

การป้องกันแบบพื้นที่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าโดยอาศัยความสามารถ
ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

นางสาววีรยา สิริวัฒนวรรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
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.

WIDE AREA PROTECTION FOR TRANSMISSION LINES EMPLOYING DATA
INTERCHANGEABILITY OF THE INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICES

Ms. Weeraya Siriwatworasakul

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การป้องกันแบบพื้นที่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าโดยอาศัย
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์
อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

โดย

นางสาววีรยา สิริวัฒนวรรสกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชะสุนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล)

วีรยา สิริวัฒนวิมลกุล : การป้องกันแบบพื้นที่กว้างสำหรับสายส่งไฟฟ้าโดยอาศัยความสามารถในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (WIDE AREA PROTECTION FOR TRANSMISSION LINES EMPLOYING DATA INTERCHANGEABILITY OF THE INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. แนบบุญ หุ่นเจริญ, 140 หน้า.

การทำงานผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางส่งผลให้ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าลดลง และอาจนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง ปัจจุบันมีแนวคิดในการนำระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมาใช้เพิ่มสมรรถนะของระบบป้องกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Device, IED) ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ โดยประยุกต์ทฤษฎีกราฟและทฤษฎีเพทรีเน็ตในการกำหนดขอบเขตการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง IED และประยุกต์หลักการเปรียบเทียบกระแสผลต่างเชิงเฟสเซอร์ในการตรวจจับความผิดปกติในแต่ละเขตการป้องกัน เปรียบเทียบการทำงานของ IED กับรีเลย์ระยะทางในระบบทดสอบแบบเรเดียล และ ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับระบบทดสอบแบบโครงข่าย (WSCC 9 บัส) นอกจากนี้ทดสอบโดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย 3 เหตุการณ์ ผลการทดสอบพบว่า ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอทำงานได้ถูกต้องในทุกกรณี เมื่อทำการแปรค่าตำแหน่งเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าและขนาดอิมพีแดนซ์ลัดวงจร การป้องกันสำรองโซน 2 และ โซน 3 ของ IED สามารถลดบริเวณไฟฟ้าดับเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของรีเลย์ระยะทาง อีกทั้งเมื่อทดสอบกับเหตุการณ์จริงในบางกรณียังพบว่า IED สามารถทำงานได้ถูกต้องและรวดเร็วกว่ารีเลย์ระยะทาง จึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าเพื่อให้ระบบส่งไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้นและช่วยลดโอกาสการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างได้

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2556.....

5570382021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : WIDE AREA PROTECTION / TRANSMISSION LINE PROTECTION / DATA INTERCHANGEABILITY / INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICES

WEERAYA SIRIWATWORASAKUL: WIDE AREA PROTECTION FOR TRANSMISSION LINES EMPLOYING DATA INTERCHANGEABILITY OF THE INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICES. ADVISOR: ASST. PROF. NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 140 pp.

The malfunction of distance relay affects reliability of a transmission system and may lead to system blackout. Nowadays, the idea of applying Information and Communication Technology to performance improvement of the protection has been proposed. This thesis presents algorithms for transmission line protection employing data interchangeability of Intelligent Electronic Device (IED). Graph theory and Petri Net theory have been applied to define zone of protection with data interchangeability among IED. Then it employs principle of differential current phasor to detect fault in each zone of protection. The comparison between the operation of IED and that of distance relay in a radial test system has been conducted. The performance of the proposed method has also been verified using the 9-bus WSCC test system. In addition, the algorithm has been tested with field measurements. Test results show that the operation of the IED is correct when varying fault location and fault impedance. The backup protection of zone 2 and zone 3 of the IED can reduce the outage area, comparing to the protection by distance relay in respective zones. Moreover, investigation with field data confirms that the IED operates correctly and, in some case does it, faster than the distance relay. Application of the proposed method can then improve the performance of transmission line protection system, resulting in increased reliability and reduced chance of blackout.

Department : Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ทั้งในการทำวิจัยและการดำเนินชีวิต ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุญยะกุล ที่ได้สละเวลาตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง สำหรับการเอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวของผู้ทำวิจัย สำหรับการสนับสนุนและกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆ ในห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลังทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ที่นำมาสู่ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 การป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า.....	5
2.1 การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ระยะทาง.....	5
2.1.1 พื้นฐานการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	5
2.1.2 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทาง.....	8
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะในการทำงานรีเลย์ระยะทาง	10
2.2.1 ความต้านทานอาร์ก	11
2.2.2 การแกว่งของระบบไฟฟ้า.....	11
2.2.3 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร.....	11
2.2.4 การตั้งค่าของรีเลย์ระยะทาง.....	12
2.2.5 เขตของการป้องกัน.....	12
2.3 แนวทางในการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้า.....	15
2.3.1 การปรับปรุงโดยใช้รีเลย์ปรับตัวได้	15
2.3.2 การปรับปรุงการโดยใช้รีเลย์โฟลต	15
2.3.3 การปรับปรุงการโดยใช้การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง	16

บทที่ 3 การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง.....	18
3.1 การแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง	19
3.2 ขั้นตอนวิธีในการแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง.....	21
3.2.1 การประยุกต์ทฤษฎีกราฟ	22
3.2.2 การประยุกต์ทฤษฎีเพทรีเน็ต	26
3.3 การตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง.....	31
3.3.1 วิธีการเปรียบเทียบผลต่างของกระแส	32
3.3.2 วิธีการเปรียบเทียบทิศทางของกระแส	34
บทที่ 4 ขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง.....	36
4.1 การแบ่งเขตของการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด.....	38
4.2 การตรวจจับความผิดปกติภายในเขตป้องกัน.....	45
4.2.1 การป้องกันโซน 1	48
4.2.2 การป้องกันโซน 2	50
4.2.3 การป้องกันโซน 3	52
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	57
5.1 ระบบทดสอบแบบเรเดียล	57
5.1.1 การทดสอบที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะกับรีเลย์ระยะทาง ในเชิงโซนการป้องกัน	58
5.1.2 การทดสอบที่ 1.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะกับรีเลย์ระยะทาง ในเชิงอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร	69
5.2 ระบบทดสอบแบบโครงข่าย (WSCC9 บัส).....	81
5.3 การทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้า ของประเทศไทย	93
5.3.1 เหตุการณ์ที่ 1 เหตุการณ์ผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า PU-NT เส้นที่ 1	93
5.3.2 เหตุการณ์ที่ 2 เหตุการณ์ผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า NS-PL2 เส้นที่ 1	99
5.3.3 เหตุการณ์ที่ 3 เหตุการณ์ผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า HH-RB2 เส้นที่ 1	105
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	113
6.1 สรุปผลการวิจัย	113

	หน้า
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	114
รายการอ้างอิง	115
ภาคผนวก	119
ภาคผนวก ก	120
ภาคผนวก ข	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบแบบเรเดียล	60
ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติของรีเลย์ระยะทาง.....	62
ตารางที่ 5.3 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e3	73
ตารางที่ 5.4 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e4	73
ตารางที่ 5.5 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e1	75
ตารางที่ 5.6 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e6	75
ตารางที่ 5.7 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e8	77
ตารางที่ 5.8 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบแบบโครงข่าย	84
ตารางที่ 5.9 ร้อยละความถูกต้องในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด	87
ตารางที่ 5.10 ข้อมูลค่ากระแสต่างๆสำหรับการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ 1	96
ตารางที่ 5.11 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของเหตุการณ์ที่ 1.....	97
ตารางที่ 5.12 ข้อมูลค่ากระแสต่างๆสำหรับการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ 2	102
ตารางที่ 5.13 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของเหตุการณ์ที่ 2.....	103
ตารางที่ 5.14 ข้อมูลค่ากระแสต่างๆสำหรับการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ 3	109
ตารางที่ 5.15 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของเหตุการณ์ที่ 3.....	110
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสในระบบแบบเรเดียล.....	121
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบแบบเรเดียล.....	121
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบแบบเรเดียล	121
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสในระบบ WSCC 9 บัส	123
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งในระบบ WSCC 9 บัส	123
ตารางที่ ก.6 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ WSCC 9 บัส	123
ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด	124
ตารางที่ ข.2 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1.....	125
ตารางที่ ข.3 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2.....	125
ตารางที่ ข.4 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3.....	126
ตารางที่ ข.5 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4.....	126
ตารางที่ ข.6 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1.....	127

ตารางที่ ข.7 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2.....	127
ตารางที่ ข.8 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3.....	128
ตารางที่ ข.9 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4.....	128
ตารางที่ ข.10 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1	129
ตารางที่ ข.11 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2	129
ตารางที่ ข.12 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3	130
ตารางที่ ข.13 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4	130
ตารางที่ ข.14 ร้อยละความถูกต้องของรีเลย์ระยะทางโซน 1	131
ตารางที่ ข.15 ร้อยละความถูกต้องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโซน 1	131
ตารางที่ ข.16 ร้อยละความถูกต้องของรีเลย์ระยะทางโซน 2	132
ตารางที่ ข.17 ร้อยละความถูกต้องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโซน 2.....	133
ตารางที่ ข.18 ร้อยละความถูกต้องของรีเลย์ระยะทางโซน 3	134
ตารางที่ ข.19 ร้อยละความถูกต้องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโซน 3.....	135
ตารางที่ ข.20 ตัวอย่างผลการทดสอบการตรวจจับความผิดปกติภายในโซนต่างๆ	136
ตารางที่ ข.21 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ที่ 1	137
ตารางที่ ข.22 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ที่ 2	138
ตารางที่ ข.23 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ที่ 3.....	139

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การแบ่งโซนการทำงานของรีเลย์ระยะทาง	6
ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลของสายส่งที่รีเลย์ R เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน	6
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์รีเลย์บน R – X diagram	8
ภาพที่ 2.4 ลักษณะสมบัติแบบโม	9
ภาพที่ 2.5 ลักษณะสมบัติของโมรีเลย์ในแกน G - B และแกน R - X.....	10
ภาพที่ 2.6 ภาพโซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบโม	10
ภาพที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสของเหตุการณ์ผิดปกติตัวอย่าง	13
ภาพที่ 2.8 จำนวนสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หลุดออกจากระบบไฟฟ้า [21].....	14
ภาพที่ 2.9 เขตของการป้องกันสายส่งโดยรีเลย์ระยะทาง	16
ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างเขตของการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e6	20
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างโครงข่ายไฟฟ้า	22
ภาพที่ 3.3 กราฟระบุทิศทางของโครงข่ายไฟฟ้าตัวอย่าง	22
ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต	26
ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ตหลังจากยิงทรานสิชัน t_1	27
ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต เมื่อพิจารณาโทเค็นในเพลส R7	28
ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต เมื่อยิงทรานสิชันครั้งที่ 1	30
ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต เมื่อยิงทรานสิชันครั้งที่ 2	30
ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติโดยวิธีเปรียบเทียบผลต่างของกระแส	32
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างของขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ..	37
ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนวิธีการแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด ..	39
ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้า	42
ภาพที่ 4.4 ผลจากการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้าตัวอย่าง	44
ภาพที่ 4.5 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันของสายส่งไฟฟ้า.....	46
ภาพที่ 4.6 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติในเขตการป้องกันปฐมภูมิ (โซน 1)	48
ภาพที่ 4.7 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติในเขตการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2)	51
ภาพที่ 4.8 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติในเขตการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน 3)	53

ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างการเข้าชั้นของการตรวจจับความผิดพร้อมในโซน 1 และ โซน 3..... 54

ภาพที่ 5.1 ระบบทดสอบแบบเรเดียล..... 57

ภาพที่ 5.2 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบทดสอบแบบเรเดียล 57

ภาพที่ 5.3 ตัวอย่างผลการตรวจจับความผิดพร้อมของการทดสอบที่ 1.1 61

ภาพที่ 5.4 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันโซนต่างๆ 63

ภาพที่ 5.5 การทำงานของรีเลย์ระยะทางในการป้องกันโซนต่างๆ..... 64

ภาพที่ 5.6 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1 ของอุปกรณ์ป้องกัน 65

ภาพที่ 5.7 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์ป้องกัน 66

ภาพที่ 5.8 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสำรองโซน 2 ของสายส่งไฟฟ้า L3..... 67

ภาพที่ 5.9 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 3 ของอุปกรณ์ป้องกัน 67

ภาพที่ 5.10 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสำรองโซน 3 ของสายส่งไฟฟ้า L3..... 68

ภาพที่ 5.11 ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3, e4 72

ภาพที่ 5.12 ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2, e5 74

ภาพที่ 5.13 ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1, e6 76

ภาพที่ 5.14 ร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์ป้องกัน 78

ภาพที่ 5.15 ร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์ป้องกัน 79

ภาพที่ 5.16 ร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 3 ของอุปกรณ์ป้องกัน 80

ภาพที่ 5.17 ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส..... 81

ภาพที่ 5.18 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบทดสอบ WSCC 9 บัส... 82

ภาพที่ 5.19 ตัวอย่างผลการตรวจจับความผิดพร้อมของการทดสอบที่ 2 85

ภาพที่ 5.20 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1 88

ภาพที่ 5.21 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2 89

ภาพที่ 5.22 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3 89

ภาพที่ 5.23 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4 90

ภาพที่ 5.24 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 5 90

ภาพที่ 5.25 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 6 91

ภาพที่ 5.26 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเหตุการณ์ผิดพร้อมบนสายส่ง NT-PU 93

ภาพที่ 5.27 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในเหตุการณ์ผิดพร้อมที่ 1 93

หน้า

ภาพที่ 5.28 ผลการตรวจจับความผิดพร่องของเหตุการณ์ที่ 1.....	98
ภาพที่ 5.29 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเหตุการณ์ผิดพร่องบนสายส่ง NS-PL2	99
ภาพที่ 5.30 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในเหตุการณ์ผิดพร่องที่ 2	99
ภาพที่ 5.31 ผลการตรวจจับความผิดพร่องของเหตุการณ์ที่ 2.....	104
ภาพที่ 5.32 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเหตุการณ์ผิดพร่องบนสายส่ง HH-RB2	105
ภาพที่ 5.33 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในเหตุการณ์ผิดพร่องที่ 3	105
ภาพที่ 5.34 รูปคลื่นกระแสของเหตุการณ์ผิดพร่องที่ 3	106
ภาพที่ 5.35 ผลการตรวจจับความผิดพร่องของเหตุการณ์ที่ 3.....	111
ภาพที่ ก.1 ระบบทดสอบแบบเรเดียล	121
ภาพที่ ก.2 ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส.....	122

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ นำเสนอเกี่ยวกับที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งไฟฟ้าเป็นหัวใจหลักในการส่งกำลังไฟฟ้าจากระบบกำเนิดไฟฟ้าไปยังระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้นระบบส่งไฟฟ้าจึงควรจะมี ความมั่นคงและมีความน่าเชื่อถือสูง การเกิดความผิดปกติ (Fault) ขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าจะทำให้ความเชื่อถือได้และเสถียรภาพของระบบส่งไฟฟ้าลดลง โดยความผิดปกติที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดในระบบส่งไฟฟ้าคือ ความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) และอุปกรณ์ที่เกิดความผิดปกติบ่อยที่สุดคือ สายส่งไฟฟ้า ดังนั้นระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง รีเลย์ระยะทางซึ่งเป็นรีเลย์ป้องกันสายส่งไฟฟ้าในปัจจุบันยังคงมีปัญหาที่ทำให้รีเลย์ระยะทางทำงานผิดพลาดเช่น ความต้านทานอาร์ก, การแกว่งของระบบไฟฟ้า, การตั้งค่าของรีเลย์ระยะทาง, อิมพีแดนซ์ลัดวงจร และ เขตของการป้องกันของรีเลย์ระยะทาง เป็นต้น

หากรีเลย์ป้องกันตรวจจับความผิดปกตินอกเขตการป้องกันแล้วทำการตัดวงจร ซึ่งการตัดวงจรผิดพลาดนี้อาจจะทำให้สถานการณ์ที่เกิดเลวร้ายลงยิ่งขึ้น และถึงแม้การทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน (ตัวตัดวงจร) จะเป็นไปอย่างถูกต้องแต่การทำงานของรีเลย์ก็อาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงกับระบบได้ เช่น กรณีที่รีเลย์ป้องกันตัดสายส่งที่เกิดความผิดปกติออกแล้วทำให้กำลังที่เคยไหลผ่านสายส่งเส้นที่เกิดความผิดปกติเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลจนทำให้สายส่งเส้นอื่นเกิดสภาวะโหลดเกิน (Overload) ซึ่งสายส่งเส้นที่เกิดสภาวะโหลดเกินนั้นอาจจะถูกตัดวงจรด้วยรีเลย์ระยะทางโซน 3 จนนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง [1] จากการศึกษาการเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Blackout) ในอดีต พบว่ามีหลายครั้งที่การทำงานอันไม่พึงประสงค์หรือการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางโดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบป้องกันสำรอง (Backup Protection) เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดการรบกวนระบบจนนำไปสู่การเปิดวงจรสายส่งอย่างต่อเนื่อง (Cascading Outage) [2]

แนวคิดในการปรับปรุงรีเลย์ระยะทาง ได้แก่ การประยุกต์แนวคิดเกี่ยวกับการทำให้รีเลย์มีความสามารถในการปรับการทำงานด้วยตัวเอง (Adaptive Relaying) [3]-[6], การประยุกต์รีเลย์ไพลอต(Pilot relay) และการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection)

เนื่องจากปัจจุบันระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะพัฒนามากยิ่งขึ้น จึงมีแนวคิดที่น่าสนใจอีกแนวคิด คือ การนำเทคโนโลยีและความสามารถในการสื่อสารกันได้ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดมาประยุกต์เพื่อปรับปรุงการป้องกันในระบบ งานวิจัย [7]-[14] นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงการป้องกันในระบบส่งไฟฟ้าแบบใหม่ โดยการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีสารสนเทศ การสื่อสาร และ ไฟฟ้ากำลัง เรียกว่า การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ซึ่งจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Device, IED) ในเขตการป้องกันมาเป็นเงื่อนไขในการทำงาน

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงประยุกต์แนวคิดของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) เพื่อใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้ารูปแบบใหม่ โดยอาศัยความสามารถในการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

1.2 วัตถุประสงค์

- นำเสนอขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบใหม่โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. กำหนดให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ รีเลย์ป้องกันซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้
2. พัฒนาเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบใหม่โดยขั้นตอนวิธีในการแบ่งกลุ่มการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด
3. พัฒนาขั้นตอนวิธีในการตรวจจับความผิดปกติภายในโซนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด
4. พิจารณาเฉพาะเหตุการณ์เกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเท่านั้น
5. พิจารณาความผิดปกติแบบ สามเฟสสมมูล (Three phase fault) และหนึ่งเฟสลงดิน (Single line to ground fault) เท่านั้น

6. พิจารณากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีความผิดปกติเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว
7. ไม่พิจารณาความผิดปกติที่เกิดขึ้นซ้ำซ้อนในเวลาเดียวกัน (Simultaneous faults)
8. ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีด้วยระบบทดสอบดังนี้
 - 8.1 ระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้น (2-Generator 5-Bus system)
 - 8.2 ระบบทดสอบ Western States Coordinating Council (WSCC) 9 บัส
 - 8.3 ข้อมูลจากเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาพื้นฐานของระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าและการทำงานของรีเลย์ระยะทาง
2. ศึกษาปัจจัยในการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ระยะทาง
3. ศึกษาการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection)
4. ศึกษาการแบ่งเขตการป้องกันในการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง
5. ศึกษาเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง
6. คัดเลือกแนวทางในการแบ่งเขตการป้องกันและเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) จากงานวิจัยในอดีต
7. พัฒนาเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบใหม่โดยขั้นตอนวิธีในการแบ่งกลุ่มการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด
8. พัฒนาขั้นตอนวิธีในการตรวจจับความผิดปกติภายในโซนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด
9. ทดสอบขั้นตอนวิธีที่พัฒนากับระบบทดสอบต่างๆ
10. รวบรวมข้อมูลและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สมรรถนะในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น
2. ความเชื่อถือได้ของระบบส่งไฟฟ้าสูงขึ้น

3. โอกาสในการเกิดไฟดับบริเวณกว้างลดน้อยลง

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอเกี่ยวกับที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 2 การป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า นำเสนอเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า อันประกอบไปด้วย พื้นฐานของระบบป้องกัน การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ระยะทาง และปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานผิดพลาดของรีเลย์ระยะทาง

บทที่ 3 การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) นำเสนอเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ซึ่งประกอบไปด้วย เขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง, การแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง และการตรวจจับความผิดปกติของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

บทที่ 4 ขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง นำเสนอขั้นตอนวิธีที่พัฒนาเพื่อปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยประยุกต์หลักการของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ซึ่งประกอบด้วย การแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ นำเสนอเกี่ยวกับการทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไปในบทที่ 4 โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 การทดสอบ คือ การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับ ขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง โดยใช้ระบบทดสอบ 2-Generator 5-Bus, การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) โดยใช้ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส และการประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนามากับเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยจำนวน 3 เหตุการณ์

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ในบทนี้จะนำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2

การป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า

เนื้อหาในบทนี้ นำเสนอเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้า ประกอบด้วย การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ระยะทาง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการทำงานของรีเลย์ระยะทาง และแนวทางในการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

2.1 การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ระยะทาง

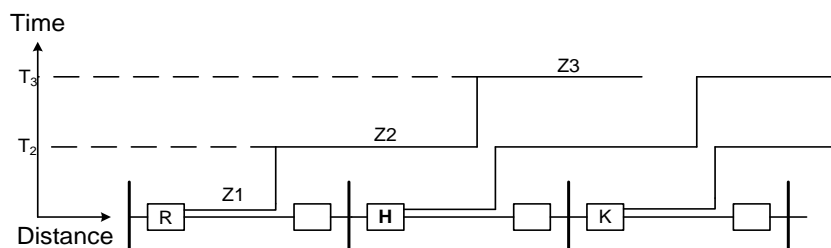
การป้องกันสายส่งไฟฟ้า เป็นการกำจัดความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสายส่งไฟฟ้า โดยมีอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า คือ รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) การทำงานจะมีการแบ่งส่วนการทำงานดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.1.1 พื้นฐานการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

การทำงานของระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้า (Transmission Line Protection) ในปัจจุบันนิยมใช้รีเลย์ระยะทางแบบเชิงเลข (Numerical Distance Relay, Digital distance relay) ซึ่งรีเลย์ชนิดนี้สามารถโปรแกรมได้ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบป้องกัน

การทำงานของรีเลย์ระยะทางจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบป้องกันให้มีการประสานการทำงาน (Coordination) ของรีเลย์ระยะทางเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการทำงานของระบบป้องกันปฐมภูมิ ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งจะแบ่งการทำงานเป็นโซนการป้องกัน 3 โซน ได้แก่ การป้องกันโซน 1 เป็นระบบป้องกันปฐมภูมิจะทำการตัดวงจรทันทีที่ตรวจพบความผิดปกติ, การป้องกันโซน 2 เป็นระบบป้องกันสำรองต้องถ่วงเวลาเมื่อโซน 1 ไม่ทำงานภายในระยะเวลาที่กำหนด และ การป้องกันโซน 3 จะเป็นระบบป้องกันสำรองระยะไกลอีกชั้น [17]–[19]

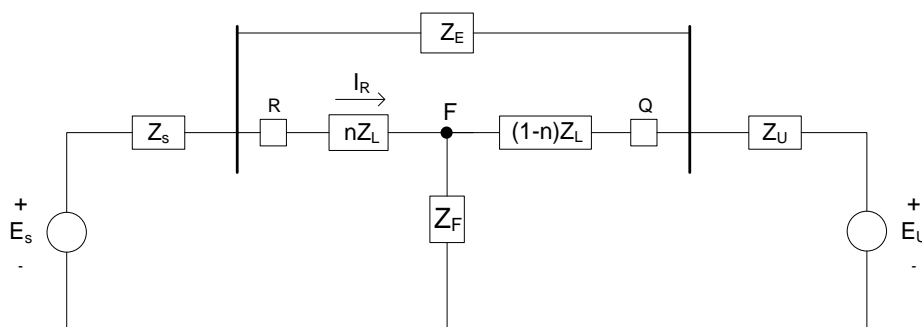
ภาพที่ 2.1 หากพิจารณาที่รีเลย์ระยะทาง R จะพบว่า รีเลย์ระยะทาง H ทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันปฐมภูมิ และรีเลย์ระยะทาง R จะเป็นรีเลย์ป้องกันสำรองโซน 2 ให้กับส่วนที่รีเลย์ระยะทาง H และรีเลย์ระยะทาง R เป็นรีเลย์ป้องกันสำรองโซน 3 ให้กับส่วนปลายสายของสายส่งไฟฟ้าที่รีเลย์ระยะทาง H ป้องกันอยู่



ภาพที่ 2.1 การแบ่งโซนการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

หลักการการทำงานของรีเลย์ระยะทางคือการตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของสายส่งไฟฟ้า กล่าวคือ รีเลย์ระยะทางจะรับสัญญาณขาเข้าเป็นแรงดันบัสดที่รีเลย์ติดตั้งอยู่และกระแสในสายที่ใช้รีเลย์ป้องกัน โดยรับสัญญาณเข้าผ่านทางหม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสจากนั้นจึงนำมาคำนวณเป็นค่าอิมพีแดนซ์

รีเลย์ระยะทางจะทำการตัดวงจรเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ซึ่งค่าที่กำหนดไว้ขึ้นอยู่กับความยาวของสาย เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่สายส่งรีเลย์ระยะทางจะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายลดลง



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลของสายส่งที่รีเลย์ R เมื่อเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน

ภาพที่ 2.2 เป็นการจำลองระบบไฟฟ้ากำลังให้เหลือเพียงสองบัส คือบัส R และบัส Q โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า S และ U ต่ออยู่ตามลำดับ Z_E เป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบส่วนที่เหลือ และ Z_L เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัส R และ Q ซึ่งจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์เห็นในสภาวะปกติ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติจุด F รีเลย์ R จะเห็นสายส่งมีระยะทางสั้นลง โดยจะเห็นค่าอิมพีแดนซ์เป็น Z_R ถ้า Z_R มีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโซนการทำงานที่ตั้งไว้ รีเลย์ R จะทำการตัดวงจร ซึ่งจะตัดวงจรทันทีหรือมีการหน่วงเวลาไว้ก่อนขึ้นอยู่กับว่า Z_R ตกอยู่ในโซนการทำงานใด การคำนวณ Z_R เป็นไปดังสมการ(2.1)

$$Z_R = nZ_L + Z_F \quad (2.1)$$

โดยที่

Z_R	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ R มองเห็น
n	คือ	ระยะห่างจากรีเลย์ R มีหน่วยเป็น p.u.
Z_L	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์ R ทำหน้าที่ป้องกัน
Z_F	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของความผิดพลาด

การกำหนดช่วงของโซนการป้องกัน (Zone of Protection) จะกำหนดโดย

- Zone 1 กำหนดที่ระยะความยาว 85 – 90 % ของความยาวสายส่งที่จะป้องกัน
- Zone 2 กำหนดที่ระยะความยาว 120 – 150 % ของความยาวสายส่งที่จะป้องกัน และจะหน่วงเวลาการทำงานไว้ที่ 0.03 วินาที เนื่องจากทำงานเป็นระบบป้องกันสำรองให้กับรีเลย์ป้องกันปฐมภูมิของสายส่งเส้นถัดไป
- Zone 3 กำหนดที่ระยะความยาวไม่เกิน 150 % ของสายส่งเส้นถัดไปที่ยาวที่สุด และจะหน่วงเวลาการป้องกันไว้ที่ 1 – 2 วินาที เนื่องจากทำงานเป็นระบบป้องกันสำรองระยะไกล

อุปกรณ์ป้องกันในระบบป้องกันมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการทำงานขึ้นได้ เพื่อป้องกันให้ระบบไม่เกิดความเสียหายจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันสำรองในกรณีที่ส่วนป้องกันหลักไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้นการแบ่งส่วนการป้องกันจึงมีความสำคัญเพราะสามารถทำให้ระบบป้องกันมีความเชื่อถือได้สูงขึ้น การแบ่งส่วนการป้องกันนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ระบบป้องกันปฐมภูมิ (Primary Protection) และระบบป้องกันสำรอง (Backup Protection)

1. ระบบป้องกันปฐมภูมิ หมายถึง การป้องกันลำดับแรกโดยอุปกรณ์ป้องกันในเขตป้องกันต้องทำหน้าที่แยกส่วนของวงจรที่เกิดความผิดพลาดออกจากระบบ การทำงานของระบบป้องกันปฐมภูมินั้นต้องทำงานเร็วที่สุดเท่าที่ทำได้และต้องแยก

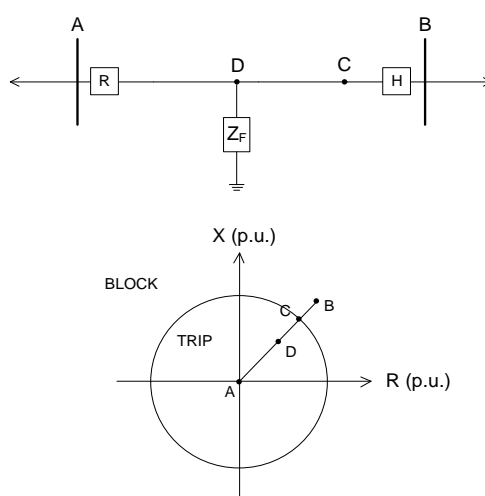
ส่วนของวงจรไฟฟ้าให้น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบน้อยที่สุด

2. ระบบป้องกันสำรอง หมายถึง การใช้ระบบป้องกันอีกชุดหนึ่งที่มีเวลาการทำงานช้ากว่าระบบป้องกันปฐมภูมิ ทำหน้าที่ป้องกันในกรณีที่ระบบป้องกันปฐมภูมิไม่ทำงาน ซึ่งผลการทำงานเพื่อกำจัดความผิดปกติของระบบป้องกันสำรองมักจะแยกส่วนของวงจรออกมามากกว่าการทำงานโดยระบบป้องกันปฐมภูมิ ทั้งนี้ระบบป้องกันสำรองยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ

- การป้องกันสำรองท้องถิ่น (Local Backup Protection) ซึ่งจะเป็นระบบป้องกันสำรองที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับระบบป้องกันปฐมภูมิ
- การป้องกันสำรองระยะไกล (Remote Backup Protection) เป็นระบบป้องกันสำรองที่ติดตั้งอยู่ห่างไกลจากระบบป้องกันปฐมภูมิ

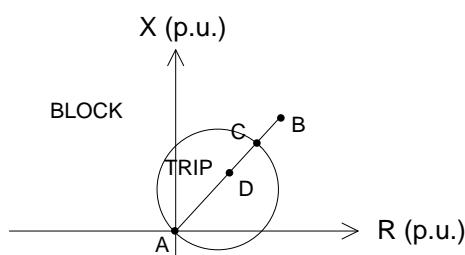
2.1.2 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทาง

การป้องกันสายส่งไฟฟ้านอกจากจะพิจารณาระยะของโซนการป้องกันแล้ว ยังต้องคำนึงถึงลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทาง ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการป้องกันไม่ให้กว้างหรือแคบจนเกินไป การพิจารณาการทำงานของรีเลย์ระยะทางจะสนใจค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นเป็นหลัก ดังนั้นจึงมักแสดงทางเดินของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance Locus) บนแผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ (R- X Diagram) ควบคู่ไปกับลักษณะสมบัติของรีเลย์ระยะทางดังเช่น ภาพที่ 2.3



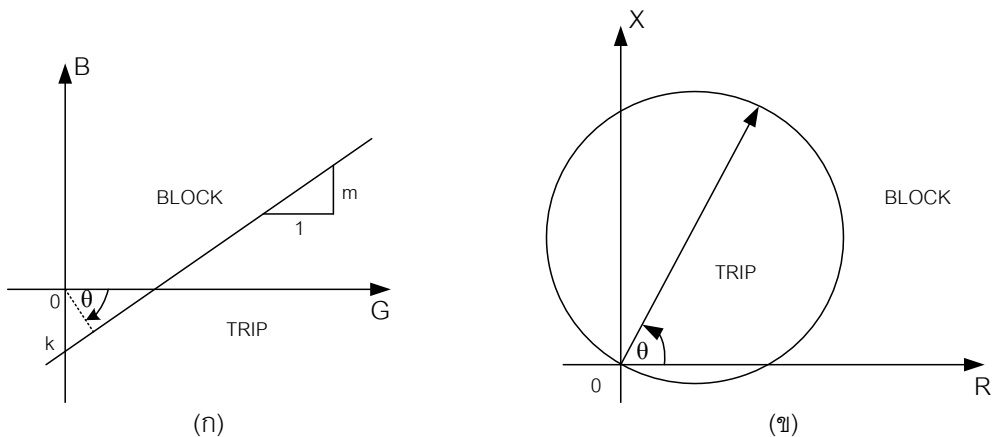
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างลักษณะสมบัติของอิมพีแดนซ์รีเลย์บน R – X diagram

ภาพที่ 2.3 เป็นตัวอย่างของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) ซึ่งใช้ขนาดของอิมพีแดนซ์เป็นเงื่อนไขตัดสินตัดวงจร โดยจะทำการตัดวงจรเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นมีค่าน้อยกว่าขนาดที่กำหนดไว้ (ตกอยู่ใน TRIP โซน) อย่างไรก็ตามการใช้อิมพีแดนซ์รีเลย์ ไม่สามารถกำหนดทิศทางในการตัดวงจรได้เนื่องจากรีเลย์จะเห็นการลัดวงจรทั้งที่อยู่ข้างหน้าและข้างหลัง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักใช้รีเลย์ที่มีลักษณะสมบัติแบบโม (Mho Relay) ดังภาพที่ 2.4 เนื่องจากมีคุณสมบัติของการเป็นรีเลย์ระยะทางแบบมีทิศทาง (Directional Distance Relay) หรือรีเลย์ที่มีลักษณะสมบัติแบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilateral Relay) ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานใน R-X diagram ได้มากกว่า นอกจากนี้ยังมีลักษณะสมบัติแบบอื่นๆ อีกสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน[18]-[19] ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นขึ้นกับลักษณะของระบบไฟฟ้า และลักษณะของความผิดปกติที่มักเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า



ภาพที่ 2.4 ลักษณะสมบัติแบบโม

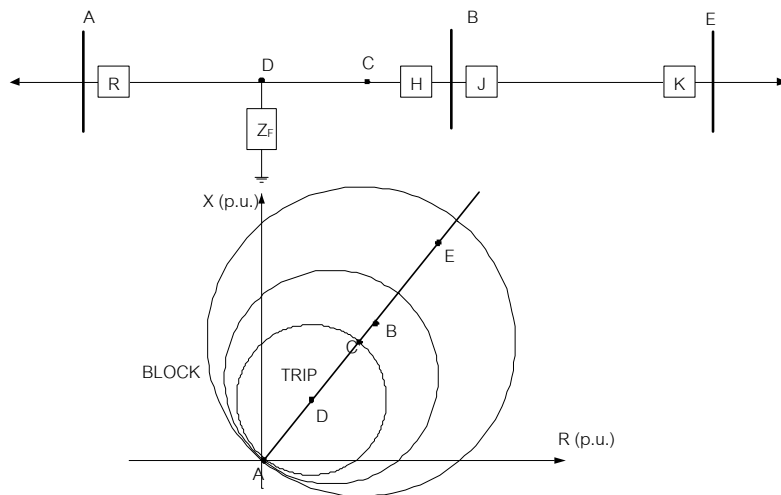
ลักษณะสมบัติแบบโมนั้นจะใช้ค่าความนำไฟฟ้าเชิงซ้อน (Admittance) เป็นตัวตัดสินการตัดวงจรสามารถอธิบายการทำงานได้ด้วยภาพที่ 2.5 และสมการที่(2.2) โดยจากภาพที่ 2.5 (ก) จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาในแกนของค่า B กับ G นั้น ลักษณะสมบัติแบบโมจะเป็นเส้นตรงโดยมีไซนการทำงานอยู่ในบริเวณ TRIP และเมื่อทำการแปลงค่าจากแกนจาก B-G ไปเป็น R-X จะพบว่าลักษณะสมบัติแบบโมบนแกน R-X จะเปลี่ยนเป็นรูปกราฟวงกลมดังภาพที่ 2.5 (ข) ซึ่งสมการของวงกลมในแกน R-X นี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติในแกน B-G ดังสมการที่ (2.51) ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [18]



ภาพที่ 2.5 ลักษณะสมบัติของไมรีเลย์ในแกน G - B และแกน R - X

$$\left(R + \frac{m}{2k}\right)^2 + \left(X + \frac{1}{2k}\right)^2 = \frac{m^2 + 1}{4k^2} \tag{2.2}$$

เมื่อพิจารณาการป้องกันทั้ง 3 โซนการป้องกันด้วยลักษณะสมบัติแบบไมจะได้ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ภาพโซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทางแบบไม

2.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการทำงานรีเลย์ระยะทาง

ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของรีเลย์ระยะทาง คือการทำงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ระยะทาง เนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความต้านทานอาร์ก (Arc resistance), การแกว่งของระบบไฟฟ้า (Power system swing), การตั้งค่า (Setting value) ของรีเลย์ระยะทาง, อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) และ เขตของการป้องกัน (Zone of protection)

2.2.1 ความต้านทานอาร์ก

ความต้านทานอาร์ก (Arc resistance) จะเกิดขึ้นขณะเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า โดยความต้านทานอาร์กจะไปเพิ่มความต้านทานของระบบไฟฟ้าและทำให้ค่ามของอิมพีแดนซ์ลดลง ทำให้รีเลย์ระยะทางเห็นว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไกลกว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้เกิดผลคือ ถ้าเกิดความผิดพลาดที่ปลายของระยะป้องกันโซน 1 รีเลย์จะมองเห็นว่าเป็นความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่ในโซน 2 ทำให้รีเลย์สั่งตัดความผิดพลาดออกจากวงจรช้าไปกว่าที่ควรจะเป็น

2.2.2 การแกว่งของระบบไฟฟ้า

การแกว่งของระบบไฟฟ้า (Power system swing) มีโอกาสเกิดได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การเกิดการความผิดพลาดแล้วเกิดการตัดความผิดพลาดนั้นออกจากระบบไฟฟ้า และการ Switching Operation ซึ่งเกี่ยวกับการตัดต่อโหลดขนาดใหญ่ เป็นต้น

การแกว่งของระบบไฟฟ้า จะทำให้ค่าแรงดันและกระแส ณ จุดติดตั้งรีเลย์ระยะทางมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้รีเลย์ระยะทางทำงานผิดพลาดเพราะค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นแกว่งไปมาจนเข้ามาสู่โซนการป้องกันต่างๆ ซึ่งในกรณีที่เกิดความผิดพลาด หากรีเลย์ระยะทาง ณ ตำแหน่งอื่นๆทำงานผิดพลาดเนื่องจากปัญหาการแกว่งของระบบไฟฟ้า จะส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น และอาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ (Blackout)

2.2.3 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นมีค่ามากขึ้น และอาจส่งผลให้รีเลย์ระยะทางไม่ทำงานเพราะค่าอิมพีแดนซ์อยู่นอกโซนการป้องกัน

2.2.4 การตั้งค่าของรีเลย์ระยะทาง

การตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง ถ้าหากตั้งค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance setting) สูงเกินไป รีเลย์อาจทำงานผิดพลาดในกรณีโหลดเกิน แต่หากตั้งค่าอิมพีแดนซ์ต่ำเกินไป รีเลย์อาจทำงานผิดพลาดในกรณีเกิดความผิดปกติ

โดยการตั้งค่าของรีเลย์ระยะทางจะมีค่าแน่นอนตั้งแต่การตั้งค่าครั้งแรก แต่ระบบไฟฟ้ามักมีการเปลี่ยนแปลงเสมอ เช่น การเปลี่ยนสายส่ง, การตัดสายส่ง และ การเพิ่มสายส่ง เป็นต้น ดังนั้นค่าที่ตั้งไว้ตั้งแต่แรกอาจจะไม่เหมาะสมหากระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นต้องตั้งค่าใหม่หรือปรับการตั้งค่าใหม่อย่างสม่ำเสมอ

การตั้งค่าในกรณีที่สายส่งระยะสั้นมาก อาจจะทำให้รีเลย์ระยะทางเห็นความผิดปกติโซนการป้องกันได้

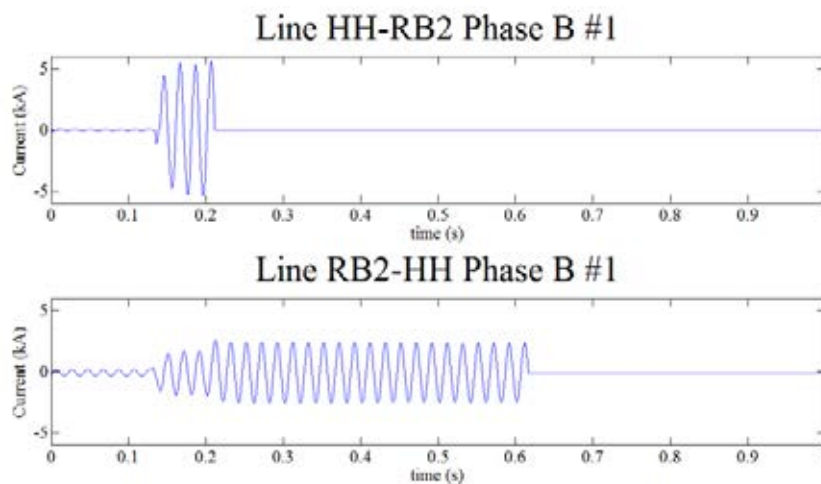
2.2.5 เขตของการป้องกัน

เขตของการป้องกัน (Zone of protection) เป็นการประสานการทำงานของรีเลย์ป้องกันสายส่งไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยการทำงานของรีเลย์ระยะทางจะมีการวางระบบให้มีการประสานการทำงาน (Coordination) ของรีเลย์เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการทำงานของระบบป้องกันปฐมภูมิ โดยเขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางที่มักทำงานผิดพลาด คือ เขตของการป้องกันโซน 1 และ เขตของการป้องกันโซน 3

1. เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 1

เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 1 จะตั้งค่าไว้ที่ 85-90% ของสายส่งไฟฟ้าที่ต้องการป้องกัน ดังนั้นหากเกิดความผิดปกติที่ต้นทางหรือปลายทางของสายส่งไฟฟ้า อาจจะทำให้รีเลย์ระยะทางตัดสินใจการทำงานผิดพลาดเป็นการทำงานโซน 2 ได้ ตัวอย่างเช่น รายงานความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าแห่งประเทศไทย เมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2555 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ พบเหตุผิดปกติบนตำแหน่งต้นทางของสายส่งที่เชื่อมระหว่างสถานีไฟฟ้าหัวหิน (HH) และสถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 (RB2) โดยรีเลย์ระยะทางที่สถานีไฟฟ้าหัวหินตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 และใช้เวลาในการกำจัดความผิดปกติ 67 มิลลิวินาที แต่เนื่องจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นของสายส่งฝั่งสถานีไฟฟ้าหัวหิน ทำให้รีเลย์ระยะทางที่สถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 ตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 และใช้เวลาในการกำจัดความผิดปกติ 475 มิลลิวินาที โดยรูปคลื่นของกระแสที่บันทึกได้

จากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ข้อผิดพลาดอัตโนมัติ (Digital Fault Recorder, DFR) ดังภาพที่ 2.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสในช่องสัญญาณที่เกิดความผิดปกติจากสถานีไฟฟ้าทั้ง 2 สถานี



ภาพที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสของเหตุการณ์ผิดปกติตัวอย่าง

2. เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 3

เขตการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เนื่องจากรีเลย์ระยะทางโซน 3 มีขอบเขตการทำงานที่กว้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีจุดเชื่อมต่อจากหลายแหล่งจ่าย [20] ซึ่งจะมีโซนการทำงานของรีเลย์โซน 3 กว้างกว่าแบบที่เป็นสายส่งเส้นเดียวมาก จึงอาจจะตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่เข้ามาในโซนการทำงานได้แม้จะเป็นกรณีที่ไม่ใช่การเกิดความผิดปกติขึ้น เช่น การเกิดสภาวะไหลตเกิน และการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน การตัดวงจรในสถานการณ์เหล่านี้อาจจะทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นและนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของทั้งระบบได้ โดยความผิดพลาดของการรีเลย์ระยะทางโซน 3 จะอธิบายในกรณีการเกิดสภาวะไหลตเกิน และการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน ได้ดังนี้

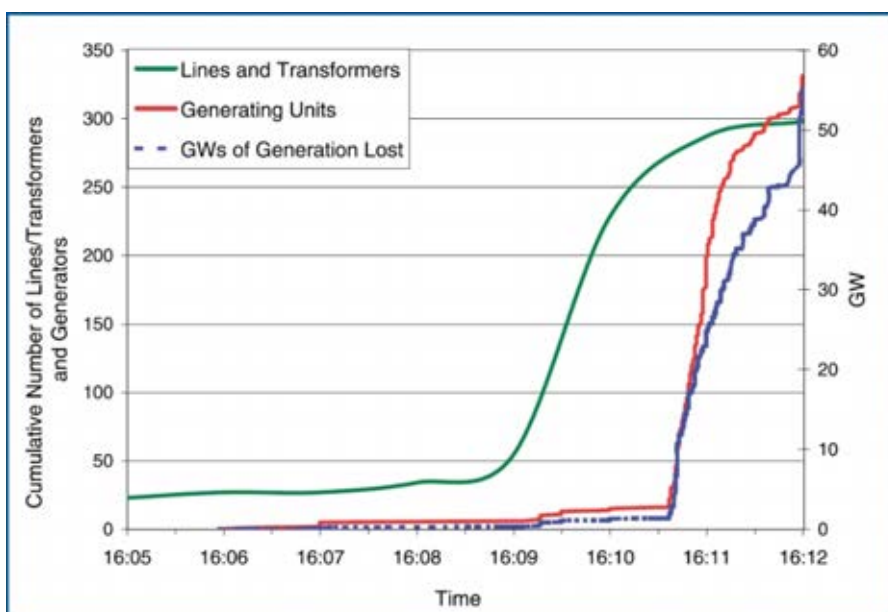
1. กรณีการเกิดสภาวะไหลตเกิน

เหตุผลที่รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ในโซนการทำงานในสภาวะไหลตเกินเพราะเมื่อเกิดสภาวะไหลตเกินขึ้นค่ากระแสในสายส่งจะเพิ่มสูง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์โซน 3 มองเห็นมีค่าต่ำจนตกอยู่ในโซนการทำงาน ส่งผลให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตัดวงจรสายส่งเส้นที่ตนเองป้องกันอยู่ออกไป ผลที่เกิด

คือกำลังไฟฟ้าที่เคยไหลผ่านสายส่งเส้นนั้นจะเปลี่ยนทิศทางไปไหลในสายส่งเส้นอื่น ทำให้สายส่งเส้นอื่นที่ทำงานใกล้เคียงก็เกิดสภาวะโหลดเกินตามไปด้วย

เมื่อสายส่งเส้นอื่นเกิดสภาวะโหลดเกินรีเลย์โซน 3 ที่เห็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นนั้นตกอยู่ในโซนการป้องกันจะทำการตัดวงจรออกอีกตามลำดับ ซึ่งการตัดวงจรในลักษณะนี้จะทำให้เกิดการเปิดวงจรสายส่งอย่างต่อเนื่องและนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง

เหตุการณ์การตัดวงจรผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางโซน 3 เนื่องจากสภาวะโหลดเกินถูกระบุไว้อย่างชัดเจนใน [21] ว่าเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างที่สหรัฐอเมริกาเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม ค.ศ. 2003 ซึ่งในรายงานฉบับนี้ได้ระบุว่ารีเลย์ระยะทางโซน 3 ได้ตัดสายส่งสำคัญออกจากระบบเป็นจำนวนมากเนื่องจากตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ในโซนการทำงานที่เป็นผลมาจากสภาวะโหลดเกินแล้วตัดสินใจว่าเป็นความผิดพลาด ผลคือในช่วงเวลาระหว่าง 16:05:57 ถึง 16:10:38 ตามเวลาท้องถิ่น มีไฟฟ้าที่ถูกตัดออกจากระบบเป็นปริมาณมหาศาลดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 จำนวนสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หลุดออกจากระบบไฟฟ้า [21]

2. กรณีการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน

ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันที่ส่งผลให้รีเลย์ระยะทางโซน 3 ตัดวงจรผิดพลาดนั้นจะมีลักษณะปัญหาที่ใกล้เคียงกันกับปัญหาการเกิดสภาวะโหลดเกินคือเมื่อแรงดันที่บัสที่รีเลย์ตรวจจับอยู่มีค่าต่ำลง รีเลย์จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายต่ำลง

แล้วตัดวงจรสายที่รีเลย์นั้นป้องกันอยู่ ออกซึ่งอาจจะทำให้ปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพแรงดันยิ่งทวีความรุนแรงจนนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้

2.3 แนวทางในการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

การศึกษางานวิจัยในอดีต [5]-[14],[17] สามารถจำแนกแนวทางในการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. รีเลย์ปรับตัวได้ (Adaptive relay)
2. รีเลย์ไพลอต (Pilot relay)
3. การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection)

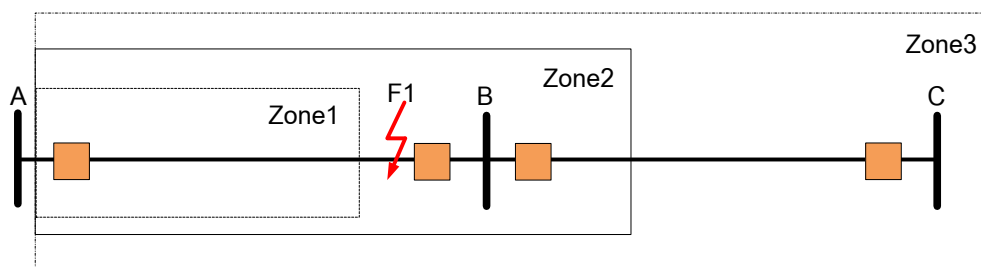
2.3.1 การปรับปรุงโดยใช้รีเลย์ปรับตัวได้

การปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ปรับตัวได้ (Adaptive relay) สามารถแบ่งเป็นรีเลย์ปรับตัวได้ที่ไม่อาศัยช่องทางการสื่อสาร และรีเลย์ปรับตัวได้ที่อาศัยช่องทางการสื่อสาร ซึ่งรีเลย์ปรับตัวได้ทั้งสองแบบ เป็นการประยุกต์แนวคิดเกี่ยวกับการทำให้รีเลย์มีความสามารถในการปรับค่าการทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งมีจุดประสงค์หลัก คือให้รีเลย์ระยะทางทำงานเฉพาะในสถานการณ์ที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น แต่ไม่ทำงานในกรณีอื่นๆ แม้รีเลย์ระยะทางจะตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์ในโซนการทำงานได้ก็ตาม

2.3.2 การปรับปรุงการใช้รีเลย์ไพลอต

การป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ไพลอต(Pilot relay) เป็นการนำหลักการรีเลย์ผลต่าง (Differential relay) มาดัดแปลง และใช้ช่องทางการสื่อสารระหว่างปลายแต่ละด้านของสายส่งเพื่อให้สามารถป้องกันสายส่งได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีกรหน่วงเวลา [18] โดยการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในระบบส่งไฟฟ้าโดยรีเลย์ไพลอตจะเป็นการพัฒนาการป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 1 ให้ครอบคลุมแต่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

หลักการป้องกันสายส่งโดยใช้รีเลย์ระยะทาง ไม่สามารถกำจัดความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้ง 2 ข้างของสายส่งไฟฟ้าได้ทันที เนื่องจากรีเลย์จะตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ข้อมูลเพียงข้างเดียว ทำให้การกำจัดความผิดปกติที่ปลายอีกข้างหนึ่งของสายส่งจะต้องมีการหน่วงเวลาเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยเมื่อเกิดความผิดปกติที่จุด F1 รีเลย์ระยะทางที่บัส A จะตัดสินใจว่าความผิดปกติอยู่ในโซน 2 ซึ่งทำให้การทำงานในการกำจัดความผิดปกติจะมีการหน่วงเวลาออกไป



ภาพที่ 2.9 เขตของการป้องกันสายส่งโดยรีเลย์ระยะทาง

รูปแบบการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการประยุกต์รีเลย์ไหลอด (Pilot Relaying Schemes) มีรูปแบบหลากหลาย เช่น Zone1 Extension Scheme, Zone Acceleration Scheme, Direction Comparison Blocking Scheme, Direct Underreaching Transferred Trip (DUTT) Scheme, Permissive Overreaching Transferred Trip (POTT) Scheme และ Permissive Underreaching Transferred Trip (PUTT) Scheme เป็นต้น โดยแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียในแง่ของความเร็ว (Speed) ความมั่นคง (Security) และความวางใจได้ (Dependability) ต่างกัน และเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานแตกต่างกัน

2.3.3 การปรับปรุงการโดยใช้การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

คำนิยามของการป้องกันแบบพื้นที่กว้างยังไม่มีข้อกำหนดอย่างเป็นทางการ โดยหากนิยามการป้องกันแบบพื้นที่กว้างเป็นการป้องกันที่มาจากบริเวณที่ห่างไกลออกไป จะสามารถแบ่งการป้องกันแบบพื้นที่กว้างออกไปเป็น 2 ประเภทคือ

1. การปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้างซึ่งไม่อาศัยช่องทางการสื่อสาร

การป้องกันแบบพื้นที่กว้างโดยไม่อาศัยช่องทางการสื่อสาร คือ การป้องกันของรีเลย์ระยะทางโซน 2 และ โซน 3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันสำรองที่มาจากบริเวณที่ห่างออกไป (Remote area)

การปรับปรุงการทำงานของสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้างซึ่งไม่อาศัยช่องทางการสื่อสารคือ การปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 2 และ โซน 3 ให้สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แม่นยำยิ่งขึ้น เพราะการทำงานที่ผิดพลาดของรีเลย์ระยะทางโซน 2 และ โซน 3 อาจส่งผลให้ระบบไฟฟ้าสูญเสียความเชื่อถือได้ และ เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

2. การปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้างซึ่งอาศัยช่องทางสื่อสาร

การป้องกันแบบพื้นที่กว้างโดยอาศัยช่องทางสื่อสาร คือ การป้องกันรูปแบบใหม่ ซึ่งผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีสารสนเทศ การสื่อสาร และ ไฟฟ้ากำลัง เพื่อปรับปรุงการระบบป้องกันให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

การพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารในระบบโครงข่ายอัจฉริยะ (Smart Grid) เป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงมีงานวิจัย[7]-[14] นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงการป้องกันในระบบส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) ซึ่งสามารถประยุกต์เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้าได้ เช่น บัสบาร์, หม้อแปลง และ สายส่งไฟฟ้า โดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้างจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Device, IED) ในเขตการป้องกันมาเป็นเงื่อนไขในการทำงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงประยุกต์การป้องกันแบบพื้นที่กว้างเพื่อปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้า โดยหลักการและทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการป้องกันแบบพื้นที่กว้างจะกล่าวในบทที่ 3

บทที่ 3

การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

เนื้อหาในบทนี้ นำเสนอเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) ซึ่งประกอบไปด้วย เขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง, การแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง และการตรวจจับความผิดปกติของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

Wide Area Protection (WAP) คือการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ซึ่งเป็นระบบป้องกันที่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices, IEDs) เพื่อเฝ้าระวังและแก้ไขปัญหาต่างๆ เช่น การกำจัดความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ การเฝ้าระวังและป้องกันปัญหาเสถียรภาพ เป็นต้น โดยการพัฒนากระบวนการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) อาศัยเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์สารสนเทศและการสื่อสาร เป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ของการป้องกันในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

มาตรฐาน IEC61850 นิยาม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices, IEDs) คือ อุปกรณ์ที่สามารถทำงานซึ่งประกอบด้วยโปรเซสเซอร์มากกว่า 1 ตัว และมีประสิทธิภาพในการรับข้อมูลหรือคำสั่งควบคุมจากแหล่งภายนอก (External source) และ ส่งข้อมูลหรือคำสั่งควบคุมไปยังแหล่งภายนอกได้

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices, IEDs) [22] เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีไมโครคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กแบบฝังตัว เพื่อส่งคำสั่งควบคุมไปยังตัวตรวจวัด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดจะรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าและสามารถออกคำสั่งควบคุมไปยังตัวตรวจวัดในกรณีที่เกิดความผิดปกติ รีเลย์แบบดิจิทัลเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแบบแรก ซึ่งใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีฟังก์ชันในการควบคุม และ ป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดถูกออกแบบเพื่อรองรับมาตรฐาน IEC61850 มาตรฐานสำหรับระบบอัตโนมัติในสถานีไฟฟ้าย่อยซึ่งสามารถสื่อสาร และ ทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ต่างๆได้

การป้องกันแบบพื้นที่กว้างสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ การแบ่งเขตการป้องกัน และการตรวจจับความผิดปกติของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

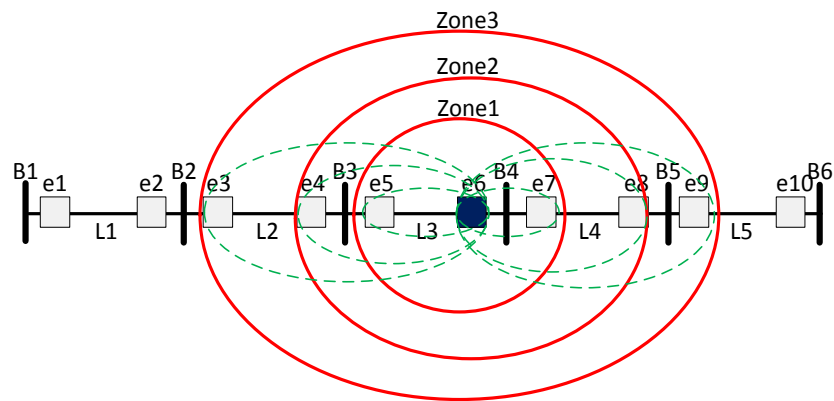
3.1 การแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

การแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้างมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบป้องกันแบบพื้นที่กว้าง เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบป้องกันแบบพื้นที่กว้างสามารถสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้อย่างอิสระ แต่ว่าการใช้ข้อมูลในการประมวลผลที่มากเกินไปจนความจำเป็นอาจส่งผลเสียต่อการตัดสินใจในการออกคำสั่งควบคุมไปยังตัวตัวจริงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแบ่งเขตของการติดต่อสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในแต่ละเขตการป้องกัน โดยมีเหตุผลสนับสนุน 2 ประการ [8], [23] คือ

1. การป้องกันอุปกรณ์ต่างๆในระบบจำเป็นต้องใช้การประมวลผลที่รวดเร็ว การใช้ข้อมูลจำนวนมากอาจส่งผลให้การประมวลผลช้ากว่าที่ควรจะเป็น
2. ขณะเกิดความผิดปกติในระบบ บริเวณที่อยู่ใกล้ตำแหน่งเกิดความผิดปกติจะได้รับผลกระทบมาก แต่บริเวณที่ห่างออกไปจะได้รับผลกระทบน้อยลงเรื่อยๆ จึงทำให้ข้อมูลจากบริเวณที่ห่างออกไปไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องนำข้อมูลของบริเวณที่ห่างออกไปมาประมวลผล

เขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง เกิดจากการจัดกลุ่มการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดแสดงในภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของเขตการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e6 โดย สัญลักษณ์ "B" แทนบัสบาร์ในระบบส่งไฟฟ้า, สัญลักษณ์ "L" แทนสายส่งไฟฟ้า, สัญลักษณ์ "e" แทนอุปกรณ์ป้องกัน (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด), วงกลมเส้นประจะแสดงเขตการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ วงกลมเส้นทึบจะแสดงเขตการป้องกันซึ่งแบ่งออกเป็น เขตการป้องกันที่ 1, เขตการป้องกันที่ 2 และ เขตการป้องกันที่ 3



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างเขตของการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6

จากภาพที่ 3.1 เขตการป้องกันแรกของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6 คือ สายส่งไฟฟ้า L3 และ บัสบาร์ B4 โดยการป้องกันสายส่งไฟฟ้า L3 นั้น e6 จะแลกเปลี่ยนข้อมูลกับ e5 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าเกิดความผิดปกติหรือไม่ และการป้องกันบัสบาร์ B4 นั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6 จะแลกเปลี่ยนข้อมูลกับ e7 ในการตัดสินใจเช่นกัน หากเกิดความผิดปกติสายส่งไฟฟ้า L3 หรือ บัสบาร์ B4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6 จะส่งคำสั่งควบคุมให้ตัวตัดวงจรทำงานเพื่อแยกความผิดปกติ นั้นออกจากระบบ

จากภาพที่ 3.1 เขตการป้องกันที่ 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6 คือ บัสบาร์ B3 และ สายส่งไฟฟ้า L4 ซึ่งจะเป็นเขตการป้องกันสำรองเมื่อเขตการป้องกันแรกไม่ทำงานหรือทำงานผิดพลาด โดยการป้องกันในเขตนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6 จะต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลกับ e4 และ e8 เพื่อป้องกัน บัสบาร์ B3 และ สายส่งไฟฟ้า L4 ตามลำดับ

จากภาพที่ 3.1 เขตการป้องกันที่ 3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลาด e6 จะต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลกับ e3 และ e9 เพื่อป้องกันสายส่งไฟฟ้า L2 และบัสบาร์ B5 ตามลำดับ โดยเขตการป้องกันที่ 3 จะเป็นเขตการป้องกันสำรองของเขตการป้องกันที่ 2 อีกชั้นหนึ่ง

3.2 ขั้นตอนวิธีในการแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

จากการศึกษางานวิจัยในอดีต [7]-[11],[13],[23]-[24] ขั้นตอนวิธีในการแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง สามารถประยุกต์ทฤษฎีต่างๆมากมาย เช่น แผนภาพต้นไม้ (Topology tree), ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system), ทฤษฎีกราฟ (Graph theory) และ ทฤษฎีเพทรีเน็ต (Petri net theory) และอื่นๆ ซึ่งขั้นตอนวิธีที่ได้ต่างมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

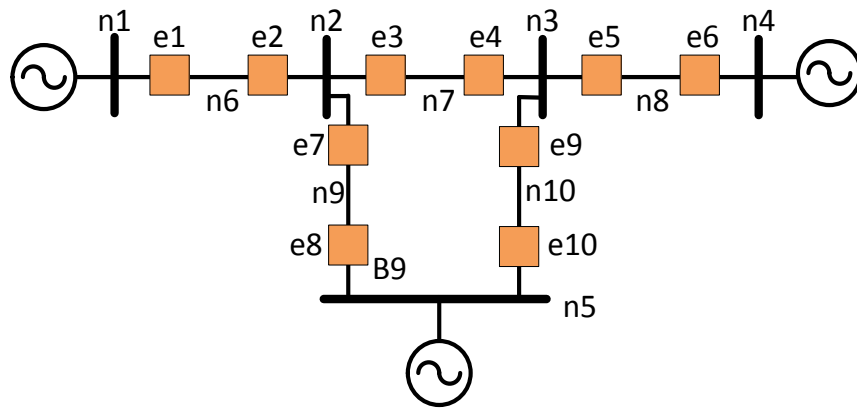
- แผนภาพต้นไม้ เป็นวิธีที่ง่ายและชัดเจน แต่ไม่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีใหญ่และมักเป็นแบบวง (Ring) เพราะวิธีแผนภาพต้นไม้จะพิจารณากรณีที่ไม่มีการวนแบบปิด (Loop)
- ระบบผู้เชี่ยวชาญ เป็นวิธีที่สามารถประยุกต์กับระบบได้ง่าย แต่วิธีระบบผู้เชี่ยวชาญไม่ได้อธิบายขั้นตอนวิธีอนุมาน (Inference engine) ในการวิเคราะห์อย่างละเอียด
- ทฤษฎีกราฟ เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้า แต่ไม่ได้แสดงขั้นตอนวิธีในการแบ่งเขตการป้องกันอย่างละเอียด
- ทฤษฎีเพทรีเน็ต เป็นวิธีที่มีความชัดเจนและซับซ้อนน้อยที่สุด ซึ่งการแบ่งเขตการป้องกันจะประยุกต์บางส่วนของทฤษฎีนี้เท่านั้น เพราะโดยทั่วไปทฤษฎีเพทรีเน็ตจะใช้ในการจำลองสถานการณ์ทำงานต่างๆให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถวิเคราะห์ได้ ส่วนใหญ่จะประยุกต์ใช้ในระบบพลวัต (Dynamic system)

ดังนั้นขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมในการแบ่งเขตการป้องกันในการป้องกันแบบพื้นที่กว้างจึงเป็น ทฤษฎีกราฟ และ ทฤษฎีเพทรีเน็ต เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีอื่น โดยทฤษฎีพื้นฐานของวิธีทฤษฎีกราฟ และ ทฤษฎีเพทรีเน็ต ที่งานวิจัยในอดีตนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งเขตการป้องกันในการป้องกันแบบพื้นที่กว้างรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การประยุกต์ทฤษฎีกราฟ

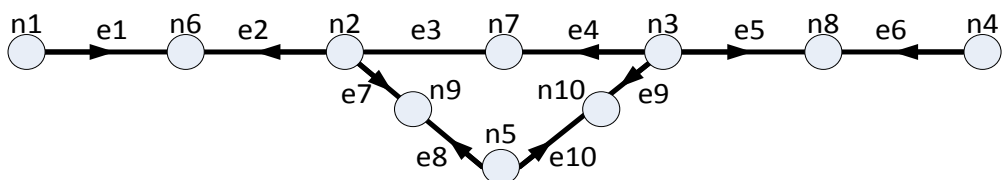
นิยามของกราฟ G คือ เซตจำกัด 2 เซต ได้แก่ เซตที่ไม่เป็นเซตว่างของจุดยอด (Vertex) แทนด้วยสัญลักษณ์ $V(G)$ และเซตของเส้นเชื่อม (Edge) ที่เชื่อมระหว่างจุดยอด แทนด้วยสัญลักษณ์ $E(G)$

นิยามของกราฟระบุทิศทาง D คือ เซตจำกัด 2 เซต ได้แก่ เซตที่ไม่เป็นเซตว่างของจุดยอด (Vertex) แทนด้วยสัญลักษณ์ $V(D)$ และเซตของเส้นเชื่อมซึ่งมีทิศทาง (Edge) ที่เชื่อมระหว่างจุดยอด แทนด้วยสัญลักษณ์ $E(D)$



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างโครงข่ายไฟฟ้า

ตัวอย่างโครงข่ายไฟฟ้าในภาพที่ 3.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปกราฟระบุทิศทางได้ โดยการประยุกต์ทฤษฎีกราฟกับระบบไฟฟ้ากำลัง จะกำหนดให้ บัสบาร์ และสายส่งไฟฟ้า แทนด้วย จุดยอด และอุปกรณ์ป้องกัน แทนด้วย เส้นเชื่อม โดยจะกำหนดทิศทางให้เส้นเชื่อมพุ่งออกจากบัสบาร์ไปสู่สายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 กราฟระบุทิศทางของโครงข่ายไฟฟ้าตัวอย่าง

กราฟระบุทิศทางสามารถเขียนแทนด้วยเมทริกซ์ได้ 2 วิธี คือ เมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence matrix) และ เมทริกซ์ประชิด (Adjacency matrix) โดยที่

เมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) คือเมทริกซ์ขนาด $n \times m$ เมื่อ n คือจำนวนจุดยอดทั้งหมดของกราฟ และ m คือจำนวนเส้นเชื่อมทั้งหมดของกราฟ เมทริกซ์อุบัติการณ์ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดยอดและเส้นเชื่อมของกราฟ โดยที่

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ เชื่อมต่อกับจุดเริ่มต้นของเส้นเชื่อม } j \\ -1 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ เชื่อมต่อกับจุดสิ้นสุดของเส้นเชื่อม } j \\ 0 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ ไม่เชื่อมต่อกับเส้นเชื่อม } j \end{cases}$$

กราฟระบุทิศทางที่แสดงดังภาพที่ 3.3 สามารถแทนด้วยเมทริกซ์อุบัติการณ์ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 & e7 & e8 & e9 & e10 \\ \begin{matrix} n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \\ n5 \\ n6 \\ n7 \\ n8 \\ n9 \\ n10 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

เมทริกซ์ประชิด (Adjacency matrix, B) คือ เมทริกซ์ขนาด $n \times n$ เมื่อ n คือ จำนวนจุดยอดทั้งหมดของกราฟ เมทริกซ์ประชิดจะใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดยอดที่อยู่ประชิดกันของกราฟ โดยที่

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ ประชิดกับจุดยอดที่ } j \\ 0 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ ไม่ประชิดกับจุดยอดที่ } j \end{cases}$$

กราฟระบุทิศทางที่แสดงดังภาพที่ 3.3 สามารถแทนด้วยเมทริกซ์ประชิดได้ดังนี้

$$\begin{array}{c}
 n1 \quad n2 \quad n3 \quad n4 \quad n5 \quad n6 \quad n7 \quad n8 \quad n9 \quad n10 \\
 B = \begin{array}{c}
 n1 \\
 n2 \\
 n3 \\
 n4 \\
 n5 \\
 n6 \\
 n7 \\
 n8 \\
 n9 \\
 n10
 \end{array} \left[\begin{array}{cccccccccc}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

เมทริกซ์เข้าถึงได้ (Reachability matrix, R) คือ เมทริกซ์ขนาด $n \times n$ เมื่อ n คือ จำนวนจุดยอดทั้งหมดของกราฟ เมทริกซ์เข้าถึงได้จะใช้แสดงความสัมพันธ์ของแนวเดินระหว่างจุดยอด 2 จุด โดยที่

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ มีแนวเดินในกราฟระหว่างจุดยอดที่ } i \text{ และจุดยอดที่ } j \\ 0 & \text{เมื่อ ไม่มีแนวเดินในกราฟระหว่างจุดยอดที่ } i \text{ และจุดยอดที่ } j \end{cases}$$

เมทริกซ์เข้าถึงได้ยังแสดงความสัมพันธ์ของแนวเดินระหว่างจุดยอดหลายจุดที่มีจำนวนการเชื่อมต่อน้อยกว่าอันดับของการเข้าถึงได้ p จากกราฟระบุทิศทางที่แสดงดังภาพที่ 3.3 เมื่อเรากำหนดให้อันดับการเข้าถึงได้คือ $p=3$ สามารถแทนด้วยเมทริกซ์เข้าถึงได้ ดังต่อไปนี้

$$\begin{array}{c}
 n1 \quad n2 \quad n3 \quad n4 \quad n5 \quad n6 \quad n7 \quad n8 \quad n9 \quad n10 \\
 R = \begin{array}{c}
 n1 \\
 n2 \\
 n3 \\
 n4 \\
 n5 \\
 n6 \\
 n7 \\
 n8 \\
 n9 \\
 n10
 \end{array} \left[\begin{array}{cccccccccc}
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

งานวิจัยในอดีต [8] ประยุกต์หลักการทฤษฎีกราฟในการแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง โดยใช้เมทริกซ์อุบัติการณ์ (Complete Incidence matrix, M)

เมทริกซ์อุบัติการณ์สมบูรณ์ (Complete Incidence matrix, M) คือเมทริกซ์ขนาด $p \times q$ เมื่อ p คือจำนวนจุดยอดทั้งหมดของกราฟ และ q คือจำนวนเส้นเชื่อมทั้งหมดของกราฟ เมทริกซ์อุบัติการณ์ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดยอดและเส้นเชื่อมของกราฟ โดยที่

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ เชื่อมต่อกับจุดเริ่มต้นของเส้นเชื่อม } j \\ -1 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ เชื่อมต่อกับจุดสิ้นสุดของเส้นเชื่อม } j \\ 0 & \text{เมื่อ จุดยอดที่ } i \text{ ไม่เชื่อมต่อกับเส้นเชื่อม } j \end{cases}$$

งานวิจัย [8] ไม่ได้นำเสนอวิธีการแบ่งเขตการป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้างอย่างละเอียด แต่ได้นำเสนอกฎการแบ่งโซนการป้องกันโดยวิธีทฤษฎีกราฟไว้ดังนี้

1. การป้องกันลำดับแรก

- ครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices) ติดตั้งอยู่
- ครอบคลุมบัสบาร์ที่อยู่ตำแหน่งหลังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

2. การป้องกันลำดับที่ 2

- ครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices) ติดตั้งอยู่
- ครอบคลุมบัสบาร์ที่อยู่ตรงข้ามกับตำแหน่งที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดติดตั้งอยู่

3. การป้องกันลำดับที่ 3

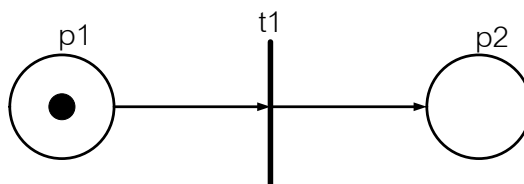
- ครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices) ติดตั้งอยู่
- ครอบคลุมบัสบาร์ที่อยู่ตรงข้ามกับตำแหน่งที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดติดตั้งอยู่
- ครอบคลุมสายส่งทุกสายไฟฟ้าที่เชื่อมกับสายส่งที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Devices) ติดตั้งอยู่

3.2.2 การประยุกต์ทฤษฎีเพทรีเน็ต

ทฤษฎีเพทรีเน็ต [25] เป็นแนวคิดอย่างหนึ่งที่สามารถจำลองสถานการณ์ทำงานต่างๆให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ โดยจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเพลส (Place) , ทรานสิชัน (Transition) และ อาร์ก (Arc) โดยเพลสจะแสดงในรูปของวงกลม, ทรานสิชันแสดงอยู่ในรูปของแท่งสี่เหลี่ยม และ อาร์กแสดงอยู่ในรูปของเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ตัวอย่างของการจำลองระบบโดยใช้เพทรีเน็ต คือ ระบบฮาร์ดแวร์ของคอมพิวเตอร์ ระบบการจัดแบ่งทรัพยากรในคอมพิวเตอร์ ระบบกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม และ การจำลองการไหลของข้อมูลในองค์กร เป็นต้น

การแสดงสถานะของระบบในขณะใดๆ แสดงโดยใช้โทเค็น (Token) ซึ่งแสดงด้วยจุดภายในเพลส ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ซึ่งเพลสแต่ละเพลสอาจจะมีโทเค็นหรือไม่ก็ได้



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต

เพทรีเน็ตประกอบด้วยโครงสร้างส่วนต่างๆ คือ $PN = (P, N, T, O, M_0)$ โดยกำหนดให้ $N = \{0, 1, 2, \dots\}$ โดยที่

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ คือ เซตของเพลส

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ คือ เซตของทรานสิชัน

$I : (P \times T) \rightarrow N$ คือ อินพุตฟังก์ชัน แสดงโดยอาร์กจากเพลสสู่ทรานสิชัน

$O : (P \times T) \rightarrow N$ คือ เอาต์พุตฟังก์ชัน แสดงโดยอาร์กจากทรานสิชันสู่เพลส

$M_0 : P \rightarrow N$ คือ มาร์กกิงเริ่มต้น

จากภาพที่ 3.4 จะได้ว่า

$$P = \{p_1, p_2\} \quad , \quad T = \{t_1\}$$

$$I(p_1, t_1) = 1 \quad , \quad I(p_2, t_1) = 0$$

$$O(p_1, t_1) = 0 \quad , \quad O(p_2, t_1) = 1$$

$$M_0(p_1) = 1 \quad , \quad M_0(p_2) = 0$$

เพทรีเน็ตสามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของระบบ เมื่อเกิดเหตุการณ์ต่างๆได้โดยการคำนวณจากสมการสเตทของแบบจำลองเพทรีเน็ต

เมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A_{ij}) เป็นเมทริกซ์ที่แสดงการเชื่อมต่อระหว่างเพลสและทรานสิชันต่างๆภายในเพทรีเน็ต เมทริกซ์ขนาด $n \times m$ เมื่อ n คือจำนวนของทรานสิชันทั้งหมด และ m คือจำนวนของเพลสทั้งหมด เมื่อสมาชิกในเมทริกซ์อุบัติการณ์ (a_{ij}) ดังนี้ $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$ โดยที่

$$a_{ij}^+ = O(p_j, t_i) \quad \text{คือ} \quad \text{น้ำหนักของอาร์กที่ต่อระหว่างทรานสิชัน } t_i \text{ ไปยังเอาต์พุตเพลส } p_j$$

$$a_{ij}^- = I(p_j, t_i) \quad \text{คือ} \quad \text{น้ำหนักของอาร์กที่ต่อระหว่างอินพุตเพลส } p_j \text{ ไปยังทรานสิชัน } t_i$$

จากภาพที่ 3.4 แสดงเมทริกซ์อุบัติการณ์ได้ดังนี้ $A = [0 \ 1] - [1 \ 0] = [-1 \ 1]$ สมการสเตทสำหรับเพทรีเน็ตแสดงถึงมาร์กกิงภายในเพทรีเน็ต ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโทเค้นหลังจากการยิงทรานสิชัน (Firing Vector) ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$M_k = M_{k-1} + A^T u_k \quad ; k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

โดยที่

$$M_k \quad \text{คือ} \quad \text{เมทริกซ์ที่แสดงมาร์กกิงหลังจากการยิงทรานสิชัน}$$

$$M_{k-1} \quad \text{คือ} \quad \text{เมทริกซ์ที่แสดงมาร์กกิงก่อนการยิงทรานสิชัน}$$

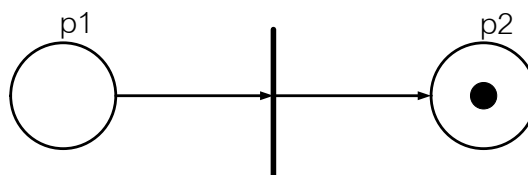
$$A \quad \text{คือ} \quad \text{เมทริกซ์อุบัติการณ์}$$

$$u_k \quad \text{คือ} \quad \text{เวกเตอร์ยิงทรานสิชัน (Firing vector)}$$

จากภาพที่ 3.4 หากยิงทรานสิชัน t_1 เวกเตอร์การยิงทรานสิชันคือ $u_1 = [1]$ ทำให้มาร์กกิงของเพทรีเน็ตหลังจากการยิงทรานสิชันเป็นดังนี้

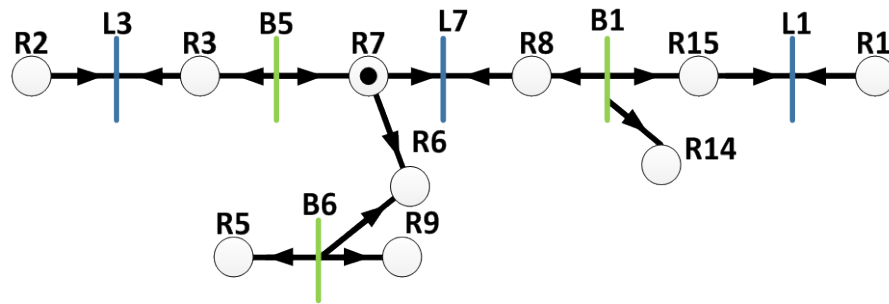
$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [-1 \ 1]^T [1] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

จาก M_1 แสดงว่าหลังจากการยิงทรานสิชัน t_1 แล้วโทเค้นจะย้ายจากเพลสที่ 1 ไปยังที่เพลสที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ตหลังจากยิงทรานสิชัน t_1

งานวิจัยในอดีต [23] ได้ประยุกต์สมการสเตทของแบบจำลองของทฤษฎีเพทรีเน็ตในการแบ่งเขตการป้องกันใน Wide Area Protection โดยจะอธิบายหลักการจากภาพที่ 3.6 โดย สัญลักษณ์ “B” แทนบัสบาร์ในระบบส่งไฟฟ้า, สัญลักษณ์ “L” แทนสายส่งไฟฟ้า และ สัญลักษณ์ “R” แทนอุปกรณ์ป้องกัน (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด)



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต เมื่อพิจารณาโทเค็นในเพลส R7

การประยุกต์สมการสเตทของแบบจำลองของทฤษฎีเพทรีเน็ตในการแบ่งเขตการป้องกันใน Wide Area Protection ปรับสมการให้อยู่ในรูปแบบที่ง่าย โดยจะอธิบายจากเมทริกซ์ 3 เมทริกซ์ ได้แก่ เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพลสและทรานสิชัน (Node-transition associated matrix, A), เมทริกซ์โทเค็น (Token matrix, B) และ เมทริกซ์แสดงลำดับการทริกของทรานสิชัน (Triggering matrix, C)

เมทริกซ์ Node-transition associated matrix (A) คือ เมทริกซ์ขนาด $n \times m$ เมื่อ n คือจำนวนเพลสทั้งหมด และ m คือจำนวนทรานสิชันทั้งหมด โดยที่

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ เพลส } i \text{ เชื่อมต่อกับทรานสิชัน } j \text{ และอาร์กมีทิศทางจากเพลสไปยังทรานสิชัน} \\ -1 & \text{เมื่อ เพลส } i \text{ เชื่อมต่อกับทรานสิชัน } j \text{ และอาร์กมีทิศทางจากทรานสิชันไปยังเพลส} \\ 0 & \text{เมื่อ เพลส } i \text{ ไม่เชื่อมต่อกับทรานสิชัน } j \end{cases}$$

เมทริกซ์ Token matrix (B) คือ เมทริกซ์ที่แสดงว่าหลังจากการยิงทรานสิชันแล้วโทเค็นจะไปอยู่ที่เพลสใด และ Token matrix เป็นเมทริกซ์ที่มีขนาด $1 \times n$ เมื่อ n คือจำนวนเพลสทั้งหมด โดยที่

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ เพลส } i \text{ ได้รับโทเค็นจากการยิงทรานสิชันครั้งนี้} \\ 0 & \text{เมื่อ เพลส } i \text{ ไม่ได้รับโทเค็นจากการยิงทรานสิชันครั้งนี้} \\ \text{other} & \text{เมื่อ เพลส } i \text{ ได้รับโทเค็นจากการยิงทรานสิชันก่อนหน้า} \end{cases}$$

เมทริกซ์ Triggering matrix (C) คือ เมทริกซ์ที่แสดงว่าการยิงทรานสิชันครั้งนั้นๆ จะผ่านทรานสิชันตำแหน่งใด และ Triggering matrix เป็นเมทริกซ์ที่มีขนาด $1 \times m$ เมื่อ m คือ จำนวนทรานสิชันทั้งหมด โดยที่

$$c_j = \begin{cases} \pm 1 & \text{เมื่อ ทรานสิชัน } j \text{ ถูกยิงทรานสิชันในครั้งนี้} \\ 0 & \text{เมื่อ ทรานสิชัน } j \text{ ไม่ถูกยิงทรานสิชันในครั้งนี้} \\ \text{other} & \text{เมื่อ ทรานสิชัน } j \text{ ถูกยิงไปทรานสิชันในครั้งก่อนหน้าแล้ว} \end{cases}$$

ตัวอย่างแบบจำลองในภาพที่ 3.6 สามารถเขียน เมทริกซ์ Node-transition associated matrix (A) ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & L3 & B5 & B6 & L7 & B1 & L1 \\ R2 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R3 & \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R5 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R6 & \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R7 & \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R8 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ R9 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R14 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\ R15 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\ R16 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

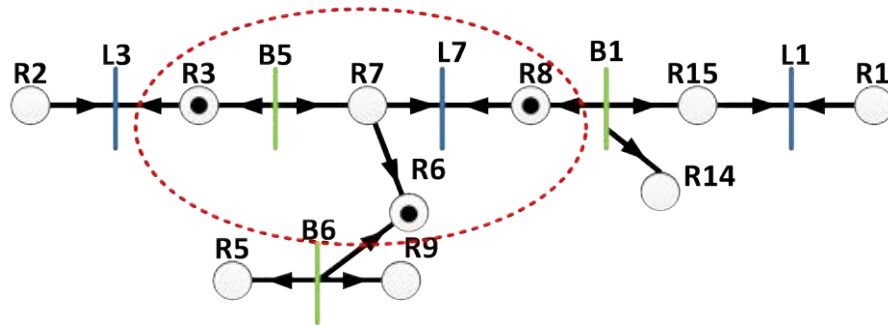
กำหนดเมทริกซ์โทเค็นแรกเริ่ม (Original token matrix) คือ เมทริกซ์ขนาด $1 \times n$ เมื่อ n คือจำนวนเพลสทั้งหมด สมาชิกในเมทริกซ์โทเค็นแรกเริ่มจะมีค่าเท่ากับ 0 ทุกตำแหน่ง ยกเว้นตำแหน่งที่เพลสนั้นมีโทเค็นจะมีค่าเท่ากับ 1 โดยภาพที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าเพลส R7 เป็นตำแหน่งที่มีโทเค็นอยู่ จึงสามารถกำหนดเมทริกซ์โทเค็นแรกเริ่มของแบบจำลองตัวอย่างได้ดังนี้ $B_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ จะได้สามารถคำนวณ เมทริกซ์ Triggering matrix (C) และ Token matrix (B) ได้ดังนี้

$$C_1 = B_0 \cdot A = [0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (3.2)$$

$$B_1 = C_1 \cdot A^T = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3.3)$$

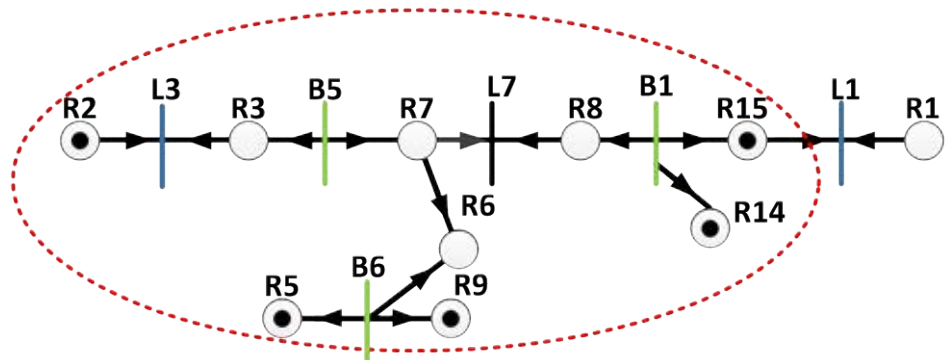
$$C_2 = B_1 \cdot A = [1 \quad -4 \quad -1 \quad 3 \quad -1 \quad 0] \quad (3.4)$$

$$B_2 = C_2 \cdot A^T = [1 \quad 5 \quad 1 \quad 5 \quad 7 \quad 4 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0] \quad (3.5)$$



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต เมื่อยิงทรานสิชันครั้งที่ 1

การยิงทรานสิชันครั้งที่ 1 เมื่อพิจารณาเมทริกซ์ C_1 และ เมทริกซ์ B_1 ในสมการ(3.2)-(3.3) ตามลำดับ พบว่า ทรานสิชัน B5 และ L7 ถูกยิงทรานสิชันในครั้งที่ 1 และส่งผลให้เฟลส R3, R6 และ R8 ได้รับโทเค็นจากการยิงทรานสิชันครั้งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.7 เมื่อเส้นประแสดงเขตการป้องกันที่เกิดจากการยิงทรานสิชันครั้งที่ 1



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างแบบจำลองเพทรีเน็ต เมื่อยิงทรานสิชันครั้งที่ 2

การยิงทรานสิชันครั้งที่ 2 เมื่อพิจารณาเมทริกซ์ C_2 และ เมทริกซ์ B_2 ในสมการ (3.4)-(3.5) ตามลำดับ พบว่า ทรานสิชัน L3, B6 และ B1 ถูกยิงในการยิงทรานสิชันครั้งที่ 2 และส่งผลให้เฟลสที่ได้รับโทเค็นคือ R2, R5, R9, R14 และ R15 ดังแสดงในภาพที่ 3.8 เมื่อเส้นประแสดงเขตการป้องกันที่เกิดจากการยิงทรานสิชันครั้งที่ 2

3.3 การตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

ปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดทฤษฎีในการตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันแบบพื้นที่กว้างอย่างเป็นทางการ จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่ามีการใช้สัญญาอนุญาตแรงดันในการตรวจจับความผิดปกติ [15]-[16] และ การใช้สัญญาอนุญาตกระแสในการตรวจจับความผิดปกติ [7]-[8],[10]-[11],[26]-[27] ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการใช้สัญญาอนุญาตกระแส โดยสามารถจะแบ่งออกเป็นการเปรียบเทียบผลต่างของกระแส [7]-[8],[10]-[11] และ การเปรียบเทียบทิศทางของกระแส [9],[12],[26],[28]

ข้อดี-ข้อเสียของการเปรียบเทียบผลต่างของกระแส (Wide area current differential protection) และการเปรียบเทียบทิศทางของกระแส (Wide area direction comparative protection) ไว้ดังนี้

- การเปรียบเทียบผลต่างของกระแส (Wide area current differential protection)
 - ข้อดี คือ ง่าย และมีความไวสูง
 - ข้อเสีย คือ ต้องการระบบสื่อสารที่มีคุณภาพสูงเพราะข้อมูลจำเป็นต้องประสานกันทางเวลาอย่างต่อเนื่อง
- การเปรียบเทียบทิศทางของกระแส (Wide area direction comparative protection)
 - ข้อดี คือ ไม่ต้องประสานเวลาการทำงาน สามารถทำงานได้หากระบบสื่อสารไม่ทำงาน
 - ข้อเสีย ความไวต่ำ ประสิทธิภาพน้อยกว่าการเปรียบเทียบผลต่างกระแส

ดังนั้นในการปรับใช้กับระบบไฟฟ้าจึงควรผสมผสานการตรวจจับความผิดปกติระหว่างการเปรียบเทียบผลต่างของกระแส และการเปรียบเทียบทิศทางของกระแส เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3.3.1 วิธีการเปรียบเทียบผลต่างของกระแส

การเปรียบเทียบผลต่างของกระแสจะประยุกต์ทฤษฎีกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff current law, KCL) กฎนี้กล่าวว่า “ ณ จุดใดๆ ในวงจรไฟฟ้า ผลรวมของกระแสทางพีชคณิตมีค่าเท่ากับ ศูนย์ หรือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าจุดๆหนึ่ง มีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากจุดๆนั้น ” ดังแสดงในสมการ(3.6)

$$\sum_{i=1}^n I_{in,i} - \sum_{j=1}^m I_{out,j} = 0 \quad (3.6)$$

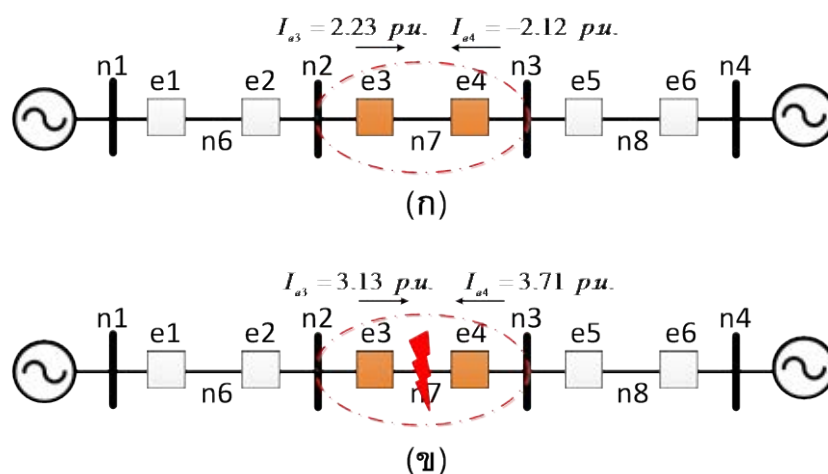
เมื่อ

n คือ จำนวนกระแสที่ไหลเข้าหาจุดๆหนึ่งในวงจรไฟฟ้า

m คือ จำนวนกระแสที่ไหลออกจากจุดๆหนึ่งในวงจรไฟฟ้า

ทางทฤษฎีพบว่า กรณีที่ไม่มีความผิดพลาดในระบบการคำนวณผลต่างของกระแสในแต่ละโซนการป้องกันจะมีค่าเท่ากับ 0 แต่หากเกิดความผิดพลาดในระบบการคำนวณผลต่างของกระแสผิดพลาดจะมีค่าไม่เท่ากับ 0 แต่ในทางปฏิบัติในกรณีที่ไม่มีความผิดพลาดในระบบผลต่างของกระแสไม่สามารถเท่ากับ 0 แต่จะมีค่าน้อยๆค่าหนึ่ง เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของเครื่องมือวัด เป็นต้น

งานวิจัย [8] ได้กำหนดค่าประมาณของการตัดสินใจว่าเกิดความผิดพลาดในโซนหรือไม่ คือ หากเกิดความผิดพลาดในโซนป้องกัน ผลต่างของขนาดกระแสในโซนป้องกันนั้นจะมีค่ามากกว่า 1 p.u. มากๆ ($|\sum I_{diff}| \gg 1$) โดยแสดงดังตัวอย่างในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพลาดโดยวิธีเปรียบเทียบผลต่างของกระแส

ภาพที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติในโซนป้องกันของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง เมื่อสัญลักษณ์ “e” ใช้แทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และสัญลักษณ์ “n” ใช้แทนบัสบาร์และสายส่งไฟฟ้า เมื่อบัสบาร์แทนด้วย n1, n2, n3 และ n4 สายส่งไฟฟ้าแทนด้วย n6, n7 และ n8 โดยที่เส้นประแสดงขอบเขตของการตรวจจับความผิดปกติในโซนป้องกัน โดยกระแสที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดปกติในโซนป้องกันคือ กระแสจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 (I_{e3}) และกระแสจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 (I_{e4})

ภาพที่ 3.9 (ก) แสดงค่ากระแสที่วัดจะเป็นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และกระแสจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 ในสภาวะปกติ ซึ่งมีค่าดังนี้ $I_{e3} = 2.23 \text{ p.u.}$ และ $I_{e4} = -2.12 \text{ p.u.}$ เมื่อนำไปคำนวณตามสมการ(3.6)จะได้ค่าดังสมการ(3.7) ซึ่ง $|\sum I_{diff}| < 1 \text{ p.u.}$ แสดงว่าไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้นภายในโซนการป้องกัน

$$\left| \sum I_{diff} \right| = \left| \sum_{i=1}^n I_{in,i} - \sum_{j=1}^m I_{out,j} \right| = |I_{e3} + I_{e4}| = |2.23 - 2.12| = 0.11 \text{ p.u.} \quad (3.7)$$

ภาพที่ 3.9 (ข) แสดงค่ากระแสที่วัดจะเป็นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และกระแสจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 ในขณะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ โดย $I_{e3} = 3.45 \text{ p.u.}$ และ $I_{e4} = 4.72 \text{ p.u.}$ เมื่อนำไปคำนวณตามสมการ(3.6)จะได้ค่าดังสมการ(3.8) ซึ่ง $|\sum I_{diff}| \gg 1 \text{ p.u.}$ แสดงว่าเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นภายในโซนการป้องกัน

$$\left| \sum I_{diff} \right| = \left| \sum_{i=1}^n I_{in,i} - \sum_{j=1}^m I_{out,j} \right| = |I_{e3} + I_{e4}| = |3.45 + 4.72| = 8.17 \text{ p.u.} \quad (3.8)$$

3.3.2 วิธีการเปรียบเทียบทิศทางของกระแส

การเปรียบเทียบทิศทางกระแสที่ไหลในแต่ละอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดขณะเกิดความผิดพลาดเพื่อคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดที่แท้จริงในระบบไฟฟ้า โดยการคำนวณค่าคงที่ในการทำงาน (Action Factor, AF) และ ค่ารวมค่าการประมาณความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบแต่ละอุปกรณ์ ($F_{out,i}$) จากนั้นจะนำค่า $F_{out,i}$ ไปเปรียบเทียบกับค่าขีดแบ่ง (threshold) ในโซนของแต่ละอุปกรณ์ ($F_{th,i}$) [26]

ค่าคงที่ในการทำงาน (Action Factor, AF) ซึ่งจะแสดงทิศทางของความผิดพลาดที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว

$$AF_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ } i \text{ ระบุทิศทางความผิดพลาดแบบไปข้างหน้า} \\ -1 & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ } i \text{ ระบุทิศทางความผิดพลาดแบบกลับทิศทาง} \\ 0 & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ } i \text{ ระบุว่าไม่มีความผิดพลาด} \end{cases}$$

ค่าการประมาณความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบแต่ละอุปกรณ์ ($F_{out,i}$) โดยอุปกรณ์ต่างๆในระบบได้แก่ บัสบาร์, สายส่ง และหม้อแปลง ซึ่งสามารถคำนวณ $F_{out,i}$ ได้ดังสมการ (3.9)

$$F_{out,i} = \sum_{n=1}^N AF_n \quad (3.9)$$

เมื่อ

n คือ จำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่ป้องกันอุปกรณ์ในระบบตัวที่ i

ค่าขีดแบ่ง (threshold) ในโซนของแต่ละอุปกรณ์ ($F_{th,i}$) คือค่าที่ใช้ระบุว่าเกิดความผิดพลาดในโซนหรือไม่ ซึ่งไม่ค่าไม่เท่ากันขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง แต่งานวิจัย [31] ได้คำนวณจากสมการ(3.10)

$$F_{th,i} = |F'_{out,i}| - 1 \quad (3.10)$$

เมื่อ

i คือ อุปกรณ์ในระบบที่จะป้องกัน

$F'_{out,i}$ คือ ค่าประมาณความผิดพลาดในการป้องกันอุปกรณ์ตัวที่ i

เมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทุกตัวทำงานถูกต้อง

จากนั้นจึงนำค่าสัมบูรณ์ของค่าการประมาณความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบแต่ละอุปกรณ์ ($|F_{out,i}|$) และค่าขีดแบ่ง (threshold) ในโซนของแต่ละอุปกรณ์ ($F_{th,i}$) เพื่อระบุว่าเกิดความพร่องในโซนการป้องกันหรือไม่

- $F_{out,i} > F_{th,i}$ เมื่อเกิดความผิดพลาดในโซนการป้องกัน
- $F_{out,i} < F_{th,i}$ เมื่อเกิดความผิดพลาดนอกโซนการป้องกัน

บทที่ 4

ขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

เนื้อหาในบทนี้ นำเสนอขั้นตอนวิธีในการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ซึ่งประกอบด้วย การแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และการตรวจจับความผิดปกติพร้อมภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้า

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้นในบทที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่า สามารถประยุกต์การป้องกันแบบพื้นที่กว้าง (Wide Area Protection) เพื่อปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้า โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (Intelligent Electronic Device)

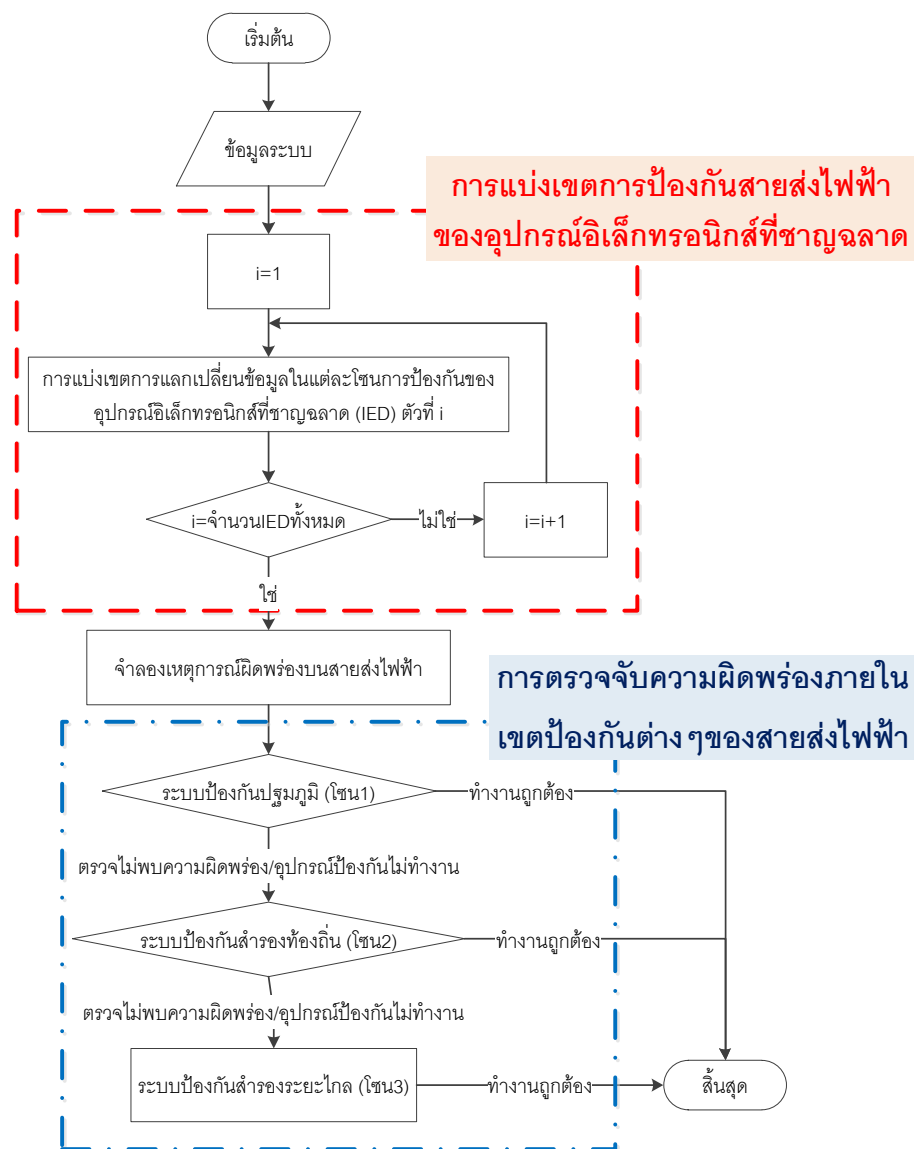
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่นำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ อุปกรณ์ป้องกันเช่น รีเลย์เชิงเลข (Numerical relay) ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณแอนะล็อก ระหว่างกันได้ ดังนั้นจึงต้องแบ่งเขตการแลกเปลี่ยนข้อมูลก่อนว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด ควรแลกเปลี่ยนข้อมูลกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์เงื่อนไขในการทำงานในแต่ละเขตการป้องกัน การป้องกันในแต่ละเขตการป้องกันสามารถแบ่งได้เป็น การป้องกันปฐมภูมิ (โซน1), การป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน2) และการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน3)

โครงสร้างของขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และการตรวจจับความผิดปกติพร้อมภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้าของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง ดังแสดงในภาพที่ 4.1

การแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เป็นการแบ่งการแลกเปลี่ยนข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเขตการป้องกันต่างๆ โดยทฤษฎีที่นำมาใช้ในการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ทฤษฎีกราฟและทฤษฎีเพทรีเน็ต [23] โดยจะประยุกต์ทฤษฎีกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบไฟฟ้า และทฤษฎีเพทรีเน็ตจะถูกประยุกต์เพื่อการแบ่งเขตการแลกเปลี่ยนข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเขตการป้องกันต่างๆ

การตรวจจับความผิดปกติภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้าของการป้องกันแบบพื้นที่กว้างดังแสดงในภาพที่ 4.1 เป็นการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเขตการป้องกันสามารถแบ่งได้เป็น การป้องกันปฐมภูมิ (โซน1), การป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน2) และการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน3) โดยจะประยุกต์การเปรียบเทียบผลต่างของกระแสจากงานวิจัยในอดีต [8] ซึ่งงานวิจัยในอดีตจะใช้ขนาดของกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโดยไม่คำนึงถึงโหลดและกระแสอื่นๆในระบบไฟฟ้า แต่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบผลต่างของค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและคำนึงถึงโหลดและกระแสภายนอกอื่นๆในระบบไฟฟ้าด้วย



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างของขั้นตอนวิธีในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

4.1 การแบ่งเขตของการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

การแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด เป็นการแบ่งเขตของการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว เพื่อใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า โดยจะประยุกต์ทฤษฎีกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบไฟฟ้า และทฤษฎีเพทรีเน็ต [23] จะถูกประยุกต์เพื่อการแบ่งเขตการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด โดยแสดงขั้นตอนวิธีในการแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าดังภาพที่ 4.2

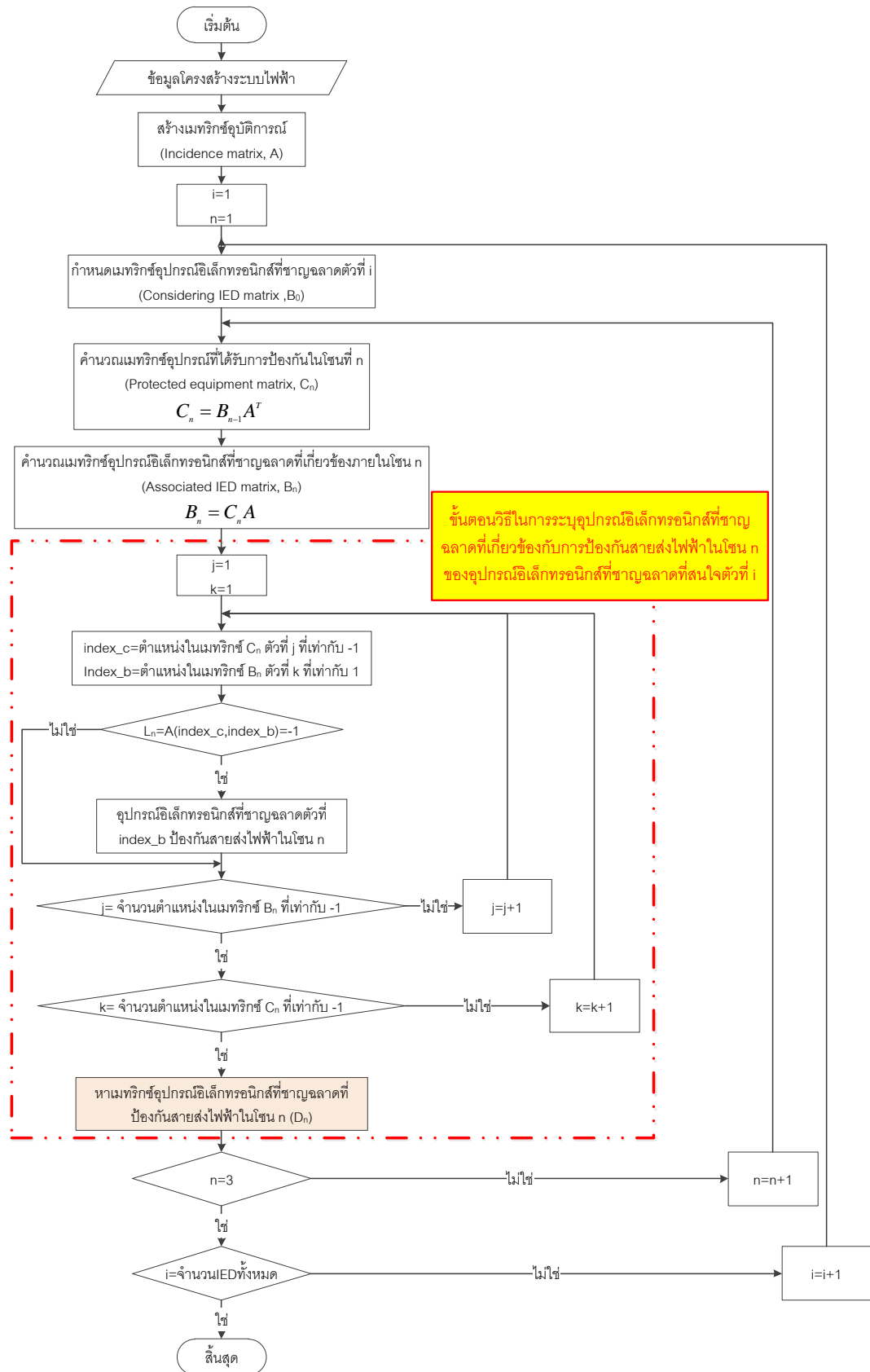
ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลโครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามารถแทนด้วยกราฟพระนุกิตทางได้ โดยการประยุกต์ทฤษฎีกราฟกับระบบไฟฟ้ากำลัง

กำหนดให้ บัสบาร์ และสายส่งไฟฟ้า แทนด้วย จุดยอด และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแทนด้วย เส้นเชื่อม โดยจะกำหนดทิศทางบวกของกราฟพระนุกิตทางคือทิศของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พุ่งจากบัสบาร์ไปสู่สายส่งไฟฟ้า และทิศทางลบของกราฟพระนุกิตทางคือทิศของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พุ่งจากสายส่งไฟฟ้าไปสู่บัสบาร์

เมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) เป็นเมทริกซ์ที่มีขนาด $n \times m$ เมื่อ n คือจำนวนบัสบาร์ หม้อแปลงและสายส่งไฟฟ้าทั้งหมดในระบบไฟฟ้า และ m คือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้งหมดในระบบไฟฟ้า ซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัสบาร์, สายส่งไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบไฟฟ้า โดยที่

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ อุปกรณ์ตัวที่ } i \text{ เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด } j \text{ ในทิศทางบวก} \\ -1 & \text{เมื่อ อุปกรณ์ตัวที่ } i \text{ เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด } j \text{ ในทิศทางลบ} \\ 0 & \text{เมื่อ อุปกรณ์ตัวที่ } i \text{ ไม่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด } j \end{cases}$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเริ่มต้น (Considering IED matrix, B_0) เป็น เมทริกซ์ขนาด $1 \times m$ เมื่อ m คือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้งหมดในระบบ และเป็นเมทริกซ์ที่แสดงถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณาอยู่ โดยที่สมาชิกในเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเริ่มต้น จะมีค่าเท่ากับ 0 ทุกตำแหน่ง ยกเว้นตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่สนใจจะมีค่าเท่ากับ 1



ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนวิธีการแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณเมทริกซ์อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน (Protected equipment matrix, C) ในแต่ละโซนของการป้องกัน เป็นเมทริกซ์ที่มีขนาด $1 \times m$ เมื่อ m คือ จำนวนบัสบาร์และสายส่งทั้งหมดในระบบ ซึ่งจะแสดงว่าอุปกรณ์ชนิดใดได้รับการป้องกันได้รับการป้องกันในโซนนั้น โดยเมทริกซ์อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันในแต่ละโซน สามารถคำนวณได้ดังสมการ (4.1)

$$C_n = B_{n-1} \times A^T \quad (4.1)$$

โดยที่

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ บัสบาร์ } i \text{ เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันในโซน } n \\ -1 & \text{เมื่อ สายส่งไฟฟ้า } i \text{ เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันในโซน } n \\ \text{other} & \text{เมื่อ บัสบาร์ } i \text{ หรือสายส่งไฟฟ้า } i \text{ อยู่นอกการป้องกันโซน } n \end{cases}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้อง (Associated IED matrix, B) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันภายในโซนนั้นๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่สนใจอยู่ ซึ่งมีขนาด $1 \times m$ เมื่อ m คือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้งหมดในระบบ โดยเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้อง สามารถคำนวณได้ดังสมการ (4.2)

$$B_n = C_n \times A \quad (4.2)$$

โดยที่

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ } i \text{ เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน } n \\ \text{other} & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ } i \text{ ไม่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน } n \end{cases}$$

ขั้นตอนที่ 5 การระบุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนที่ n ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่สนใจตัวที่ i โดยแสดงในรูปแบบของเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่ป้องกันสายส่งภายในโซน (Line protected IED matrix, D)

เมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่ป้องกันสายส่งภายในโซน เป็นเมทริกซ์ที่แสดงว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าภายในโซนนั้นๆ ซึ่งมีขนาด $1 \times m$ เมื่อ m คือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้งหมดในระบบไฟฟ้า โดยสมาชิกในเมทริกซ์ D จะมีค่าเป็น 0 ยกเว้นตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในโซนที่ n ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่สนใจตัวที่ i

กำหนดให้

Index_c คือ ตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับ -1 ของเมทริกซ์อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันในโซน n (C_n)

Index_b คือ ตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับ 1 ของเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณาอยู่ในโซน n (B_n)

จากนั้นหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งแถวที่ index_c และ หลักที่ index_b ของเมทริกซ์อุปกรณ์(A) ดังแสดงในสมการ(4.3)

$$A(index_c, index_b) \quad (4.3)$$

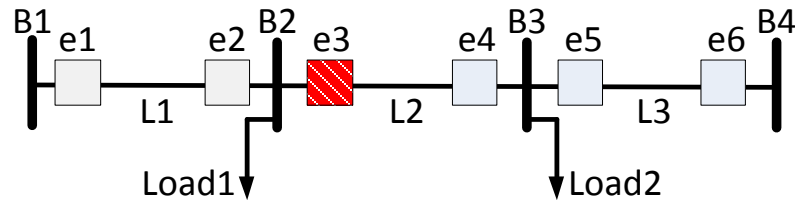
โดยที่

$$A(index_c, index_b) = \begin{cases} -1 & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ index_b} \\ & \text{ป้องกันสายส่งในโซน n} \\ other & \text{เมื่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ index_b} \\ & \text{ไม่ได้ป้องกันสายส่งในโซน n} \end{cases}$$

เมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่ป้องกันสายส่งภายในโซน (Line protected IED matrix, D) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าภายในโซนนั้นๆ ซึ่งมีขนาด $1 \times m$ เมื่อ m คือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้งหมดในระบบไฟฟ้า โดยสมาชิกในเมทริกซ์ D จะมีค่าเป็น 0 ยกเว้นตำแหน่ง index_b ที่ทำให้ $A(index_c, index_b) = -1$ จะมีค่าเป็น 1

$$d_j = \begin{cases} 1 & \text{เป็น ตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ j ที่เกี่ยวข้องกับป้องกันสายส่ง} \\ & \text{ในโซน n ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่} \\ 0 & \text{เป็น ตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่ j ที่ไม่เกี่ยวข้องกับป้องกัน} \\ & \text{สายส่งในโซน n ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่} \end{cases}$$

ภาพที่ 4.3 แสดงตัวอย่างของโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 โดย สัญลักษณ์ “B” แทนบัสบาร์ในระบบส่งไฟฟ้า, สัญลักษณ์ “L” แทนสายส่งไฟฟ้า, สัญลักษณ์ “e” แทน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด



ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 โครงสร้างของโครงข่ายไฟฟ้าตัวอย่างสามารถแทนด้วยกราฟระบุทิศทางได้ โดยการประยุกต์ทฤษฎีกราฟ และสามารถสร้างเมทริกซ์อุบัติการณ์ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\ \begin{matrix} B1 \\ L1 \\ B2 \\ L2 \\ B3 \\ L3 \\ B4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.4)$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดเมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเริ่มต้น (Considering IED matrix, B_0) โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่คือ e3 ดังนั้นจะได้เมทริกซ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเริ่มต้นดังนี้

$$B_0 = \begin{bmatrix} e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณเมทริกซ์อุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน (Protected equipment matrix, C) ในแต่ละโซนของการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 สามารถคำนวณได้โดยสมการ (4.1) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันในการป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{array}{cccccc}
 & B1 & L1 & B2 & L2 & B3 & L3 & B4 \\
 C_1 = B_0 \times A^T = & [0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0]
 \end{array} \quad (4.6)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณเมทริกซ์อุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้อง (Associated IED matrix, B) ในแต่ละโซนของการป้องกันของอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คำนวณได้โดยสมการ (4.2) โดยอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 ของอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{array}{cccccc}
 & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\
 B_1 = C_1 \times A = & [0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0]
 \end{array} \quad (4.7)$$

ขั้นตอนที่ 5 การระบุอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในโซนที่ n ของอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่สนใจตัวที่ i ซึ่งแสดงในรูปแบบของเมทริกซ์อุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่ป้องกันสายส่งภายในโซน (Line protected IED matrix, D) โดยอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1 ของอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 เป็นดังนี้

$$\begin{array}{cccccc}
 & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\
 D_1 = & [0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0]
 \end{array} \quad (4.8)$$

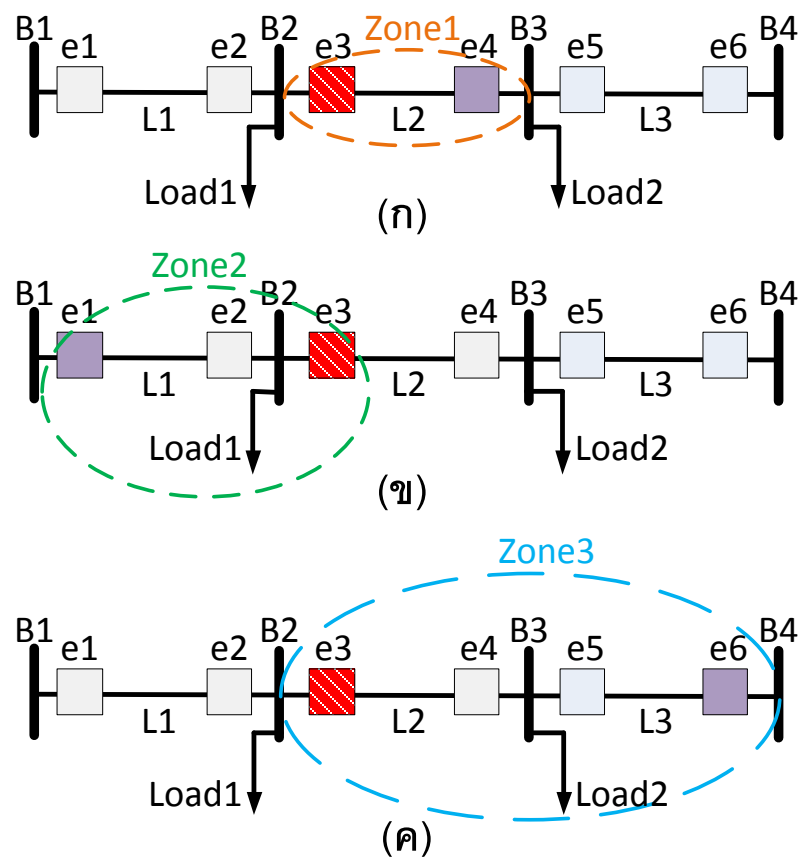
จากสมการ(4.8) แสดงว่า อุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 จะใช้ข้อมูลของอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 เพื่อการป้องกันสายส่งไฟฟ้าภายในเขตการป้องกันโซน 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.4(ก)

อุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าภายในเขตการป้องกันโซน 2 และ โซน 3 ของอุปกรณิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 จะแสดงดังสมการ(4.9)-(4.10) ตามลำดับ

$$\begin{array}{cccccc}
 & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\
 D_2 = & [1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0]
 \end{array} \quad (4.9)$$

$$\begin{array}{cccccc}
 & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\
 D_3 = & [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1]
 \end{array} \quad (4.10)$$

โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าภายในเขตการป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 ดังแสดงในภาพที่ 4.4(ข) และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e5 เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าภายในเขตการป้องกันโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 ดังแสดงในภาพที่ 4.4(ค)



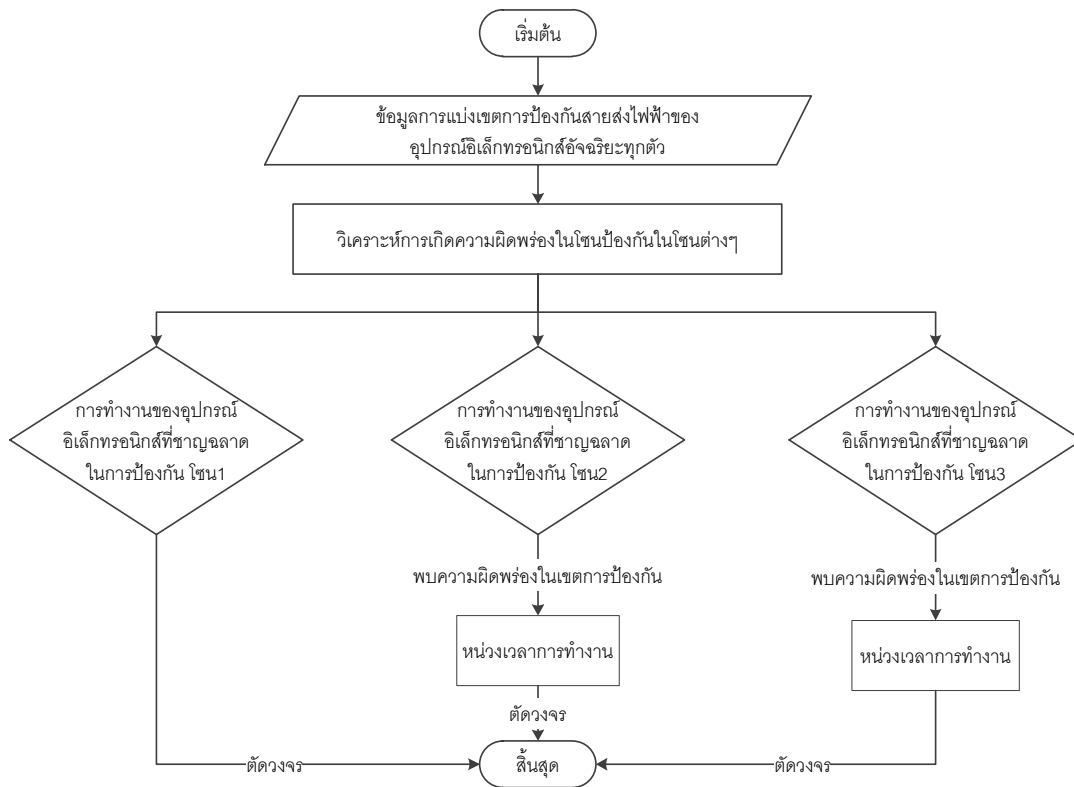
ภาพที่ 4.4 ผลจากการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้าตัวอย่าง

4.2 การตรวจจับความผิดพร้อมภายในเขตป้องกัน

การตรวจจับความผิดพร้อมภายในเขตการป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้า เป็นการนำผลจากการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัวมาวิเคราะห์หาความผิดพร้อมในโซนการป้องกันต่างๆ โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่ จะนำข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าในโซนต่างๆ มาใช้ในการตรวจจับความผิดพร้อมในแต่ละโซนการป้องกัน

การตรวจจับความผิดพร้อมภายในเขตการป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้าจะประยุกต์การเปรียบเทียบผลต่างของกระแสจากงานวิจัยในอดีต [8] ซึ่งงานวิจัยในอดีตจะใช้ขนาดของกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโดยไม่คำนึงถึงกระแสโหลดและกระแสภายนอกของระบบไฟฟ้า แต่การพิจารณาแต่ขนาดของกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดอาจทำให้การตรวจจับความผิดพร้อมผิดพลาดเมื่อกระแสผิดพร้อมใกล้เคียง 1 p.u. และการไม่คำนึงถึงกระแสโหลดและกระแสภายนอกของระบบไฟฟ้าจะทำให้ตรวจจับความผิดพร้อมผิดพลาด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบผลต่างของค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและคำนึงถึงโหลดและกระแสภายนอกของระบบไฟฟ้าด้วย

การตรวจจับความผิดพร้อมภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้า จะใช้สัญญาณแอนะล็อก คือสัญญาณกระแส โดยแสดงขั้นตอนวิธีในการตรวจจับความผิดพร้อมภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้างภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดพลาดภายในเขตการป้องกันของสายส่งไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทุกตัว เป็นข้อมูลที่แสดงถึงการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเพื่อป้องกันสายส่งไฟฟ้าในแต่ละโซน จากนั้นจำลองการเกิดความผิดพลาดบนสายส่งไฟฟ้าทุกเส้นในระบบไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดทิศทางกระแสเริ่มต้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเป็นทิศทางจากบัสบาร์ไปสู่สายส่งไฟฟ้า และทิศทางกระแสเริ่มต้นของโหลดเป็นทิศทางจากบัสบาร์ไปสู่โหลด จากนั้นคำนวณค่ากระแสที่ผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทุกตัวและค่ากระแสของโหลดทั้งหมดในระบบไฟฟ้า โดยค่ากระแสที่นำมาใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดจะเป็นค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ ซึ่งมีขนาดของกระแส และมุมเฟสของกระแส

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดภายในโซนการป้องกันต่างๆ หากพบความผิดพลาดในการป้องกันปฐมภูมิ (โซน 1) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดจะส่งสัญญาณไปยังตัวตัดวงจรเพื่อแยกความผิดพลาดออกจากระบบ

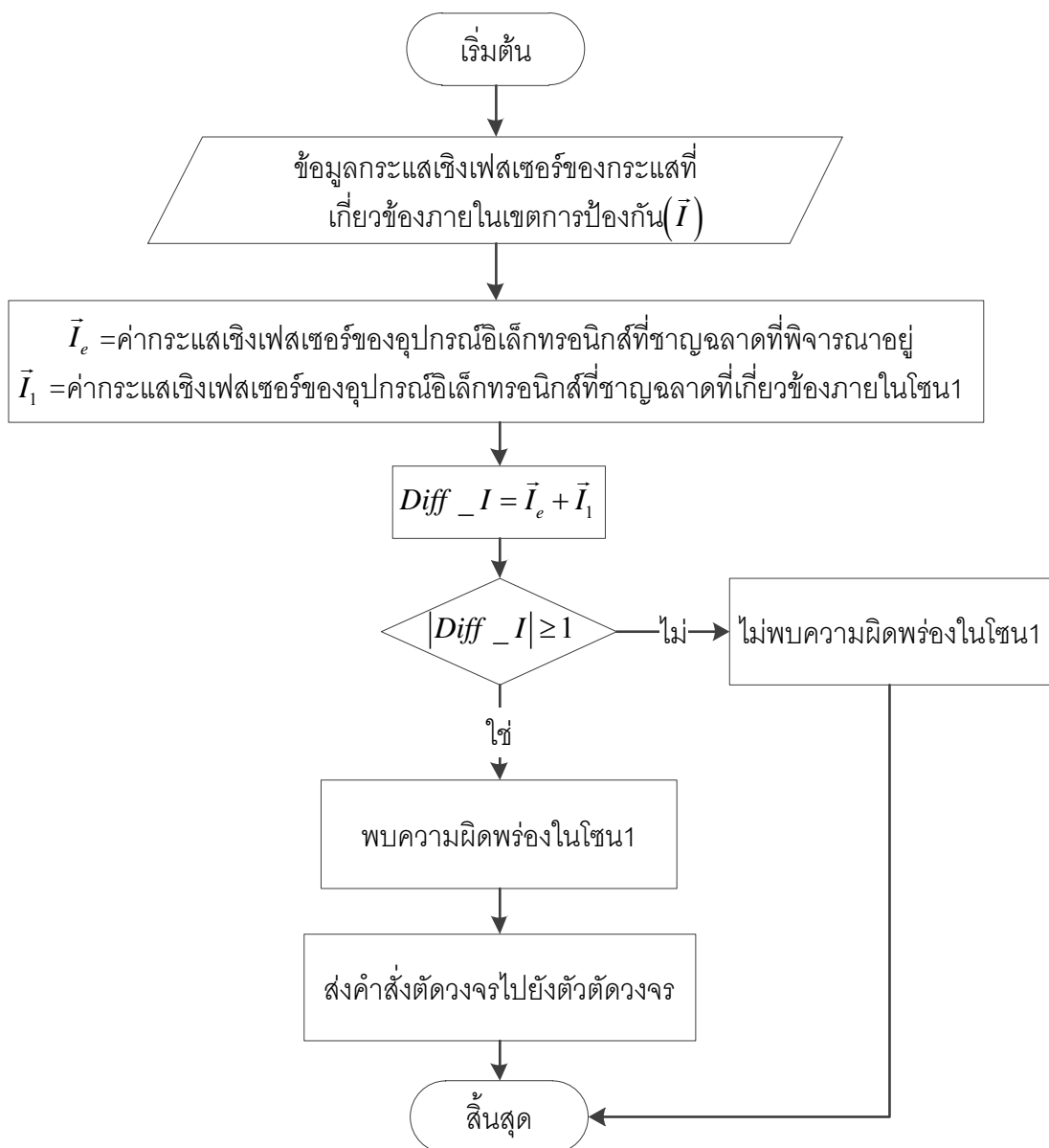
หากพบความผิดพลาดในการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) จะมีการหน่วงเวลาในการทำงานก่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดจะส่งสัญญาณไปยังตัวตัดวงจร เพื่อให้การป้องกันปฐม

ภูมิ (โซน 1) ทำงานเพื่อแยกความผิดปกติที่เกิดขึ้นออกจากระบบก่อน เนื่องจากการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) จะเป็นการป้องกันสำรองสำหรับการป้องกันปฐมภูมิ (โซน 1)

หากพบความผิดปกติในการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน 3) จะมีการหน่วงเวลาในการทำงานเช่นเดียวกับการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) เนื่องจากการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน 3) จะเป็นการป้องกันสำรองสำหรับการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) อีกชั้นหนึ่ง

4.2.1 การป้องกันโซน 1

การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันปฐมภูมิ (โซน1) พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทุกตัวพร้อมกัน ซึ่งค่ากระแสที่นำมาใช้ในการตรวจจับความผิดปกติโซน 1 โดยนำค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่ (\vec{I}_e) และ ค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 1 (\vec{I}_1) มาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันปฐมภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติในเขตการป้องกันปฐมภูมิ (โซน 1)

การตรวจจับความผิดพลาดภายในเขตการป้องกันโซน 1 คือการคำนวณผลต่างของกระแสเชิงเฟสเซอร์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันในโซน 1 ทั้งหมด ดังสมการ

$$Diff_I = \bar{I}_e + \bar{I}_1 \quad (4.11)$$

โดยที่

\bar{I}_e คือ ค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่

\bar{I}_1 คือ ค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 1

เงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ขนาดของผลต่างกระแสต้องมีค่ามากกว่า 1 ($|Diff_I| \geq 1$)

ถ้า $|Diff_I| \geq 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจพบความผิดพลาดบนสายส่งในโซนที่ 1 จากนั้นจะส่งคำสั่งควบคุมไปยังตัวตัดวงจรให้กำจัดความผิดพลาดนี้ออกจากระบบ

ถ้า $|Diff_I| < 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจไม่พบความผิดพลาดบนสายส่งในโซนที่ 1

4.2.2 การป้องกันโซน 2

การตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันโซน 2 เป็นการป้องกันสำรองในกรณีที่การป้องกันปฐมภูมิ(โซน 1)ไม่ทำงานหรือทำงานผิดพลาด การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) จะพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทุกตัวพร้อมกัน โดยนำค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของกระแสทั้งหมดภายในโซนการป้องกัน (\bar{I}) ซึ่งประกอบด้วยค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่ (\bar{I}_e), ค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 2 (\bar{I}_2) และค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของกระแสภายนอกที่เกี่ยวข้องภายในโซน 2 (\bar{I}_{ext}) มาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) โดยกระแสภายนอกที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 จะประกอบด้วยกระแสไหลต และกระแสที่ไหลออกจากบัสทั้งหมด ยกเว้นกระแสของสายส่งเส้นที่ต้องการจะป้องกัน ซึ่งขั้นตอนวิธีในการตรวจจับความผิดปกติในโซน 2 แสดงในภาพที่ 4.7

การตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันโซน 2 คือการคำนวณผลต่างของกระแสเชิงเฟสเซอร์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันในโซน 2 ทั้งหมด ดังสมการ(4.12)

$$Diff_I = \bar{I}_1 - \sum_{i=1}^m \bar{I}_{2,i} + \sum_{j=1}^n \bar{I}_{ext,j} \quad (4.12)$$

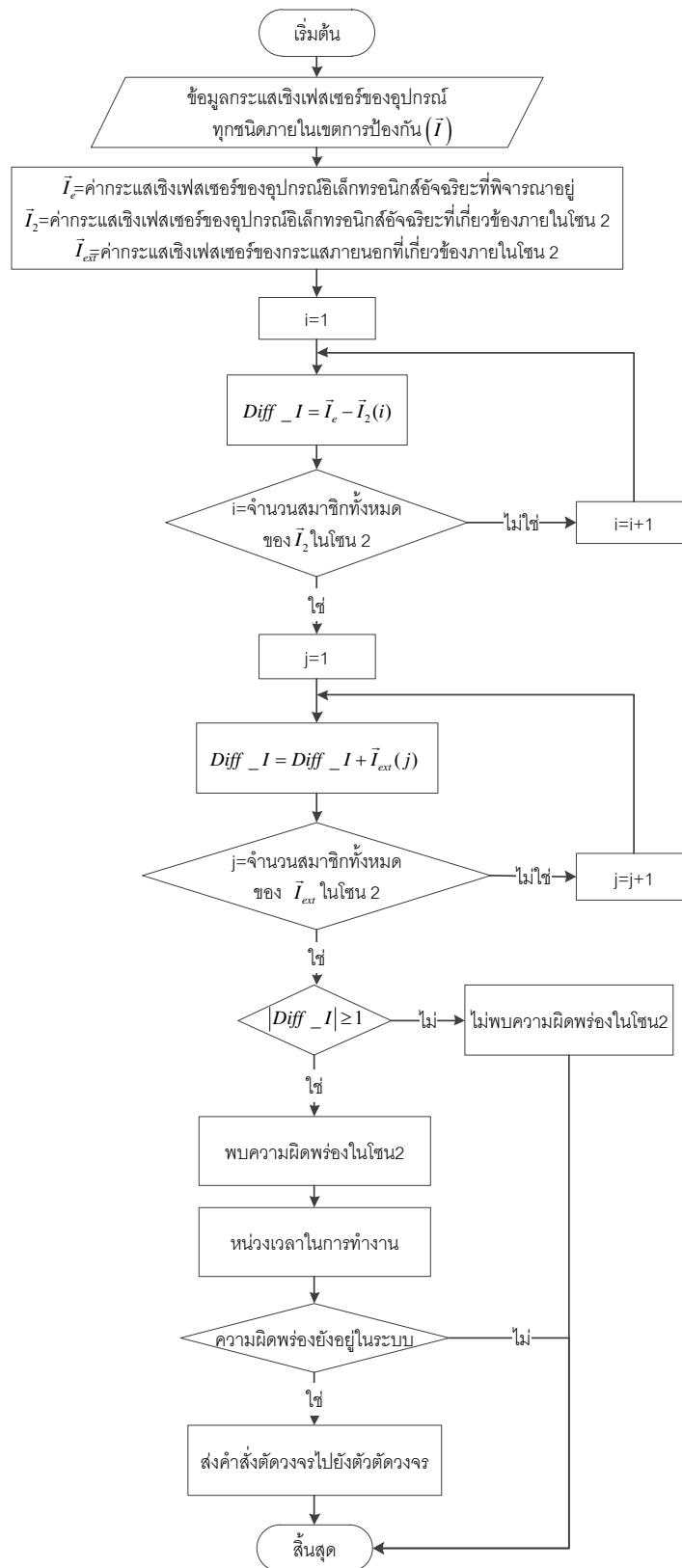
เมื่อ

- m คือ จำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 2
 n คือ จำนวนกระแสภายนอกที่เกี่ยวข้องภายในโซน 2

เงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ขนาดของผลต่างกระแสต้องมีค่ามากกว่า 1 ($|Diff_I| \geq 1$)

ถ้า $|Diff_I| \geq 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจพบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 2 จากนั้นจะหน่วงเวลาการทำงานไประยะเวลาหนึ่ง โดยหากหลังการหน่วงเวลาแล้วยังพบความผิดปกติอยู่ในระบบจะส่งคำสั่งควบคุมไปยังตัวตัดวงจรให้กำจัดความผิดปกตินี้ออกจากระบบ

ถ้า $|Diff_I| < 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจไม่พบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 2

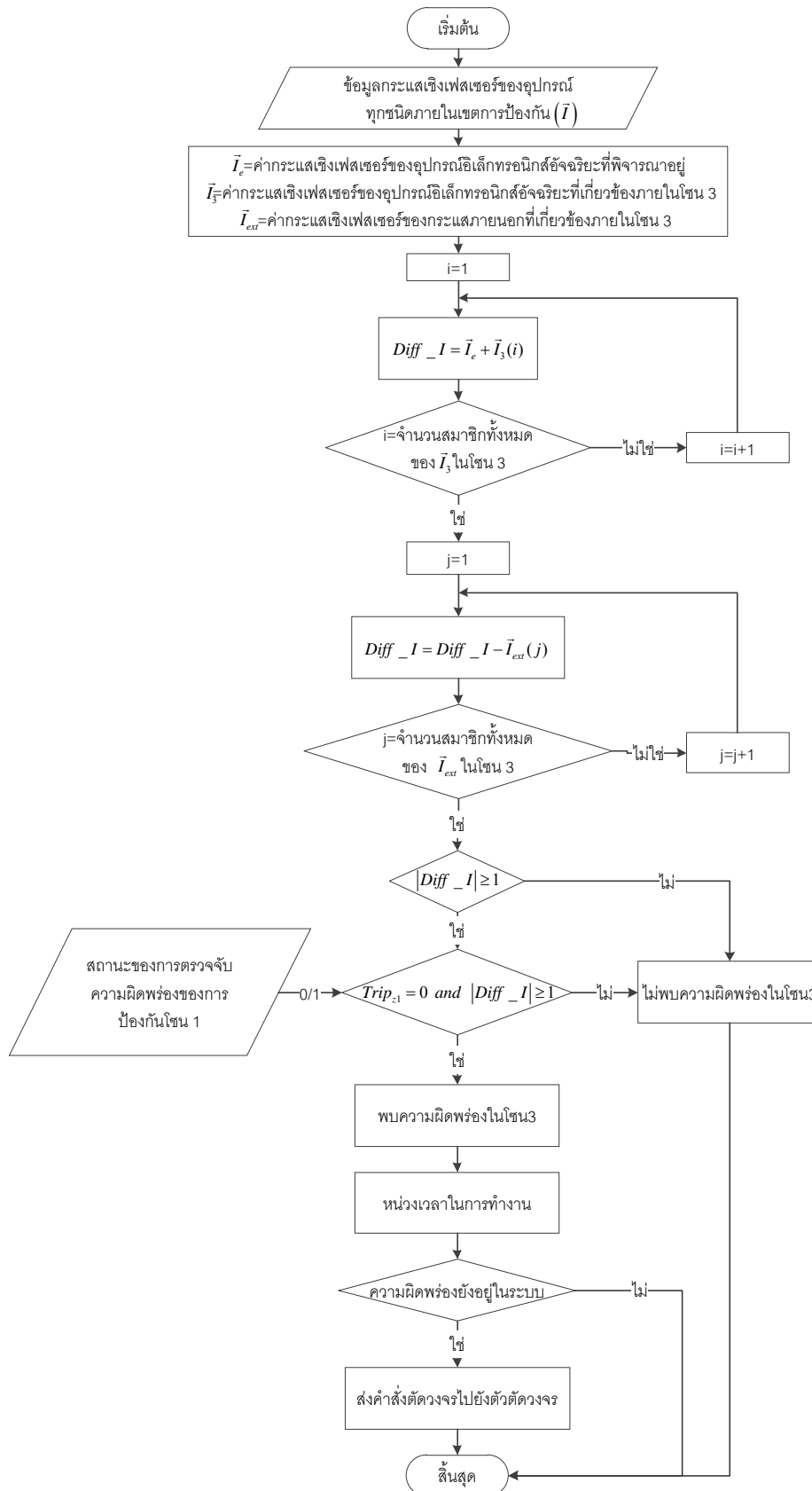


ภาพที่ 4.7 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติพ่วงในเขตการป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2)

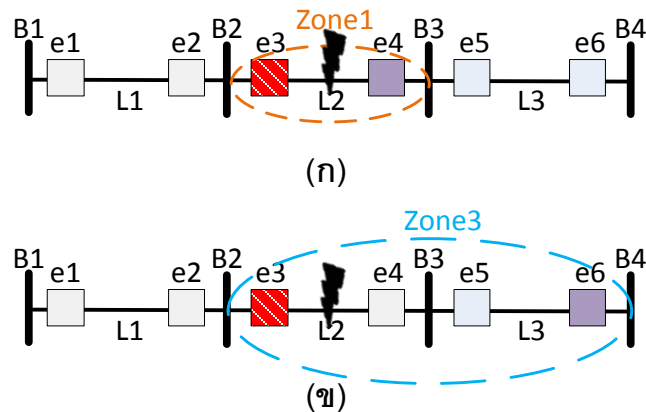
4.2.3 การป้องกันโซน 3

การตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันโซน 3 เป็นการป้องกันสำรองในกรณีที่การป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน 2) ไม่ทำงานหรือทำงานผิดพลาด การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน 3) จะพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทุกตัวพร้อมกัน โดยนำค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของกระแสทั้งหมดภายในโซนการป้องกัน (\bar{I}) ซึ่งประกอบด้วยค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่ (\bar{I}_e), ค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 3 (\bar{I}_3) และค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของกระแสภายนอกที่เกี่ยวข้องภายในโซน 3 (\bar{I}_{ext}) โดยกระแสภายนอกที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 จะประกอบด้วยกระแสไหลด และกระแสที่ไหลออกจากบัสทั้งหมด ยกเว้นกระแสของสายส่งเส้นที่ต้องการจะป้องกัน ซึ่งขั้นตอนวิธีในการตรวจจับความผิดปกติในโซน 3 จำเป็นต้องนำสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันโซน 1 มาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน 3) โดยขั้นตอนวิธีต่างๆแสดงในภาพที่ 4.8

เนื่องจากการเปรียบเทียบการหากระแสผลต่างภายในการป้องกันโซน 1 และ โซน 3 มีความซ้ำซ้อนกัน กล่าวคือ เขตการป้องกันโซน 1 ดังภาพที่ 4.9 (ก) และเขตการป้องกันโซน 3 ดังภาพที่ 4.9 (ข) มีการทับซ้อนกันอยู่ ดังนั้นหากเกิดความผิดปกติที่สายส่งไฟฟ้า L2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 จะมองเห็นความผิดปกติในโซน 1 และ โซน 3 เพื่อป้องกันการวิเคราะห์ผิดพลาด จึงต้องสร้างกฎมาเพื่อกำหนดว่า หากพบความผิดปกติในการป้องกันโซน 1 และการป้องกันโซน 3 แสดงว่าความผิดปกติที่แท้จริงเกิดภายในโซน 1 ดังนั้นการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันโซน 3 จะพบความผิดปกติ ก็ต่อเมื่อการเปรียบเทียบการหาผลต่างกระแสอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด และ ไม่ตรวจพบความผิดปกติในโซน 1



ภาพที่ 4.8 ขั้นตอนวิธีการตรวจจับความผิดปกติในเขตการป้องกันสำหรับระยะไกล (โซน 3)



ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างการเข้าเงื่อนไขของการตรวจจับความผิดปกติในโซน 1 และ โซน 3

ดังนั้นเมื่อทราบกระแสของอุปกรณ์ทุกชนิดภายในเขตการป้องกัน นำค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่พิจารณาอยู่ (\vec{I}_1), ค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 3 (\vec{I}_3) และค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของกระแสภายนอก (\vec{I}_{ext}) มาคำนวณผลต่างกระแส ดังสมการ(4.13)

$$Diff_I = \vec{I}_e + \sum_{i=1}^m \vec{I}_{3,i} - \sum_{j=1}^n \vec{I}_{load,j} \quad (4.13)$$

เมื่อ

- m คือ จำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องภายในโซน 3
 n คือ จำนวนกระแสภายนอกที่เกี่ยวข้องภายในโซน 3

เงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ขนาดของผลต่างกระแสต้องมีค่ามากกว่า 1 ($|Diff_I| \geq 1$) และตรวจจับว่าไม่พบความผิดปกติในการป้องกันโซน 1 ($Trip_{z1} = 0$)

ถ้า $|Diff_I| < 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจไม่พบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 3

ถ้า $Trip_{z1} = 0$ and $|Diff_I| \geq 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจพบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 3 จากนั้นจะหน่วงเวลาการทำงานไประยะเวลาหนึ่ง โดยหากหลังการหน่วงเวลาแล้วยังพบความผิดปกติอยู่ในระบบจะส่งคำสั่งควบคุมไปยังตัวตรวจจริงให้กำจัดความผิดปกตินี้ออกจากระบบ

ข้อมูลผลจากการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้าตัวอย่างในภาพที่ 4.4 สามารถนำมาตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 โดยเมื่อนำค่านวนเพื่อหาผลต่างของกระแสในสมการที่(4.11) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Diff_I &= \vec{I}_e + \vec{I}_1 \\ &= \vec{I}_{e3} + \vec{I}_{e4} \end{aligned}$$

เงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ขนาดของผลต่างกระแสต้องมีค่ามากกว่า 1 ($|Diff_I| \geq 1$) ถ้า $|Diff_I| \geq 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจพบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 1

2. การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และสำหรับการป้องกันในโซนนี้มีกระแสไหลตเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยกระแสไหลตที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือกระแสไหลต1

โดยเมื่อนำค่านวนเพื่อหาผลต่างของกระแสในสมการที่(4.12) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Diff_I &= \vec{I}_e - \sum_{i=1}^m \vec{I}_{2,i} + \sum_{j=1}^n \vec{I}_{ext,j} \\ &= \vec{I}_{e3} - \vec{I}_{e1} + \vec{I}_{load1} \end{aligned}$$

เงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ขนาดของผลต่างกระแสต้องมีค่ามากกว่า 1 ($|Diff_I| \geq 1$) ถ้า $|Diff_I| \geq 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจพบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 2

3. การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e6 และสำหรับการ

ป้องกันในโซนนี้มีกระแสไหลตเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยกระแสไหลตที่เกี่ยวข้องคือกระแสไหลต2

โดยเมื่อนำคำนวณเพื่อหาผลต่างของกระแสในสมการที่(4.13) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Diff_I &= \vec{I}_e + \sum_{i=1}^m \vec{I}_{3,i} - \sum_{j=1}^n \vec{I}_{ext,j} \\ &= \vec{I}_{e3} + \vec{I}_{e6} - \vec{I}_{load2} \end{aligned}$$

เงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ขนาดของผลต่างกระแสต้องมีค่ามากกว่า 1 ($|Diff_I| \geq 1$) และตรวจจับว่าไม่พบความผิดปกติในการป้องกันโซน 1 ($Status_{z1} = 0$)

ถ้า $Status_{z1} = 0 \wedge |Diff_I| \geq 1$ แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวที่พิจารณานั้นตรวจพบความผิดปกติบนสายส่งในโซนที่ 3

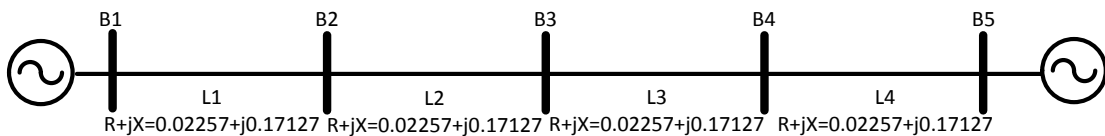
บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไปในบทที่ 4 โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 การทดสอบ คือ การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับ ขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง โดยใช้ระบบทดสอบ 2-Generator 5-Bus, การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) โดยใช้ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส และการประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนากับเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยจำนวน 2 เหตุการณ์

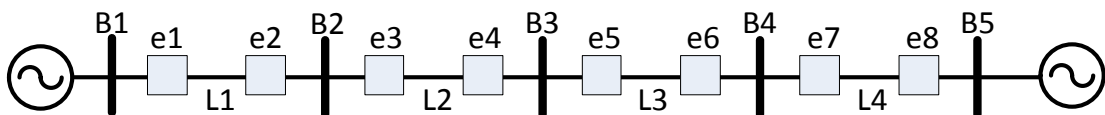
5.1 ระบบทดสอบแบบเรเดียล

การทดสอบที่ 1 คือ การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับ ขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง โดยใช้ระบบทดสอบแบบเรเดียล ซึ่งเป็นระบบอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในภาพที่ 5.1 โดยสัญลักษณ์ “B” แทนบัสบาร์ในระบบส่งไฟฟ้า, สัญลักษณ์ “L” แทนสายส่งไฟฟ้า



ภาพที่ 5.1 ระบบทดสอบแบบเรเดียล

ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน (อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง) ในระบบทดสอบแบบเรเดียลแสดงในภาพที่ 5.2 โดยสัญลักษณ์ “e” แทนอุปกรณ์ป้องกัน (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และรีเลย์ระยะทาง)



ภาพที่ 5.2 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบทดสอบแบบเรเดียล

5.1.1 การทดสอบที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะกับรีเลย์ระยะทางในเชิงโซนการป้องกัน

การทดสอบที่ 1.1 คือ การเปรียบเทียบการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับ ขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง

วัตถุประสงค์ การทดสอบที่ 1.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การทำงานที่แตกต่างกันของโซนการป้องกันต่างๆระหว่างขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง

สมมติฐาน การทดสอบที่ 1.1 มีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

1. ความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1 ถึง 4
2. ความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 เส้นเท่านั้น
3. ตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u. ของสายส่งไฟฟ้า
4. ความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 ตำแหน่งบนสายส่งไฟฟ้าเท่านั้น
5. ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าเป็นความผิดพลาดแบบสามเฟสสมมูล (Three Phase Fault)
6. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault Impedance) มีค่าเท่ากับ 0 โอห์ม (0 p.u.)
7. การป้องกันโซน 1 ของรีเลย์ระยะทาง ครอบคลุม 85% ของสายส่งไฟฟ้าที่จะป้องกัน ($Z_{Trip,Zone1} = 0.01918 + 0.1468j \text{ p.u.}$)
8. การป้องกันโซน 2 ของรีเลย์ระยะทาง ครอบคลุม 150% ของสายส่งไฟฟ้าที่จะป้องกัน ($Z_{Trip,Zone2} = 0.03385 + 0.2591j \text{ p.u.}$)
9. การป้องกันโซน 3 ของรีเลย์ระยะทาง ครอบคลุม 150% ของสายส่งไฟฟ้าเส้นถัดไปที่ยาวที่สุด ($Z_{Trip,Zone3} = 0.05643 + 0.4318j \text{ p.u.}$)

ขั้นตอนในการทดสอบ การทดสอบที่ 1.1 มีขั้นตอนในการทำการทดสอบดังนี้

1. นำข้อมูลโครงสร้างการเชื่อมต่อของระบบทดสอบแบบเรเดียลจากภาพที่ 5.2 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับอุปกรณ์อื่นๆ (บัสบาร์, สายส่ง) โดยเมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 & e7 & e8 \\ \begin{matrix} B1 \\ L1 \\ B2 \\ L2 \\ B3 \\ L3 \\ B4 \\ L4 \\ B5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. คำนวณหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้ง 8 ตัวในระบบทดสอบ โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1
3. จำลองการเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 เส้น โดยปรับค่าตำแหน่งผิดปกติ (Fault location) ตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u.ของความยาวสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้น โดยเริ่มต้นจากบัสทางซ้ายไปยังบัสทางขวา
4. เปรียบเทียบการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) กับการทำงานของรีเลย์ระยะทางเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งที่ละเส้น

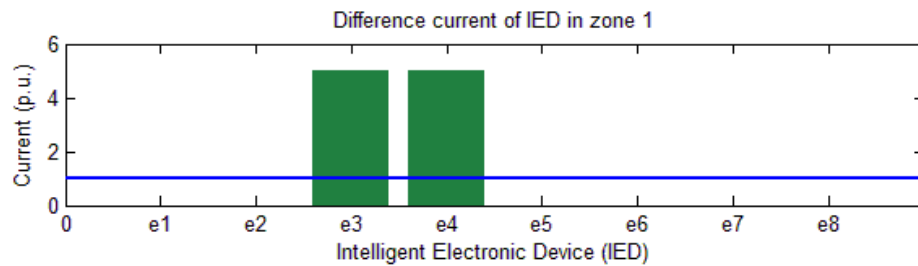
ผลการทดสอบที่ 1.1 การทดสอบที่ 1.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับปริเยษะทาง ดังนั้นผลการทดสอบที่ 1.1 จะนำเสนอการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำหน้าที่เป็นการป้องกันโซนต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ตารางที่ 5.1 แสดงผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด โดยจะแสดงว่า ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซนต่างๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใดในการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน เช่น การป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 จะนำข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 มาวิเคราะห์การตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1

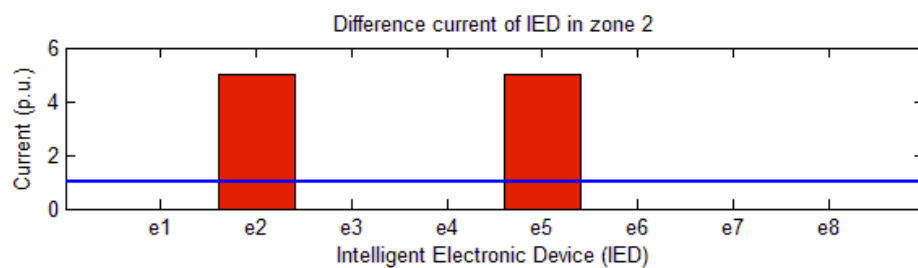
ตารางที่ 5.1 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบแบบเรเดียล

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเกี่ยวกับการป้องกันในโซนต่างๆ		
	การป้องกันโซน 1	การป้องกันโซน 2	การป้องกันโซน 3
e1	e2	-	e4
e2	e1	e4	-
e3	e4	e1	e6
e4	e3	e6	e1
e5	e6	e3	e8
e6	e5	e8	e3
e7	e8	e5	-
e8	e7	-	e5

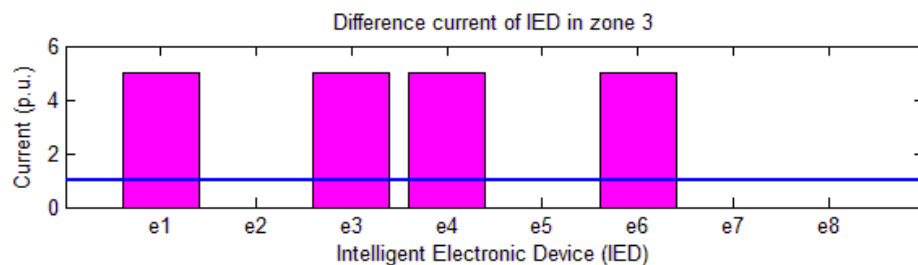
2. ภาพที่ 5.3 และ ตารางที่ 5.2 แสดงตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติภายในโซนต่างๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง ตามลำดับ โดยแสดงการตรวจจับความผิดปกติในโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (0.5 p.u.) ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2 และมีอิมพีแดนซ์ลัดวงจร 0 p.u.



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 5.3 ตัวอย่างผลการตรวจจับความผิดปกติของการทดสอบที่ 1.1

ภาพที่ 5.3 แสดงผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตรวจจับได้ในแต่ละโซนการป้องกัน เมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่ง 0.5 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2 และอิมพีแดนซ์ลัดวงจร 0 p.u. เมื่อแกนตั้งแสดงขนาดผลต่างของกระแส (p.u.) และ แกนนอนแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว พบว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 เพราะผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 ตรวจจับได้มีค่ามากกว่า 1 p.u. ดังแสดงในภาพที่ 5.3(ก), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่

ชาวนวลลาต e2 และ e5 จะตรวจพบความผิดพ่วงในโซน 2 ดังแสดงในภาพที่ 5.3(ข) และการป้องกันโซน 3 พบว่าผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาต e3, e4, e5 และ e6 มีค่ามากกว่า 1 p.u. แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาต e3 และ e4 ตรวจพบความผิดพ่วงขึ้นในโซน 1 ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาต e1 และ e6 จะตรวจพบความผิดพ่วงในโซน 3 ดังแสดงในภาพที่ 5.3(ค) โดยผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาตในแต่ละโซนการป้องกันจะอ้างอิงข้อมูลจากตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพ่วงของรีเลย์ระยะทาง

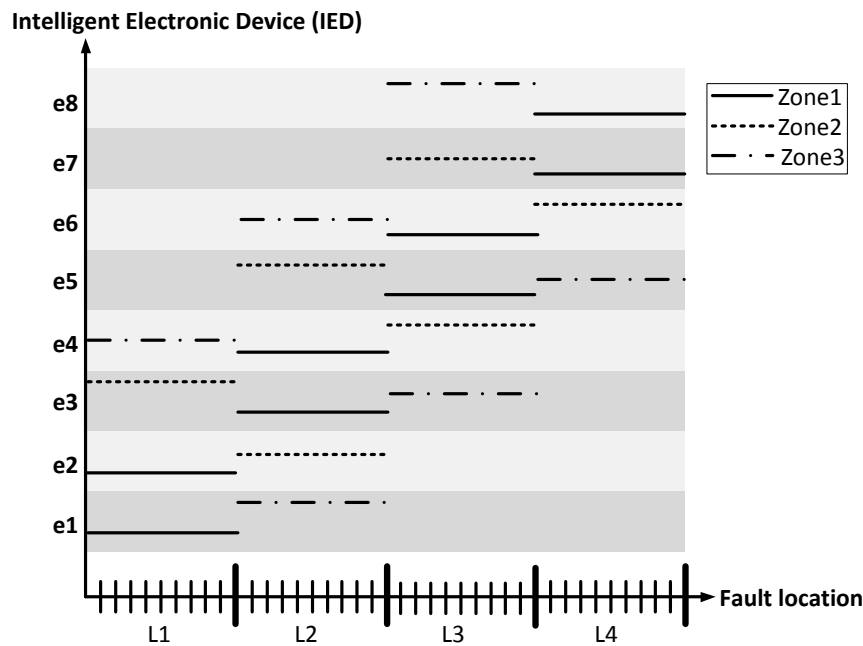
	อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ ระยะทางมองเห็น (p.u.)	การทำงานของรีเลย์ ระยะทาง โซน 1	การทำงานของรีเลย์? ระยะทาง โซน 2	การทำงานของรีเลย์ ระยะทาง โซน 3
e1	0.0339+0.2569j	-	ตรวจพบความผิดพ่วง	-
e2	-0.0113-0.0856j	-	-	-
e3	0.0113+0.0856j	ตรวจพบความผิดพ่วง	-	-
e4	0.0113+0.0856j	ตรวจพบความผิดพ่วง	-	-
e5	-0.0113-0.0856j	-	-	-
e6	0.0339+0.2569j	-	ตรวจพบความผิดพ่วง	-
e7	-0.0339-0.2569j	-	-	-
e8	0.0564+0.4282j	-	-	ตรวจพบความผิดพ่วง

หมายเหตุ “-” คือ ตำแหน่งเกิดความผิดพ่วงอยู่นอกโซนการป้องกัน

ตารางที่ 5.2 แสดงตัวอย่างการตรวจจับความผิดพ่วงของรีเลย์ระยะทาง โดยจะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางแต่ละตัวมองเห็น พบว่า รีเลย์ระยะทาง e3 และ e4 ตรวจพบความผิดในการป้องกันโซน 1, รีเลย์ระยะทาง e1 และ e6 ตรวจพบความผิดพ่วงในการป้องกันโซน 2 และรีเลย์ระยะทาง e8 ตรวจพบความผิดพ่วงในการป้องกันโซน 3

ภาพที่ 5.3 และ ตารางที่ 5.2 แสดงการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาต และรีเลย์ระยะทาง โดยพบว่าในการป้องกันการเกิดความผิดพ่วงบนตำแหน่งเดียวกันในระบบไฟฟ้าการทำงานในโซนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาต และ รีเลย์ระยะทาง จะแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ขอบเขตการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนวลลาต และ รีเลย์ระยะทางมีความแตกต่างกันเช่นกัน

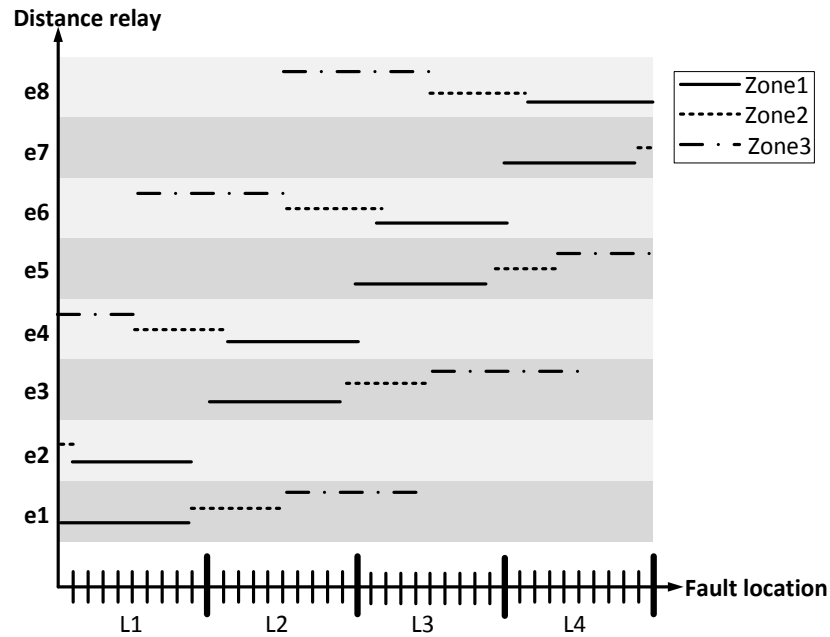
3. ภาพที่ 5.4 และ ภาพที่ 5.5 แสดงขอบเขตการทำงานในการป้องกันโซนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทางตามลำดับ โดยจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการทำงานโซนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด โดยอ้างอิงข้อมูลจากตาราง ข.2-ข.13 ในภาคผนวก ข



ภาพที่ 5.4 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันโซนต่างๆ

ภาพที่ 5.4 แสดงการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในการป้องกันโซนต่างๆ เมื่อแกนตั้งแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ แกนนอนแสดงตำแหน่งเกิดความผิดปกติของสายส่งเส้นที่ 1-4 โดยสายส่งแต่ละเส้นจะจำลองการผิดพลาดที่ตำแหน่ง 0.1-0.9 p.u.ของความยาวสายส่งไฟฟ้า โดยโซนการป้องกันแต่ละโซนแสดงได้จากลักษณะของเส้นที่บัพและเส้นประที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 5.4 จะอธิบายถึงการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1-e8 ว่าโซนการป้องกัน โซน 1, 2 และ 3 จะครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าเส้นใดบ้าง เช่น การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 ในการป้องกันโซน 1 จะครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2 (L2) การป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 จะครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1 (L1) และ การป้องกันโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 จะครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3 (L3)



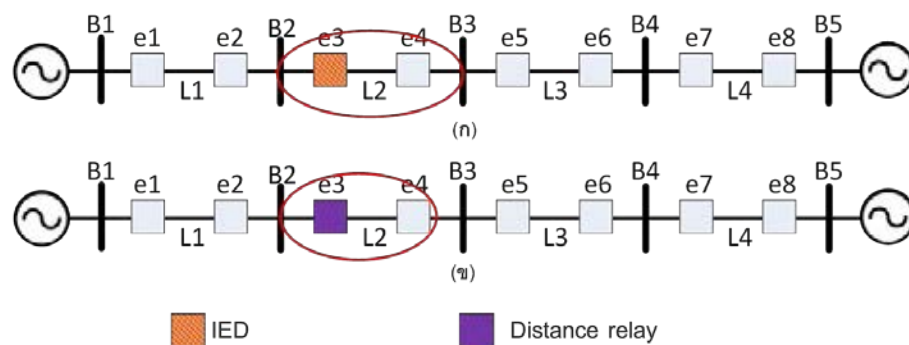
ภาพที่ 5.5 การทำงานของรีเลย์ระยะทางในการป้องกันโซนต่างๆ

ภาพที่ 5.5 แสดงการทำงานของรีเลย์ระยะทางในการป้องกันโซนต่างๆ เมื่อแกนตั้งแสดงรีเลย์ระยะทาง และ แกนนอนแสดงตำแหน่งเกิดความผิดปกติของสายส่งเส้นที่ 1-4 โดยสายส่งแต่ละเส้นจะจำลองการผิดปกติที่ตำแหน่ง 0.1-0.9 p.u.ของความยาวสายส่งไฟฟ้า โดยโซนการป้องกันแต่ละโซนแสดงได้จากลักษณะของเส้นที่บดและเส้นประที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 5.5 จะอธิบายถึงการทำงานของรีเลย์ระยะทาง e1-e8 ว่าโซนการป้องกัน โซน 1, 2 และ 3 จะครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าเส้นใดบ้าง เช่น การทำงานของรีเลย์ระยะทาง e3 ในการป้องกันโซน 1 จะครอบคลุม 0.85 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2 (L2) การป้องกันโซน 2 ของรีเลย์ระยะทาง e3 จะครอบคลุม 0.1-0.5 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3 (L3) และ การป้องกันโซน 3 ของรีเลย์ระยะทาง e3 จะครอบคลุม 0.6-0.9 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3 (L3) และ 0.1-0.5 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4 (L4)

วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 1.1 การทดสอบที่ 1.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การทำงานที่แตกต่างกันของโซนการป้องกันต่างๆระหว่างขั้นตอนวิธีที่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด กับขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง และจากผลการทดสอบที่ 1.1 สามารถวิเคราะห์ประเด็นหลักๆได้ดังนี้

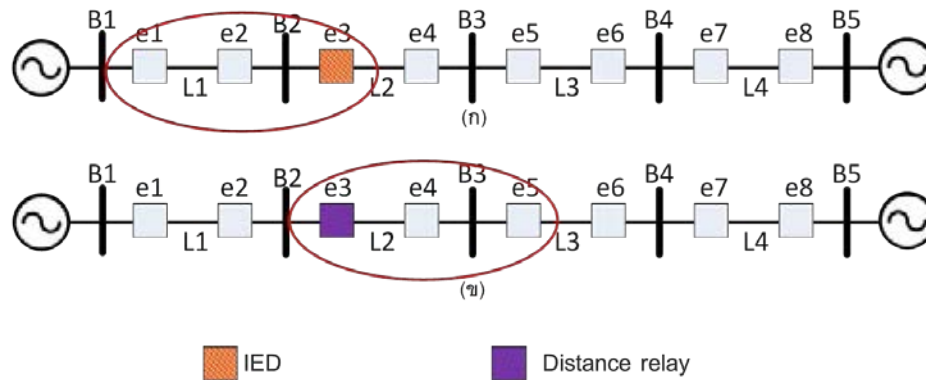
1. เขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดครอบคลุมตลอดทั้งความยาวสายส่งไฟฟ้าที่ป้องกัน แต่รีเลย์ระยะทางจะครอบคลุม 85% ของความยาวสายส่งไฟฟ้าที่ต้องการป้องกันเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 5.6 (ก) และ (ข) เมื่อพิจารณาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและรีเลย์ระยะทางในตำแหน่งเดียวกันคือตำแหน่ง e3 พบว่าการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโซน 1 สามารถครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่งไฟฟ้า L2 แต่การทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 1 ครอบคลุมค่าที่ตั้งไว้ (85%ของสายส่ง L2) เท่านั้น ดังนั้นหากเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่ง 90% ของสายส่ง L2 รีเลย์ระยะทางจะมองเห็นความผิดปกติอยู่ในโซน 2 และ หน่วงเวลาในการทำงานออกไป แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ในโซน 1 และทำการตัดวงจร แสดงว่า ในกรณีที่เกิดความผิดปกติบริเวณปลายสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถกำจัดความผิดปกติได้รวดเร็วกว่ารีเลย์ระยะทาง



ภาพที่ 5.6 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1 ของอุปกรณ์ป้องกัน

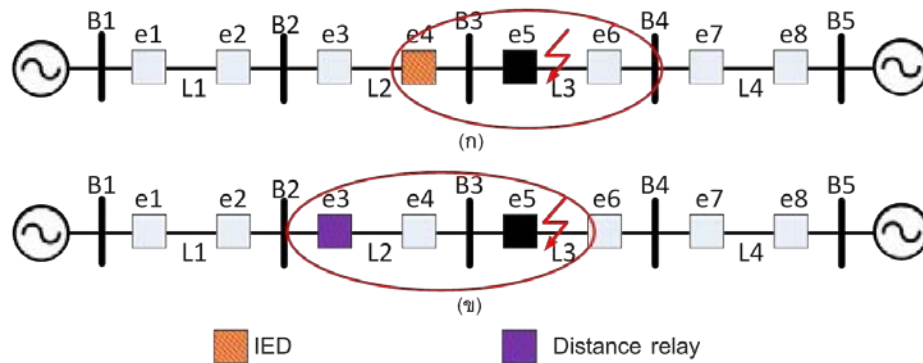
2. เขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและระยะทางมีความแตกต่างกัน โดยการป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าทุกเส้นที่เชื่อมกับบัสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งอยู่ แต่รีเลย์ระยะทางจะครอบคลุม 150 % ของความยาวสายส่งที่จะป้องกันโดยจะมีทิศทาง การป้องกันที่ตรงข้ามกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด ดังแสดงในภาพที่ 5.7 (ก) และ

(ข) เมื่อพิจารณาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและรีเลย์ระยะทางในตำแหน่งเดียวกันคือตำแหน่ง e3 พบว่าการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดโซน 2 สามารถครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่ง L1 แต่การทำงานของรีเลย์ระยะทางโซน 2 ครอบคลุมสายส่ง L2 และ 50% ของสายส่ง L3



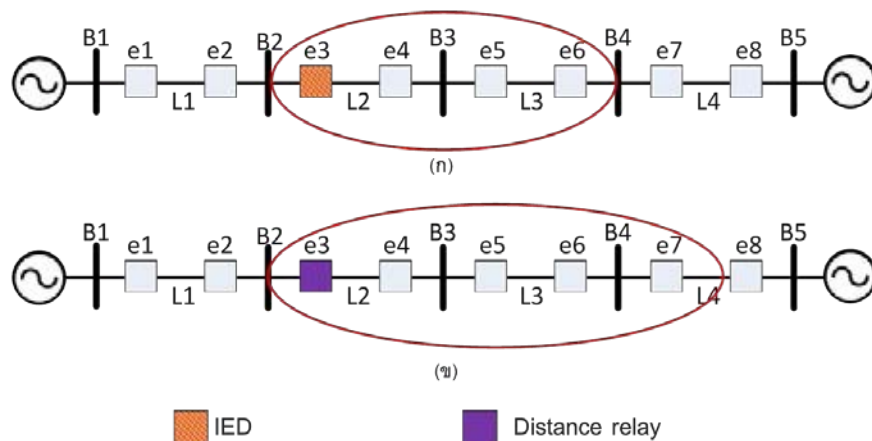
ภาพที่ 5.7 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์ป้องกัน

- เนื่องจากขอบเขตการป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง มีความแตกต่างกัน จึงทำให้การทำงานของเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและรีเลย์ระยะทาง มีความแตกต่างกันเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.8 (ก) และ (ข) เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า L3 แล้ว อุปกรณ์ป้องกันที่ตำแหน่ง e5 ไม่ทำงานหรือทำงานผิดพลาด พบว่า การป้องกันสำรองของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้น จะเป็นการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 แต่การป้องกันสำรองของรีเลย์ระยะทางจะเป็นการทำงานของรีเลย์ระยะทาง e3 ดังนั้นแสดงว่าเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถทำงานเป็นการป้องกันสำรอง และสามารถลดบริเวณที่ถูกตัดออกจากระบบเนื่องจากความผิดปกติได้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของรีเลย์ระยะทาง



ภาพที่ 5.8 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสำหรับข้อบกพร่อง 2 ของสายส่งไฟฟ้า L3

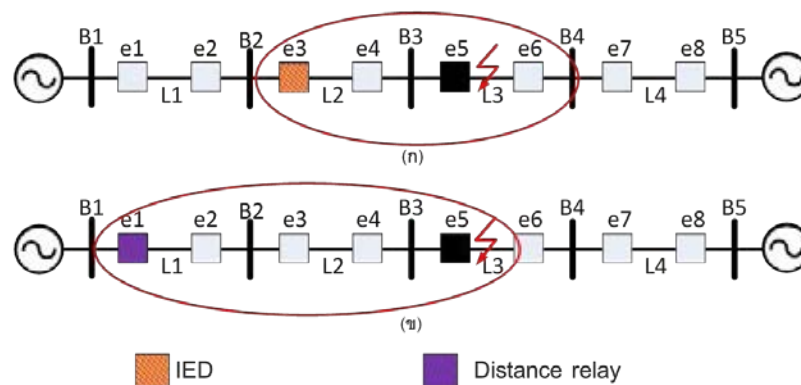
4. เขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและระยะทางมีความแตกต่างกัน โดยการป้องกัน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดครอบคลุมสายส่งไฟฟ้าทุกเส้นที่เชื่อมกับบัสตรงข้ามกับบัสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งอยู่ แต่รีเลย์ระยะทางจะระยะความยาวไม่เกิน 150 % ของสายส่งเส้นถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 5.9 (ก) และ (ข) เมื่อพิจารณาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและรีเลย์ระยะทางในตำแหน่งเดียวกันคือตำแหน่ง e3 พบว่าการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด 3 สามารถครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่ง L1 และ สายส่ง L3 แต่การทำงานของรีเลย์ระยะทาง 3 ครอบคลุมสายส่ง L2 และ 150% ของสายส่ง L3



ภาพที่ 5.9 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 3 ของอุปกรณ์ป้องกัน

5. เนื่องจากขอบเขตการป้องกัน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง มีความแตกต่างกัน จึงทำให้การทำงานของสำรองของเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้า 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและรีเลย์ระยะทาง มีความแตกต่างกัน

เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.10 (ก) และ (ข) เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า L3 แล้วอุปกรณ์ป้องกันที่ตำแหน่ง e5 ไม่ทำงานหรือทำงานผิดพลาด พบว่า การป้องกันสำรองโซน 3 ของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้น จะเป็นการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 แต่การป้องกันสำรองโซน 3 ของรีเลย์ระยะทางจะเป็นการทำงานของรีเลย์ระยะทาง e3 ดังนั้นแสดงว่าเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถทำงานเป็นการป้องกันสำรอง และสามารถลดบริเวณที่ถูกตัดออกจากระบบเนื่องจากความผิดปกติได้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของรีเลย์ระยะทาง



ภาพที่ 5.10 การเปรียบเทียบเขตการป้องกันสำรองโซน 3 ของสายส่งไฟฟ้า L3

5.1.2 การทดสอบที่ 1.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะกับรีเลย์ระยะทางในเชิงอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร

การทดสอบที่ 1.2 คือ การเปรียบเทียบการสมรรถนะในการทำงานของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับ ขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง โดยพิจารณาอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อสมรรถนะในการวิเคราะห์

วัตถุประสงค์ การทดสอบที่ 1.2 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการทำงานในโซนการป้องกันต่างๆของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง

สมมติฐาน การทดสอบที่ 1.2 มีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

1. ความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1 ถึง 4
2. ความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 เส้นเท่านั้น
3. ตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u. ของสายส่งไฟฟ้า
4. ความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 ตำแหน่งบนสายส่งไฟฟ้าเท่านั้น
5. ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าเป็นความผิดพลาดแบบสามเฟสสมดุล (Three Phase Fault)
6. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault Impedance) มีค่าเท่ากับ 1-10 โอห์ม (0.00189-0.0189 p.u.) และมุมเฟสของอิมพีแดนซ์ตั้งแต่ 0-90 องศา ปรับค่าครั้งละ 15 องศา
7. การป้องกันโซน 1 ของรีเลย์ระยะทาง ครอบคลุม 85% ของสายส่งไฟฟ้าที่จะป้องกัน ($Z_{Trip,Zone1} = 0.01918 + 0.1468j \text{ p.u.}$)
8. การป้องกันโซน 2 ของรีเลย์ระยะทาง ครอบคลุม 150% ของสายส่งไฟฟ้าที่จะป้องกัน ($Z_{Trip,Zone2} = 0.03385 + 0.2591j \text{ p.u.}$)
9. การป้องกันโซน 3 ของรีเลย์ระยะทาง ครอบคลุม 150% ของสายส่งไฟฟ้าเส้นถัดไปที่ยาวที่สุด ($Z_{Trip,Zone3} = 0.05643 + 0.4318j \text{ p.u.}$)

ขั้นตอนในการทดสอบ การทดสอบที่ 1.2 มีขั้นตอนในการทำการทดสอบดังนี้

- นำข้อมูลโครงสร้างการเชื่อมต่อของระบบทดสอบแบบเบเรเดียจจากภาพที่ 5.2 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับอุปกรณ์อื่นๆ (บัสบาร์, สายส่ง) โดยเมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) ได้ดังนี้

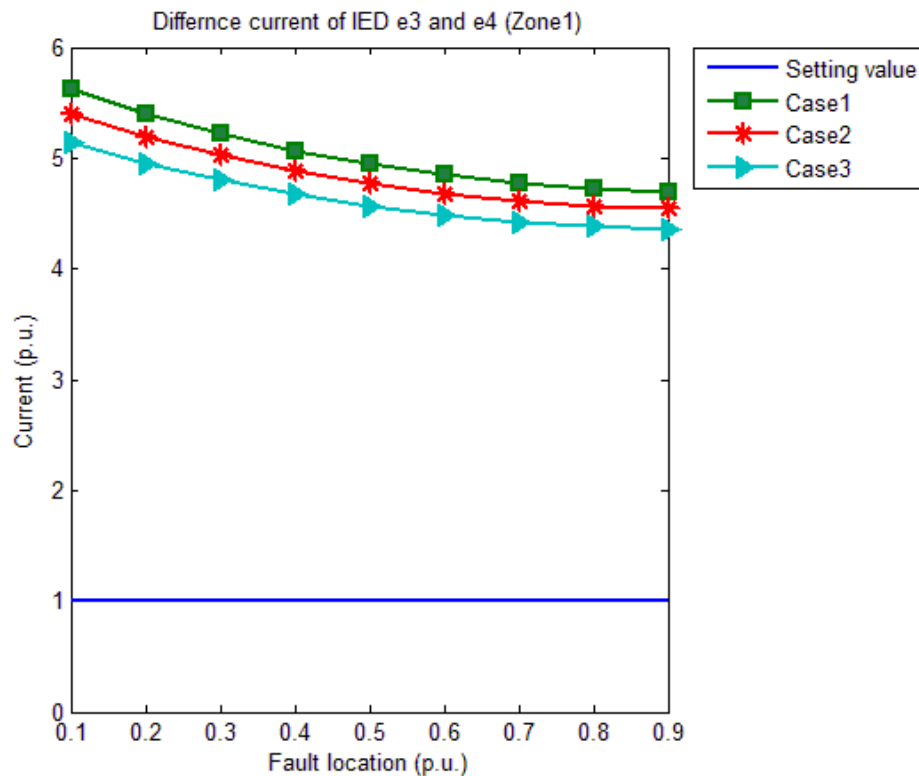
$$A = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 & e7 & e8 \\ \begin{matrix} B1 \\ L1 \\ B2 \\ L2 \\ B3 \\ L3 \\ B4 \\ L4 \\ B5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- คำนวณหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้ง 8 ตัวในระบบทดสอบ โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1
- จำลองการเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 เส้น โดยปรับค่าตำแหน่งผิดปกติ (Fault location) ตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u.ของความยาวสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้น โดยเริ่มต้นจากบัสทางซ้ายไปยังบัสทางขวา
- เปรียบเทียบการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) กับการทำงานของรีเลย์ระยะทางเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งที่ละเส้น
- พิจารณาอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการทำงานในโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1-e8 และรีเลย์ระยะทาง e1-e8
- พิจารณาอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการทำงานในโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2-e7 และรีเลย์ระยะทาง e1, e3-e6, e8
- พิจารณาอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการทำงานในโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1, e3-e6, e8 และรีเลย์ระยะทาง e1, e3, e6, e8

ผลการทดสอบที่ 1.2 การทดสอบที่ 1.2 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการทำงานในโซนการป้องกันต่างๆของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด กับรีเลย์ระยะทาง ดังนั้นผลการทดสอบที่ 1.2 จะนำเสนอความถูกต้องการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันภายในโซนการป้องกันต่างๆ เมื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรในการเกิดความผิดพลาดตำแหน่งต่างๆ โดยผลการทดสอบจะแสดงตัวอย่างการตรวจจับความผิดพลาดภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และรีเลย์ระยะทาง เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 0.1-0.9 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2 และ ปรับค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร 3 ค่า คือ $1\angle 60^\circ \Omega$, $5\angle 60^\circ \Omega$ และ $10\angle 60^\circ \Omega$ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจจับความผิดพลาดภายในโซนการป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $1\angle 60^\circ \Omega$, กรณีที่ 2 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $5\angle 60^\circ \Omega$ และ กรณีที่ 3 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $10\angle 60^\circ \Omega$

เมื่อเกิดความผิดพลาดบนสายส่งเส้นที่ 2 การป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 และผลการตรวจจับความผิดพลาดภายในโซน 1 จะแสดงดังภาพที่ 5.11 ซึ่งแกนตั้งคือ ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3,e4 ในกรณีต่างๆ (p.u.) และแกนนอนคือ ตำแหน่งผิดพลาด (p.u.) หากพบว่าผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3, e4 ที่คำนวณได้เกินค่าที่ตั้งไว้ (1 p.u.) จะทำการตัดวงจร

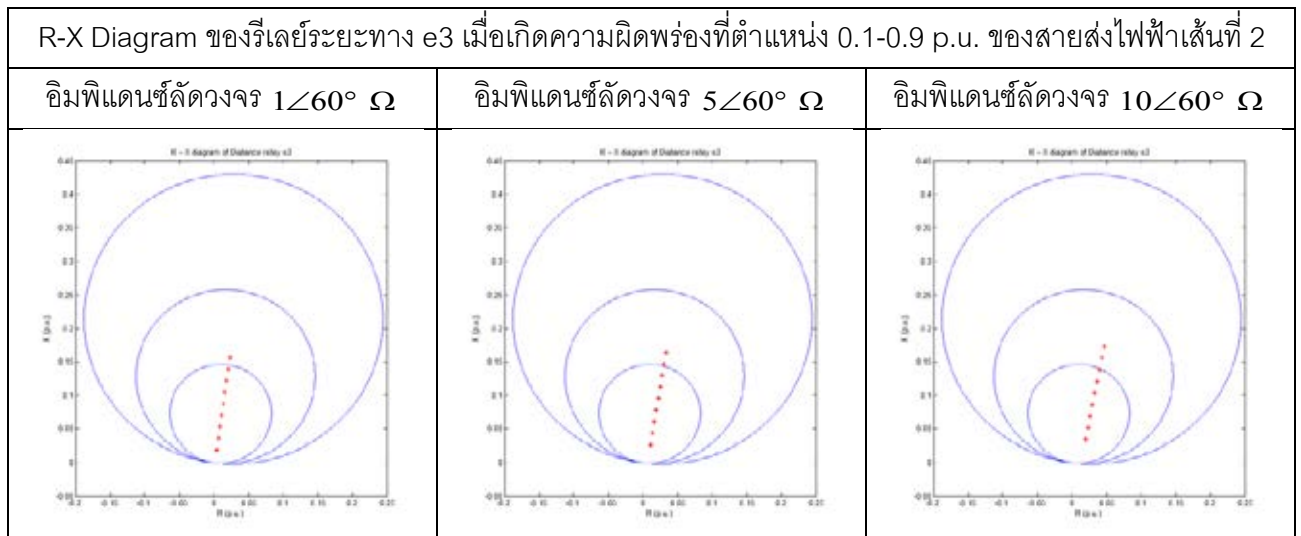


ภาพที่ 5.11 ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3, e4

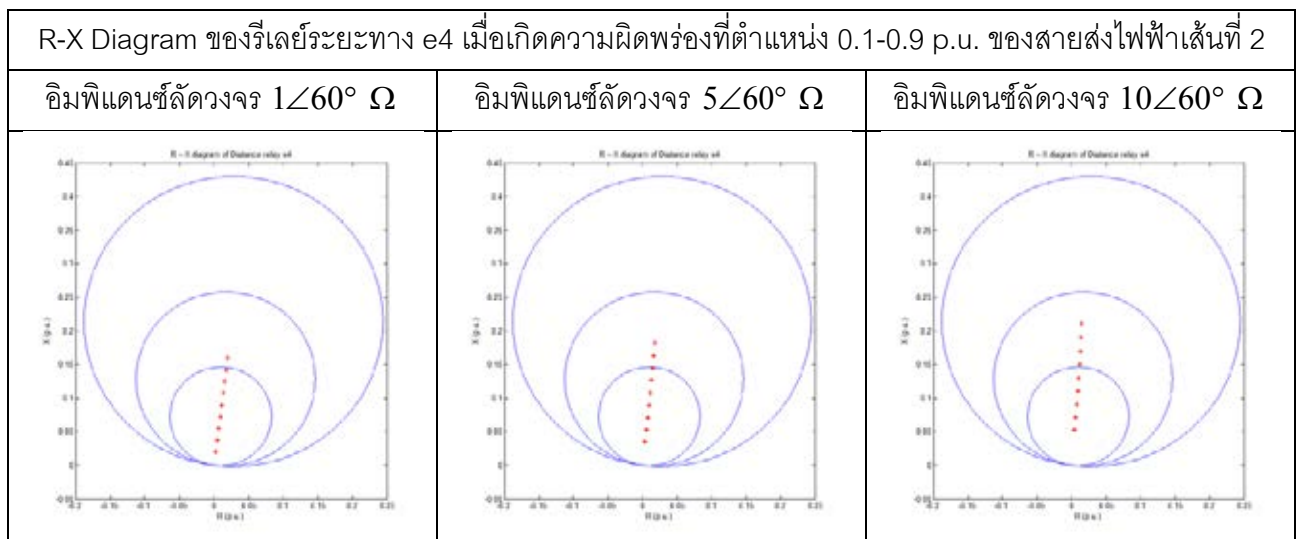
เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 2 การป้องกันโซน 1 ของรีเลย์ระยะทางคือ รีเลย์ระยะทาง e3 และ e4 และผลการตรวจจับความผิดปกติภายในโซน 1 จะแสดงโดยแผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ (R-X Diagram) ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และ ตารางที่ 5.4 ซึ่งแกนตั้งคือ ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.) และแกนนอนคือ ค่าความต้านทาน (p.u.) หากพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นมีค่าน้อยกว่าขนาดที่กำหนดไว้ รีเลย์ระยะทางจะทำการตัดวงจร

R-X Diagram ของของรีเลย์ระยะทาง e3 และ e4 พบว่า เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 2 และค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง e3 และ e4 มองเห็น จะมีค่ามากขึ้น โดยจะส่งผลต่อให้รีเลย์ระยะทาง e3 ตรวจจับความผิดปกติผิดพลาด ในช่วง 0.8-0.9 p.u.ของสายส่งเส้นที่ 2 และรีเลย์ระยะทาง e4 ตรวจจับความผิดปกติผิดพลาด ในช่วง 0.1-0.3 p.u.ของสายส่งเส้นที่ 2

ตารางที่ 5.3 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e3



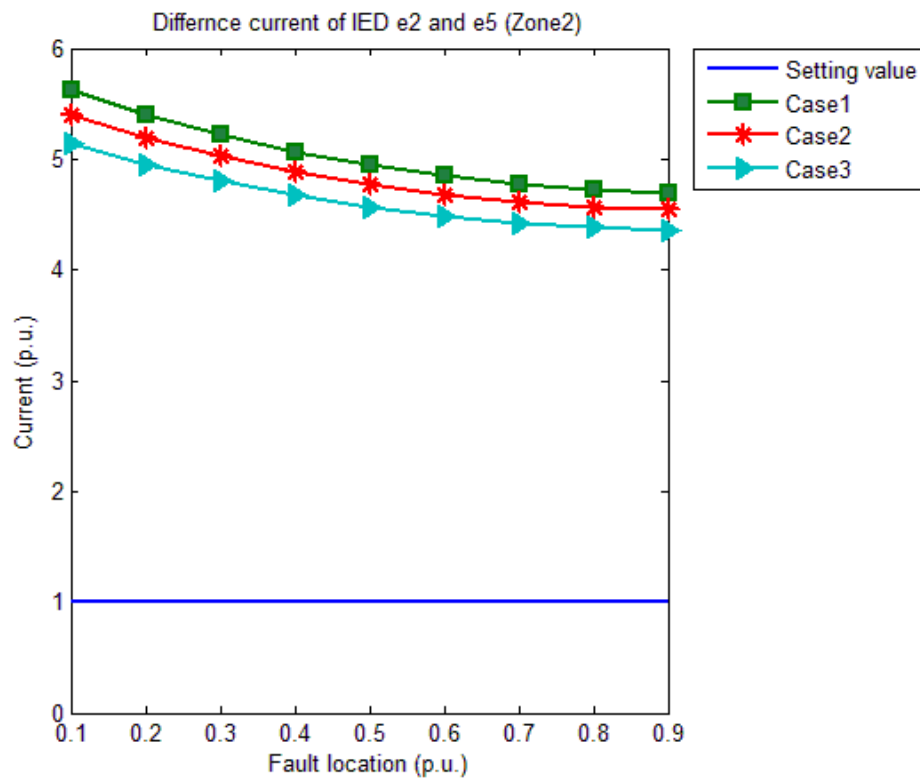
ตารางที่ 5.4 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e4



- การตรวจจับความผิดปกติภายในโซนการป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $1 \angle 60^\circ \Omega$, กรณีที่ 2 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $5 \angle 60^\circ \Omega$ และ กรณีที่ 3 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $10 \angle 60^\circ \Omega$

เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 2 การป้องกันโซน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 และ e5 และผลการตรวจจับความผิดปกติภายในโซน 2 จะแสดงดังภาพที่ 5.12 ซึ่งแกนตั้งคือ ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2, e5 ในกรณีต่างๆ (p.u.) และแกนนอน

คือ ตำแหน่งผิดพลาด (p.u.) หากพบว่าผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2, e5 ที่คำนวณได้เกินค่าที่ตั้งไว้ (1 p.u.) จะทำการตัดวงจร

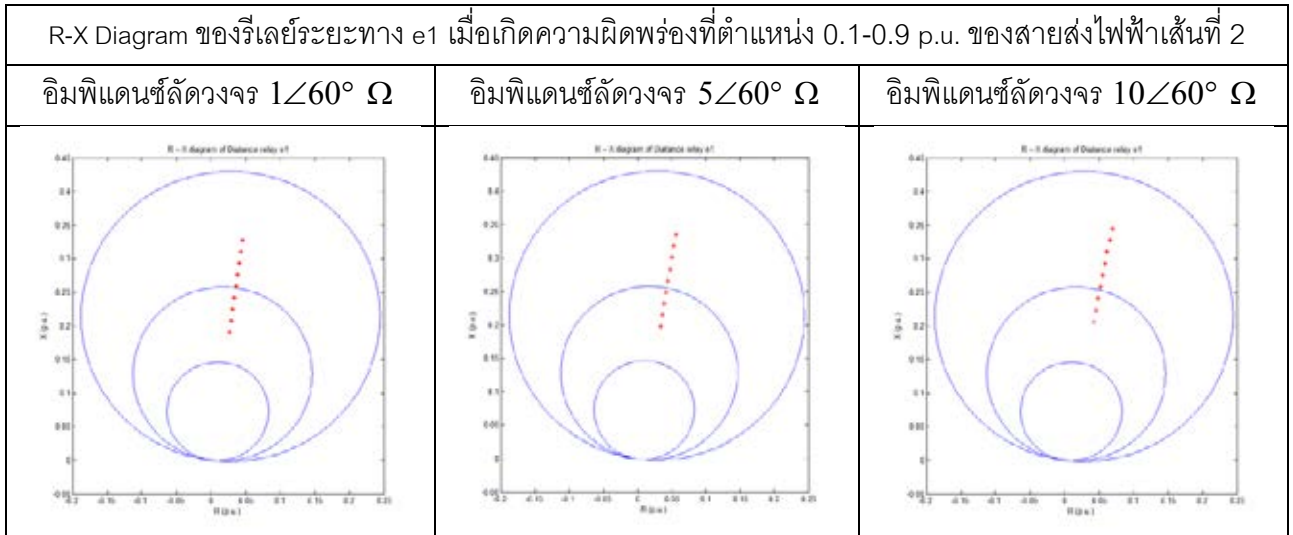


ภาพที่ 5.12 ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2, e5

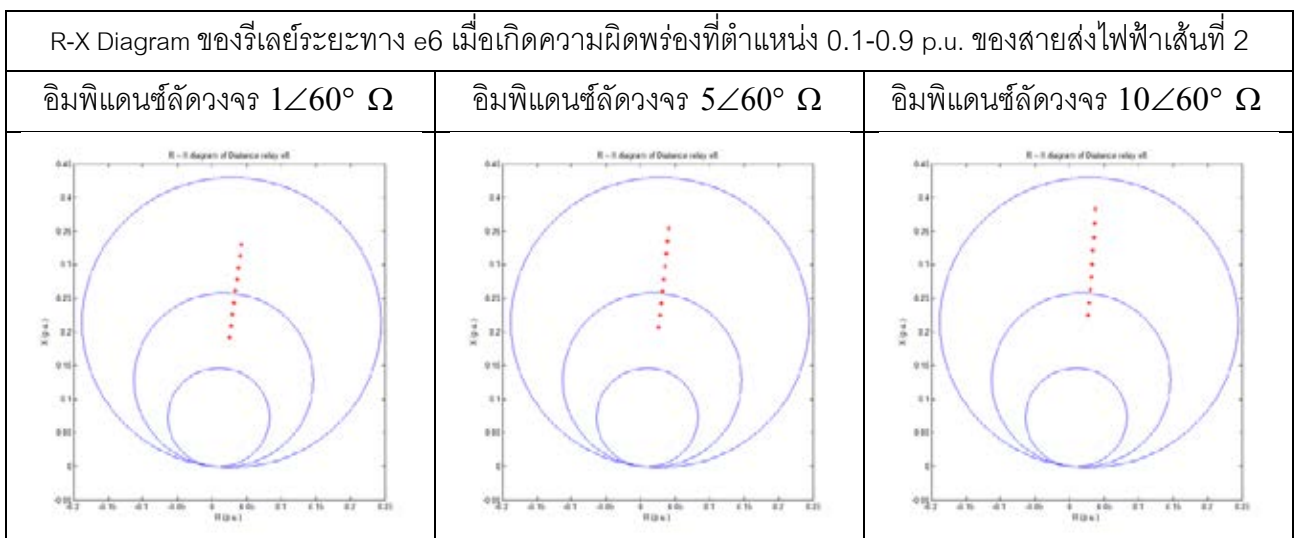
- เมื่อเกิดความผิดพลาดบนสายส่งเส้นที่ 2 การป้องกันโซน 2 ของรีเลย์ระยะทาง คือ รีเลย์ระยะทาง e1 และ e6 และผลการตรวจจับความผิดพลาดภายในโซน 2 จะแสดงโดยแผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีเอกแทนซ์ (R-X Diagram) ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และ ตารางที่ 5.6 ซึ่งแกนตั้งคือ ค่ารีเอกแทนซ์ (p.u.) และแกนนอนคือ ค่าความต้านทาน (p.u.) หากพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นมีค่าน้อยกว่าขนาดที่กำหนดไว้ รีเลย์ระยะทางจะทำการตัดวงจร

R-X Diagram ของของรีเลย์ระยะทาง e1 และ e6 พบว่า เมื่อเกิดความผิดพลาดบนสายส่งเส้นที่ 2 และ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจจับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง e1 และ e6 มองเห็น จะมีค่ามากขึ้น โดยจะส่งผลต่อให้รีเลย์ระยะทาง e1 ตรวจจับความผิดพลาดผิดพลาด ในช่วง 0.3-0.5 p.u.ของสายส่งเส้นที่ 2 และรีเลย์ระยะทาง e6 ตรวจจับความผิดพลาดผิดพลาด ในช่วง 0.6-0.7 p.u.ของสายส่งเส้นที่ 2

ตารางที่ 5.5 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e1



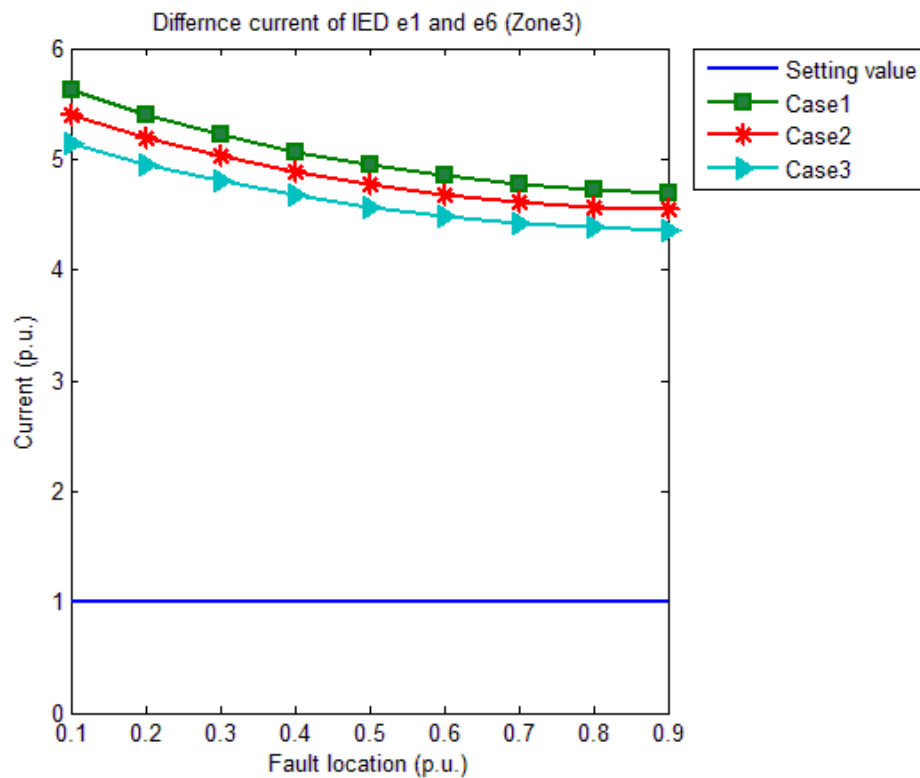
ตารางที่ 5.6 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e6



4. การตรวจจับความผิดปกติภายในโซนการป้องกันโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ รีเลย์ระยะทาง โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $1 \angle 60^\circ \Omega$, กรณีที่ 2 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $5 \angle 60^\circ \Omega$ และ กรณีที่ 3 คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร $10 \angle 60^\circ \Omega$

เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 2 การป้องกันโซน 3 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และ e6 และผลการตรวจจับความผิดปกติภายในโซน 3 จะแสดงดังภาพที่ 5.13 ซึ่งแกนตั้งคือ ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1, e6 ในกรณีต่างๆ (p.u.) และแกนนอน

คือ ตำแหน่งผิดพลาด (p.u.) หากพบว่าผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1,e6 ที่คำนวณได้เกินค่าที่ตั้งไว้ (1 p.u.) จะทำการตัดวงจร

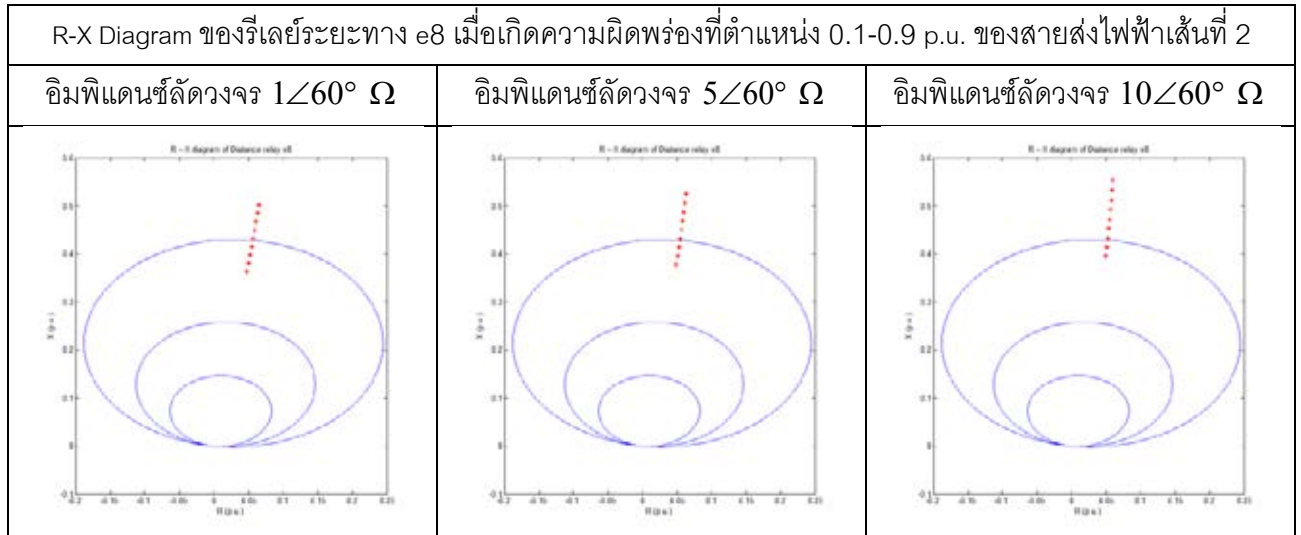


ภาพที่ 5.13 ผลต่างกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1, e6

เมื่อเกิดความผิดพลาดบนสายส่งเส้นที่ 2 การป้องกันโซน 3 ของรีเลย์ระยะทางคือ รีเลย์ระยะทาง e8 และผลการตรวจจับความผิดพลาดภายในโซน 3 จะแสดงโดยแผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ (R-X Diagram) ดังแสดงในตารางที่ 5.7 ซึ่งแกนตั้งคือ ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.) และแกนนอนคือ ค่าความต้านทาน (p.u.) หากพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทางมองเห็นมีค่าน้อยกว่าขนาดที่กำหนดไว้ รีเลย์ระยะทางจะทำการตัดวงจร

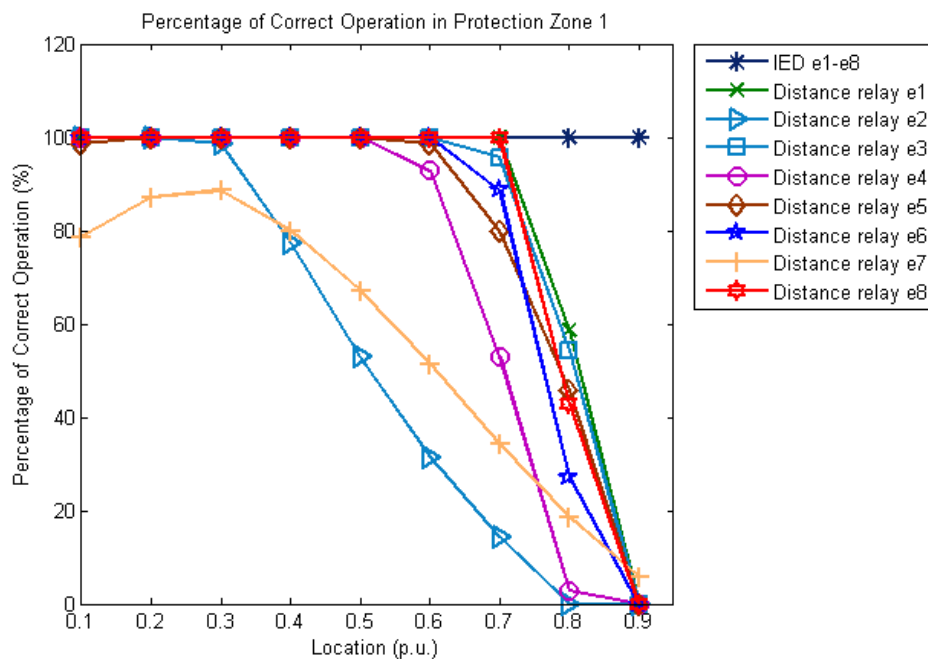
R-X Diagram ของของรีเลย์ระยะทาง e8 พบว่า เมื่อเกิดความผิดพลาดบนสายส่งเส้นที่ 2 และ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ระยะทาง e8 มองเห็น จะมีค่ามากขึ้น โดยจะส่งผลต่อให้รีเลย์ระยะทาง e8 ตรวจจับความผิดพลาดผิดพลาด ในช่วง 0.5-0.7 p.u. ของสายส่งเส้นที่ 2

ตารางที่ 5.7 แผนภูมิค่าความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์ของรีเลย์ระยะทาง e8



วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 1.2 การทดสอบที่ 1.2 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการทำงานในโซนการป้องกันต่างๆ ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด กับรีเลย์ระยะทาง และจากผลการทดสอบที่ 1.2 สามารถวิเคราะห์ประเด็นหลักๆ ได้ดังนี้

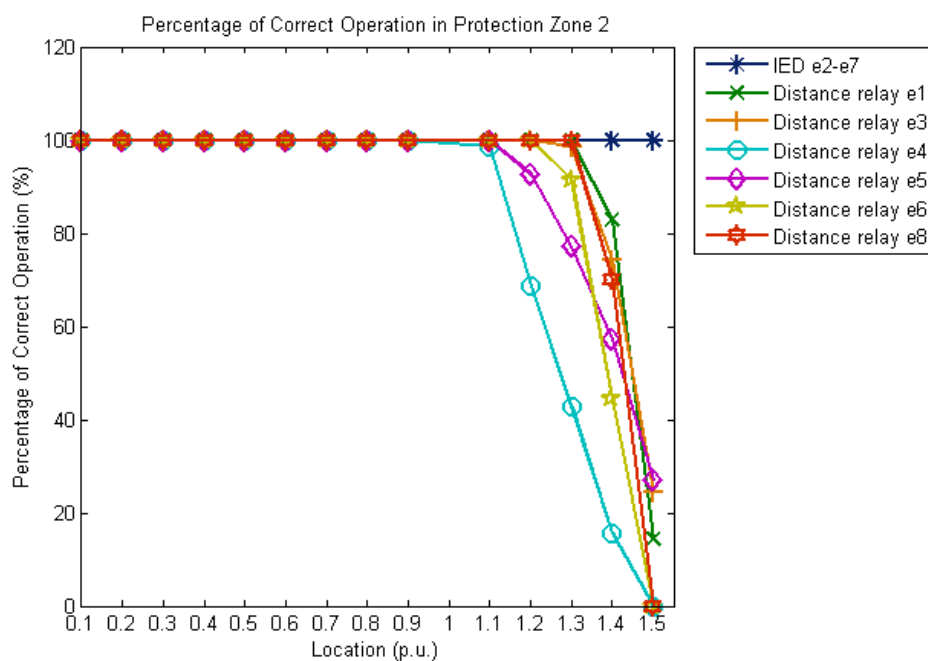
1. ผลการทดสอบจากภาพที่ 5.14 แสดงอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โซน 1 ซึ่งอิมพีแดนซ์ลัดวงจรไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด แต่อิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของรีเลย์ระยะทาง โดยจะมีผลมากเมื่อเกิดความผิดพลาดในช่วงปลายของโซนการป้องกัน ได้แก่ 0.7-0.9 p.u. แสดงว่า หากเกิดความผิดพลาดขึ้นบนตำแหน่งปลายของโซนการป้องกันโซน 1 และเป็นความผิดพลาดที่มีขนาดอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมากขึ้นอาจส่งผลให้รีเลย์ระยะทางโซน 1 ทำงานผิดพลาดได้



ภาพที่ 5.14 ร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์ป้องกัน

ภาพที่ 5.14 แสดงร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1-e8 และรีเลย์ระยะทาง e1-e8 โดยมีแกนนตั้ง คือ ร้อยละการทำงานถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน (%) และ แกนนอน คือตำแหน่งผิดพลาดภายในเขตการป้องกัน (p.u.) เมื่ออ้างอิงข้อมูลจากตารางที่ ข.14-ข.15 จากภาคผนวก ข.

2. ผลการทดสอบจากภาพที่ 5.15 แสดงอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โชน 2 ซึ่งอิมพีแดนซ์ลัดวงจรไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด แต่อิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของรีเลย์ระยะทาง โดยจะมีผลมากเมื่อเกิดความผิดพลาดในช่วงปลายของโซนการป้องกัน ได้แก่ 1.3-1.5 p.u. แสดงว่า หากเกิดความผิดพลาดขึ้นบนตำแหน่งปลายของโซนการป้องกัน โชน 2 และเป็นความผิดพลาดที่มีขนาดอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมากขึ้นอาจส่งผลให้รีเลย์ระยะทาง โชน 2 ไม่สามารถทำงานเป็นการป้องกันสำรองของสายส่งเส้นนั้นได้

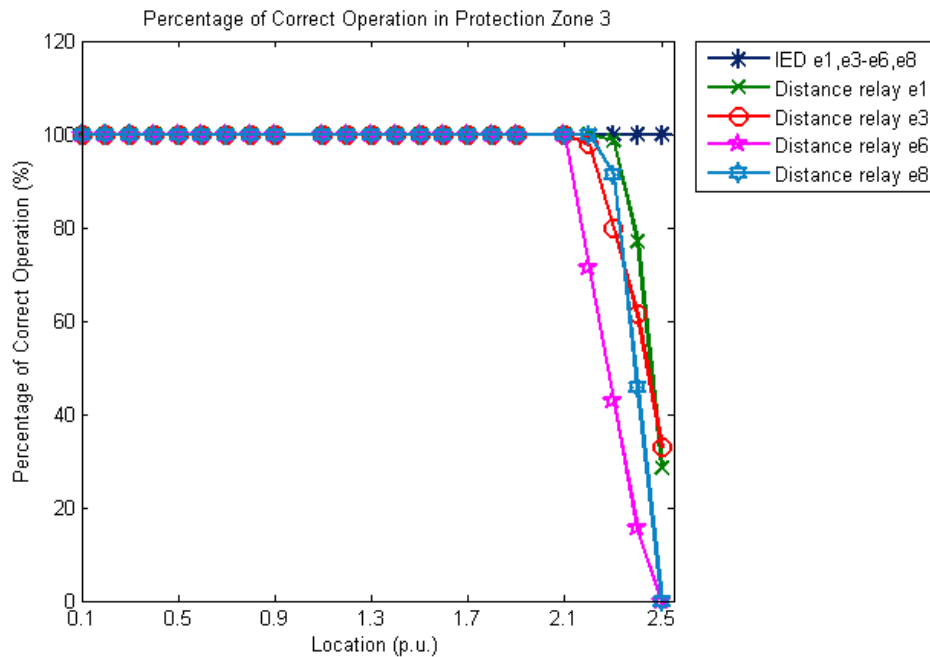


ภาพที่ 5.15 ร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกัน โชน 2 ของอุปกรณ์ป้องกัน

ภาพที่ 5.15 แสดงร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกัน โชน 2 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2-e7 และรีเลย์ระยะทาง e1, e3-e6, e8 โดยมีแกนตั้ง คือร้อยละการทำงานถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน (%) และ แกนนอน คือตำแหน่งผิดพลาดภายในขอบเขตการป้องกัน (p.u.) เมื่ออ้างอิงข้อมูลจากตารางที่ ข.16-ข.17 จากภาคผนวก ข.

3. ผลการทดสอบจากภาพที่ 5.16 แสดงอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โชน 3 ซึ่งอิมพีแดนซ์ลัดวงจรไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด แต่อิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของรีเลย์ระยะทาง โดยจะมีผลมากเมื่อเกิดความผิดพลาดในช่วงปลายของโซนการ

ป้องกัน ได้แก่ 2.3-2.5 p.u. แสดงว่า หากเกิดความผิดปกติเพิ่มขึ้นบนตำแหน่งปลายของโซน การป้องกันโซน 3 และเป็นความผิดปกติที่มีขนาดอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมากขึ้นอาจส่งผลให้ รีเลย์ระยะทางโซน 3 ไม่สามารถทำงานเป็นการป้องกันสำรองของสายส่งเส้นนั้นได้



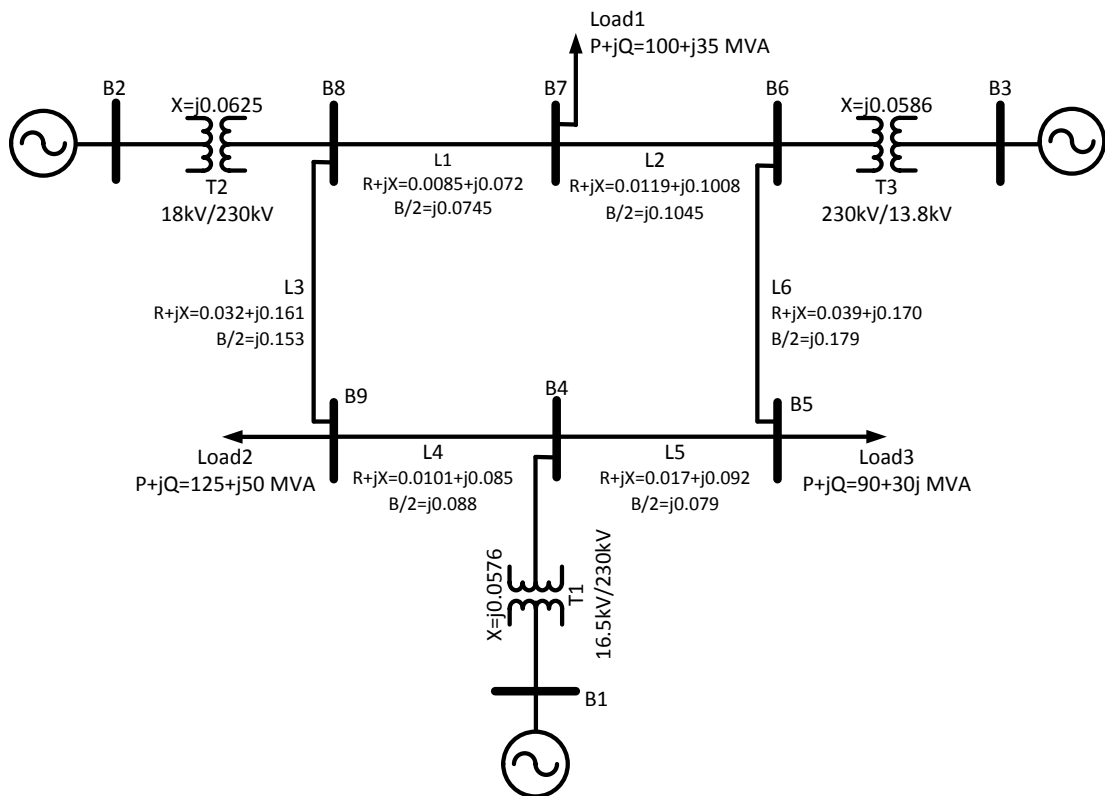
ภาพที่ 5.16 ร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 3 ของอุปกรณ์ป้องกัน

ภาพที่ 5.16 แสดงร้อยละการทำงานถูกต้องภายในการป้องกันโซน 3 ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1, e3-e6, e8 และรีเลย์ระยะทาง e1, e3, e6, e8 โดยมีแกนตั้ง คือร้อยละการทำงานถูกต้องของอุปกรณ์ป้องกัน (%) และ แกนนอน คือ ตำแหน่งผิดปกติภายในขอบเขตการป้องกัน (p.u.) เมื่ออ้างอิงข้อมูลจากตารางที่ ข.18-ข.19 จากภาคผนวก ข.

4. อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีผลต่อการทำงานของรีเลย์ระยะทางแต่ไม่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด เนื่องจากหลักการรีเลย์ระยะทาง คือการตรวจจับค่าอิมพีแดนซ์สายส่ง โดยรีเลย์ระยะทางจะทำการตัดวงจรเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ที่ตรวจพบน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ แต่การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดใช้หลักการของการเปรียบเทียบผลต่างของกระแส คือเป็นการเปรียบเทียบเพื่อหาขนาดของกระแสผิดปกติในเขตการป้องกัน และทำการตัดวงจรเมื่อพบกระแสผิดปกติมากกว่าค่าที่กำหนดไว้

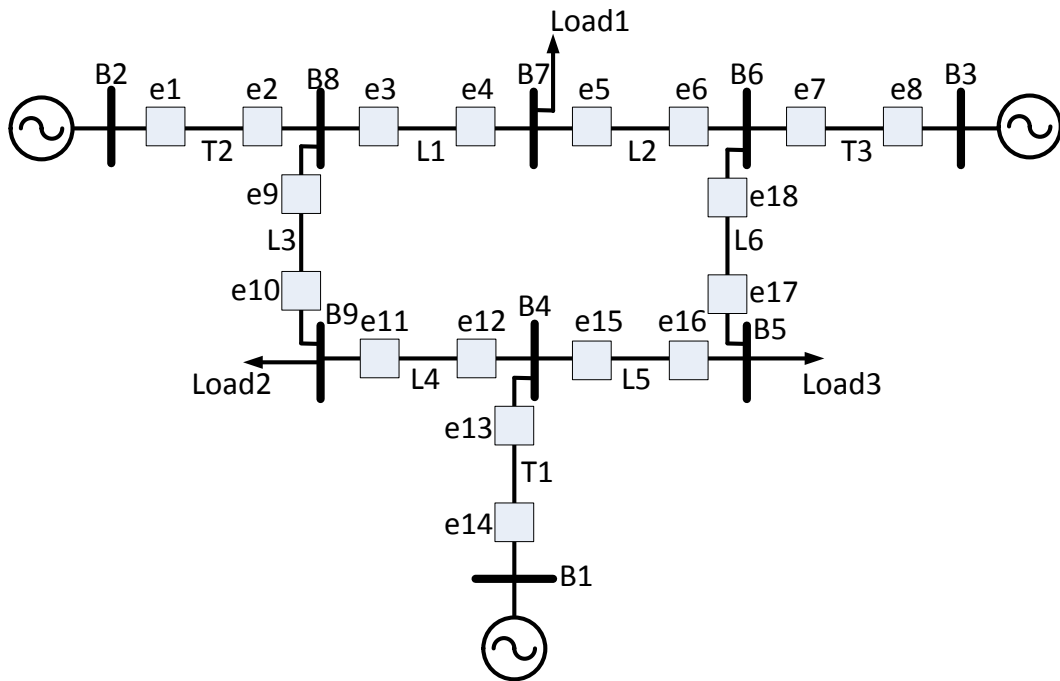
5.2 ระบบทดสอบแบบโครงข่าย (WSCC9 บัส)

การทดสอบที่ 2 คือ การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) โดยใช้ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส ดังแสดงในภาพที่ 5.17 โดยสัญลักษณ์ "B" แทน บัสบาร์, สัญลักษณ์ "L" แทนสายส่งไฟฟ้า และ สัญลักษณ์ "T" แทนด้วยหม้อแปลงในระบบส่งไฟฟ้า



ภาพที่ 5.17 ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส

ตำแหน่งติดตั้ง อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบทดสอบ WSCC 9 บัส แสดงในภาพที่ 5.18 โดยสัญลักษณ์ "e" แทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด



ภาพที่ 5.18 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบทดสอบ WSCC 9 บัส

การทดสอบที่ 2 การทดสอบสมรรถนะในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในระบบทดสอบ WSCC 9 บัส

วัตถุประสงค์ การทดสอบที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะในการทำงานของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา โดยจะวิเคราะห์โซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการตรวจจับความผิดปกติในโซนการป้องกันต่างๆ

สมมติฐาน การทดสอบที่ 2 มีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

1. ความผิดปกติเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1 ถึง 6
2. ความผิดปกติเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 เส้นเท่านั้น
3. ตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u. ของสายส่งไฟฟ้า
4. ความผิดปกติเกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าครั้งละ 1 ตำแหน่งบนสายส่งไฟฟ้าเท่านั้น
5. ความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าเป็นความผิดปกติแบบสามเฟสสมดุล (Three Phase Fault)
6. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault Impedance) มีค่าเท่ากับ 0-100 โอห์ม
7. มุมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีค่า 0-90 องศา โดยปรับครั้งละ 15 องศา

ขั้นตอนในการทดสอบ การทดสอบที่ 2 มีขั้นตอนในการทำการทดสอบดังนี้

1. หาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับอุปกรณ์อื่นๆ (บัลบาร์, สายส่ง และ หม้อแปลง) ของระบบทดสอบ WSCC 9 บัส จากภาพที่ 5.18 มา โดยเมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 & e7 & e8 & e9 & e10 & e11 & e12 & e13 & e14 & e15 & e16 & e17 & e18 \\ \begin{matrix} B2 \\ T2 \\ B8 \\ L1 \\ B7 \\ L2 \\ B6 \\ T3 \\ B3 \\ L3 \\ B9 \\ L4 \\ B4 \\ L5 \\ B5 \\ L6 \\ T1 \\ B1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. คำนวณหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้ง 18 ตัวในระบบทดสอบ โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1
3. จำลองการเกิดความผิดปกติของบนสายส่งไฟฟ้าทีละ 1 เส้น โดยปรับค่าตำแหน่งผิดพลาด (Fault location) ตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u.ของความยาวสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้น โดยแต่ละตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดจะปรับค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ตั้งแต่ $0-100\angle 90^\circ$ โอห์ม
4. วิเคราะห์ความถูกต้องในการทำงานของการป้องกันโซนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2)

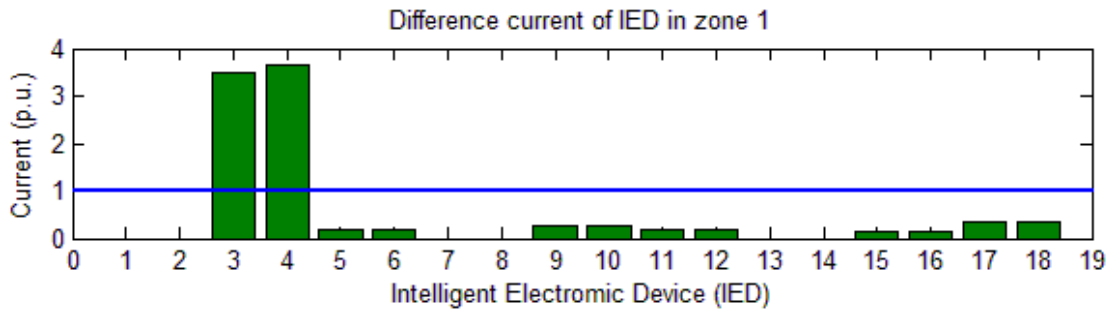
ผลการทดสอบที่ 2 การทดสอบที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะในการทำงานของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา โดยจะวิเคราะห์โซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อความแม่นยำในการตรวจจับความผิดปกติของในโซนการป้องกันต่างๆ ซึ่งจะนำเสนอ ดังนี้

1. ตารางที่ 5.8 แสดงว่า การป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซนต่างๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด ในการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน เช่น การป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 จะนำข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 มาวิเคราะห์การตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1

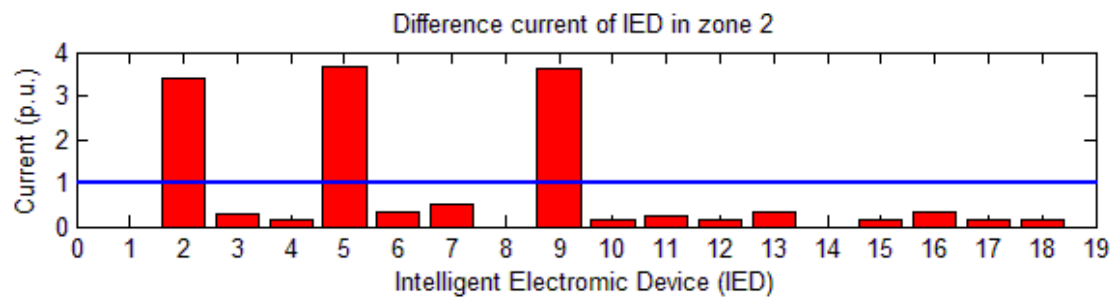
ตารางที่ 5.8 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของระบบทดสอบแบบโครงข่าย

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันในโซนต่างๆ		
	การป้องกันโซน 1	การป้องกันโซน 2	การป้องกันโซน 3
e1	e2	-	e4,e10
e2	e1	e4,e10	-
e3	e4	e1,e10	e6
e4	e3	e6	e1,e10
e5	e6	e3	e8,e17
e6	e5	e8,e17	e3
e7	e8	e5,e17	-
e8	e7	-	e5,e17
e9	e10	e1,e4	e12
e10	e9	e12	e1,e4
e11	e12	e14,e16	e9
e12	e11	e9	e14,e16
e13	e14	e11,e16	-
e14	e13	-	e11,e16
e15	e16	e11,e14	e18
e16	e15	e18	e11,e14
e17	e18	e15	e5,e8
e18	e17	e5,e8	e15

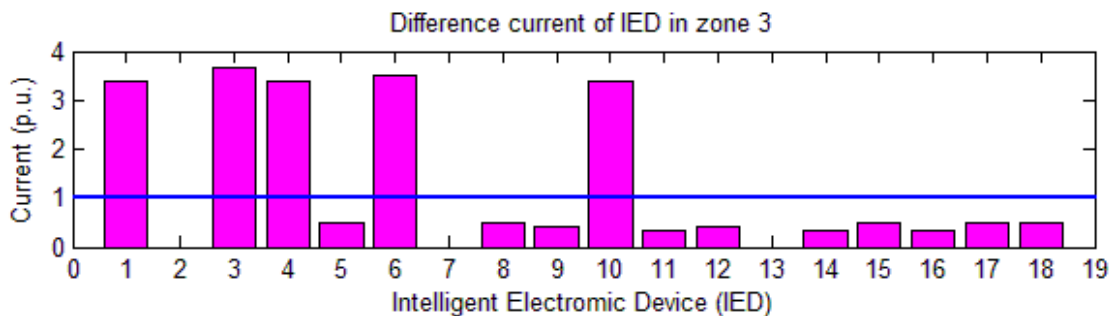
2. ตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติในโซนการป้องกันต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสามเฟสสมดุลขึ้นบนตำแหน่ง 0.5 p.u. ของสายส่งเส้นที่ 1 และอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีค่า $100\angle 75^\circ$ โอห์ม ดังแสดงในภาพที่ 5.19



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 5.19 ตัวอย่างผลการตรวจจับความผิดปกติของการทดสอบที่ 2

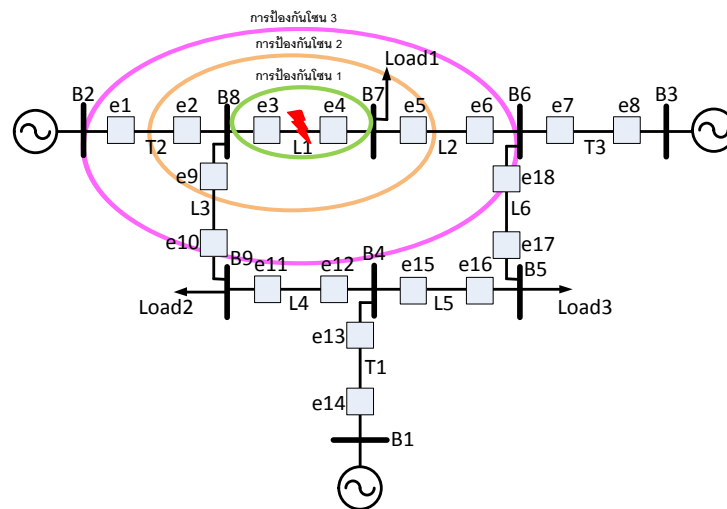
ภาพที่ 5.19 แสดงผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตรวจจับได้ในแต่ละโซนการป้องกัน เมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่ง 0.5 p.u. ของสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1 และอิมพีแดนซ์ลัดวงจร $100 \angle 75^\circ$ โอห์ม. เมื่อแกนตั้งแสดงขนาดผลต่างของกระแส (p.u.) และ แกนนอนแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว พบว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 เพราะผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 ตรวจจับได้มีค่ามากกว่า 1 p.u. ดังแสดงในภาพที่ 5.19 (ก), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2, e5 และ e9 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 ดังแสดงในภาพที่ 5.19(ข) และการป้องกันโซน 3 พบว่าผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3, e4, e5 และ e6 มีค่ามากกว่า 1 p.u. แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 ตรวจพบความผิดปกติขึ้นในโซน 1 ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1, e6 และ e10 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 3 ดังแสดงในภาพที่ 5.19 (ค)

3. ร้อยละความถูกต้องของการป้องกันแต่ละโซนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเมื่อทดสอบจำลองความผิดพลาดตั้งแต่ 0.1-0.9 p.u. ของสายส่งเส้นที่ 1-6 ซึ่งอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault Impedance) มีค่าเท่ากับ 0-100 โอห์ม และมุมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีค่า 0-90 องศา โดยปรับครั้งละ 15 องศา ดังแสดงในตารางที่ 5.9 โดยพบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดในการป้องกันโซน 1, 2 และ 3 ได้ถูกต้องทุกกรณี

ตารางที่ 5.9 ร้อยละความถูกต้องในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

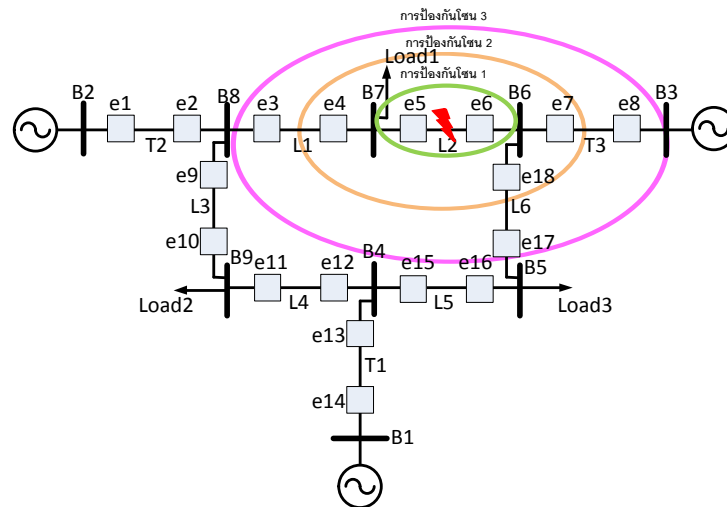
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด	ร้อยละการทำงานถูกต้อง		
	การทำงานโซน 1	การทำงานโซน 2	การทำงานโซน 3
e1	100%	100%	100%
e2	100%	100%	100%
e3	100%	100%	100%
e4	100%	100%	100%
e5	100%	100%	100%
e6	100%	100%	100%
e7	100%	100%	100%
e8	100%	100%	100%
e9	100%	100%	100%
e10	100%	100%	100%
e11	100%	100%	100%
e12	100%	100%	100%
e13	100%	100%	100%
e14	100%	100%	100%
e15	100%	100%	100%
e16	100%	100%	100%
e17	100%	100%	100%
e18	100%	100%	100%

4. เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ถูกต้องทุกกรณี ดังนั้นจะแสดงการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นต่างๆ โดยภาพที่ 5.20-ภาพที่ 5.25 จะแสดงว่า เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1-6 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใดจะพบความผิดปกติในเขตการป้องกันโซน 1, โซน 2 และ โซน 3



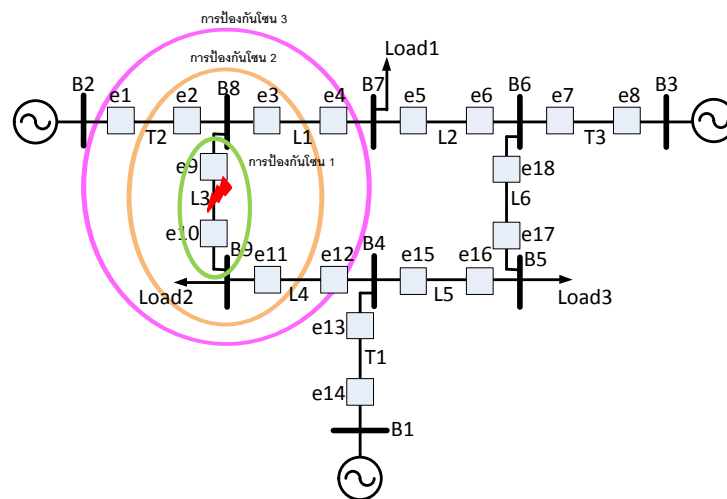
ภาพที่ 5.20 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1

ภาพที่ 5.20 แสดงการทำงานของโซนป้องกันต่างๆเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 คือ e3 และ e4, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 คือ e2, e5 และ e9, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 คือ e1, e6 และ e10



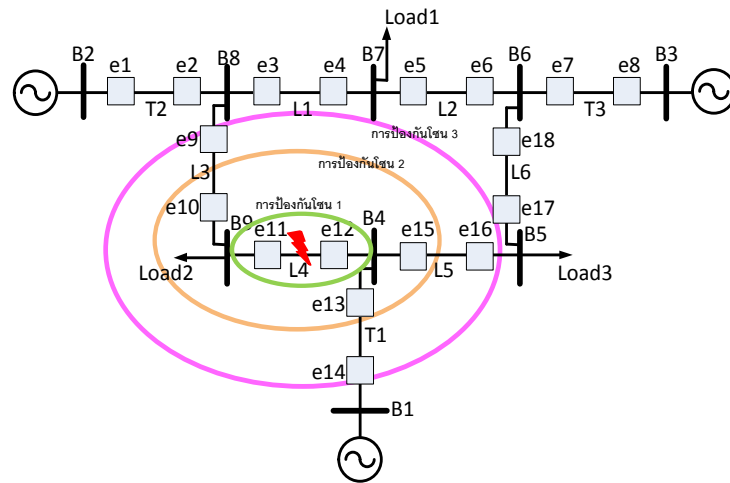
ภาพที่ 5.21 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2

ภาพที่ 5.21 แสดงการทำงานของโซนป้องกันต่างๆเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 คือ e5 และ e6, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 คือ e4, e7 และ e18, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 คือ e3, e8 และ e17



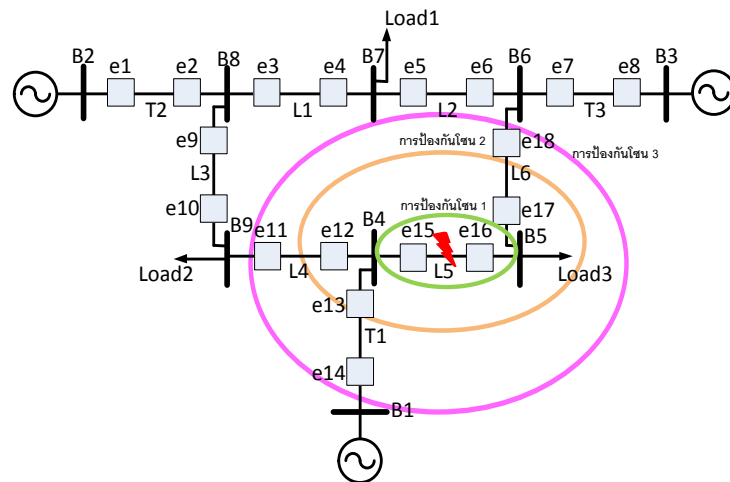
ภาพที่ 5.22 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3

ภาพที่ 5.22 แสดงการทำงานของโซนป้องกันต่างๆเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 คือ e9 และ e10, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 คือ e2, e3 และ e11, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 คือ e1, e4 และ e12



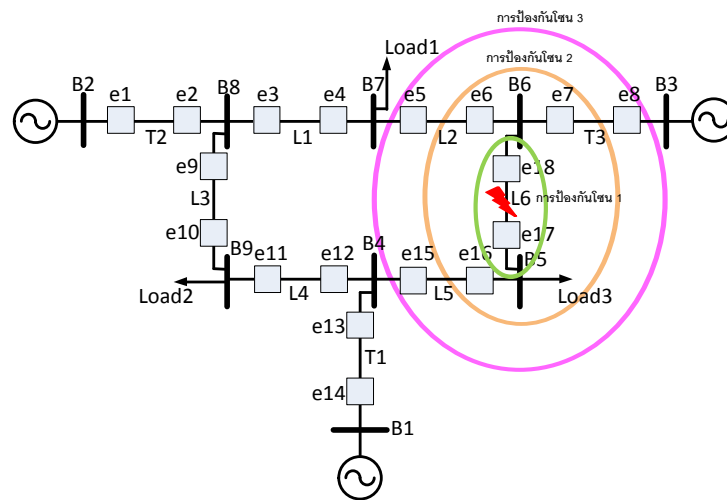
ภาพที่ 5.23 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4

ภาพที่ 5.23 แสดงการทำงานของโซนป้องกันต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งเส้นที่ 4 โดยมีรายละเอียดดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 คือ e11 และ e12, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 คือ e10, e13 และ e15, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 คือ e9, e14 และ e16



ภาพที่ 5.24 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 5

ภาพที่ 5.24 แสดงการทำงานของโซนป้องกันต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งเส้นที่ 5 โดยมีรายละเอียดดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 คือ e15 และ e16, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 คือ e12, e13 และ e17, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 คือ e11, e14 และ e18



ภาพที่ 5.25 การป้องกันโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 6

ภาพที่ 5.25 แสดงการทำงานของโซนป้องกันต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งเส้นที่ 6 โดยมีรายละเอียดดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 1 คือ e17 และ e18, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 2 คือ e6, e7 และ e16, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโซน 3 คือ e5, e8 และ e15

วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 2 การทดสอบที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะในการทำงานของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา โดยจะวิเคราะห์โซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ อิทธิพลของอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Fault impedance) ต่อการตรวจจับความผิดปกติของในโซนการป้องกันต่างๆเมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้นในระบบ WSCC 9 บัส จากผลการทดสอบที่ 2 สามารถวิเคราะห์ประเด็นหลักๆได้ดังนี้

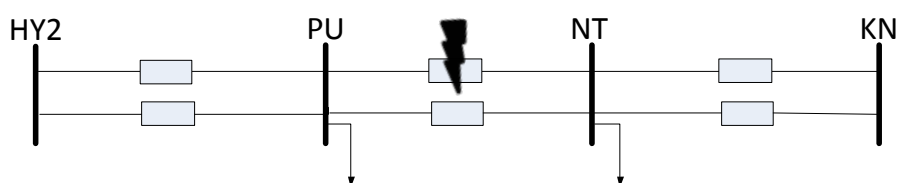
1. ผลการทดสอบจากภาพที่ 5.19 แสดงว่าการตรวจจับความผิดปกติของในโซนการป้องกันต่างๆเมื่อมีค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมากๆ และขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ถูกต้องตามทีออกแบบไว้
2. ผลการทดสอบจากตารางที่ 5.9 แสดงว่าขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดมีความยืดหยุ่น และสามารถประยุกต์ใช้กับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ทุกตำแหน่ง และ อิมพีแดนซ์ลัดวงจรค่าสูงๆ
3. ขั้นตอนวิธีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดประยุกต์หลักการการเปรียบเทียบผลต่างของกระแสเชิงเฟสเซอร์ เพื่อตรวจจับความผิดปกติภายในโซนการป้องกันต่างๆ ดังนั้นตำแหน่งผิดปกติ และ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร จึงไม่มีผลต่อการสมรรถนะในการตรวจจับความผิดปกติภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด โดยตำแหน่งผิดปกติและอิมพีแดนซ์ลัดวงจร ที่ทำให้กระแสผิดปกติมีขนาดต่ำกว่า 1p.u. เท่านั้น จึงจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดปกติของในโซนการป้องกันต่างๆ

5.3 การทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย

การทดสอบที่ 3 คือ การประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนามากับเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยจำนวน 3 เหตุการณ์

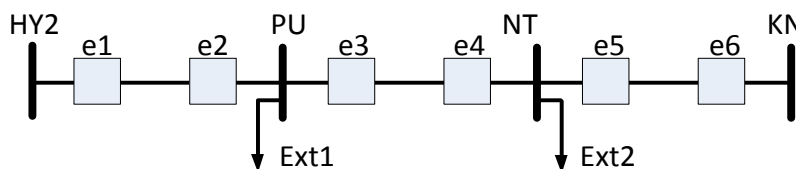
วัตถุประสงค์ การทดสอบที่ 3 มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีที่พัฒนาโดยการประยุกต์ใช้กับข้อมูลการเกิดความผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย

5.3.1 เหตุการณ์ที่ 1 เหตุการณ์ผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า PU-NT เส้นที่ 1



ภาพที่ 5.26 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเหตุการณ์ผิดปกติบนสายส่ง NT-PU

เหตุการณ์ผิดปกติเหตุการณ์ที่ 1 เป็นการเกิดความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) ที่เฟส C บนสายส่งไฟฟ้า NT-PU เส้นที่ 1 โดยมีวงจรสมมูลดังภาพที่ 5.26



ภาพที่ 5.27 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในเหตุการณ์ผิดปกติที่ 1

ตำแหน่งติดตั้ง อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ผิดปกติที่ 1 แสดงในภาพที่ 5.27 โดยโดยสัญลักษณ์ “e” แทน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

การทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่ 1 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนวิธีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดปกติอัตโนมัติ (Digital Fault Recorder : DFR) ที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้านครศรีธรรมราช (NT), สถานีไฟฟ้าพลัง (PU), สถานีไฟฟ้าขนอม (KN) และสถานีไฟฟ้าหาดใหญ่2 (HY2) แต่เนื่องจากมีข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดปกติอัตโนมัติเพียงแค่ 2 สถานีเท่านั้น (NT,PU) จึงมีสมมติฐานให้ละเลยกำลังสูญเสียใน

สายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้านครศรีธรรมราช (NT) กับ สถานีไฟฟ้าขนอม (KN) และละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าพัทลุง (PU) กับ สถานีไฟฟ้าหาดใหญ่2 (HY2)

สมมติฐาน การทดสอบกับเหตุการณ์ผิดพลาดที่ 1 มีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

1. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดอัตโนมัติที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้านครศรีธรรมราช (NT) และ พัทลุง (PU) เพื่อหาคำนวนหากระแสคำนวณหากระแสที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
2. ข้อมูลมีการประสานกันทางเวลา (Time Synchronization)
3. ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าหาดใหญ่2 (HY2) และ สถานีไฟฟ้าพัทลุง (PU) คือ $\vec{I}_{HY2 \text{ to } PU} = -1 \times \vec{I}_{PU \text{ to } HY2}$
4. ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าขนอม (KN) และ สถานีไฟฟ้านครศรีธรรมราช (NT) คือ $\vec{I}_{KN \text{ to } NT} = -1 \times \vec{I}_{NT \text{ to } KN}$
5. พิจารณากระแสผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady state)

ขั้นตอนในการทดสอบ การประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นกับเหตุการณ์ผิดพลาดที่ 1 มีขั้นตอนในการทำการทดสอบดังนี้

1. นำข้อมูลโครงสร้างการเชื่อมต่อของเหตุการณ์ที่ 1 จากภาพที่ 5.27 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับอุปกรณ์อื่นๆ (บัสบาร์, สายส่ง) โดยเมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\ \begin{matrix} HY2 \\ Line_{HY2 \text{ to } PU} \\ PU \\ Line_{PU \text{ to } NT} \\ NT \\ Line_{NT \text{ to } KN} \\ KN \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. คำนวณหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้ง 6 ตัว โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1
3. นำข้อมูลค่ากระแสจากเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติพร้อมอัตโนมัติขณะเกิดความผิดปกติมาคำนวณการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) โดยค่ากระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ กระแสไหลดมีรายละเอียดดังนี้
 - 1) $\vec{I}_{e1} = I_{HY2 \text{ to } PU\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า HY2 ไปยังสถานีไฟฟ้า PU เส้นที่ 1
 - 2) $\vec{I}_{e2} = I_{PU \text{ to } HY2\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PU ไปยังสถานีไฟฟ้า HY2 เส้นที่ 1
 - 3) $\vec{I}_{e3} = I_{PU \text{ to } NT\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PU ไปยังสถานีไฟฟ้า NT เส้นที่ 1
 - 4) $\vec{I}_{e4} = I_{NT \text{ to } PU\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e4 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NT ไปยังสถานีไฟฟ้า PU เส้นที่ 1
 - 5) $\vec{I}_{e5} = I_{NT \text{ to } KN\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e5 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NT ไปยังสถานีไฟฟ้า KN เส้นที่ 1
 - 6) $\vec{I}_{e6} = I_{KN \text{ to } NT\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e6 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า KN ไปยังสถานีไฟฟ้า NT เส้นที่ 1

- 7) $\vec{I}_{Ext1} = I_{PU\ to\ HY2\#2} + I_{PU\ to\ NT\#2} + I_{PU\ to\ KT2A} + I_{PU\ to\ KT4A}$ คือกระแสที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้า PU ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PU ไปยังสถานีไฟฟ้า HY2 เส้นที่ 2 ($I_{PU\ to\ HY2\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PU ไปยังสถานีไฟฟ้า NT เส้นที่ 2 ($I_{PU\ to\ NT\#2}$) และกระแสของสถานีไฟฟ้า PU ที่ไปยังหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดในระดับแรงดันอื่น ($I_{PU\ to\ KT2A} + I_{PU\ to\ KT4A}$)
- 8) $\vec{I}_{Ext2} = I_{NT\ to\ PU\#2} + I_{NT\ to\ KN\#2} + I_{NT\ to\ TS\#1} + I_{NT\ to\ TS\#2} + I_{NT\ to\ KT3A} + I_{NT\ to\ KT4A}$ คือคือกระแสที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้า NT ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NT ไปยังสถานีไฟฟ้า PU เส้นที่ 2 ($I_{NT\ to\ PU\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NT ไปยังสถานีไฟฟ้า KN เส้นที่ 2 ($I_{NT\ to\ KN\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NT ไปยังสถานีไฟฟ้า TS ($I_{NT\ to\ TS\#1} + I_{NT\ to\ TS\#2}$) และกระแสของสถานีไฟฟ้า NT ที่ไปยังหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดในระดับแรงดันอื่น ($I_{NT\ to\ KT3A} + I_{NT\ to\ KT4A}$)

ตารางที่ 5.10 ข้อมูลค่ากระแสต่างๆสำหรับการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ 1

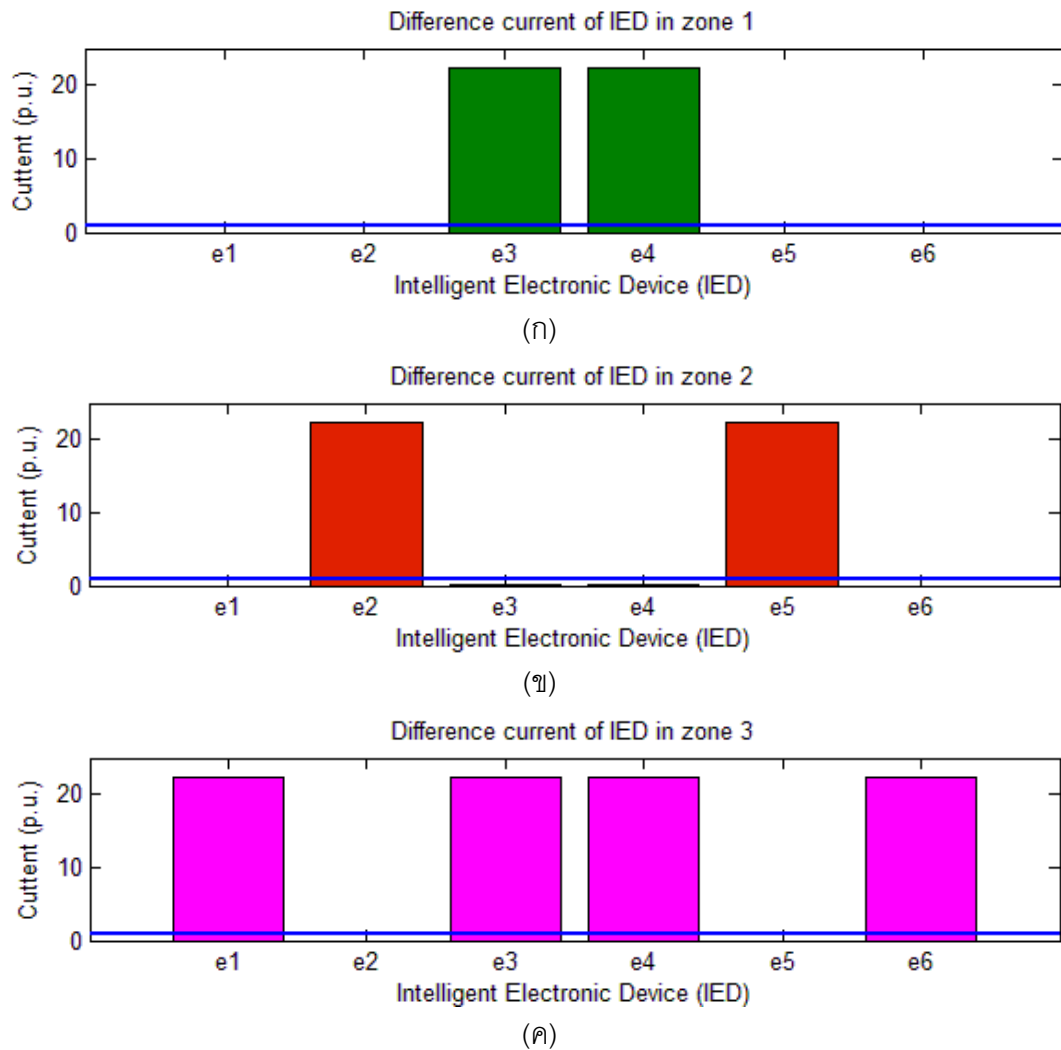
	สัญลักษณ์กระแส	ขนาดของกระแส (A)	มุมเฟสของกระแส (Degree)
1	\vec{I}_{e1}	638.2	-25.19
2	\vec{I}_{e2}	638.2	154.81
3	\vec{I}_{e3}	1472.0	36.89
4	\vec{I}_{e4}	4136.4	-44.78
5	\vec{I}_{e5}	787.6	153.67
6	\vec{I}_{e6}	787.6	-26.33
7	\vec{I}_{Ext1}	850.7	135.10
8	\vec{I}_{Ext2}	3394.9	131.06

ผลการทดสอบของเหตุการณ์ที่ 1 จะแบ่งเป็นการทำงานของการทำงานของป้องกันในโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบหนึ่งเฟสลงดิน เฟส C บนสายส่งไฟฟ้า NT-PU เส้นที่ 1

ตารางที่ 5.11 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของเหตุการณ์ที่ 1

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเกี่ยวกับการป้องกันในโซนต่างๆ		
	การป้องกันโซน 1	การป้องกันโซน 2	การป้องกันโซน 3
e1	e2	-	e4
e2	e1	e4	-
e3	e4	e1	e6
e4	e3	e6	e1
e5	e6	e3	e8
e6	e5	e8	e3
e7	e8	e5	-
e8	e7	-	e5

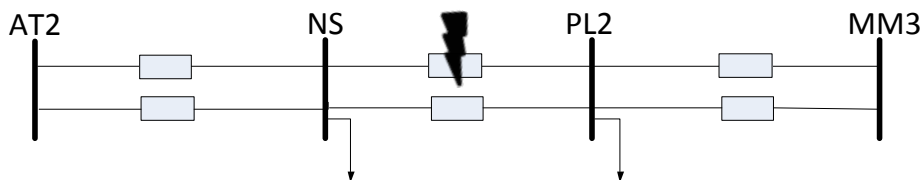
ตารางที่ 5.11 แสดงผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดของเหตุการณ์ที่ 1 โดยจะแสดงว่า ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซนต่างๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด ในการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน เช่น การป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 จะนำข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 มาวิเคราะห์การตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1



ภาพที่ 5.28 ผลการตรวจจับความผิดปกติของเหตุการณ์ที่ 1

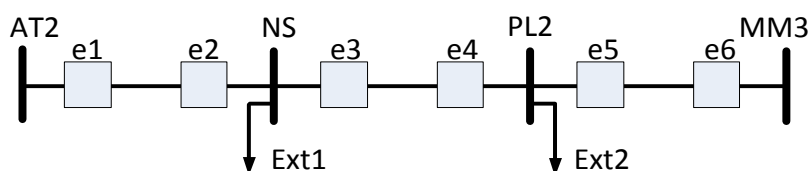
ภาพที่ 5.28 แสดงผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตรวจจับได้ในแต่ละโซนการป้องกัน เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า NT-PU เส้นที่ 1 เมื่อแกนตั้งแสดงขนาดผลต่างของกระแส (p.u.) และ แกนนอนแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว โดยหากผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดมีค่ามากกว่า 1 p.u. (เส้นที่บ) แสดงความเกิดความผิดปกติขึ้นในโซนการป้องกันนั้น ผลการทดสอบพบว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 ดังแสดงใน ภาพที่ 5.28(ก), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 และ e5 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 ดังแสดงในภาพที่ 5.28(ข) และการป้องกันโซน 3 พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และ e6 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 3 ดังแสดงในภาพที่ 5.28(ค) โดยผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในแต่ละโซนการป้องกันจะอ้างอิงข้อมูลจาก ตาราง ข.21 ในภาคผนวก ข

5.3.2 เหตุการณ์ที่ 2 เหตุการณ์ผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้า NS-PL2 เส้นที่ 1



ภาพที่ 5.29 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเหตุการณ์ผิดปกติพร้อมบนสายส่ง NS-PL2

เหตุการณ์ผิดปกติพร้อมเหตุการณ์ที่ 2 เป็นการเกิดความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Grond Fault) ที่เฟส C บนสายส่งไฟฟ้า NS-PL2 เส้นที่ 1 โดยมีวงจรสมมูลดังภาพที่ 5.29



ภาพที่ 5.30 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในเหตุการณ์ผิดปกติที่ 2

ตำแหน่งติดตั้ง อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ผิดปกติที่ 2 แสดงในภาพที่ 5.30 โดยโดยสัญลักษณ์ “e” แทน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

การทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่ 2 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนวิธีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติอัตโนมัติ (Digital Fault Recorder : DFR) ที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้าอ่างทอง2 (AT2), สถานีไฟฟ้านครสวรรค์ (NS), สถานีไฟฟ้าพิษณุโลก2 (PL2) และสถานีไฟฟ้าแม่เมาะ3 (MM3) แต่เนื่องจากมีข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติอัตโนมัติเพียงแค่ 2 สถานีเท่านั้น (NS, PL2) จึงมีสมมติฐานให้ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าอ่างทอง2 (AT2) กับ สถานีไฟฟ้านครสวรรค์ (NS) และละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก2 (PL2) กับ สถานีไฟฟ้าแม่เมาะ3 (MM3)

สมมติฐาน การทดสอบกับเหตุการณ์ผิดปกติที่ 2 มีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

1. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุผิดปกติอัตโนมัติที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้านครสวรรค์ (NS) และ พิษณุโลก2 (PL2) เพื่อหาคำนวนหากระแสค่านวนหากระแสที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
2. ข้อมูลมีการประสานกันทางเวลา (Time Synchronization)

3. ละเอียดกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าอ่างทอง2 (AT2) และสถานีไฟฟ้านครสวรรค์ (NS) คือ $\vec{I}_{AT2 \text{ to } NS} = -1 \times \vec{I}_{NS \text{ to } AT2}$
4. ละเอียดกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าพิษณุโลก2 (PL2) และสถานีไฟฟ้าแม่เมาะ3 (MM3) คือ $\vec{I}_{MM3 \text{ to } PL2} = -1 \times \vec{I}_{PL2 \text{ to } MM3}$
5. พิจารณากระแสติดพร้อมในสภาวะอยู่ตัว (Steady state)

ขั้นตอนในการทดสอบ การประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนามาจากเหตุการณ์ผิดปกติพร้อมที่ 2 มีขั้นตอนในการทำการทดสอบดังนี้

1. นำข้อมูลโครงสร้างการเชื่อมต่อของเหตุการณ์ที่ 2 จากภาพที่ 5.30 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับอุปกรณ์อื่นๆ (บัสบาร์, สายส่ง) โดยเมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\ \begin{matrix} AT2 \\ Line_{AT2 \text{ to } NS} \\ NS \\ Line_{NS \text{ to } PL2} \\ PL2 \\ Line_{PL2 \text{ to } MM3} \\ MM3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2. คำนวณหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้ง 6 ตัว โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1
3. นำข้อมูลค่ากระแสจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์พร้อมอัตโนมัติขณะเกิดความผิดปกติมาคำนวณการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) โดยค่ากระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ กระแสไหลดมีรายละเอียดดังนี้

- 1) $\vec{I}_{e1} = I_{AT2 \text{ to } NS\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e1 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า AT2 ไปยังสถานีไฟฟ้า NS เส้นที่ 1
- 2) $\vec{I}_{e2} = I_{NS \text{ to } AT2\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e2 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า AT2 เส้นที่ 1
- 3) $\vec{I}_{e3} = I_{NS \text{ to } PL2\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e3 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า PL2 เส้นที่ 1
- 4) $\vec{I}_{e4} = I_{PL2 \text{ to } NS\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e4 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PL2 ไปยังสถานีไฟฟ้า NS เส้นที่ 1
- 5) $\vec{I}_{e5} = I_{PL2 \text{ to } MM3\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e5 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PL2 ไปยังสถานีไฟฟ้า MM3 เส้นที่ 1
- 6) $\vec{I}_{e6} = I_{MM3 \text{ to } PL2\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e6 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า MM3 ไปยังสถานีไฟฟ้า PL2 เส้นที่ 1
- 7) $\vec{I}_{Ext1} = I_{NS \text{ to } PL2\#2} + I_{NS \text{ to } AT2\#2} + I_{NS \text{ to } BB\#1} + I_{NS \text{ to } BB\#2} + I_{NS \text{ to } TTK\#1} + I_{NS \text{ to } TTK\#2} + I_{NS \text{ to } TA2\#1} + I_{NS \text{ to } KT1A} + I_{NS \text{ to } KT4A}$ คือกระแสที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้า NS ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า PL2 เส้นที่ 2 ($I_{NS \text{ to } PL2\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า AT2 เส้นที่ 2 ($I_{NS \text{ to } AT2\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า BB ($I_{NS \text{ to } BB\#1} + I_{NS \text{ to } BB\#2}$),

กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า TTK ($I_{NS\ to\ TTK\#1} + I_{NS\ to\ TTK\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า NS ไปยังสถานีไฟฟ้า TA2 ($I_{NS\ to\ TA2\#1}$) และกระแสของสถานีไฟฟ้า NS ที่ไปยังหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดในระดับแรงดันอื่น ($I_{NS\ to\ KT1A} + I_{NS\ to\ KT4A}$)

$$8) \vec{I}_{Ext2} = I_{PL2\ to\ NS\#2} + I_{PL2\ to\ MM3\#2} + I_{PL2\ to\ LS\#1} + I_{PL2\ to\ LS\#2} + I_{PL2\ to\ SK\#1} + I_{PL2\ to\ SK\#2} + I_{PL2\ to\ KT1A} + I_{PL2\ to\ KT4A}$$

คือกระแสที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้า PL2 ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PL2 ไปยังสถานีไฟฟ้า NS เส้นที่ 2 ($I_{PL2\ to\ NS\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PL2 ไปยังสถานีไฟฟ้า MM3 เส้นที่ 2 ($I_{PL2\ to\ MM3\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PL2 ไปยังสถานีไฟฟ้า LS ($I_{PL2\ to\ LS\#1} + I_{PL2\ to\ LS\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PL2 ไปยังสถานีไฟฟ้า SK ($I_{PL2\ to\ SK\#1} + I_{PL2\ to\ SK\#2}$) และกระแสของสถานีไฟฟ้า PL2 ที่ไปยังหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดในระดับแรงดันอื่น ($I_{PL2\ to\ KT1A} + I_{PL2\ to\ KT4A}$)

ตารางที่ 5.12 ข้อมูลค่ากระแสต่างๆสำหรับการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ 2

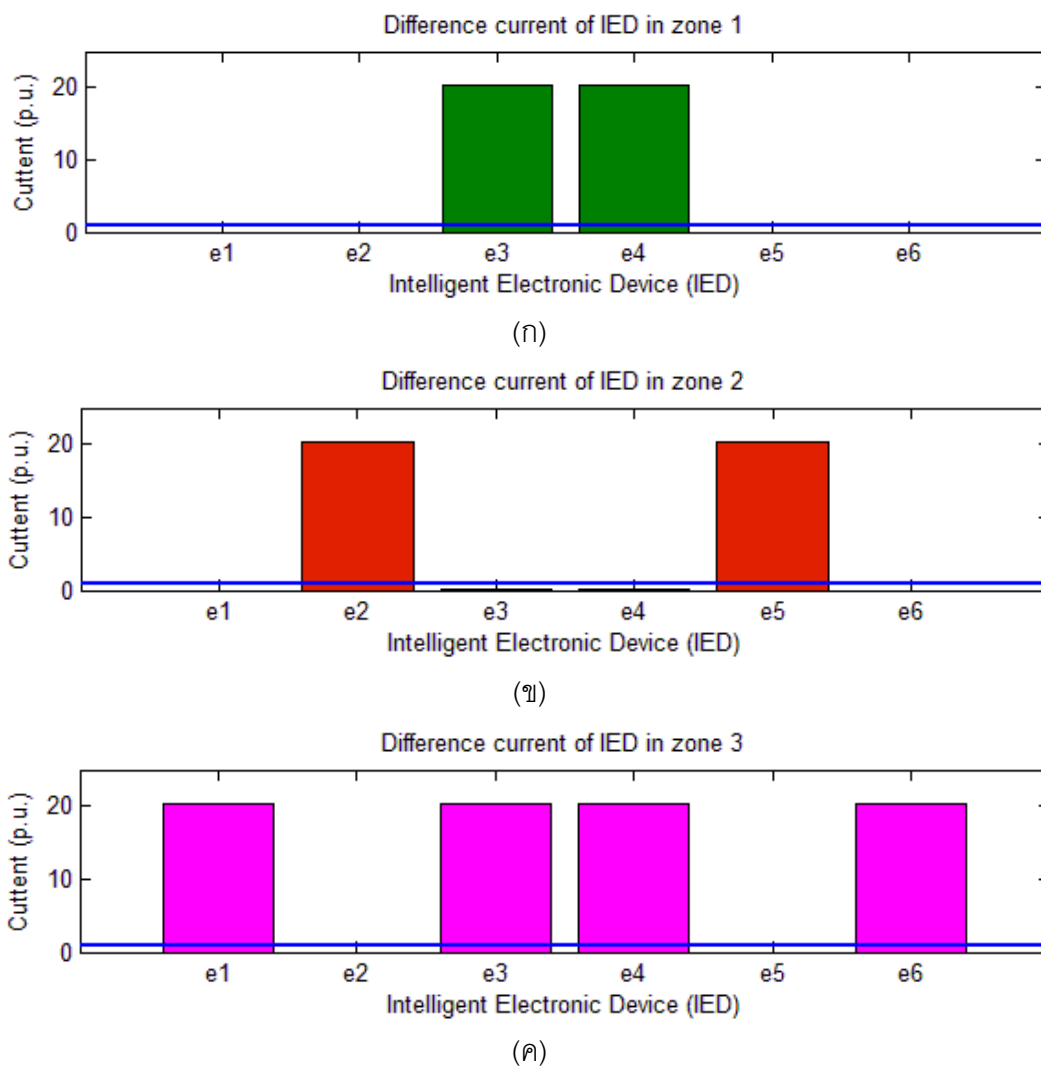
	สัญลักษณ์กระแส	ขนาดของกระแส (A)	มุมเฟสของกระแส (Degree)
1	\vec{I}_{e1}	220.8	-141.11
2	\vec{I}_{e2}	220.8	38.89
3	\vec{I}_{e3}	1846.4	-111.73
4	\vec{I}_{e4}	3264.5	-118.57
5	\vec{I}_{e5}	553.4	86.69
6	\vec{I}_{e6}	553.4	93.31
7	\vec{I}_{Ext1}	1658.8	72.05
8	\vec{I}_{Ext2}	2754.8	56.88

ผลการทดสอบของเหตุการณ์ที่ 2 จะแบ่งเป็นการทำงานของการทำงานของป้องกันในโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบหนึ่งเฟสลงดิน เฟส C บนสายส่งไฟฟ้า NS-PL2 เส้นที่ 1

ตารางที่ 5.13 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของเหตุการณ์ที่ 2

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเกี่ยวกับการป้องกันในโซนต่างๆ		
	การป้องกันโซน 1	การป้องกันโซน 2	การป้องกันโซน 3
e1	e2	-	e4
e2	e1	e4	-
e3	e4	e1	e6
e4	e3	e6	e1
e5	e6	e3	e8
e6	e5	e8	e3
e7	e8	e5	-
e8	e7	-	e5

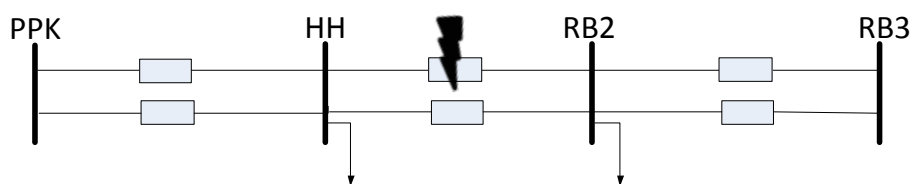
ตารางที่ 5.13 แสดงผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดของเหตุการณ์ที่ 2 โดยจะแสดงว่า ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซนต่างๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด ในการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน ซึ่งจะเป็นเช่นเดียวกันกับผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดของเหตุการณ์ที่ 1



ภาพที่ 5.31 ผลการตรวจจับความผิดปกติของเหตุการณ์ที่ 2

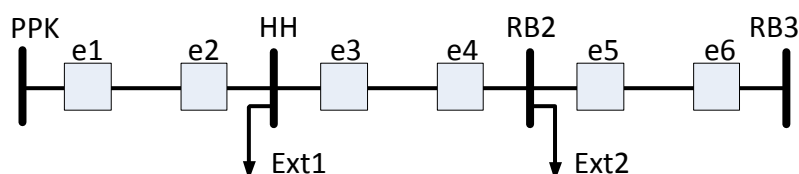
ภาพที่ 5.31 แสดงผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตรวจจับได้ในแต่ละโซนการป้องกัน เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า NS-PL2 เส้นที่ 1 เมื่อแกนตั้งแสดงขนาดผลต่างของกระแส (p.u.) และ แกนนอนแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว โดยหากผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดมีค่ามากกว่า 1 p.u. (เส้นทึบ) แสดงความเกิดความผิดปกติขึ้นในโซนการป้องกันนั้น ผลการทดสอบพบว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 ดังแสดงในภาพที่ 5.31(ก), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 และ e5 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 ดังแสดงในภาพที่ 5.31(ข) และการป้องกันโซน 3 พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และ e6 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 3 ดังแสดงในภาพที่ 5.31(ค) โดยผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในแต่ละโซนการป้องกันจะอ้างอิงข้อมูลจาก ตาราง ข.22 ในภาคผนวก ข

5.3.3 เหตุการณ์ที่ 3 เหตุการณ์ผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้า HH-RB2 เส้นที่ 1



ภาพที่ 5.32 วงจรสมมูลอย่างง่ายของเหตุการณ์ผิดปกติพร้อมบนสายส่ง HH-RB2

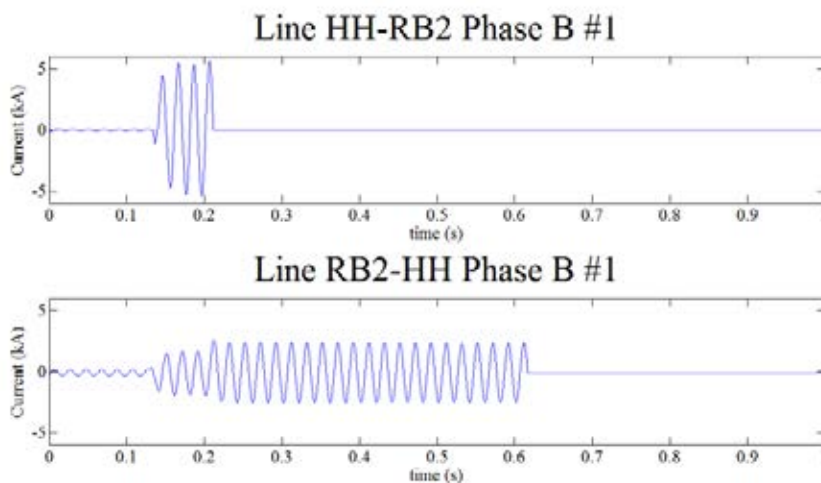
เหตุการณ์ผิดปกติพร้อมเหตุการณ์ที่ 3 เป็นการเกิดความผิดปกติแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Grond Fault) ที่เฟส B บนสายส่งไฟฟ้า HH-RB2 เส้นที่ 1 โดยมีวงจรสมมูลดังภาพที่ 5.32



ภาพที่ 5.33 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆในเหตุการณ์ผิดปกติที่ 3

ตำแหน่งติดตั้ง อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ผิดปกติที่ 2 แสดงในภาพที่ 5.33 โดยโดยสัญลักษณ์ “e” แทน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

รายงานความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าแห่งประเทศไทย เมื่อวันที่ 20 พฤศจิกายน 2555 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ พบเหตุผิดปกติบนตำแหน่งต้นทางของสายส่งที่เชื่อมระหว่างสถานีไฟฟ้าหัวหิน (HH) และสถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 (RB2) โดยรีเลย์ระยะทางที่สถานีไฟฟ้าหัวหินตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 และใช้เวลาในการกำจัดความผิดปกติ 67 มิลลิวินาที แต่เนื่องจากความผิดปกติเกิดขึ้นที่ต้นทางของสายส่งฝั่งสถานีไฟฟ้าหัวหิน ทำให้รีเลย์ระยะทางที่สถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 ตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 และใช้เวลาในการกำจัดความผิดปกติ 475 มิลลิวินาที โดยรูปคลื่นของกระแสที่บันทึกได้จากเครื่องบันทึกเหตุขัดข้องอัตโนมัติ (Digital Fault Recorder, DFR) จากสถานีไฟฟ้าทั้ง 2 สถานีดังภาพที่ 5.34



ภาพที่ 5.34 รูปคลื่นกระแสของเหตุการณ์ผิดพลาดที่ 3

การทดสอบขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่ 3 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนวิธีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือ ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดอัตโนมัติ (Digital Fault Recorder : DFR) ที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้าประจวบคีรีขันธ์ (PKK), สถานีไฟฟ้าหัวหิน (HH), สถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 (RB2) และสถานีไฟฟ้าราชบุรี 3 (RB3) แต่เนื่องจากมีข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดอัตโนมัติเพียงแค่ 2 สถานีเท่านั้น (HH, RB2) จึงมีสมมติฐานให้ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าประจวบคีรีขันธ์ (PKK) กับ สถานีไฟฟ้าหัวหิน (HH) และ ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 (RB2) กับ สถานีไฟฟ้าราชบุรี 3 (RB3)

สมมติฐาน การทดสอบกับเหตุการณ์ผิดพลาดที่ 3 มีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

1. ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดอัตโนมัติที่ติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้าหัวหิน (HH) และ ราชบุรี 2 (RB2) เพื่อหาคำนวณหากระแสคำนวณหากระแสที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
2. ข้อมูลมีการประสานกันทางเวลา (Time Synchronization)
3. ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าประจวบคีรีขันธ์ (PKK) และ สถานีไฟฟ้าหัวหิน (HH) คือ $\vec{I}_{PKK \text{ to } HH} = -1 \times \vec{I}_{HH \text{ to } PKK}$
4. ละเลยกำลังสูญเสียในสายส่งไฟฟ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าราชบุรี 2 (RB2) และ สถานีไฟฟ้าราชบุรี 3 (RB3) คือ $\vec{I}_{RB3 \text{ to } RB2} = -1 \times \vec{I}_{RB2 \text{ to } RB3}$
5. พิจารณากระแสผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state)

ขั้นตอนในการทดสอบ การประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนากับเหตุการณ์ผิดพลาดที่ 2 มีขั้นตอนในการทำการทดสอบดังนี้

- นำข้อมูลโครงสร้างการเชื่อมต่อของเหตุการณ์ที่ 3 จากภาพที่ 5.33 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดกับอุปกรณ์อื่นๆ (บัสบาร์, สายส่ง) โดยเมทริกซ์อุบัติการณ์ (Incidence Matrix, A) ได้ดังนี้

$$A = \begin{matrix} & & e1 & e2 & e3 & e4 & e5 & e6 \\ \begin{matrix} PPK \\ Line_{PPK \text{ to } HH} \\ HH \\ Line_{HH \text{ to } RB2} \\ RB2 \\ Line_{RB2 \text{ to } RB3} \\ RB3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- คำนวณหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันสายส่งในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดทั้ง 6 ตัว โดยใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1
- นำข้อมูลค่ากระแสจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์อัตโนมัติขณะเกิดความผิดพลาดมาคำนวณการทำงานภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด (ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) โดยค่ากระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และ กระแสไหลดมีรายละเอียดดังนี้

1) $\vec{I}_{e1} = I_{PPK \text{ to } HH\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า PPK ไปยังสถานีไฟฟ้า HH เส้นที่ 1

2) $\vec{I}_{e2} = I_{HH \text{ to } PPK\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า HH ไปยังสถานีไฟฟ้า PPK เส้นที่ 1

- 3) $\vec{I}_{e3} = I_{HH \text{ to } RB2\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e3 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า HH ไปยังสถานีไฟฟ้า PRB2 เส้นที่ 1
- 4) $\vec{I}_{e4} = I_{RB2 \text{ to } HH\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e4 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB2 ไปยังสถานีไฟฟ้า HH เส้นที่ 1
- 5) $\vec{I}_{e5} = I_{RB2 \text{ to } RB3\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e5 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB2 ไปยังสถานีไฟฟ้า RB3 เส้นที่ 1
- 6) $\vec{I}_{e6} = I_{RB3 \text{ to } RB2\#1}$ คือ กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวนฉลาด e6 เป็น กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB3 ไปยังสถานีไฟฟ้า RB2 เส้นที่ 1
- 7) $\vec{I}_{Ext1} = I_{HH \text{ to } PKK\#2} + I_{HH \text{ to } RB2\#2} + I_{HH \text{ to } KT1A} + I_{HH \text{ to } KT3A}$ คือกระแสที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้า HH ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า HH ไปยังสถานีไฟฟ้า PKK เส้นที่ 2 ($I_{HH \text{ to } PKK\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า HH ไปยังสถานีไฟฟ้า RB2 เส้นที่ 2 ($I_{HH \text{ to } RB2\#2}$) และกระแสของสถานีไฟฟ้า HH ที่ไปยังหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดในระดับแรงดันอื่น ($I_{HH \text{ to } KT1A} + I_{HH \text{ to } KT3A}$)
- 8) $\vec{I}_{Ext2} = I_{RB2 \text{ to } HH\#2} + I_{RB2 \text{ to } RB3\#2} + I_{RB2 \text{ to } TECO\#1} + I_{RB2 \text{ to } TECO\#2} + I_{RB2 \text{ to } BP2\#1} + I_{RB2 \text{ to } BP2\#2} + I_{RB2 \text{ to } KT1A} + I_{RB2 \text{ to } KT4A} + I_{RB2 \text{ to } KT5A}$ คือกระแสที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้า RB2 ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB2 ไปยังสถานีไฟฟ้า HH เส้นที่ 2 ($I_{RB2 \text{ to } HH\#2}$), กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB2 ไปยังสถานีไฟฟ้า RB3 เส้นที่ 2 ($I_{RB2 \text{ to } RB3\#2}$), กระแสของ

สายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB2 ไปยังสถานีไฟฟ้า BP2 $(I_{RB2 \text{ to } BP2\#1} + I_{RB2 \text{ to } BP2\#2})$, กระแสของสายส่งไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้า RB2 ไปยังโรงไฟฟ้าTECO $(I_{RB2 \text{ to } TECO\#1} + I_{RB2 \text{ to } TECO\#2})$ และ กระแสของสถานีไฟฟ้า BP2 ที่ไปยังหม้อแปลงเพื่อจ่ายโหลดในระดับแรงดันอื่นๆ $(I_{RB2 \text{ to } KT1A} + I_{RB2 \text{ to } KT4A} + I_{RB2 \text{ to } KT5A})$

ตารางที่ 5.14 ข้อมูลค่ากระแสต่างๆสำหรับการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่ 3

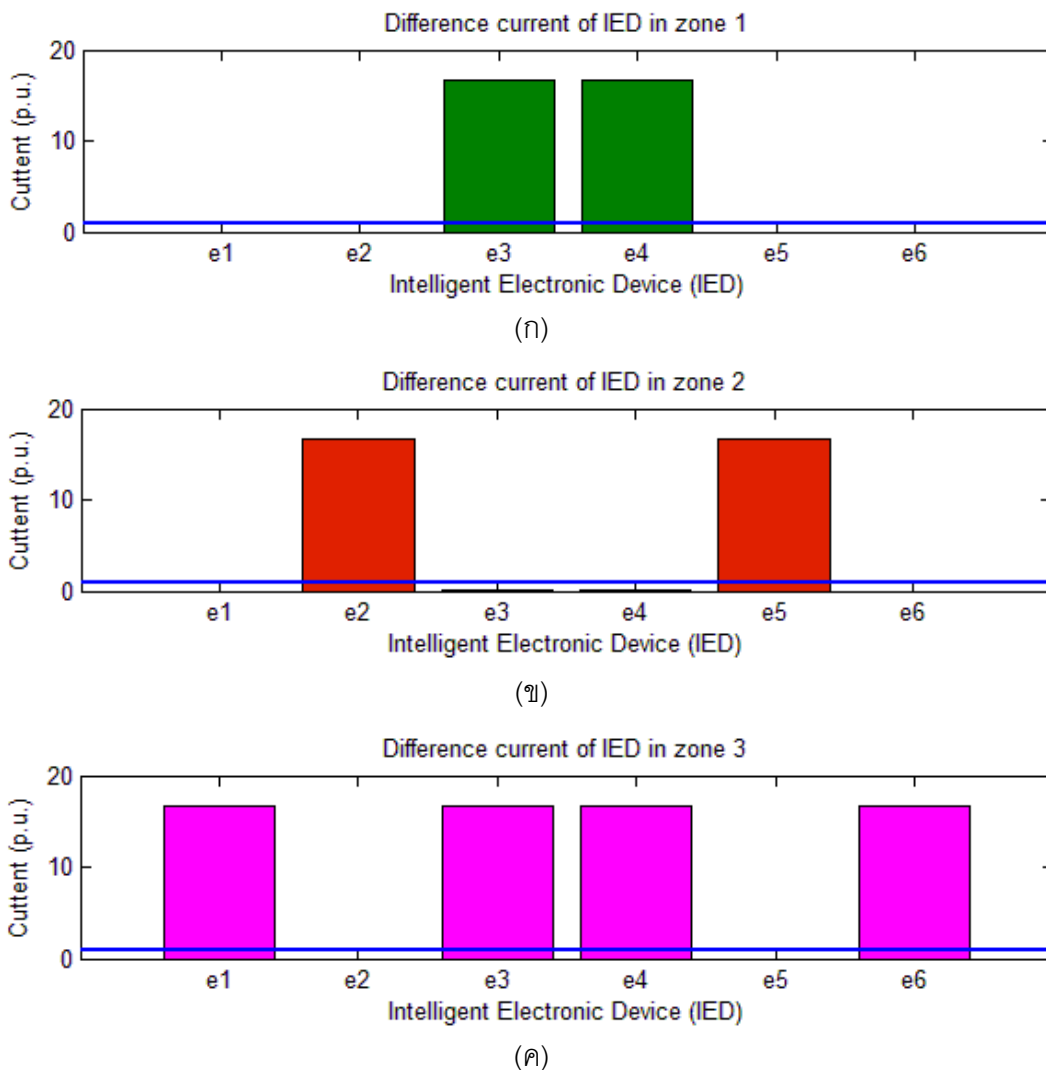
	สัญลักษณ์กระแส	ขนาดของกระแส (A)	มุมเฟสของกระแส (Degree)
1	\vec{I}_{e1}	699.07	-161.70
2	\vec{I}_{e2}	699.07	18.30
3	\vec{I}_{e3}	3362.73	-161.37
4	\vec{I}_{e4}	1205.65	143.76
5	\vec{I}_{e5}	1513.20	-95.17
6	\vec{I}_{e6}	1513.20	84.83
7	\vec{I}_{Ext1}	2690.31	18.72
8	\vec{I}_{Ext2}	1377.65	35.62

ผลการทดสอบของเหตุการณ์ที่ 3 จะแบ่งเป็นการทำงานของการทำงานของการป้องกันในโซนต่างๆ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบหนึ่งเฟสลงดิน เฟส B บนสายส่งไฟฟ้า HH-RB2 เส้นที่ 1

ตารางที่ 5.15 ผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของเหตุการณ์ที่ 3

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเกี่ยวกับการป้องกันในโซนต่างๆ		
	การป้องกันโซน 1	การป้องกันโซน 2	การป้องกันโซน 3
e1	e2	-	e4
e2	e1	e4	-
e3	e4	e1	e6
e4	e3	e6	e1
e5	e6	e3	e8
e6	e5	e8	e3
e7	e8	e5	-
e8	e7	-	e5

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดของเหตุการณ์ที่ 3 โดยจะแสดงว่า ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซนต่างๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตัวใด ในการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกัน เช่น การป้องกันโซน 1 ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 จะนำข้อมูลจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 มาวิเคราะห์การตรวจจับความผิดปกติในการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโซน 1



ภาพที่ 5.35 ผลการตรวจจับความผิดปกติของเหตุการณ์ที่ 3

ภาพที่ 5.35 แสดงผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดตรวจจับได้ในแต่ละโซนการป้องกัน เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้า NT-PU เส้นที่ 1 เมื่อแกนตั้งแสดงขนาดผลต่างของกระแส (p.u.) และ แกนนอนแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว โดยหากผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดมีค่ามากกว่า 1 p.u. (เส้นทึบ) แสดงความเกิดความผิดปกติขึ้นในโซนการป้องกันนั้น ผลการทดสอบพบว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 ดังแสดงใน ภาพที่ 5.35(ก), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 และ e5 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 ดังแสดงในภาพที่ 5.35(ข) และการป้องกันโซน 3 พบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และ e6 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 3 ดังแสดงในภาพที่ 5.35(ค) โดยผลต่างของกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในแต่ละโซนการป้องกันจะอ้างอิงข้อมูลจาก ตาราง ข.23 ในภาคผนวก ข

วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ 3 ทดสอบที่ 3 มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ขั้นตอนวิธีที่พัฒนาโดยการประยุกต์ใช้กับข้อมูลการเกิดความผิดปกติในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย ผลการทดสอบกับเหตุการณ์ผิดปกติทั้ง 2 เหตุการณ์ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. กรณีรายงานความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าแห่งประเทศไทยที่แสดงผลว่ารีเลย์ระยะทางสามารถทำงานในโซน 1 คือเหตุการณ์ผิดปกติเหตุการณ์ที่ 1 และ เหตุการณ์ผิดปกติเหตุการณ์ที่ 2 พบว่าการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเป็นดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 และทำการส่งคำสั่งตัดวงจรไปยังตัวตัดวงจร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 และ e5 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และ e6 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 3 ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถทำงานในการป้องกันโซน 1 เช่นเดียวกับการทำงานของรีเลย์ระยะทาง
2. กรณีรายงานความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าแห่งประเทศไทยที่แสดงผลว่ารีเลย์ระยะทางสามารถทำงานในโซน 2 คือเหตุการณ์ผิดปกติเหตุการณ์ที่ 3 เนื่องจากเกิดความผิดปกติที่ปลายสายส่งทำให้รีเลย์ระยะทางมองเป็นการทำงานโซน 2 แต่การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดเป็นดังนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e3 และ e4 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 1 และทำการส่งคำสั่งตัดวงจรไปยังตัวตัดวงจร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e2 และ e5 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 2 และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด e1 และ e6 จะตรวจพบความผิดปกติในโซน 3 แสดงว่ากรณีที่เกิดความผิดปกติดังเหตุการณ์ที่ 3 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถทำงานในการป้องกันโซน 1 แต่การทำงานของรีเลย์ระยะทางคือ การป้องกันโซน 2 ดังนั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดจึงสามารถกำจัดความผิดปกติได้ถูกต้อง และ รวดเร็วกว่ารีเลย์ระยะทาง
3. ผลการทดสอบกับเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทย จำนวน 3 เหตุการณ์ พบว่าขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถประยุกต์เพื่อตรวจจับความผิดปกติและทำการตัดวงจรได้อย่างถูกต้อง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปรับปรุงการป้องกันสายส่งไฟฟ้าโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือการแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด และการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้าของการป้องกันแบบพื้นที่กว้าง

การแบ่งเขตป้องกันสายส่งไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด เป็นการแบ่งเขตของการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดแต่ละตัว เพื่อใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า โดยจะประยุกต์ทฤษฎีกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบไฟฟ้า และทฤษฎีเพทรีเน็ต จะถูกประยุกต์เพื่อการแบ่งเขตการป้องกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

การตรวจจับความผิดปกติภายในเขตการป้องกันต่างๆของสายส่งไฟฟ้าของการป้องกันแบบพื้นที่กว้างเป็นการการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในเขตการป้องกันสามารถแบ่งได้เป็น การป้องกันปฐมภูมิ (โซน1), การป้องกันสำรองท้องถิ่น (โซน2) และการป้องกันสำรองระยะไกล (โซน3) ซึ่งประยุกต์การเปรียบเทียบผลต่างของกระแสจากงานวิจัยในอดีต โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบผลต่างของค่ากระแสเชิงเฟสเซอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดและคำนึงถึงกระแสไหลคืนในระบบไฟฟ้าด้วย

ผลการทดสอบที่ 1 แสดงว่าการแบ่งเขตการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบใหม่มีความแตกต่างกับเขตการป้องกันเดิมของรีเลย์ระยะทาง โดยการป้องกันโซน1ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถครอบคลุมตลอดทั้งความยาวของสายส่งที่ป้องกัน และการทำงานของอุปกรณ์ในการป้องกันสำรองโซน 2, โซน3 ของอิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถช่วยลดบริเวณที่ถูกต้องออกจากระบบเนื่องจากการป้องกันสำรองได้เมื่อเทียบกับการป้องกันสำรองโซน 2, โซน3 ของรีเลย์ระยะทาง และเมื่อปรับค่าตำแหน่งเกิดความผิดปกติและอิมพีแดนซ์ลัดวงจรพบว่าสมรรถนะในการตรวจจับความผิดปกติภายในเขตป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่การตรวจจับความผิดปกติของรีเลย์ระยะทางมีค่าความผิดพลาดมากขึ้นในกรณีที่มีความผิดปกติที่เกิดที่ปลายโซนการป้องกันและมีอิมพีแดนซ์ลัดวงจรขนาดใหญ่

ผลการทดสอบที่ 2 แสดงการประยุกต์ขั้นตอนวิธีกับระบบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น ผลการทดสอบยืนยันสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นว่า เมื่อการปรับค่าตำแหน่งผิดพลาดและอิมพีแดนซ์ลัดวงจรให้มีความมากยิ่งขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดยังสามารถทำงานได้ถูกต้อง แสดงว่าอิทธิพลของตำแหน่งเกิดความผิดพลาดและอิมพีแดนซ์ลัดวงจรมีผลน้อยมากกับขั้นตอนวิธีในการตรวจจับความผิดพลาดภายในเขตการป้องกันต่างๆ หลักการในการตรวจจับความผิดพลาดในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด คือการประยุกต์การเปรียบเทียบผลต่างของกระแสเชิงเฟสเซอร์ ดังนั้นตำแหน่งผิดพลาด และ อิมพีแดนซ์ลัดวงจร จึงไม่มีผลต่อสมรรถนะในการตรวจจับความผิดพลาดภายในโซนการป้องกันต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด โดยตำแหน่งผิดพลาดและอิมพีแดนซ์ลัดวงจร ที่ทำให้กระแสผิดพลาดมีขนาดต่ำกว่า 1 p.u. เท่านั้น จึงจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดพลาดในโซนการป้องกันต่างๆ

ผลการทดสอบที่ 3 แสดงการประยุกต์ขั้นตอนวิธีที่พัฒนากับเหตุการณ์ผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยจำนวน 3 เหตุการณ์ โดยขั้นตอนวิธีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดและทำการตัดวงจรได้ถูกต้อง และผลการทดสอบของเหตุการณ์ผิดพลาดที่ 3 แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดจึงสามารถกำจัดความผิดพลาดได้ถูกต้อง และ รวดเร็วกว่ารีเลย์ระยะทาง เพราะเมื่อเกิดความผิดพลาดบริเวณปลายสายส่งไฟฟ้ารีเลย์ระยะทางจะมองเป็นการป้องกันโซน 2 แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดยังคงสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้ในการป้องกันโซน 1

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นให้ครอบคลุมการเกิดความผิดพลาดแบบเฟสถึงเฟส และความผิดพลาดแบบเฟสถึงเฟสลงดิน
2. ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นโดยปรับค่าตำแหน่งผิดพลาดและอิมพีแดนซ์ลัดวงจรให้มีความมากยิ่งขึ้น
3. ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการเหตุการณ์ผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าของประเทศไทยเพิ่มเติม
4. ปรับปรุงขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่น ทดสอบปรับหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำงานโซนต่างๆ

รายการอ้างอิง

- [1] Seong-II, L., Han-Chuan, Y., Seong-Jeong, R., Seung-Jae, L., and Myeon-Song, C. Adaptive blinder for distance relay based on sensitivity factors. Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology (POWERCON), pp. 1-5. 22-26 October 2006.
- [2] Kundur, P. Power System Stability and Control. United States of America: McGraw-Hill, 1994.
- [3] Zaremski, B. Z., Delaree, J., Centeno, V. and Connors, R. The Advancement of Adaptive Relaying in Power Systems Protection [Online]. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA, 2012. Available from:http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05022012-120008/unrestricted/Zaremski_BZ_T_2012.pdf
- [4] Dhir, R. Adaptive Relaying: A New direction in Power System Protection [Online]. Delhi, India, 2012. Available from: http://www.ieeebeacon.com/Archives/March2012/Download/PDF/87_91_AdaptiveRelaying_Beacon%202012.pdf
- [5] Bruno, S., De Benedictics, M., La Scala, M., Lamonaca, S., Rotondo, G. and Stecchi, U. Adaptive relaying to balance protection dependability with power system security. Proceedings of 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, pp. 482-487, 11-15 July 2010.
- [6] Upendar, J., Gupta, C. P. and Singh, G. K. Comprehensive Adaptive Distance Relaying Scheme for Parallel Transmission Lines. IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 26 (April 2011): 1039-1052.
- [7] Wang, Y. G., Yin, X. G., You, D. H., Xu, T. Q. and Xiang, H. B. Development of wide area current differential protection IED based on IEC 61850. Proceedings of 2008. T&D. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-9, 21-24 April 2008.

- [8] Yi, L. V. et. Al. Study on wide-area backup protection system for the smart grid. Proceedings of 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), pp. 218-224, July 2011.
- [9] Cong, W., Pan, Z. C. and Ding, L. A Wide Area Protection System Based on “Three Defensive Lines” and Its Application in Power System. Proceedings of 2004 International Conference on Power System Technology, pp. 718-722, 21-24 November 2004.
- [10] Sheng, S., Li, K. K., Chan, W. L., Zeng, X. J. and Duan, X. Z. Agent-based Wide Area Current Differential Protection System. Proceedings of the 2005 Industry Applications Conference, pp. 453-458, 2-6 October 2005.
- [11] Sheng, S., Li, K. K., Chan, W. L., Zeng, X. J. and Shi, D. Y. Adaptive Agent-Based Wide-Area Current Differential Protection System. IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 46 (October 2010): 2111-2117.
- [12] Wang, Y. G., Yin, X. G. and You, D. H. Agent-Based Wide Area Protection with High Fault Tolerance. Proceedings of The 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), pp. 739-744, 17-19 July 2010.
- [13] Wei, D., He, B. T. and Wang, H. F. Discuss of Wide-area Relay Protection Based on Wide-area Information. Proceeding of 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), pp. 1862-1868, 16-20 October 2011.
- [14] Hu, Z. S. and Wang, Z. P. Integrated Back-up Protection Based on Substation Area Information. Proceeding of 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), pp. 1084-1088, 16-20 October 2011.

- [15] He, Z. Q., Zhang, Z., Yin, X. G. and Wang, H. A Novel Algorithm of Wide Area Backup Protection Based on Fault Component Comparison. Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), pp. 1-7, 24-28 October 2010.
- [16] Li, Z. X., Yin, X. G., Zhang, Z., He, Z. Q. and Wang, H. A Novel Adaptive Partitioning Method for Wide Area Protection. Proceedings of 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, 25-28 March 2011.
- [17] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การป้องกันระบบไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ทีซีซี พรีนติ้ง, 2548.
- [18] Anderson, P. M. Power system protection. United States of America: IEEE PRESS and McGraw-Hill, 1999.
- [19] Blackburn, J. L. Protective relaying principles and applications. 2nd ed.: Marcel Dekker, 1998.
- [20] Horowitz, S. H., and Phadke, A. G. Third zone revisited. IEEE Transaction on Power Delivery 20 (January 2006): 23-29.
- [21] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [Online]. Available from: <http://www.ferc.gov> [April 2004]
- [22] Wikipedia. Intelligent electronic device [Online]. San Francisco, CA, USA. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_electronic_device
- [23] W. Cong et. Al. A Wide Area Protection System and Division of Protection IED Associated Area Based on Petri Net. Proceedings of 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, pp. 1-5, 18 August 2005.

- [24] Sheng, S., Liu, J. H., Xiao, H. and Jiang, D. J. Expert System for Wide Area Protection Zone Selection. Proceedings of 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, pp. 1-3, 18 August 2005.
- [25] อรรถพล ตันติสันติกร, การพัฒนาซอฟต์แวร์จัดการระบบควบคุมแบบแบตช์โดยใช้ทฤษฎีเพทรีเน็ต, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [26] W. Cong et. Al. A Fault Determination Algorithm for Relaying Protection System Based on Wide Area Information. Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), pp. 1-6, 22-26 October 2006.
- [27] C. Lei et. Al. Study on the Substation Area Backup Protection in Smart Substation. Proceedings of 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, 27-29 March 2012.
- [28] Tan, J. C., Crossley, P. A., Kirschen, D., Goody, J. and Downes, J. A. An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 15 (April 2000): 508-514.

ภาคผนวก

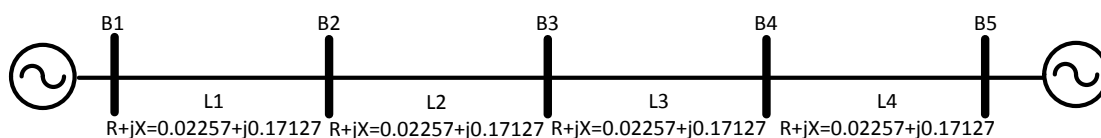
ภาคผนวก ก

ก.1. คำนิยามสำหรับข้อมูลต่างๆ

Sbase	คือ	ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าของระบบ (MVA)
Bus	คือ	หมายเลขของบัส
Type	คือ	ชนิดของบัส 1 = Load Bus, 2 = PV Bus, 3 = Slack Bus
Pd	คือ	ความต้องการกำลังจริง (p.u.)
Qd	คือ	ความต้องการกำลังรีแอกทีฟ (p.u.)
Gs	คือ	ค่าความต้องการกำลังจริงของค่า Shunt Conductance (MW)
Bs	คือ	ค่ากำลังรีแอกทีฟที่ฉีดเข้าบัสของ Shunt Susceptance (MVar)
Vm	คือ	ค่าเริ่มต้นในการคำนวณของขนาดของแรงดันบัส (องศา)
Va	คือ	ค่าเริ่มต้นในการคำนวณของมุมของแรงดันบัส (องศา)
baseKV	คือ	ค่าฐานของแรงดันไฟฟ้าที่บัส (kV)
Pg	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากบัส (MW)
Qg	คือ	ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกจากบัส (MVar)
Vg	คือ	ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
MBase	คือ	ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVA)
fbus	คือ	ตำแหน่งที่สายส่งต่อเชื่อม (จากบัสที่)
tbus	คือ	ตำแหน่งที่สายส่งต่อเชื่อม (ถึงบัสที่)
R	คือ	ความต้านทาน (p.u.)
X	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ (p.u.)
B	คือ	ค่า Susceptance ของ Line Charging ของสายส่ง (p.u.)

ก.2. ข้อมูลของระบบทดสอบแบบเรเดียล

ระบบแบบเรเดียล ดังแสดงในภาพที่ ก.1 ใช้ในการทดสอบที่ 1 คือ การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) กับ ขั้นตอนวิธีของรีเลย์ระยะทาง โดยมีข้อมูลของระบบทดสอบดังนี้



ภาพที่ ก.1 ระบบทดสอบแบบเรเดียล

ข้อมูลของบัส สายส่ง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณหาราคาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เมื่อกำหนดให้ค่า $S_{base} = 100$ MVA มีดังนี้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสในระบบแบบเรเดียล

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Vm	Va	baseKV
1	2	0	0	0	0	1	0	230
2	1	0	0	0	0	1	0	230
3	1	0	0	0	0	1	0	230
4	1	0	0	0	0	1	0	230
5	3	0	0	0	0	1	0	230

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งในระบบทดสอบแบบเรเดียล

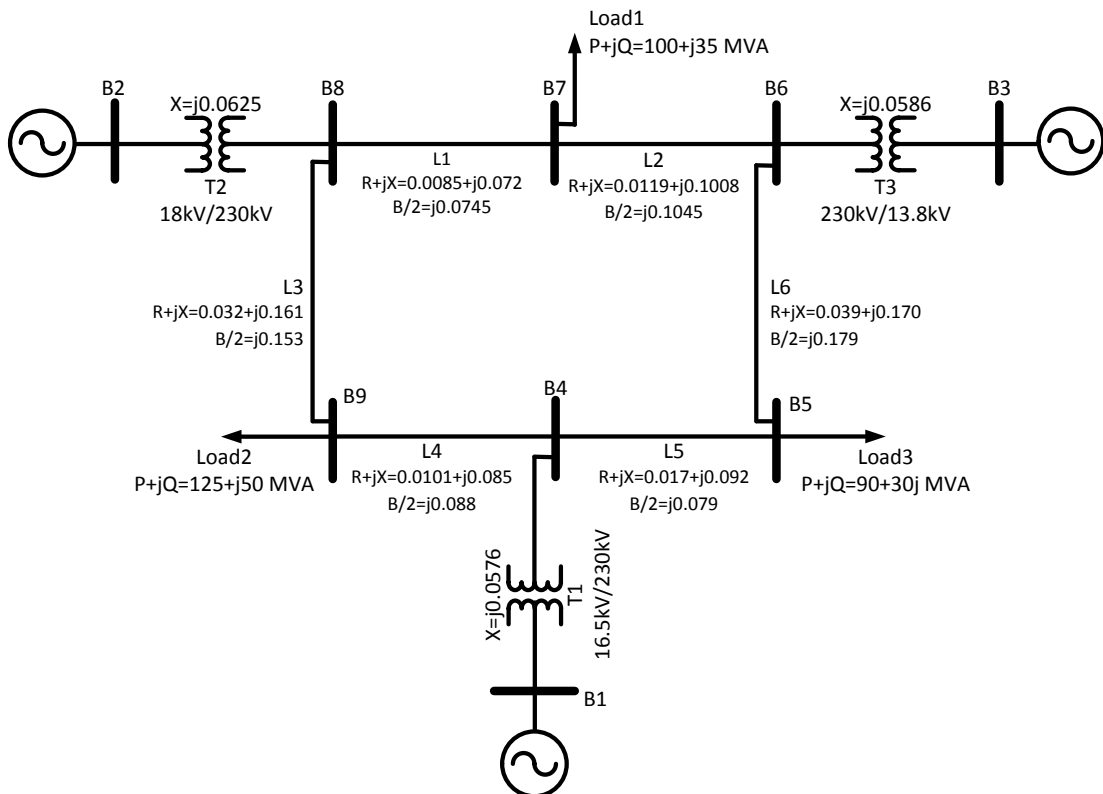
fbus	tbus	R	X	B
1	2	0.02257	0.17127	0
2	3	0.02257	0.17127	0
3	4	0.02257	0.17127	0
4	5	0.02257	0.17127	0

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบแบบเรเดียล

Bus	Pg	Qg	Vg	MBase	R	X
1	100	0	1	100	0	0.05
5	0	0	1	100	0	0.05

ก.3. ข้อมูลของระบบทดสอบแบบโครงข่าย (WSCC 9 Bus)

ระบบทดสอบ WSCC 9 Bus ดังแสดงในภาพที่ ก.2 ใช้ในการทดสอบที่ 2 คือ การวิเคราะห์สมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนา (อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด) โดยมีข้อมูลของระบบทดสอบดังนี้



ภาพที่ ก.2 ระบบทดสอบ WSCC 9 บัส

ข้อมูลของบัส สายส่ง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณหาราคาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เมื่อกำหนดให้ค่า $S_{base} = 100$ MVA มีดังนี้

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลบัสในระบบ WSCC 9 บัส

Bus	Type	Pd	Qd	Gs	Bs	Vm	Va	baseKV
1	3	0	0	0	0	1	0	230
2	2	0	0	0	0	1	0	230
3	2	0	0	0	0	1	0	230
4	1	0	0	0	0	1	0	230
5	1	90	30	0	0	1	0	230
6	1	0	0	0	0	1	0	230
7	1	100	36	0	0	1	0	230
8	1	0	0	0	0	1	0	230
9	1	125	50	0	0	1	0	230

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลสายส่งในระบบ WSCC 9 บัส

fbus	tbus	R	X	B
1	4	0	0.0576	0
4	5	0.017	0.092	0.158
5	6	0.039	0.17	0.358
3	6	0	0.0586	0
6	7	0.0119	0.1008	0.209
7	8	0.0085	0.072	0.149
8	2	0	0.0625	0
8	9	0.032	0.161	0.306
9	4	0.01	0.085	0.178

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ WSCC 9 บัส

Bus	Pg	Qg	Vg	MBase	R	X
1	0	0	1	100	0	0.05
2	163	0	1	100	0	0.275
3	85	0	1	100	0	0.327

ภาคผนวก ข

ข.1. ตารางผลการทดสอบที่ 1.1

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพร่องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด

	ค่ากระแส		โซน 1	โซน 2	โซน 3	การทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด
	ขนาด ของกระแส (p.u.)	มุมเฟสของ กระแส (Degree)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	
e1	3.281	-39.29	0	-	4.9916	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 3
e2	3.281	140.71	0	4.9916	-	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 2
e3	3.281	-39.29	4.9916	0	4.9916	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 1
e4	2.130	-85.80	4.9916	0	4.9916	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 1
e5	2.130	94.20	0	4.9916	0	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 2
e6	2.130	-85.80	0	0	4.9916	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 3
e7	2.130	94.20	0	0	-	ไม่พบความผิดพร่อง
e8	2.130	-85.80	0	-	0	ไม่พบความผิดพร่อง

หมายเหตุ “-” คือ ตำแหน่งเกิดความผิดพร่องอยู่นอกโซนการป้องกัน

ตารางที่ ข.2 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1			
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง	
	e1	e2	e1	e2
0.1	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-
0.2	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.3	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.4	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.5	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.6	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.7	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.8	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.9	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-	ตัดวงจร

ตารางที่ ข.3 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2			
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง	
	e3	e4	e3	e4
0.1	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-
0.2	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.3	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.4	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.5	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.6	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.7	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.8	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.9	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-	ตัดวงจร

ตารางที่ ข.4 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3			
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง	
	e5	e6	e5	e6
0.1	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-
0.2	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.3	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.4	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.5	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.6	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.7	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.8	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.9	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-	ตัดวงจร

ตารางที่ ข.5 การป้องกันโซน 1 เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติพร้อมบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4			
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง	
	e7	e8	e7	e8
0.1	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-
0.2	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.3	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.4	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.5	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.6	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.7	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.8	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร	ตัดวงจร
0.9	ตัดวงจร	ตัดวงจร	-	ตัดวงจร

ตารางที่ ข.6 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1	
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	รีเลย์ระยะทาง
	e3	e4
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ

ตารางที่ ข.7 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2

ตำแหน่งเกิด ความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2			
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง	
	e2	e5	e1	e6
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ

ตารางที่ ข.8 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3

ตำแหน่งเกิด ความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3			
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง	
	e4	e7	e3	e8
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-	ตรวจพบความผิดปกติ

ตารางที่ ข.9 การป้องกันโซน 2 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4	
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	รีเลย์ระยะทาง
	e6	e5
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	-

ตารางที่ ข.10 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 1	
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	รีเลย์ระยะทาง
	e4	e6
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ

ตารางที่ ข.11 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2

ตำแหน่งเกิด ความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 2		
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง
	e1	e6	e8
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ

ตารางที่ ข.12 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3

ตำแหน่งเกิด ความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 3		
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาด		รีเลย์ระยะทาง
	e3	e8	e1
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ	-

ตารางที่ ข.13 การป้องกันโซน 3 เมื่อเกิดความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4

ตำแหน่ง เกิดความผิดปกติ (p.u)	ความผิดปกติบนสายส่งไฟฟ้าเส้นที่ 4	
	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด	รีเลย์ระยะทาง
	e5	e3
0.1	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.2	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.3	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.4	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.5	ตรวจพบความผิดปกติ	ตรวจพบความผิดปกติ
0.6	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.7	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.8	ตรวจพบความผิดปกติ	-
0.9	ตรวจพบความผิดปกติ	-

หมายเหตุ

1. ตำแหน่งเกิดความผิดปกติจะเริ่มต้นจากบัสทางขวาไปยังบัสทางซ้าย
2. “-“ คือ ตำแหน่งเกิดความผิดปกติอยู่นอกโซนการป้องกัน

ตารางที่ ข.16 ร้อยละความถูกต้องของรีเลย์ระยะทางโซน 2

ตำแหน่งเกิด ความผิดพลาด (p.u)	ร้อยละความถูกต้องในการทำงาน					
	e1	e3	e4	e5	e6	e8
0.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.3	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.4	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.6	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.7	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.8	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.9	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.1	100%	100%	98.57%	100%	100%	100%
1.2	100%	100%	68.57%	92.86%	100%	100%
1.3	100%	98.57%	42.86%	77.14%	91.43%	100%
1.4	82.86%	74.29%	15.71%	57.14%	44.29%	70%
1.5	14.29%	24.29%	0%	27.14%	0%	0%

ตารางที่ ข.18 ร้อยละความถูกต้องของรีเลย์ระยะทางโซน 3

ตำแหน่งเกิด ความผิดปกติ (p.u)	ร้อยละความถูกต้องในการทำงาน			
	e1	e3	e6	e8
0.1	100%	100%	100%	100%
0.2	100%	100%	100%	100%
0.3	100%	100%	100%	100%
0.4	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%
0.6	100%	100%	100%	100%
0.7	100%	100%	100%	100%
0.8	100%	100%	100%	100%
0.9	100%	100%	100%	100%
1.1	100%	100%	100%	100%
1.2	100%	100%	100%	100%
1.3	100%	100%	100%	100%
1.4	100%	100%	100%	100%
1.5	100%	100%	100%	100%
1.6	100%	100%	100%	100%
1.7	100%	100%	100%	100%
1.8	100%	100%	100%	100%
1.9	100%	100%	100%	100%
2.1	100%	100%	100%	100%
2.2	100%	95.71%	71.43%	100%
2.3	98.57%	80%	42.86%	91.43%
2.4	77.14%	61.42%	15.71%	45.71%
2.5	28.57%	32.86%	0%	0

ตารางที่ ข.19 ร้อยละความถูกต้องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาวจังหวัดขอนแก่น 3

ตำแหน่งเกิด ความผิดพลาด (p.u)	ร้อยละความถูกต้องในการทำงาน					
	e1	e3	e4	e5	e6	e8
0.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.3	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.4	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.5	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.6	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.7	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.8	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.9	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.3	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.4	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.5	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.6	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.7	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.8	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1.9	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.2	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.3	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.4	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2.5	100%	100%	100%	100%	100%	100%

ข.3. ตารางผลการทดสอบที่ 2

ตารางที่ ข.20 ตัวอย่างผลการทดสอบการตรวจจับความผิดพร่องภายในโซนต่างๆ

	ค่ากระแส		โซน1	โซน 2	โซน 3	การทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชำรุดฉาด
	ขนาด ของกระแส (p.u.)	มุมเฟสของ กระแส (Degree)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	
e1	1.8913	12.20	0	-	3.3828	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 3
e2	1.8913	-167.80	0	3.3828	-	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 2
e3	2.4490	-16.27	3.4959	0.2916	3.6618	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 1
e4	1.3620	-49.87	3.6618	0.1728	3.3828	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 1
e5	1.5578	145.25	0.1728	3.6618	0.5083	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 2
e6	1.3875	-33.61	0.1728	0.3356	3.4959	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 3
e7	0.9389	176.82	0	0.5083	-	ไม่พบความผิดพร่อง
e8	0.9389	-3.18	0	-	0.5083	ไม่พบความผิดพร่อง
e9	1.1694	114.25	0.2624	3.6332	0.4326	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 2
e10	0.9292	-71.56	0.2624	0.1704	3.3828	ตรวจพบความผิดพร่อง โซน 3
e11	0.9805	130.38	0.1704	0.2624	0.3269	ไม่พบความผิดพร่อง
e12	0.8102	-49.93	0.1704	0.1565	0.4326	ไม่พบความผิดพร่อง
e13	1.0650	133.77	0	0.3269	-	ไม่พบความผิดพร่อง
e14	1.0650	-46.23	0	-	0.3269	ไม่พบความผิดพร่อง
e15	0.2618	-34.70	0.1565	0.1704	0.492	ไม่พบความผิดพร่อง
e16	0.4154	140.15	0.1565	0.3356	0.3269	ไม่พบความผิดพร่อง
e17	0.4740	-91.72	0.3356	0.1565	0.5083	ไม่พบความผิดพร่อง
e18	0.7484	106.94	0.3356	0.1728	0.492	ไม่พบความผิดพร่อง
โหลด 1	0.4304	20.89				
โหลด 2	0.3668	21.52				
โหลด 3	0.3925	31.93				

หมายเหตุ "-" คือ ตำแหน่งเกิดความผิดพร่องอยู่นอกโซนการป้องกัน

ข.4. ตารางผลการทดสอบที่ 3

ตารางที่ ข.21 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ที่ 1

	ค่ากระแส		โซน 1	โซน 2	โซน 3	การทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด
	ขนาด ของกระแส (p.u.)	มุมเฟสของ กระแส (Degree)				
e1	2.5423	-25.19	0	-	22.2780	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 3 และช่วงเวลาการทำงาน
e2	2.5423	154.81	0	22.2780	-	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 2 และช่วงเวลาการทำงาน
e3	5.8640	36.89	22.3011	0.0468	22.2885	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 1 และส่งคำสั่งตัดวงจร
e4	16.4781	-44.78	22.3011	0.0163	22.2780	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 1 และส่งคำสั่งตัดวงจร
e5	3.1375	153.67	0	22.2885	-	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 2 และช่วงเวลาการทำงาน
e6	3.1375	-26.33	0	-	22.2885	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 3 และช่วงเวลาการทำงาน
กระแส ภายนอก 1	3.3887	135.10	หมายเหตุ “-” คือ ตำแหน่งเกิดความผิดปกติอยู่นอกโซนการป้องกัน			
กระแส ภายนอก 2	13.5245	131.06				

ตารางที่ ข.22 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ที่ 2

	ค่ากระแส		โซน 1	โซน 2	โซน 3	การทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด
	ขนาด ของกระแส (p.u.)	มุมเฟสของ กระแส (Degree)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	
e1	0.8796	-141.11	0	-	20.3314	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 3 และช่วงเวลาการทำงาน
e2	0.8796	38.89	0	20.3314	-	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 2 และช่วงเวลาการทำงาน
e3	7.3556	-111.73	20.3272	0.0468	20.2588	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 1 และส่งคำสั่งตัดวงจร
e4	13.0050	-118.57	20.3272	0.0998	20.3314	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 1 และส่งคำสั่งตัดวงจร
e5	2.2046	86.69	0	20.2588	-	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 2 และช่วงเวลาการทำงาน
e6	2.2046	93.31	0	-	20.2558	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 3 และช่วงเวลาการทำงาน
กระแส ภายนอก 1	6.6081	72.05	หมายเหตุ “-“ คือ ตำแหน่งเกิดความผิดปกติอยู่นอกโซนการป้องกัน			
กระแส ภายนอก 2	10.9742	56.88				

ตารางที่ ข.23 การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชาญฉลาดในเหตุการณ์ที่ 3

	ค่ากระแส		โซน 1	โซน 2	โซน 3	การทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ชาญฉลาด
	ขนาด ของกระแส (p.u.)	มุมเฟสของ กระแส (Degree)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	ขนาดของ ผลต่างเชิง เฟสเซอร์ (p.u.)	
e1	2.7849	-161.70	0	-	16.7334	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 3 และหน่วยเวลาการทำงาน
e2	2.7849	18.30	0	16.7334	-	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 2 และหน่วยเวลาการทำงาน
e3	13.3962	-161.37	16.6303	0.1061	16.6771	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 1 และส่งคำสั่งตัดวงจร
e4	4.8030	143.76	16.6303	0.0543	16.7334	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 1 และส่งคำสั่งตัดวงจร
e5	6.0282	-95.17	0	16.6771	-	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 2 และหน่วยเวลาการทำงาน
e6	6.0282	84.83	0	-	16.6771	ตรวจพบความผิดปกติ โซน 3 และหน่วยเวลาการทำงาน
กระแส ภายนอก 1	10.7174	18.72	หมายเหตุ “-“ คือ ตำแหน่งเกิดความผิดปกติอยู่นอกโซนการป้องกัน			
กระแส ภายนอก 2	5.4882	35.62				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว วีรยา สิริวัฒนวรสกุล เกิดวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2532 ที่กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2554 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555