc} \\ K_{2c} & 0 & 0 & I_{Fci} & I_{Fabc} & I_{Fabc} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Par} \\ V_{Pai} \\ V_{Pbr} \\ V_{Pbi} \\ V_{Pcr} \\ V_{Pci} \end{bmatrix}$ |

$$\text{โดยที่ } K_3 = \sum_k^{a,b,c} [(Z_{akr} - Z_{bkr})I_{Pkr} - (Z_{aki} - Z_{bki})I_{Pki}]$$

$$K_4 = \sum_k^{a,b,c} [(Z_{akr} - Z_{bkr})I_{Pki} + (Z_{aki} - Z_{bki})I_{Pkr}]$$

$$K_{1a} = \sum_k^{a,b,c} (Z_{akr}I_{Pkr} - Z_{aki}I_{Pki})$$

$$K_{2a} = \sum_k^{a,b,c} (Z_{akr}I_{Pki} + Z_{aki}I_{Pkr})$$

2.1.2.2 การหาค่ากระแสไหลหรือการประมาณกระแสไหล [3, 4]

จากขั้นตอนที่ 5 ของกระบวนการหาดำแหน่งผิดพลาดจะต้องคำนวณกระแสไหลใหม่ ซึ่งวิธีการหาค่ากระแสไหลนั้นจะขึ้นกับข้อมูลของไหลที่มี ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 ไหลดมีคุณสมบัติเป็นอิมพีแดนซ์ และทราบค่าอิมพีแดนซ์ของไหล (Z_L) [4] จากภาพที่ 2.8 สามารถคำนวณหากระแสไหลเฟส a ได้ตามสมการต่อไปนี้

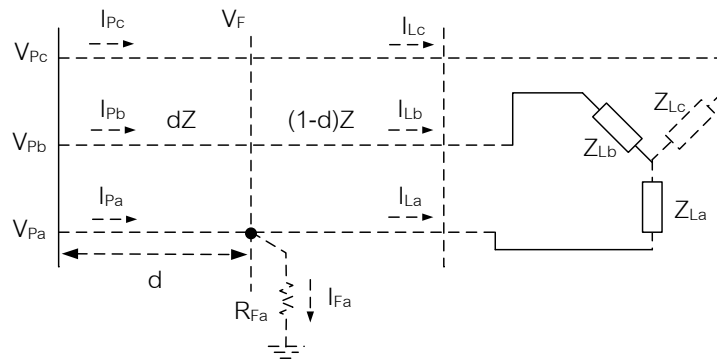
$$I_{La} = [Y_{L11} \quad Y_{L12} \quad Y_{L13}] \cdot [V_{Fa} \quad V_{Fb} \quad V_{Fc}]^T \quad (2.35)$$

โดยที่

$$Y_{L11} = [(1-d)Z_{aa} + Z_{La}]^{-1} \quad (2.36)$$

$$Y_{L12} = [(1-d)Z_{ab}]^{-1} \quad (2.37)$$

$$Y_{L13} = [(1-d)Z_{ac}]^{-1} \quad (2.38)$$



ภาพที่ 2.8 วงจรสมมูลของความผิดปกติประเภทเฟส a ลงดินและมีโหลดต่ออยู่

กรณีที่ 2 โหลดมีคุณสมบัติเป็นอิมพีแดนซ์ แต่ไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด หรือการไม่ทราบค่า (Z_L) นั้นเอง [4] ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณกระแสโหลดจากค่าแรงดันและกระแสก่อนเกิดความผิดปกติ เนื่องจากค่า Y_{L12} และ Y_{L13} นั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Y_{L11} จึงสามารถละเลยได้ ทำให้สามารถประมาณค่าแอดมิตแตนซ์ที่เฟส a ได้เป็น

$$Y_{L11} = \frac{I_{La(\text{prefault})}}{V_{Fa(\text{prefault})}} \tag{2.39}$$

ดังนั้น เมื่อทราบค่าแรงดันที่จุดเกิดความผิดปกติก็จะสามารถประมาณค่ากระแสโหลดขณะเกิดความผิดปกติได้

$$I_{La(\text{duringfault})} = Y_{L11} \times V_{Fa(\text{duringfault})} \tag{2.40}$$

กรณีที่ 3 ทราบคุณสมบัติของโหลดหรือทราบค่า n_p หรือ n_q นั้นเอง [3, 4]

โดยที่ n_p, n_q คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงการตอบสนองทางพลวัตของโหลด ซึ่งค่าและความหมายแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ n_p หรือ n_q กับพฤติกรรมของโหลด

| n_p หรือ n_q | พฤติกรรมของโหลด |
|------------------|-----------------|
| 0 | กำลังไฟฟ้าคงที่ |
| 1 | กระแสคงที่ |
| 2 | อิมพีแดนซ์คงที่ |

ดังนั้น เมื่อทราบค่า n_p, n_q ของโหลดจะสามารถหาค่ากระแสโหลดได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$I = I_r \left| \frac{V}{V_0} \right|^{n_p-2} + jI_i \left| \frac{V}{V_0} \right|^{n_q-2} \tag{2.41}$$

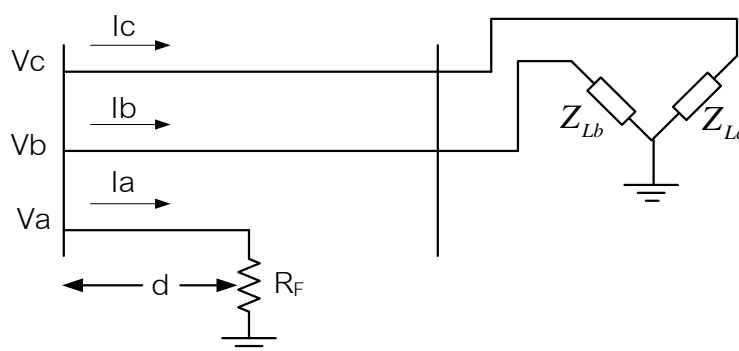
โดยที่ V_0 คือ แรงดันก่อนเกิดความผิดปกติ

I_r คือ ส่วนประกอบจริงของกระแสไหลตกก่อนเกิดความผิดปกติ

I_i คือ ส่วนประกอบจินตภาพของกระแสไหลตกก่อนเกิดความผิดปกติ

2.1.3 วิธีการที่ใช้ข้อมูลของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติ [7]

วิธีการนี้จะวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติโดยใช้ส่วนประกอบเชิงเฟสเหมือนวิธีที่สอง แต่วิธีการนี้จะนำผลของไหลตกของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติมาพิจารณาเพิ่มเติม ซึ่งจะทำให้สามารถระบุสายที่เกิดความผิดปกติที่แท้จริงได้



ภาพที่ 2.9 วงจรสมมูลของความผิดปกติแบบเฟส a ลงดิน

วิธีการนี้จะมีขั้นตอนเบื้องต้นเหมือนกับสองวิธีการแรก คือ เริ่มจากแบ่งสายทั้งหมดออกเป็นสายย่อยๆ จากนั้นจึงทำการหาตำแหน่งผิดปกติในแต่ละสายย่อยจนครบทุกสาย ในที่นี้จะแสดงวิธีการหาตำแหน่งผิดปกติประเภทหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น จากภาพที่ 2.9 แรงดันและกระแสสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dZ_{aa} + R_F & dZ_{ab} & dZ_{ac} \\ dZ_{ba} & Z_{bb} + Z_{Lb} & Z_{bc} + Z_{Lbc} \\ dZ_{ca} & Z_{cb} + Z_{Lcb} & Z_{cc} + Z_{Lc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

จากสมการจะเห็นว่าวิธีการนี้จะละเลยกระแสไหลตกของเฟสที่เกิดความผิดปกติ แต่ไม่ได้ละเลยกระแสไหลตกของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติ จากสมการ (2.42) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสเอกับกระแสเฟสเอสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ว่า

$$d = \frac{\text{Imag} \left(\frac{V_a}{I_a} \right)}{\text{Imag} \left(Z_{aa} + Z_{ab} \frac{I_b}{I_a} + Z_{ac} \frac{I_c}{I_a} \right)} \quad (2.43)$$

จาก (2.42) สามารถสร้างสมการเชิงเส้นที่เป็นอิสระต่อกันได้อีก 2 สมการ ดังนี้

$$d_1 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_a - V_b + V_c}{I_a} + B \frac{I_b}{I_a} + C \frac{I_c}{I_a} \right)}{\text{imag} (Z_{aa} - Z_{ba} + Z_{ca} + A)} \quad (2.44)$$

$$d_2 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_a + V_b - V_c}{I_a} - B \frac{I_b}{I_a} - C \frac{I_c}{I_a} \right)}{\text{imag} (Z_{aa} + Z_{ba} - Z_{ca} + A)} \quad (2.45)$$

โดยที่ $A = Z_{ab} \frac{I_b}{I_a} + Z_{ac} \frac{I_c}{I_a}$

$$B = Z_{bb} + Z_{Lb} - Z_{cb} - Z_{Lcb}$$

$$C = Z_{bc} + Z_{Lbc} - Z_{cc} - Z_{Lc}$$

เนื่องจากค่ากระแสและแรงดันของทั้งสามเฟสมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับสายย่อยหนึ่งๆ การใช้ข้อมูลของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพลาดสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในการระบุสายย่อยที่เกิดความผิดพลาดที่แท้จริงได้โดยการหาค่าคลาดเคลื่อนของค่าตอบที่ได้จากสมการที่ต่างกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Error} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n d - d_j}{|d|} \quad (2.46)$$

โดยที่ n คือ จำนวนค่าตอบที่ได้สมการที่ต่างกัน

ค่าความคลาดเคลื่อนของสายย่อยไหนมีค่าน้อยที่สุด จึงแสดงว่าสายย่อยนั้นเกิดความผิดพลาดที่แท้จริง ตารางที่ 2.5 แสดงรูปวงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทอื่นๆ ที่เกิดขึ้นบนสายย่อยหนึ่งๆ นอกจากความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดิน ตารางที่ 2.6 แสดงสูตรการคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาดของความผิดพลาดประเภทเฟสต่อเฟสและเฟสต่อเฟสลงดิน ตารางที่ 2.7 แสดงสูตรการคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาดของความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดิน

ตารางที่ 2.5 วงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ

| ประเภทความผิดพลาด | วงจรสมมูลตามประเภทความผิดพลาด |
|----------------------|-------------------------------|
| เฟสต่อเฟส (AB) | |
| เฟสต่อเฟสลงดิน (ABG) | |
| สามเฟสลงดิน (ABCG) | |

ตารางที่ 2.6 ตำแหน่งผิดพ่วงประเภทเฟสต่อเฟสและเฟสต่อเฟสลงดิน

| ประเภทความผิดพ่วง | เฟสต่อเฟส (AB) และเฟสต่อเฟสลงดิน(ABG) |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ตำแหน่งผิดพ่วงที่ 1 | $d_1 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} \right)}{\text{imag} \left(\frac{D \cdot I_a + E \cdot I_b + F \cdot I_c}{I_a - I_b} \right)}$ |
| ตำแหน่งผิดพ่วงที่ 2 | $d_2 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_a - V_b - V_c}{I_a - I_b} \right) + (Z_{cc} + Z_{Lc}) \left(\frac{I_c}{I_a - I_b} \right)}{\text{imag} \left(\frac{(D - Z_{ca}) I_a + (E - Z_{cb}) I_b + F \cdot I_c}{I_a - I_b} \right)}$ |

ตารางที่ 2.7 ตำแหน่งผิดพ่วงของความผิดพ่วงแบบสามเฟส

| ประเภทความผิดพ่วง | สามเฟส (ABC) |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ตำแหน่งผิดพ่วงที่ 1 | $d_1 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} \right)}{\text{imag} \left(\frac{D \cdot I_a + E \cdot I_b + F \cdot I_c}{I_a - I_b} \right)}$ |
| ตำแหน่งผิดพ่วงที่ 2 | $d_2 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} \right)}{\text{imag} \left(\frac{G \cdot I_a + H \cdot I_b + J \cdot I_c}{I_b - I_c} \right)}$ |
| ตำแหน่งผิดพ่วงที่ 3 | $d_3 = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_c - V_a}{I_c - I_a} \right)}{\text{imag} \left(\frac{K \cdot I_a + L \cdot I_b + M \cdot I_c}{I_c - I_a} \right)}$ |

โดยที่ $D = Z_{aa} - Z_{ba}$, $E = Z_{ab} - Z_{bb}$, $F = Z_{ac} - Z_{bc}$

$G = Z_{ba} - Z_{ca}$, $H = Z_{bb} - Z_{cb}$, $J = Z_{bc} - Z_{cc}$

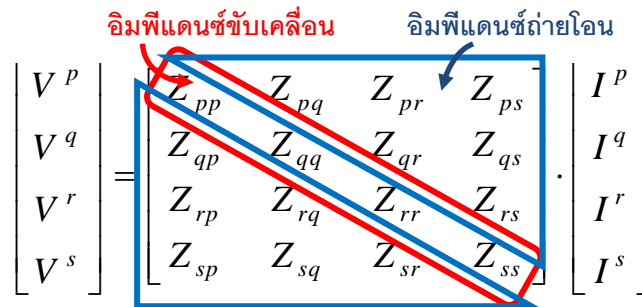
$K = Z_{ca} - Z_{aa}$, $L = Z_{cb} - Z_{ab}$, $M = Z_{cc} - Z_{ac}$

สำหรับการหาตำแหน่งผิดพ่วงประเภทสามเฟสลงดินจะหาได้โดยการนำตำแหน่งผิดพ่วงทั้งสามคำตอบมาเฉลี่ยกัน

$$d = \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \right) \tag{2.47}$$

2.1.4 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ [8]

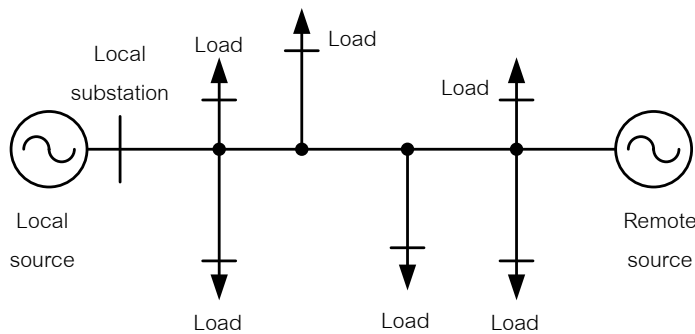
และกำหนดให้ โหนด หมายถึง จุดเชื่อมต่อ 1 เฟสเท่านั้น ในขณะที่ บัส จะประกอบด้วย 1 โหนด 2 โหนด หรือ 3 โหนดก็ได้ ขึ้นอยู่กับจำนวนเฟสที่บัสนั้นมี เช่น บัส 3 เฟส ก็จะมีโหนด 3 โหนด



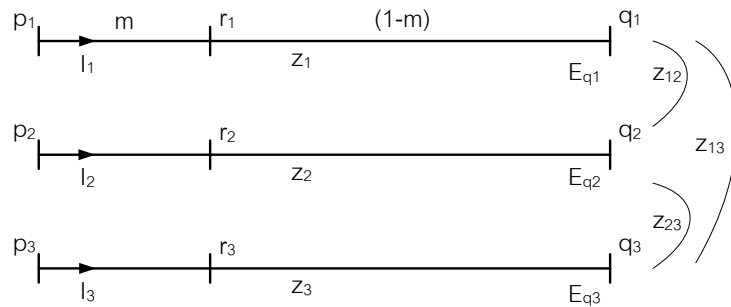
ภาพที่ 2.10 เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส

2.1.4.1 วิธีการที่พิจารณาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่ง

วิธีการนี้จะมีขั้นตอนเบื้องต้นเหมือนกับสามวิธีการแรกที่ได้นำเสนอไปแล้ว คือ เริ่มจากแบ่งสายทั้งหมดออกเป็นสายย่อยๆ จากนั้นจึงทำการหาตำแหน่งผิดพลาดในแต่ละสายย่อยจนครบทุกสายย่อย ในที่นี้จะแสดงวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น ภาพที่ 2.11 แสดงวงจรที่สายป้อนแบบเรเดียลที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่ง



ภาพที่ 2.11 วงจรสายป้อนตัวอย่างที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่ง



ภาพที่ 2.12 วงจรสมมูลของสายย่อยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพ่วง

จากภาพที่ 2.12 นี้ จะสามารถเขียนค่าอิมพีแดนซ์ถ่ายโอนและอิมพีแดนซ์ขับเคลื่อนได้ดังนี้

$$Z_{kr_i} = B_{ki} + C_{ki}d \quad (2.48)$$

$$Z_{r_i r_i} = A_{i_i_0} + A_{i_i_1} \cdot d + A_{i_i_2} \cdot d^2, \quad i=1,2,3 \quad t=1,2,3 \quad \text{and} \quad i \neq t \quad (2.49)$$

$$Z_{r_i r_i} = A_{i_i_0} + A_{i_i_1} \cdot d + A_{i_i_2} \cdot d^2, \quad i=1,2,3 \quad (2.50)$$

โดยที่ Z_{kr_i} คือ อิมพีแดนซ์ถ่ายโอนระหว่างโนด k และโนดที่เกิดความผิดพ่วง r_i

$Z_{r_i r_s}$ คือ อิมพีแดนซ์ถ่ายโอนระหว่างโนด r_i และโนด r_s

$Z_{r_i r_i}$ คือ อิมพีแดนซ์ขับเคลื่อนที่โนดที่เกิดความผิดพ่วง r_i

$B_{ki}, C_{ki}, A_{i_i_0}, A_{i_i_1}, A_{i_i_2}, A_{i_i_0}, A_{i_i_1}, A_{i_i_2}$ คือ ค่าคงที่ที่หาได้จากพารามิเตอร์ของวงจร

d คือ ตำแหน่งที่เกิดความผิดพ่วง

เมื่อพิจารณาการเกิดความผิดพ่วงประเภทหนึ่งเฟสลงดิน จะสามารถเขียนสมการของกระแสความผิดพ่วงได้ดังนี้

$$I_{f_1} = \frac{E_{r_1 0}}{Z_{r_1 r_1} + R_{F1}} \quad (2.51)$$

โดยที่ $E_{r_1 0}$ คือ แรงดันก่อนเกิดความผิดพ่วงของโนดที่เกิดความผิดพ่วง r_1

R_{F1} คือ ความต้านทานความผิดพ่วง

แรงดันก่อนเกิดความผิดพ่วง $E_{r_1 0}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตำแหน่งผิดพ่วงและแรงดันก่อนเกิดความผิดพ่วงที่โนด p_1 และ q_1 ได้ตามสมการต่อไปนี้

$$E_{r_1 0} = E_{p_1 0} - m(E_{p_1 0} - E_{q_1 0}) \quad (2.52)$$

กำหนดให้ k_1 เป็นเฟสที่เกิดความผิดพลาด ดังนั้นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปของเฟสที่เกิดความผิดพลาดจะเท่ากับ

$$\Delta E_{k_1} = -Z_{k_1 r_1} I_{f_1} \quad (2.53)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.51) และ (2.52) มาแทนใน (2.53) จะได้ว่า

$$\Delta E_{k_1} = \frac{-E_{p_1 0} + m(E_{p_1 0} - E_{q_1 0})}{Z_{r_1} + R_{F_1}} \quad (2.54)$$

เมื่อทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการ (2.54) จะสามารถหาค่าตำแหน่งผิดพลาดออกมาได้

เนื่องจากค่าเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Superimposed voltage) นั้นแปรปรวนเมื่อค่าความต้านทานผิดพลาดมีค่าสูง และการวัดค่าแรงดันก่อนเกิดและขณะเกิดความผิดพลาดที่ผิดพลาดเพียงเล็กน้อย อาจส่งผลกระทบต่อมากกับแรงดันที่เปลี่ยนไปที่แท้จริง ดังนั้น การหาค่าเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแส (Superimposed current)

$$[\Delta E] = -[Z_s][\Delta I] \quad (2.55)$$

เมื่อ $[\Delta E]$ คือ ค่าเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Superimposed voltage)

$[\Delta I]$ คือ ค่าเปลี่ยนแปลงของกระแส (Superimposed current)

$[Z_s]$ คือ อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของแหล่งจ่าย (Local source impedance matrix)

ดังนั้น ΔE_{k_1} ในสมการ (2.54) คือ สมาชิกโหนด k_1 ใน ΔE ของสมการ (2.55)

ในการหาค่าแรงดันก่อนเกิดความผิดพลาดที่โหนดต่างๆ สามารถหาได้โดยการนำค่ากระแสของสถานีไฟฟ้าต้นทาง (Local substation) และกระแสของแหล่งกำเนิดไกล (Remote source) คูณกับเมตริกซ์ $[J]$ ซึ่งกระแสของแหล่งกำเนิดไกลหาได้จากสมการ

$$[I_r] = [J_{rr}]^{-1} ([E_r] - [J_{rr}][I_l]) \quad (2.56)$$

โดยที่ $[E_l], [I_l]$ คือ แรงดันและกระแสก่อนเกิดความผิดพลาดที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง (Local substation)

$[I_r]$ คือ กระแสก่อนเกิดความผิดพลาดจากแหล่งกำเนิดไกล (Remote source)

$[J]$ คือ เมตริกซ์ของบัสอิมพีแดนซ์ของระบบก่อนเกิดความผิดพลาดโดยไม่รวมอิมพีแดนซ์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางและแหล่งกำเนิดไกล

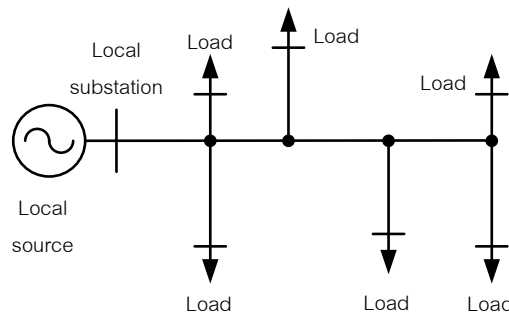
$[J_{rr}]$ คือ เมตริกซ์ย่อยของ $[J]$ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ของสถานีไฟฟ้าต้นทาง

$[J_{rl}]$ คือ เมตริกซ์ย่อยของ $[J]$ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์ถ่ายโอนระหว่างสถานีไฟฟ้าต้นทางและแหล่งกำเนิดไกล

กระบวนการนี้จะหาตำแหน่งผิดพลาดไปทุกๆสายย่อยจนครบทุกสายย่อย ซึ่งกระบวนการของแต่ละท่อนนั้นจะไม่มีกระบวนการวนซ้ำ ทำให้กระบวนการนี้ใช้เวลาสั้นๆ โดยถ้าค่าตำแหน่งผิดพลาด (d) ที่ได้มีค่าระหว่าง 0 กับ 1 เปอรเซ็นต์ แสดงว่า เกิดความผิดพลาดบนสายย่อยนั้น

2.1.4.2 วิธีการที่พิจารณาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแหล่งเดียว

วิธีการนี้จะต่างจากวิธีที่พิจารณาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่งตรงที่ไม่จำเป็นต้องหาค่าแรงดันก่อนเกิดความผิดพลาดที่โหนดต่างๆ และไม่จำเป็นต้องใช้อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดอีกด้วย ในที่นี่จะแสดงการหาตำแหน่งผิดพลาดเฉพาะความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น ภาพที่ 2.13 แสดงวงจรที่สายป้อนแบบเรเดียลที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแหล่งเดียว



ภาพที่ 2.13 วงจรสายป้อนตัวอย่างที่มีแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว

กำหนดให้โหนดที่สถานีไฟฟ้า คือ k_1, k_2 และ k_3 และเฟสที่เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นที่โหนด k_1 และกำหนดให้ $[Z]$ เป็นเมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์บัสของระบบที่รวมโหนดที่เกิดความผิดพลาด แต่ไม่รวมความต้านทานผิดพลาด และไม่รวมอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด สมการที่ (2.48) (2.49) และ (2.50) ยังสามารถใช้ได้ แต่ค่าคงที่ต่างๆจะไม่เท่ากัน เนื่องจากวิธีที่พิจารณาแหล่งกำเนิดสองแหล่งนั้นจะรวมอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดเข้าไปด้วย กำหนดให้ $[W]$ หมายถึง เมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์บัสที่ได้รวมความต้านทานผิดพลาดเข้าไปแล้ว หลังจากทีรวม R_{F1} เข้าไปที่โหนด r_1 แล้วจะได้ว่า

$$[W] = [Z] - \frac{Z(:, r_1)[Z(:, r_1)]^T}{Z_{r_1 r_1} + R_{F1}} \quad (2.57)$$

โดยที่ $Z(:, r_1)$ เป็นหลักที่ r_1 ของ $[Z]$

$[T]$ หมายถึง ทรานสโพสของเมตริกซ์หรือเวกเตอร์

ดังนั้น แรงดันที่โหนด k_1 ที่สถานีไฟฟ้าขณะเกิดความผิดพลาดจะได้ว่า

$$E_{k1} = W_{k1k1}I_{k1} + W_{k1k2}I_{k2} + W_{k1k3}I_{k3} \quad (2.58)$$

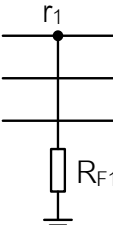
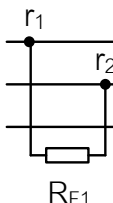
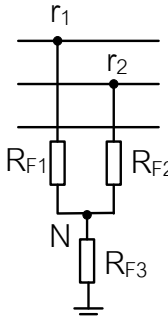
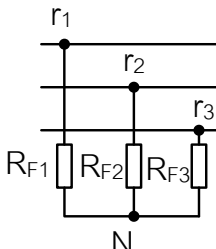
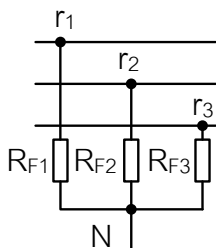
โดยที่ I_{k1}, I_{k2} และ I_{k3} คือ กระแสขณะเกิดความผิดพลาดที่วัดได้ที่แหล่งกำเนิดต้นทาง

จากสมการที่ (2.57) และ (2.58) จะได้ว่า

$$E_{k1} = Z_{k1k1}I_{k1} + Z_{k1k2}I_{k2} + Z_{k1k3}I_{k3} - \left(\frac{1}{Z_{r1r1} + R_{F1}} \right) \cdot (Z_{k1r1}^2 I_{k1} + Z_{k1r1}Z_{k2r1}I_{k2} + Z_{k1r1}Z_{k3r1}I_{k3}) \quad (2.59)$$

เมื่อแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสมการ (2.59) แล้วแก้สมการจะสามารถหาค่าตำแหน่งผิดพลาดได้ ตารางที่ 2.8 แสดงรูปวงจรสมมูลของความผิดพลาดของความผิดพลาดทุกประเภทที่เกิดขึ้นบนสายย่อยหนึ่งๆ และตารางที่ 2.9 แสดงข้อดี ข้อเสียของกระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดโดยวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์

ตารางที่ 2.8 รูปวงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ

| ประเภทความผิดพลาด | วงจรสมมูลตามประเภทความผิดพลาด |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| หนึ่งเฟสลงดิน (AG) |  |
| เฟสต่อเฟส (AB) |  |
| เฟสต่อเฟสลงดิน (ABG) |  |
| สามเฟส (ABC) |  |
| สามเฟสลงดิน (ABCG) |  |

ตารางที่ 2.9 สรุปข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการหาตำแหน่งผิดพร่องโดยวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์

| วิธีการที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์วิธีการต่างๆ | ข้อดี | ข้อเสีย |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| วิธีการที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบลำดับ | <ul style="list-style-type: none"> ● สามารถหาตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความผิดพร่องได้ทั้งหมด | <ul style="list-style-type: none"> ● ไม่สามารถระบุสายย่อยที่เกิดความผิดพร่องที่แท้จริงได้ หรือ ตำแหน่งผิดพร่องที่ได้มีหลายตำแหน่ง ● ตำแหน่งผิดพร่องที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากได้ละเอียดกระแสไหล ● ใช้เวลานานในการระบุตำแหน่งผิดพร่อง |
| วิธีการที่วิเคราะห์โดยใช้ส่วนประกอบเฟส | <ul style="list-style-type: none"> ● สามารถหาตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความผิดพร่องได้ทั้งหมด | <ul style="list-style-type: none"> ● ไม่สามารถระบุสายย่อยที่เกิดความผิดพร่องที่แท้จริงได้ หรือ ตำแหน่งผิดพร่องที่ได้มีหลายตำแหน่ง ● ใช้เวลานานในการระบุตำแหน่งผิดพร่อง |
| วิธีการที่วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง | <ul style="list-style-type: none"> ● สามารถระบุตำแหน่งผิดพร่องที่ถูกต้องที่สุดได้ ● มีความคลาดเคลื่อนในการหาตำแหน่งผิดพร่องเนื่องจากละเอียดกระแสไหลที่เฟสเกิดความผิดพร่อง | <ul style="list-style-type: none"> ● ไม่สามารถระบุสายย่อยที่เกิดความผิดพร่องที่แท้จริงได้ หรือ ตำแหน่งผิดพร่องที่ได้มีหลายตำแหน่ง |
| วิธีการวิเคราะห์โดยใช้บัสอิมพีแดนซ์แมตริกซ์ | <ul style="list-style-type: none"> ● สามารถหาตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความผิดพร่องได้ทั้งหมด ● ใช้เวลาน้อยในการระบุตำแหน่งผิดพร่อง | <ul style="list-style-type: none"> ● ไม่สามารถระบุสายย่อยที่เกิดความผิดพร่องที่แท้จริงได้ หรือ ตำแหน่งผิดพร่องที่ได้มีหลายตำแหน่ง |

2.2 วิธีการใช้การเคลื่อนที่ของสัญญาณและส่วนประกอบความถี่สูง [9,10]

วิธีการนี้จะใช้หลักการที่ว่า ขณะเกิดความผิดพลาดนั้นจะเกิดส่วนประกอบความถี่สูงขึ้นในสัญญาณกระแสและแรงดันเคลื่อนที่ออกจากจุดเกิดความผิดพลาด ไปที่จุดต่างๆของวงจร ซึ่งอาจจะใช้กับการตรวจจับเวลาในการเคลื่อนที่ของสัญญาณความถี่สูง ทำให้สามารถนำมาระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ [9] ซึ่งส่วนประกอบความถี่สูงนี้จะถูกแยกออกมาด้วยการกระบวนการทางสัญญาณ โดยส่วนใหญ่จะใช้การแปลงแบบเวฟเล็ต (Wavelet transform) ข้อเสียของวิธีนี้คือ ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณสูง (High sampling rate) และต้องมีอุปกรณ์สื่อสารเพื่อส่งข้อมูลระหว่างจุดตรวจจับสัญญาณต่างๆ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ข้อดีของวิธีนี้คือ มีความแม่นยำในการหาตำแหน่งผิดพลาดสูง

2.3 วิธีการใช้ฐานความรู้ [11, 12]

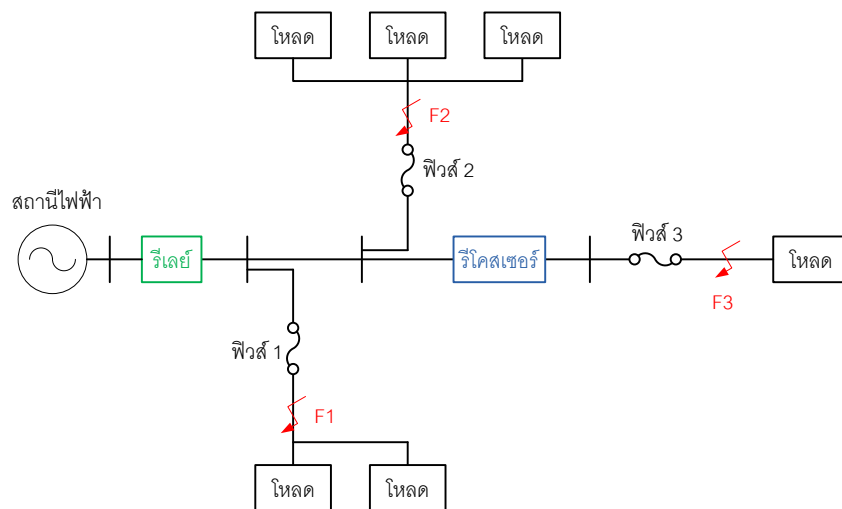
วิธีการนี้เป็นการใช้กระบวนการอัจฉริยะเทียม (Artificial intelligence) ต่างๆ[11] เช่น โครงข่ายสมองเทียม(Neural network) ตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy logic) สถิติ (Statistic) และวิธีการทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ในการระบุตำแหน่งผิดพลาด เนื่องจากวิธีนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกได้ ทำให้ข้อมูลทางด้านขาเข้าของวิธีนี้เป็นได้หลายชนิด เช่น ขนาดกระแส ขนาดแรงดัน กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าปรากฏ สถานะของรีเลย์ สถานะเซอร์กิตเบรกเกอร์ รูปคลื่นแรงดัน เป็นต้น หรืออาจจะไม่ต้องใช้กระบวนการอัจฉริยะเทียม แต่มีฐานข้อมูล (Database) ของระบบ ข้อมูลนี้อาจจะเป็นแรงดันตกขณะเกิดความผิดพลาดที่เก็บจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตหรือเก็บจากการจำลองด้วยโปรแกรมต่างๆ [12] เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นจริงในระบบ ก็นำค่าแรงดันตกนี้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อระบุตำแหน่งผิดพลาด ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถหาคำตอบได้เร็ว ข้อเสียคือ ต้องมีการฝึก (Train) เพื่อที่จะสร้างกระบวนการระบุตำแหน่งจากข้อมูลขาเข้าต่างๆ หรือสร้างฐานข้อมูลเก็บไว้ โดยที่กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดหรือฐานข้อมูลหนึ่งๆจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับวงจรหนึ่งๆ เมื่อวงจรไฟฟ้าเปลี่ยน จึงต้องทำการฝึกใหม่ (Retrain) เพื่อสร้างกระบวนการระบุตำแหน่งหรือฐานข้อมูลใหม่ ข้อเสียอีกข้อหนึ่งคือ ขั้นตอนการหาคำตอบของวิธีนี้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนจึงยากต่อการแก้ไขปรับปรุงเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาด

2.4 วิธีการผสมผสาน [13,14]

เนื่องจากวิธีต่างๆมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน การนำวิธีการต่างๆมาผสมผสานกันจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดได้ เนื่องจากวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์เป็นวิธีที่ไม่ต้องการอุปกรณ์เพิ่มเติมในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพลาด ทำให้ประหยัด และกระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดนั้นไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย แต่ข้อเสีย คือ จะได้คำตอบหลายคำตอบ ดังนั้น ในที่นี้จึงจะขอแสดงวิธีการตัดคำตอบที่ผิด เพื่อหาตำแหน่งผิดพลาดที่น่าจะถูกต้องที่สุด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

1) การใช้รูปคลื่นของกระแสขณะเกิดความผิดพลาด [13]

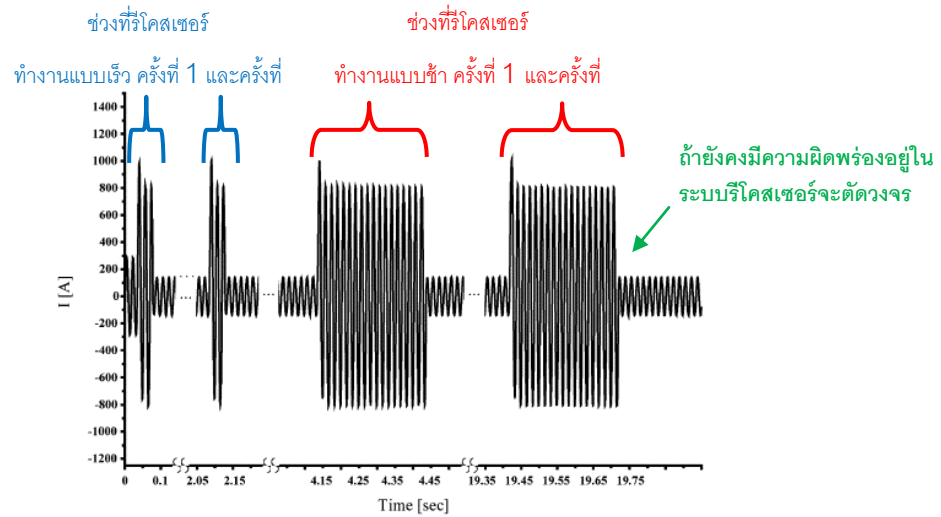
เนื่องจากรูปคลื่นของกระแสขณะเกิดความผิดพลาดจะมีลักษณะเฉพาะตัวที่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้องกันหลักและอุปกรณ์ป้องกันรองในระบบ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีโคสเซอร์ ฟิวส์ เป็นต้น ดังนั้น การพิจารณารูปคลื่นของกระแสขณะเกิดความผิดพลาดจึงสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพลาดเพิ่มเติมได้ ซึ่งแสดงตัวอย่าง ดังภาพที่ 2.14



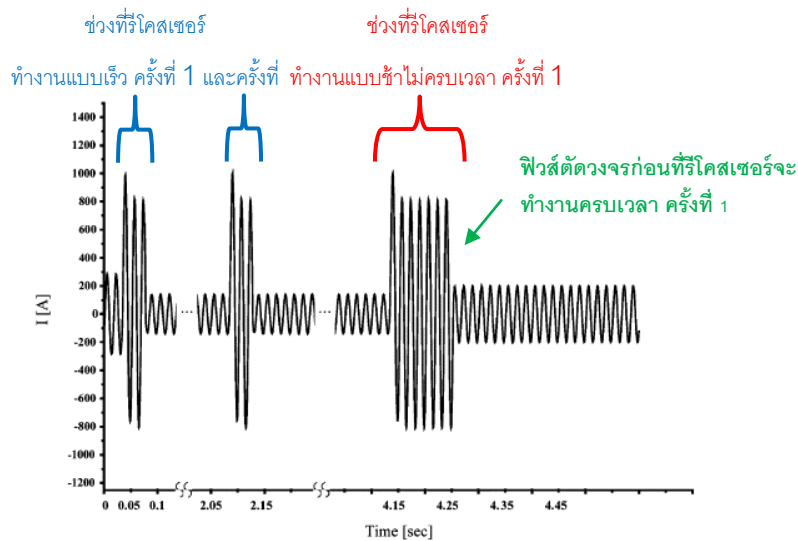
ภาพที่ 2.14 วงจรสายป้อนตัวอย่างการวิเคราะห์ความผิดพลาด

จากภาพที่ 2.14 เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นที่จุด F3 และใช้วิธีใช้ค่าอิมพีแดนซ์ในการหาตำแหน่งผิดพลาด จะได้คำตอบมา 3 ค่า ได้แก่ ตำแหน่ง F1, F2 และ ตำแหน่ง F3 เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ปรากฏของทั้ง 3 ตำแหน่ง ต่อต้นสายป้อนมีค่าเท่ากัน เมื่อพิจารณารูปคลื่นของกระแสขณะเกิดความผิดพลาด ถ้าเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง F3 อุปกรณ์ป้องกันหลักที่ทำหน้าที่ตัดวงจร คือ รีโคสเซอร์ ถ้าการทำงานของรีโคสเซอร์ถูกตั้งไว้แบบรวดเร็ว 2 ครั้ง แบบช้า 2 ครั้ง (2 fast

2 delay) รูปคลื่นของกระแสจะมีลักษณะดังภาพที่ 2.15 แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดที่จุด F1 อุปกรณ์ป้องกันหลักที่ทำหน้าที่ตัดวงจร คือ ฟิวส์ 1 จะทำให้ได้รูปคลื่นของกระแสดังภาพที่ 2.16 ดังนั้นการพิจารณารูปคลื่นของกระแสขณะเกิดความผิดพลาดสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพลาดที่แท้จริงได้



ภาพที่ 2.15 กระแสขณะกระบวนการกำจัดความผิดพลาดโดยรีโคสเซอร์



ภาพที่ 2.16 กระแสขณะกระบวนการกำจัดความผิดพลาดโดยฟิวส์

2) การใช้ข้อมูลของโหลดที่ถูกต้อง [13]

เมื่ออุปกรณ์ป้องกันหลักและอุปกรณ์รองมีการตั้งค่าการทำงานที่เหมือนกัน วิธีที่ 1 จะไม่สามารถจำแนกหาตำแหน่งผิดพลาดที่แท้จริงได้ เช่น เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง F1 และ F2

ในภาพที่ 11 อุปกรณ์ป้องกันหลัก คือ ฟิวส์ 1 และฟิวส์ 2 ตามลำดับ ถ้าฟิวส์ทั้งสองมีการตั้งค่าการทำงานที่เหมือนกัน ลักษณะของรูปคลื่นกระแสขณะเกิดความผิดปกติจะเหมือนกัน ข้อมูลของโหลดที่ถูกตัด (Interrupted load) สามารถเป็นอีกหนึ่งข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติได้ ถ้ากำหนดให้โหลดแต่ละตัวในภาพที่ 2.14 มีค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 10 kW เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติจุด F1 กำลังไฟฟ้าจริงที่หายไป ซึ่งที่สามารถตรวจวัดได้ที่ต้นสายป้อนจะเท่ากับ 20 kW เมื่อเกิดความผิดปกติจุด F2 กำลังไฟฟ้าจริงที่หายไปจะเท่ากับ 30 kW ดังนั้นจากข้อมูลของโหลดที่ถูกตัดออกไปขณะเกิดความผิดปกติจะสามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติที่แท้จริงได้ ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ถ้าขนาดของโหลดที่ถูกตัดไปมีค่าเท่ากัน จะทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งผิดปกติที่น่าจะถูกต้องที่สุดได้

ตารางที่ 2.10 สรุปข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการหาตำแหน่งผิดพร่องโดยใช้วิธีการต่างๆ

| วิธีการระบุตำแหน่งผิดพร่อง | ข้อดี | ข้อเสีย |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ | <ul style="list-style-type: none"> ● ไม่ต้องอุปกรณ์เพิ่มเติมในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพร่อง ทำให้ประหยัด ● กระบวนการหาตำแหน่งผิดพร่องนั้นไม่ซับซ้อน เข้าใจง่าย | <ul style="list-style-type: none"> ● ตำแหน่งผิดพร่องที่ได้จะมีได้หลายตำแหน่ง |
| วิธีการใช้ส่วนประกอบความถี่สูงและการเคลื่อนที่ของสัญญาณ | <ul style="list-style-type: none"> ● มีความแม่นยำในการหาตำแหน่งผิดพร่องสูง | <ul style="list-style-type: none"> ● ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณสูง และต้องมีอุปกรณ์สื่อสารเพื่อส่งข้อมูลระหว่างจุดตรวจจับสัญญาณต่างๆ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม ● มีความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ |
| วิธีการใช้ฐานความรู้ | <ul style="list-style-type: none"> ● สามารถหาคำตอบได้เร็ว | <ul style="list-style-type: none"> ● กระบวนการมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับวงจรหนึ่งๆ เมื่อวงจรไฟฟ้าเปลี่ยนจึงต้องทำการฝึกใหม่ เพื่อสร้างกระบวนการระบุตำแหน่งหรือฐานข้อมูลใหม่ ● ขั้นตอนการหาคำตอบของวิธีนี้นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนจึงยากต่อการแก้ไขปรับปรุงเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพร่อง ● ต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการฝึกเพื่อสร้างกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพร่อง |
| วิธีการผสมผสาน | <ul style="list-style-type: none"> ● มีความแม่นยำในการหาตำแหน่งผิดพร่องสูง | <ul style="list-style-type: none"> ● กระบวนการมีความยุ่งยาก ซับซ้อน เพราะเป็นการนำกระบวนการสามแรกมาผสมผสานกัน ● ข้อเสียนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการที่เลือกมาผสมกัน |

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบุตำแหน่ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อใหญ่ดังนี้ คือ 3.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3.2 อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3.3 กระบวนการคำนวณกำลังไหลแบบถอยหลังเดินหน้า สำหรับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล 3.4 วงจรสมมูลของสายย่อยและโหลด

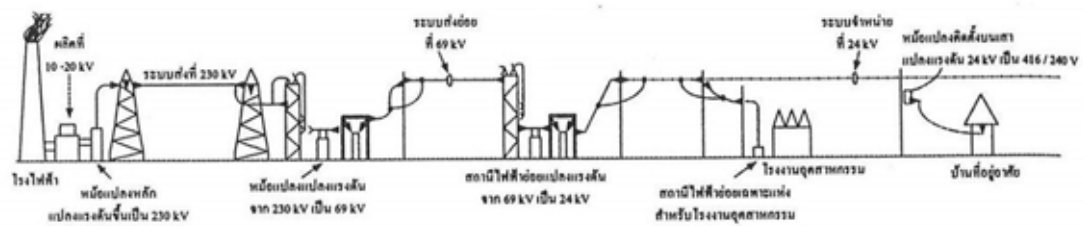
3.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า [15]

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทยอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ทำหน้าที่รับไฟจากระบบส่งไฟฟ้าซึ่งมีระดับแรงดันประมาณ 500 กิโลโวลต์ หรือ 230 กิโลโวลต์ ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ภาพที่ 3.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด เริ่มตั้งแต่ระบบผลิตไฟฟ้าไปจนถึงระบบจำหน่ายไฟฟ้า [15] โดยหน่วยงานที่รับผิดชอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะดูแลตั้งแต่ระบบสายส่งย่อย (Sub-transmission system) สายป้อนปฐมภูมิ (Primary feeder) สายป้อนทุติยภูมิ (Secondary feeder) รวมถึงการบริการลูกค้าของตนเอง แรงดันของระบบสายส่งย่อยจะอยู่ที่ 115 กิโลโวลต์ หรือ 69 กิโลโวลต์ จากนั้นสถานีไฟฟ้าย่อยจะแปลงแรงดันให้ต่ำลงแล้วส่งไปที่สายป้อนปฐมภูมิที่ระดับแรงดัน 12 หรือ 24 กิโลโวลต์สำหรับกฟน. และ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์สำหรับกฟภ. โดยสายป้อนปฐมภูมินี้จะจัดวางไปตามถนนหรือเส้นทางต่างๆ จากนั้นจึงใช้หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution transformer) ทำหน้าที่แปลงแรงดันลงให้เหมาะกับสายป้อนทุติยภูมิที่ระดับแรงดันประมาณ 416/240 โวลต์สำหรับกฟน. และ 400/230 โวลต์สำหรับกฟภ.

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นระบบย่อยๆ ได้อีก 3 ระบบ ดังนี้

3.1.1 ระบบส่งไฟฟ้าย่อย (Subtransmission system)

หน่วยงานที่รับผิดชอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า (กฟน.และกฟภ.) จะรับกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่จุดซื้อขายไฟฟ้าต่างๆ จากนั้นกฟน.และกฟภ.จะส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รับมาไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ ด้วยระบบส่งแรงดัน 115 กิโลโวลต์ หรือ 69 กิโลโวลต์ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในปัจจุบันนั้นกฟน.มีการส่งจ่ายที่แรงดัน 230 กิโลโวลต์ร่วมอยู่ด้วย



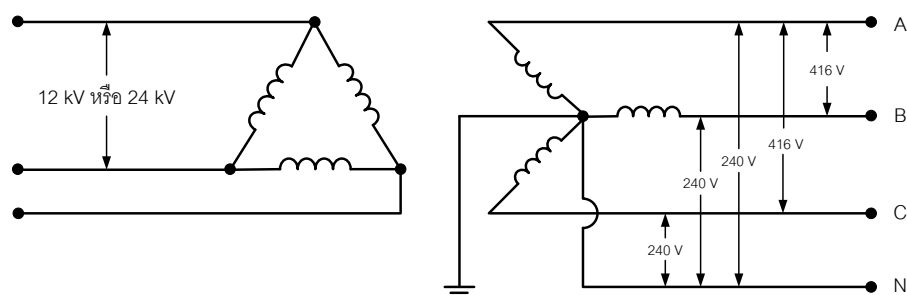
ภาพที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด

3.1.2 ระบบจำหน่าย (Distribution system)

กฟน. และ กฟภ. จะมีสถานีไฟฟ้าย่อยอยู่หลายแห่ง เพื่อที่จะแปลงแรงดัน 115 กิโลโวลต์ หรือ 69 กิโลโวลต์ ลงให้เป็นแรงดันที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายของแต่ละหน่วยงาน โดยกฟน. จะแปลงแรงดันลงให้เหลือ 24 กิโลโวลต์ หรือ 12 กิโลโวลต์ และกฟภ. จะแปลงแรงดันลงให้เหลือ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ทั้งนี้สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีขนาดใหญ่อาจมีหม้อแปลงกำลัง (Power transformer) จำนวน 2-4 ชุด โดยแต่ละชุดสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสายป้อนจำนวนหลายสายป้อน

3.1.3 ระบบการใช้กำลังไฟฟ้า (Utilization system)

สำหรับกฟน. ระบบการใช้กำลังไฟฟ้าหรือระบบจำหน่ายแรงต่ำนั้น จะติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในบริเวณที่จะใช้ไฟฟ้า โดยจะแปลงแรงดัน 24 กิโลโวลต์ หรือ 12 กิโลโวลต์ ไปเป็นระดับแรงดัน 416/240 3 เฟส 4 สาย แม้ว่าทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงจะมีพิกัดแรงดันเป็น 416/240 โวลต์ก็ตาม แต่การกฟน. ให้ใช้พิกัดแรงดัน (Nominal voltage) ของด้านแรงดันต่ำเป็น 380/220 โวลต์ 3 เฟส 4 สาย ภาพที่ 3.2 แสดงระบบการใช้กำลังของกฟน.

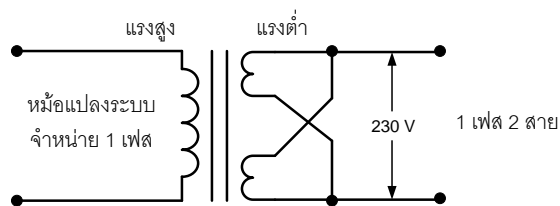


ภาพที่ 3.2 ระบบการใช้กำลังไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ของกฟน.

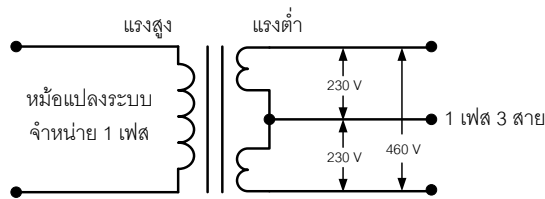
สำหรับกฟภ.จะมีระบบการใช้อำลังไฟฟ้าอยู่ 2 ระบบ

3.1.3.1 ระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 1 เฟส

จะมีทั้งแบบระบบ 1 เฟส 2 สาย 230 โวลท์ และแบบระบบ 1 เฟส 3 สาย 460/230 โวลท์ โดยแบบระบบ 3 สายนี้จะเป็นระบบเกาที่จ่ายไฟให้กับไฟถนน แต่ไม่ได้จ่ายให้กับบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ภาพที่ 3.3 แสดงวงจรของระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย ของกฟภ.และภาพที่ 3.4 แสดงวงจรของระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 1 เฟส 3 สาย ของ กฟภ.



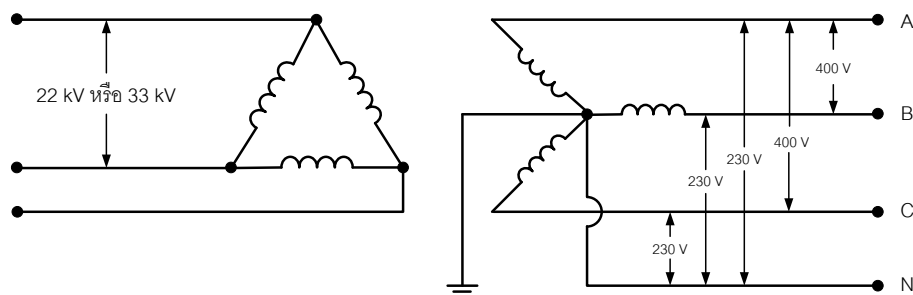
ภาพที่ 3.3 ระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย ของกฟภ.



ภาพที่ 3.4 ระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 1 เฟส 3 สาย ของกฟภ.

3.1.3.2 ระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

ระบบนี้มีแรงดันมาตรฐาน คือ 400/230 โวลท์ ซึ่งใช้จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป ภาพที่ 3.5 แสดงวงจรของระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ของกฟภ.



ภาพที่ 3.5 ระบบการใช้อำลังไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ของกฟภ.

3.1.4 สถานีไฟฟ้าย่อย (Distribution substation)

สถานีไฟฟ้าย่อยเป็นสถานีกกลางที่รับกำลังไฟฟ้าจากสายส่ง เพื่อลดแรงดันและจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อไปสู่ระบบจำหน่าย สำหรับหน้าที่และจุดประสงค์ของการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าซึ่งรวมทั้งสถานีไฟฟ้าต้นทางและสถานีไฟฟ้าย่อยมีดังนี้

- 1) เป็นสถานีเปลี่ยนระดับแรงดัน
- 2) เป็นสถานีควบคุมแรงดันในระบบให้มีค่าคงที่ตามความต้องการ
- 3) สถานีเชื่อมระบบส่งและระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า ในการตัดวงจรออกจากระบบ หรือนำเข้าสู่ระบบ
- 4) เป็นสถานีวัดปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า
- 5) เป็นสถานีเชื่อมโยงระบบสื่อสาร (และการป้องกันระบบไฟฟ้า)

โดยทั่วไปสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าดังต่อไปนี้

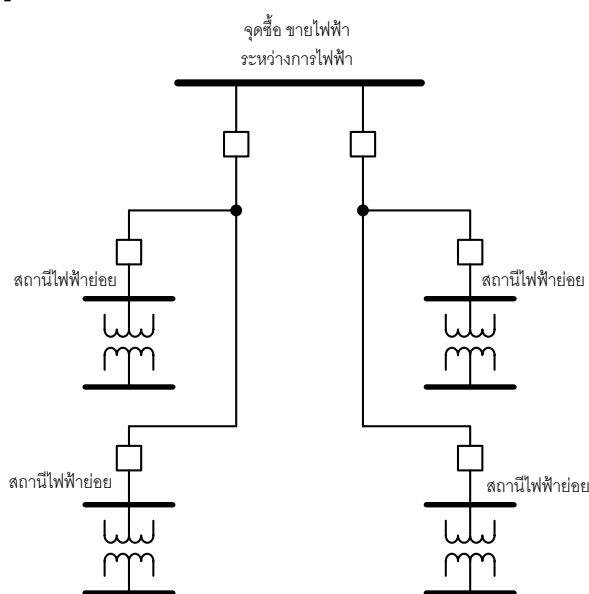
- 1) หม้อแปลงกำลัง (Power transformer)
- 2) เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)
- 3) สวิตช์ตัดตอน (Disconnecting switch)
- 4) บัส (Bus)
- 5) หม้อแปลงกระแส (Current transformer)
- 6) หม้อแปลงแรงดัน (Voltage transformer)
- 7) คาปาซิเตอร์ต่อขนาน (Shunt capacitor)
- 8) ระบบต่อลงดิน (Grounding system)
- 9) เครื่องล่อฟ้า (Lightning arrester)
- 10) รีเลย์ป้องกันและระบบควบคุม (Protective relays and control system)
- 11) กักตักสัญญาณสื่อสาร (Line traps)
- 12) แบตเตอรี่ (Station batteries)
- 13) อุปกรณ์หรือเครื่องมืออื่นๆ (Other apparatus)

3.1.5 การจัดเรียงวงจรสายส่งไฟฟ้าย่อย

การจัดเรียงวงจรสายส่งย่อยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเรเดียล (Radial) และแบบวงรอบ (Loop) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.5.1 ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบเรเดียล

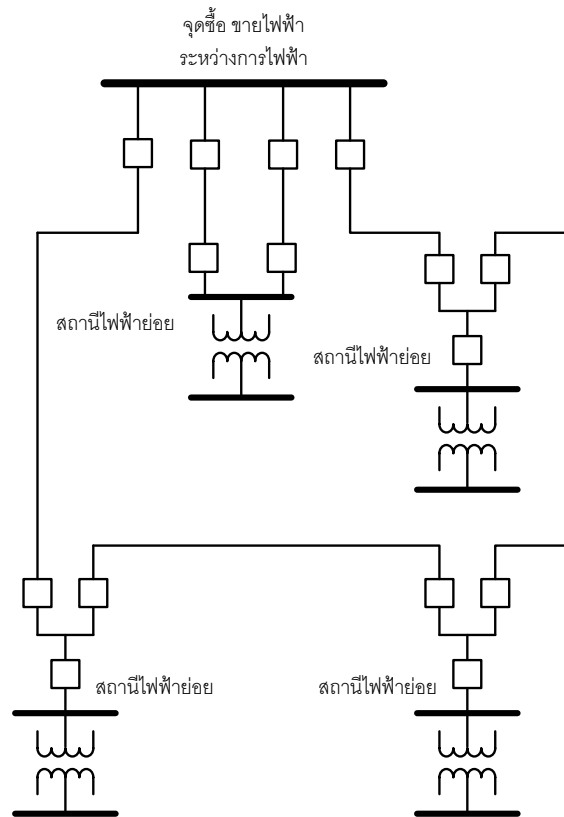
วงจรรองสายส่งของระบบเรเดียลจะเริ่มจากบัสของจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าและสิ้นสุดที่สถานีไฟฟ้าย่อย ระบบเรเดียลเป็นระบบที่ง่ายและมีราคาของการลงทุนก่อสร้างสายส่งเริ่มต้นต่ำ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่สายส่งย่อยสายใดสายหนึ่ง สถานีไฟฟ้าย่อยที่ต่อจากสายส่งย่อยนั้นก็จะไม่สามารถรับไฟฟ้าได้ ภาพที่ 3.6 แสดงวงจรรองสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบเรเดียลที่มีจุดซื้อขายไฟฟ้าต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อย 4 สถานี



ภาพที่ 3.5 วงจรรองสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบเรเดียล

3.1.5.2 ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบวงรอบ

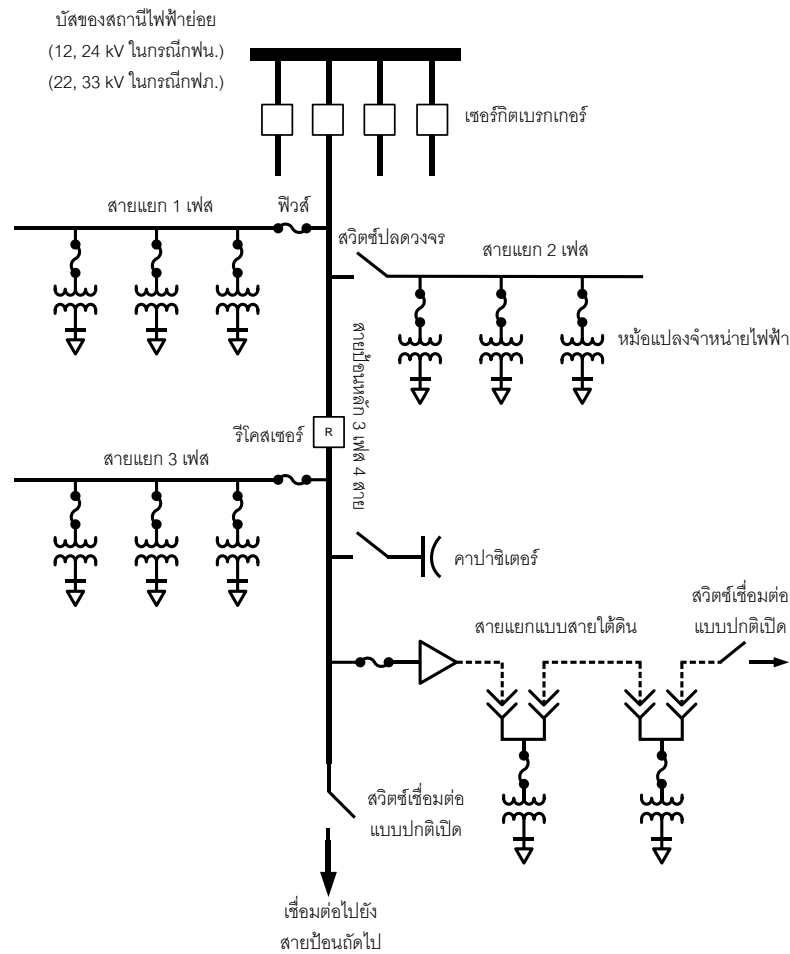
วงจรรองสายส่งในระบบแบบวงรอบจะเริ่มจากบัสของจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าและจะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่สถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ จากนั้นจะกลับสู่บัสของจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าเดิม ข้อดีของระบบวงรอบ คือ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สายส่งย่อยสายใดสายหนึ่ง สถานีไฟฟ้าย่อยทั้งหมดยังสามารถรับไฟฟ้าได้ เนื่องจากยังมีสายส่งย่อยอีกสายหนึ่งที่เชื่อมกับสถานีไฟฟ้าย่อยอื่นหรือเชื่อมกับจุดซื้อขายระหว่างการไฟฟ้าอยู่ การตรวจสอบและแก้ไขความผิดปกติสามารถทำได้โดยการปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นทางและปลายทางของสายส่งย่อยที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบ การจัดเรียงวงจรมแบบนี้จะให้ความน่าเชื่อถือสูงกว่าการจัดเรียงวงจรมแบบเรเดียล ภาพที่ 3.7 แสดงวงจรรองสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบวงรอบที่มีจุดซื้อขายไฟฟ้าต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อย 4 สถานี



ภาพที่ 3.6 วงจรระบบส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแบบวงรอบ

3.1.6 การจัดเรียงวงจรสายป้อนปฐมภูมิ

สายป้อนปฐมภูมิ คือ สายไฟที่ต่ออยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยกับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า มีระดับแรงดัน 12 หรือ 24 กิโลโวลท์ สำหรับกฟน. และ 22 หรือ 33 กิโลโวลท์สำหรับกฟภ. ซึ่งจะประกอบไปด้วยสายป้อนหลัก (Main feeder) ที่ปกติจะเป็นวงจร 3 เฟส 4 สาย จากนั้นจะมีสายแยก (Laterals) ต่อกออกไปจากสายป้อนหลัก และสายแยกย่อย (Sublaterals) ต่อกออกไปจากสายแยกอีกทีหนึ่ง ภาพที่ 3.8 แสดงวงจรสายป้อนตัวอย่างที่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ต้นสายป้อนหรือต้นสถานีไฟฟ้าย่อย มีรีโคสเซอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ต่ออยู่ตรงกลางของสายป้อนหลัก เพื่อจำกัดพื้นที่ไฟฟ้าดับเมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้น ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันทั้งสองจะอธิบายในภายหลัง และมีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ที่สายป้อนหลักเพื่อปรับปรุงแรงดันและลดกำลังสูญเสียในสายป้อน สำหรับพื้นที่ที่ต้องการความน่าเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าสูง อาจจะใช้เดินสายป้อนด้วยระบบเคเบิลใต้ดิน (Underground cable) วงจรสายป้อนปฐมภูมิสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้



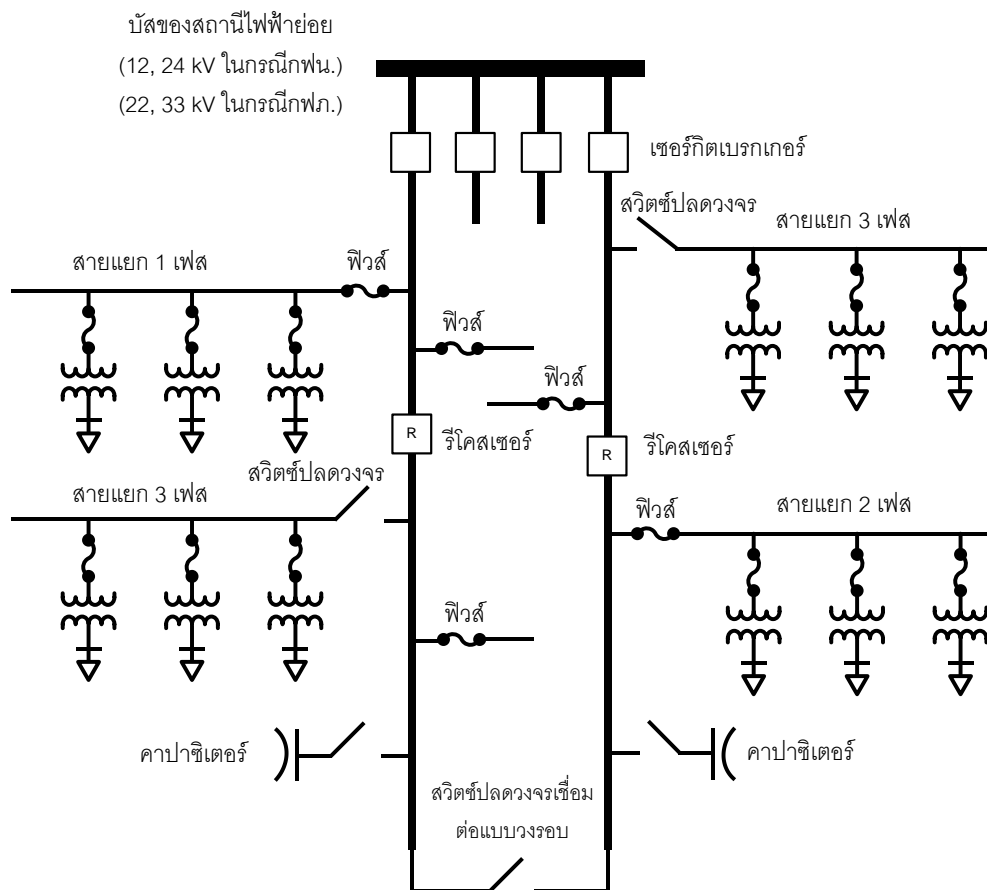
ภาพที่ 3.7 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

3.1.6.1 สายป้อนแบบเรเดียล

ลักษณะการจัดเรียงวงจรแบบนี้จะไม่มี ความซับซ้อนและเป็นที่ยอมรับมากที่สุด สายป้อนหนึ่งๆนั้น จะต่ออยู่กับบัสของสถานีไฟฟ้าย่อยเพียงจุดเดียวเท่านั้น การจัดเรียงสายป้อนแบบนี้จะแสดงดังภาพที่ 3.7 โดยสวิตช์เชื่อมต่อ (Tie switch) ระหว่างสายป้อนจะทำงานแบบปกติเปิด ขนาดของกระแสในสายป้อนหลักนั้นจะมีความมากที่สุดที่ต้นสาย และมีค่าลดลงเรื่อยๆ จากต้นสายสู่ปลายสาย เนื่องจากกระแสไฟนั้นต้องจ่ายให้กับสายแยกและจุดต่อโหลดต่างๆ ความน่าเชื่อถือของลักษณะวงจรแบบนี้ต่ำเมื่อเทียบกับลักษณะวงจรอื่นๆ เพราะว่าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่สายป้อน เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นสายป้อนจะตัดวงจรทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดไม่ได้รับไฟ นอกเสียจากสายป้อนนั้นจะมีอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ ต่ออยู่ เช่น ฟิวส์ รีโคสเซอร์ เป็นต้น

3.1.6.2 สายป้อนแบบวงรอบ

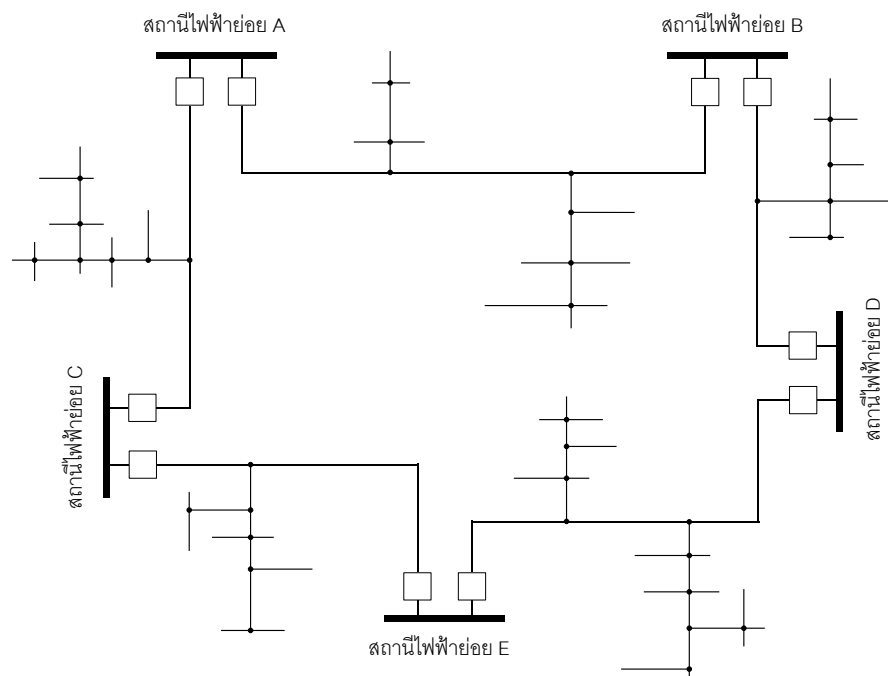
ลักษณะการจัดเรียงวงจรแบบนี้จะเริ่มต้นที่สายป้อนหนึ่งที่ต่อกับบัสของสถานีไฟฟ้าย่อย จากนั้นจึงจ่ายไฟให้โหลดของสายป้อนนั้นๆ แล้วกลับมาต่อกับอีกสายป้อนหนึ่งของสถานีไฟฟ้าย่อยเดิม โดยที่ลักษณะการจัดเรียงวงจรแบบนี้จะมีเบรกเกอร์เชื่อมต่อแบบวงรอบ (Loop tie breaker) หรือสวิตช์ปลดวงจรเชื่อมต่อแบบวงรอบ (Loop tie disconnection switch) ต่อกันอยู่ระหว่าง 2 สายป้อน โดยสวิตช์ปลดวงจรหรือเบรกเกอร์นี้จะทำงานแบบปกติปิด ความเชื่อถือของการจัดเรียงวงจรแบบนี้จะสูงกว่าแบบเรเดียล เพราะว่าโหลดต่างๆรับไฟมาจากสองสายป้อน ภาพที่ 3.9 แสดงวงจรสายป้อนปฐมภูมิแบบวงรอบ



ภาพที่ 3.8 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงรอบ

3.1.6.3 สายป้อนแบบเครือข่าย

การจัดเรียงวงจรแบบนี้จะเป็นการเชื่อมต่อกันของสายป้อนระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อย ทำให้ความน่าเชื่อถือของการจัดเรียงแบบนี้มีค่ามากกว่าสองแบบแรกมาก อย่างไรก็ตามการจัดเรียงดังกล่าวก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าสองแบบแรกเช่นกัน การจัดเรียงสายป้อนแบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมนักเนื่องจากต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง การปฏิบัติงานเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นมีความซับซ้อน อีกทั้งการจัดเรียงระบบจำหน่ายแบบเรเดียลและแบบวงรอบนั้นหากมีการปฏิบัติและการจัดการที่ดี จะมีความน่าเชื่อถือสูง และเป็นที่ยังพอใจแก่ลูกค้าเป็นส่วนใหญ่ได้ ภาพที่ 3.10 แสดงวงจรสายป้อนแบบเครือข่าย



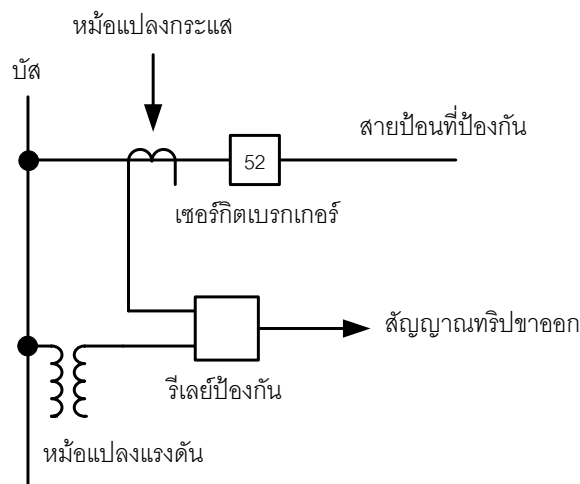
ภาพที่ 3.9 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเครือข่าย

3.2 อุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

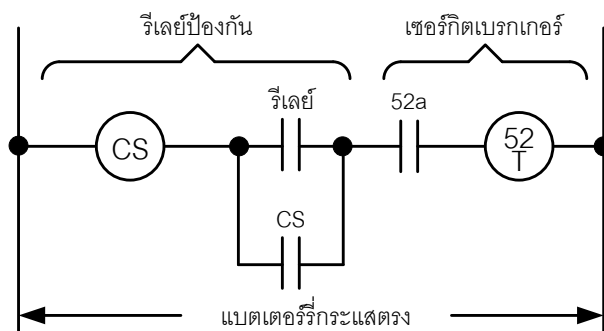
จากภาพที่ 3.8 จะเห็นว่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดวงจรที่ต้นสายป้อน คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ แต่ในระบบป้องกันทั้งหมด จะมีอุปกรณ์อื่นๆ ที่สำคัญที่ทำหน้าที่ตรวจจับและกำจัดความผิดปกติอีกหลายอย่าง ได้แก่ เครื่องแปลงสัญญาณ (หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน) รีเลย์ แบตเตอรี่ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์เปรียบเสมือนกล้ามเนื้อของระบบป้องกัน ทำหน้าที่กำจัดความผิดปกติออกจากระบบ รีเลย์เปรียบเสมือนสมอง

ของระบบป้องกัน ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติ นอกจากนี้อาจมีอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ที่ต้นสายป้อน ได้แก่ ฟิวส์และรีโคสเซอร์ เป็นต้น

รีเลย์จะตรวจจับค่ากระแสและแรงดันผ่านทางหม้อแปลงกระแส และหม้อแปลงแรงดัน ซึ่งหน้าที่ของหม้อแปลงทั้งสองตัว คือ ลดระดับกระแสและแรงดันของระบบจำหน่ายให้เหมาะสมกับระดับกระแสและแรงดันขาเข้าของรีเลย์ ภาพที่ 3.11 แสดงวงจรของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ที่ต้นสายป้อนหนึ่งๆ และภาพที่ 3.12 แสดงวงจรทรูปกระแสตรงของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งจากรูปคอนแทกทั้งหมดจะมีสถานะเปิดวงจรอยู่ในขณะที่คอนแทกหลักของเซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจรและจ่ายไฟให้กับสายป้อน คอนแทก 52a ของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นจะมีสถานะปิดวงจร เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบและรีเลย์ตรวจจับความผิดปกติได้ คอนแทกของรีเลย์จะปิดวงจรและทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทรูปคอยด์ (52T) ได้รับไฟตรง ซึ่งจะทำให้คอนแทกหลักของเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจร และตัดไฟของสายป้อนเพื่อกำจัดความผิดปกติออกไป



ภาพที่ 3.10 วงจรการต่อของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆที่ต้นสายป้อน [16]



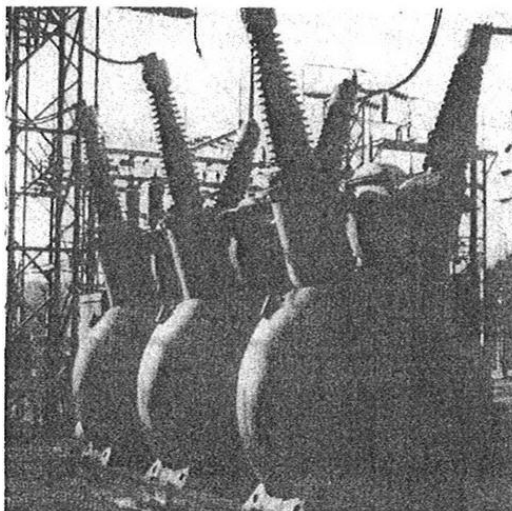
ภาพที่ 3.11 วงจรกระแสตรงของวงจรทรูปเซอร์กิตเบรกเกอร์ [16]

โดยปกติคอนแทคของรีเลย์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic relay) ไม่ได้ถูกออกแบบให้ทนรับกระแสทรูปคอยด์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จึงต้องมีคอนแทคเตอร์สวิตช์ (Contactor switch (CS)) ทำหน้าที่รับกระแสทรูปคอยด์นี้แทน ซึ่งถ้าเป็นรีเลย์ประเภทไม่เคลื่อนที่ (Solid state relay) จะไม่จำเป็นต้องมีคอนแทคเตอร์สวิตช์

3.2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ [17]

เป็นอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ปิดวงจร และเปิดวงจรไฟฟ้า โดยการแยกหรือต่อคอนแทค ในขณะที่ระบบมีสถานะเป็นปกติหรือสภาวะเกิดความผิดปกติ ในปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบแรงดันสูงพิเศษ (Extra high voltage) จะสามารถตัดกระแสผิดปกติได้ถึง 100 กิโลแอมแปร์ และใช้ได้กับระบบที่มีแรงดันสูงถึง 800 กิโลโวลต์ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะกำจัดความผิดปกติในขณะที่กระแสผิดปกติมีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าใกล้เคียงศูนย์ และสามารถที่จะกำจัดกระแสผิดปกติที่มีค่าใกล้เคียงศูนย์ครั้งแรกได้ แต่บ่อยครั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องกำจัดความผิดปกติที่กระแสผิดปกติใกล้เคียงศูนย์ครั้งที่สอง หรือครั้งที่สาม เนื่องจากในขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังกำจัดความผิดปกติ นั้น จะมีแรงดันย้อนกลับ (Recovery voltage) ที่ขั้วคอนแทคหลักของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ถ้าค่าแรงดันนี้สามารถเอาชนะความแข็งแรงของฉนวน (Dielectric strength) ได้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องรอให้กระแสผิดปกติมีค่าใกล้เคียงศูนย์ในครั้งถัดไป

เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นถูกออกแบบมาหลากหลายชนิด แต่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ถูกออกแบบมาเป็นชนิดแรกๆและยังคงใช้กันอยู่ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีถังน้ำมันและใช้คอนแทคหลักของเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นกลไกการทำงาน (Operating mechanism) น้ำมันทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างถังน้ำมันซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์โวลต์กับคอนแทคหลักที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของระบบ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ดับอาร์คขณะคอนแทคหลักเปิดวงจรเพื่อกำจัดความผิดปกติอีกด้วย ภาพที่ 3.13 แสดงเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดน้ำมันที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 138 กิโลโวลต์

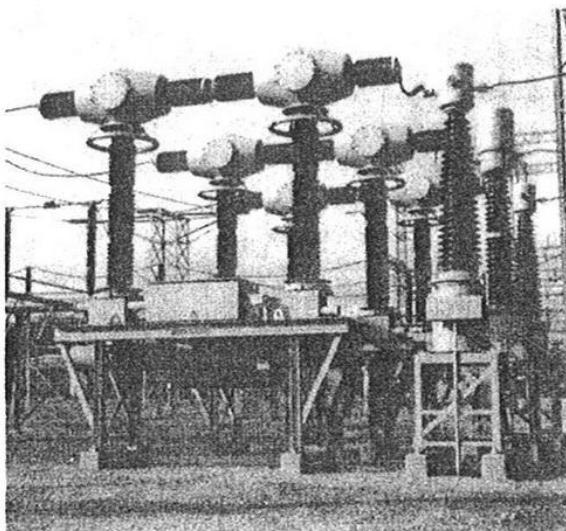


ภาพที่ 3.12 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดน้ำมันที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 138 กิโลโวลท์

ในทางปฏิบัติเมื่อระบบมีแรงดันที่สูงขึ้นจะไม่สามารถสร้างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้มีค่าความแข็งแรงของฉนวน (Dielectric strength) ที่เพียงพอได้ และเพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์มีคุณสมบัติเฉพาะ (Characteristic) ที่หลากหลาย ฉนวนที่ใช้ในเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงมีหลายชนิด เช่น น้ำมัน อากาศ แก๊สหรือฉนวนของแข็ง เป็นต้น มีตัวดับอาร์คหลายชนิด เช่น น้ำมัน แก๊ส อากาศหรือสูญญากาศ เป็นต้น และมีกลไกการทำงานที่หลายแบบ เช่น ใช้ขดลวดอิมพัลส์ (Impulse coil) ใช้ขดลวดโซลินอยด์ ใช้มอเตอร์สปริงอัดอากาศ (Spring motor pneumatic) หรือใช้มอเตอร์สปริงไฮดรอลิก (Spring motor hydraulic) เป็นต้น

หนึ่งในตัวแปรที่สำคัญเพื่อบ่งบอกลักษณะจำเพาะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Specification of a circuit breaker) คือ ตัวดับอาร์ค ซึ่งตัวดับอาร์คคือน้ำมันนั้นไม่ต้องการพลังงานจากกลไกการทำงาน แต่จะได้รับพลังงานโดยตรงจากการเกิดอาร์คเอง ในขณะที่ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur hexafluoride ; SF₆) ต้องการพลังงานภายนอกและจะทำงานได้เมื่อมีความดันสูง หรือมีการระเบิดของแก๊สหรือการระเบิดของอากาศขณะกำจัดความผิดพลาด เมื่อพิจารณาถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้น้ำมันจะสร้างปัญหามากกว่า เช่น สร้างเสียงรบกวน ทำให้พื้นดินสั่นสะเทือนขณะกำจัดความผิดพลาด สร้างปัญหาเรื่องไฟไหม้ นอกจากนี้ยังสร้างมลพิษทางน้ำ แต่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ SF₆ จะมีปัญหาทางเสียงอย่างเดียวและสามารถที่จะป้องกันได้โดยการสร้างกรอบป้องกันพิเศษ (Special shielding) สำหรับการเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นต้องคำนึงถึงราคาเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้น้ำมันจะมีราคาถูก แต่อายุ

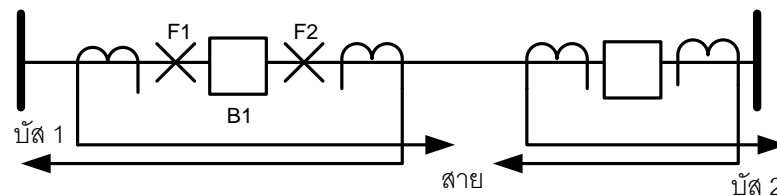
ราคาอาจจะเปลี่ยนแปลงไป ภาพที่ 3.14 แสดงเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด SF₆ ที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 345 กิโลโวลท์



ภาพที่ 3.13 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิด SF₆ ที่มีพิกัดแรงดันเท่ากับ 345 กิโลโวลท์

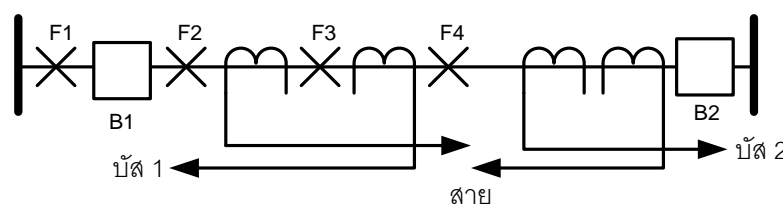
การออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ และส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันอย่างมาก คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังมีไฟ (Live tank) เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบนี้จะมีตัวถังที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของคอนแทคหลัก ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีฉนวนกันระหว่างตัวถังและคอนแทคหลักอีกต่อไป ซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ถูกออกแบบมาก่อนหน้านี้ คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังไม่มีไฟ (Dead tank) จะมีหม้อแปลงกระแสอยู่ที่สองด้านของคอนแทคหลัก ทำให้เหมาะสำหรับการกำหนดให้หม้อแปลงกระแสทั้งสองตัวมีการทำงานที่ป้องกันพื้นที่ที่ซ้อนทับกันได้ (Overlapping zones of protection) แต่เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังมีไฟนั้น อุปกรณ์ทั้งอุปกรณ์จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของสายไฟ ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบนี้ไม่สามารถทำงานกับหม้อแปลงกระแสที่มีศักย์ไฟฟ้าของขดลวดด้านที่สอง (Secondary winding) เท่ากับศูนย์โวลต์ได้ ทำให้ต้องออกแบบให้หม้อแปลงมีระบบฉนวนเป็นของตัวเอง และเป็นอุปกรณ์แยกออกจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ การที่จะใช้หม้อแปลงกระแสสองตัวเพื่อที่จะให้อยู่ทั้งสองด้านของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แล้วสามารถป้องกันพื้นที่ที่ซ้อนทับกันนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากจะใช้ค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงกระแสแค่หนึ่งตัว ที่มีขดลวดด้านที่สองหลายอันแทน การจัดวางหม้อแปลงกระแสที่ต่างกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งสองแบบนี้ ทำให้พื้นที่การป้องกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งสองนั้นต่างกัน จากภาพที่ 3.15 เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังไม่มีไฟที่มีหม้อแปลงกระแสตรวจจับความผิดปกติของบัสและที่สาย ทำให้ได้พื้นที่การป้องกันที่ซ้อนทับกันที่เซอร์กิตเบรก

เกอร์ ถ้าเกิดความผิดปกติที่ F_1 ระบบการป้องกันทั้งสองจะทำงาน รีเลย์ความแตกต่างที่บัส 1 (Bus differential relay) จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ B_1 และเซอร์กิตเบรกเกอร์อื่นๆ ที่ป้องกันบัส 1 อยู่เปิดวงจร ความผิดปกติก็จะถูกกำจัดไป แต่ระบบการป้องกันสายจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ B_1 และเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านไกล (Remote station) เปิดวงจรด้วย ซึ่งเป็นการทำงานที่ไม่จำเป็น แต่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ถ้ามีจุดต่อโหลดอยู่ระหว่างสาย โหลดเหล่านี้จะถูกตัดไฟไป ถ้าเกิดความผิดปกติที่จุด F_2 ระบบป้องกันที่บัสและที่สายจะทำงานเหมือนเดิม สำหรับความผิดปกติที่จุดนี้นั้น การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์อื่นๆ ที่ป้องกันบัส 1 เปิดวงจรมันไม่จำเป็น แต่การเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านไกลนั้นจำเป็น



ภาพที่ 3.14 การป้องกันบัสและสายของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังที่ไม่มีไฟ

ภาพที่ 3.16 แสดงเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังมีไฟ สำหรับความผิดปกติที่จุด F_1 ระบบป้องกันบัส 1 เท่านั้นที่เห็นความผิดปกตินี้ ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ B_1 และเบรกเกอร์อื่นๆ ที่ป้องกันบัส 1 เปิดวงจร สำหรับความผิดปกติที่จุด F_2 การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ป้องกันบัส 1 นั้นเปิดวงจรจะไม่สามารถกำจัดความผิดปกตินี้ได้ เพราะไฟฟ้ายังสามารถมาจากเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านไกลได้ และเนื่องจากระบบการป้องกันสายไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ ทำให้ความผิดปกติที่จุดนี้เป็นจุดบอด สำหรับความผิดปกติที่จุด F_3 และ F_4 ระบบป้องกันสายทั้งสองจะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ B_1 และ B_2 เปิดวงจรและกำจัดความผิดปกติได้ สำหรับความผิดปกติที่จุด F_3 นั้น การเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ต่างๆ ที่อยู่บัส 1 นั้นไม่จำเป็น



ภาพที่ 3.15 การป้องกันบัสและสายของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบตัวถังที่มีไฟ

3.2.2 รีเลย์ [16, 17, 18]

รีเลย์เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ตรวจจับความผิดปกติของสัญญาณเข้า ซึ่งสัญญาณเข้านี้จะนำมาจากตัวแปลงสัญญาณ (Transducers) เช่น หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน และสวิตช์คอนแทคต่างๆ ถ้าเกิดความผิดปกติของสัญญาณเข้า รีเลย์จะทำการสั่งการเปิดหรือปิดคอนแทคต่างๆ เพื่อเริ่มต้นการทำงานอื่นๆต่อไป เช่น การเริ่มต้นให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจร เป็นต้น

ประเภทของรีเลย์นั้นมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับว่าจะจำแนกประเภทอย่างไร ซึ่งโดยทั่วไปรีเลย์จะถูกจำแนกตามลักษณะการทำงาน จำแนกประเภทตามโครงสร้างของรีเลย์ จำแนกตามประเภทสัญญาณเข้า เป็นต้น ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างประเภทของรีเลย์ต่างๆ ตามการจำแนกที่ต่างกัน

- 1) จำแนกตามลักษณะการทำงาน
 - การป้องกัน
 - การตรวจวัด
 - การควบคุม
 - อื่นๆ
- 2) จำแนกตามโครงสร้าง
 - ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)
 - ประเภทไม่เคลื่อนที่ (Static)
 - ประเภทคอมพิวเตอร์ (Computerised)
 - แบบไม่ใช่ไฟฟ้า เช่น ใช้ความร้อน ใช้ความดัน เป็นต้น
 - อื่นๆ
- 3) จำแนกตามสัญญาณเข้า
 - ใช้กระแส
 - ใช้แรงดัน
 - ใช้กำลังไฟฟ้า
 - ใช้ความถี่
 - อื่นๆ
- 4) จำแนกตามประเภทการป้องกัน
 - รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent relay)
 - รีเลย์แบบมีทิศทาง (Directional overcurrent relay)

- รีเลย์แบบระยะทาง (Distance relay)
 - รีเลย์ความแตกต่าง (Differential relay)
 - อื่นๆ
- 5) จำแนกตามตัวเลขสากล ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ จะถูกกำหนดด้วยตัวเลข
- 21 หมายถึง รีเลย์แบบระยะทาง (Distance relay)
 - 50 หมายถึง รีเลย์กระแสเกินแบบทันที (Instantaneous-overcurrent relay)
 - 51 หมายถึง รีเลย์กระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time-delay overcurrent relay)
 - 52 หมายถึง เซอร์กิตเบรกเกอร์
 - 87 หมายถึง รีเลย์ความแตกต่าง (Differential relay)
 - อื่นๆ

ในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดของรีเลย์ที่จำแนกตามโครงสร้างของรีเลย์เท่านั้น เริ่มต้นนั้น รีเลย์ทั้งหมดจะเป็นประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromechanical relays) จากนั้นรีเลย์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ (Static relays) ก็ถูกสร้างขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1970-1980 และในไม่กี่ปีต่อมานี้รีเลย์ที่ใช้ไมโครโพลีเซสเซอร์หรือเรียกอีกอย่างว่า รีเลย์ประเภทคอมพิวเตอร์ (Computer relays) ก็ถูกใช้มากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากรีเลย์ประเภทนี้ให้ความแม่นยำที่มากกว่า ขนาดที่เล็กลง ค่าอุปกรณ์และการติดตั้งที่น้อยกว่า และอื่นๆอีกมากมาย อย่างไรก็ตาม รีเลย์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้ายังคงถูกใช้อยู่ในปัจจุบัน

3.2.2.1 รีเลย์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromechanical relay)

รีเลย์ประเภทนี้ใช้กลไกทางไฟฟ้า แม่เหล็ก และเครื่องกลผสมกันในการทำงาน มีขดลวดคอยล์และคอนแทคต่างๆ อีกทั้งยังมีความทนทานแล่น่าเชื่อถืออีกด้วย รีเลย์ประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1) รีเลย์ชนิดใช้การดึงดูด (Attraction relays)

รีเลย์ชนิดนี้จะรับไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับก็ได้ ซึ่งจะทำงานโดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโลหะ เมื่อมีแรงดึงดูดการสนามแม่เหล็กที่ผลิตออกมาจากขดลวดคอยล์ รีเลย์ชนิดนี้จะมี 2 แบบ คือ รีเลย์แบบอาร์เมเจอร์ (Armature-type relay) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.17 รีเลย์แบบนี้ประกอบไปด้วยแผ่นโลหะที่จะเคลื่อนที่เข้าหาขดลวดคอยล์เมื่อมีแรงดึงดูด ซึ่งที่แผ่นโลหะนี้จะมีคอนแทคเคลื่อนที่ติดอยู่ โดยคอนแทคนี้จะเปิดหรือปิดขึ้นอยู่กับการออกแบบ อีกแบบคือ รีเลย์แบบโซลินอยด์ (Solenoid-type relay) แสดงดังภาพที่ 3.18 รีเลย์แบบนี้จะมีแกนของ

ถูกสูบอยู่ในขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งรีเลย์แบบนี้จะมีคอนแทคติดอยู่ที่ถูกสูบ แรงของการดึงดูดของรีเลย์ชนิดนี้มีค่าเท่ากับ

$$F = K_1 I^2 - K_2 \quad (3.1)$$

โดยที่ K_1 จะมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์ พื้นที่ว่างของอากาศ พื้นที่ประสิทธิผลของจรรยาแม่เหล็ก รีลัคแตนซ์ของจรรยาแม่เหล็ก และอื่นๆ

K_2 คือ แรงหน่วงเหนี่ยวที่เกิดจากสปริง

เมื่อรีเลย์อยู่ในสภาวะสมดุลแรงลัพธ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้ได้ว่า

$$K_1 I^2 = K_2 \quad (3.2)$$

และจะได้ว่า

$$I = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) จะเห็นว่ากระแสมีค่าคงที่ ดังนั้น ในการปรับจุดเริ่มต้นการทำงานของรีเลย์สามารถทำได้โดยการปรับค่าความหน่วงเหนี่ยวของสปริง หรือความต้านทานของวงจรโซลินอยด์ รีเลย์ชนิดนี้ใช้การดึงดูดจะไม่สามารถทำงานแบบหน่วงเวลาได้ ดังนั้นรีเลย์ชนิดนี้จะใช้กับการทำงานแบบทันทีทันใด (Instantaneous) เท่านั้น

2) รีเลย์ชนิดนี้ใช้การเคลื่อนที่ของขดลวดคอยล์ (Relays with moveable coils)

$$T = B l a N i \quad (3.4)$$

โดยที่ T คือ ทอร์ก

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

l คือ ความยาวของขดลวดคอยล์

a คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดคอยล์

N คือ จำนวนรอบของขดลวดคอยล์

i คือ กระแสในขดลวดคอยล์

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นว่าทอร์กจะแปรผันตรงกับกระแสในขดลวดคอยล์ และความเร็วของการเคลื่อนที่ที่สามารถควบคุมได้โดยการหน่วง (Damping) ซึ่งจะแปรผันตรงกับทอร์ก ทำให้ได้กราฟคุณสมบัติเฉพาะของรีเลย์เป็นแบบแปรผกผันกับเวลา แสดงดังภาพที่ 3.19

3) รีเลย์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction relays)

รีเลย์ชนิดนี้จะใช้ได้กับไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น หลักการทำงาน คือ การใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำให้ตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ ซึ่งตัวนำนี้ส่วนใหญ่ คือ จานหมุนหรือถ้วย รีเลย์ชนิดเหนี่ยวนำนี้ต้องใช้แหล่งกำเนิดฟลักซ์แม่เหล็กสองแหล่งเพื่อที่ส่วนที่เคลื่อนหมุนได้

พิจารณาภาพที่ 3.20 แสดงกระแสไฟฟ้าและแรงที่ตรงข้ามกันในรีเลย์ชนิดเหนี่ยวนำ โดยกำหนดให้

$$\Phi_1 = \Phi_{1\max} \sin \omega t \quad (3.5)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{2\max} \sin(\omega t + \theta) \quad (3.6)$$

$$i_{\phi 1} \propto \frac{d\Phi_1}{dt} \propto \cos(\omega t) \quad (3.7)$$

$$i_{\phi 2} \propto \frac{d\Phi_2}{dt} \propto \Phi_2 \cos(\omega t + \theta) \quad (3.8)$$

3.2.2.2 รีเลย์ประเภทไม่เคลื่อนที่ (Static relays)

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังได้ขยายตัวและเพิ่มความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้รีเลย์นั้นต้องมีประสิทธิภาพและคุณสมบัติเฉพาะตัวมากขึ้น การพัฒนาของเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) ทำให้เกิดเป็นรีเลย์ประเภทที่ไม่เคลื่อนที่ขึ้น ฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติเฉพาะตัวของรีเลย์ประเภทนี้ยังคงมีเหมือนกับรีเลย์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า แต่จะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือวงจรรวม (Integrated circuits) แทน

ข้อดีของรีเลย์ประเภทนี้ คือ มีประสิทธิภาพดีกว่า ใช้พลังงานน้อย มีการทำงานที่ถูกต้องมากกว่า ราคาที่ถูกกว่ารีเลย์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า มีขนาดเล็กและยืดหยุ่น (Flexibility) กว่า การตั้งค่าการทำงานนั้นสามารถตั้งได้ละเอียดและสามารถทำงานที่การตั้งค่าแบบเดิมได้บ่อยครั้งกว่า ซึ่งตรงข้ามกับรีเลย์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวการทำงานที่ตายตัว และปรับได้ยากกว่า การสั้นสะเทือนและฝุ่นไม่ส่งผลกระทบต่อรีเลย์ประเภทนี้และไม่จำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งในการติดตั้ง (Orientation)

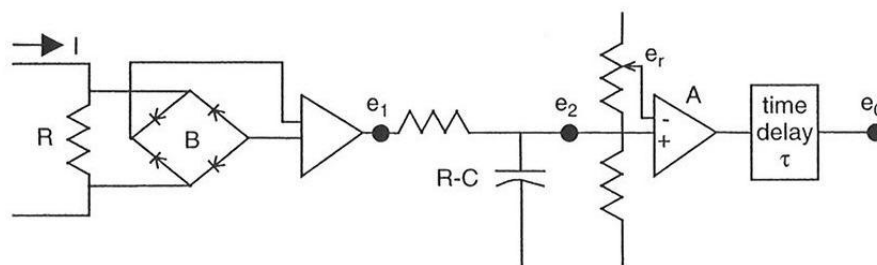
ข้อเสียของรีเลย์ประเภทนี้ คือ การทำงานจะมีความคลาดเคลื่อนเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสูง หรือ ค่าแรงดันหรือกระแสเกิน ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะทำให้ความน่าเชื่อถือของรีเลย์ประเภทนี้ต่ำลง

วงจรของรีเลย์ประเภทที่ไม่เคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

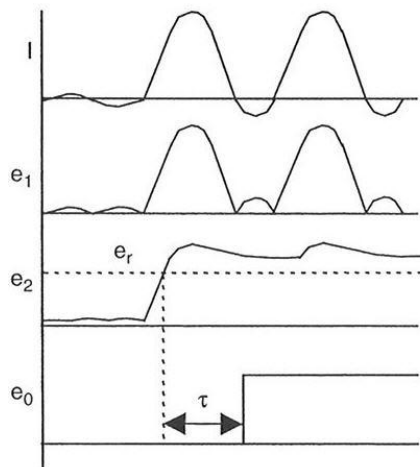
- 1) วงจรแบบอนาล็อก ที่สามารถตรวจจับความผิดปกติหรือสามารถวัดค่าต่างๆได้
- 2) วงจรแบบดิจิทัล ซึ่งจะใช้ตรรกะ (Logic) กับตัวแปรต่างๆในการทำงาน

เนื่องจากวงจรของรีเลย์ประเภทนี้มีความหลากหลาย เพื่อให้ได้คุณสมบัติการทำงานเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถที่จะแสดงตัวอย่างวงจรทั้งหมดได้ ในที่นี้จะตัวอย่างการทำงานของรีเลย์เพียงหนึ่งชนิดที่ทำงานแบบกระแสเกินทันทีทันใด (Instantaneous overcurrent relay) เท่านั้น

จากภาพที่ 3.21 แสดงวงจรรีเลย์ประเภทไม่เคลื่อนที่ที่ทำงานแบบกระแสเกินทันทีทันใด โดยมีกระแสขาเข้า (I) ผ่านความต้านทานแบบขนาน (R) จากนั้นจึงผ่านวงจรเรกติไฟ์เต็มคลื่นแบบบริดจ์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และกำจัดริบเบิลของรูปคลื่นด้วยวงจรแบบฟิลเตอร์แบบตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ($R-C$ filter) จากนั้นจึงต่อเข้ากับวงจรรวมและขยายสัญญาณแบบ High gain (High-gain summing amplifier) ซึ่งข้อมูลขาเข้าอีกตัวหนึ่ง คือ แรงดันอ้างอิงที่สามารถปรับค่าได้ ถ้าข้อมูลขาเข้าขั้วบวกของวงจรรวมและขยายสัญญาณมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงนี้ ข้อมูลขาออกของวงจรรวมและขยายสัญญาณจะมีค่าสูง และจะถูกหน่วงเวลาด้วย วงจรหน่วงเวลา เพื่อเป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนที่มากับข้อมูลขาเข้า ภาพที่ 3.22 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆของวงจรรีเลย์ประเภทไม่เคลื่อนที่ที่ทำงานแบบกระแสเกินทันทีทันใด การที่วงจรหน่วงเวลาสามารถปรับค่าได้และตั้งค่าให้เวลาที่หน่วงนั้นขึ้นกับกระแสขาเข้า จะทำให้ได้รีเลย์ที่ทำงานแบบกระแสเกินแบบหน่วงเวลา



ภาพที่ 3.16 วงจรรีเลย์ประเภทไม่เคลื่อนที่ที่ทำงานแบบกระแสเกินทันทีทันใด



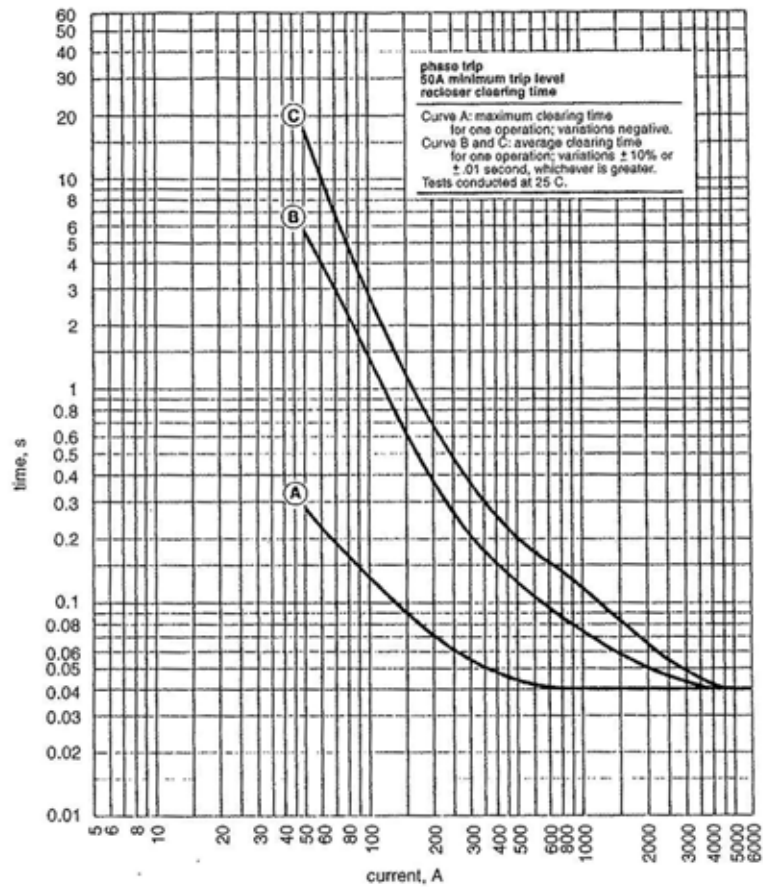
ภาพที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆของวงจรรีเลย์ภาพที่ 3.21

3.2.2.3 รีเลย์ประเภทคอมพิวเตอร์ (Computer relays)

ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ที่พัฒนามากขึ้น ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถทำงานเป็นรีเลย์ได้เช่นกัน แต่เนื่องจากโดยปกติข้อมูลขาเข้าของรีเลย์จะเป็นค่าแรงดันและกระแส จึงจำเป็นต้องแปลงข้อมูลขาเข้าที่เป็นอนาล็อกให้เป็นดิจิทัลเพื่อให้เหมาะสมกับรีเลย์ประเภทคอมพิวเตอร์

3.2.3 รีโคสเซอร์ [18]

รีโคสเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของกระแสเกินแบบเฟสและกระแสเกินแบบเฟสลงดินได้ หลักการทำงานของรีโคสเซอร์ คือ เมื่อเกิดกระแสเกินขึ้นในระบบนานตามเวลาที่กำหนดไว้ รีโคสเซอร์จะทำการเปิดวงจร จากนั้นรีโคสเซอร์จะทำการปิดวงจรโดยอัตโนมัติ ถ้าความผิดปกติยังคงอยู่ในระบบหลังจากการทำการเปิดและปิดวงจรของรีโคสเซอร์ตามจำนวนครั้งที่ตั้งไว้ สุดท้ายรีโคสเซอร์จะอยู่ในสถานะเปิดวงจร เพื่อตัดส่วนของวงจรที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบ ความผิดปกติส่วนใหญ่ประมาณ 80-95 % ในระบบไฟฟ้าเป็นความผิดปกติชั่วคราว (Temporary fault) และอยู่ในระบบประมาณ 2-3 คาบ หรือ 2-3 วินาทีเท่านั้น การที่รีโคสเซอร์มีการทำงานแบบเปิดและปิดวงจรหลายครั้ง ทำให้ระบบจำหน่ายยังจ่ายไฟฟ้าต่อได้เมื่อเกิดความผิดปกติแบบชั่วคราว โดยทั่วไปรีโคสเซอร์จะมีทำงานแบบเปิดและปิดวงจรมากที่สุดทั้งหมด 3 ครั้ง หลังจากนั้นสถานะของรีโคสเซอร์จะล๊อคไว้ที่แบบเปิดวงจร



ภาพที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์เวลา กระแสของรีโคสเซอร์

กราฟคุณสมบัติเฉพาะของเวลาการทำงานกับกระแสของรีโคสเซอร์โดยทั่วไปมี 3 เส้น ดังนี้ เส้นที่ 1 เป็นเส้นการทำงานแบบเร็ว เส้นที่ 2 และ 3 เป็นเส้นการทำงานแบบช้า และแทนด้วยเส้น A B และ C ในภาพที่ 3.24 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามรีโคสเซอร์ใหม่ๆที่ควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor-based controls) จะสามารถปรับเลือกรูปร่างของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของเวลาการทำงานกับกระแสให้เหมาะสมกับความผิดพลาดแบบเฟสและแบบเฟสลงดินได้ง่าย การตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์รีโคสเซอร์ให้ประสาน (Co-ordination) กับอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆก็เป็นสิ่งสำคัญ การตั้งค่าการทำงานที่ประสานกันของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ทำให้เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ ส่วนที่เล็กที่สุดของระบบที่เกิดความผิดพลาดจะถูกตัดออกไป เพื่อให้ส่วนอื่นๆของระบบยังคงได้รับไฟฟ้าต่อไป

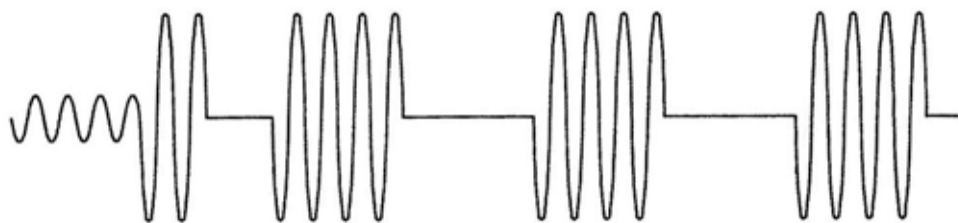
โดยทั่วไปกราฟคุณสมบัติเฉพาะของเวลาการทำงานกับกระแสของรีโคสเซอร์และลำดับการทำงานของรีโคสเซอร์จะถูกเลือกให้ประสานกับอุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ต้นทาง (Upstream) หลังจากเลือกขนาดและลำดับการทำงานของรีโคสเซอร์แล้ว อุปกรณ์ที่อยู่ปลายทาง

(Downstream) ของรีโคสเซอร์จะถูกเลือกให้ทำงานประสานกันตามลำดับ ภาพที่ 3.25 แสดงสัญญาณกระแสขณะเกิดความผิดปกติถาวร (Permanent fault) ที่รีโคสเซอร์พยายามเปิดวงจร จะเห็นว่ากระแสผิดปกติรูปคลื่นแรกนั้นจะอยู่ในระบบไม่นาน เนื่องจากรีโคสเซอร์จะเปิดวงจรอย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดความผิดปกติแบบชั่วคราวและป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เสียหายกับสายป้อนอื่นๆ สำหรับอีกสามการทำงานภายหลังจะถูกตั้งเวลาการทำงานไว้แล้ว ถ้าความผิดปกติเป็นแบบถาวร อุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ ที่อยู่ใกล้กับความผิดปกติมากที่สุดจะเปิดวงจรก่อนที่รีโคสเซอร์จะลืยสถานะเป็นเปิดวงจร เพื่อกำจัดพื้นที่ความผิดปกติของระบบ

รีโคสเซอร์สามารถจำแนกออกได้ ดังนี้

- 1) รีโคสเซอร์แบบ 1 เฟส และรีโคสเซอร์แบบ 3 เฟส
- 2) รีโคสเซอร์ประเภทไฮโดรลิกและรีโคสเซอร์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์
- 3) รีโคสเซอร์ที่ใช้น้ำมัน สูญญากาศ หรือ SF₆

รีโคสเซอร์แบบ 1 เฟส มักจะใช้กับโหลดที่ต้องการการป้องกันเพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น ในกรณีนี้เมื่อเกิดความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดินขึ้น รีโคสเซอร์จะทำการเปิดวงจรเพื่อกำจัดเฟสที่เกิดความผิดปกติเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ทำให้เฟสอื่นๆที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติยังคงได้รับไฟฟ้าอยู่ ส่วนรีโคสเซอร์แบบ 3 เฟสนั้นจะใช้เมื่อต้องการเปิดวงจรทั้งสามเฟสเพื่อป้องกันการไม่สมดุลของโหลดในระบบ



ภาพที่ 3.19 สัญญาณกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ถูกรีโคสเซอร์พยายามตัดวงจร

รีโคสเซอร์ที่ใช้ไฮโดรลิกเป็นกลไกการทำงานจะมีขดลวดคอยด์ที่ต่ออนุกรมกับสายไฟ และเมื่อกระแสมีค่าเกินค่าที่ตั้งไว้ ขดลวดคอยด์จะดึงลูกสูบให้คอนแทคของรีโคสเซอร์ทำการเปิดวงจร คุณสมบัติเฉพาะของเวลาและลำดับการทำงานของรีโคสเซอร์ประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับการไหลของน้ำมันในห้องเครื่อง (Chambers) ต่างๆ กลไกการควบคุม (Control mechanism) การทำงานของรีโคสเซอร์จะเป็นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งอยู่ภายนอกรีโคสเซอร์และจะรับสัญญาณกระแสจากหม้อแปลงกระแส เมื่อกระแสมีค่าเกินค่าที่ตั้งไว้ จะทำให้สัญญาณหน่วงเวลา

(Delayed shot) ถูกสร้างขึ้น และส่งผลให้มีสัญญาณทริปส่งไปที่กลไกการควบคุม จากนั้นวงจรควบคุมจะสั่งให้รีโคสเซอร์เปิดและปิดวงจรตามจำนวนครั้งและลำดับที่ได้ตั้งไว้ รีโคสเซอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์จะใช้ขดลวดคอยด์หรือกลไกของมอเตอร์ในการเปิดและปิดคอนแทค รีโคสเซอร์ที่ใช้ น้ำมันจะใช้น้ำมันเพื่อการดับอาร์คและยังทำหน้าที่เป็นฉนวนอีกด้วย น้ำมันนี้จะใช้ในกลไกการควบคุม รีโคสเซอร์ที่ใช้สุญญากาศหรือ SF₆ มีข้อดี คือ มีค่าบำรุงรักษาน้อยกว่า

รีโคสเซอร์มักจะติดตั้งที่จุดต่างๆของระบบจำหน่ายดังนี้

- ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อเป็นอุปกรณ์ป้องกันหลักของวงจรไฟฟ้าใดวงจรหนึ่ง
- ติดตั้งที่สายป้อนหลัก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับทั้งสายป้อน เมื่อเกิดความผิดปกติที่ปลายสาย
- ติดตั้งที่สายแยกหรือสายแยกย่อย เพื่อไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับที่สายป้อนหลัก เมื่อเกิดความผิดปกติที่สายแยกหรือสายแยกย่อย

ในการติดตั้งรีโคสเซอร์ต้องพิจารณาค่าต่างๆต่อไปนี้

- 1) แรงดันของระบบไฟฟ้า (System voltage)
- 2) ระดับความผิดปกติ (Short-circuit level)
- 3) กระแสไหลสูงสุด (Maximum load current)
- 4) กระแสความผิดปกติที่น้อยที่สุดในพื้นที่ที่รีโคสเซอร์นั้นป้องกันอยู่ (Minimum short-circuit within the zone to be protected by the recloser)
การทำงานร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันต้นทางและอุปกรณ์ป้องกันปลายทาง (Co-ordination with other mechanisms located upstream towards the source, and downstream towards the load)
- 5) ความไวในการทำงานของความผิดปกติแบบลงดิน (Sensitivity of operation for earth faults)

พิกัดแรงดัน (Voltage rating) และความสามารถทางด้านความผิดปกติ (Short-circuit capacity) ของรีโคสเซอร์ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าที่จุดที่รีโคสเซอร์ได้ต่อในระบบ สำหรับค่าพิกัดกระแสของรีโคสเซอร์ก็ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสไหลสูงสุดของวงจรเช่นกัน สิ่งสำคัญของการติดตั้งรีโคสเซอร์ในสายป้อน คือ ต้องมั่นใจว่ากระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ปลายสายป้อนจะมีค่าสูงพอที่จะทำให้รีโคสเซอร์จะเปิดวงจร

3.2.4 ฟิวส์ [18]

ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินชนิดหนึ่ง ที่มีส่วนประกอบที่ได้รับความร้อนโดยตรงจากกระแสที่ไหลผ่านตัวมัน และส่วนประกอบนี้จะถูกทำลายเมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่าเกินค่าที่กำหนด ฟิวส์ที่ดีต้องเปิดวงจรด้วยการทำลายส่วนประกอบของฟิวส์ มีการดับอาร์คขณะถูกทำลาย และทำให้วงจรอยู่ในสถานะเปิดวงจร ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมฟิวส์ต้องมีค่าเท่ากับพิกัดแรงดันของระบบ (ไม่มีการอาร์คตกคร่อมฟิวส์)

ไซนการทำงานของฟิวส์จะกำหนดโดยขอบเขต 2 ขอบเขต คือ ขอบเขตล่างจะขึ้นอยู่กับเวลาน้อยสุดที่ฟิวส์จะหลอมละลาย (Minimum melting time) ขอบเขตบนจะขึ้นอยู่กับเวลามากที่สุดที่ฟิวส์จะทำการกำจัดความผิดปกติ

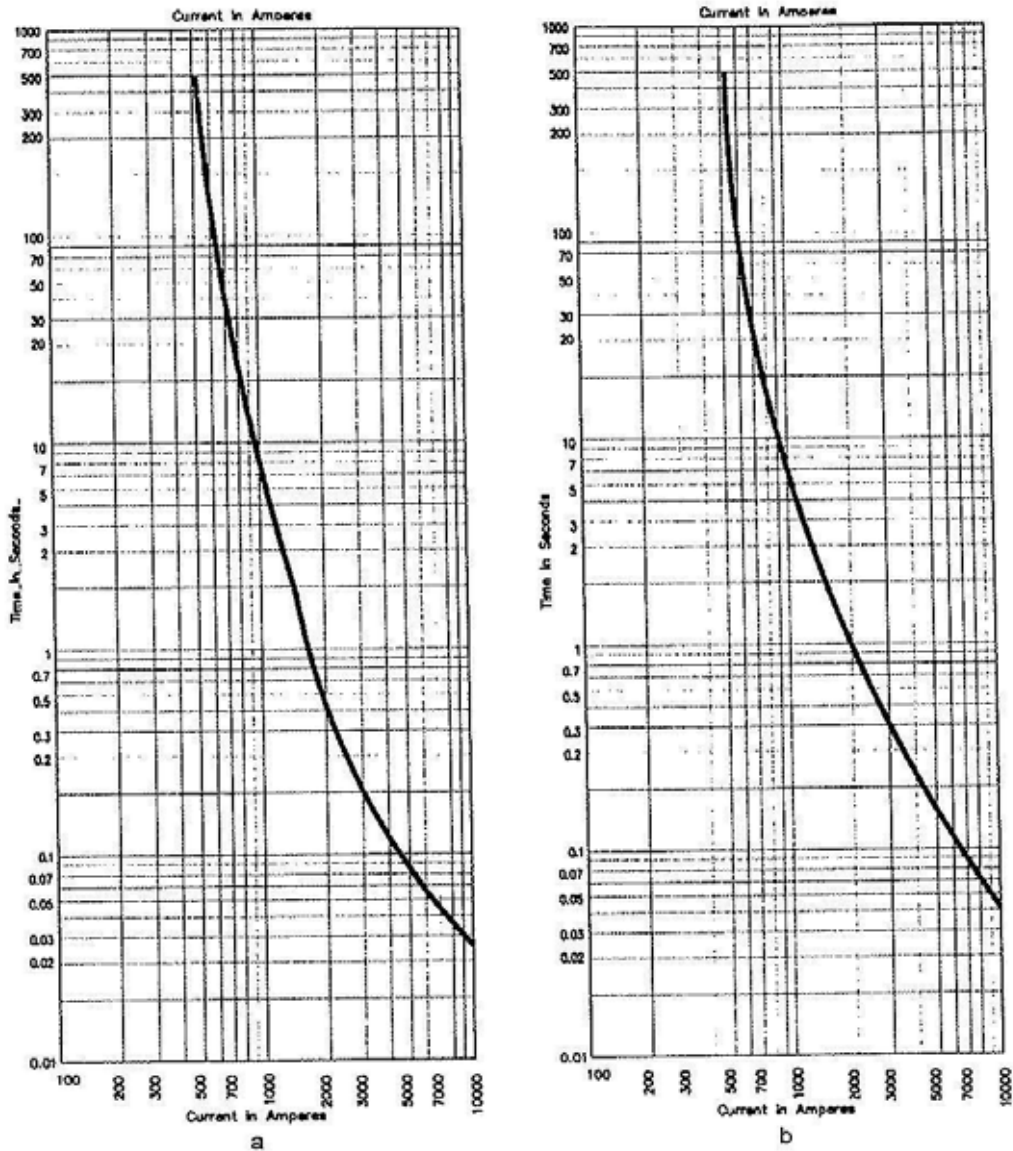
มีมาตรฐานมากมายที่จำแนกฟิวส์ประเภทต่างๆตาม พิกัดแรงดัน พิกัดกระแส คุณสมบัติเฉพาะเวลา-กระแส คุณสมบัติเด่นของผู้ผลิตแต่ละราย และอื่นๆ อีกมากมาย ตัวอย่างเช่น มาตรฐาน ANSI/UL 198-1982 ได้จำแนกประเภทของฟิวส์ตามแรงดัน โดยฟิวส์แรงดันต่ำนั้น คือ ฟิวส์ที่มีแรงดันเท่ากับหรือน้อยกว่า 600 โวลต์ สำหรับฟิวส์แรงดันกลางและสูงจะมีแรงดันในช่วง 2.3-138 กิโลโวลต์ มาตรฐาน ANSI/IEEE C37.40 ,41 ,42 ,46 ,47 ,48 ก็จำแนกฟิวส์ตามแรงดันในลักษณะนี้เช่นกัน อย่างไรก็ตามองค์กรและประเทศอื่นๆจะมีมาตรฐานที่เหมาะสมของตัวเอง นอกจากนี้ผู้ผลิตฟิวส์จะออกแบบและจำแนกฟิวส์เองด้วย

สำหรับฟิวส์ในระบบจำหน่ายจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามอัตราส่วนความเร็ว (Speed ratio) ดังนี้

- 1) ชนิด K ซึ่งจะทำงานแบบเร็ว
- 2) ชนิด T ซึ่งจะทำงานแบบช้า

อัตราส่วนความเร็ว (Speed ratio) คือ อัตราส่วนของกระแสต่ำสุดที่ฟิวส์จะหลอมละลาย (minimum melt current) ที่เวลา 0.1 วินาที กับกระแสต่ำสุดที่ฟิวส์จะหลอมละลายที่เวลา 300 วินาที สำหรับฟิวส์ประเภท K จะมีค่าอัตราส่วนความเร็วอยู่ระหว่าง 6-8 และสำหรับฟิวส์ประเภท T จะมีค่าอัตราส่วนความเร็วระหว่าง 10-13 ในภาพที่ 3.26 แสดงกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิวส์ประเภท 200K และฟิวส์ประเภท 200T เปรียบเทียบกัน ซึ่งจะเห็นว่าฟิวส์ประเภท 200K จะใช้กระแสขนาด 4400 แอมแปร์ เพื่อกำจัดความผิดปกติที่เวลา 0.1 วินาที และกระแสขนาด 560 แอมแปร์ เพื่อกำจัดความผิดปกติที่เวลา 300 วินาที ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความเร็วได้เท่ากับ 7.86 ในขณะที่ฟิวส์ประเภท 200T จะใช้กระแสขนาด 6500 แอมแปร์ เพื่อกำจัดความผิด

พ่วงที่เวลา 0.1 วินาที และกระแสขนาด 520 แอมแปร์ เพื่อกำจัดความผิดพลาดพ่วงที่เวลา 300 วินาที ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความเร็วได้เท่ากับ 12.5



ภาพที่ 3.20 กราฟคุณสมบัติเฉพาะเวลา กระแสของฟิวส์ประเภท 200K (a) และฟิวส์ประเภท 200T (b)

ในการเลือกติดตั้งฟิวส์ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายต้องพิจารณาค่าต่างๆต่อไปนี้

- 1) ระดับแรงดันและฉนวน (Voltage and insulation level)
- 2) ประเภทของระบบ (Type of system)
- 3) กระแสผิดพลาดพ่วงสูงสุด (Maximum short-circuit level)

4) กระแสไหลด (Load current)

ซึ่งค่าต่างๆทั้ง 4 ค่า นี้จะเป็นค่าที่กำหนดพิกัดกระแส (Nominal current) พิกัดแรงดัน (Nominal voltage) และคุณสมบัติเฉพาะความสามารถทางด้านความผิดปกติพร้อม (Short-circuit capability characteristics) ของฟิวส์

การเลือกค่าพิกัดกระแส (Selection of nominal current)

ค่าพิกัดกระแสของฟิวส์ควรจะต้องมีค่ามากกว่าค่ากระแสไหลดต่อเนื่องสูงสุด (Maximum continuous load current) ซึ่งผู้ผลิตฟิวส์บางรายจะทำตารางออกมาเพื่อความสะดวกในการเลือกใช้ฟิวส์ที่เหมาะสม

การเลือกค่าพิกัดแรงดัน (Selection of nominal voltage) จะต้องพิจารณาคุณสมบัติเฉพาะของระบบ ดังนี้

- แรงดันเฟสต่อเฟสสูงสุดและแรงดันเฟสต่อดินสูงสุด
- ประเภทของการต่อลงดิน (Type of earthing)
- จำนวนเฟส (สามเฟสหรือหนึ่งเฟส)

คุณสมบัติเฉพาะของระบบจะบ่งบอกถึงแรงดันที่ฟิวส์เห็นขณะฟิวส์เปิดวงจร ซึ่งแรงดันนี้ควรที่จะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าพิกัดแรงดันของฟิวส์ ดังนั้นจึงต้องใช้เงื่อนไขต่อไปนี้

- 1) ระบบที่ไม่ได้ต่อลงดิน พิกัดแรงดันของฟิวส์จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าแรงดันเฟสต่อเฟสสูงสุด
- 2) ระบบสามเฟสที่ต่อลงดิน สำหรับโหลดเฟสเดียว พิกัดแรงดันของฟิวส์จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเฟสต่อดินสูงสุด สำหรับโหลดสามเฟส พิกัดแรงดันของฟิวส์จะต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อเฟสปกติ

การเลือกค่าความสามารถความผิดปกติพร้อม (Short-circuit capacity)

ค่าความสามารถผิดปกติพร้อมสมมาตร (The symmetrical short-circuit capacity) ของฟิวส์ควรจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่ากระแสผิดปกติพร้อมสมมาตร (Symmetrical fault current) ที่คำนวณได้ที่จุดที่ต่อฟิวส์

3.3 การคำนวณกำลังไหลแบบถอยหลัง เดินหน้าสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

วิธีการคำนวณกำลังไหลในระบบไฟฟ้านั้นมีหลายวิธี แต่วิธีการสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล วิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ไม่ซับซ้อน และเข้าใจง่าย คือ วิธีการคำนวณแบบถอยหลัง เดินหน้า (Backward and forward propagation) ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้ได้กับระบบที่ไม่มีความสมดุล (Unbalanced system) และสามารถใช้ได้กับโหลดที่มีพฤติกรรมที่หลายแบบได้ โดยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพของโหลดที่มีพฤติกรรมหลายแบบจะสามารถเขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$P_{load} = P_{load}^0 (A_0 + A_1 V + A_2 V^2 + A_3 V^{lp}) \quad (3.9)$$

$$Q_{load} = Q_{load}^0 (R_0 + R_1 V + R_2 V^2 + R_3 V^{lq}) \quad (3.10)$$

โดยที่ P_{load}^0 คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่พิกัดแรงดัน (Nominal voltage)

Q_{load}^0 คือ กำลังไฟฟ้าจินตภาพของโหลดที่พิกัดแรงดัน (Nominal voltage)

A_0, R_0 คือ ค่าคงที่ที่เป็นสัดส่วนของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

A_1, R_1 คือ ค่าคงที่ที่เป็นสัดส่วนของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

A_2, R_2 คือ ค่าคงที่ที่เป็นสัดส่วนของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่

A_3, R_3 คือ ค่าคงที่ที่เป็นสัดส่วนของแรงดัน V_{lp}, V_{lq} ของโหลด

lp, lq คือ ค่าคงที่ที่เป็นเลขยกกำลัง (Exponent) ของแรงดันโหลดตามพฤติกรรมที่แท้จริงของโหลด

$$A_0 + A_1 + A_2 + A_3 = 1 \quad (3.11)$$

$$R_0 + R_1 + R_2 + R_3 = 1 \quad (3.12)$$

วิธีการนี้จะเริ่มจากการกำหนดให้ขนาดของแรงดันทุกบัสมีค่าเท่ากับ 1 เพอร์ยูนิท และมีมุมเฟส 0 องศา -120 องศา และ 120 องศาสำหรับเฟสเอ เฟสบี และเฟสซีตามลำดับ แรงดันที่ต้นสายป้อนหรือต้นสถานีไฟฟ้าย่อยถูกกำหนดให้ทราบค่าจากการตรวจวัดและมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณกำลังไหล กระแสเริ่มต้นของแต่ละสายย่อยถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งขนาดและมุมเฟส จากนั้นกระบวนการจะคำนวณแบบถอยหลังและคำนวณแบบเดินหน้า จนกระทั่งค่าแรงดันทุกบัสนั้นเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

3.3.1 การคำนวณถอยหลัง (Backward propagation)

การคำนวณถอยหลังจะเป็นการคำนวณกระแสของแต่ละสายย่อย โดยการสมมติให้แรงดันที่แต่ละบัสนั้นมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับพิกัดแรงดัน (Nominal voltage) ซึ่งเริ่มจากการ

คำนวณกระแสของโหลดทุกตัว จากนั้นจึงคำนวณกระแสของแต่ละสายย่อยจากปลายสายป้อน
ก่อนไปสู่ต้นสายป้อน

ถ้าโหลดมีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ กระแสโหลดสามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$\begin{bmatrix} I_{loada} \\ I_{loadb} \\ I_{loadc} \end{bmatrix} = conj \begin{bmatrix} S_{loada} / V_a \\ S_{loadb} / V_b \\ S_{loadc} / V_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยที่ S_{loada} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เฟสเอ

S_{loadb} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เฟสบี

S_{loadc} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เฟสซี

ถ้าโหลดมีพฤติกรรมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ กระแสโหลดสามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$\begin{bmatrix} I_{loada} \\ I_{loadb} \\ I_{loadc} \end{bmatrix} = constant \quad (3.14)$$

โดยที่ $constant$ คือ ค่าคงที่ที่ถูกกำหนดไว้แล้ว

ถ้าโหลดมีพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่ กระแสโหลดสามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$\begin{bmatrix} I_{loada} \\ I_{loadb} \\ I_{loadc} \end{bmatrix} = conj \begin{bmatrix} V_a / Z_{loada} \\ V_b / Z_{loadb} \\ V_c / Z_{loadc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

โดยที่ Z_{loada} คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดเฟสเอ ที่มีพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่

Z_{loadb} คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดเฟสบี ที่มีพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่

Z_{loadc} คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดเฟสซี ที่มีพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่

3.3.2 วิธีการคำนวณเดินหน้า (forward propagation)

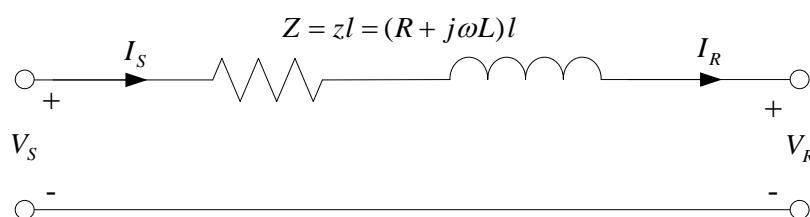
การคำนวณเดินหน้าจะเป็นการคำนวณแรงดันที่แต่ละบัส โดยจะคำนวณจากบัสต้นสาย
ป้อนไปยังบัสปลายสายป้อน โดยกำหนดให้แรงดันที่บัสต้นสายป้อนหรือบัสต้นสถานีไฟฟ้าย่อยจะ
มีค่าคงที่และเท่ากับค่าที่ตรวจวัดได้ ขณะที่กำลังทำการคำนวณเดินหน้านี้ กระแสในแต่ละสาย
ย่อยจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่และเท่ากับค่าที่ได้จากวิธีการคำนวณถอยหลัง

3.4 วงจรสมมูลของสายย่อยและโหลด

กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบจำหน่ายที่นำเสนอนั้น จะพิจารณาอุปกรณ์เพียง 2 ชนิด เท่านั้น ได้แก่ สายส่งระยะสั้น และโหลด ซึ่งวงจรสมมูลของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.4.1 และ 3.4.2

3.4.1 สายย่อย (Line sections)

สายย่อยในระบบจำหน่ายนั้นถือว่าเป็นสายส่งระยะสั้น ซึ่งสายประเภทนี้จะมีความยาวต่ำกว่า 80 กิโลเมตร หรือมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 69 kV โดยทั่วไปสายประเภทนี้จะมีผลจากตัวเก็บประจุน้อยมาก จึงสามารถละเลยผลของตัวเก็บประจุได้ ดังนั้น แบบจำลองประเภทนี้จะประกอบไปด้วยความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น ภาพที่ 3.27 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น



ภาพที่ 3.21 วงจรสมมูลสายส่งระยะสั้น

จากภาพที่ 3.30 สามารถนำมาเขียนเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยที่ $z = R + j\omega L$ หมายถึง อิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาว (โอห์มต่อกิโลเมตร)

Z หมายถึง อิมพีแดนซ์อนุกรมทั้งหมด (โอห์ม)

l หมายถึง ความยาวสาย (กิโลเมตร)

ภาพที่ 3.27 เป็นวงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้นแบบหนึ่งเฟส แต่วิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอนั้นจะวิเคราะห์วงจรแบบสามเฟส เพราะระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นไม่สมดุล (Unbalanced system) วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้นแบบสามเฟส แสดงดังภาพที่ 3.28

เมื่อพิจารณาวงจรดังภาพที่ 3.28 สามารถเขียนเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

และเมตริกซ์ของสายส่งระยะสั้นแบบสามเฟสจะได้เท่ากับ

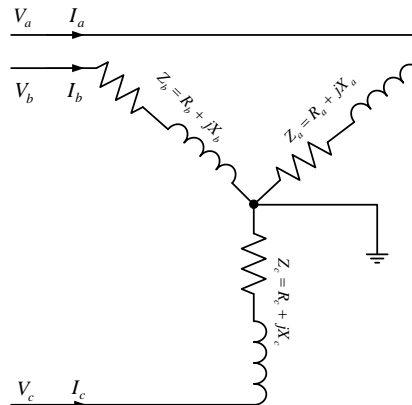
$$[Z_{Line}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่ Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc} คือ อิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self impedance) ของสายส่งระยะสั้น

$Z_{ab}, Z_{ac}, Z_{ba}, Z_{bc}$ คือ อิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual impedance) ของสายส่งระยะสั้น

3.4.2 โหลด (Loads)

ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอนิเวศยานิพนธ์นี้ จะหาความผิดพลาดที่เกิดบนสายป้อนปฐมภูมิเท่านั้น ดังนั้นตั้งแต่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าและอุปกรณ์ที่ต่อจากหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้านี้จะถูกมองว่าเป็นโหลดทั้งสิ้น ซึ่งนิเวศยานิพนธ์นี้กำหนดให้โหลดทุกโหลดมีลักษณะการต่อแบบวางลงดินแสดงดังภาพที่ 3.29



ภาพที่ 3.22 วงสมมูลของโหลดที่ต่อแบบวางลงดิน

จากภาพที่ 3.29 สามารถเขียนเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเมื่อโหลดพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} I_{loada} \\ I_{loadb} \\ I_{loadc} \end{bmatrix} = \text{conj} \begin{bmatrix} S_{loada} / V_a \\ S_{loadb} / V_b \\ S_{loadc} / V_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

โดยที่ S_{loada} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เฟสเอ

S_{loadb} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เฟสบี

S_{loadc} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดที่มีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เฟสซี

จากภาพที่ 3.32 สามารถเขียนเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเมื่อโหลดพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} I_{loada} \\ I_{loadb} \\ I_{loadc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a / Z_{loada} \\ V_b / Z_{loadb} \\ V_c / Z_{loadc} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยที่ Z_{loada} คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดเฟสเอ

Z_{loadb} คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดเฟสบี

Z_{loadc} คือ อิมพีแดนซ์ของโหลดเฟสซี

บทที่ 4

กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอ

วิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอนั้นเป็นวิธีการผสมผสาน ซึ่งจะเริ่มจากวิธีการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ปรากฏที่ตรวจวัดที่ต้นสายป้อนแล้วนำไปเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ของสายย่อย (Line section) แต่ละสาย โดยการจำลองความผิดพลาดลงในสายย่อยทุกสายย่อย ถ้าระบบมีสายย่อยทั้งหมด n สาย จะต้องทำการจำลองความผิดพลาดลงในสายย่อยทั้งหมด n ครั้ง แต่ตำแหน่งผิดพลาดที่ได้จากวิธีนี้จะได้หลายตำแหน่ง จึงต้องใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัดไป (Interrupted load) เป็นวิธีการเพิ่มเติมในการระบุสายย่อยที่เกิดความผิดพลาดที่แท้จริง เนื่องจากวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอนี้ต้องทำการจำลองความผิดพลาดลงในแต่ละสายย่อย ดังนั้น วิธีการนี้จึงต้องทราบประเภทความผิดพลาดที่ถูกต้องล่วงหน้า ซึ่งวิธีการหาประเภทความผิดพลาดนั้น มีบทความต่างๆเสนอไว้แล้ว [19 , 20]

เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่ากระแสโหลดในระบบไม่สูงมาก ดังนั้นในการระบุตำแหน่งผิดพลาดจึงไม่สามารถละลายค่ากระแสโหลดได้และจำเป็นต้องหาค่าหรือประมาณค่ากระแสโหลดขณะเกิดความผิดพลาด ซึ่งในการหาค่ากระแสโหลดขณะเกิดความผิดพลาดจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมของโหลด แต่ในทางปฏิบัติพฤติกรรมของโหลดในระบบจำหน่ายนั้นไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและเป็นไปการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า จึงต้องทำการสมมติให้โหลดมีพฤติกรรมเป็นชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ขณะเกิดความผิดพลาดระบบมีพฤติกรรมแบบอิมพีแดนซ์คงที่

กระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

- 1) กระบวนการคำนวณก่อนเกิดความผิดพลาด (Pre-fault calculation)
- 2) กระบวนการคำนวณหลังเกิดความผิดพลาด (Post-fault calculation)

4.1 กระบวนการคำนวณก่อนเกิดความผิดพลาด (Pre-fault calculation)

กระบวนการนี้จะคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบหรือของสายป้อนหนึ่งในสถานะโหลดเป็นปกติ ซึ่งจะใช้หลักการการคำนวณกำลังไหลแบบถอยหลัง เดินหน้า (Backward - forward propagation) สำหรับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 โดยการคำนวณนี้ จะคำนวณไว้ล่วงหน้าก่อนที่ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นจริงในระบบ เพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูลและจะนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพลาดต่อไป ฐานข้อมูลที่ได้จากกระบวนการนี้จะ

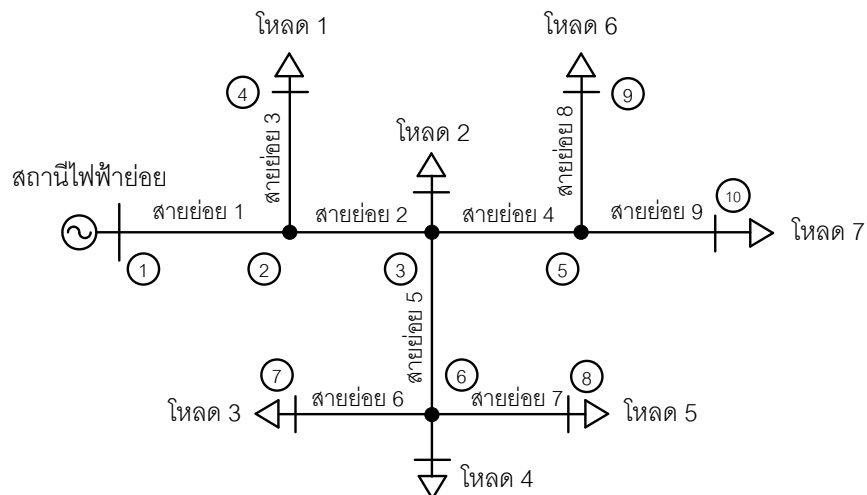
เป็นข้อมูลเฉพาะสายป้อน กล่าวคือ สายป้อนหนึ่งๆจะมีฐานข้อมูลเฉพาะสายป้อนนั้นๆ ถ้าในหนึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยมีสายป้อน 10 สายป้อน สถานีไฟฟ้าย่อยนั้นต้องมี 10 ฐานข้อมูล

กระบวนการคำนวณกำลังไหลแบบถอยหลัง เดินหน้าสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล จะกำหนดให้มีโหลดมีพฤติกรรมแบบกำลังไฟฟ้าคงที่และกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดแต่ละตัวเป็นข้อมูลที่ทราบล่วงหน้า ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำมาจากหน่วยงานที่ดูแลรับผิดชอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ข้อมูลที่ต้องการในการคำนวณกำลังไหลของระบบใดๆ มี 3 ค่า ดังนี้

- 1) พิกัดแรงดันของระบบ (Nominal voltage)
- 2) อิมพีแดนซ์และลักษณะการต่อวงจร (Impedance and topology of line section)
- 3) กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลด (Apparent power of load)

ภาพที่ 4.1 แสดงวงจรสายป้อนตัวอย่างที่มีบัสทั้งหมด 10 บัส เลขที่อยู่ในวงกลม คือ เลขบัสมีโหลดทั้งหมด 7 โหลด และมีสายย่อยทั้งหมด 9 สาย



ภาพที่ 4.1 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างข้อมูลอิมพีแดนซ์และลักษณะการต่อวงจรและตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างข้อมูลกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดของระบบในภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลอิมพีแดนซ์และลักษณะการต่อวงจร

| สายย่อย | จากบัส | ไปบัส | อิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self impedance) (โอห์ม/กิโลเมตร) | อิมพีแดนซ์เชื่อมโยง (Mutual impedance) (โอห์ม/กิโลเมตร) | ความยาว สาย (กิโลเมตร) |
|---------|--------|-------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 2 | $0.4704+0.8405*j$ | $0.0599+0.3734*j$ | 0.92 |
| 2 | 2 | 3 | $0.4704+0.8405*j$ | $0.0599+0.3734*j$ | 1.21 |
| 3 | 2 | 4 | $0.3267+0.8285*j$ | $0.0598+0.4052*j$ | 0.33 |
| 4 | 3 | 5 | $0.8877+0.8588*j$ | $0.0658+0.5193*j$ | 0.85 |
| 5 | 3 | 6 | $0.8877+0.8588*j$ | $0.0658+0.5193*j$ | 0.51 |
| 6 | 6 | 8 | $0.3267+0.8285*j$ | $0.0598+0.4052*j$ | 0.27 |
| 7 | 6 | 7 | $0.3267+0.8285*j$ | $0.0598+0.4052*j$ | 0.18 |
| 8 | 5 | 9 | $0.3267+0.8285*j$ | $0.0598+0.4052*j$ | 0.39 |
| 9 | 5 | 10 | $0.4704+0.8405*j$ | $0.0599+0.3734*j$ | 2.1 |

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลด

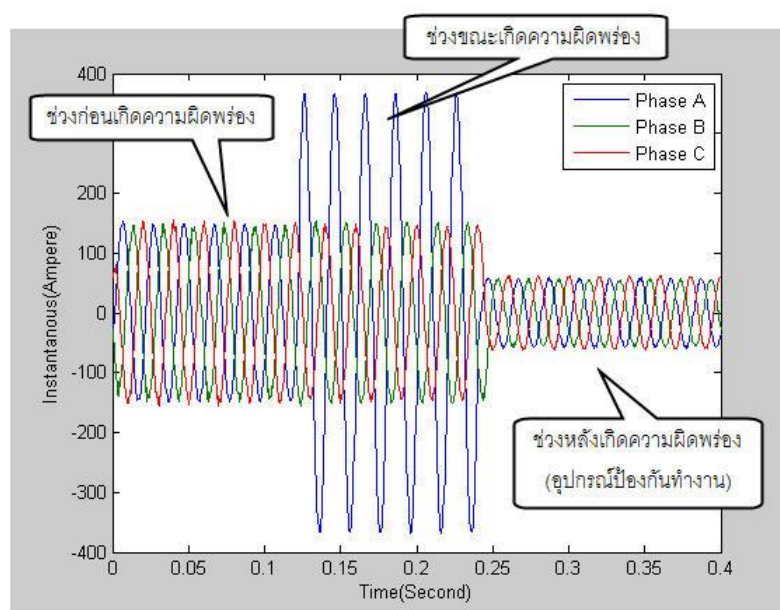
| โหลดต่อบัส | กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟสเอ (กิโลวัตต์แอมแปร์) | กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟสบี (กิโลวัตต์แอมแปร์) | กำลังไฟฟ้าปรากฏเฟสซี (กิโลวัตต์แอมแปร์) |
|------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 4 | $14.25 + 9.95*j$ | $14.25 + 9.95*j$ | $14.25 + 9.94*j$ |
| 3 | 0.00000001 | $18.18 + 1.43*j$ | $7.88 + 16.44*j$ |
| 7 | $45.37 + 31.92*j$ | $45.43 + 31.98*j$ | $45.45 + 31.89*j$ |
| 6 | $7.86 + 16.46*j$ | 0.00000001 | $18.2 + 1.4*j$ |
| 8 | $89.24 + 62.83*j$ | $89.25 + 62.92*j$ | $89.25 + 62.76*j$ |
| 9 | $28.41 + 19.90*j$ | $28.41 + 19.90*j$ | $28.41 + 19.90*j$ |
| 10 | 0.00000001 | $12.14 + 0.94*j$ | $5.26 + 10.98*j$ |

ล่วงหน้า กระบวนการคำนวณหลังเกิดความผิดปกติสามารถแบ่งออกเป็น 7 กระบวนการย่อย ดังนี้

4.2.1 กระบวนการคำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณผิดปกติ

กระบวนการนี้จะคำนวณเฟสเซอร์ของสัญญาณกระแสผิดปกติและสัญญาณแรงดันผิดปกติด้วยวิธีการที่เรียกว่า อินเตอร์โพลเทตติ้งวินโดวส์ฟาสฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Interpolating windowed fast fourier transform) ซึ่งวิธีการนี้จะให้ค่าเฟสเซอร์ที่แม่นยำกว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ฟาสฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (FFT) ปกติ

สัญญาณผิดปกติที่เป็นข้อมูลขาเข้าของกระบวนการนี้จะได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณที่ต้นสายป้อน เช่น รีเลย์ เครื่องบันทึกสัญญาณผิดปกติ (DFR) เป็นต้น โดยทั่วไปสัญญาณผิดปกติสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 สัญญาณกระแสผิดปกติ

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้และจะนำไปใช้ในกระบวนการถัดไปมีทั้งหมด 6 ค่า ดังนี้

- 1) เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายป้อนก่อนเกิดความผิดปกติ
- 2) เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายป้อนก่อนเกิดความผิดปกติ
- 3) เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายป้อนขณะเกิดความผิดปกติ
- 4) เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายป้อนขณะเกิดความผิดปกติ
- 5) เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายป้อนหลังเกิดความผิดปกติ

6) เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายป้อนหลังเกิดความผิดปกติ

4.2.2 กระบวนการชดเชยกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลด

กระบวนการนี้จะนำเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันก่อนเกิดความผิดปกติมาคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏก่อนเกิดความผิดปกติซึ่งสามารถคำนวณได้ว่า

$$S_{pre} = V_{pre} * conj(I_{pre}) \quad (4.1)$$

โดยที่ S_{pre} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบก่อนเกิดความผิดปกติ

V_{pre} คือ เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายป้อนก่อนเกิดความผิดปกติ

I_{pre} คือ เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายป้อนก่อนเกิดความผิดปกติ

$conj$ คือ คอนจูเกตของจำนวนเชิงซ้อน

จากนั้นคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ต้องชดเชยให้กับโหลดในสถานะโหลดเป็นปกติ จะได้ว่าโหลดแต่ละตัวจะถูกชดเชยเท่ากับ

$$\Delta S_{Lcomp} = \frac{S_{pre} - S_{normal}}{N_L} \quad (4.2)$$

โดยที่ ΔS_{Lcomp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ต้องชดเชยให้กับโหลดแต่ละตัว

S_{pre} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบก่อนเกิดความผิดปกติ

S_{normal} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบในสถานะโหลดเป็นปกติ (ฐานข้อมูล)

N_L คือ จำนวนโหลดทั้งหมดในระบบ

4.2.3 กระบวนการคำนวณกำลังโหลดก่อนเกิดความผิดปกติ

การคำนวณกำลังโหลดก่อนเกิดความผิดปกติจะใช้หลักการคำนวณกำลังโหลดแบบถอยหลัง เดินหน้าเหมือนกันกับกระบวนการคำนวณก่อนเกิดความผิดปกติ (Pre-fault calculation) แตกต่างตรงที่กำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดแต่ละตัวนั้นเป็นค่าที่ถูกชดเชยแล้ว

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการและจะนำไปใช้ในกระบวนการถัดไปมี 2 ค่า ดังนี้

1) เฟสเซอร์กระแสในแต่ละสายย่อยก่อนเกิดความผิดปกติ

2) เฟสเซอร์แรงดันที่แต่ละบัสก่อนเกิดความผิดปกติ

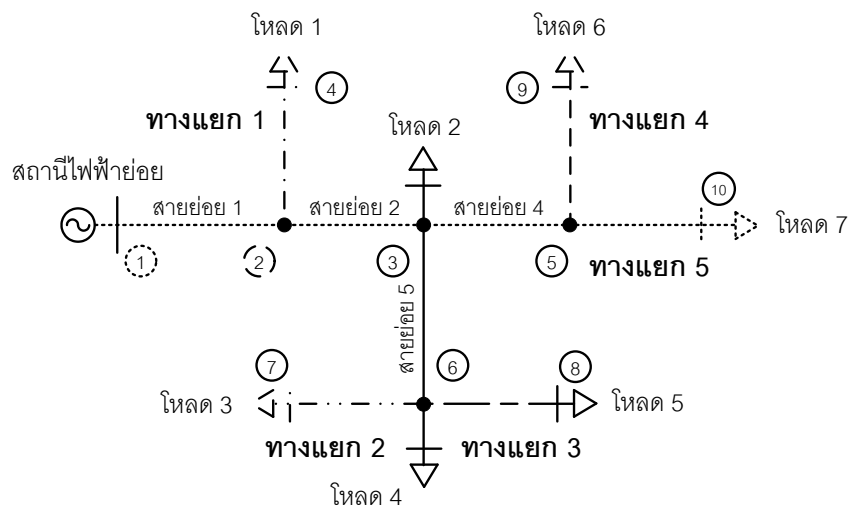
4.2.4 กระบวนการคำนวณอิมพีแดนซ์ทางแยกและอิมพีแดนซ์จุดต่อโหลด

กระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบว่าระบบหรือสายป้อนที่วิเคราะห์มีทางแยกที่ทางและมีจุดต่อโหลดที่จุดต่อ จากนั้นจึงนำค่ากระแสในแต่ละสายย่อยและแรงดันที่แต่ละบัสที่ได้จาก

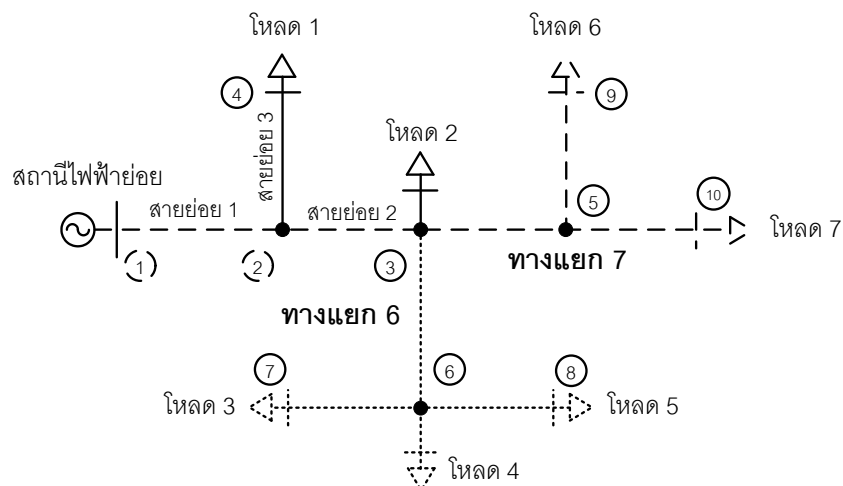
กระบวนการในหัวข้อ 4.2.3 มาคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ทางแยกและอิมพีแดนซ์จุดต่อโหลด มีรายละเอียดดังนี้

4.2.4.1 การคำนวณอิมพีแดนซ์ทางแยก

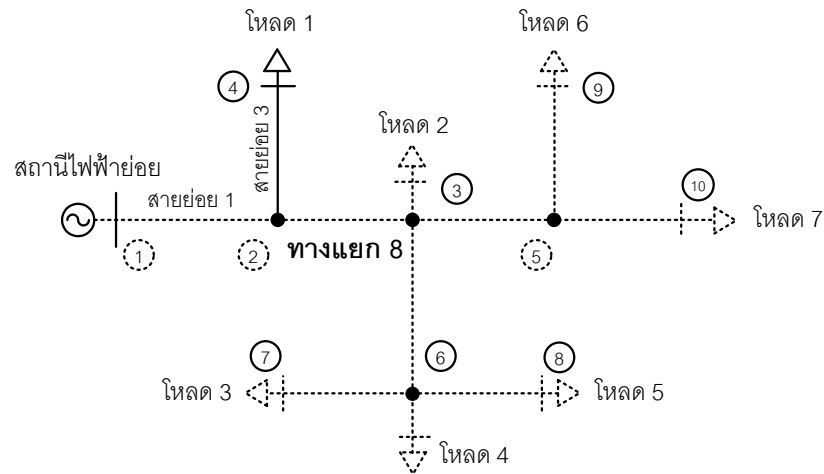
พิจารณาวงจรสายป้อนภาพที่ 4.1 จะมีสายแยกทั้งหมด 8 เส้นทาง และแสดงดังภาพที่ 4.3 ถึงภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.3 ทางแยกที่ 1 ถึงทางแยกที่ 5 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง



ภาพที่ 4.4 ทางแยกที่ 6 และทางแยกที่ 7 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง



ภาพที่ 4.5 ทางแยกที่ 8 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง

ในการระบุว่าระบบมีทางแยกที่ทางจะสามารถตรวจสอบได้จากตารางข้อมูลอิมพีแดนซ์และลักษณะการต่อวงจร จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าถ้าสายย่อยไหนมีแถว “จากบัส” เท่ากัน แสดงว่าเกิดทางแยกขึ้น พิจารณาภาพที่ 4.6 จะเห็นว่าสายย่อย 4 และสายย่อย 5 มีค่า “จากบัส” เท่ากัน คือ บัส 3 ทำให้เกิดทางแยกขึ้น 2 ทางแยก ซึ่งเมื่อตรวจสอบทั้งระบบจากตารางนี้จะได้ทางแยกทั้งหมด 8 ทางแยก

| สายย่อย | จากบัส | ไปบัส | อิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self impedance) (โอห์ม/กิโลเมตร) | อิมพีแดนซ์เชื่อมโยง (Mutual impedance) (โอห์ม/กิโลเมตร) | ความยาว สาย (กิโลเมตร) |
|---------|--------|-------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 0.4704+0.8405*j | 0.0599+0.3734*j | 0.92 |
| 2 | 2 | 3 | 0.4704+0.8405*j | 0.0599+0.3734*j | 1.21 |
| 3 | 2 | 4 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.33 |
| 4 | 3 | 5 | 0.8877+0.8588*j | 0.0658+0.5193*j | 0.85 |
| 5 | 3 | 6 | 0.8877+0.8588*j | 0.0658+0.5193*j | 0.51 |
| 6 | 6 | 8 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.27 |
| 7 | 6 | 7 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.18 |
| 8 | 5 | 9 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.39 |
| 9 | 5 | 10 | 0.4704+0.8405*j | 0.0599+0.3734*j | 2.1 |

สายย่อยมีเลขจากบัสซ้ำกัน
จึงเกิดทางแยก

ภาพที่ 4.6 การตรวจสอบจำนวนทางแยกจากตารางข้อมูลขาเข้า

ต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณอิมพีแดนซ์ของทางแยกที่ 6 ของวงจรสายป้อนภาพที่ 4.1 จากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของทางแยกที่ 6 มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของสายย่อย 5

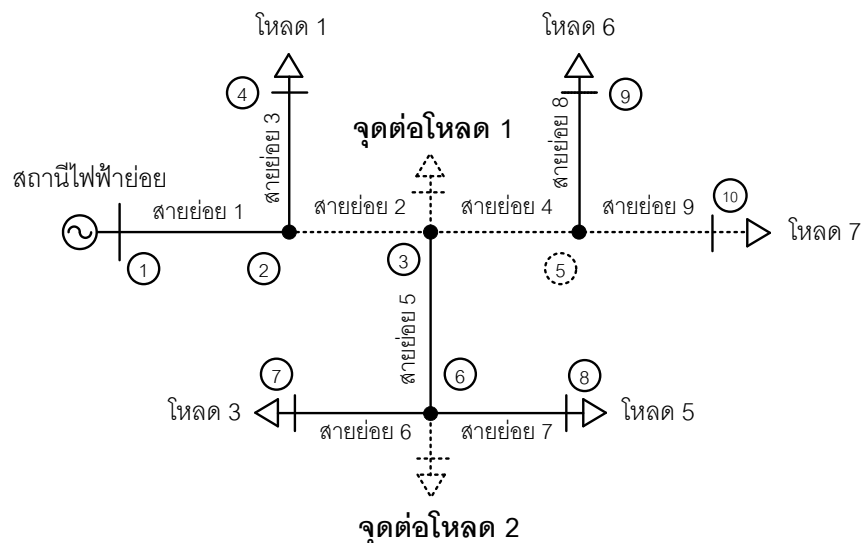
สายย่อย 6 สายย่อย 7 โหลด 3 โหลด 4 และโหลด 5 รวมกันทางไฟฟ้า สมการที่ (4.3) แสดงการคำนวณของอิมพีแดนซ์ของทางแยกนี้

$$[Z_{Lateral6}] = \begin{bmatrix} Z_{Lateral6a} \\ Z_{Lateral6b} \\ Z_{Lateral6c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Bus3a}/I_{Line5a} & 0 & 0 \\ 0 & V_{Bus3b}/I_{Line5b} & 0 \\ 0 & 0 & V_{Bus3c}/I_{Line5c} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

โดยที่ $Z_{Lateral6a}$, $Z_{Lateral6b}$, $Z_{Lateral6c}$ คือ อิมพีแดนซ์ของทางแยกที่ 6 เฟสเอ บี และซีตามลำดับ V_{Bus3a} , V_{Bus3b} , V_{Bus3c} คือ แรงดันที่บัส 3 เฟสเอ เฟสบี และเฟสซีตามลำดับ I_{Line5a} , I_{Line5b} , I_{Line5c} คือ กระแสที่ไหลเข้าสายย่อย 5 เฟสเอ เฟสบี และเฟสซีตามลำดับ

4.2.4.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์จุดต่อโหลด

พิจารณาวงจรสายป้อนภาพที่ 4.1 จะมีจุดต่อโหลดทั้งหมด 2 จุดต่อ



ภาพที่ 4.7 จุดต่อโหลดที่ 1 และจุดต่อโหลดที่ 2 ของสายป้อนระบบจำหน่ายตัวอย่าง

ในการระบุว่าระบบมีจุดต่อโหลดก็จุดต่อสามารถทำได้โดยการตรวจสอบว่าบัสที่โหลดต่ออยู่นั้น อยู่บนจุดเชื่อมของสายย่อยแต่ละสายหรือไม่ จากตารางที่ 2 จะทราบว่าบัสที่โหลดทั้งหมด 7 โหลด และแต่ละโหลดต่ออยู่ที่บัส 3 บัส 4 บัส 6 บัส 7 บัส 8 บัส 9 และบัส 10 จากนั้นนำบัสเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับแถว “จากบัส” ของแต่ละสายย่อยในตารางที่ 4.1 ถ้าบัสที่โหลดอยู่ต่ออยู่มีค่าเท่ากับ “จากบัส” ของสายย่อยสายใดสายหนึ่งแสดงว่าโหลดนั้นเป็นจุดต่อโหลด แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังภาพที่ 4.8

| สายย่อย | จากบัส | ไปบัส | อิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self impedance) (โอห์ม/กิโลเมตร) | อิมพีแดนซ์เชื่อมโยง (Mutual impedance) (โอห์ม/กิโลเมตร) | ความยาว สาย (กิโลเมตร) |
|---------|--------|-------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 0.4704+0.8405*j | 0.0599+0.3734*j | 0.92 |
| 2 | 2 | 3 | 0.4704+0.8405*j | 0.0599+0.3734*j | 1.21 |
| 3 | 2 | 4 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.33 |
| 4 | 3 | 5 | 0.8877+0.8588*j | 0.0658+0.5193*j | 0.85 |
| 5 | 3 | 6 | 0.8877+0.8588*j | 0.0658+0.5193*j | 0.51 |
| 6 | 6 | 8 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.27 |
| 7 | 6 | 7 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.18 |
| 8 | 5 | 9 | 0.3267+0.8285*j | 0.0598+0.4052*j | 0.39 |
| 9 | 5 | 10 | 0.4704+0.8405*j | 0.0599+0.3734*j | 2.1 |

บัสที่โหลดต่ออยู่

- บัส 3
- บัส 4
- บัส 6
- บัส 7
- บัส 8
- บัส 9
- บัส 10

เกิดจุดต่อโหลดที่ บัส 3 และบัส 6

ภาพที่ 4.8 การตรวจสอบจำนวนจุดต่อโหลดจากตารางข้อมูลขาเข้า

ต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณอิมพีแดนซ์ของจุดต่อโหลดที่ 2 ของวงจรสายป้อน ภาพที่ 4.1 สมการที่ (4.4) แสดงการคำนวณของอิมพีแดนซ์ของจุดต่อโหลดนี้

$$[Z_{Loadtap2}] = \begin{bmatrix} Z_{Loadtap2a} \\ Z_{Loadtap2b} \\ Z_{Loadtap2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Bus6a}/I_{Load4a} & 0 & 0 \\ 0 & V_{Bus6b}/I_{Load4b} & 0 \\ 0 & 0 & V_{Bus6c}/I_{Load4c} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

โดยที่ $Z_{Loadtap2a}$, $Z_{Loadtap6b}$, $Z_{Loadtap6c}$ คือ อิมพีแดนซ์ของจุดต่อโหลดที่ 2 เฟสเอ บี และซี ตามลำดับ

V_{Bus6a} , V_{Bus6b} , V_{Bus6c} คือ แรงดันที่บัส 6 เฟสเอ เฟสบี และเฟสซีตามลำดับ

I_{Load4a} , I_{Load4b} , I_{Load4c} คือ กระแสที่ไหลเข้าโหลด 4 เฟสเอ เฟสบี และเฟสซีตามลำดับ

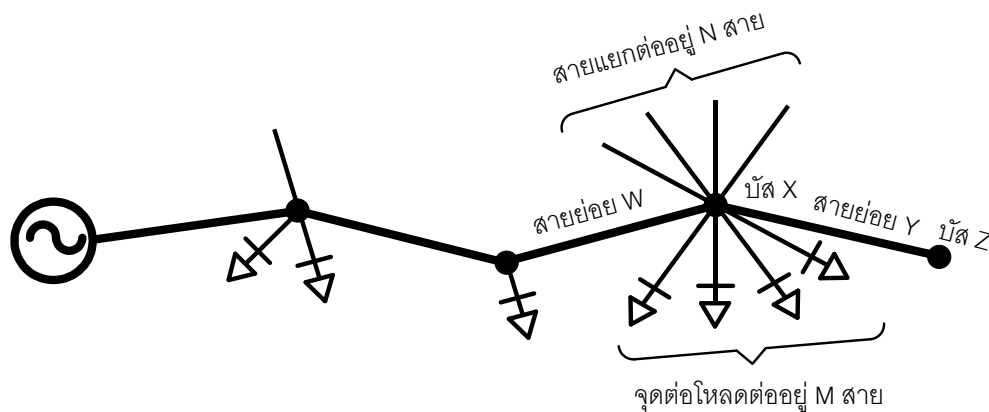
4.2.5 กระบวนการคำนวณกำลังไหลขณะเกิดความผิดพลาด

กระบวนการคำนวณกำลังไหลขณะเกิดความผิดพลาดนี้จะแตกต่างจากกระบวนการกำลังไหลก่อนเกิดความผิดพลาด โดยกระบวนการนี้จะกำหนดให้ระบบมีพฤติกรรมเป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่ทั้งระบบ และจะคำนวณกระแสในแต่ละสายย่อยและแรงดันของแต่ละบัสไปพร้อมๆกันเพียงหนึ่งรอบ ไม่มีการคำนวณแบบวนซ้ำ (Non-Iterative) ซึ่งค่าทั้งสองจะถูกคำนวณจากต้นสายป้อนไปจนกระทั่งปลายสายป้อน โดยใช้ค่าเฟสเซอร์กระแสขณะเกิดความผิดพลาดและเฟสเซอร์แรงดันขณะเกิดความผิดพลาดที่ได้จากกระบวนการในหัวข้อ 4.2.1 เป็นค่าเริ่มต้น

ข้อมูลขาเข้าที่ต้องการในการคำนวณกำลังไหลขณะเกิดความผิดพลาดของระบบใดๆ มี 3 ค่า ดังนี้

- 1) เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายป้อนขณะเกิดความผิดปกติ
- 2) เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายป้อนขณะเกิดความผิดปกติ
- 3) ตารางข้อมูลอิมพีแดนซ์และลักษณะการต่อของวงจร
- 4) อิมพีแดนซ์ทางแยก
- 5) อิมพีแดนซ์จุดต่อโหลด

จากตัวอย่างการคำนวณเบื้องต้นสามารถสรุปสมการสำหรับคำนวณกระแสในสายย่อยใด ๆ และแรงดันที่บัสใด ๆ ได้พิจารณาภาพที่ 4.9 แสดงสายย่อย Y ใดๆ ที่มีสายย่อย W เป็นสายย่อยต้นทางที่ต่อมาจากต้นสายป้อนหรือต้นสถานีไฟฟ้าย่อย มีบัส X เป็นบัสต้นทาง และมีบัส Z เป็นบัสปลายทาง



ภาพที่ 4.9 วงจรสายป้อนระบบจำหน่ายไฟฟ้าตัวอย่าง

เพราะฉะนั้นกระแสในสายย่อย Y ใดๆ สามารถคำนวณได้ว่า

$$\begin{bmatrix} I_{LineYa} \\ I_{LineYb} \\ I_{LineYc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{LineXa} \\ I_{LineXb} \\ I_{LineXc} \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} V_{BusXa} / Z_{Lateralia} \\ V_{BusXb} / Z_{Lateralib} \\ V_{BusXc} / Z_{Lateralic} \end{bmatrix} - \sum_{j=1}^M \begin{bmatrix} V_{BusXa} / Z_{Loadtapja} \\ V_{BusXb} / Z_{Loadtapjb} \\ V_{BusXc} / Z_{Loadtapjc} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่ I_{LineWa} , I_{LineWb} , I_{LineWc} คือ กระแสเฟสเอ เฟสบี และเฟสซีในสายย่อย W ซึ่งเป็นสายย่อยต้นทางที่ต่อมาจากต้นสายป้อนหรือต้นสถานีไฟฟ้าย่อย

V_{BusXa} , V_{BusXb} , V_{BusXc} คือ แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซีที่บัส X ซึ่งเป็นบัสต้นทางของสายย่อย Y

$Z_{Lateralia}$, $Z_{Lateralib}$, $Z_{Lateralic}$ คือ อิมพีแดนซ์เฟสเอ เฟสบี และเฟสซีของทางแยก

$Z_{Loadtapja}$, $Z_{Loadtapjb}$, $Z_{Loadtapjc}$ คือ อิมพีแดนซ์เฟสเอ เฟสบี และเฟสซีของจุดต่อโหลด j

N คือ จำนวนทางแยกทั้งหมดที่ต่อที่บัสต้นทาง X

M คือ จำนวนจุดต่อโหลดทั้งหมดที่ต่อที่บัสต้นทาง X

และแรงดันที่บัส Z ใดๆ สามารถคำนวณได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{BusZa} \\ V_{BusZb} \\ V_{BusZc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{BusXa} \\ V_{BusXb} \\ V_{BusXc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{LineYaa} & Z_{LineYab} & Z_{LineYac} \\ Z_{LineYba} & Z_{LineYbb} & Z_{LineYbc} \\ Z_{LineYca} & Z_{LineYcb} & Z_{LineYcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{LineYa} \\ I_{LineYb} \\ I_{LineYc} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

โดยที่ $V_{BusXa}, V_{BusXb}, V_{BusXc}$ คือ แรงดันเฟสเอ เฟสบี และเฟสซีของบัสต้นทาง X

$I_{LineYa}, I_{LineYb}, I_{LineYc}$ คือ กระแสเฟสเอ เฟสบี และเฟสซีในสายย่อย Y ซึ่งเป็นสายย่อยที่เชื่อมระหว่างบัส X และบัส Z

$Z_{LineYaa}, Z_{LineYbb}, Z_{LineYcc}$ คือ อิมพีแดนซ์ตัวเองของสายย่อย Y

$Z_{LineYab}, Z_{LineYac}, Z_{LineYba}, Z_{LineYbc}, Z_{LineYca}, Z_{LineYcb}$ คือ อิมพีแดนซ์ร่วมของสายย่อย Y ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้และจะนำไปใช้ในกระบวนการถัดไปมี 2 ค่า ดังนี้

- 1) เฟสเซอร์กระแสในแต่ละสายย่อยขณะเกิดความผิดปกติ
- 2) เฟสเซอร์แรงดันที่แต่ละบัสขณะเกิดความผิดปกติ

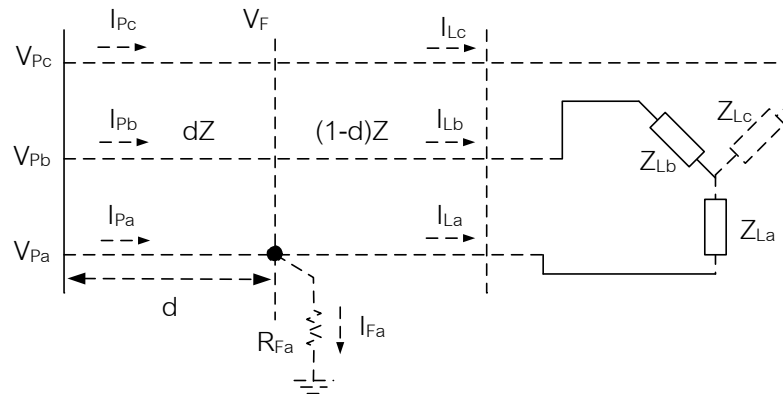
4.2.6 กระบวนการระบุตำแหน่งผิดปกติในแต่ละสายย่อย

กระบวนการนี้จะจำลองความผิดปกติตามประเภทความผิดปกติที่ทราบล่วงหน้าในสายย่อยทุกสาย ถ้าระบบมีสายย่อย n สาย กระบวนการนี้จะจำลองความผิดปกติ n ครั้ง ในสายย่อยแต่ละสาย เพื่อตรวจสอบว่าความผิดปกติมีโอกาสเกิดขึ้นที่สายย่อยทั้งหมดกี่สาย

ข้อมูลขาเข้าที่ต้องการในกระบวนการนี้ มี 6 ค่า ดังนี้

- 1) เฟสเซอร์กระแสในแต่ละสายย่อยก่อนเกิดความผิดปกติ
- 2) เฟสเซอร์แรงดันในแต่ละบัสก่อนเกิดความผิดปกติ
- 3) เฟสเซอร์กระแสในแต่ละสายย่อยขณะเกิดความผิดปกติ
- 4) เฟสเซอร์แรงดันที่แต่ละบัสขณะเกิดความผิดปกติ
- 5) อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของสายย่อย
- 6) ประเภทความผิดปกติที่จำแนกไว้ล่วงหน้า

ต่อไปนี้จะแสดงกระบวนการคำนวณตำแหน่งผิดปกติและความต้านทานผิดปกติของความผิดปกติประเภทเฟสเอเฟสลงดินในสายย่อยใดๆ พิจารณาภาพที่ 4.10 แสดงสายย่อยที่เกิดความผิดปกติประเภทเฟสเอลงดิน



ภาพที่ 4.10 วงจรสมมูลของสายย่อยใดๆที่เกิดความผิดปกติประเภทเฟสแอลงดิน
ขั้นตอนที่ 1 จำลองวงจรสมมูลของสายย่อยตามประเภทความผิดปกติที่ทราบล่วงหน้า
ขั้นตอนที่ 2 สมมติให้กระแสไหลตขณะเกิดความผิดปกติมีค่าเท่ากับกระแสไหลก่อนเกิด
ความผิดปกติ

$$I_{La} = I_{La(\text{prefault})} \quad (4.7)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณกระแสผิดปกติจากสูตรต่อไปนี้

$$I_{Fa} = I_{Pa} - I_{La} \quad (4.8)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาตำแหน่งผิดปกติและค่าความต้านทานผิดปกติ จากภาพที่ 4.10 สามารถ
เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ว่า

$$V_{Pa} = d \times (Z_{La} I_a + Z_{Lb} I_b + Z_{Lc} I_c) + R_{Fa} I_{Fa} \quad (4.9)$$

ส่วนจริงของสมการที่ (4.9) จะได้ว่า

$$V_{Par} = d \times (Z_{Laar} I_{ar} - Z_{Laa} I_{ai} + Z_{Labr} I_{br} - Z_{Labi} I_{bi} + Z_{Lacr} I_{cr} - Z_{Laci} I_{ci}) + R_{Fa} I_{Far} \quad (4.10)$$

ส่วนจินตภาพของสมการที่ (4.9) จะได้ว่า

$$V_{Pai} = d \times (Z_{Laar} I_{ai} + Z_{Laa} I_{ar} + Z_{Labr} I_{bi} + Z_{Labi} I_{br} + Z_{Lacr} I_{ci} + Z_{Laci} I_{cr}) + R_{Fa} I_{Fai} \quad (4.11)$$

เมื่อแก้สมการ (4.10) และ (4.11) เพื่อหาค่าตำแหน่งผิดปกติ (d) และค่าความต้านทานผิดปกติ
(R_F) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} d \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1a} & I_{Far} \\ K_{2a} & I_{Fai} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{Par} \\ V_{Pai} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

โดยที่

$$K_{1a} = \sum_{k=a}^c (Z_{Lakr} I_{Pkr} - Z_{Laki} I_{Pki})$$

$$K_{2a} = \sum_{k=a}^c (Z_{Lakr} I_{Pki} - Z_{Laki} I_{Pkr})$$

ชั้นที่ตอน 5 คำนวณแรงดันที่ตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Pa} \\ V_{Pb} \\ V_{Pc} \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ชั้นตอน 6 คำนวณกระแสไหลคืนใหม่จากแรงดันที่ได้จากชั้นตอนที่ 5 ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ชั้นตอนที่ 7 กลับไปที่ชั้นตอนที่ 2 ด้วยค่ากระแสผิดพลาดใหม่ (I_{Fa}) จากนั้นทำซ้ำชั้นตอนเดิมจนกระทั่ง ตำแหน่งผิดพลาด (d) นั้นเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

การประมาณกระแสไหลคืนขณะเกิดความผิดพลาด

เนื่องจากกระบวนการที่นำเสนอได้กำหนดให้ขณะเกิดความผิดพลาดระบบมีพฤติกรรมเป็นอิมพีแดนซ์คงที่ ดังนั้นกระแสไหลคืนใหม่ในชั้นตอน 6 สามารถประมาณค่าได้จากค่าแรงดันและกระแสก่อนเกิดความผิดพลาดได้ จากภาพที่ 4.10 กระแสไหลคืนเฟสเอสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I_{La} = [Y_{L11} \quad Y_{L12} \quad Y_{L13}] [V_{Fa} \quad V_{Fb} \quad V_{Fc}]^T \quad (4.14)$$

โดยที่ Y_L คือ ค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์หลังตำแหน่งผิดพลาด ซึ่งมีค่าเท่ากับแอดมิตแตนซ์สายย่อยหลังตำแหน่งผิดพลาดรวมกับค่าแอดมิตแตนซ์ไหลคืน สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Y_L = [(1-d)Z_L + Z_R]^{-1} \quad (4.15)$$

ซึ่งค่า Y_{L12} และ Y_{L13} นั้นเป็นค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างเฟส (Mutual) จึงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ Y_{L11} ทำให้สามารถละเลยค่าสองค่านี้ได้ ดังนั้น จะสามารถประมาณค่าแอดมิตแตนซ์ขณะเกิดความผิดพลาดที่เฟสเอได้ว่า

$$Y_{L11} = \frac{I_{La}(\text{prefault})}{V_{Fa}(\text{prefault})} \quad (4.16)$$

ดังนั้น จะสามารถหาค่ากระแสไหลคืนขณะเกิดความผิดพลาดได้ว่า

$$I_{La}(\text{duringfault}) = Y_{L11} \times V_{Fa}(\text{duringfault}) \quad (4.17)$$

4.2.7 กระบวนการวิเคราะห์ตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัด

จากเฟสเซอร์กระแสก่อนเกิดความผิดพลาดและเฟสเซอร์แรงดันก่อนเกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จากหัวข้อ 4.2.1 จะสามารถนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงก่อนเกิดความผิดพลาดได้ว่า

$$P_{pre} = \text{real}(V_{pre} * \text{conj}(I_{pre})) \quad (4.18)$$

โดยที่ P_{pre} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบก่อนเกิดความผิดพลาด

V_{pre} คือ เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายปีก่อนเกิดความผิดพลาด

I_{pre} คือ เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายปีก่อนเกิดความผิดพลาด

real คือ ส่วนจริงของสมการ

conj คือ คอนจูเกตของจำนวนเชิงซ้อน

และจากเฟสเซอร์ของกระแสหลังเกิดความผิดพลาดและเฟสเซอร์แรงดันหลังเกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จากหัวข้อ 4.2.1 จะสามารถนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงหลังเกิดความผิดพลาดได้ว่า

$$P_{post} = \text{real}(V_{post} * \text{conj}(I_{post})) \quad (4.19)$$

โดยที่ P_{post} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เหลือของระบบหลังอุปกรณ์ป้องกันทำงาน

V_{post} คือ เฟสเซอร์แรงดันที่ต้นสายป้อนหลังเกิดความผิดพลาด

I_{post} คือ เฟสเซอร์กระแสที่ต้นสายป้อนหลังเกิดความผิดพลาด

real คือ ส่วนจริงของสมการ

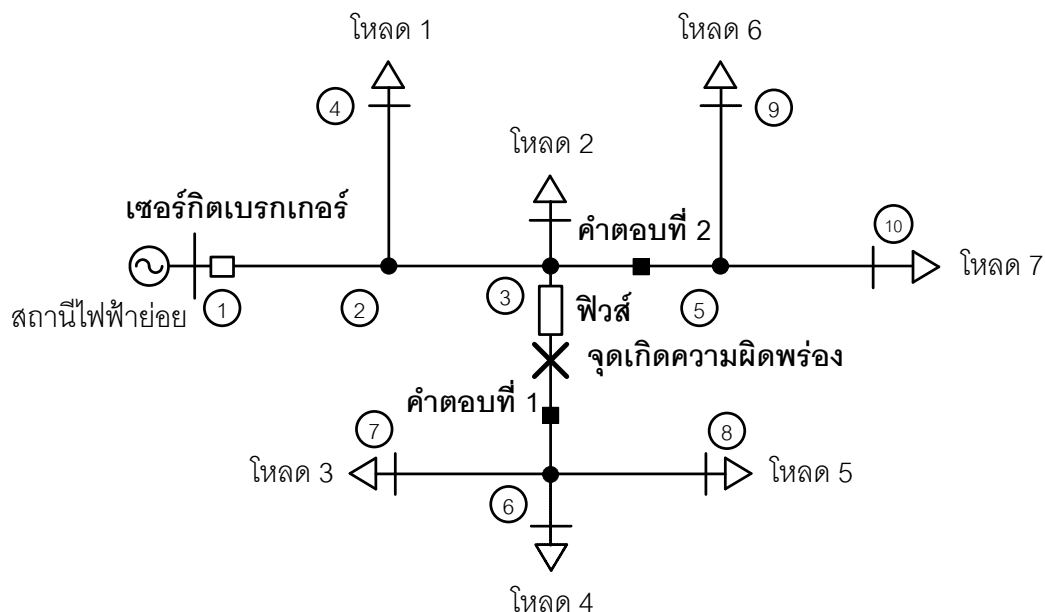
conj คือ คอนจูเกตของจำนวนเชิงซ้อน

จากกำลังไฟฟ้าจริงทั้งสองค่าเบื้องต้น สามารถนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตัดได้ว่า

$$P_{interrupted} = P_{pre} - P_{post} \quad (4.20)$$

โดยที่ $P_{interrupted}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตัดออกจากระบบเมื่ออุปกรณ์ป้องกันทำงาน

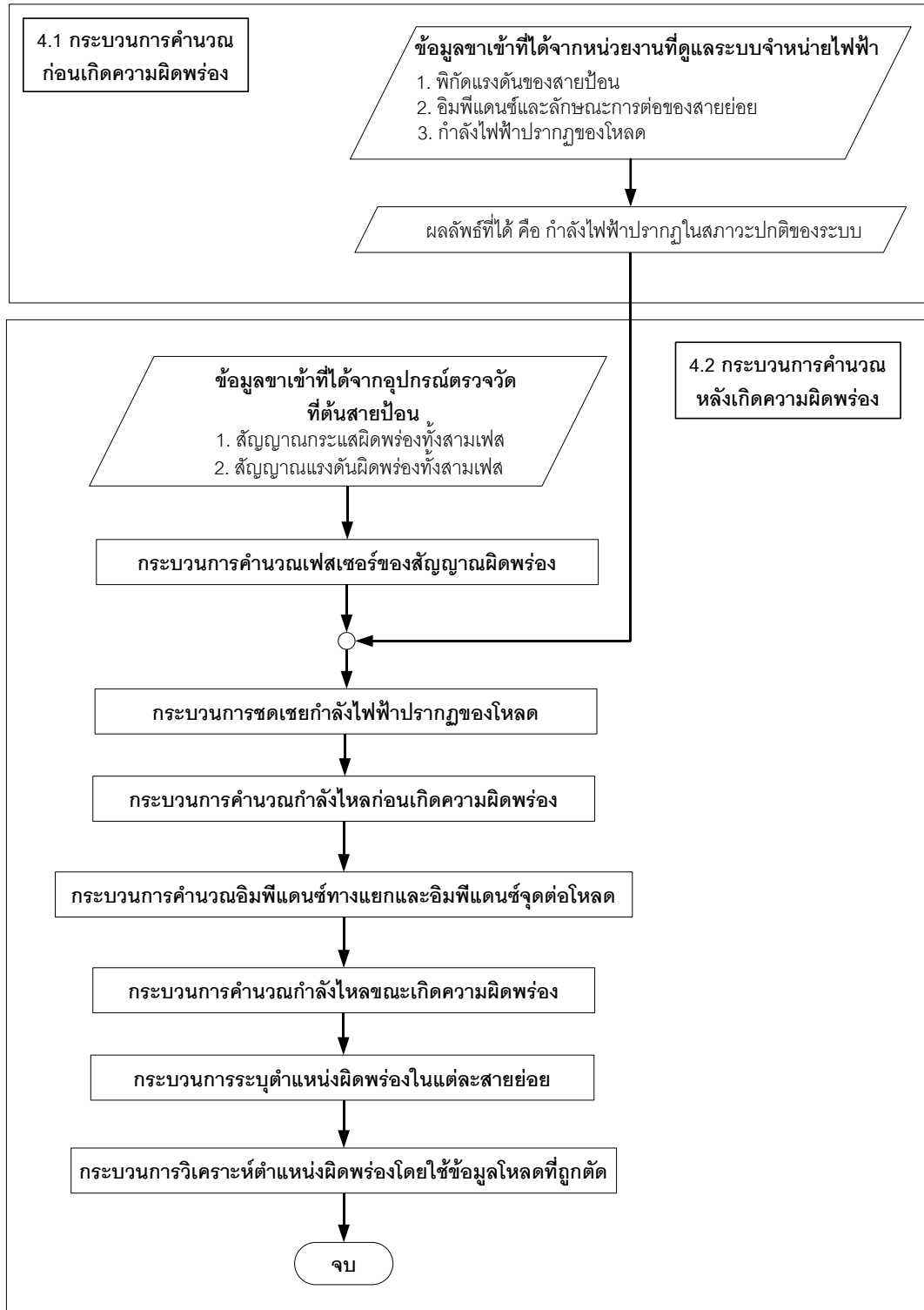
ต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพลาด โดยใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัด จากวงจรภาพที่ 4.1 กำหนดให้เกิดความผิดพลาดขึ้นบนสายย่อยที่อยู่ระหว่างบัส 3 และบัส 6 จากกระบวนการหาตำแหน่งผิดพลาดโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์สมมติว่าได้ตำแหน่งผิดพลาด 2 ตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 4.11 ซึ่งเครื่องหมายกากบาท คือ จุดเกิดความผิดพลาด และเครื่องหมายสี่เหลี่ยมคือ ตำแหน่งผิดพลาด 2 ตำแหน่ง ที่ได้จากวิธีใช้ค่าอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 4.11 วงจรตัวอย่างในการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติโดยใช้ข้อมูลโหนดที่ถูกตัด

จากภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นที่ค้ำตอปที่ 2 จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นสายป้อนทำการตัดวงจรและทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตัดออกจากระบบมีค่าประมาณกำลังไฟฟ้าจริงของโหนดทั้งระบบ ซึ่งจากตารางที่ 4.2 สามารถรวมกำลังไฟฟ้าจริงของโหนดทั้งระบบได้เท่ากับ 601.49 กิโลวัตต์ แต่ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นที่ค้ำตอปที่ 1 ฟิวส์จะตัดวงจรทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกตัดออกมีค่าประมาณกำลังไฟฟ้าจริงของโหนด 3 โหนด 4 และโหนด 5 รวมกันจากตารางที่ 4.2 สามารถรวมกำลังไฟฟ้าจริงของโหนด 3 โหนด 4 และโหนด 5 ได้เท่ากับ 430.05 กิโลวัตต์ ดังนั้น ในกรณีนี้ถ้าการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหนดที่ถูกตัดไปมีค่าประมาณ 430 กิโลวัตต์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติมากที่สุดคือค้ำตอปที่ 1

จากกระบวนการระบุตำแหน่งผิดปกติที่นำเสนอทั้งหมดสามารถเขียนเป็นแผนผังของกระบวนการได้ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แผนผังกระบวนการระบุตำแหน่งผิดปกติที่น่าเสนอ

บทที่ 5

การทดสอบและการวิเคราะห์ผล

บทนี้จะแสดงการทดสอบและวิเคราะห์ผลของกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดที่นำเสนอ โดยจะทดสอบกับระบบที่จำลองขึ้นในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆของระบบนั้นเป็นข้อมูลจริงที่ได้มาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

5.1 ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่นำมาใช้ทดสอบเป็นระบบที่มีแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นสายป้อนหนึ่งของสถานีไฟฟ้าย่อยบางมูลนาค จังหวัดพิจิตร มีบัสทั้งหมด 69 บัส มีความยาวสายย่อยรวมกันทั้งหมดเท่ากับ 29.73 กิโลเมตร มีโหลดทั้งหมด 43 ตัว มีสายย่อยทั้งหมด 91 เส้น นอกจากนี้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ต้นสายป้อน ยังมีอุปกรณ์ป้องกันในสายป้อน ได้แก่ ฟิวส์ 9 ตัว และพารามิเตอร์ต่างๆของระบบนี้ได้นำมาจากการโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิเคราะห์ทางไฟฟ้ากำลัง

5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนในการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: สร้างระบบจำลองขึ้นและพัฒนาโปรแกรมการระบุตำแหน่งผิดพลาดในโปรแกรม

MATLAB

ขั้นตอนที่ 2: ทดสอบกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดตามรูปแบบการทดสอบ 2 รูปแบบ ดังนี้

1) รูปแบบที่ 1

- 13 ตำแหน่งผิดพลาด
- 4 ประเภทความผิดพลาด ได้แก่ เฟสเอลงดิน เฟสบีต่อเฟสซี เฟสเอต่อเฟสซีลงดิน และสามเฟสลงดิน
- 4 ความต้านทานผิดพลาด ได้แก่ 1E-6 โอห์ม 20 โอห์ม 40 โอห์ม และ 80 โอห์ม
- โหลดมีสภาวะเป็นเป็นปกติ
- จำนวนเหตุการณ์จำลองทั้งหมด 208 เหตุการณ์

2) รูปแบบที่ 2

- 5 ตำแหน่งติดตั้ง
- 4 ประเภทความผิดพลาด ได้แก่ เฟสเอลงดิน เฟสบีต่อเฟสซี เฟสเอต่อเฟสซีลงดิน และสามเฟสลงดิน
- 1 ความต้านทานผิดพลาด ได้แก่ 80 โอห์ม
- โหลดแต่ละตัวเพิ่มขึ้นเฉลี่ย $\pm 10\% \pm 20\% \pm 30\%$
- จำนวนเหตุการณ์จำลองทั้งหมดเท่ากับ 120 เหตุการณ์

โดยที่เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะทางผิดพลาดสามารถคำนวณได้ว่า

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Actual distance} - \text{Estimate distance}|}{\text{Total line length}} \times 100 \quad (5.1)$$

โดยที่

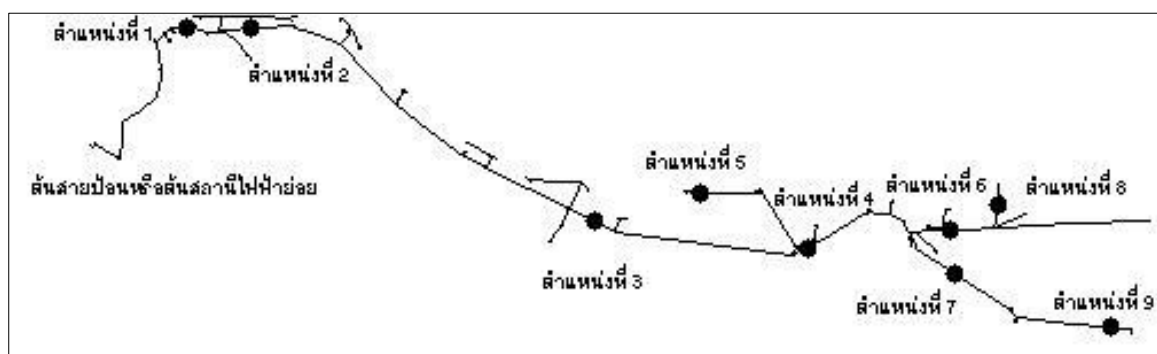
Actual distance คือ ระยะผิดพลาดที่จำลองขึ้นในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems

Estimate distance คือ ระยะผิดพลาดที่ได้จากกระบวนการที่นำเสนอ

Total distance คือ ความยาวของสายย่อยทั้งหมดรวมกัน

ขั้นตอนที่ 3: วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4: สรุปผลการทดสอบ

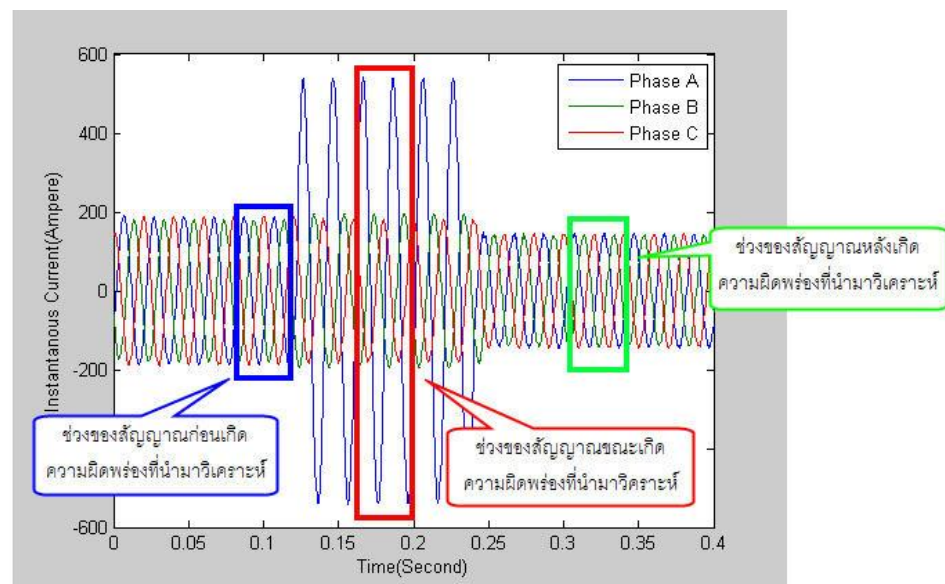


ภาพที่ 5.1 วงจรสายป้อนสถานีไฟฟ้าย่อยบางมูลนาคและตำแหน่งผิดพลาดที่จำลอง

5.3 การจำลองเหตุการณ์ผิดพ่วง

รายละเอียดในการจำลองตำแหน่งผิดพ่วงในโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystems รายละเอียด มีดังนี้

- ความถี่สุ่ม (Sampling frequency) เท่ากับ 2000 เฮิรต
- สัญญาณผิดพ่วงก่อนเกิดความผิดพ่วงใช้ 2 คาบก่อนเกิดความผิดพ่วง
- สัญญาณผิดพ่วงขณะเกิดความผิดพ่วงใช้ 2 คาบหลังเกิดความผิดพ่วง หรือคาบที่ 3-4 หลังเกิดความผิดพ่วง
- สัญญาณผิดพ่วงหลังเกิดความผิดพ่วงใช้ 2 คาบหลังอุปกรณ์ป้องกันทำงาน



ภาพที่ 5.2 ช่วงของสัญญาณผิดพ่วงที่นำมาวิเคราะห์

5.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ เพื่อแยกการวิเคราะห์การหาตำแหน่งผิดพ่วงของกระบวนการที่นำเสนอและผลกระทบต่างๆต่อกระบวนการ ดังนี้

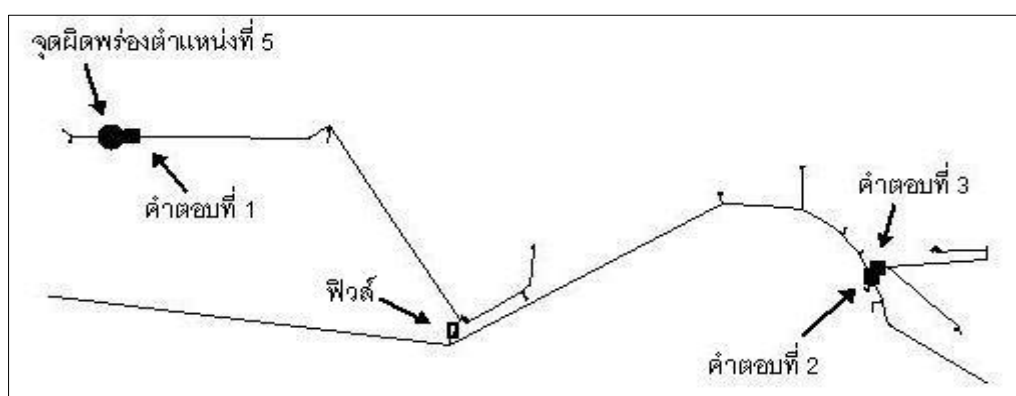
5.4.1 การวิเคราะห์ตำแหน่งผิดพ่วงโดยใช้ข้อมูลโหลดตัด

การระบุตำแหน่งผิดพ่วงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล โดยใช้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์นั้นจะให้ตำแหน่งผิดพ่วงได้หลายคำตอบ ดังนั้น จึงต้องมีวิธีการเพิ่มเติมในการตัดคำตอบที่ผิดออก เพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องที่สุด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัดออกไป

หลังจากอุปกรณ์ป้องกันทำงานเป็นวิธีการเพิ่มเติมดังกล่าว เนื่องจากเหตุการณ์ผิดปกติที่จำลองมีจำนวนมาก จึงขอแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดปกติ 3 เหตุการณ์เท่านั้น

เหตุการณ์ผิดปกติที่ 1

เป็นเหตุการณ์ที่จำลองตามรูปแบบที่ 1 ความผิดปกติประเภทเฟสบีต่อเฟสซี เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 5 ความต้านทานผิดปกติ 40 โอห์ม จากกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์จะได้ตำแหน่งผิดปกติทั้งหมด 3 ตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 5.2

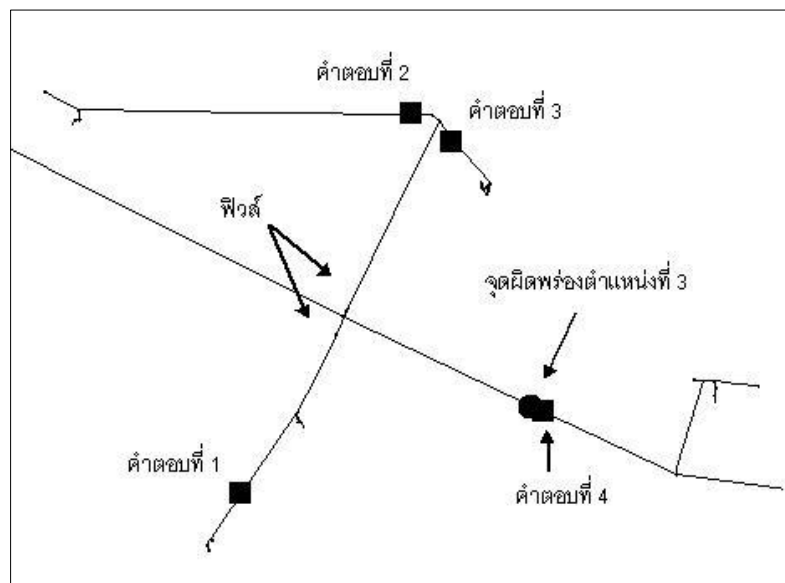


ภาพที่ 5.3 ค่าตอบที่ได้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดปกติที่ 5

จากสัญญาณกระแสและแรงดันก่อนเกิดความผิดปกติจะได้กำลังไฟฟ้าจริงก่อนเกิดความผิดปกติเท่ากับ 3659.28 กิโลวัตต์ และจากกระบวนการคำนวณโหลดที่ถูกตัดจะได้ค่าโหลดที่ถูกตัดเท่ากับ 608 kW ดังนั้น ถ้าความผิดปกติเกิดขึ้นที่ค่าตอบที่ 2 และค่าตอบที่ 3 เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้นสายป้อนต้องตัดวงจรและโหลดที่ถูกตัดต้องมีค่าประมาณ 3233 กิโลวัตต์ จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ค่าตอบที่ 1 เป็นค่าตอบที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติมากที่สุด เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าตอบที่ 1 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 0.393 % เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของค่าตอบที่ 2 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 21.124 % เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของค่าตอบที่ 3 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 21.206 % จะเห็นว่าการใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัดสามารถช่วยวิเคราะห์การตำแหน่งผิดปกติให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เหตุการณ์ผิดปกติที่ 2

เป็นเหตุการณ์ที่จำลองตามรูปแบบที่ 1 ความผิดปกติประเภทเฟสแอลลงดิน เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3 ความต้านทานผิดปกติ 20 โอห์ม จากกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์จะได้ตำแหน่งผิดปกติทั้งหมด 4 ตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 5.3

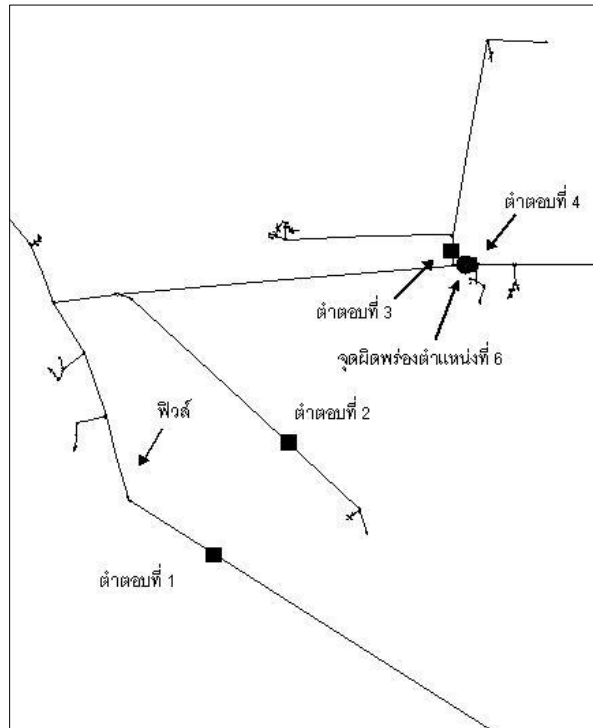


ภาพที่ 5.4 คำตอบที่ได้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดปกติที่ 3

จากสัญญาณกระแสและแรงดันก่อนเกิดความผิดปกติจะได้กำลังไฟฟ้าจริงก่อนเกิดความผิดปกติเท่ากับ 3659.28 กิโลวัตต์ และจากกระบวนการคำนวณโหลดที่ถูกตัดจะได้ค่าโหลดที่ถูกตัดเท่ากับ 3658.7 กิโลวัตต์ ดังนั้น ถ้าความผิดปกติเกิดขึ้นที่คำตอบที่ 1 คำตอบที่ 2 และคำตอบที่ 3 ฟิวส์ที่ต้นสายแยกต้องตัดวงจรและโหลดที่ถูกตัดต้องน้อยกว่า 3233 กิโลวัตต์มาก จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า คำตอบที่ 4 เป็นคำตอบที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติมากที่สุด เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของคำตอบที่ 1 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 4.62 % เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบที่ 2 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 4.569 % เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบที่ 3 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 4.672 % และเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบที่ 4 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 0.001%

เหตุการณ์ผิดปกติที่ 3

เป็นเหตุการณ์ที่จำลองตามรูปแบบที่ 1 ความผิดปกติประเภทเฟสต่อเฟสชี่ลงดิน เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 6 ความต้านทานผิดปกติ 40 โอห์ม จากกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ จะได้ตำแหน่งผิดปกติทั้งหมด 4 ตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.5 คำตอบที่ได้วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดปกติที่ 6

จากสัญญาณกระแสและแรงดันก่อนเกิดความผิดปกติจะได้กำลังไฟฟ้าจริงก่อนเกิดความผิดปกติเท่ากับ 3659.28 กิโลวัตต์ และจากกระบวนการคำนวณโหลดที่ถูกตัดจะได้ค่าโหลดที่ถูกตัดเท่ากับ 3658.7 กิโลวัตต์ ดังนั้น ถ้าความผิดปกติเกิดขึ้นที่คำตอบที่ 1 ฟิวส์ที่ต้นสายสายแยกต้องตัดวงจรและโหลดที่ถูกตัดต้องมีค่าต่างจาก 3659.28 กิโลวัตต์มาก จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า คำตอบที่ 2 คำตอบที่ 3 และคำตอบที่ 4 มีโอกาสเกิดความผิดปกติได้เท่ากัน แต่คำตอบที่ 1 โอกาสเกิดน้อยที่สุด เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของคำตอบที่ 1 เท่ากับ 4.148 % เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบที่ 2 เท่ากับ 3.565 % เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบที่ 3 เท่ากับ 0.109 % และ เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของคำตอบที่ 4 กับจุดผิดปกติเท่ากับ 0.011 % สำหรับเหตุการณ์นี้คำตอบที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติเท่ากันมีสามคำตอบ

ผลการทดสอบทั้ง 108 เหตุการณ์แสดงดังตารางที่ 5.1 ถึง 5.9 เพื่อแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัดนั้นสามารถตัดคำตอบที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติน้อยออกไป ทำให้คำตอบที่ให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุดมีค่าลดลง

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 1

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | SLG | 1 E-6 | 8.32 | 8.32 | 0.028 | 0.028 |
| | | 20 | 16.96 | 16.96 | 0.057 | 0.057 |
| | | 40 | 55.9 | 55.9 | 0.188 | 0.188 |
| | | 80 | 174.12 | 139.86 | 0.586 | 0.47 |
| | LL | 1 E-6 | 7.19 | 7.19 | 0.024 | 0.024 |
| | | 20 | 26.27 | 26.27 | 0.088 | 0.088 |
| | | 40 | 97.98 | 97.98 | 0.33 | 0.33 |
| | | 80 | 7.19 | 331.52 | 0.024 | 1.115 |
| | LLG | 1 E-6 | 3.95 | 3.95 | 0.013 | 0.013 |
| | | 20 | 4.47 | 4.47 | 0.015 | 0.015 |
| | | 40 | 18.33 | 18.33 | 0.062 | 0.062 |
| | | 80 | 35.47 | 35.47 | 0.119 | 0.119 |
| | Three | 1 E-6 | 5.83 | 5.83 | 0.02 | 0.02 |
| | | 20 | 0.88 | 0.88 | 0.003 | 0.003 |
| | | 40 | 10.07 | 10.07 | 0.034 | 0.034 |
| | | 80 | 47.96 | 47.96 | 0.161 | 0.161 |

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 2

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 2 | SLG | 1 E-6 | 988.82 | 11.31 | 3.326 | 0.038 |
| | | 20 | 100.91 | 15.9 | 3.394 | 0.053 |
| | | 40 | 1012.59 | 56.67 | 3.406 | 0.191 |
| | | 80 | 970.01 | 176.53 | 3.262 | 0.594 |
| | LL | 1 E-6 | 1043.45 | 7.41 | 3.509 | 0.025 |
| | | 20 | 1048.03 | 17.37 | 3.525 | 0.058 |
| | | 40 | 97.98 | 97.98 | 0.33 | 0.33 |
| | | 80 | 812.15 | 241.75 | 2.732 | 0.813 |
| | LLG | 1 E-6 | 1032.3 | 4.37 | 3.472 | 0.015 |
| | | 20 | 1057.01 | 4.97 | 3.555 | 0.017 |
| | | 40 | 1062.87 | 13.26 | 3.575 | 0.045 |
| | | 80 | 1077.31 | 25.5 | 3.623 | 0.086 |
| | Three | 1 E-6 | 1041.72 | 6.03 | 3.504 | 0.02 |
| | | 20 | 1055.37 | 2.26 | 3.55 | 0.008 |
| | | 40 | 1063.13 | 5.79 | 3.576 | 0.019 |
| | | 80 | 1060.85 | 33.44 | 3.568 | 0.112 |

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 3

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 3 | SLG | 1 E-6 | 988.82 | 11.31 | 3.326 | 0.038 |
| | | 20 | 100.91 | 15.9 | 3.394 | 0.053 |
| | | 40 | 1012.59 | 56.67 | 3.406 | 0.191 |
| | | 80 | 0970.01 | 176.53 | 3.262 | 0.594 |
| | LL | 1 E-6 | 1043.45 | 7.41 | 3.509 | 0.025 |
| | | 20 | 1048.03 | 17.37 | 3.525 | 0.058 |
| | | 40 | 97.98 | 97.98 | 0.33 | 0.33 |
| | | 80 | 812.15 | 241.75 | 2.732 | 0.813 |
| | LLG | 1 E-6 | 1032.3 | 4.37 | 3.472 | 0.015 |
| | | 20 | 1057.01 | 4.97 | 3.555 | 0.017 |
| | | 40 | 106287 | 13.26 | 3.575 | 0.045 |
| | | 80 | 1077.31 | 25.5 | 3.623 | 0.086 |
| | Three | 1 E-6 | 1041.72 | 6.03 | 3.504 | 0.02 |
| | | 20 | 1055.37 | 2.26 | 3.55 | 0.008 |
| | | 40 | 1063.13 | 5.79 | 3.576 | 0.019 |
| | | 80 | 1060.85 | 33.44 | 3.568 | 0.112 |

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 4

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 4 | SLG | 1 E-6 | 156.5 | 15.65 | 0.053 | 0.053 |
| | | 20 | 13.83 | 13.83 | 0.047 | 0.047 |
| | | 40 | 58.48 | 58.48 | 0.197 | 0.197 |
| | | 80 | 952.5 | 190.13 | 3.204 | 0.639 |
| | LL | 1 E-6 | 11.35 | 11.35 | 0.038 | 0.038 |
| | | 20 | 15.63 | 15.63 | 0.053 | 0.053 |
| | | 40 | 70.75 | 70.75 | 0.238 | 0.238 |
| | | 80 | 887.51 | 249.01 | 2.985 | 0.838 |
| | LLG | 1 E-6 | 7.06 | 7.06 | 0.024 | 0.024 |
| | | 20 | 7.46 | 7.46 | 0.025 | 0.025 |
| | | 40 | 0.58 | 0.58 | 0.002 | 0.002 |
| | | 80 | 25.28 | 25.28 | 0.085 | 0.085 |
| | Three | 1 E-6 | 9.26 | 9.26 | 0.031 | 0.031 |
| | | 20 | 4.79 | 4.79 | 0.016 | 0.016 |
| | | 40 | 3.99 | 3.99 | 0.013 | 0.013 |
| | | 80 | 33.15 | 33.15 | 0.111 | 0.111 |

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 5

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 5 | SLG | 1 E-6 | 227.18 | 19.41 | 0.764 | 0.065 |
| | | 20 | 188.75 | 8.05 | 0.635 | 0.027 |
| | | 40 | 135.55 | 53.93 | 0.456 | 0.181 |
| | | 80 | 212.81 | 212.81 | 0.716 | 0.716 |
| | LL | 1 E-6 | 224.3 | 15.65 | 0.754 | 0.053 |
| | | 20 | 190.74 | 10.99 | 0.642 | 0.037 |
| | | 40 | 129.48 | 69.6 | 0.435 | 0.234 |
| | | 80 | 259.45 | 259.45 | 0.873 | 0.873 |
| | LLG | 1 E-6 | 219.59 | 11.41 | 0.739 | 0.038 |
| | | 20 | 216.31 | 11.8 | 0.728 | 0.04 |
| | | 40 | 206.2 | 5.12 | 0.694 | 0.017 |
| | | 80 | 174.19 | 22.3 | 0.586 | 0.075 |
| | Three | 1 E-6 | 221.89 | 13.41 | 0.746 | 0.045 |
| | | 20 | 214.29 | 9.21 | 0.721 | 0.031 |
| | | 40 | 202.53 | 0.56 | 0.681 | 0.002 |
| | | 80 | 167.76 | 30.13 | 0.564 | 0.101 |

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 6

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 6 | SLG | 1 E-6 | 20.53 | 20.53 | 0.069 | 0.069 |
| | | 20 | 8.68 | 8.68 | 0.029 | 0.029 |
| | | 40 | 54.56 | 54.56 | 0.184 | 0.184 |
| | | 80 | 196.96 | 196.96 | 0.662 | 0.662 |
| | LL | 1 E-6 | 15.56 | 15.56 | 0.052 | 0.052 |
| | | 20 | 13.71 | 13.71 | 0.046 | 0.046 |
| | | 40 | 71.73 | 71.73 | 0.241 | 0.241 |
| | | 80 | 255.96 | 255.96 | 0.861 | 0.861 |
| | LLG | 1 E-6 | 9.93 | 9.93 | 0.033 | 0.033 |
| | | 20 | 10.07 | 10.07 | 0.034 | 0.034 |
| | | 40 | 2.78 | 2.78 | 0.009 | 0.009 |
| | | 80 | 24.47 | 24.47 | 0.082 | 0.082 |
| | Three | 1 E-6 | 12.69 | 12.69 | 0.043 | 0.043 |
| | | 20 | 7.47 | 7.47 | 0.025 | 0.025 |
| | | 40 | 2.05 | 2.05 | 0.007 | 0.007 |
| | | 80 | 32.77 | 32.77 | 0.11 | 0.11 |

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 7

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 7 | SLG | 1 E-6 | 895.72 | 25.28 | 3.013 | 0.085 |
| | | 20 | 907.54 | 0.12 | 3.052 | 0.00 |
| | | 40 | 900.31 | 42.45 | 3.028 | 0.143 |
| | | 80 | 835.8 | 171.86 | 2.811 | 0.578 |
| | LL | 1 E-6 | 887.13 | 19.74 | 2.984 | 0.066 |
| | | 20 | 876.77 | 11.7 | 2.949 | 0.039 |
| | | 40 | 832.85 | 73.5 | 2.801 | 0.247 |
| | | 80 | 648.54 | 270.11 | 2.181 | 0.908 |
| | LLG | 1 E-6 | 881.11 | 12.69 | 2.963 | 0.043 |
| | | 20 | 893.51 | 12.82 | 3.005 | 0.043 |
| | | 40 | 898.34 | 6.14 | 3.021 | 0.021 |
| | | 80 | 891.8 | 23.06 | 2.999 | 0.078 |
| | Three | 1 E-6 | 883.79 | 16.09 | 2.972 | 0.054 |
| | | 20 | 888.76 | 10.27 | 2.989 | 0.035 |
| | | 40 | 889.23 | 0.00008 | 2.991 | 0.00 |
| | | 80 | 876.56 | 32.37 | 2.948 | 0.109 |

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 8

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 8 | SLG | 1 E-6 | 711.15 | 33.9 | 2.392 | 0.114 |
| | | 20 | 717.16 | 18.65 | 2.412 | 0.063 |
| | | 40 | 704.12 | 14.95 | 2.368 | 0.05 |
| | | 80 | 627.6 | 124.35 | 2.111 | 0.418 |
| | LL | 1 E-6 | 700.44 | 26.81 | 2.356 | 0.09 |
| | | 20 | 677.45 | 9.32 | 2.278 | 0.031 |
| | | 40 | 619.42 | 78.68 | 2.083 | 0.265 |
| | | 80 | 404.86 | 298.35 | 1.362 | 1.003 |
| | LLG | 1 E-6 | 692.22 | 17.29 | 2.328 | 0.058 |
| | | 20 | 699.22 | 17.34 | 2.352 | 0.058 |
| | | 40 | 695.65 | 4E-05 | 2.34 | 0.00 |
| | | 80 | 680.35 | 21.4 | 2.288 | 0.072 |
| | Three | 1 E-6 | 695.87 | 21.85 | 2.34 | 0.073 |
| | | 20 | 695.15 | 14.71 | 2.338 | 0.049 |
| | | 40 | 689.89 | 3.05 | 2.32 | 0.01 |
| | | 80 | 665.62 | 33.05 | 2.239 | 0.111 |

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 9

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 9 | SLG | 1 E-6 | 4.263.71 | 32.53 | 14.34 | 0.109 |
| | | 20 | 4.137.6 | 24.34 | 13.916 | 0.082 |
| | | 40 | 3.999.84 | 6.47 | 13.453 | 0.022 |
| | | 80 | 3.718.88 | 180.78 | 12.508 | 0.608 |
| | LL | 1 E-6 | 4.449.09 | 26.35 | 14.964 | 0.089 |
| | | 20 | 4.308.15 | 9.12 | 14.49 | 0.031 |
| | | 40 | 4.118.95 | 76.29 | 13.853 | 0.257 |
| | | 80 | 3.788.29 | 0.15 | 12.741 | 0.001 |
| | LLG | 1 E-6 | 4.393.1 | 20.27 | 14.776 | 0.068 |
| | | 20 | 4.349.26 | 17.74 | 14.628 | 0.06 |
| | | 40 | 4.212.67 | 1.74 | 14.169 | 0.006 |
| | | 80 | 4.155.16 | 279.87 | 13.975 | 0.941 |
| | Three | 1 E-6 | 4.439.35 | 21.1 | 14.931 | 0.071 |
| | | 20 | 4.382.89 | 14.54 | 14.741 | 0.049 |
| | | 40 | 4.320.47 | 3.73 | 14.531 | 0.013 |
| | | 80 | 4.178.24 | 269.29 | 14.053 | 0.906 |

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 10

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 10 | SLG | 1 E-6 | 942.8 | 40.05 | 3.171 | 0.135 |
| | | 20 | 940.52 | 28. | 3.163 | 0.094 |
| | | 40 | 919.61 | 2.72 | 3.093 | 0.009 |
| | | 80 | 830.8 | 112.49 | 2.794 | 0.378 |
| | LL | 1 E-6 | 4656.09 | 43.38 | 15.66 | 0.146 |
| | | 20 | 4675.35 | 12.79 | 15.725 | 0.043 |
| | | 40 | 4661.24 | 119.78 | 15.677 | 0.403 |
| | | 80 | 4542.64 | 462.53 | 15.278 | 1.556 |
| | LLG | 1 E-6 | 4677.77 | 25.19 | 15.733 | 0.085 |
| | | 20 | 802.1 | 25.33 | 2.698 | 0.085 |
| | | 40 | 805.61 | 2.06 | 2.71 | 0.007 |
| | | 80 | 767.56 | 32.37 | 2.582 | 0.109 |
| | Three | 1 E-6 | 4651.36 | 35.32 | 15.644 | 0.119 |
| | | 20 | 4673.54 | 23.07 | 15.719 | 0.078 |
| | | 40 | 777.56 | 5.46 | 2.615 | 0.018 |
| | | 80 | 747.55 | 50.68 | 2.514 | 0.17 |

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 11

| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 11 | SLG | 1 E-6 | 2704.00 | 41.8 | 9.094 | 0.141 |
| | | 20 | 2705.17 | 31.9 | 9.098 | 0.107 |
| | | 40 | 2687.89 | 2.08 | 9.04 | 0.007 |
| | | 80 | 2605.84 | 109.86 | 8.764 | 0.369 |
| | LL | 1 E-6 | 2305.06 | 109.86 | 8.764 | 0.369 |
| | | 20 | 2282.86 | 33.44 | 7.753 | 0.112 |
| | | 40 | 2227.82 | 88.43 | 7.493 | 0.297 |
| | | 80 | 2027.64 | 393.66 | 6.82 | 1.324 |
| | LLG | 1 E-6 | 2350.44 | 21.06 | 7.905 | 0.071 |
| | | 20 | 2336.51 | 21.37 | 7.858 | 0.072 |
| | | 40 | 2368.14 | 3.54 | 7.965 | 0.012 |
| | | 80 | 2298.08 | 23.68 | 7.729 | 0.08 |
| | Three | 1 E-6 | 2299.41 | 27.29 | 7.734 | 0.092 |
| | | 20 | 2296.42 | 18.89 | 7.724 | 0.064 |
| | | 40 | 2289.29 | 5.41 | 7.7 | 0.018 |
| | | 80 | 2262.62 | 36.66 | 7.61 | 0.123 |

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 12

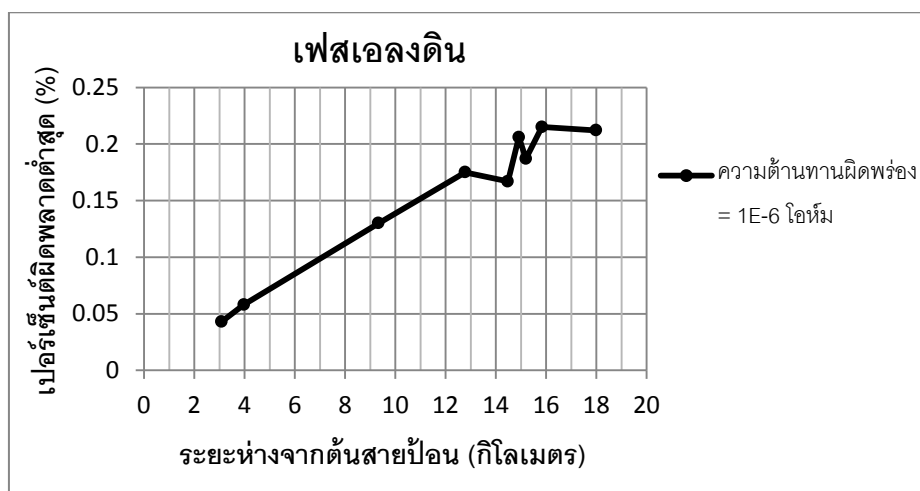
| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 | SLG | 1 E-6 | 1106.18 | 36.28 | 3.72 | 0.122 |
| | | 20 | 1086.69 | 28.31 | 3.655 | 0.095 |
| | | 40 | 1046.09 | 0.33 | 3.518 | 0.001 |
| | | 80 | 1416.59 | 102.38 | 4.764 | 0.344 |
| | LL | 1 E-6 | 1416.59 | 2.38 | 4.764 | 0.344 |
| | | 20 | 1939.01 | 8.22 | 6.522 | 0.028 |
| | | 40 | 1325.42 | 75.39 | 4.458 | 0.254 |
| | | 80 | 1432.77 | 299.99 | 4.819 | 1.009 |
| | LLG | 1 E-6 | 1916.19 | 18.13 | 6.445 | 0.061 |
| | | 20 | 1933.79 | 17.02 | 6.504 | 0.057 |
| | | 40 | 1353.83 | 2.07 | 4.553 | 0.007 |
| | | 80 | 1888.42 | 20.04 | 6.351 | 0.067 |
| | Three | 1 E-6 | 2001.94 | 21.41 | 6.733 | 0.072 |
| | | 20 | 1984.04 | 14.61 | 6.673 | 0.049 |
| | | 40 | 1959.25 | 3.67 | 6.59 | 0.012 |
| | | 80 | 1907.98 | 30.6 | 6.417 | 0.103 |

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งผิดพลาดของตำแหน่งผิดพลาดตำแหน่งที่ 13

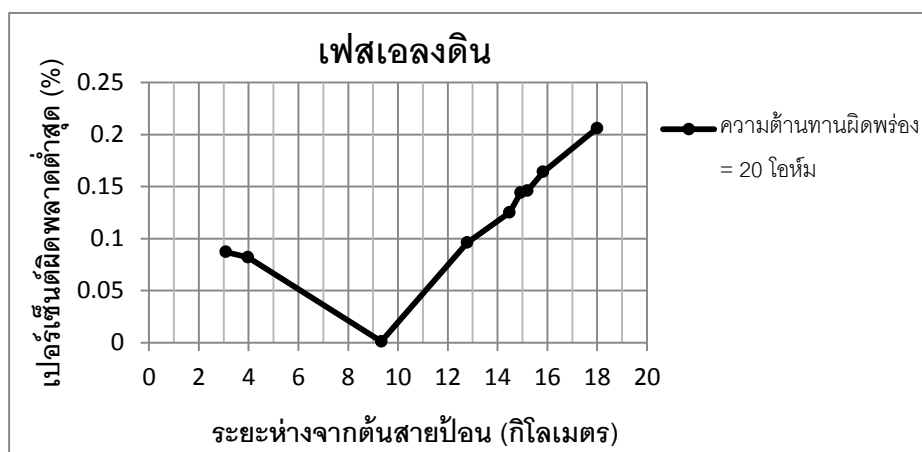
| ตำแหน่งผิดพลาด | ประเภทความผิดพลาด | ความต้านทานผิดพลาด (โอห์ม) | ระยะทางผิดพลาดสูงสุด (เมตร) | ระยะทางผิดพลาดต่ำสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงสุด (%) | เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุด (%) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 13 | SLG | 1 E-6 | 41.11 | 41.11 | 0.138 | 0.138 |
| | | 20 | 40.08 | 4.008 | 0.135 | 0.135 |
| | | 40 | 16.69 | 16.69 | 0.056 | 0.056 |
| | | 80 | 79.28 | 79.28 | 0.267 | 0.267 |
| | LL | 1 E-6 | 79.28 | 79.28 | 0.267 | 0.267 |
| | | 20 | 20.05 | 9.77 | 0.067 | 0.033 |
| | | 40 | 81.91 | 81.91 | 0.275 | 0.275 |
| | | 80 | 315.19 | 315.19 | 1.06 | 1.06 |
| | LLG | 1 E-6 | 23.59 | 23.59 | 0.079 | 0.079 |
| | | 20 | 20.05 | 20.05 | 0.067 | 0.067 |
| | | 40 | 5.45 | 5.45 | 0.018 | 0.018 |
| | | 80 | 19.76 | 19.76 | 0.066 | 0.066 |
| | Three | 1 E-6 | 24.63 | 24.63 | 0.083 | 0.083 |
| | | 20 | 17.09 | 17.09 | 0.057 | 0.057 |
| | | 40 | 05.4 | 5.4 | 0.018 | 0.018 |
| | | 80 | 303.8 | 30.38 | 0.102 | 0.102 |

5.4.2 ผลกระทบของระยะฝังพ่วง

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของระยะฝังพ่วงจะทำการทดสอบระบบตามรูปแบบที่ 1 โดยการกำหนดให้ความต้านทานฝังพ่วงคงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงระยะฝังพ่วงไป ภาพที่ 5.5 ภาพที่ 5.6 และภาพที่ 5.7 แสดงผลการทดสอบของความฝังพ่วงประเภทเฟสเอลงดินกับระยะฝังพ่วง โดยแต่ละรูปมีความต้านทานฝังพ่วงที่ต่างกัน ได้แก่ $1E-6$ โอห์ม 20 โอห์ม และ 40 โอห์ม ตามลำดับ



ภาพที่ 5.6 ผลการทดสอบความต้านทานฝังพ่วง $10E-6$ โอห์ม



ภาพที่ 5.7 ผลการทดสอบความต้านทานฝังพ่วง 20 โอห์ม

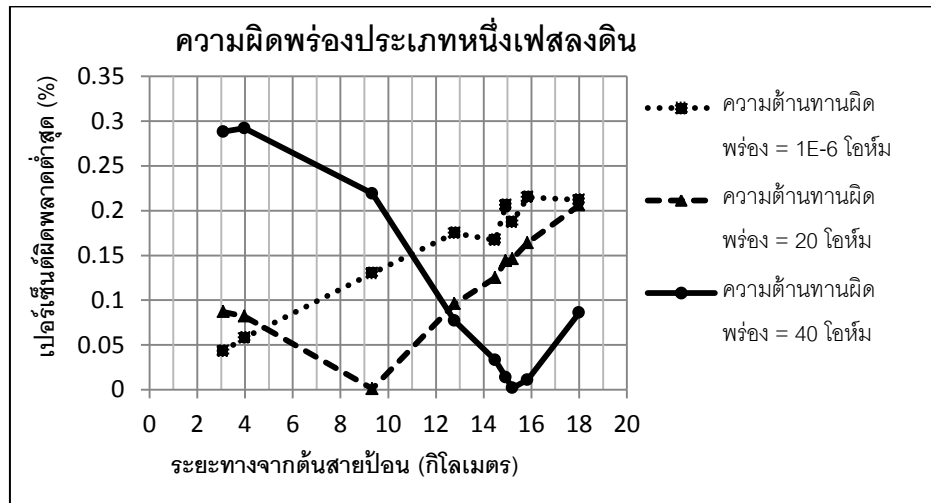


ภาพที่ 5.8 ผลการทดสอบความต้านทานผิวดำรง 40 โอห์ม

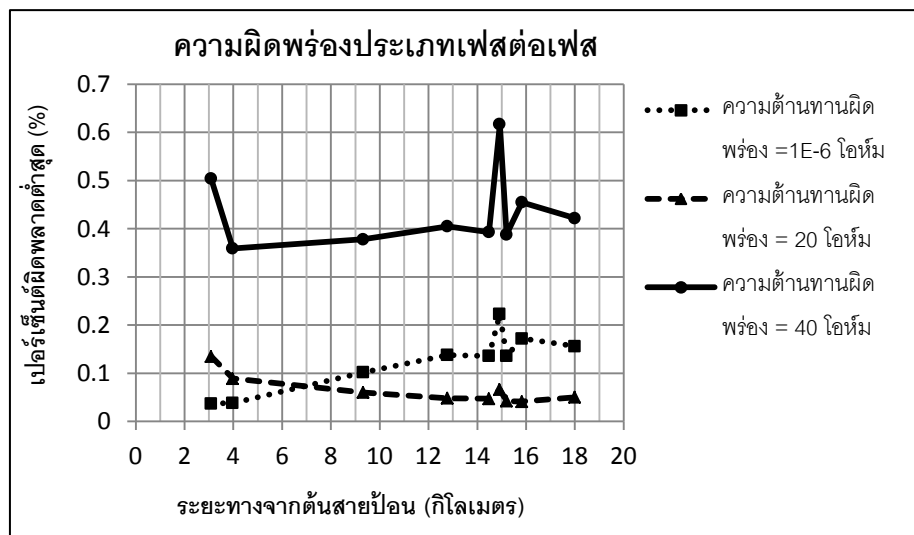
จากภาพที่ 5.5 ถึงภาพที่ 5.7 จะเห็นว่าผลกระทบของระยะผิวดำรงต่อกระบวนการที่นำเสนอมีค่าน้อยมาก โดยมีช่วงที่กว้างที่สุดของเปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดเท่ากับ 0.002 % ถึง 0.292 % อีกทั้งกระบวนการหาตำแหน่งผิวดำรงที่นำเสนอนั้นไม่ขึ้นกับระยะผิวดำรง ดังจะเห็นจากภาพที่ 5.5 และภาพที่ 5.6 ว่าเปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดในระยะผิวดำรงช่วงแรกนั้นมีค่าลดลง แต่เปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดช่วงหลังนั้นมีค่าสูงขึ้น

5.4.3 ผลกระทบของความต้านทานผิวดำรง

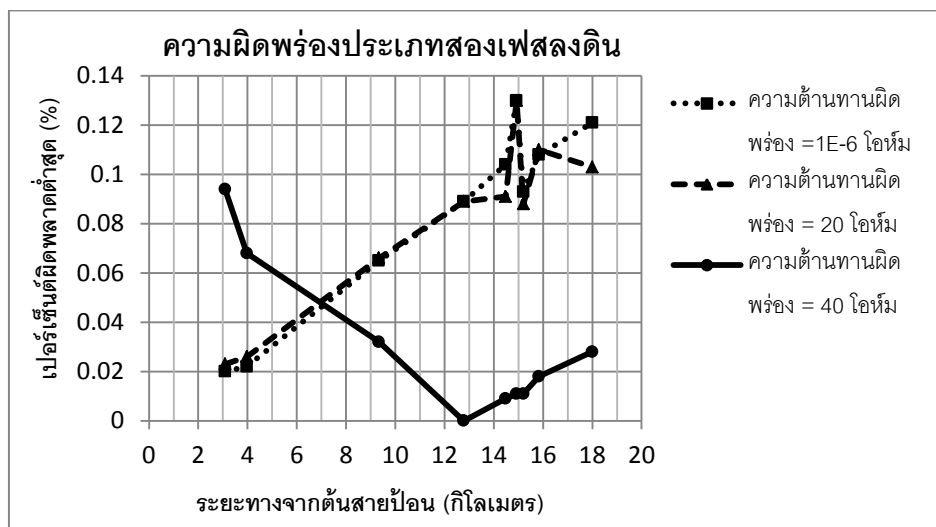
ในการวิเคราะห์ผลกระทบของความต้านทานผิวดำรงจะทำการทดสอบระบบตามรูปแบบการทดสอบที่ 1 เนื่องจากกระบวนการที่นำเสนอให้คำตอบได้หลายคำตอบ การศึกษาผลกระทบนี้จึงนำเฉพาะคำตอบที่ให้เปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดมาพิจารณา จากภาพที่ 5.8 ถึงภาพที่ 5.11 จะเห็นว่าสำหรับความลึกผิวดำรงประเภทเฟสเอลงดิน เฟสเอต่อเฟสซีลงดิน และสามเฟสลงดิน เปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดของความต้านทานผิวดำรง $1E-6$ โอห์ม และความต้านทานผิวดำรง 20 โอห์ม จะมีค่าใกล้เคียงกันและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน ซึ่งแตกต่างจากของความต้านทาน 40 โอห์ม แต่สำหรับความลึกผิวดำรงประเภทเฟสบีต่อเฟสซี เปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดของความต้านทานผิวดำรง $1E-6$ โอห์ม ของความต้านทานผิวดำรง 20 โอห์ม และของความต้านทานผิวดำรง 40 โอห์ม จะมีค่าใกล้เคียงกันและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันทั้งสามความต้านทาน โดยเปอร์เซ็นต์ความลึกสูงสุดที่มีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 0.617 % คิดเป็นระยะทางได้เท่ากับ 119.85 เมตร ซึ่งเป็นความลึกผิวดำรงประเภทเฟสบีต่อเฟสซี ความต้านทานผิวดำรง 40 โอห์ม



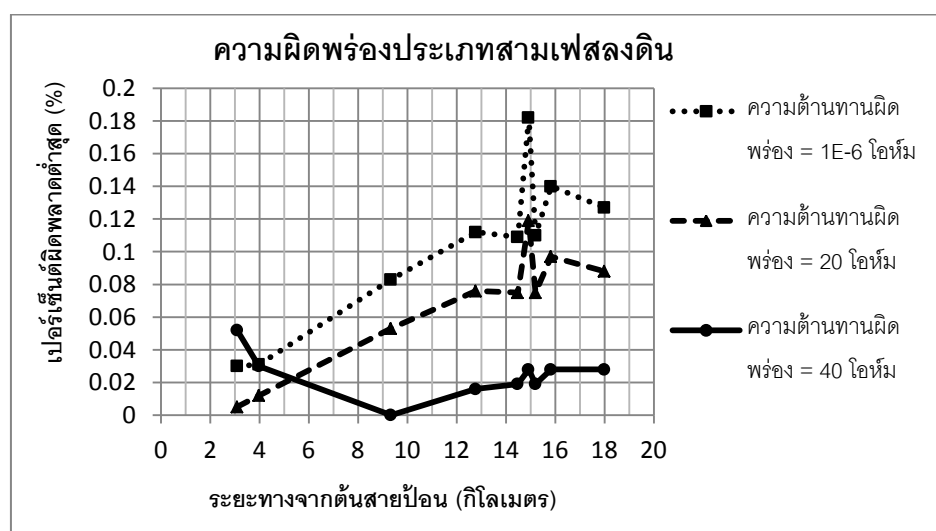
ภาพที่ 5.9 ผลการทดสอบความผิดปกติประเภทเฟสลงดิน



ภาพที่ 5.10 ผลการทดสอบความผิดปกติประเภทเฟสปีต่อเฟสซี



ภาพที่ 5.11 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดิน



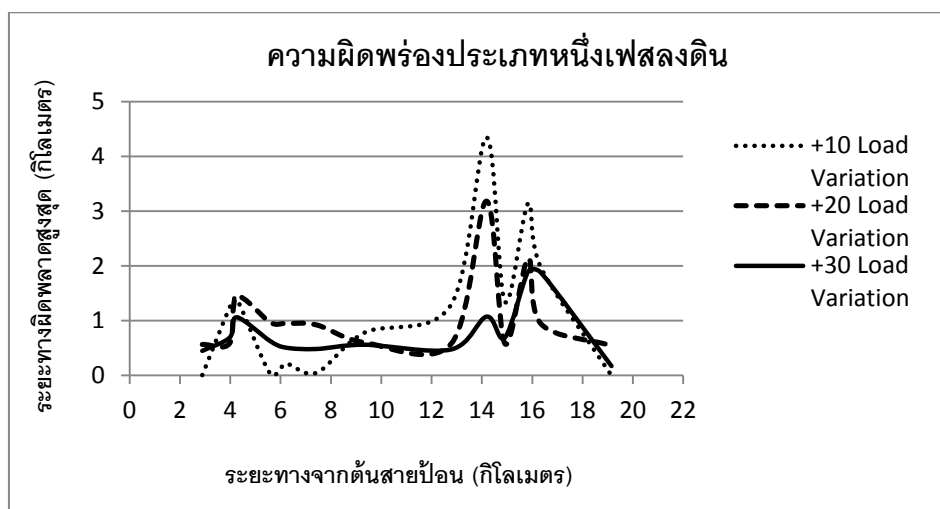
ภาพที่ 5.12 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดิน

5.4.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของโหลด

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของความต้านทานผิดพลาดจะทำการทดสอบระบบตามรูปแบบการทดสอบที่ 2 ซึ่งเป็นการทำสอบโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดแต่ละจากสภาวะปกติไปโดยเฉลี่ย 20 % เนื่องจากกระบวนการที่นำเสนอให้คำตอบได้หลายคำตอบ การศึกษาผลกระทบนี้จึงนำเฉพาะคำตอบที่ให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าสูงสุดมาพิจารณา ซึ่งผลการทดสอบกับความผิดพลาดเฟสลงดินได้ดังตารางที่ 5.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อกระบวนการได้ทำ

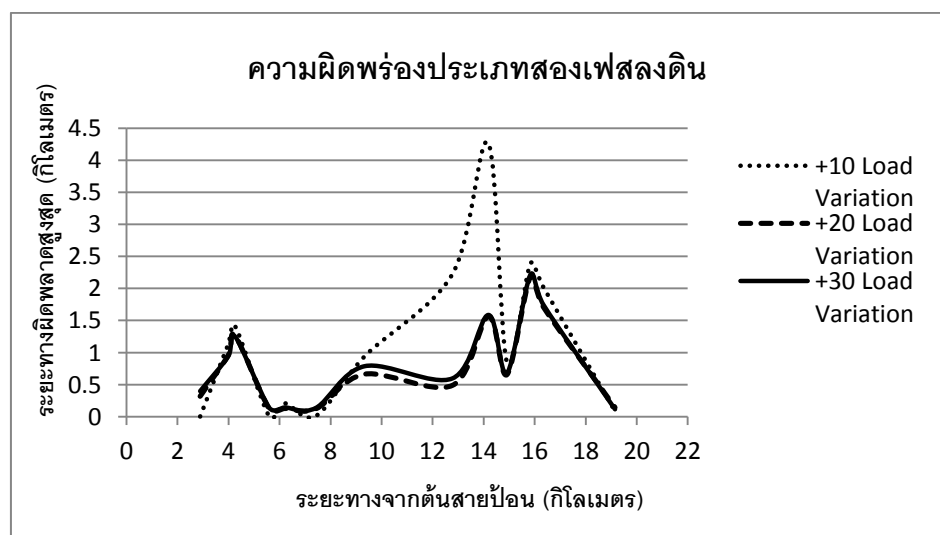
การชดเชยโหลดแล้ว เพอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่ำสุดที่มีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 3.305 % คิดเป็นระยะทางได้เท่ากับ 642.01 เมตร

5.4.4.1 ความผิดพลาดประเภทหนึ่งเฟสลงดิน



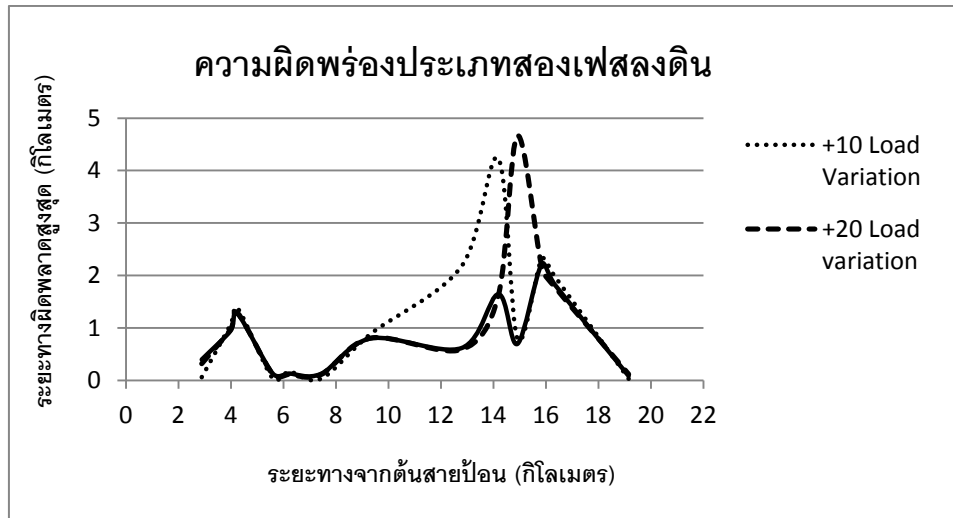
ภาพที่ 5.13 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสามเฟสลงดินเมื่อชดเชยโหลดแล้ว

5.4.4.2 ความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดิน



ภาพที่ 5.14 ผลการทดสอบความผิดพลาดประเภทสองเฟสลงดินเมื่อชดเชยโหลดแล้ว

5.4.4.3 ความผิดพร่องประเภทสามเฟสลงดิน



ภาพที่ 5.15 ผลการทดสอบความผิดพร่องประเภทสามเฟสลงดินเมื่อขาดเซย์โหดแล้ว

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษากระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในระบบจำหน่ายด้วยวิธีการผสมผสาน 2 วิธี วิธีการแรก คือ วิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ วิธีการที่สอง คือ วิธีการใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัด การระบุตำแหน่งโดยวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อนำมาใช้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะวงจรแบบเรเดียล ทำให้คำตอบที่ได้จากกระบวนการมีได้หลายตำแหน่ง จึงต้องใช้กระบวนการเพิ่มเติมในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องที่สุด วิธีการใช้ข้อมูลโหลดที่ถูกตัดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดมากที่สุดได้ ยกเว้นในบางกรณี กรณีแรก คือ คำตอบที่ได้จากวิธีการใช้ค่าอิมพีแดนซ์ ไม่มีอุปกรณป้องกันของแต่ละคำตอบ กรณีที่สอง คือ คำตอบแต่ละคำตอบมีค่าโหลดที่ถูกตัดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้นต่อไป

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้โหลดในระบบหรือในสายป้อนมีพฤติกรรมเป็นแบบอิมพีแดนซ์คงที่ขณะเกิดความผิดพลาด แต่ในทางปฏิบัติพฤติกรรมของแต่ละสายป้อนไม่เหมือนกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับโหลดของแต่ละสายป้อน ดังนั้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาด สามารถทำได้โดยทำการทดสอบกับระบบเพิ่มเติมเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของโหลดในสายป้อน การนั้นทำการเปลี่ยนกระบวนการคำนวณกำลังไหลขณะเกิดความผิดพลาดจากการกำหนดให้โหลดมีแบบอิมพีแดนซ์คงที่ไปเป็นแบบที่ได้ทำการทดสอบกับไว้ ซึ่งเมื่อกระบวนการระบุตำแหน่งผิดพลาดกำหนดพฤติกรรมโหลดได้ใกล้เคียงกับโหลดในทางปฏิบัติมากขึ้น ตำแหน่งผิดพลาดที่ได้ก็จะมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] W.H. Kersting. Distribution System Modeling and Analysis. CRC Press, 2002.
- [2] A.A. Girgis, C.M. Fallon, and D.L. Lubkeman. A Fault Location Technique for Rural Distribution Feeders. IEEE Transactions on Industry Applications 29, 6 (November-December 1993):1170-1175.
- [3] Jun Zhu, D.L. Lubkeman, and A.A. Girgis. Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders. IEEE Transactions on Power Delivery 12, 2 (April 1997):801-809.
- [4] S.J.Lee, M.S. Choi, S.H. Kang, B.G. Jin, D.S. Lee, B.S. Ahn, N.S. Yoon, H.Y. Kim, and S.B. Wee. An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery 19, 2 (April 2004):524-532.
- [5] R.H. Salim, K.R. Caino de Oliveira, A.D. Filomena, M. Resener, and A.S. Bretas. Hybrid Fault Diagnosis Scheme Implementation Power Distribution Systems Automation. IEEE Transactions on Power Delivery 23, 4 (October 2008):1846-1856.
- [6] R.H. Salim, M. Resner, A.D. Filomena, K.R. Caino de Oliveira, and A.S. Bretas. Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery 24, 2 (April 2009):508-516.
- [7] G.M. Espana, J.M. Florez, and H.V. Torres. Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery 24, 3 (July 2009):1382-1389.
- [8] Y. Liao. Generalized Fault-Location Methods for Overhead Electric Distribution Systems.
- [9] A. Borghitti, S. Corsi, C.A. Nucci, M. Paolone, L. Peretto, and R. Tinarelli. On the Use of Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Systems. . Electric Power Systems Research 79,1(January 2009): 49-56.

- [10] Z.Q.Bo, G.Weller, and M.A. Redfern. Accurate Fault Location Technique for Distribution System using Fault-Generated High-Frequency Transient Voltage Signals. Electric Power Systems Research 79,1(January 2009): 49-56.
- [11] D. Dustegor, S.V. Poroseva, M.Y. Hussaini, and S. Woogruff. Automated Graph-Methodology for Fault Detection and Location in Power Systems. . IEEE Transactions on Power Delivery 24, 2 (April 2009):508-516.
- [12] R.A.F Pereira, L.G.W. da Silva, M.Kezunovic, and J.R.S. Mantovani. Improved Fault Location on Feeders Based on Matching During-Fault Voltage Sags. IEEE Transactions on Power Delivery 24, 2 (April 2009):1382-1389.
- [13] J.Mora-Florez, V. Barrerra-Nunez, and G.Carrillo-Caicedo. Fault Location in Power Distribution Systems Using a Learning Algorithm for Mutivariable Data Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery 24, 2 (April 2009):1382-1389.
- [14] F.Chunja, K.K. Li, W.L. Chan, Y.Weiyong, and Z. Zhaoning. Application of Wavelet Fuzzy Neural Network in Locating Single Line to Ground Fault (SLG) in Distribution Lines. Electric Power Systems Research 79,1(January 2007): 49-56.
- [15] บัณฑิต เอื้ออาภรณ์. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [16] J.L. Blackburn, and T.J. Domin. Protective Relaying Principles and Applications. 3rd ed. 2007.
- [17] S.H. Horowitz, and A.G. Phadke. Power System Relaying. 3rd ed. 2008.
- [18] J.M. Gers, and E.J. Holmes. Protection of Electricity Distribution networks. The Institution of Electrical Engineers, 1998.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

สูตรการคำนวณและวงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทอื่นๆ

ตารางที่ 1 รูปวงจรสมมูลของความผิดพลาดประเภทต่างๆในสายย่อยหนึ่งๆ [6]

| ประเภทความผิดพลาด | วงจรสมมูลของความผิดพลาด |
|----------------------|-------------------------|
| เฟสต่อเฟส (AB) | |
| เฟสต่อเฟสลงดิน (ABG) | |
| สามเฟสลงดิน (ABCG) | |

ตารางที่ 2 สูตรการหาตำแหน่งผิดพลาดตามประเภทความผิดพลาด [6]

| ประเภทความผิดพลาด | สูตรการหาตำแหน่งและความต้านทานผิดพลาด |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เฟสต่อเฟส (AB) | $\begin{bmatrix} d \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_3 & I_{Far} \\ K_4 & I_{Fai} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Par} - V_{Pbr} \\ V_{Pai} - V_{Pbi} \end{bmatrix}$ |
| เฟสต่อเฟสลงดิน (ABG) | $\begin{bmatrix} d \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1a} & I_{Far} & 0 & I_{Far} + I_{Fbr} \\ K_{2a} & I_{Fai} & 0 & I_{Fai} + I_{Fbi} \\ K_{1b} & 0 & I_{Fbr} & I_{Far} + I_{Fbr} \\ K_{2b} & 0 & I_{Fbi} & I_{Fai} + I_{Fbi} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Par} \\ V_{Pai} \\ V_{Pbr} \\ V_{Pbi} \end{bmatrix}$ |
| สามเฟสลงดิน (ABCG) | $\begin{bmatrix} d \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fc} \\ R_{Fabc} \\ X_{Fabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1a} & I_{Far} & 0 & 0 & I_{Fabcr} & -I_{Fabci} \\ K_{2a} & I_{Fai} & 0 & 0 & I_{Fabci} & I_{Fabcr} \\ K_{1b} & 0 & I_{Fbr} & 0 & I_{Fabcr} & -I_{Fabci} \\ K_{2b} & 0 & I_{Fbi} & 0 & I_{Fabci} & I_{Fabcr} \\ K_{1c} & 0 & 0 & I_{Fcr} & I_{Fabcr} & -I_{Fabci} \\ K_{2c} & 0 & 0 & I_{Fci} & I_{Fabci} & I_{Fabcr} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Par} \\ V_{Pai} \\ V_{Pbr} \\ V_{Pbi} \\ V_{Pcr} \\ V_{Pci} \end{bmatrix}$ |

$$\text{โดยที่ } K_3 = \sum_k^{a,b,c} [(Z_{akr} - Z_{bkr})I_{Pkr} - (Z_{aki} - Z_{bki})I_{Pki}]$$

$$K_4 = \sum_k^{a,b,c} [(Z_{akr} - Z_{bkr})I_{Pki} + (Z_{aki} - Z_{bki})I_{Pkr}]$$

$$K_{1a} = \sum_k^{a,b,c} (Z_{akr}I_{Pkr} - Z_{aki}I_{Pki})$$

$$K_{2a} = \sum_k^{a,b,c} (Z_{akr}I_{Pki} + Z_{aki}I_{Pkr})$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรีดา เชาว์มั่น เกิดเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552