

การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วย
การแปลงเวฟเล็ต

ANALYSIS OF SIMULTANEOUS FAULTS IN ELECTRICAL POWER
TRANSMISSION SYSTEMS USING WAVELET TRANSFORM

วรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล
WORAVUT PHONGCHAISSRIKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2003-EN-M-020-050

การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วย
การแปลงเวฟเล็ต

ANALYSIS OF SIMULTANEOUS FAULTS IN ELECTRICAL POWER
TRANSMISSION SYSTEMS USING WAVELET TRANSFORM



วรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล

WORAVUT PHONGCHAI SRIKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105160
วัน..เดือน,ปี.....1.6 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-020-050

**ANALYSIS OF SIMULTANEOUS FAULTS IN ELECTRICAL POWER
TRANSMISSION SYSTEMS USING WAVELET TRANSFORM**

WORAVUT PHONGCHAIKUL

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-020-050

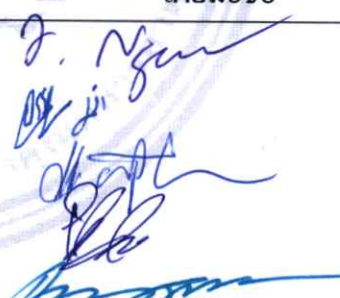
COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็ต
Thesis Title Analysis of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Wavelet Transform
นักศึกษา นายวรวุฒิ พงษ์ชัยศรีกุล
รหัสประจำตัว 47060267
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-050

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ	
ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล	
ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว	
รศ.ดร.พิชัย อารีย์	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วย การแปลงเวฟเล็ด
นักศึกษา	นาย วรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล
รหัสประจำตัว	47060267
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน ในระบบส่งจ่าย 500-kV โดยใช้การแปลงเวฟเล็ด สัญญาณฟอลต์สามารถเกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและมีผลกระทบการทำงานของรีเลย์ระยะทางที่ติดตั้งในระบบส่งจ่าย สัญญาณฟอลต์ถูกจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังเกิดฟอลต์ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ดแม่ซินิก daubechies4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงจากสัญญาณกระแสฟอลต์ การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ ถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับอัลกอริทึมที่ผ่านมา อนึ่งคุณลักษณะกระแสฟอลต์ที่มุมที่เกิดฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และเฟสที่เกิดฟอลต์ ได้ถูกวิเคราะห์ พบว่าอัลกอริทึมที่ผ่านมาให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดสำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ ในกรณีฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน วิทยานิพนธ์นี้จะแสดงให้เห็นว่าวิธีการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่นี้ มีประสิทธิภาพสำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ ในกรณีฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยผลลัพธ์ของการระบุประเภทฟอลต์ ในกรณีฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมใหม่นี้มีค่าเท่ากับ 90.44% และ อัลกอริทึมที่ผ่านมามีค่าเท่ากับ 34.52% ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลังได้ในทางปฏิบัติ

Thesis Title	Analysis of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Wavelet Transform
Student	Mr. Woravut Phongchaisrikul
Student ID.	47060267
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of characteristics for simultaneous fault signals in a 500-kV electrical power transmission system using wavelet transform. Such fault signals can occur in the transmission system, and have an effect to the operation of distance relays installed in the system. The fault signals are simulated using PSACD/EMTDC. Post-fault current signals are used in the analysis by mother wavelet daubechies4 (db4) which is employed in order to extract high frequency components from the fault current signals. The coefficients of the positive sequence current obtained from the wavelet transform are detect high frequency. The variations of first scale high frequency components that can detect fault are considered as inputs for the former algorithm. In addition, characteristics of fault current at various fault inception angles, fault locations and faulty phases are analyzed. It is found that the decision algorithm developed in this thesis gives more satisfactory results than those obtained from the former algorithm. for identifying simultaneous faults in transmission systems. The results show that an average accuracy for the fault identification is of 90.44% from decision algorithm developed, and of 34.52% from the former algorithm. The effectiveness of the proposed schemes is verified, so that the technique can be applied to the signal analysis in an electrical power system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจากรศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท EPRL ทุกท่าน สำหรับกำลังใจที่มอบให้แก่ผู้วิจัย สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวสำหรับเงินทุนการศึกษาและกำลังใจที่ดีกับถูกเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	3
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	6
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	6
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	7
1.5 ขอบเขตของการวิจัยวิจัย	7
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา	8
บทที่ 2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์และระบบป้องกันบนสายส่ง	10
2.1 องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)	10
2.2 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบจุดเดียว (Single Fault)	13
2.2.1 การคำนวณฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร (Three Phase Fault)	14
2.2.2 การคำนวณฟอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน (Single Line to Ground Fault)	15
2.2.3 การคำนวณฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส (Line to Line Fault)	17
2.2.4 การคำนวณฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน (Double Line to Ground Fault)	19
2.3 การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน (Simultaneous Fault)	21
2.4 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory)	24
2.5 ระบบการป้องกันสายส่ง	30
2.5.1 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)	31
2.5.2 การป้องกันแบบใช้ระบบสื่อสาร (Pilot protection)	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การแปลงเวฟเล็ท	36
3.1 การแปลงเวฟเล็ท (Wavelet Transform: WT)	36
3.1.1 การสเกลลิ่ง (Scaling: a)	37
3.1.2 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting: k)	38
3.1.3 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ท (Decomposition and reconstruction of Wavelet)	39
3.1.4 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis: MRA)	40
3.2 การแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform: CWT)	43
3.3 การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT)	45
3.3.1 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)	46
3.4 เวฟเล็ทแม่ (Mother wavelet)	48
บทที่ 4 การจำลองฟอลต์และวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์	51
4.1 การจำลองฟอลต์	51
4.1.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์	51
4.1.2 แบบจำลองสายส่ง	53
4.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 500 kV	54
4.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์	56
4.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์	59
บทที่ 5 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ท.....	66
5.1 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ท	66
5.2 การตรวจจับฟอลต์	66
5.3 การแสดงพฤติกรรมของการเกิดฟอลต์	71
5.3.1 กรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว	71
5.3.1.1 กรณีเกิดฟอลต์สามเฟส	71
5.3.1.2 กรณีเกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1.3 กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน	73
5.3.2 กรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน	74
5.3.2.1 ฟอลต์สามเฟส และ ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน	74
5.3.2.2 ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และ ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน	75
5.3.2.3 ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน และฟอลต์ระหว่างเฟส C กับ A	76
5.4 การระบุประเภทของฟอลต์	77
5.4.1 การระบุประเภทของฟอลต์	77
5.4.2 การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่	79
5.4.2.1 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์ในแต่ละสเกล	82
5.4.2.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุการเกิดฟอลต์ลงดินในแต่ละสเกล	82
5.5 แผนภาพสรุปการประยุกต์ใช้งานการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย	90
บทที่ 6 ผลการทดลอง	93
6.1 รูปแบบการนำเสนอ	93
6.2 ผลการทดลอง	95
6.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา	95
6.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา	97
6.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา	99
6.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา	101

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.14	กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา	121
6.2.15	กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา	123
6.2.16	กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา	125
6.2.17	กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา	127
6.2.18	กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา	129
6.3	สรุปการระบุประเภทของฟอลต์	131
บทที่ 7	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	133
เอกสารอ้างอิง	138
ภาคผนวก ก.	การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	142
ภาคผนวก ข.	สรุปผลการระบุประเภทของฟอลต์ในกรณีฟอลต์จุดเดียวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	152

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	156
ประวัติผู้เขียน	169

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ดัชนีชี้วัดผลของการเกิดฟอลต์และไม่เกิดฟอลต์ สำหรับระบบ CEGB ในช่วงระยะเวลา 5 ปี1
1.2	สถิติการเกิดฟอลต์บนระบบส่งจ่ายของ CEGB ในระยะเวลา 5 ปี2
1.3	แสดงความถี่โดยประมาณของการเกิดฟอลต์ที่ปรากฏบนสายส่งไฟฟ้า2
1.4	แสดงการเกิดฟอลต์ที่ปรากฏบนสายส่งไฟฟ้าในช่วง ปี2550- เม.ย.25513
4.1	ค่าสูงสุดขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง64
4.2	ค่าผลต่างขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง กรณีเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC) และฟอลต์ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (ABCG) ที่ตำแหน่ง F_165
5.1	แสดงเมตริกซ์การแปลงของระบบ67
5.2	แสดงผลสรุปของการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก70
5.3	แสดงผลสรุปของการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก70
5.4	ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลียตของการระบุประเภทของฟอลต์ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก84
5.5	ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลียตของการระบุประเภทของฟอลต์ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก85
5.6	ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลียตของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก86
5.7	ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลียตของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก87
5.8	แสดงผลลัพธ์ของการระบุประเภทของฟอลต์ และ การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก88
5.9	แสดงผลลัพธ์ของการระบุประเภทของฟอลต์ และ การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก89
6.1	ประเภทของฟอลต์94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์8
2.1	เวกเตอร์ของระบบองค์ประกอบสมมาตร11
2.2	พอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร14
2.3	วงจรสมมูลย์ในกรณีการเกิดพอลต์ 14
2.4	การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดพอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร15
2.5	พอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน15
2.6	การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดพอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน16
2.7	พอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส17
2.8	การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดพอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส18
2.9	พอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน19
2.10	การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดพอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน20
2.11	แสดงการเกิดพอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง22
2.12	วงจรสมมูลย์ในกรณีพอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน22
2.13	การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดพอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน22
2.14	แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง π เฟสใดๆ (v และ i เป็นฟังก์ชันของ x และ t)25
2.15	แสดงคลื่นของแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ ที่เวลา t_1 และ t_228
2.16	แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสภาวะที่เกิดพอลต์บนสายส่ง29
2.17	แสดงเขตการป้องกันตามชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้า30
2.18	แสดงการติดตั้งและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง31
2.19	แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง32
2.20	การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสภาวะที่เกิดพอลต์33
2.21	แสดงการป้องกันแบบโซนของรีเลย์ระยะทาง33
2.22	แสดงลักษณะของการป้องกันโดยใช้ระบบสื่อสาร34
3.1	แสดงลักษณะของ รูปคลื่นชายนี และ Daubechies Wavelet36
3.2	แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ต38
3.3	แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต38
3.4	แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด39
3.6	แสดงสเปซย่อย V_j ใน $L^2(R)$41
3.7	แสดงสเปซย่อย W_j ใน $L^2(R)$42
3.8	แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ด44
3.9	แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ด44
3.10	แสดงขั้นตอนที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ด44
3.11	แสดงการแปลงแยกและแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ47
3.12	แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ดโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทพฟิลเตอร์แบงค์47
3.13	แสดงเวฟเล็ดแม่แบบไม่มีชนิดย่อย48
3.14	แสดงเวฟเล็ดแม่แบบมีชนิดย่อย49
4.1	แสดงระบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงจูง 500 kV ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC52
4.2	แสดงระบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงจูง 500 kV53
4.3	แสดงโครงสร้างเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งวงจรวง 500 kV54
4.4	แสดงระยะหย่อน (Sag) ของสายตัวนำบนเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งวงจรวง 500 kV55
4.5	แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (ฟอลต์จุดเดียว)57
4.6	แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (ฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน)57
4.7	แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก (ฟอลต์จุดเดียว)58
4.8	แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก (ฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน)58
4.9	สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะปกติ59
4.10	สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟส60
4.11	สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน61
4.12	สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟสที่ตำแหน่ง F_1 และฟอลต์เฟส A ลงดินที่ตำแหน่ง F_262

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดินที่ตำแหน่ง F_1 และฟอลต์เฟส A ลงดิน ที่ตำแหน่ง F_263
5.1	แสดงผลการแปลงเวฟเฟิร์ตของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ด้าน TTK และ NCO68
5.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังสองของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ด้าน TTK และ NCO ...68
5.3	แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์สามเฟส71
5.4	แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน72
5.5	แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน73
5.6	แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน74
5.7	แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน75
5.8	แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน76
5.9	การลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1-5 ของปลายด้าน TTK77
5.10	การปรับค่าเพื่อให้มีค่าอยู่บนฐานอ้างอิงเดียวกันของสัมประสิทธิ์ การแปลงเวฟเฟิร์ตในสเกลที่ 178
5.11	เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก80
5.12	การปรับค่าเพื่อให้มีค่าอยู่บนฐานอ้างอิงเดียวกันของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเฟิร์ต ในสเกลที่ 1 ณ เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก80
5.13	ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส C81
5.14	แสดงแผนภาพการตรวจจับฟอลต์90
5.15	แสดงแผนภาพการระบุประเภทของฟอลต์91
5.16	แสดงแผนภาพการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 0 องศา	95
6.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 0 องศา	97
6.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตรที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 0 องศา	99
6.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 30 องศา	101
6.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 30 องศา	103
6.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 30 องศา	105
6.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 60 องศา	107
6.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 60 องศา	109
6.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 60 องศา	111

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 90 องศา113
6.11	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 90 องศา115
6.12	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 90 องศา117
6.13	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 120 องศา119
6.14	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 120 องศา121
6.15	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 120 องศา123
6.16	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 150 องศา125
6.17	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 150 องศา127
6.18	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ เท่ากับ 150 องศา129
6.19	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์แต่ละประเภท131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้อง โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14]135
7.2	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้อง โดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่135
7.3	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้อง โดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ต่างๆ136
7.4	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้อง โดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่ระยะทางต่างๆ137

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีความต้องการและมีความจำเป็นมากดังนั้นหากเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังย่อมเกิดผลเสียหายต่อระบบการผลิตและการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการลัดวงจรจะทำให้เกิดกระแสในปริมาณที่สูงมาก ซึ่งทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการส่งจ่ายเสียหาย อาจจะทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าขาดความต่อเนื่อง และส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมก็หยุดลงก่อให้เกิดความสูญเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก จากสถิติการเกิดฟอลต์ (Fault Statistics) ในส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากสำหรับการจัดการระบบการป้องกัน (Protection Management) ได้ถูกเก็บรวบรวมข้อมูลการทำงานของระบบป้องกันทั้งหมดเพื่อกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของระบบป้องกัน สถิติการเกิดฟอลต์แสดงได้ตามตารางที่ 1.1 [1]

ตารางที่ 1.1 ดัชนีชี้วัดผลของการเกิดฟอลต์และไม่เกิดฟอลต์ สำหรับระบบ CEGB ในช่วงระยะเวลา 5 ปี

Statistics	Year				
	1	2	3	4	5
1. Total number of system fault	672	678	505	429	295
2. Discriminative system fault performance index	94.20%	96.60%	95.60%	95.90%	92.20%
3. Total number of circuit breakers installed	10,514	9,784	9,737	9,252	9,252
4. Non-system fault performance index	98.30%	97.80%	97.60%	98.60%	98.60%

จากตารางที่ 1.1 เป็นดัชนีชี้วัดผลของการเกิดฟอลต์และไม่เกิดฟอลต์ในระบบ CEGB (The Central Electricity Generating Board) ซึ่งระบบดังกล่าวนี้มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 kV และ 275 kV ตามลำดับ อัตราเฉลี่ยของการเกิดฟอลต์จำนวน 516 ครั้งต่อปี และมีค่าเฉลี่ยความสามารถในการแยกแยะฟอลต์เป็น 94.9 % และจากตารางที่ 1.2 เป็นสถิติการเกิดฟอลต์บนเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ในระยะเวลา 5 ปี ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาเดียวกันกับตารางที่ 1.1 พบว่าค่าเฉลี่ยของการเกิดฟอลต์ประมาณ 70 % เป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้า และเคเบิล

ตารางที่ 1.2 สถิติการเกิดฟอลต์บนระบบส่งจ่ายของ CEGB ในระยะเวลา 5 ปี

Type of plant or equipment concerned	Year				
	1	2	3	4	5
1. Overhead line and cables circuit	435	460	293	269	174
2. Transformers and reactors	91	100	102	49	32
3. Generators and generator transformer	89	75	66	65	51
4. Busbars and switchgear	50	32	31	33	27
5. Other plant (motor, compensator, etc)	7	11	13	13	11

การเกิดฟอลต์บนสายส่งมีมากมายหลายสาเหตุ โดยสาเหตุหลักมาจากลมพายุ นอกจากนั้น มีสาเหตุมาจาก แรงลม กิ่งไม้พาดผ่าน เป็นต้น ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฟอลต์ทั้งสิ้น สามารถแยกเป็นชนิดของฟอลต์แต่ละชนิดที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 3 [2]

ตารางที่ 1.3 แสดงความถี่โดยประมาณของการเกิดฟอลต์ที่ปรากฏบนสายส่งไฟฟ้า

ชนิดของฟอลต์	% การเกิดฟอลต์
1. Single Line to Ground Fault	70 - 80 %
2. Double Line to Ground Fault	17 - 10 %
3. Line to Line Fault	10 - 8 %
4. Three Phase Fault	3 - 2 %

ตารางที่ 1.4 แสดงการเกิดฟอลต์ที่ปรากฏบนสายส่งไฟฟ้าในช่วง ปี2550- เม.ย.2551 [3]

ประเภทของฟอลต์	%การเกิดฟอลต์
ฟอลต์แบบขนาน	70-80%
ฟอลต์แบบอนุกรม	20-30%

จากสถิติการเกิดฟอลต์ตามตารางที่ 1.1 - 1.3 พบว่า ฟอลต์เฟสเดียว (Single Line to Ground Fault) เกิดขึ้นบ่อยที่สุด และอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์มากที่สุดได้แก่ สายส่งไฟฟ้า และเคเบิล โดยคิดเป็นปริมาณเฉลี่ย 70% ของเหตุการณ์ฟอลต์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ ของระบบไฟฟ้า และจากสถิติการเกิดฟอลต์ตามตารางที่ 1.4 พบว่าการเกิดฟอลต์แบบอนุกรม (Series Fault) จะเป็นลักษณะการแตกหักของลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulators) และระดมเสาส่งไฟฟ้าหัก ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้อยเมื่อเทียบกับกรณีการเกิดฟอลต์ฟอลต์แบบขนาน (Shunt Fault) แต่อย่างไรก็ตามการเกิดฟอลต์ไม่ว่าจะเป็นการเกิดฟอลต์แบบอนุกรม และการเกิดฟอลต์ฟอลต์แบบขนานจะส่งผลโดยตรงต่อความมีเสถียรภาพโดยรวมของระบบจ่ายไฟฟ้า และยังเสียโอกาสการจ่ายไฟฟ้า โดยไม่สามารถคิด

เป็นรูปตัวเงินได้ จากผลกระทบนี้ยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้นการออกแบบระบบป้องกันจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพราะถ้าออกแบบระบบการป้องกันมีคุณสมบัติที่ดี เช่น สามารถตรวจจับฟอลต์และสามารถแยกได้ว่า กระแสที่ไหลในขณะนั้นเป็นกระแสปกติ หรือเกิดกระแสฟอลต์ขึ้น อีกทั้งทราบรูปแบบและ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ รวมไปถึงสามารถเลือกปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำความมีเสถียรภาพโดยรวมของระบบก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เศรษฐกิจของประเทศพัฒนาไปในทิศทางที่ดีขึ้น

ในระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้รีเลย์ระยะทาง(Distance Relay) ดังนั้นข้อมูลที่ได้รับจากรีเลย์ระยะทางจะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของรีเลย์ในขณะเกิดฟอลต์ และ ปริมาณของฟอลต์ที่เกิดขึ้น เช่นแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เมื่อเกิดฟอลต์จุดเดียว (Single Fault) ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังกระแส ฟอลต์จะมีทิศทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจึงสามารถใช้รีเลย์แบบระยะทาง เพื่อ ระบุตำแหน่งและเฟสที่เกิดฟอลต์ได้และปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้ แต่เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น พร้อมกัน(Simultaneous Fault) ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสายส่งเดียวกัน รีเลย์ในขอบเขตการป้องกันจะต้องทำงานอย่างน้อย 1 ชุด เพื่อสั่งปลดวงจร ผลที่ตามมาจะทำให้ รีเลย์ตัวอื่นๆ มองเห็นฟอลต์ที่เกิดขึ้น และทำการปลดวงจรด้วย เมื่อมีฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันนั้น อาจมีทั้งฟอลต์ภายใน และภายนอกขอบเขตการป้องกัน ซึ่งรีเลย์บางชุดจะมีความลำบากในการ ตัดสินใจว่าควรจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรหรือไม่ [4] การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ใน ระบบป้องกันสายส่งได้รับความสนใจและมีการศึกษามาเป็นเวลานานพอสมควร โดยมีการพัฒนา อย่างต่อเนื่องในเรื่องการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในระบบป้องกันสายส่งดังนี้

ในช่วงปี ค.ศ. 1900- 1970 การป้องกันสายส่งไฟฟ้านั้นตามปกติจะใช้ รีเลย์แบบระยะทาง (Distance Relay) รีเลย์แบบนี้จะทำงานตามค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) [5] ระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้ง รีเลย์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ รีเลย์แบบระยะทางนี้ยังจะตอบสนองต่อค่าพารามิเตอร์อื่น นอกเหนือจากอิมพีแดนซ์ เช่น ค่าแอดมิทแตนซ์ (Admittance) รีแอกแตนซ์ (Reactance) ซึ่งวิธี อิมพีแดนซ์นั้นสามารถค้นหาตำแหน่งฟอลต์ได้โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์จากรีเลย์ ณ ปลายด้าน สายส่งที่เกิดฟอลต์ เห็นได้ชัดว่าวิธีดังกล่าวดำเนินการอยู่บนการวิเคราะห์บนความถี่พื้นฐาน (50Hz) ของระบบไฟฟ้ากำลัง แต่วิธีอิมพีแดนซ์นี้ก็ยังมีข้อเสียเกี่ยวกับผลกระทบหลายๆอย่างในการ คำนวณหาตำแหน่งฟอลต์ เช่น ความต้านทานฟอลต์ (Fault Resistance) โหลดของสายส่ง (Line Loading) และพารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย (Source Parameters) เป็นต้น ดังนั้นความแม่นยำของวิธี อิมพีแดนซ์ในการค้นหาตำแหน่งฟอลต์จึงอยู่ในขอบเขตที่จำกัด

ในช่วงปี ค.ศ. 1950- 1980 ได้มีการเปลี่ยนแนวโน้มนของการวิเคราะห์สัญญาณมาสู่ การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยวิธีคลื่นเดินทาง (Traveling Wave) [6] ซึ่งวิธี

ดังกล่าวนี้จะไม่ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ประเภทของฟอลต์ ความต้านฟอลต์ มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ และ พารามิเตอร์ของแหล่งจ่าย เป็นต้น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยวิธี คลื่นเดินทาง ยังมีข้อเสียคือไม่สามารถแยกแยะลูกคลื่นได้อย่างแม่นยำโดยมีผลมาจาก การแกว่ง ของกำลังไฟฟ้า (Oscillation) และการกำเนิดคลื่นสะท้อนหลายเท่า (Multiple Reflection Waves Generated) จากฟอลต์แบบทรานเซียนต์เป็นต้น ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความ แม่นยำในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง และยังมีการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับการ ระบุประเภทฟอลต์ด้วยเทคนิคต่างๆ ไม่ว่าจะใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของทั้งสามเฟส [7] มาใช้ในการวิเคราะห์ หรือใช้หลักการคำนวณสัมประสิทธิ์ จากค่าองค์ประกอบลำดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มาคำนวณ [8] หรือนำมาใช้เป็นข้อมูลทางสถิติ [9] โดยหลักการดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์บนความถี่พื้นฐาน (50Hz) ของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งจะแสดงผลการตอบสนองซ้ำในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

ในช่วงต้นทศวรรษที่ 90 ในต่างประเทศมีการตื่นตัวในการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับ แนวความคิดในการนำเทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent: AI) มาใช้วิเคราะห์อย่าง กว้างขวางทั้งทางด้านทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางด้าน ปัญญาประดิษฐ์ ไม่ว่าจะใช้เทคนิคฟัซซี่โลจิก (Fuzzy Logic) [10] โดยใช้องค์ประกอบของอิมพิ แคนซ์เป็นตัวแปรให้กับฟัซซี่โลจิก โครงข่ายประสาทเทียมแบบต้องควบคุม (Neural Network with Supervised Training) [11] โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ RPF และแบบอิสระ (Neural network with Unsupervised Training) [12] ใช้แผนผังของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ โคโฮแนนท์ เป็นต้นมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้น แต่ยังมีข้อเสียเกี่ยวกับข้อจำกัดที่ ยังคงต้องอาศัยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) ในวิเคราะห์องค์ประกอบ ความถี่พื้นฐาน (50Hz) ของระบบไฟฟ้ากำลัง อยู่ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 1 ไซเคิลเป็นข้อมูล พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ในบางครั้งการใช้สัญญาณองค์ประกอบความถี่ พื้นฐานเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอกับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ รวมทั้งการกำจัดสัญญาณ องค์ประกอบความถี่สูงนั้นจะเป็นการทิ้งข้อมูลที่สำคัญของสัญญาณฟอลต์ออกไปอีกด้วยจาก ข้อเสียดังกล่าว

ในช่วงปลายทศวรรษที่ 90 ได้มีการพัฒนาจากการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่ พื้นฐาน (50Hz) มาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในลักษณะการป้องกันแบบ ทรานเซียนต์ (Transient Based Protection) ซึ่งการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) ถูกนำมาใช้ การวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์แทนการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วการป้องกันแบบทรานเซียนต์ สามารถให้คำนิยามอย่างง่ายว่า “การป้องกันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคพื้นฐานการ ตรวจสอบการกำเนิดฟอลต์แบบทรานเซียนต์ความถี่สูง” ซึ่งการกำเนิดสัญญาณฟอลต์แบบทราน เซียนต์บรรจุข้อมูลไว้อย่างมากมาย เช่นประเภทและทิศทางฟอลต์ ตำแหน่งและเวลาที่ได้รับ

(Sustain Time) เป็นต้น ความรู้และข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับมาถูกจัดให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ทั้งหมด ประกอบไปด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ความถี่กำลังและ ความถี่สูง

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากทางด้านการประมวลผลสัญญาณ และได้มีการเสนอให้เวฟเลตเป็นเครื่องมือการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ (Transients) เนื่องจากการแปลงเวฟเลตนี้เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำทางเวลาที่ดียิ่งขึ้นให้การตอบสนองที่รวดเร็ว และด้วยคุณสมบัติการต่างๆของการแปลงเวฟเลตเช่นการเลื่อนตำแหน่งและการเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งด้วยการแปลงเวฟเลตได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง อาทิเช่นบทความของ Omar A.S. Youssef [13] นำเสนอการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเลต โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง (Details) และความถี่ต่ำ (Approximation) ของค่ากระแสทั้งสามเฟสในสายส่งจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่กำหนดไว้ (Threshold Value) เพื่อระบุประเภทและหาตำแหน่งของพอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่งและบทความของ P. Markming et al [14] ได้นำเสนอเทคนิคการแปลงเวฟเลตเช่นเดียวกันเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเพียงอย่างเดียวและวิเคราะห์สัญญาณพอลต์เพียง ¼ ไซเคิล (5 วินาที) ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ในการระบุประเภทพอลต์ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสซึ่งจะให้ผลตอบสนองในการวิเคราะห์ที่เร็วกว่า

งานวิจัยส่วนใหญ่ได้นำเสนอการวิเคราะห์พอลต์บนสายส่ง แบบพอลต์จุดเดียว (Single Fault) แต่เมื่อเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Simultaneous Fault) ขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสายส่ง อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้อง ในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์บนสายส่งได้ เช่น การระบุเฟสที่ไม่เกิดพอลต์อาจจะวิเคราะห์พบพอลต์ได้ และการหาตำแหน่งของพอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง โดยวิธีคลื่นเดินทาง (Traveling Wave) [6] จะอาศัยการตรวจจับยอดคลื่นแรกที่มาจากพอลต์จุดเดียวกัน แต่เมื่อเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน การตรวจจับยอดคลื่นแรกที่มาจากพอลต์คนละจุด ทำให้การหาตำแหน่งของพอลต์เกิดความผิดพลาดได้ เป็นต้น

จากการศึกษาดำรงและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังจะพบว่าการศึกษารูปการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ในระบบไฟฟ้ากำลังมีน้อยมากส่วนใหญ่จะกล่าวถึงเฉพาะการเกิดพอลต์แบบขนาน และการเกิดพอลต์แบบอนุกรม แต่ก็ยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงการศึกษาวงจรการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดยจะเน้นการอธิบายถึงวิธีการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวคิดใหม่ เกี่ยวกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันบนสายส่ง โดยวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ด้วยการแปลงเวฟเลต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประยุกต์การใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ทั้งในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว (Single Fault) และในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Simultaneous Fault) บนสายส่งวงจรรูกระบบ 500kV โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ กรณีการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบจุดเดียว (Single Fault) และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Simultaneous Fault) ว่ามีพฤติกรรมอย่างไร

2. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีใหม่ (New Algorithm) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การระบุประเภทของฟอลต์ทั้งการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบจุดเดียว (Single Fault) การเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Simultaneous Fault) โดยขั้นตอนวิธีใหม่ จะเป็นการวิเคราะห์บนพื้นฐาน การเกิดฟอลต์ที่คนละตำแหน่ง แต่เป็นเวลาเดียวกัน (ฟอลต์ทั้ง 2 จุดเกิดขึ้น ณ.เวลาที่ 0.08 วินาที) แต่ถ้าเป็นคนละเวลาที่ไม่ห่างกันมาก (เวลาน้อยกว่าตัวรีเลย์ทำงาน) จะมีผลกระทบน้อยมากต่อการระบุประเภทของฟอลต์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ส่วนใหญ่เน้นการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว แต่เมื่อเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง จะส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยมีการตั้งสมมุติฐานของการศึกษาในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ดังนี้

1. เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งจะมีองค์ประกอบความถี่สูงปนอยู่ในความถี่พื้นฐาน (50Hz) ของสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า โดยองค์ประกอบความถี่สูงนี้มีจะบรรจุข้อมูลสำคัญอย่างมากมาสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

2. การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานสั้น เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณที่ลักษณะช่วงเวลาที่ยาวที่คองที่ ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่มีองค์ประกอบความถี่สูง ด้วยการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานสั้นจึงไม่เหมาะสม จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์ซึ่งเรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ต”

3. การแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณที่ได้มีการพัฒนาต่อมาจาก การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานสั้น โดยสามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ คือที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่น้อยลง ในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

4. การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูง ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ในการศึกษาเป็นการศึกษารูปแบบของฟอลต์ที่มีสมมุติฐานว่าเป็นสัญญาณฟอลต์ที่เกิดบนสายส่งวงจรระบบ 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) จากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) ไปยังสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) ที่สามารถเกิดฟอลต์ขึ้นจริง โดยไม่พิจารณาถึงรูปแบบของสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกันเช่น สัญญาณฟ้าผ่า และ สัญญาณสวิตซ์ต่างๆ เป็นต้น

2. ทำการจำลองฟอลต์บนสายส่ง เฉพาะในวงจรที่ 1 เท่านั้น เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในกรณีฟอลต์จุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

3. วิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ใน กรณีการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง ว่ามีพฤติกรรมอย่างไรต่อวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

4. พัฒนาขั้นตอนวิธีใหม่ เพื่อรองรับในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันเพื่อระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ทำการศึกษาการใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการจำลองสัญญาณฟอลต์บนสายส่งในรูปแบบต่างๆ ในสายส่งวงจรคู่และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ

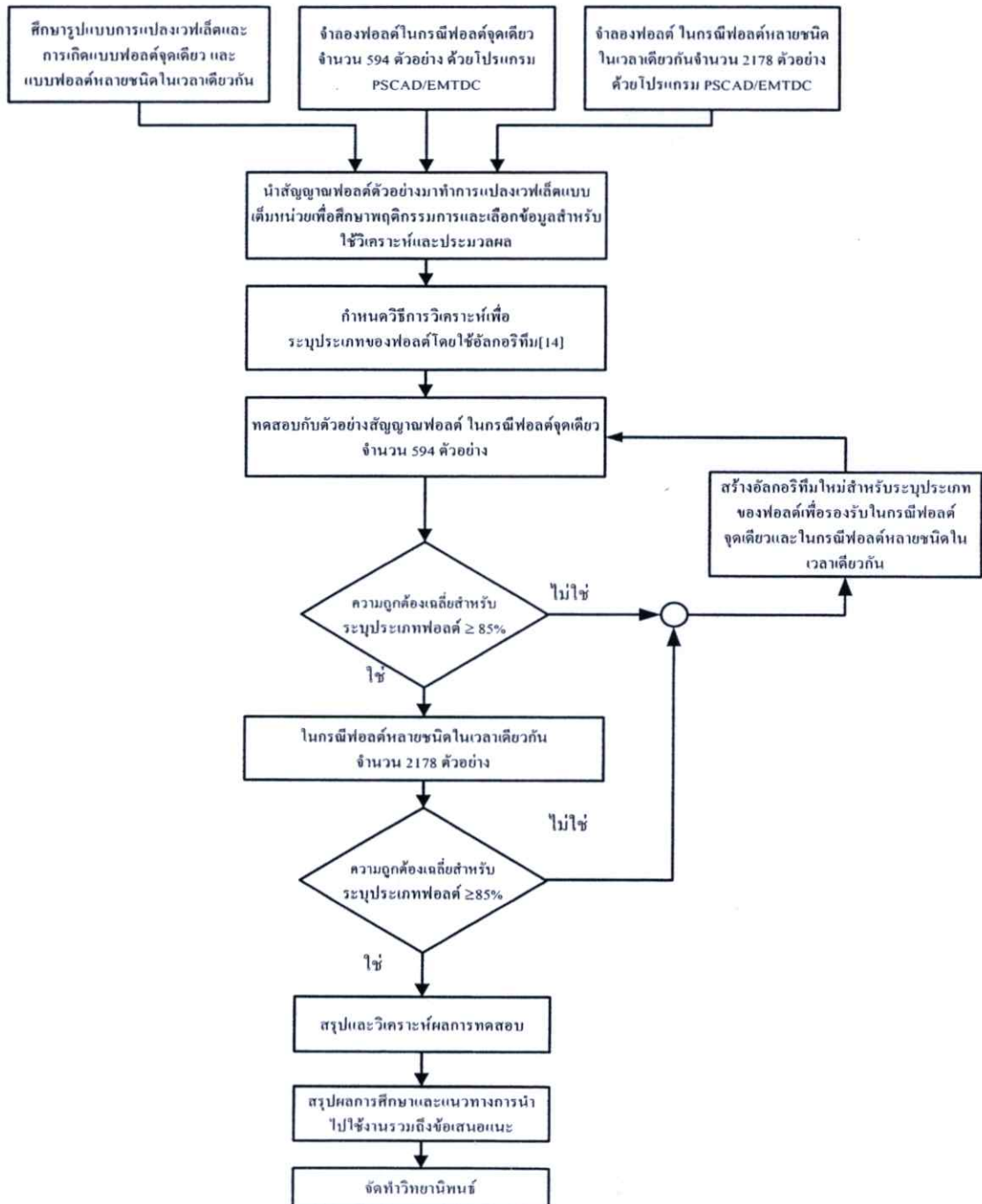
2. ทำการศึกษารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ดที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง และเวฟเล็ดแม่ที่เหมาะสมโดยอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา

3. จำลองสัญญาณฟอลต์ที่แตกต่างกันในกรณีฟอลต์แบบจุดเดียว จำนวน 594 ตัวอย่าง และในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน จำนวน 2178 ตัวอย่างด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC แล้วนำสัญญาณฟอลต์มาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการพิจารณาหาข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ รวมถึงช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ เพื่อนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์และตัดสินใจ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

4. จากขั้นตอนที่ 3 นำผลที่ได้มาทดสอบกับอัลกอริทึมของงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ ระหว่างฟอลต์แบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

5. เมื่อได้ข้อสรุปจากขั้นตอนที่ 4 แล้ว จึงทำการสร้างอัลกอริทึมใหม่เพื่อรองรับในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและเสนอแนวทางการพัฒนาการศึกษาต่อไปซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา สำหรับการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งวงจรระบบ 500 kV โดยทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ ในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ที่เกิดขึ้นบนสายส่งระหว่างสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ไปยังสถานีไฟฟ้าหนองจอก โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ เช่น ฟังผ่า และสัญญาณการสวิตชิงแบบต่างๆ หรือ การแกว่งของพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ โดยทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวในวงจรที่ 1 เท่านั้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำเสนอแนวคิดใหม่ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ ที่เกิดขึ้น เพื่อลดความยุ่งยากของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ ของวิธีเก่า รวมไปถึงนำการแปลงเวฟเล็ตไปใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้

2. สามารถนำผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนารูปแบบการระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์แบบจุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน และนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังได้จริง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

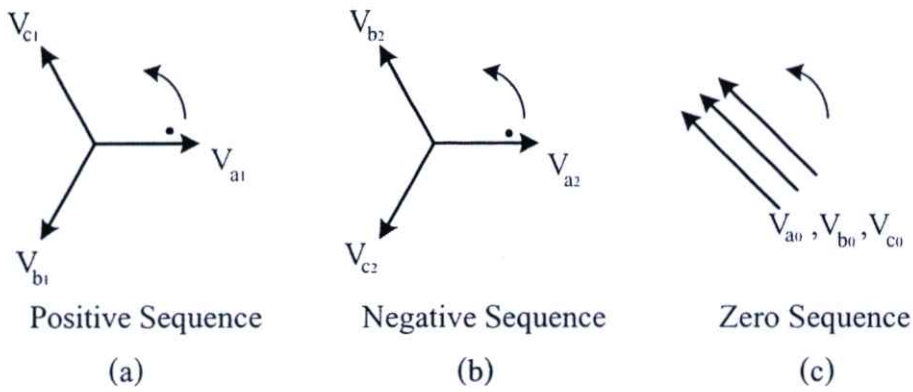
บทที่ 2

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์และระบบป้องกันบนสายส่ง

การคำนวณระดับของฟอลต์ (Fault Level) หรือ ฟอลต์แบบลัดวงจร (Short Circuit Level) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลเรื่องกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ขณะเกิดฟอลต์และนำไปพิจารณาอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานว่ามีพิกัด (Rating) ที่เหมาะสมเพียงใด เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ต้องมีความจุพิกัด (Rated Capacity) ที่เหมาะสมในการตัดกระแสลัดวงจร (Interrupting Fault Current) ได้ อุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ในส่วนที่กระแสฟอลต์ไหลผ่าน เช่น บัสบาร์ (Bus Bar) สายตัวนำ (Cable) และ หม้อแปลงไฟฟ้า (Power Transformer) เป็นต้น ต้องสามารถทนสภาพการเกิดฟอลต์ทั้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น 1 วินาที หรือ 3 วินาที จนกว่าฟอลต์จะถูกกำจัดออกไป โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายทั้งจากความร้อนและทางกล (Overheating and Mechanical Damage) ผลจากการวิเคราะห์ระดับของฟอลต์ (Fault Level) หรือ ฟอลต์แบบลัดวงจร (Short Circuit) สามารถนำไปออกแบบระบบป้องกันที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้อุปกรณ์ที่เสียหายหรือหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น

2.1. องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) [15]

องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาวงจรหลายเฟสในสถานะไม่สมดุลโดย C.L.Fortescue เป็นผู้นำเสนอว่าในระบบ n เฟสที่ไม่สมดุลสามารถที่จะแก้ปัญหาคับด้วยระบบ n เฟส ที่สมดุลได้โดยเรียกว่า องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ในระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส การมีภาระ (Load) 1 เฟส ต่ออยู่ในระบบทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ไม่เท่ากันทำให้เกิดสถานะไม่สมดุลขึ้นในระบบ โดยสมมติให้ระบบเป็นเชิงเส้น (Linear System) การหากระแสไฟฟ้าในระบบไม่สมดุลสามารถใช้วิธีการทับซ้อน (Superposition) โดยการพิจารณาแยกแต่ละลำดับ (Sequence) ของกระแสไฟฟ้า จาก Fortescue's Theorem ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ไม่สมดุลสามารถที่จะคำนวณในแบบสมดุลได้โดยใช้ระบบสมดุลดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 เวกเตอร์ของระบบองค์ประกอบสมมาตร

การแก้ปัญหาวิธีการคำนวณแบบไม่สมดุลของระบบโดยใช้ อักษรย่อของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส กำหนดให้เป็น \hat{V}_a , \hat{V}_b และ \hat{V}_c ตามลำดับ การกำหนดลำดับ (Sequence) ใช้เลข 1 แทน องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component (\hat{V}_{a1})), เลข 2 แทน องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Components (\hat{V}_{a2})) และ เลข 0 แทน องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Components (\hat{V}_{a0})) และเครื่องหมาย “^” ใช้แทนปริมาณทางเฟสเซอร์ ตามลำดับ จากรูปที่ 2.1 (a) แสดงเฟสเซอร์ขององค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence Component), 2.1 (b) แสดงเฟสเซอร์ขององค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence Component) และ 2.1 (c) แสดงเฟสเซอร์ของ องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Component) สามารถจัดรูปแบบแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ให้อยู่ในรูปของ องค์ประกอบลำดับ (Sequence Component) ได้ดังนี้

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a0} + \hat{V}_{a1} + \hat{V}_{a2} \quad (2.1)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_{b0} + \hat{V}_{b1} + \hat{V}_{b2} \quad (2.2)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_{c0} + \hat{V}_{c1} + \hat{V}_{c2} \quad (2.3)$$

ทำการลดตัวแปร \hat{V}_b และ \hat{V}_c โดยทำการแปลงตัวแปรผ่าน a Operator ($a = 1 \angle 120^\circ$) ให้อยู่ในตัวแปร \hat{V}_a เพียงตัวเดียว ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned} \hat{V}_{b0} &= \hat{V}_{a0} & \hat{V}_{c0} &= \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{b1} &= a^2 \hat{V}_{a1} & \hat{V}_{c1} &= a \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{b2} &= a \hat{V}_{a2} & \hat{V}_{c2} &= a^2 \hat{V}_{a2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

นำสมการที่ (2.4) ไปแทนในสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3) จะได้

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a0} + \hat{V}_{a1} + \hat{V}_{a2} \quad (2.5)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_{a0} + a^2 \hat{V}_{a1} + a \hat{V}_{a2} \quad (2.6)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_{a0} + a \hat{V}_{a1} + a^2 \hat{V}_{a2} \quad (2.7)$$

หรืออยู่ในรูปเมตริก คือ

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

ทำการกลับเมตริก A (Invert A) จะได้

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

แล้วนำมาหา \hat{V}_{a0} , \hat{V}_{a1} และ \hat{V}_{a2} โดยนำ \mathbf{A}^{-1} คูณตลอด จะได้สมการที่ (2.11)

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{a0} \\ \hat{V}_{a1} \\ \hat{V}_{a2} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

สังเกตุกลุ่มเวกเตอร์ลำดับบวก มีเฟสเรียงกันแบบระบบ ABC ซึ่งมีขนาดของเวกเตอร์ทั้ง 3 เวกเตอร์เท่ากันและมุมห่างกัน 120 องศา จึงเรียกว่าเวกเตอร์ลำดับบวก (Positive Sequence Vector) กลุ่มเวกเตอร์ลำดับลบ มีเฟสเรียงกันแบบระบบ CAB ซึ่งมีขนาดของเวกเตอร์ทั้ง 3 เวกเตอร์เท่ากันและมุมห่างกัน 120 องศา จึงเรียกว่าเวกเตอร์ลำดับลบ (Negative Sequence Vector) และกลุ่มเวกเตอร์ลำดับศูนย์ (Zero Sequence Vector) ซึ่งมีขนาดของเวกเตอร์ทั้ง 3 เวกเตอร์เท่ากันและมุมวางห่างกัน 0 องศา

2.2 การวิเคราะห์ฟอลต์แบบจุดเดียว (Single Fault) [16]

ฟอลต์ (Fault) หมายถึง เป็นความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแบ่งฟอลต์ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ฟอลต์แบบอนุกรม (Series Fault) ได้แก่ การแตกหักหรือตัวนำขาดทำให้มีการเปิดวงจรออก หรือเรียกอีกอย่างว่าฟอลต์แบบเปิดวงจร (Open Circuit)

2. ฟอลต์แบบขนาน (Parallel Fault) ได้แก่ การลัดวงจรระหว่าง เฟส-เฟส, เฟส-เฟส-ดิน หรือ เฟส-ดิน เป็นต้น และสามารถเรียกได้อีกอย่างว่าฟอลต์แบบลัดวงจร (Short Circuit) ฟอลต์แบบขนานมีผลทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าฟอลต์แบบอนุกรมเพราะกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีขนาดสูงกว่ามากทำให้อุณหภูมิสูงในอุปกรณ์ถ้าไม่รีบกำจัดฟอลต์ออกจากระบบจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการวิเคราะห์จะเน้นหนักไปทางการวิเคราะห์ฟอลต์แบบขนานเพื่อหาขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน แต่ฟอลต์แบบอนุกรมจะวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพในการจ่ายไฟ

3. ฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน (Simultaneous Fault) หมายถึง ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันหลายชนิดในเวลาเดียวกันบนสายส่ง

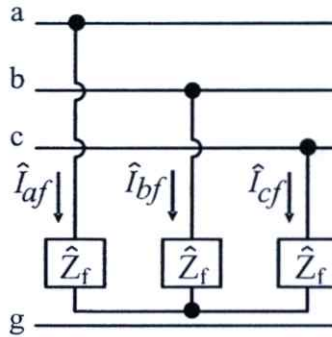
การวิเคราะห์ฟอลต์แบบจุดเดียว (Single Fault) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์โดยใช้หลักการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) มาพิจารณาโดยแยกองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในลำดับเน็ตเวิร์ค (Network Sequence) คือ เน็ตเวิร์คลำดับบวก (Positive Sequence Network), เน็ตเวิร์คลำดับลบ (Negative Sequence Network) และ เน็ตเวิร์คลำดับศูนย์ (Zero Sequence Network) ซึ่งการคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์แบบจุดเดียว (Single Fault) สามารถแบ่งได้ทั้งหมด 4 ประเภทดังต่อไปนี้

- ฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร (Three Phase Fault)
- ฟอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน (Single Line to Ground Fault)
- ฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส (Line to Line Fault)
- ฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน (Double Line to Ground Fault)

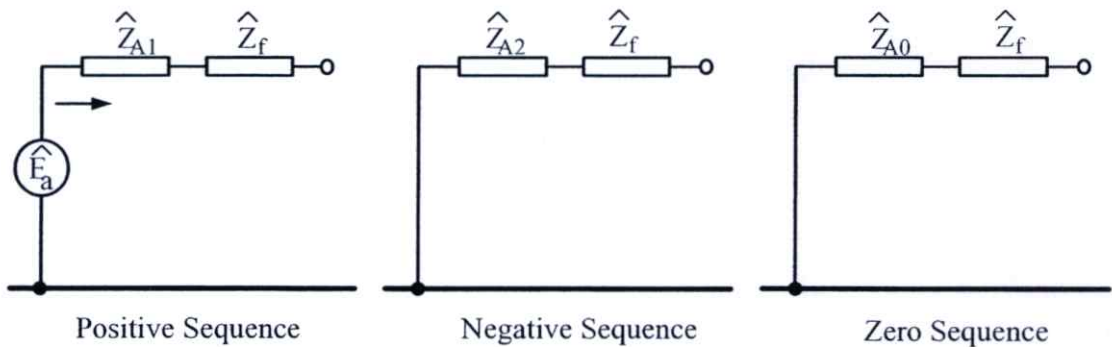
ฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร (Three Phase Fault) เป็นฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) ส่วนฟอลต์ 3 ประเภทหลังเป็นฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault)

2.2.1 การคำนวณฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร (Three Phase Fault)

ฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจรเกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำทั้งสามเส้นเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสทั้งสามเฟส และวงจรสมมูลย์ในกรณีการเกิดฟอลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร



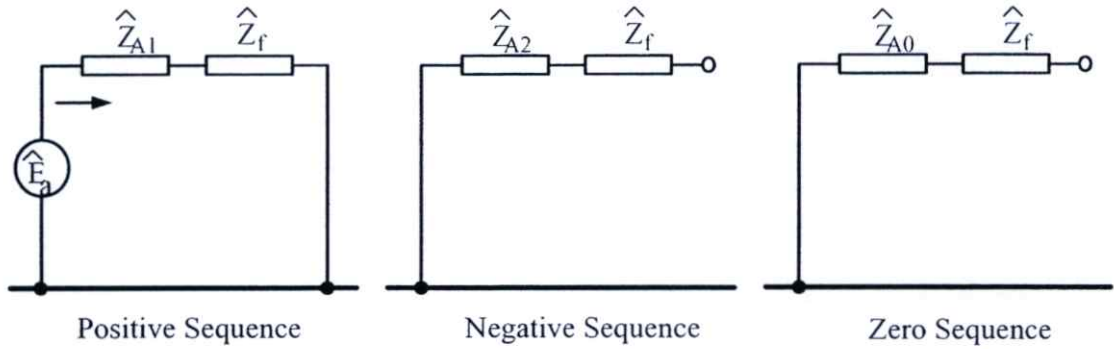
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ในกรณีการเกิดฟอลต์

การคำนวณเริ่มจากหาค่ากระแสไฟฟ้าใน ลำดับเน็ตเวิร์ค (Network Sequence) โดยเงื่อนไขของกรณีเกิด ฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร

$$\hat{V}_a = \hat{V}_b = \hat{V}_c = 0$$

$$\hat{I}_a = \hat{I}_b = \hat{I}_c$$

สามารถทำการเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์ค (Network Sequence) องค์กรประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์กรประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และองค์กรประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ได้ดังรูปที่ 2.4

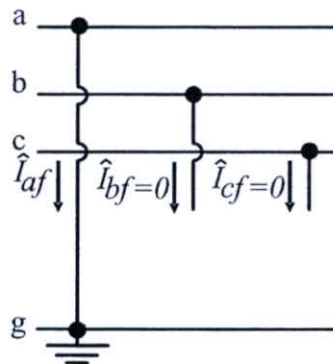


รูปที่ 2.4 การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดฟอลต์แบบสามเฟสลัดวงจร

จากรูปที่ 2.4 สามารถหากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$\hat{I}_{af} = \hat{I}_{a1} = \frac{\hat{E}_a}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_f} \quad (2.14)$$

2.2.2 การคำนวณฟอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน (Single Line to Ground Fault)



รูปที่ 2.5 ฟอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน

โดยเงื่อนไขของกรณีเกิดฟอลต์แบบเฟสลัดวงจรลงดิน

$$\begin{aligned} \hat{V}_a &= 0 \\ \hat{I}_b &= \hat{I}_c = 0 \end{aligned}$$

แยกองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้อยู่รูปแบบขององค์ประกอบสมมาตรตามสมการ (2.11) และ (2.13) ได้ดังนี้

$$\hat{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c)$$

$$\hat{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + a\hat{I}_b + a^2\hat{I}_c)$$

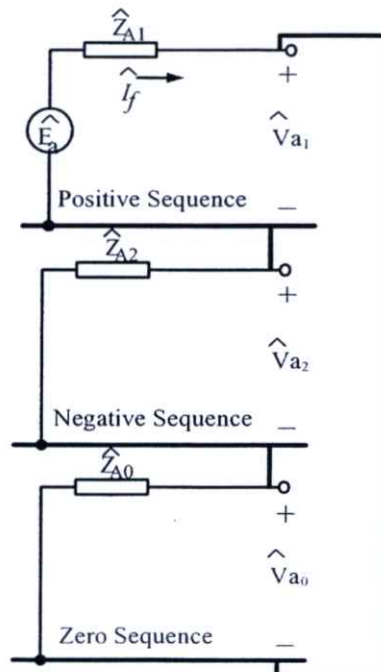
$$\hat{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + a^2\hat{I}_b + a\hat{I}_c)$$

เนื่องจาก $\hat{I}_b = \hat{I}_c = 0$ และ $\hat{V}_a = 0$ ดังนั้น

$$\hat{I}_{a1} = \hat{I}_{a2} = \hat{I}_{a0} = \frac{\hat{I}_a}{3} \quad (2.15)$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a1} + \hat{V}_{a2} + \hat{V}_{a0} = 0 \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.15) และสมการ (2.16) สามารถทำการเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์ค (Network Sequence) องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ได้ดังรูปที่ 2.6

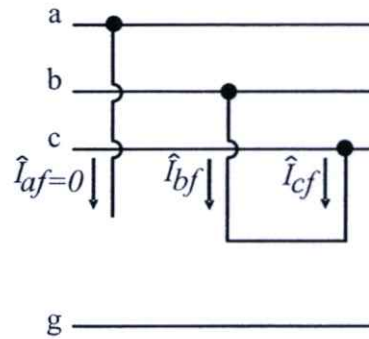


รูปที่ 2.6 การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดฟอลต์แบบเฟสตัดวงจรลงดิน

จากรูปที่ 2.6 สามารถหากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$\hat{I}_f = \frac{3\hat{E}_a}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0}} \quad (2.17)$$

2.2.3 การคำนวณฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส (Line to Line Fault)



รูปที่ 2.7 ฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส

โดยเงื่อนไขของกรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส

$$\begin{aligned} \hat{V}_b &= \hat{V}_c \\ \hat{I}_a &= 0 \\ \hat{I}_b &= -\hat{I}_c \end{aligned}$$

แยกองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้อยู่รูปแบบองค์ประกอบสมมาตรตามสมการ (2.11) และ (2.13) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{I}_{a0} &= \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c) \\ \hat{I}_{a1} &= \frac{1}{3}(\hat{I}_a + a\hat{I}_b + a^2\hat{I}_c) \\ \hat{I}_{a2} &= \frac{1}{3}(\hat{I}_a + a^2\hat{I}_b + a\hat{I}_c) \end{aligned}$$

เนื่องจาก $\hat{I}_a = 0$ และ $\hat{I}_b = -\hat{I}_c$ ดังนั้น

$$\hat{I}_{a0} = 0 \quad (2.18)$$

$$\hat{I}_{a2} = -\hat{I}_{a1} \quad (2.19)$$

และ

$$\hat{V}_{a0} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + \hat{V}_b + \hat{V}_c)$$

$$\hat{V}_{a1} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + a\hat{V}_b + a^2\hat{V}_c)$$

$$\hat{V}_{a2} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + a^2\hat{V}_b + a\hat{V}_c)$$

เนื่องจาก $\hat{V}_b = \hat{V}_c$ ดังนั้น

$$\hat{V}_{a0} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + 2\hat{V}_b) \quad (2.20)$$

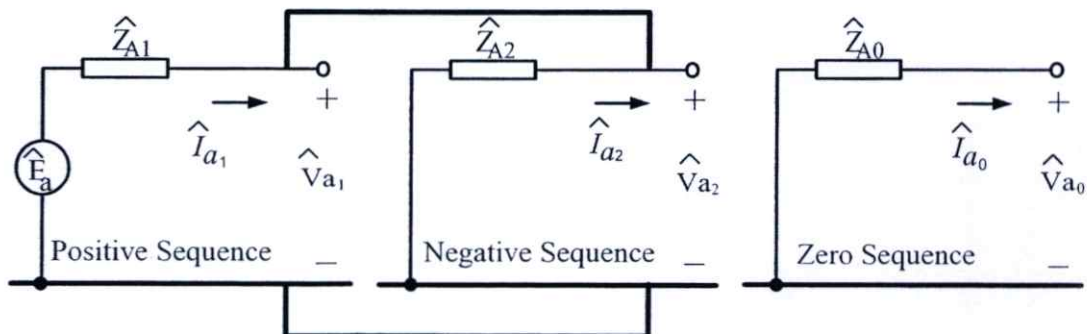
$$\hat{V}_{a1} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + a\hat{V}_b + a^2\hat{V}_c) \quad (2.21)$$

$$\hat{V}_{a2} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + a^2\hat{V}_b + a\hat{V}_c) \quad (2.22)$$

เพราะฉะนั้น

$$\hat{V}_{a1} = \hat{V}_{a2} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.18), สมการ (2.19) และสมการ (2.23) สามารถทำการเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์ค (Network Sequence) องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟส

จากรูปที่ 2.8 สามารถหากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$\hat{I}_{a1} = \frac{\hat{E}_a}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2}} \quad (2.24)$$

เพราะฉะนั้น

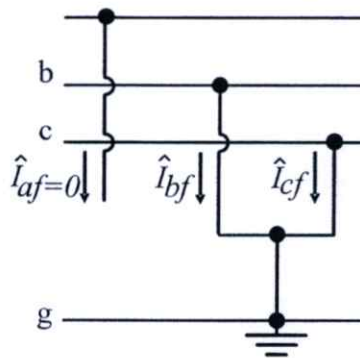
$$\begin{aligned} \hat{I}_a &= \hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2} + \hat{I}_{a0} \\ &= \hat{I}_{a1} - \hat{I}_{a1} = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_b &= \hat{I}_{a0} + a^2 \hat{I}_{a1} + a \hat{I}_{a2} \\ &= \hat{I}_{a0} + a^2 \hat{I}_{a1} - a \hat{I}_{a1} \\ &= (a^2 - a) \frac{\hat{E}_a}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

เนื่องจาก $\hat{I}_b = -\hat{I}_c$ ดังนั้น

$$\hat{I}_c = (a - a^2) \frac{\hat{E}_a}{\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2}} \quad (2.27)$$

2.2.4 การคำนวณฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน (Double Line to Ground Fault)



รูปที่ 2.9 ฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน

โดยเงื่อนไขของกรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสลัดวงจรลงดิน

$$\begin{aligned} \hat{V}_b &= \hat{V}_c = 0 \\ \hat{I}_a &= 0 \end{aligned}$$

แยกองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้อยู่รูปแบบขององค์ประกอบสมมาตรตามสมการ (2.11) และ (2.13) ได้ดังนี้

$$\hat{V}_{a0} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + \hat{V}_b + \hat{V}_c)$$

$$\hat{V}_{a1} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + a\hat{V}_b + a^2\hat{V}_c)$$

$$\hat{V}_{a2} = \frac{1}{3}(\hat{V}_a + a^2\hat{V}_b + a\hat{V}_c)$$

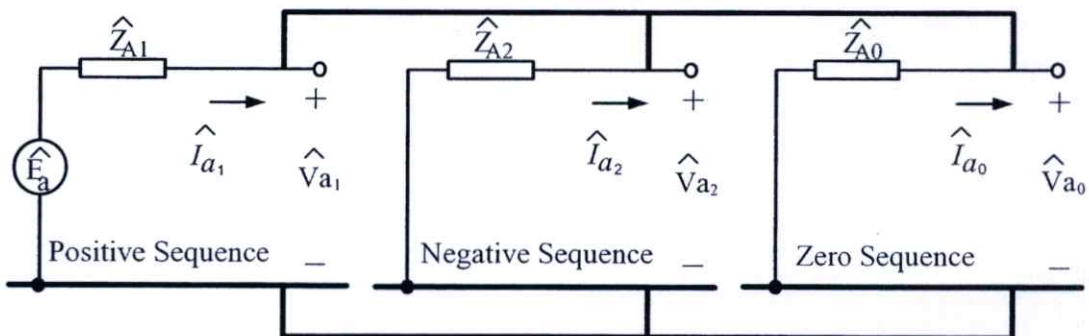
เนื่องจาก $\hat{V}_b = \hat{V}_c = 0$ ดังนั้น

$$\hat{V}_{a0} = \hat{V}_{a1} = \hat{V}_{a2} = \frac{\hat{V}_a}{3} \quad (2.28)$$

และ

$$\hat{I}_a = \hat{I}_{a0} + \hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2} = 0 \quad (2.29)$$

จากสมการ(2.28) และสมการ (2.29) สามารถทำการเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์ค (Network Sequence) องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์คกรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสกับเฟสตัดวงจรลงดิน

จากรูปที่ 2.10 สามารถหากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$\hat{I}_{a1} = \frac{\hat{E}a}{\hat{Z}_{A1} + (\hat{Z}_{A2} // \hat{Z}_{A0})} \quad (2.30)$$

$$\hat{I}_{a2} = -\frac{\hat{Z}_{A0}}{\hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0}} \hat{I}_{a1} \quad (2.31)$$

$$\hat{I}_{a0} = -\frac{\hat{Z}_{A2}}{\hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0}} \hat{I}_{a1} \quad (2.32)$$

และ

$$\hat{V}_{a1} = \hat{E}a - \hat{Z}_{A1} \hat{I}_{a1} \quad (2.33)$$

$$\hat{V}_{a2} = -\hat{Z}_{A2} \hat{I}_{a2} \quad (2.34)$$

$$\hat{V}_{a0} = -\hat{Z}_{A0} \hat{I}_{a0} \quad (2.35)$$

เพราะฉะนั้น

$$\hat{I}_a = (\hat{I}_{a0} + \hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2}) = 0 \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_b &= (\hat{I}_{a0} + a^2 \hat{I}_{a1} + a \hat{I}_{a2}) \\ &= (a^2 - a) \hat{E}a \left[\frac{\hat{Z}_{A0} - a \hat{Z}_{A2}}{\hat{Z}_{A1} \hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0} (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2})} \right] \end{aligned} \quad (2.37)$$

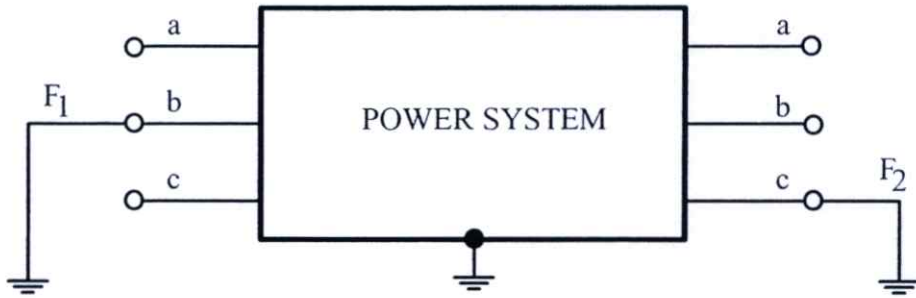
$$\begin{aligned} \hat{I}_c &= (\hat{I}_{a0} + a \hat{I}_{a1} + a^2 \hat{I}_{a2}) \\ &= (a - a^2) \hat{E}a \left[\frac{\hat{Z}_{A0} - a \hat{Z}_{A2}}{\hat{Z}_{A1} \hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0} (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2})} \right] \end{aligned} \quad (2.38)$$

2.3 การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน (Simultaneous Fault) [17]

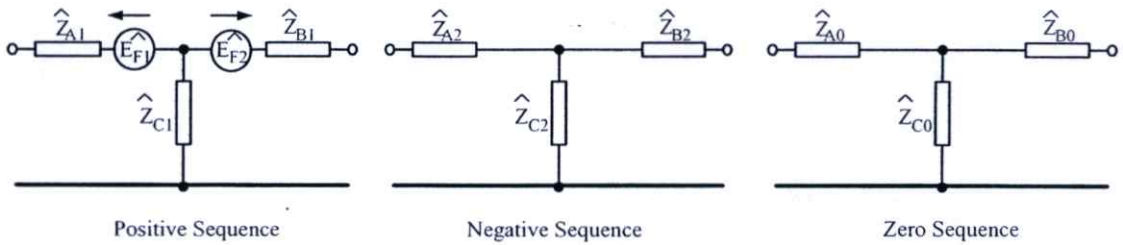
การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน (Simultaneous Fault) ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกันในระบบทำได้เช่นเดียวกับกรณีเกิดฟอลต์ที่จุดเดียว (Single Fault) โดยพิจารณาจากค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ โดยค่าที่ได้ถูกนำไปคำนวณหาองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เหลือจากระบบไฟฟ้าไปยังตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ทั้ง 2 จุด

วิทยานิพนธ์นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณการเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีเกิดฟอลต์เฟส B ลัดวงจรลงดิน (BG) เกิดที่ตำแหน่ง F₁ และ ฟอลต์เฟส C ลัดวงจรลงดิน (CG) เกิดที่ตำแหน่ง F₂ วงจรสมมูลย์ในกรณีการเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดใน

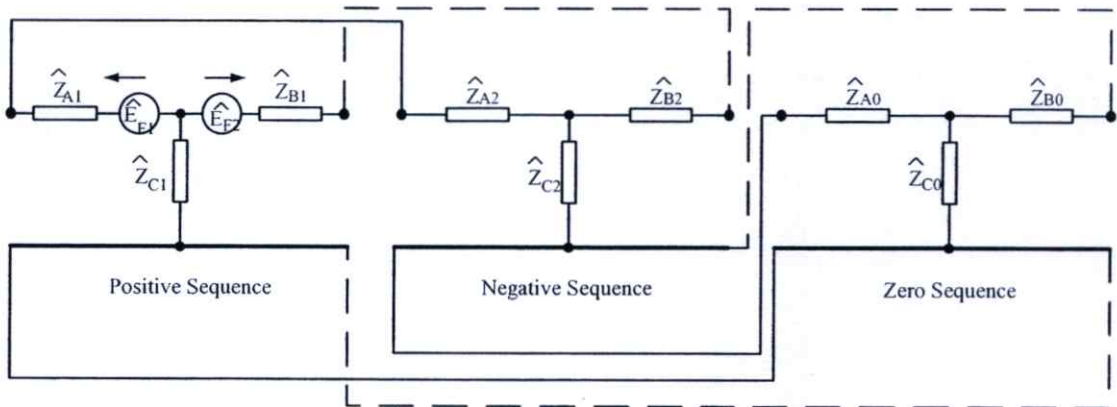
เวลาเดียวกันและการเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์กกรณีเกิดกรณีฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลในกรณีฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.13 การเชื่อมโยงลำดับเน็ตเวิร์กกรณีเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน

โดยจะพิจารณาที่ตำแหน่ง F_1 เป็นกรณีเกิดฟอลต์เฟส B ลัดวงจรลงดิน (BG)

$$\hat{V}_{aF1} = 0$$

$$\hat{I}_{aF1} = \hat{I}_{cF1} = 0$$

แยกองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบขององค์ประกอบสมมาตรตามสมการ (2.11) และ (2.13) ได้ดังนี้

$$\hat{I}_{aF1} = \hat{I}_{a0F1} + \hat{I}_{a1F1} + \hat{I}_{a2F1} = 0$$

$$\hat{I}_{bF1} = \hat{I}_{a0F1} + a^2 \hat{I}_{a1F1} + a \hat{I}_{a2F1}$$

$$\hat{I}_{cF1} = \hat{I}_{a0F1} + a \hat{I}_{a1F1} + a^2 \hat{I}_{a2F1} = 0$$

ดังนั้น

$$\hat{I}_{bF1} = 3a^2 \hat{I}_{a1F1} \quad (2.39)$$

โดยจะพิจารณาที่ตำแหน่ง F_2 เป็นกรณีเกิดฟอลต์เฟส C ลัดวงจรลงดิน (CG)

$$\hat{V}_{cF2} = 0$$

$$\hat{I}_{aF2} = \hat{I}_{bF2} = 0$$

แยกองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบขององค์ประกอบสมมาตรตามสมการ (2.11) และ (2.13) ได้ดังนี้

$$\hat{I}_{aF2} = \hat{I}_{a0F2} + \hat{I}_{a1F2} + \hat{I}_{a2F2} = 0$$

$$\hat{I}_{bF2} = \hat{I}_{a0F2} + a^2 \hat{I}_{a1F2} + a \hat{I}_{a2F2} = 0$$

$$\hat{I}_{cF2} = \hat{I}_{a0F2} + a \hat{I}_{a1F2} + a^2 \hat{I}_{a2F2}$$

ดังนั้น

$$\hat{I}_{cF1} = 3a \hat{I}_{a1F2} \quad (2.40)$$

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ F_1

$$\begin{aligned} \hat{V}_{bF1} = & a^2 \hat{E}_{F1} - a^2 \hat{I}_{a1F1} (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{C1}) - a \hat{I}_{a2F1} (\hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{C2}) - \hat{I}_{a0F1} (\hat{Z}_{A0} + \hat{Z}_{C0}) \\ & - a^2 \hat{I}_{a1F2} \hat{Z}_{C1} - a \hat{I}_{a2F2} \hat{Z}_{C2} - \hat{I}_{a0F2} \hat{Z}_{C0} = 0 \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_{F1} = & \hat{I}_{a1F1} [(\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0}) + (\hat{Z}_{C1} + \hat{Z}_{C2} + \hat{Z}_{C0})] \\ & + \hat{I}_{a1F2} (\hat{Z}_{C1} + a \hat{Z}_{C2} + a^2 \hat{Z}_{C0}) \end{aligned} \quad (2.42)$$

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ F_2

$$\begin{aligned} \hat{V}_{cF2} = & a \hat{E}_{F2} - a \hat{I}_{a1F2} (\hat{Z}_{B1} + \hat{Z}_{C1}) - a^2 \hat{I}_{a2F2} (\hat{Z}_{B2} + \hat{Z}_{C2}) - \hat{I}_{a0F2} (\hat{Z}_{B0} + \hat{Z}_{C0}) \\ & - a \hat{I}_{a1F1} \hat{Z}_{C1} - a^2 \hat{I}_{a2F1} \hat{Z}_{C2} - \hat{I}_{a0F1} \hat{Z}_{C0} = 0 \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_{F2} = & \hat{I}_{a1F2} [(\hat{Z}_{B1} + \hat{Z}_{B2} + \hat{Z}_{B0}) + (\hat{Z}_{C1} + \hat{Z}_{C2} + \hat{Z}_{C0})] \\ & + \hat{I}_{a1F1} (\hat{Z}_{C1} + a^2 \hat{Z}_{C2} + a \hat{Z}_{C0}) \end{aligned} \quad (2.44)$$

โดยกำหนดให้

$$G = (\hat{Z}_{B1} + \hat{Z}_{B2} + \hat{Z}_{B0}) + (\hat{Z}_{C1} + \hat{Z}_{C2} + \hat{Z}_{C0}) \quad (2.45)$$

$$H = \hat{Z}_{C1} + a \hat{Z}_{C2} + a^2 \hat{Z}_{C0} \quad (2.46)$$

$$J = (\hat{Z}_{A1} + \hat{Z}_{A2} + \hat{Z}_{A0}) + (\hat{Z}_{C1} + \hat{Z}_{C2} + \hat{Z}_{C0}) \quad (2.47)$$

$$K = \hat{Z}_{C1} + a^2 \hat{Z}_{C2} + a \hat{Z}_{C0} \quad (2.48)$$

เพราะฉะนั้น

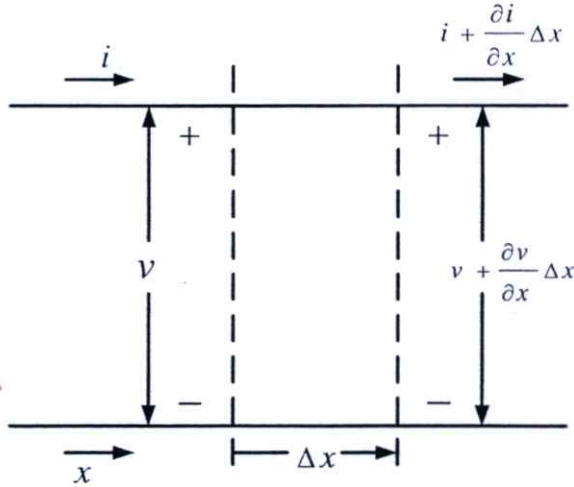
$$\hat{I}_{bF1} = 3a^2 [(G\hat{E}_{F1} - H\hat{E}_{F2}) / (GJ - HK)] \quad (2.49)$$

$$\hat{I}_{cF1} = 3a [(J\hat{E}_{F2} - K\hat{E}_{F1}) / (GJ - HK)] \quad (2.50)$$

2.4 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory) [6]

การศึกษาเสิร์จ (Surge) บนสายส่งนั้นมีความซับซ้อนมาก ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีของสายส่งที่ไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากเป็นแบบการศึกษาที่ดี โดยเฉพาะเมื่อความสูญเสียจากค่า ωL และ ωC มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า R และ G สำหรับเสิร์จฟ้าผ่า (Lighting Surge) บนสายส่งนั้นเป็นการศึกษาสายส่งแบบความสูญเสียต่ำซึ่งเป็นแบบที่ง่ายต่อการศึกษาในขั้นพื้นฐาน และสามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องศึกษาทฤษฎีที่มีความซับซ้อนได้ แต่ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสำหรับสายส่ง

แบบยาวด้วยการกระจายแบบคงที่ ซึ่งทำการวัดระยะทาง x ตามความยาวของสายส่งจากปลายด้านส่ง (Sending Ends) ไปยังส่วนย่อยของความยาวที่แตกต่างกัน Δx ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง ณ เฟสใดๆ (v และ i เป็นฟังก์ชันของ x และ t)

จากรูปที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้า v และกระแสไฟฟ้า i เป็นฟังก์ชันของทั้ง x และ t ดังนั้นต้องใช้การหาอนุพันธ์บางส่วน (Partial Derivative) โดยแรงดันไฟฟ้าอนุกรมที่ตกคร่อมส่วนย่อยของความยาวคือ

$$i(R\Delta x) + (L\Delta x) \frac{\partial i}{\partial t}$$

และสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.51)$$

เครื่องหมายลบมีความจำเป็นเพราะว่าค่าของ $v + (\partial v / \partial x) \Delta x$ ต้องน้อยกว่าค่าของ v สำหรับค่าบวกของ v และ $\partial i / \partial t$ และในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = - \left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \Delta x \quad (2.52)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.51) และ (2.52) ด้วย Δx โดยสมมติว่าเป็นสายส่งที่มีความสูญเสียต่ำจึงกำหนดให้ค่า R และ G จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการที่ (2.51) และ (2.52) จึงมีค่าเป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.53)$$

และ

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.54)$$

ในตอนนี้สามารถกำจัดเทอมของ i ด้วยการหาอนุพันธ์บางส่วนทั้ง 2 เทอมในสมการที่(2.53) ด้วยตัวแปร x และสมการที่ (2.54) ด้วยตัวแปร t ดังนี้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad (2.55)$$

และ

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.56)$$

จากขั้นตอนนี้จะได้เทอมของ $\partial^2 i / \partial x \partial t$ ซึ่งมีอยู่ทั้ง 2 ข้างของสมการจะถูกกำจัดออก ดังนั้นจะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.57)$$

ซึ่งสมการที่ (2.57) นั้นเรียกว่า “สมการคลื่นเดินทางของสายส่งแบบความสูญเสียต่ำ” ผลลัพธ์ของสมการจะเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ และนิพจน์ของแรงดันไฟฟ้าดังเทอมต่อไปนี้

$$v = f(x - vt) \quad (2.58)$$

ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ได้มีการอธิบายความหมายแต่ต้องมีค่าเดียว โดยที่ค่าคงที่ v ต้องมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ถ้า x มีหน่วยเป็นเมตรและเวลา t มีหน่วยเป็นวินาที สามารถพิสูจน์คำตอบของสมการนี้ได้โดยแทนที่อนุพันธ์บางส่วนลำดับสองของ v ลงในสมการที่ (2.57) ในการหาค่า v ในขั้นแรกนั้นต้องทำการเปลี่ยนตัวแปรซึ่งจะได้

$$u = x - vt \quad (2.59)$$

และเขียนได้เป็น

$$v(x, t) = f(u) \quad (2.60)$$

แล้ว

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial f(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \\ &= -v \frac{\partial f(u)}{\partial u} \end{aligned} \quad (2.61)$$

และ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.62)$$

ในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.63)$$

แทนค่าอนุพันธ์บางส่วนอันดับ 2 ของ v ในสมการที่ (2.57) ซึ่งจะได้

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.64)$$

และเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมการที่ (2.58) เป็นคำตอบของสมการที่ (2.57) ถ้า

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.65)$$

เทอมของแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (2.58) คือคลื่นเดินทางในทิศทาง x บวก จากรูปที่ 2.15 แสดงฟังก์ชันของ $x - vt$ ซึ่งคล้ายกับรูปร่างของคลื่นแรงดันไฟฟ้าคงที่ เดินทางตามความยาวสายส่งซึ่งเกิดจากฟ้าผ่าโดยฟังก์ชันนี้แสดงค่า 2 ค่าของเวลาคือ t_1 และ t_2 ซึ่ง $t_2 > t_1$ เมื่อผู้สังเกตเดินไปกับคลื่นและอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมบนคลื่นนั้นซึ่งพบว่ารูปร่างของคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่เดินทางนี้จะยังคงรูปร่างเหมือนเดิมตามสมการที่ (2.66)

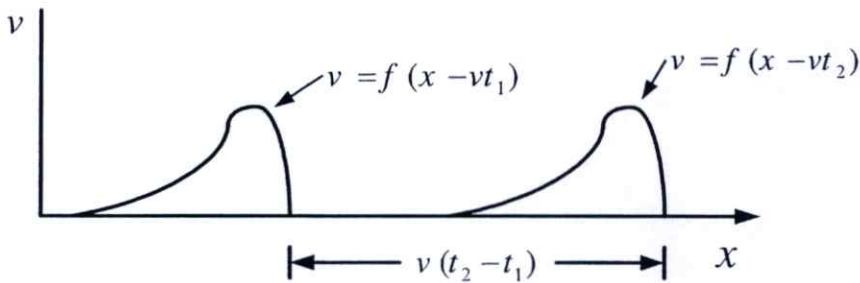
$$x - vt = \text{a constant} \quad (2.66)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.67) คือ

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/s} \quad (2.67)$$

เมื่อ L และ C มีหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร (H/m) และฟาร์ดต่อเมตร (F/m) ตามลำดับดังนั้นคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่เดินทางในทิศทางบวก x ด้วยความเร็ว v ฟังก์ชันของ $x + vt$ สามารถแสดงเป็นคำตอบของสมการที่ (2.58) และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้สามารถแปลงคลื่นเดินทางในทิศทางลบ x โดยทั่วไปมีคำตอบของสมการดังนี้

$$v = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (2.68)$$



รูปที่ 2.15 แสดงคลื่นของแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ ที่เวลา t_1 และ t_2

ซึ่งสมการคำตอบนี้เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งส่วนที่เดินทางไปด้านหน้า และส่วนที่เดินทางไปด้านหลังบนสายส่ง โดยกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตเฉพาะสำหรับส่วนประกอบแต่ละส่วนไว้ ถ้าคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Forward Traveling Wave) ซึ่งเรียกว่า คลื่นอินซิเดนซ์ (Incident)

ดังสมการที่ (2.69)

$$v^+ = f_1(x - vt) \quad (2.69)$$

คลื่นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุและสามารถนิยามได้เป็น

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{L/C}} f_1(x - vt) \quad (2.70)$$

สามารถพิสูจน์ได้โดยแทนที่ค่าของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (2.53) โดยให้ v เท่ากับ $1/\sqrt{LC}$ ในลักษณะเดียวกันคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหลัง (Backward Traveling Wave) ของแรงดันไฟฟ้าจะมีสมการดังนี้

$$v^- = f_2(x + vt) \quad (2.71)$$

และลักษณะของกระแสไฟฟ้า คือ

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{LC}} f_2(x + vt) \quad (2.72)$$

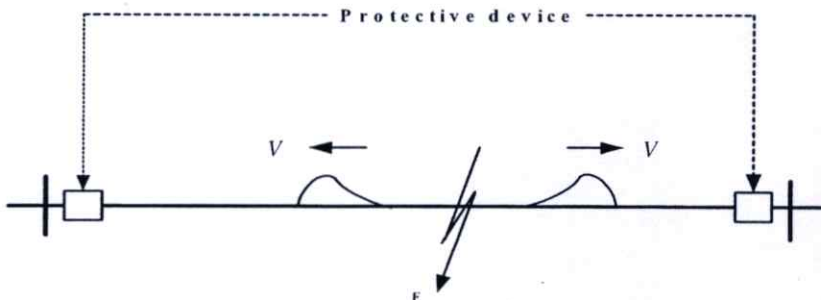
จากสมการที่ (2.69) และ (2.70) จะได้ว่า

$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.73)$$

และจากสมการที่ (2.71) และ (2.72) จะได้

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.74)$$

ถ้าสมมติให้กระแสไฟฟ้าทิศทางบวกของ i^- อยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเดินทางถอยหลัง (Back-Ward) แล้วเครื่องหมายลบจะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายบวกในสมการที่ (2.72) และ (2.74) เพื่อเลือกที่จะรักษาทิศทางตำแหน่ง x ให้เป็นกระแสไฟฟ้าบวกทั้งคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Forward Moving Wave) และคลื่นที่เคลื่อนที่ถอยหลัง (Backward Moving Wave)



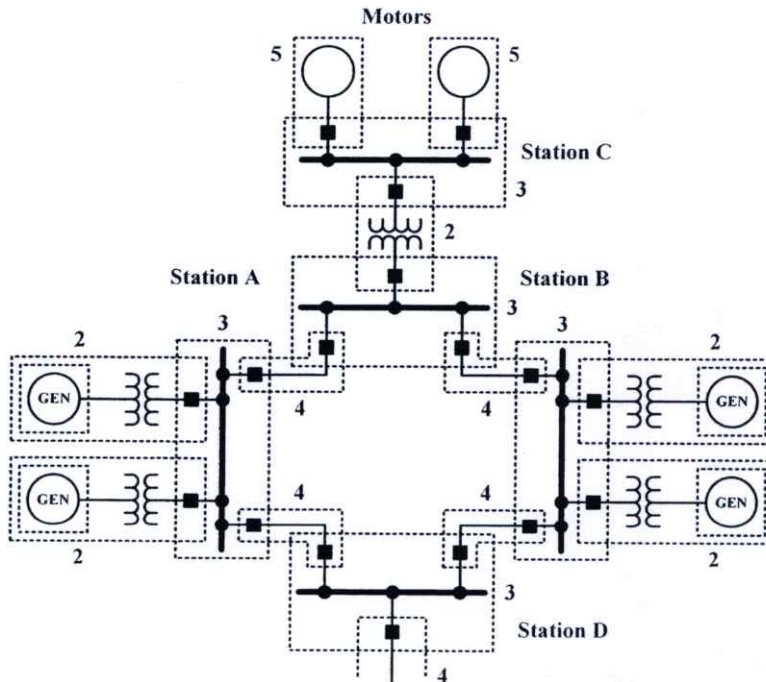
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสภาวะที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง

อัตราส่วนของ v^+ และ i^+ เรียกว่า อิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่ง (Characteristic Impedance: Z_c) เมื่อ R และ G มีค่าเป็นศูนย์ จากหลักการของคลื่นเดินทางนี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะของสัญญาณฟอลต์ได้ดังนี้ คือ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น ณ จุดใดๆบนสายส่งจะมีสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่งด้วยความเร็วซึ่งถูกกำหนดด้วยสมการที่ (2.67) ซึ่งสามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์กับหลักการของอุปกรณ์ป้องกันสายส่งโดยเฉพาะส่วนที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณ

2.5 ระบบการป้องกันสายส่ง [18]

ระบบการป้องกันไฟฟ้าที่ดีย่อมไม่เป็นผลกระทบกระเทือนต่อระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นหน้าที่ของระบบการป้องกันไฟฟ้าที่ดี ก็คือต้องสามารถตัดระบบไฟฟ้าออกจากวงจรให้รวดเร็วที่สุดในกรณีที่เกิดสถานะผิดปกติในระบบไฟฟ้า ในการป้องกันระบบไฟฟ้าจะแบ่งขอบเขตการป้องกันตามชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้แก่

1. ขอบเขตการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Zone)
2. ขอบเขตการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Zone)
3. ขอบเขตการป้องกันบัส (Bus Zone)
4. ขอบเขตการป้องกันสายส่งและสายจำหน่าย (Transmission and Distribution Zone)
5. ขอบเขตการป้องกันมอเตอร์ (Motor Zone)



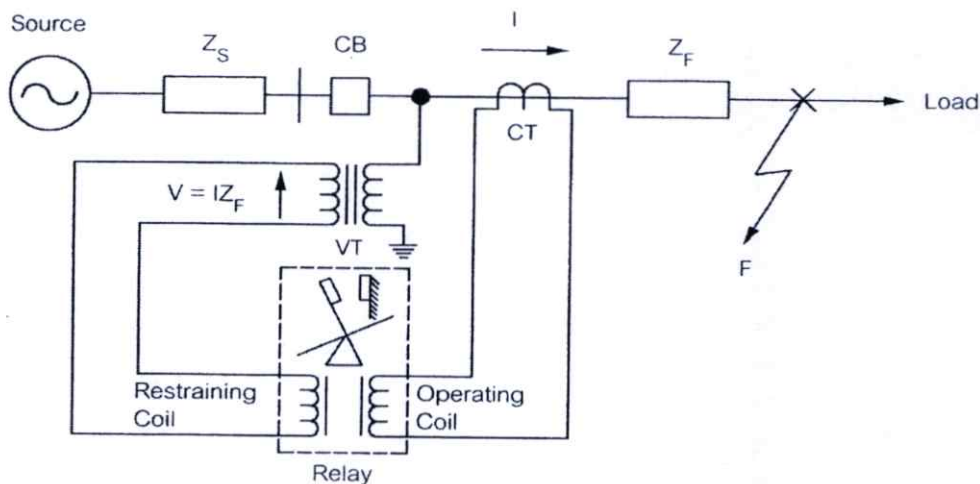
รูปที่ 2.17 แสดงเขตการป้องกันตามชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะขอบเขตการป้องกันสายส่ง โดยส่วนการป้องกันสายส่ง (Transmission Line) จะใช้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) และการป้องกันแบบใช้ระบบสื่อสาร (Pilot Protection)

2.5.1 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection) [19]

ในการป้องกันสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์แปรตามขนาดของความยาวของสายส่งนั้นจะใช้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) เป็นตัวป้องกันโดยต้องมีอินพุตมาให้รีเลย์ 2 ตัวคือแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (PT) และกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงกระแส (CT) ในอดีตการป้องกันสายส่งมักจะใช้รีเลย์กระแสเกินแต่เมื่อระบบขยายตัวขึ้นก็พบว่า รีเลย์กระแสเกินไม่สามารถป้องกันได้อีกต่อไปจึงเปลี่ยนมาใช้รีเลย์ระยะทางแทนเนื่องจากง่ายในการจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกัน (Co-ordination) ในระบบที่เป็น Loop Line และมีหลายแหล่งจ่าย (Source) ขณะเดียวกันก็ไม่ต้องคำนวณค่าที่ต้องกำหนด (Setting) และการจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันใหม่เมื่อกระแสฟอลต์ (Fault Current) เปลี่ยนไปด้วย

การทำงานของรีเลย์ชนิดนี้อาศัยการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50 หรือ 60 Hz) จากกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าด้วยการแปลงฟูเรียร์ตามหลักการของคลื่นเดินทาง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ซึ่งปกติจะอยู่ที่ปลายของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.18



$$\begin{aligned} \text{Ampere turns ของ Operating Coil} &= IZ_{\text{pick up}} \\ \text{Ampere turns ของ Restraining Coil} &= V = IZ_F \\ \text{เงื่อนไขการทำงาน} &: V < IZ_{\text{pick up}} \quad \text{หรือ} \quad Z_F < Z_{\text{pick up}} \end{aligned}$$

รูปที่ 2.18 แสดงการติดตั้งและหลักการการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

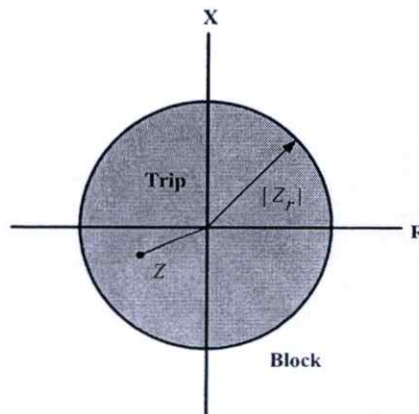
ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั้นได้มาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ (2.75) โดยการทำงานของรีเลย์จะใช้การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตอบสนองเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ (Z_r) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.75)$$

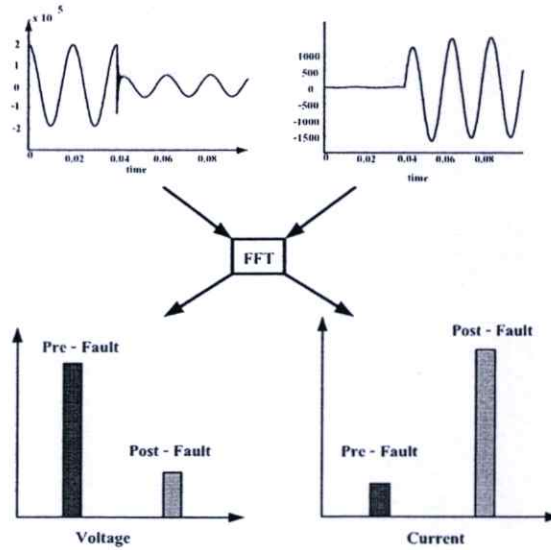
เงื่อนไขการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

1. อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีค่าต่ำกว่า (Z_r) ที่ตั้งเอาไว้รีเลย์จะทำงาน
2. อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีค่ามากกว่า (Z_r) ที่ตั้งเอาไว้รีเลย์จะไม่ทำงาน

จากการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์นี้เองทำให้บางครั้งจะเรียกรีเลย์รูปแบบนี้ว่า อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) และถ้าพิจารณาในระนาบเชิงซ้อนทางเดินของโลกัส (locus) จะมีลักษณะเป็นวงกลมมีรัศมี $|Z_r|$ ดังรูปที่ 2.19 ค่าอิมพีแดนซ์ที่หาได้จากสมการที่ (2.75) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิจารณาจากรีเลย์ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งในรูปที่ 2.18 ในสภาวะปกติรีเลย์จะมองค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งอยู่นอกวงกลมรัศมี $|Z_r|$ ดังนั้นจะไม่มีการสั่งให้เบรกเกอร์ปลดวงจร แต่ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้นค่าของแรงดันไฟฟ้าจะลดลงในขณะที่ค่าของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20 ถ้าพิจารณาจากสมการที่ (2.75) พบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ตามรูปที่ 2.19 และถ้าค่าอิมพีแดนซ์ลดต่ำลงมากกว่ารัศมี $|Z_r|$ รีเลย์ก็จะเริ่มทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นหรือไม่



รูปที่ 2.19 แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง



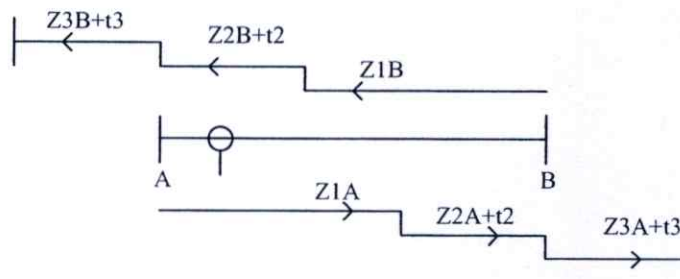
รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสถานะที่เกิดฟอลต์

ผลการลดลงของอิมพีแดนซ์นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ในสถานะปกติและค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวก็สามารถที่จะคำนวณหาระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ดังสมการที่ (2.76)

$$Location = \frac{Z}{m} = \frac{V}{mI} \quad (2.76)$$

เมื่อ m คือค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว (ohm/km)

จากจุดนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในระบบการป้องกันแบบโซน (Zone protection) ได้ปกติ จะใช้รีเลย์ระยะทาง (Distance relay) ป้องกันสายส่งโดยแบ่งเป็น 3 โซน ต่อ 1 ด้านของสายส่ง คือ



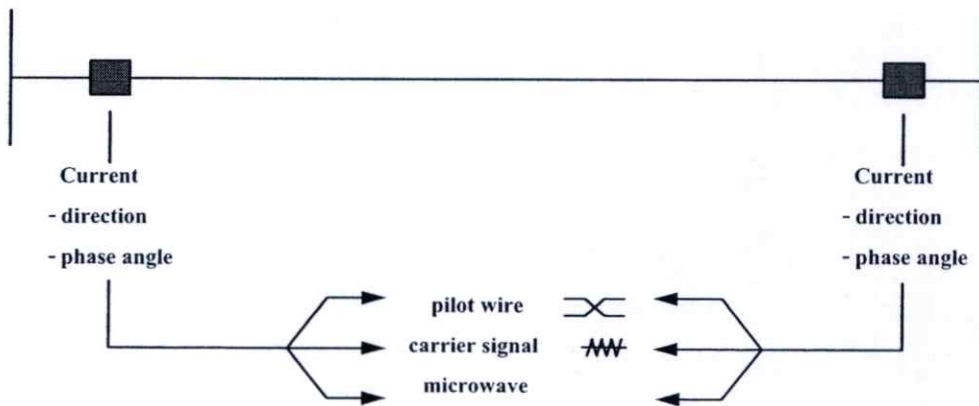
รูปที่ 2.21 แสดงการป้องกันแบบโซนของรีเลย์ระยะทาง

จากจุด A จะมี 3 โซน มองมาด้านจุด B (จุด B จะมี 3 โซน มองกลับมา จุด A ด้วย) โดย โซนที่ 1 เมื่อรีเลย์ระยะทางตรวจจับฟอลต์ได้จะปลดวงจรออกจากระบบทันที ในขณะที่โซนที่ 2 และโซนที่ 3 จะมีการหน่วงเวลา t_2 และ t_3 ตามลำดับ

2.5.2 การป้องกันแบบใช้ระบบสื่อสาร (Pilot protection) [20]

การป้องกันแบบใช้ระบบสื่อสาร (Pilot protection) หมายถึงการควบคุมแบบระยะไกล (Remote) ให้เบรกเกอร์ที่ปลายสายส่งทั้งสองด้านเปิดวงจรออกได้เร็วเกือบพร้อมกัน ผลที่ได้คือ ทำให้อุปกรณ์มีโอกาสเสียหายเนื่องจากการลัดวงจรน้อยลงระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

เนื่องจากการใช้รีเลย์ระยะทางนั้นพบปัญหาด้านการตอบสนองที่ล่าช้า โดยเฉพาะในกรณีที่สายส่งมีความยาวมากหรือจุดที่เกิดฟอลต์อยู่ไกลปลายสายส่งมากๆ ซึ่งจะส่งผลให้รีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้ากว่าเมื่อเทียบกับรีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ ในทางปฏิบัติเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งวงจรใดๆ ก็ตามรีเลย์ที่ปลายทั้ง 2 ด้านควรที่จะทำการตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดฟอลต์ที่เกิดขึ้นออกจากระบบ นอกจากนี้ในระบบแรงดันไฟฟ้า 500 kV กรณีสายส่งระยะสั้นๆถ้าใช้รีเลย์ระยะทางในการป้องกันมักประสบกับปัญหาจากแรงดันไฟฟ้าภายนอก เช่น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce Voltage) และค่าผิดพลาดกรณีฟอลต์อิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault) ผลกระทบเหล่านี้ทำให้ระบบรีเลย์ป้องกันลดความน่าเชื่อถือลง เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในระบบการป้องกันสายส่งแรงสูงแบบใหม่จึงมีการนำระบบสื่อสารมาใช้เชื่อมโยงข้อมูลของปลายสายส่งทั้งสองด้านเข้าด้วยกัน โดยใช้หลักการของระบบป้องกันซึ่งเรียกว่า รีเลย์กระแสผลต่าง (Current Differential Relay) มาใช้ร่วมกับช่องการสื่อสารใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Channel) ใน Overhead Ground Wire ของสายส่ง เนื่องจากการสื่อสารโดยใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) จะไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากฟอลต์ และมีความแม่นยำสูง ดังนั้นระบบป้องกันดังกล่าวจึงได้พัฒนาร่วมกับระบบสื่อสาร ซึ่งมีด้วยกันหลากหลายประเภทเช่น ระบบรีเลย์สื่อสาร (Pilot Relay) ระบบป้องกันแบบคลื่นพาหะ (Carrier Protection), ระบบสัญญาณไมโครเวฟ เป็นต้น โดยที่แต่ละแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ทำให้การนำไปใช้งานต้องพิจารณาความเหมาะสมทางด้านเทคนิคและราคาเป็นหลัก



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะของการป้องกันโดยใช้ระบบสื่อสาร

จุดประสงค์ของการนำระบบสื่อสารเข้ามาใช้งานในระบบป้องกันสายส่งคือ การเชื่อมโยงข้อมูลของปลายสายส่งแต่ละด้านเพื่อให้ทราบว่าในสถานะที่มีฟอลต์เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในช่วงใด ถ้าฟอลต์เกิดขึ้นในช่วง (Internal Fault) ที่ทำการพิจารณา ก็จะส่งปลดวงจรเพื่อกำจัดฟอลต์ไม่ว่าจะเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งใด แต่ถ้าเกิดฟอลต์อยู่นอกช่วง (External Fault) ที่พิจารณาก็ส่งบล็อกไม่ให้มีการปลดวงจร ซึ่งการระบุว่าเกิดฟอลต์ในช่วงที่พิจารณาหรือไม่นั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบทิศทาง (Direction Comparison) การไหลของกระแสฟอลต์ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน หรือการเปรียบเทียบมุมเฟส (Phase Comparison) ของกระแสฟอลต์ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน โดยข้อมูลทั้งหมดจะเชื่อมโยงผ่านระบบสื่อสารดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

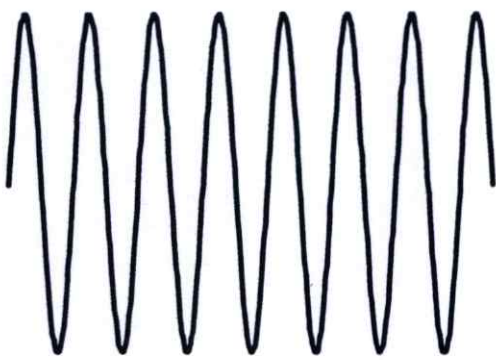
บทที่ 3

การแปลงเวฟเล็ต

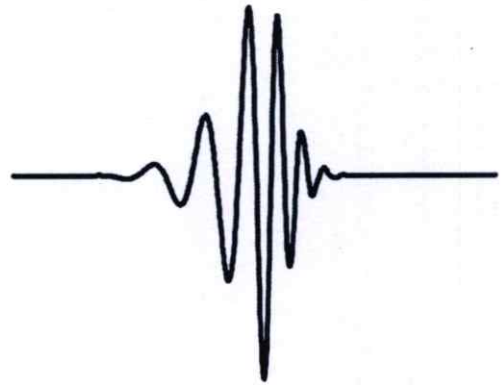
การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) เป็นอีกวิธีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณซึ่งมีประโยชน์มากในด้านการประมวลสัญญาณ (Signal processing) ทฤษฎีของการแปลงเวฟเล็ตสามารถนำมาประยุกต์เพื่ออธิบายลักษณะของสัญญาณต่างๆ มากมาย เช่น การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นของแผ่นดินไหว และ เสียงพูดของมนุษย์ รวมถึง สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง เป็นต้น ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของเวฟเล็ต โดยจะกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต รวมไปถึงคุณสมบัติของการแยกวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด (Multi Resolution Analysis : MRA) ของการแปลงเวฟเล็ตซึ่งทำให้เกิดขบวนการแยกวิเคราะห์ (Decomposition) และการรวมกลับ (Reconstruction) ซึ่งเป็นการนำการแปลงเวฟเล็ตมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย

3.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT) [21, 22, 23]

การแปลงเวฟเล็ตจะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยเซตของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้นๆ สัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” โดยลักษณะของเวฟเล็ตเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นลดลงสู่ศูนย์ทั้งสองด้านอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 3.1 (ข)



(ก) คลื่นไซน์



(ข) Daubechies Wavelet

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของ รูปคลื่นไซน์ และ Daubechies Wavelet

เมื่อพิจารณาค้นเวฟเล็ต $\psi(t)$ หมายถึงคลื่นสัญญาณเล็กๆที่เหมาะสมสำหรับเป็นเซตฟังก์ชันพื้นฐานของสเปซฟังก์ชัน (Function spaces) ซึ่งเป็นคลื่นที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีแอมพลิจูด

ลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วเมื่อ $\pm\infty \rightarrow t$ (ในโดเมนเวลา) ดังรูปที่ 3.1 (ข) และพื้นที่สุทธิของรูปคลื่นเท่ากับศูนย์หรือ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟูเรียร์ที่ประกอบด้วยคลื่น โคไซน์ (Cosine) และไซน์ (Sine) ดังรูปที่ 3.1 (ก) โดยเป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time-domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency-domain) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นการหาสเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณนั่นเอง ดังนั้นเวฟเลตจึงสามารถแทนฟังก์ชันที่มีลักษณะขดแหลมหรือมีลักษณะเป็นขอบการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non-stationary signal) หรือเหตุการณ์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา ด้วยเทอมของฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis Function) ที่มีนัยสำคัญสูงน้อยกว่า พื้นฐานฟูเรียร์ (Fourier Basis) ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบีบอัดสัญญาณได้เป็นอย่างดี

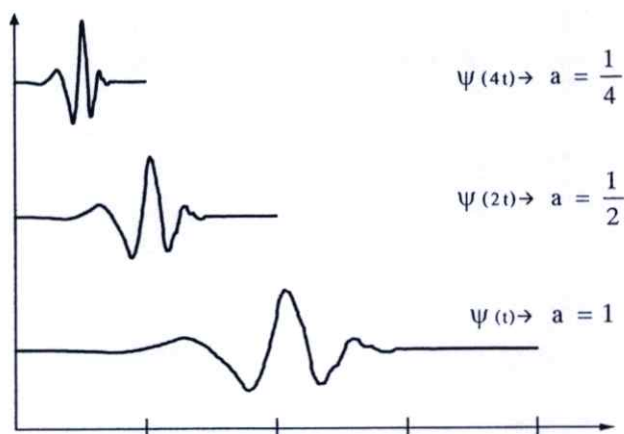
การนำเวฟเลตหลายๆ ลูกคลื่นมารวมกันเป็นเซตเพื่อจะใช้อธิบายสัญญาณใดๆ โดยที่คลื่นเวฟเลตแต่ละอันมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเลตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเลตแม่” (Mother Wavelets) คลื่นเวฟเลตแต่ละอันจะอยู่ภายในเซตของเวฟเลต โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกลลิง (Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเลตแม่นั้นเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา ดังนั้นถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$\psi_{a,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) \quad (3.1)$$

$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ k ตามลำดับ โดยที่เวฟเลตแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า a และ k แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเลตแม่เดิมอยู่ และเพื่อให้เวฟเลตที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเลตแม่จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ เพื่ออธิบายคุณสมบัติของการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของลูกคลื่นเวฟเลตให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะขออธิบายถึงเวฟเลตที่มีการสเกลและเลื่อนตำแหน่งดังนี้

3.1.1 การสเกลลิง (Scaling: a)

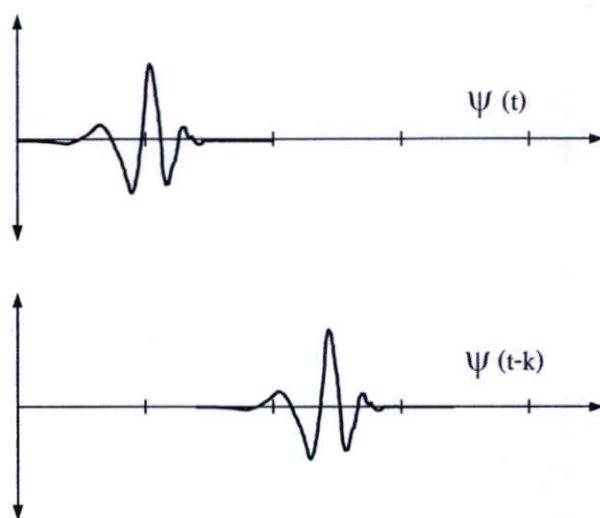
การสเกลลิง (Scaling) จะหมายถึงการหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) ซึ่งจะให้ “a” แทนด้วยพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเลตแม่นั้นเองหรืออาจเรียก “a” ว่าเป็นตัวประกอบขนาด (Scale Factor) ถ้าพิจารณาตัวประกอบขนาด (a) ในรูปที่ 3.2 ถ้าตัวประกอบขนาด (a) มีค่าน้อยลูกคลื่นเวฟเลตจะมีความถี่สูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าตัวประกอบขนาด (a) มีค่ามากลูกคลื่นเวฟเลตจะมีความถี่ต่ำลง



รูปที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด

3.1.2 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting: k)

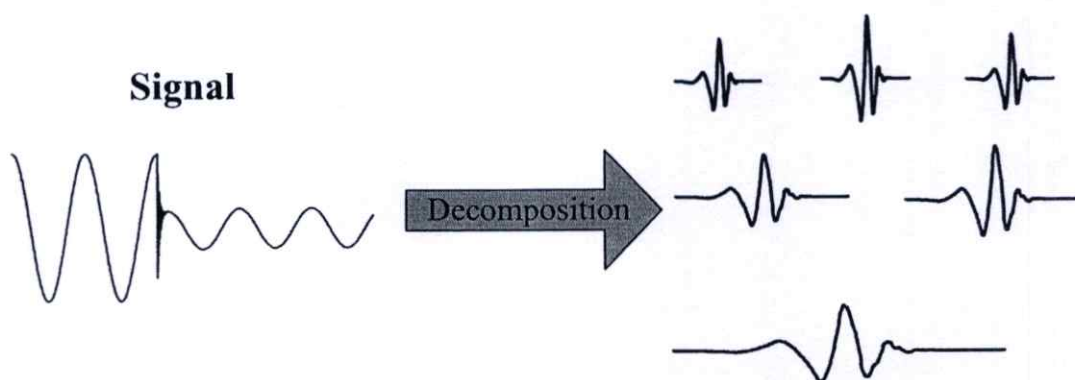
การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ดจะมีความหมายง่ายๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน $\psi(t)$ ด้วย k จะแสดงได้โดย $\psi(t-k)$ การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดยพารามิเตอร์ 'k' ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ดบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ดที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.3



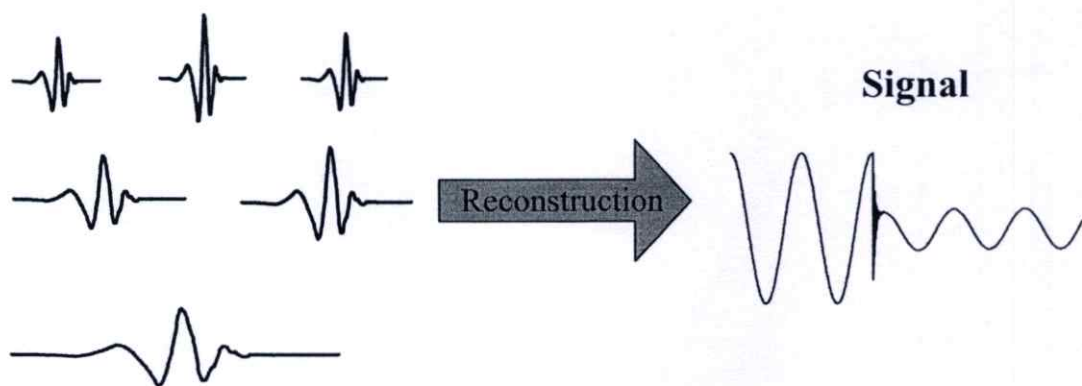
รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ด

3.1.3 การกระจายและรวมกลับของเวฟเลต (Decomposition and reconstruction of Wavelet)

ฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับการแปลงเวฟเลต Mallat [24] กล่าวไว้ว่า การอธิบายสิ่งใดในทฤษฎีเวฟเลต จะเปรียบเสมือนการแตกสิ่งเหล่านั้นออกเป็นส่วนประกอบเล็กๆที่สัมพันธ์กันเหมือนกับภาพต่อจิ๊กซอว์ โดยที่ชิ้นส่วนเหล่านั้นจะอยู่ในรูปของเวฟเลตที่ถูกสเกลลิงและเลื่อนตำแหน่ง โดยมีค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆ กันขึ้นอยู่กับเวฟเลตแต่ละตัว ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่าคลื่นเวฟเลตเป็นฟังก์ชันพื้นฐานในการสร้างสัญญาณใดๆเรียกว่า ฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับการแปลงเวฟเลต โดยการแตกกระจายชิ้นส่วนนี้เรียกว่า การแตกกระจายเวฟเลต (Wavelet Decomposition) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 ซึ่งก็คือขั้นตอนการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform : WT) และในทำนองเดียวกันการรวมกลับเวฟเลต (Wavelet Reconstruction) ก็คือการแปลงกลับเวฟเลต (Inverse Wavelet Transform : IWT) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลต



รูปที่ 3.5 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลต

ในการสร้างเซตเวฟเลต คลื่นเวฟเลตจะถูกยืดขยาย หรือเปลี่ยนความถี่ และคลื่นเวฟเลตที่ถูกยืดขยายยังถูกเลื่อนในแกนเวลาอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองอย่างเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด การวิเคราะห์แบบนี้เป็นการกระจายรายละเอียดของสัญญาณ

จะถูกระบายไปที่ความถี่ต่างๆและตำแหน่งต่างๆเปรียบเหมือนเสียงดนตรีที่ถูกกระจายเป็นตัวโน้ตบนเส้นของระดับเสียง

3.1.4 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis:MRA)

การแปลงเวฟเลตที่หลายระดับความละเอียด (Multiresolution Wavelet Transform) อธิบายโดย Mallat การใช้ฟังก์ชันที่จะนำมาเป็นเวฟเลตแม่ หรือตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter) จะต้องสัมพันธ์กันกับฟังก์ชันที่เป็นฟังก์ชันสเกลลิ่ง หรือตัวกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ด้วยการแปลงความละเอียดหลายระดับนี้ มีคุณสมบัติของจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ออกมาเป็นแบบโครงสร้างเชิงพีระมิด (Pyramidal Structure) อยู่ในตัวซึ่งคุณสมบัติข้อนี้ไม่จำเป็นสำหรับการแปลงเวฟเลตทั่วไปแต่ด้วยคุณสมบัติของโครงสร้างเชิงพีระมิดนี้ทำให้การแปลงเวฟเลตที่ระดับสเกลต่างๆสามารถใช้ฟังก์ชันสเกลลิ่งและฟังก์ชันเวฟเลตเพียงตัวเดียวได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายในทางปฏิบัติ ด้วยการทำซ้ำ การแปลงเวฟเลตแบบหลายระดับความละเอียด เสมือนกับเป็นการกรองสัญญาณนำเข้าไปที่เข้ามาให้แยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่มีความถี่สูง (High Frequency Band) และส่วนที่มีความถี่ต่ำ (Low Frequency Band) การกรองจะเริ่มจากข้อมูลทั้งหมดของสัญญาณก่อน ในการกรองนี้จะได้สัญญาณส่วนที่เป็นความถี่สูง และส่วนที่เป็นความถี่ต่ำออกมาจากนั้นสัญญาณที่นำเข้าไปจะถูกลดข้อมูลลง ในแต่ละขั้นของการแปลง สัญญาณที่ถูกนำออกมาได้จากส่วนที่มีความถี่สูงเรียกว่าสัมประสิทธิ์เวฟเลต (Wavelet Coefficient) ที่ความละเอียดสูง และสำหรับสัญญาณนำออกในส่วนที่มีความถี่ต่ำจะนำไปผ่านการแยกองค์ประกอบ (Decomposition) ด้วยค่าอัตราของ 2 จากนั้นสัญญาณส่วนที่เหลือนี้จะถูกแบ่งเป็นความถี่สูงและความถี่ต่ำอีกครั้งหนึ่งสำหรับสัญญาณนำออกที่ได้จากตัวกรองความถี่สูงนี้ แต่ละจุดของการสุ่ม (Sampling) จะเป็นสัมประสิทธิ์เวฟเลตที่เลื่อนตำแหน่งต่างๆ ที่ค่าระดับสเกลลิ่งเดียวกัน ซึ่งหลักการของการวิเคราะห์สัญญาณหลายระดับความละเอียดนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ถ้ากำหนดสัญลักษณ์ $f_j(t)$ แทนฟังก์ชัน $f(t)$ ที่ถูกระบายไปที่ระดับความละเอียด j และที่ระดับความละเอียด $j+1$ รายละเอียดจะถูกแทนด้วย $d_j(t)$ เมื่อรวมเข้ากับ j จะได้ฟังก์ชัน $f(t)$ ที่ถูกระบายไปที่ระดับความละเอียด $j+1$ นั่นคือ

$$f_j(t) = f(t) + d_j(t) \quad (3.2)$$

ซึ่งฟังก์ชันในสมการที่ (3.2) จะเป็นฟังก์ชันที่มีรายละเอียดเข้าใกล้ $f(t)$ มากกว่าแทนฟังก์ชันที่ระดับความละเอียด $j+1$ และสัญญาณ $f(t)$ จะสร้างกลับคืนเมื่อรวมรายละเอียดที่ระดับความละเอียดต่างๆไปจนถึงอนันต์หรือ $j \rightarrow \infty$ ซึ่งจะได้

$$f_j(t) = f(t) + \sum_{k=j}^{\infty} d_k(t) \quad (3.3)$$

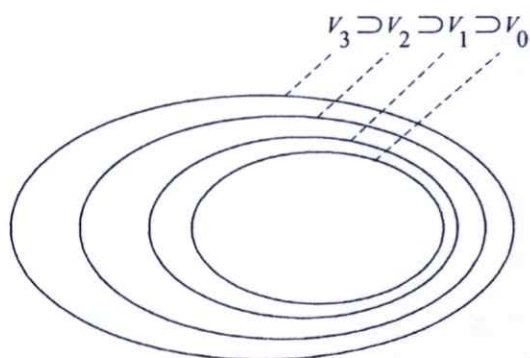
การวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดจะครอบคลุมถึงการแสดงความละเอียด ในแต่ละระดับ ไปพร้อมๆกัน จากสมการที่ (3.3) จะเห็นว่าฟังก์ชันถูกกระจายออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วน ฟังก์ชันหลัก และส่วนของรายละเอียด ในทำนองเดียวกันจะสามารถดูสเปซของฟังก์ชันนั้นก็คือ $L^2(\mathbb{R})$ ซึ่งประกอบไปด้วยลำดับของสเปซย่อย W_k และ V_j รวมไปถึงการประมาณค่าของ $f(t)$ ที่ระดับความละเอียด j คือ $f_j(t)$ ใน V_j และรายละเอียด $d_k(t)$ ใน W_k

การวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียดของ $L^2(\mathbb{R})$ ได้นิยามลำดับของสเปซย่อย V_j โดยที่ Z เป็นเซตของจำนวนเต็มดังนี้

- 1). $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots \subset L^2(\mathbb{R})$
- 2). $\bigcap_j V_j = \{0\}, \overline{\bigcup_j V_j} = L^2(\mathbb{R})$
- 3). $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}$
- 4). $f(t) \in V_0 \Rightarrow f(t-k) \in V_0$
- 5). มีฟังก์ชัน $\varphi(t)$ และ $\varphi(t-k)$ ซึ่งเป็นออร์โธโนมัล (Orthonormal Basis) อยู่ใน V_0

ความหมายของคุณสมบัติแต่ละข้อจะอธิบายได้ดังนี้

จากนิยามข้อที่ (1) สเปซย่อย V_j จะเป็นสับเซตของสเปซย่อย V_{j+1} ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงสเปซย่อย V_j ใน $L^2(\mathbb{R})$

ตามนิยามของการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด และความแตกต่างของการประมาณ ฟังก์ชันใน V_j และ V_{j+1} คือรายละเอียด $d_j(t)$ ซึ่งอยู่ใน W_j ดังนั้นจะได้

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j \quad (3.4)$$

เมื่อ \oplus แทนการบวกเชิงตั้งฉากและ W_j ถูกเรียกว่าสเปซของรายละเอียดและจะตั้งฉากกับ V_j โดยใช้สัญลักษณ์ $V_j \perp W_j$ ซึ่งหมายความว่าผลคูณภายในของแต่ละส่วน (element) ใน V_j กับแต่ละส่วนใน W_j จะมีค่าเป็นศูนย์แต่เมื่อมองที่สเปซย่อยจะได้

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1} \quad (3.5)$$

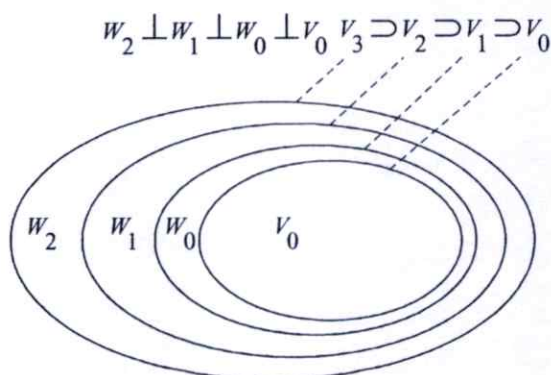
เมื่อแทนสมการที่ (3.5) ในสมการที่ (3.4) จะได้

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j = W_j \oplus W_{j-1} \oplus V_{j-1} \quad (3.6)$$

และเมื่อกระจาย V_{j+1} ไปอีกจะได้

$$V_{j+1} = W_j \oplus W_{j-1} \oplus W_{j-2} \oplus \dots \oplus W_{j-j} \oplus V_{j-1} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) สามารถแสดงสเปซย่อย W_j ใน $L^2(\mathbb{R})$ ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงสเปซย่อย W_j ใน $L^2(\mathbb{R})$

นิยามข้อที่ (2) ฟังก์ชันจะถูกประมาณที่ระดับความละเอียดที่หยาบที่สุดคือที่ระดับ $j \rightarrow -\infty$ จะได้ว่า

$\lim_{j \rightarrow -\infty} V_j = 0$ ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มรายละเอียดจนถึงที่ระดับความละเอียดอนันต์จะได้สัญญาณ

กลับคืนมานั่นคือ $\lim_{j \rightarrow \infty} V_j \rightarrow L^2(\mathbb{R})$

นิยามข้อที่ (3) สเปซ V_j ถูกสเกลหรือขยายจากสเปซ V_0 เนื่องจากที่ระดับความละเอียด $j+1$ จะเก็บรายละเอียดที่สูงกว่าที่ระดับความละเอียด j ดังนั้นความถี่ฟังก์ชันใน V_{j+1} จะมีค่าเป็นสองเท่าของฟังก์ชันใน V_j หมายความว่าถ้ามีฟังก์ชัน $f(t)$ ในสเปซย่อย V_j แล้วจะมี $f(2t)$ อยู่ใน V_{j+1}

นิยามข้อที่ (4) ถ้าสเปซย่อย V_0 มีฟังก์ชัน $f(t)$ แล้วฟังก์ชัน $f(t)$ ที่ถูกเลื่อนคือ $f(t-k)$ ซึ่งจะเลื่อนด้วยค่าจำนวนเต็ม k และจะเก็บอยู่ใน V_0 ด้วย

นิยามข้อที่ (5) มีฟังก์ชันพื้นฐาน $\varphi(t)$ ซึ่งเรียกว่าสเกลลิงฟังก์ชัน และรวมถึงสเกลลิงฟังก์ชันที่ถูกเลื่อนคือ $\varphi(t-k)$ อยู่ในและแต่ละฟังก์ชันจะมีคุณสมบัติที่เป็นออร์โธโนมัล

3.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform: CWT) [22]

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้นมีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบความถี่สูง และช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งก็เป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงสมการสำหรับการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a, k) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) dt \quad (3.8)$$

เมื่อ

$f(t)$ = สัญญาณที่ทำการแปลง

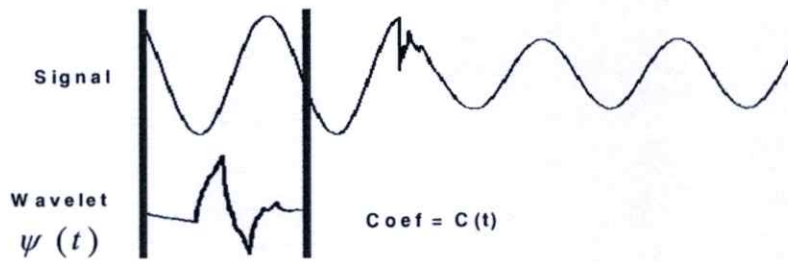
$\psi(t)$ = เวฟเล็ตแม่

a = แฟคเตอร์สเกลลิง (Scaling)

k = แฟคเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

จากสมการที่ (3.8) เมื่อพิจารณาเทอมของ $\psi(t)$ ซึ่งเป็นเทอมของเวฟเล็ตแม่ที่เทียบได้กับเทอมของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้นเอง แต่เมื่อพิจารณาเทอมของ $\psi(t)$ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์ a และ k ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

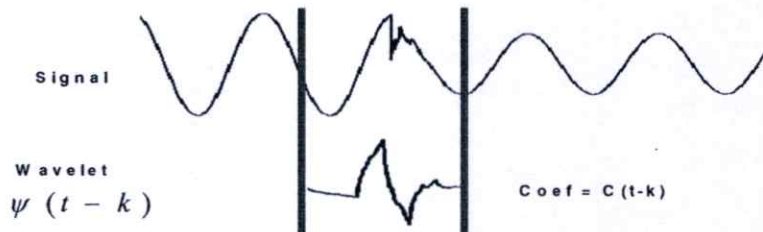
1. นำเวฟเล็ตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต

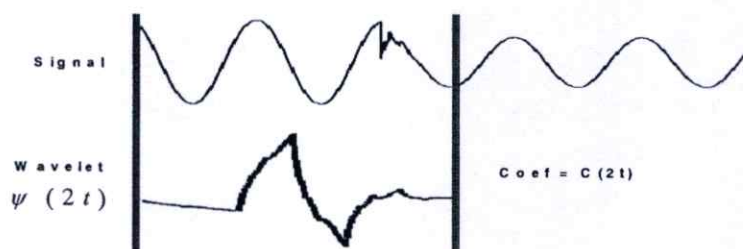
2. คำนวณสัมประสิทธิ์ (C) ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวฟเล็ตแม่ในสเกลแรกกับสัญญาณในส่วนแรก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปร่างของเวฟเล็ตแม่ด้วย

3. เลื่อนตำแหน่งการวิเคราะห์ไปทางขวาและทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จนกระทั่งครอบคลุมช่วงสัญญาณทั้งหมด ซึ่งจากขั้นตอนที่ 1 - 3 นี้เป็นการแปลงเวฟเล็ตตลอดช่วงสัญญาณในสเกลแรก



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต

4. เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำตามขั้นตอนที่ 1 - 3 ใหม่



รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ต

5. ทำตามขั้นตอนที่ 1 - 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล

จากขั้นตอนทั้งหมดผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปแบบประสิทธิที่ได้จากการวิเคราะห์ของแต่ละสเกลในแต่ละส่วนของสัญญาณ และเนื่องจากการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง การปรับเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่ที่ดีแต่จะมีข้อเสียคือ ในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องอาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมากและบางครั้งให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมากเกินไป

3.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT)

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT) ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [25]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (3.9)$$

โดยที่ a_0^m คือ การสเกล

$nb_0 a_0^m$ คือ การเลื่อนตำแหน่ง

m, n คือ เลขจำนวนเต็มบวก

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (Sample) ดังนั้นสมการที่ (3.9) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (3.10) [26]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (3.10)$$

เมื่อ m, n, k คือ เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่

n คือ จำนวนข้อมูล

m คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

k คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ($a_0 = 2; b_0 = 1$) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Dyadic Wavelet Transform ดังสมการต่อไปนี้ [27]

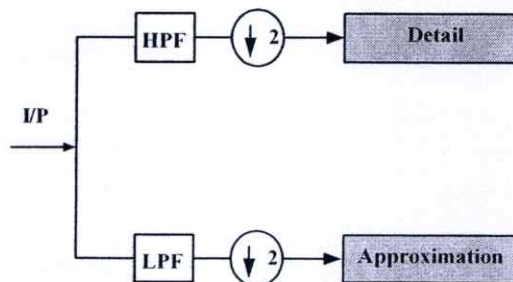
$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k 2^m}{2^m}\right] \quad (3.11)$$

ซึ่งสามารถอธิบายหลักการการทำงานได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์แบงก์ดังนี้

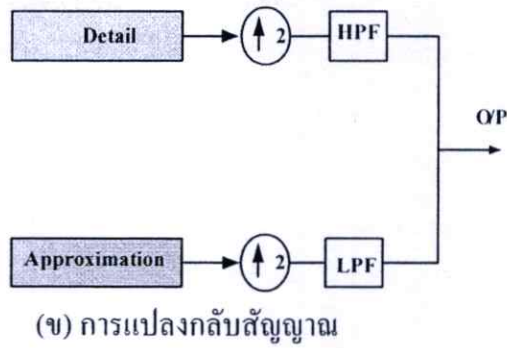
3.3.1 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis) [23]

ขบวนการแปลงเวฟเล็ตจะมีลักษณะคล้ายกับขบวนการออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Filter Banks) เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Window Function) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่าซึ่งเปรียบเสมือนกับนำสัญญาณอินพุตผ่านตัวกรองความถี่ที่มีแบนวิธที่มีอัตราการลดลงครึ่งละสองเท่าเหมือนกับแบนวิธของฟังก์ชันหน้าต่าง (Window Function) ในขณะนั้นนั่นเอง ดังนั้นสามารถนำหลักการของฟิลเตอร์แบงก์ (Filter Banks) มาใช้ในการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในทางปฏิบัติได้

ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two Channel Filter Banks) เป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของความถี่สูงและส่วนของความถี่ต่ำ ดังนั้นฟิลเตอร์แบงก์แบบ 2 ช่องสัญญาณ จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นตัวกรองความถี่สูงและความถี่ต่ำ (High Pass Filter (HPF) and Low Pass Filter (LPF)) ดังรูปที่ 3.11(ก) ซึ่งเป็นลักษณะของวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two Channel Filter Banks) และในทางกลับกันก็สามารถแปลงกลับสัญญาณโดยผ่านฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Reconstruction Two Channel Synthesis Filter Banks) ดังรูปที่ 3.11(ข) โดยที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ของความถี่สูงและความถี่ต่ำคือ HPF และ LPF ส่วนตัวกรองสร้างกลับ (Reconstruction) ของความถี่สูงและความถี่ต่ำคือ HPF และ LPF มีความสัมพันธ์กันในลักษณะที่เรียกว่า “Quadrature Mirror Filters (QMF)”

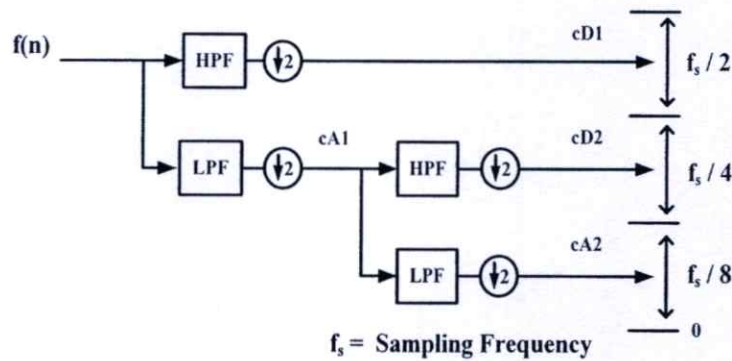


(ก) การแปลงแยกสัญญาณ



รูปที่ 3.11 แสดงการแปลงแยกและแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ

ลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Analysis Filter Banks) จะเป็นลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Structure) ซึ่งเป็นการนำเอาฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two Channel Filter Banks) มาเรียงต่อกันโดยใช้สัญญาณเอาต์พุตในส่วนของความถี่ต่ำมาทำการแยกความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ในกรณีที่ทำการแปลงเวฟเล็ตเข้าไปในแนวของความถี่ต่ำ (Low Pass) จะเป็นลักษณะของ Dyadic Tree Structure ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งโครงสร้างในรูปนี้จะเป็นการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT)



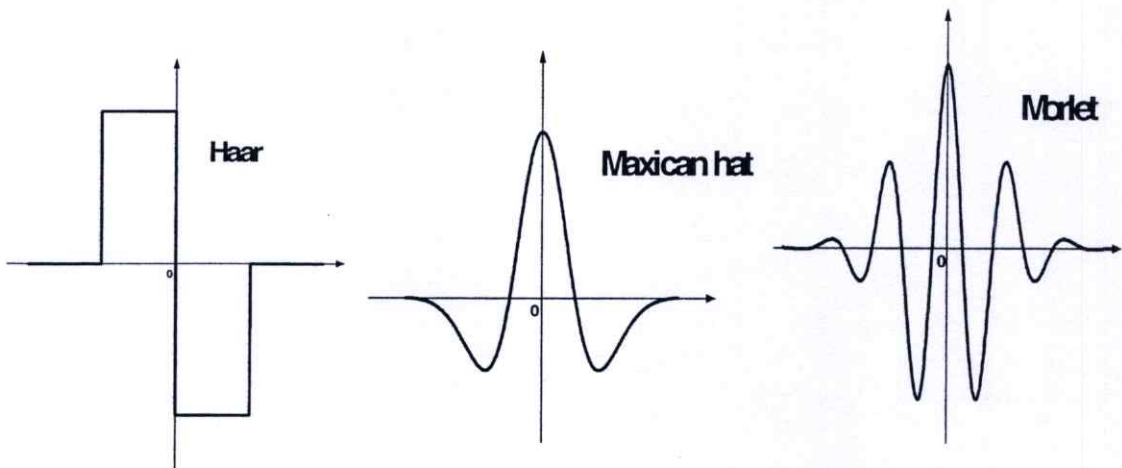
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์

จากรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นลักษณะของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในลักษณะของ Dyadic Tree Structure โดยมีสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยความถี่การสุ่ม f_s (Sampling Rate) จะถูกวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์ 2 ช่องสัญญาณในสเกลที่ 1 (2^1) ซึ่งสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 2 ช่วงความถี่ คือส่วนความถี่สูงหรือ detail 1 มีความถี่อยู่ในช่วง $\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{4}$ Hz และส่วนความถี่ต่ำหรือ Approximation 1 มีความถี่ในช่วง $\frac{f_s}{4} - 0$ Hz และในการวิเคราะห์ใน

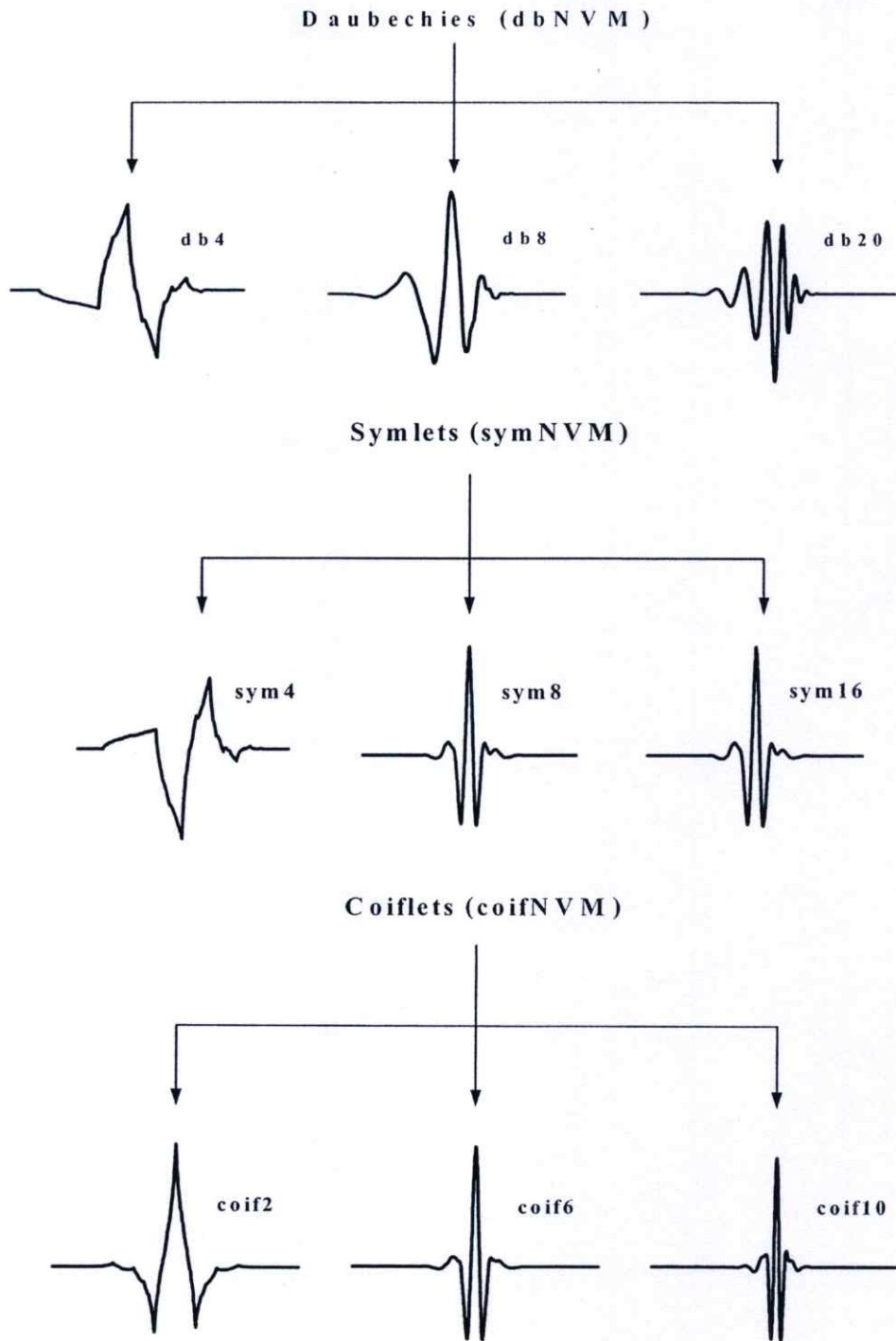
สเกลที่ 2 (2^{-2}) ก็ทำได้โดยการใช้คู่กรองชุดเดิมมาวิเคราะห์ต่อจาก Approximation 1 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะออกมาเป็นส่วนของความถี่สูงสเกลที่ 2 หรือ detail 2 ซึ่งมีความถี่ในช่วง $\frac{f_s}{4} - \frac{f_s}{8}$ Hz และส่วนความถี่ต่ำสเกลที่ 2 หรือ Approximation 2 มีความถี่อยู่ในช่วง $\frac{f_s}{8} - 0$ Hz ถ้าทำการวิเคราะห์ต่อในสเกลที่ 3 ก็สามารถทำซ้ำในลักษณะเดิม ในทางกลับกันก็สามารถที่จะรวมสัญญาณที่ทำการกระจายในหลายๆ ช่วงความถี่ให้กลับมาเป็นสัญญาณเดิมได้

3.4 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) [28]

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้วยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองสัญญาณนั้นๆ ให้เหมาะสมด้วยสำหรับการแปลงเวฟเล็ตนั้นตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเล็ตแม่นั้นเอง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อยๆ ลงไปอีก ในแต่ละตระกูลจะมีค่า Number of Vanishing Moments (NVM) ที่ายชื่อตระกูล เช่น Daubechies 4, 8, ..., 20, Symmlet 4, 5, 6, ..., 10 เป็นต้น และเนื่องจากรูปแบบของเวฟเล็ตแม่ที่มีความหลากหลายนี้เองจึงทำให้การแปลงเวฟเล็ตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายประเภท โดยเลือกเวฟเล็ตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่การวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของเวฟเล็ตแม่ได้ดังรูปที่ 3.13 - 3.14



รูปที่ 3.13 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบไม่มีชนิดย่อย



รูปที่ 3.14 แสดงเวฟเลตแม่แบบมีชนิคย่อย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้า ซึ่งทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาหลายช่วงความถี่แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสำหรับการเลือกชนิดของเวฟเลต

นั้นได้เลือกใช้เป็นแบบ Daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น พัลส์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี [29] เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ที่น้อยเพียง 4 ตัว โดยสามารถแบ่งลักษณะการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตมาใช้วิเคราะห์สัญญาณพัลส์ออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet Decomposition) โดยจะเลือกพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง (Detail) เท่านั้น และการรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction) ให้จำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับสัญญาณต้นแบบที่วิเคราะห์

บทที่ 4

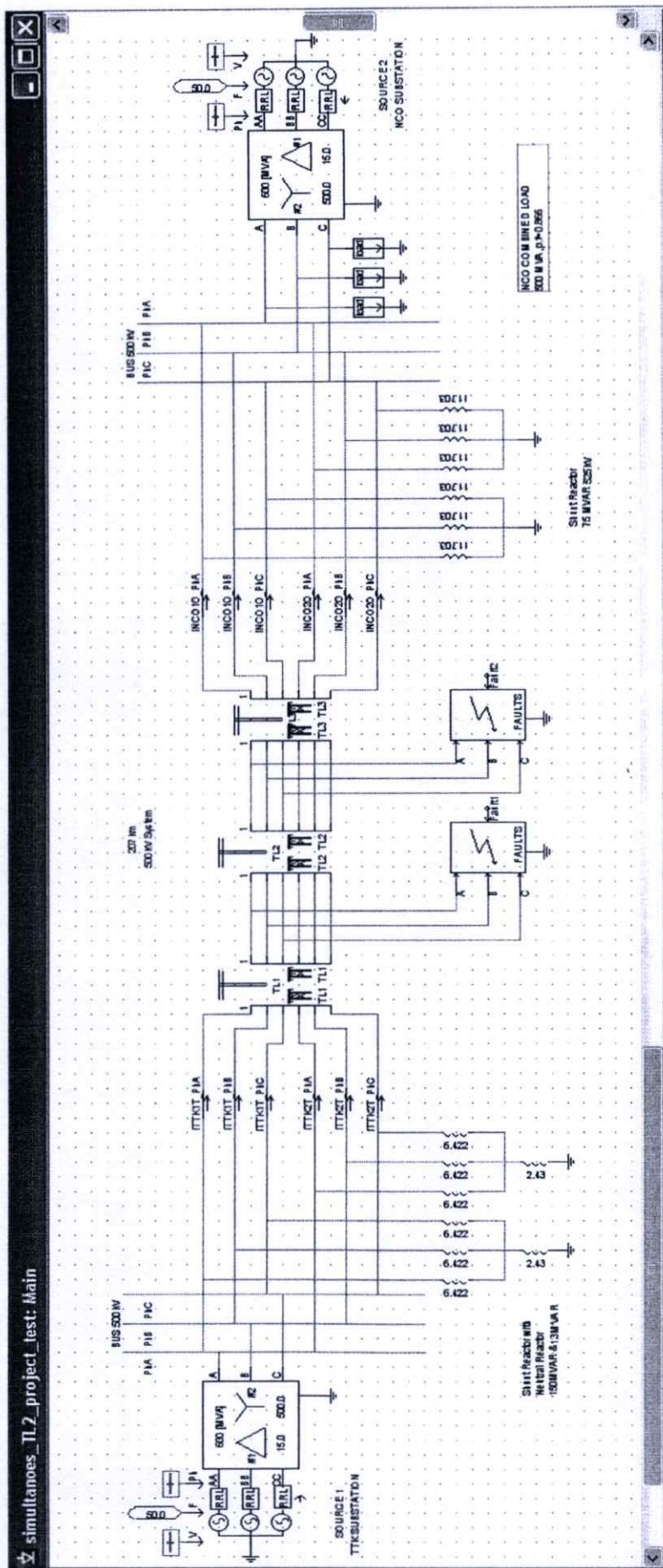
การจำลองฟอลต์และการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

4.1 การจำลองฟอลต์

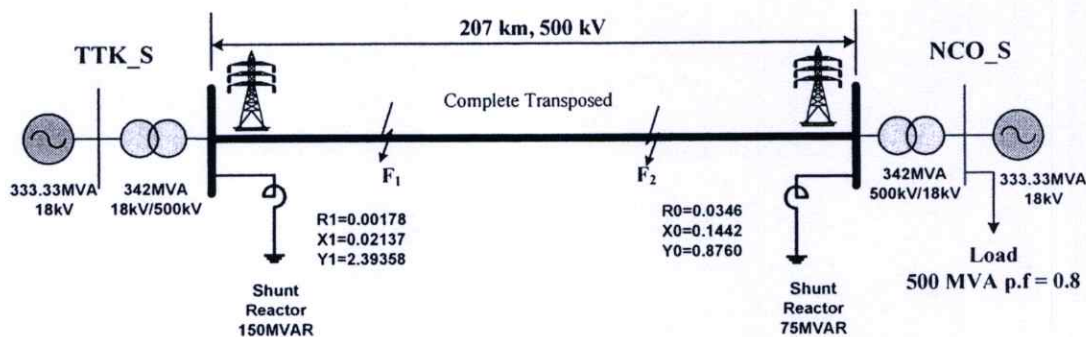
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองฟอลต์บนสายส่งด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ Power Systems Computer Aided Design / Electromagnetic Transients Including DC Program ที่ได้รับการพัฒนามาจากโปรแกรม ATP/EMTP จุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง เนื่องจากฟอลต์เป็นสิ่งที่ผิดปกติในระบบไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทดลองในระบบจริงได้ และเพื่อใช้สำหรับการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป โปรแกรม PSCAD/EMTDC มีความสามารถในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง และเหมาะสมสำหรับจำลองผลตอบสนองเชิง โดเมนเวลาแบบทันทีทันใดอย่างแม่นยำ (Time Domain Instantaneous Responses) โดยเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในชื่อของ Electromagnetic Transient ซึ่งให้ผลตอบสนองเหมือนกับปรากฏการณ์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง [30, 31] พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB / Wavelet [28] ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยมีเนื้อหาและรายละเอียดของการจำลองฟอลต์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ดังต่อไปนี้

4.1.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์ [32]

เนื่องจากในสภาวะที่เกิดฟอลต์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ได้ครอบคลุมในหลากหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างวงจรคู่ 500 kV ซึ่งเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) โดยสายส่งมีความยาว 207 กิโลเมตร แต่ละเฟสมีตัวนำ 4 ตัว และประเภทสาย ACSR 795 cmil (AL42/St7) ซึ่งสามารถแสดงระบบที่ใช้ในการจำลองได้ ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 การจำลองระบบที่เป็นส่วนของสายส่งในทางปฏิบัติสายส่งจะมีการไขว้สลับสาย (Transposed) เพื่อทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสเท่ากัน มีการติดตั้งรีแอกเตอร์ชานขนาด 150 MVAR และชานขนาด 75 MVAR ที่สถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงระบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 500 kV [32] ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC



รูปที่ 4.2 แสดงระบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง 500 kV [32]

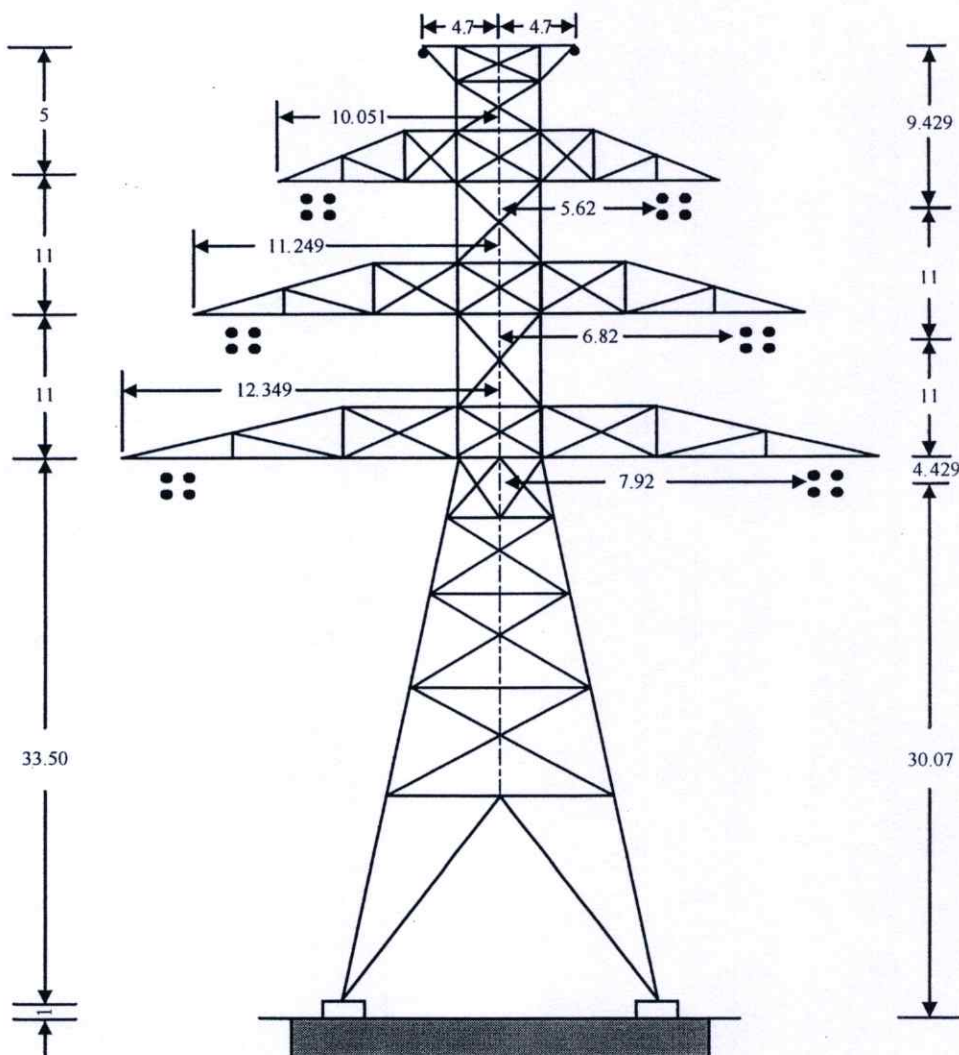
4.1.2 แบบจำลองสายส่ง [33]

ในการศึกษาฟลด์ที่เกิดบนสายส่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่งให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองฟลด์ ดังนั้นจึงต้องเลือกรูปแบบในการคำนวณให้เหมาะสมด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งนั้นมีให้เลือกใช้อยู่ด้วยกันหลายรูปแบบเช่น แบบวงจรวาย (Pi-Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายในการคำนวณ แต่รูปแบบของวงจรวายจะเหมาะสมสำหรับการศึกษาการไหลของพลังงาน (Load Flow) สำหรับการศึกษาทฤษฎีของคลื่นเดินทางหรือการศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ เช่น ฟลด์บนสายส่งนั้นการใช้วงจรวายจะไม่เหมาะสมนักโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความถูกต้องในการจำลองฟลด์นั้นจะต้องแบ่งวงจรวายให้สั้นลงและใช้วงจรวายจำนวนมากมาเรียงต่อกัน (Cascade) และเนื่องจากสัญญาณฟลด์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่าความถี่พื้นฐานอยู่มาก ดังนั้นถ้าต้องการแสดงผลของความถี่สูงมากขึ้นเท่าใดก็จะต้องใช้วงจรวายขนาดที่สั้นมาเรียงต่อกันมากขึ้น ในบางครั้งสายส่งระยะทางสั้นๆ อาจต้องใช้วงจรวายถึง 100 วงจรด้วยกันจึงทำให้ยุ่งยาก และวงจรในการจำลองฟลด์มีขนาดที่ใหญ่เกินไป

จากข้อจำกัดของวงจรวายจึงมีการนำรูปแบบการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งในรูปแบบของพารามิเตอร์ขึ้นอยู่ความถี่ (Frequency – Dependent Parameter) หรือนิยมเรียกกันว่า J. marti ซึ่งจะมีการคำนวณอย่างละเอียดโดยพารามิเตอร์ในการคำนวณจะเปลี่ยนไปตามความถี่ที่ใช้คำนวณรูปแบบของ J. marti นี้จะเหมาะสมกับการศึกษาผลของคลื่นเดินทาง และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ต่างๆ รวมถึงการจำลองฟลด์บนสายส่งโดยไม่ต้องแบ่งช่วงของวงจรด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้รูปแบบของ J. marti ในการสร้างแบบจำลองของสายส่ง

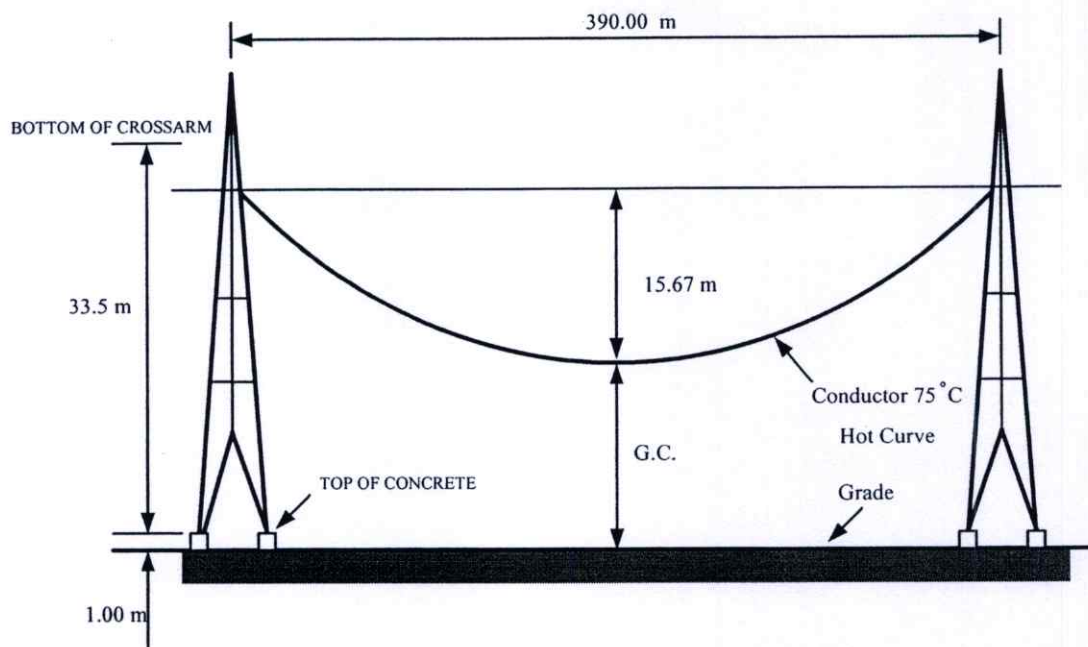
4.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 500 kV [32]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบจำลองสายส่งสามบัสแบบโครงข่ายระบบ 500 kV วงจรคู่ (Double Circuit) ซึ่งเป็นสายส่งที่มีการใช้งานจริงจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) โดยสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างของเสา (Tower) ที่ใช้ในการจำลองได้ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดง โครงสร้างเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งวงจรคู่ 500 kV

สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งนั้นเนื่องจากในทางปฏิบัติระยะห่างของเสา (Span) และระยะหย่อน (Sag) จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non - Uniform) ขึ้นอยู่กับสถานที่ในการติดตั้ง แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ระยะห่างของเสา และระยะหย่อนของสายตัวนำและสายล่อฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดช่วงระยะทางทั้งหมด



รูปที่ 4.4 แสดงระยะหย่อน (Sag) ของสายตัวนำบนเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งแรงดัน 500 kV

โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

- โครงสร้างเสาส่ง (Tower) แบบ DL tangent 3°
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 4 ตัวนำ (4 bundle)
- ประเภทสาย ACSR 795 cmil (Al54/St7)
- ประเภทของสายล่อฟ้า (Over Head Ground Wire) 3/8 inch, EHS GALV (St7)
- ความต้านทานของสายตัวนำ (DC Resistance) ACSR 795 cmil = 0.07185 โอห์มต่อกิโลเมตร
- รัศมีของสายตัวนำ (Conductor Radius) ACSR 795 cmil = 0.013865 เมตร
- ความต้านทานของสายล่อฟ้า 4.19 โอห์มต่อกิโลเมตร
- รัศมีของสายล่อฟ้า (Ground Wire Radius) 0.00457 เมตร
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวแกนนอนของสายตัวนำล่างสุด (Horiz. Spacing Between Lowest Conductors) 15.84 เมตร
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวแกนนอนของสายตัวนำกลาง (Horiz. Spacing Between Middle Conductors) 13.64 เมตร
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวแกนนอนของสายตัวนำบนสุด (Horiz. Spacing Between Top Conductors) 11.24 เมตร
- ระยะห่างระหว่างสายล่อฟ้า (Spacing Between Ground Wires) 9.4 เมตร
- ความสูงของตัวนำล่างสุดที่เสาส่ง 30.07 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่เสาส่ง เหนือสายตัวนำต่ำสุด 31.429 เมตร

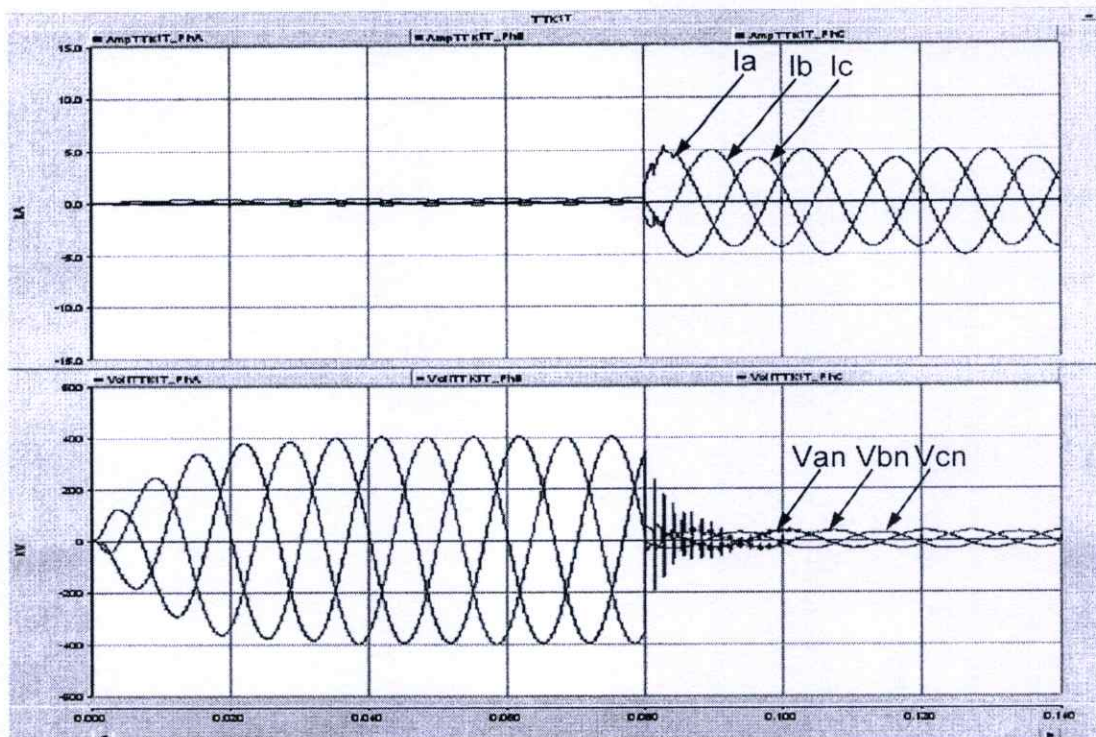
- ระยะห่างแนวแกนตั้งของศูนย์กลางสายตัวนำบน (Vertical Offset of Top Conductors) 22 เมตร
- ระยะห่างแนวแกนตั้งศูนย์กลางสายตัวนำกลาง (Vertical Offset of Middle Conductors) 11 เมตร
- ระยะหย่อนต่ำสุดของสายตัวนำ (Sag) 15.67 เมตร
- ระยะหย่อนต่ำสุดของสายล่อฟ้า (Sag) 42.67 เมตร
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างต้น (Span) 390 เมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม. เมตร

4.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

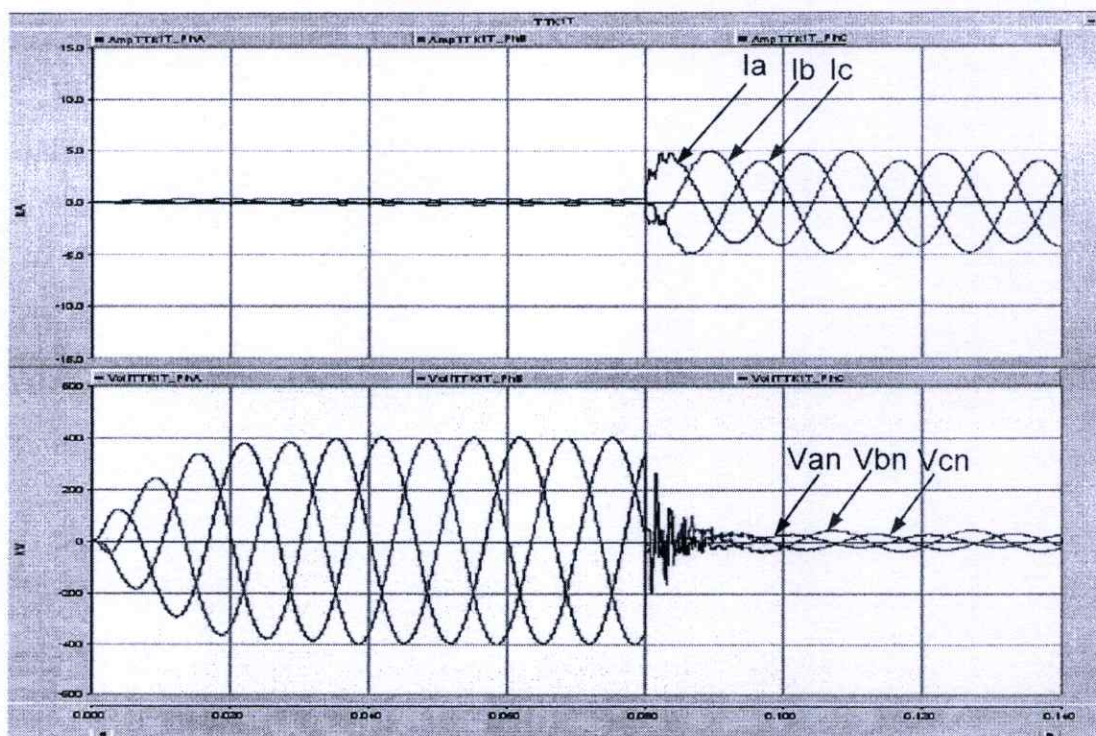
ในการจำลองฟอลต์จะมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลเกี่ยวข้องกับลักษณะของสัญญาณฟอลต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการเกิดสัญญาณฟอลต์ในแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 11 ประเภทได้แก่ AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC
- ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้ (ระยะทางที่เกิดฟอลต์จะคิดจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) เป็นจุดอ้างอิง)
 1. ฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดที่ 20 กิโลเมตร และเกิดฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดที่ 103.5 กิโลเมตร
 2. ฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดที่ 20 กิโลเมตร และเกิดฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดที่ 187 กิโลเมตร
 3. ฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดที่ 103.5 กิโลเมตร และเกิดฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดที่ 187 กิโลเมตร
- ขนาดของโหลดเท่ากับ 500 MVA (p.f. = 0.8)
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ $0^\circ - 150^\circ$ เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ 30°)
- ความต้านทานของฟอลต์ 10 โอห์ม

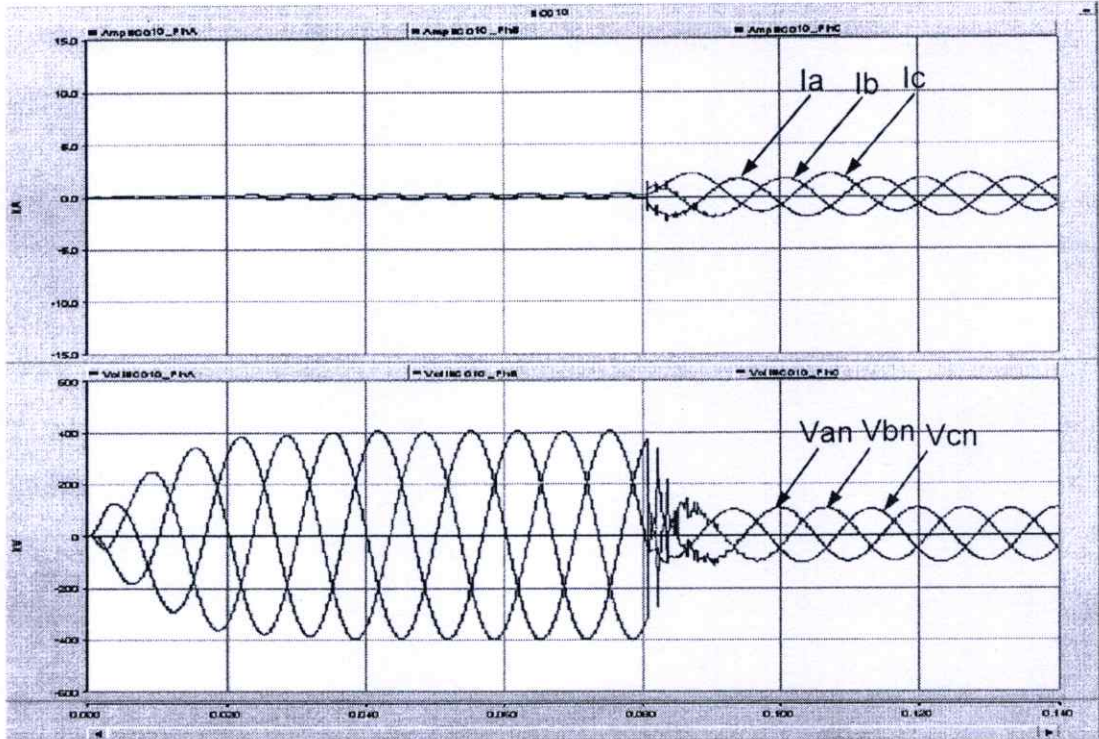
การจำลองฟอลต์กำหนดให้เริ่มเกิดฟอลต์ที่เวลา 0.08 วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 7 ไซเคิล (0 – 0.14 วินาที) โดยไม่มีการกำจัดฟอลต์ออกสามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณฟอลต์ที่จำลองได้ ในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยวัดที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียว คือเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC) ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร ส่วนในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยวัดที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าหนองจอกในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ก็คือตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์ฟอลต์สามเฟส (ABC) ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์ที่เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร



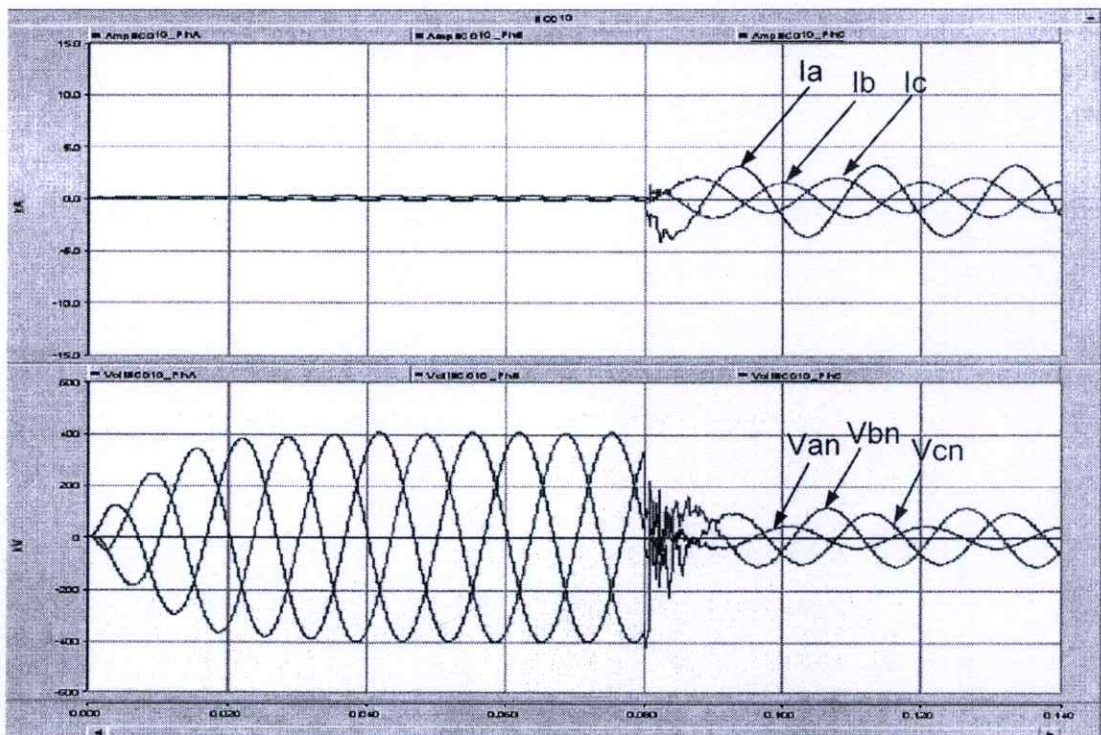
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (ฟอลต์จุดเดียว)



รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (ฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน)

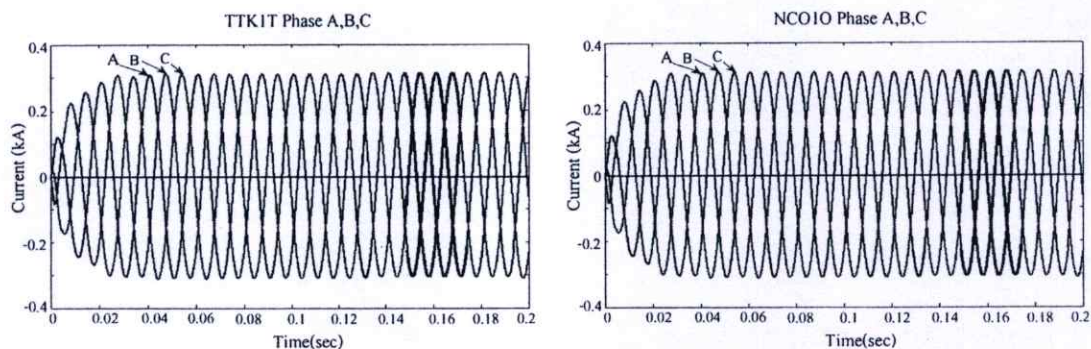


รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก (ฟอลต์จุดเดียว)

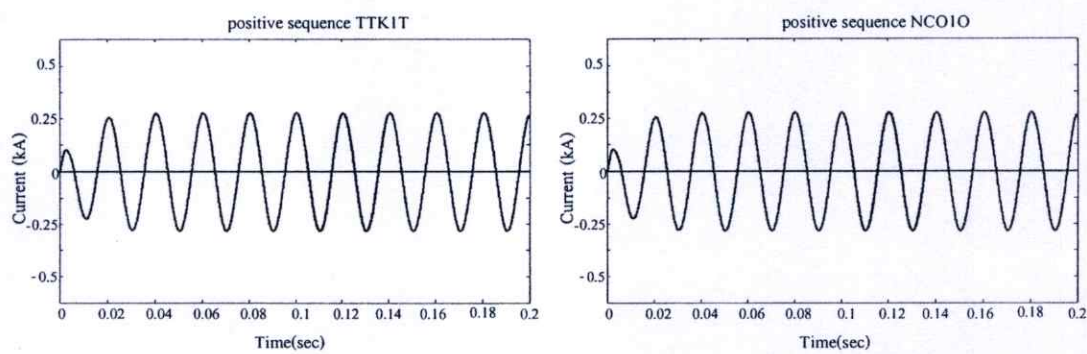


รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก (ฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน)

4.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

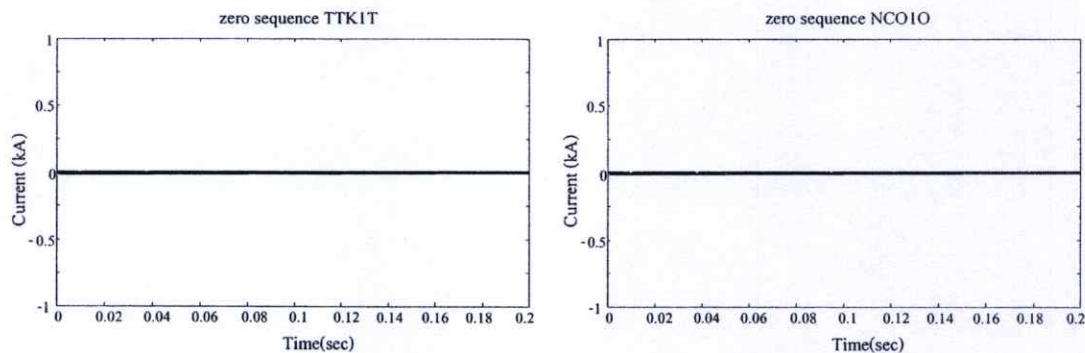


(ก) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน TTK (ข) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน NCO



(ค) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน TTK

(ง) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน NCO

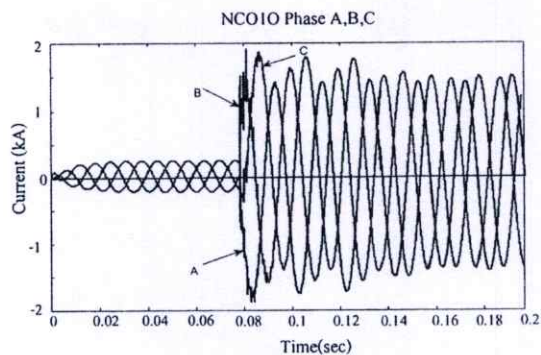
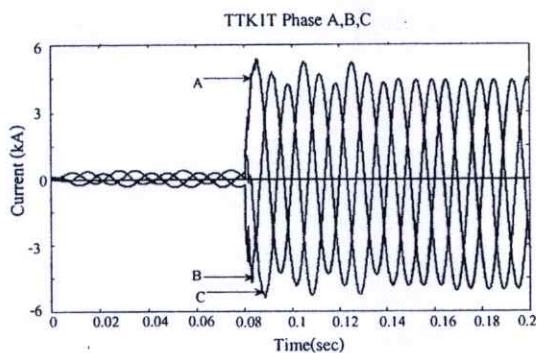


(จ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน TTK

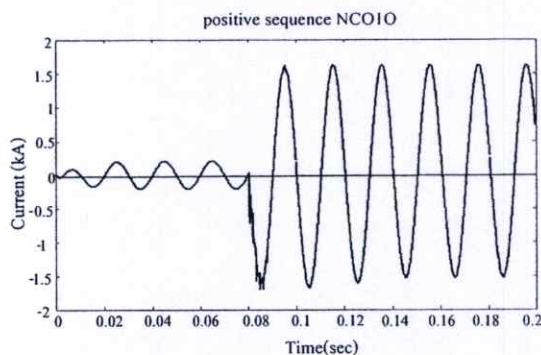
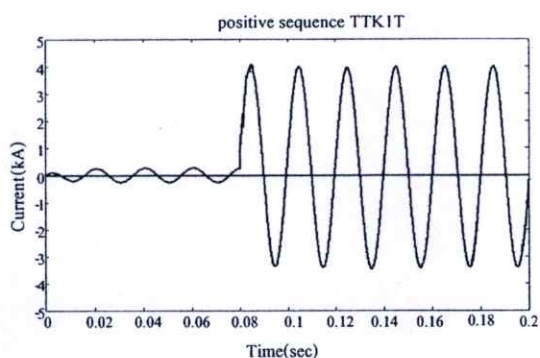
(ฉ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน NCO

รูปที่ 4.9 สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับศูนย์ในสถานะปกติ

รูปที่ 4.9 สัญญาณกระแสของเฟส A, B, C, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์ในสถานะปกติที่ไม่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับจากทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าหนองจอก สังเกตเห็นว่าค่าของกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current) มีค่าน้อยมาก

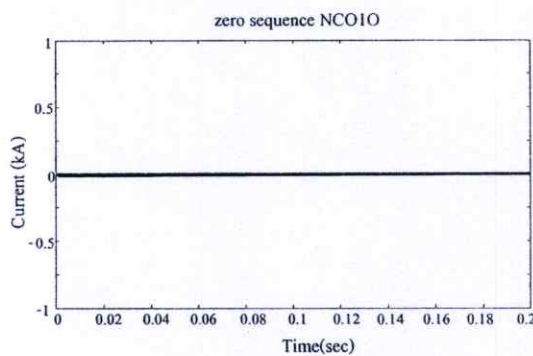
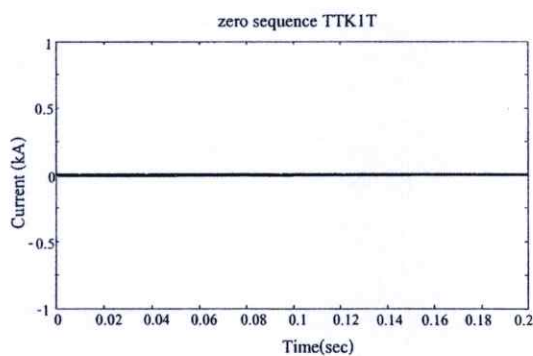


(ก) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน TTK (ข) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน NCO



(ค) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน TTK

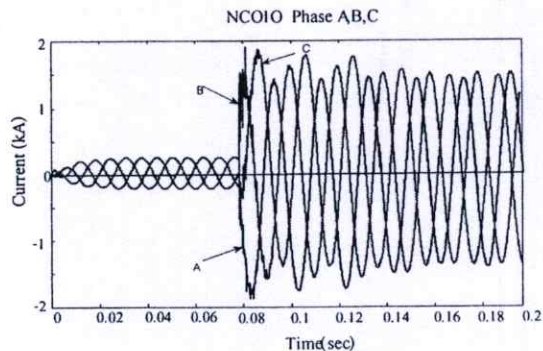
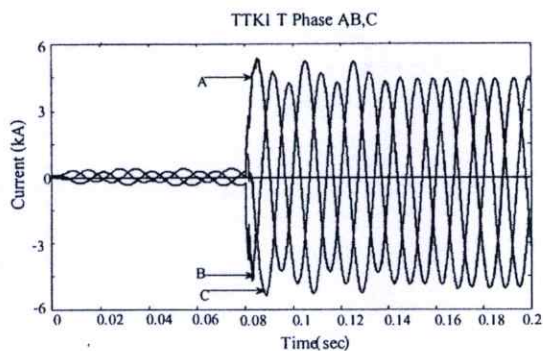
(ง) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน NCO



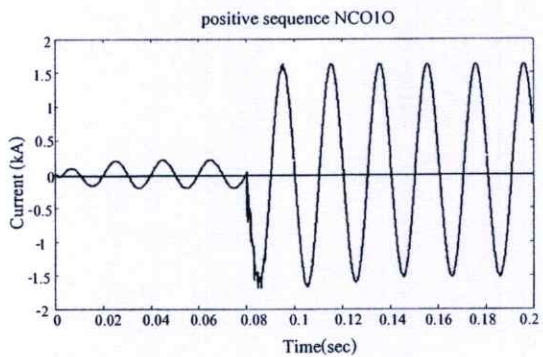
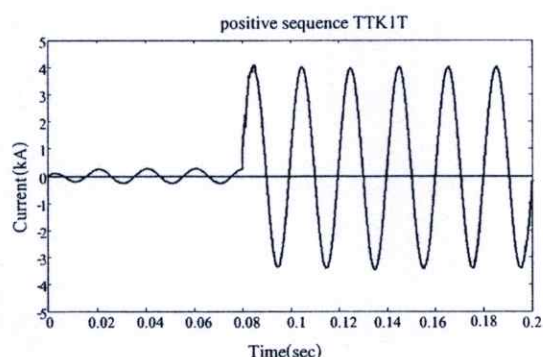
(จ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน TTK

(ฉ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน NCO

รูปที่ 4.10 สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์
ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟส

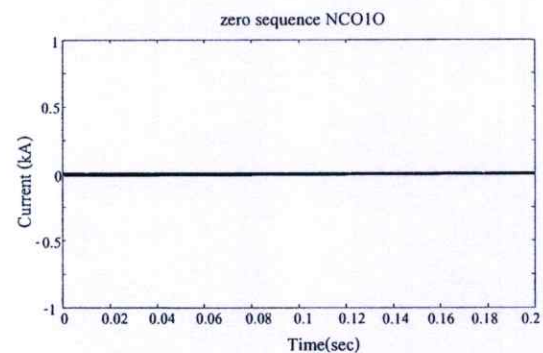
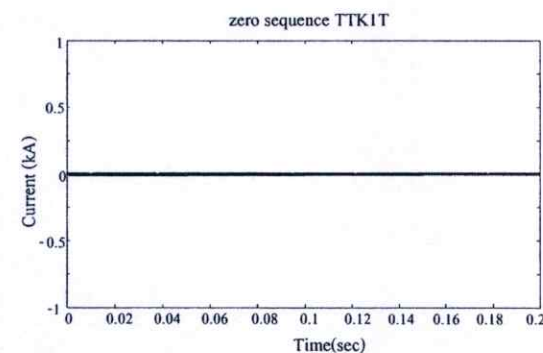


(ก) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน TTK (ข) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน NCO



(ค) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน TTK

(ง) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน NCO



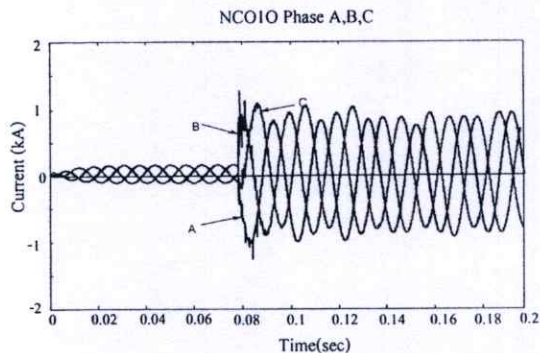
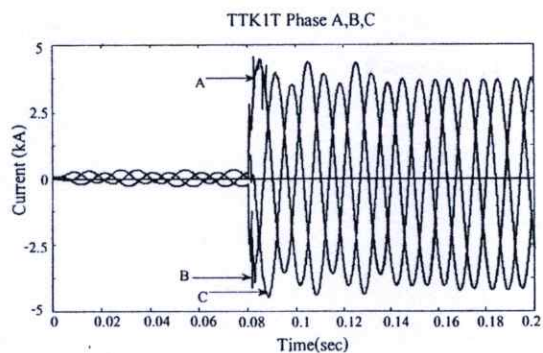
(จ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน TTK

(ฉ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน NCO

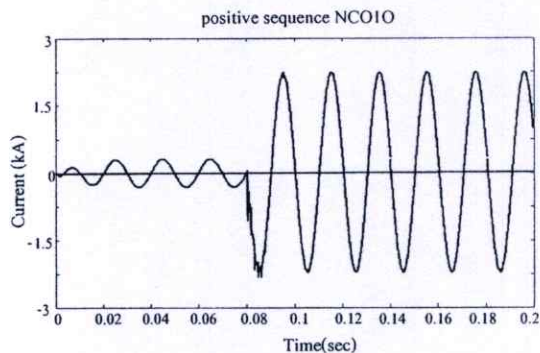
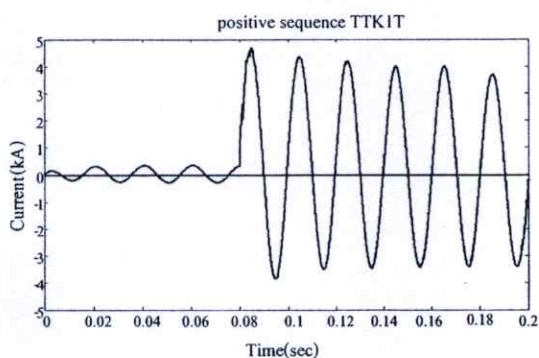
รูปที่ 4.11 สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์

ในสถานะเกิดฟอลต์สามเฟสถ่วงจรลงดิน

รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เป็นสัญญาณกระแสของเฟส A, B, C และ กระแสลำดับศูนย์ในสถานะเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC) และ ฟอลต์สามเฟสถ่วงจรลงดิน (ABCG) ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร ตามลำดับและสัญญาณกระแสของเฟส A, B, C, กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับศูนย์จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 จะมีลักษณะคล้ายกัน

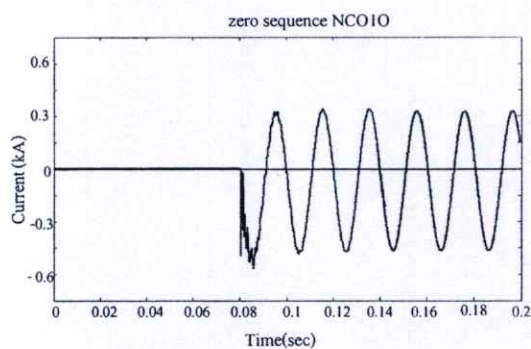
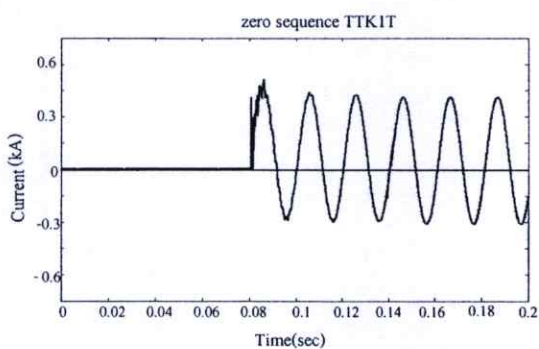


(ก) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน TTK (ข) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน NCO



(ค) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน TTK

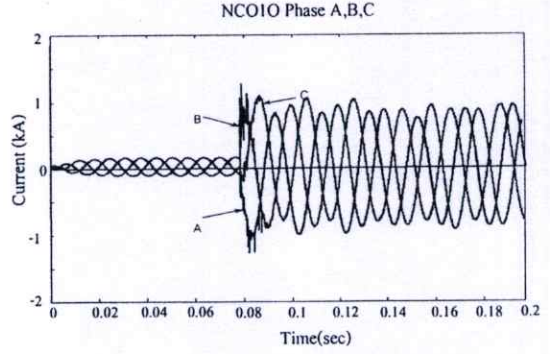
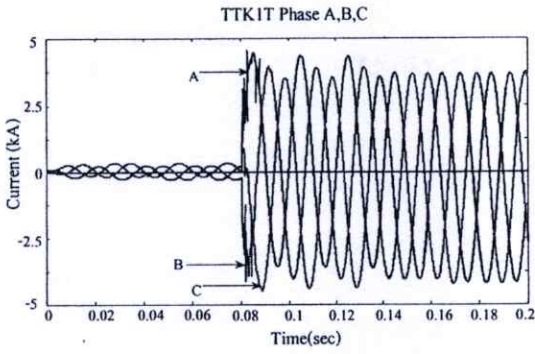
(ง) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน NCO



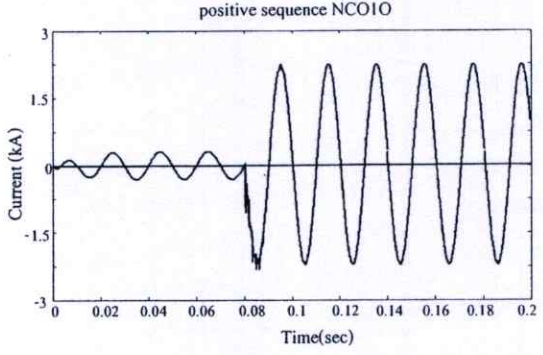
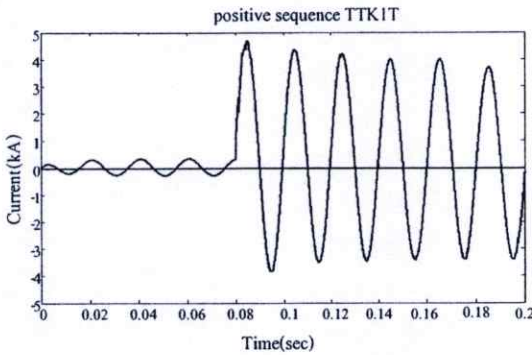
(จ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน TTK

(ฉ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน NCO

รูปที่ 4.12 สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟสที่ตำแหน่ง F_1 และฟอลต์เฟส A ลงดินที่ตำแหน่ง F_2

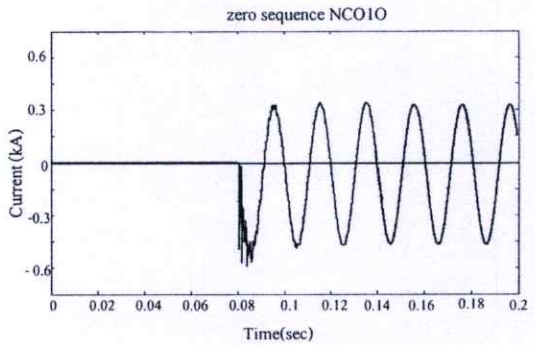
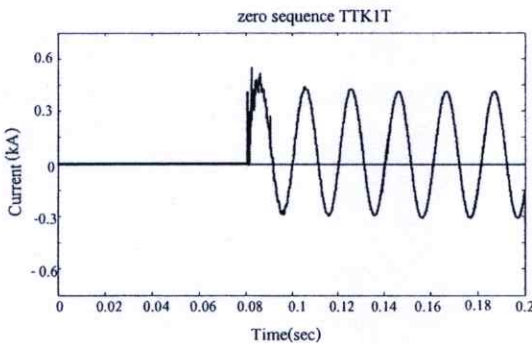


(ก) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน TTK (ข) สัญญาณกระแสเฟส A, B และ C ด้าน NCO



(ค) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน TTK

(ง) สัญญาณกระแสลำดับบวกด้าน NCO



(จ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน TTK

(ฉ) สัญญาณกระแสลำดับศูนย์ด้าน NCO

รูปที่ 4.13 สัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟส, กระแสลำดับบวก และ กระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟสตัววงจรลงดินที่ตำแหน่ง F_1 และฟอลต์เฟส A ลงดินที่ตำแหน่ง F_2

เมื่อพิจารณาสัญญาณกระแสลำดับบวก ในสภาวะเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC) และฟอลต์สามเฟสตัววงจรลงดิน (ABCG) รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าค่ากระแสลำดับบวก จะค่าน้อยกว่าในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ส่วนสัญญาณกระแสลำดับศูนย์ ในสภาวะเกิดฟอลต์

สามเฟส (ABC) และฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (ABCG) จะค่าน้อยมากหรือ กล่าวได้ว่าไม่สามารถตรวจจับสัญญาณกระแสลำดับศูนย์ได้ แต่เมื่อเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน (Simultaneous Fault) ตามรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาสัญญาณกระแสลำดับศูนย์ จะมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับกรณีฟอลต์สามเฟส (ABC) และฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (ABCG) เพราะว่ามีผลกระทบมาจากฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) ที่เกิดขึ้นเอง ดังนั้นเมื่อเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันจะมีกระทบต่อการวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่ง

การวิเคราะห์ฟอลต์จะจำลองฟอลต์ โดยทำการจำลองฟอลต์จากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ถึงสถานีไฟฟ้าหนองจอก โดยวิเคราะห์ทางจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก เป็นจุดอ้างอิงซึ่งแบ่งการจำลองฟอลต์เป็น 4 กรณี

- 1.กรณีเกิดฟอลต์จุดเดียว คือ เกิดฟอลต์ฟอลต์สามเฟส (ABC) ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร
- 2.กรณีเกิดฟอลต์จุดเดียว คือ เกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (ABCG) ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร
- 3.กรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน คือตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์ฟอลต์สามเฟส (ABC) ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์ที่เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร
- 4.กรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน คือตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (ABCG) ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์ที่เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร

ตารางที่ 4.1 ค่าสูงสุดขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง

ประเภทของฟอลต์		ค่าสูงสุดขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง			
F1	F2	TTK (Circuit1)	TTK (Circuit2)	NCO (Circuit1)	NCO (Circuit2)
ABC	Normal	4.384 kA	1.989 kA	1.660 kA	0.893 kA
ABCG	Normal	4.385 kA	1.988 kA	1.659 kA	0.893 kA
ABC	AG	4.209 kA	1.690 kA	2.184 kA	1.632 kA
ABCG	AG	4.174 kA	1.664 kA	2.279 kA	1.579 kA

ตารางที่ 4.2 ค่าผลต่างขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง กรณีเกิดฟอลต์สามเฟส (ABC) และฟอลต์ฟอลต์สามเฟสลำดับวงจรลงดิน (ABCG) ที่ตำแหน่ง F_1

ชนิดฟอลต์ ตำแหน่งที่ 2	ค่าผลต่างขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง			
	TTK (Circuit1)	TTK (Circuit2)	NCO (Circuit1)	NCO (Circuit2)
Normal	0.0005 kA	0.0005 kA	0.0008 kA	0.0006 kA
AG	0.0353 kA	0.0260 kA	0.0944 kA	0.0531 kA

จากรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ค่าองค์ประกอบกระแสลำดับบวกของกระแสแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเกิดฟอลต์ชนิดสามเฟส (ABC) และชนิดสามเฟสลงดิน (ABCG) ที่ตำแหน่ง F_1 ส่วนตำแหน่ง F_2 อยู่ในสภาวะปกติ พบว่า ค่าองค์ประกอบกระแสลำดับบวกจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างฟอลต์สามเฟส (ABC) และสามเฟสลงดิน (ABCG) ส่วนในรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน (AG) ที่ตำแหน่ง F_2 ค่าองค์ประกอบกระแสลำดับบวกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 ในขณะเดียวกันค่าองค์ประกอบกระแสลำดับบวกจะมีค่าผลต่างเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ที่แสดงให้เห็นผลกระทบของการเกิดฟอลต์ดังกล่าวที่แสดงตามตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 โดยพฤติกรรมของการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จะส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งดังกล่าวได้ ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งด้วยการแปลงเวฟเฟิร์ตจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

5.1 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตในบทที่ 3 วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยสมมุติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรที่จะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย [34,35] เช่น มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน โดยนำข้อมูลสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากแบบจำลองฟอลต์ที่อัตราการสุ่ม (Sampling Rate) 200 kHz มาทำการแปลงให้อยู่ในองค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) จากนั้นนำสัญญาณองค์ประกอบกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current) มาดำเนินการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา โดยการใช้เวฟเล็ตแม่ซันิค Daubechies 4 (db4) แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละสเกล เพื่อตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสเกล หลังจากนั้นนำข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้มาวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ต่างๆจะแสดงในหัวข้อถัดไป

5.2 การตรวจจับฟอลต์

รูปแบบของการตรวจจับฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC มาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียว โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเล็ตจะนำสัญญาณกระแสฟอลต์ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้านมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่างๆ โดยใช้เมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation Matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ (5.1) [31, 36]

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

เมื่อ \hat{I}_{a0} หมายถึงองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)

\hat{I}_{a1} หมายถึงองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence)

\hat{I}_{a2} หมายถึงองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence)

T หมายถึงเมตริกการแปลงของกระแส (Phase Current Transformation Matrix)

วิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้เมตริกการแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transformation Matrix) [37] เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายส่งทั้งแบบมีการไขว้สลับสายแบบสมบรูณ์และไม่มีการไขว้สลับสาย โดยเมตริกการแปลงของระบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงเมตริกการแปลงของระบบ

Scale	Frequency Range (kHz)	Sequence Transformation Matrix
1	50-100	$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
2	25-50	
3	12.5-25	
4	6.25-12.5	
5	3.125-6.25	

การตรวจจับพอลต์สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณกระแสพอลต์ในแต่ละเฟส และสัญญาณกระแสพอลต์ขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ของปลายสายส่งแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ดแม่ซนิก Daubechies4 (db4) [29, 38] เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกัน แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2 ตามลำดับซึ่งในแต่ละสเกลสามารถแสดงค่าของช่วงความถี่ต่างๆดังนี้

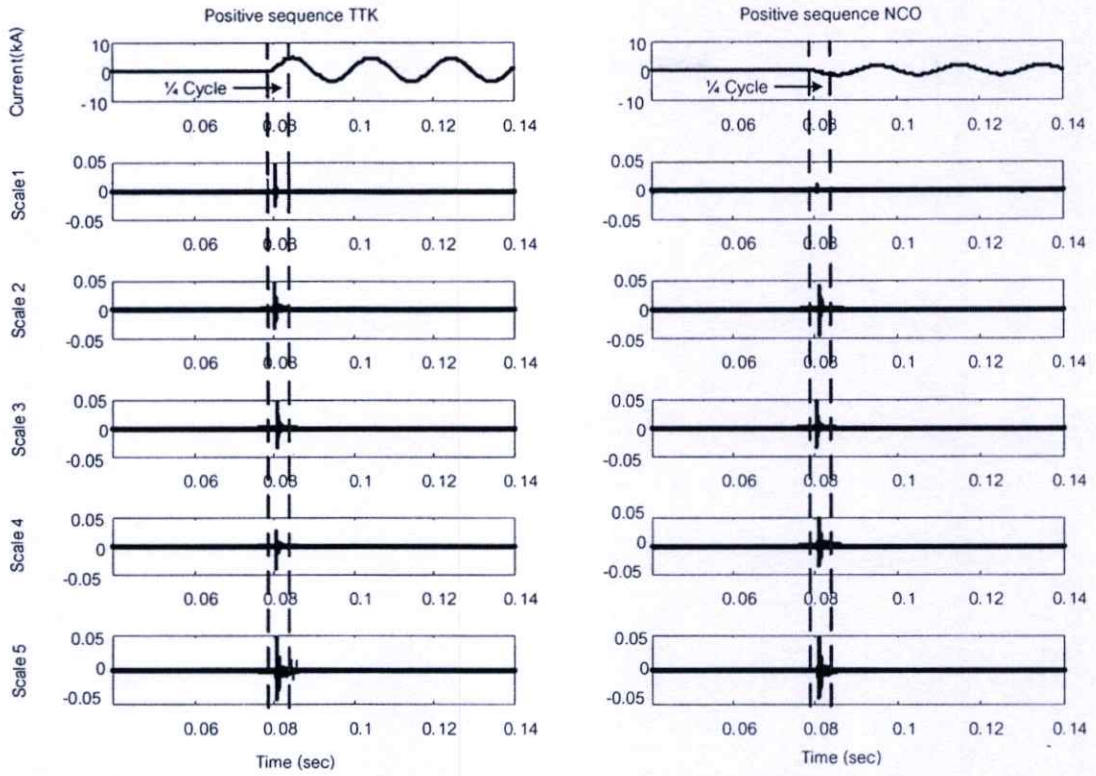
สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

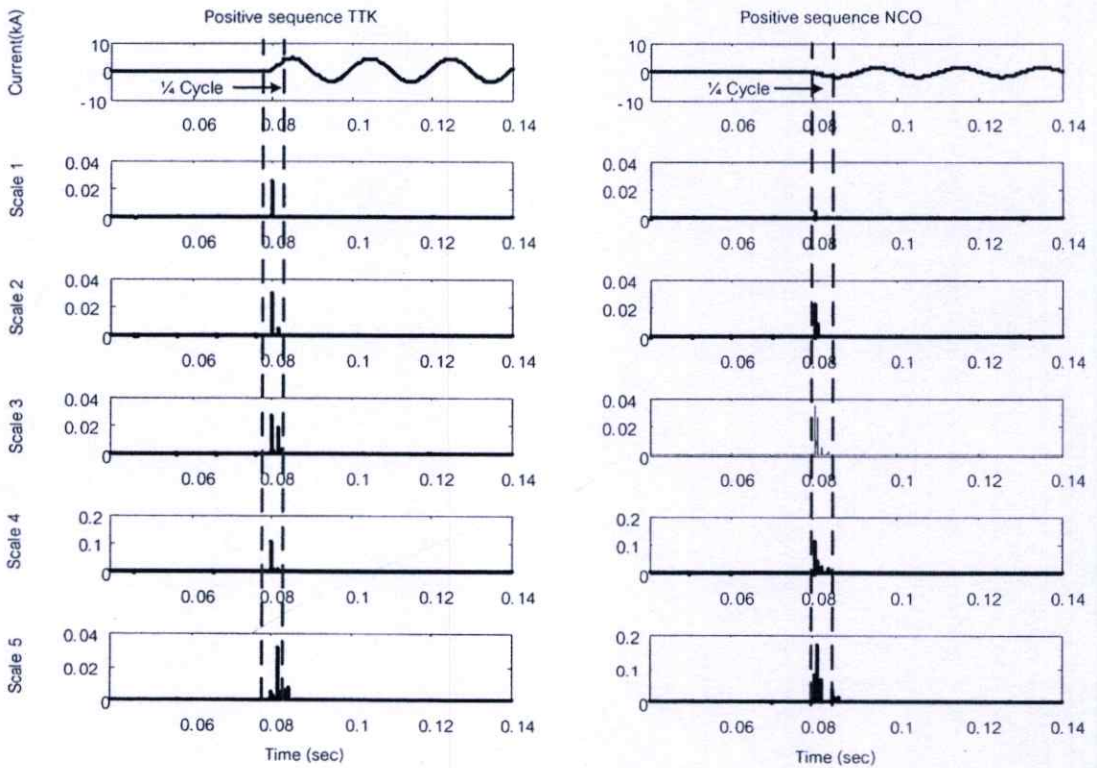
สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz



รูปที่ 5.1 แสดงผลการแปลงเวฟสี่เหลี่ยมของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ด้าน TTK และ NCO



รูปที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังสองของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ด้าน TTK และ NCO

วิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง ¼ ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์เป็นจำนวนเท่า ในแต่ละสเกลของกระแสที่ปลายสายส่งแต่ละด้านดังรูปที่ 5.1 และเพื่อให้การพิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.2 จากผลการแปลงเวฟเฟิร์ตสามารถสังเกตได้ว่าในสภาวะที่เริ่มมีฟอลต์ ($t \geq 0.08 \text{ sec}$) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกลจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 0.08 \text{ sec}$) ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า “ถ้าสัมประสิทธิ์ในช่วง ¼ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ของสเกลใดสเกลหนึ่งของกระแสลำดับบวก เมื่อวัดที่ปลายสายส่งแต่ละด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากช่วงสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ แสดงว่าเกิดฟอลต์ขึ้นบนสายส่ง” จากนั้นนำค่ากระแสสูงสุดในช่วง ¼ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ของวงจรที่ 1 และ วงจรที่ 2 มาเปรียบเทียบในแต่ละบัส เพื่อทำการระบุวงจรที่มีฟอลต์เกิดขึ้น โดยรายละเอียดขั้นตอนการระบุวงจรที่มีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาฟอลต์ที่สถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK)

If Maximum Current of TTK1T > Maximum Current of TTK2T

then

Fault at Circuit 1

else

Fault at Circuit 2

end

พิจารณาฟอลต์ที่สถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO)

If Maximum Current of NCO1O > Maximum Current of NCO2O

then

Fault at Circuit 1

else

Fault at Circuit 2

end

ตารางที่ 5.2 และ ตารางที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสสูงสุดหลังเกิดฟอลต์ของทั้งสองวงจรทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก ตามลำดับโดยผลลัพธ์ที่ได้ของการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ ตามตารางที่ 5.2 และ ตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 แสดงผลสรุปของการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก

ประเภทของฟอลต์		มุมเริ่มเกิดฟอลต์	ระยะทางที่เกิดฟอลต์		ค่าสูงสุดของกระแสสูงสุดหลังเกิดฟอลต์		ผลลัพธ์การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์
F1	F2		F1	F2	TTK1T	TTK2T	
AG	-	0	20	-	8.09E-05	8.02E-05	Circuit 1
AG	-	30	20	-	6.30E-03	6.25E-03	Circuit 1
AG	-	60	20	-	2.14E-02	2.13E-02	Circuit 1
AG	-	90	20	-	3.04E-02	3.01E-02	Circuit 1
AG	ABC	0	20	187	8.09E-05	8.02E-05	Circuit 1
AG	ABC	30	20	187	6.30E-03	6.25E-03	Circuit 1
AG	ABC	60	20	187	2.14E-02	2.13E-02	Circuit 1
AG	ABC	90	20	187	3.04E-02	3.01E-02	Circuit 1

ตารางที่ 5.3 แสดงผลสรุปของการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก

ประเภทของฟอลต์		มุมเริ่มเกิดฟอลต์	ระยะทางที่เกิดฟอลต์		ค่าสูงสุดของกระแสสูงสุดหลังเกิดฟอลต์		ผลลัพธ์การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์
F1	F2		F1	F2	NCO1O	NCO2O	
AG	-	0	20	-	2.45E-04	1.22E-04	Circuit 1
AG	-	30	20	-	7.87E-03	3.91E-03	Circuit 1
AG	-	60	20	-	2.87E-02	1.42E-02	Circuit 1
AG	-	90	20	-	4.18E-02	2.08E-02	Circuit 1
AG	ABC	0	20	187	9.75E-04	4.85E-04	Circuit 1
AG	ABC	30	20	187	3.13E-02	1.55E-02	Circuit 1
AG	ABC	60	20	187	1.14E-01	5.66E-02	Circuit 1
AG	ABC	90	20	187	1.66E-01	8.26E-02	Circuit 1

อย่างไรก็ตามก่อนที่ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งที่เกิดขึ้น จำเป็นต้องเข้าใจในพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเส็ดแบบเต็มหน่วยและผลกระทบต่อกรวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดความเข้าใจในมากขึ้น

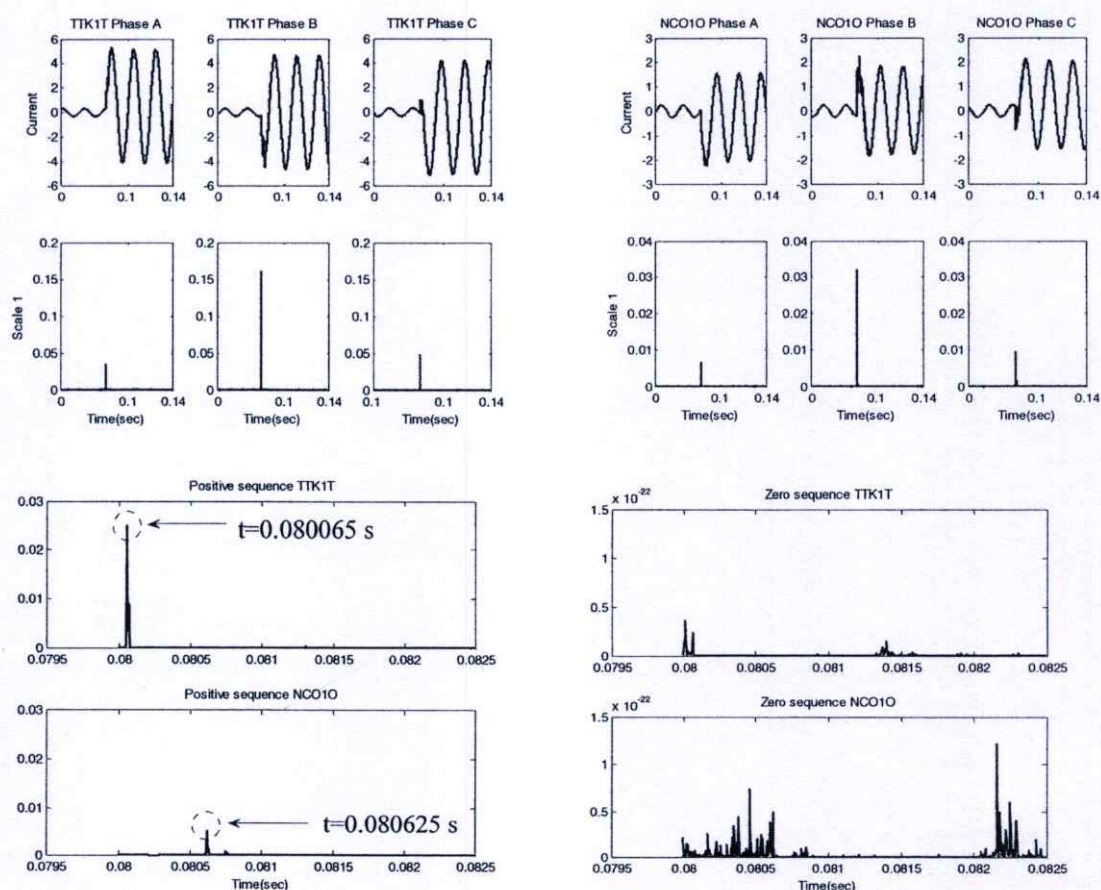
5.3 การแสดงพฤติกรรมของการเกิดฟอลต์

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่งส่วนใหญ่จะวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในลักษณะฟอลต์จุดเดียว แต่เมื่อเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสายส่งเดียวกันจะส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่ง ดังนั้นก่อนที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จำเป็นต้องเข้าใจในพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ทั้งในกรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว และกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันเสียก่อน เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่งมากขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 กรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว

5.3.1.1 กรณีเกิดฟอลต์สามเฟส

ในกรณีนี้เป็นการจำลองฟอลต์โดยเกิดที่ตำแหน่ง F_1 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโกเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร และมุมที่เริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A

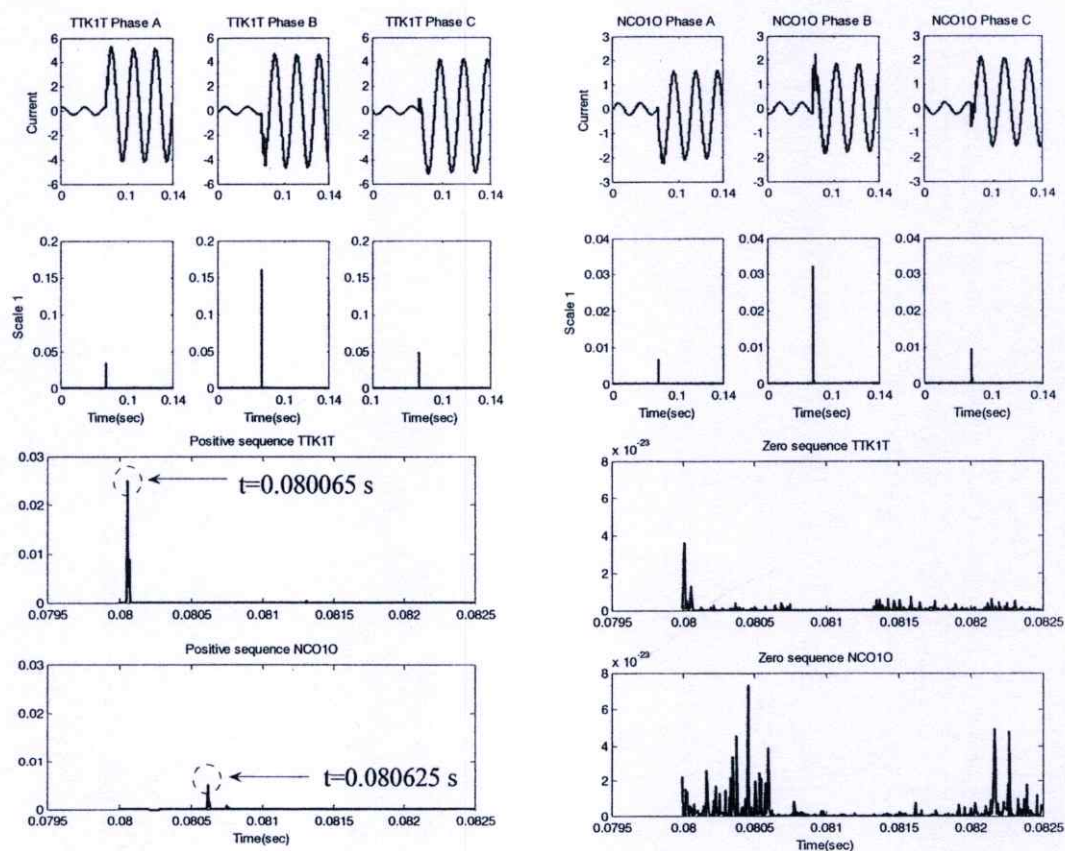


รูปที่ 5.3 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ที่ปลายสายส่ง ทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์สามเฟส

จากรูปที่ 5.3 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าหนองจอก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสามเฟสมีขนาดมากกว่า 5 เท่าเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ และค่าสัมประสิทธิ์ของเฟส B จะมีขนาดที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของเฟส A และ เฟส C เป็นเพราะว่าเกิดจากผลของมุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ และจากการตรวจจับฟอลต์ทำให้สามารถทราบเวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์ซึ่งเป็นเวลาที่สัญญาณฟอลต์เดินทางมาจากจุดที่เกิดฟอลต์มายังปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน ข้อมูลทางด้านเวลานี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการหาตำแหน่งฟอลต์ได้ จากรูปกระแสลำดับบวกจะเห็นได้ว่าที่ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ตรวจจับเวลาได้เร็วกว่า และค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกมากกว่าที่ทางสถานีไฟฟ้าหนองจอกเป็นเพราะเกิดฟอลต์ใกล้สถานีไฟฟ้าท่าตะโก และค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์มีค่าน้อยมากหรือเท่ากับในกรณีไม่เกิดฟอลต์

5.3.1.2 กรณีเกิดฟอลต์สามเฟสด้วงจรลงดิน

ในกรณีนี้เป็นการจำลองฟอลต์โดยเกิดที่ตำแหน่ง F₁ ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโกเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร และมุมที่เริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A

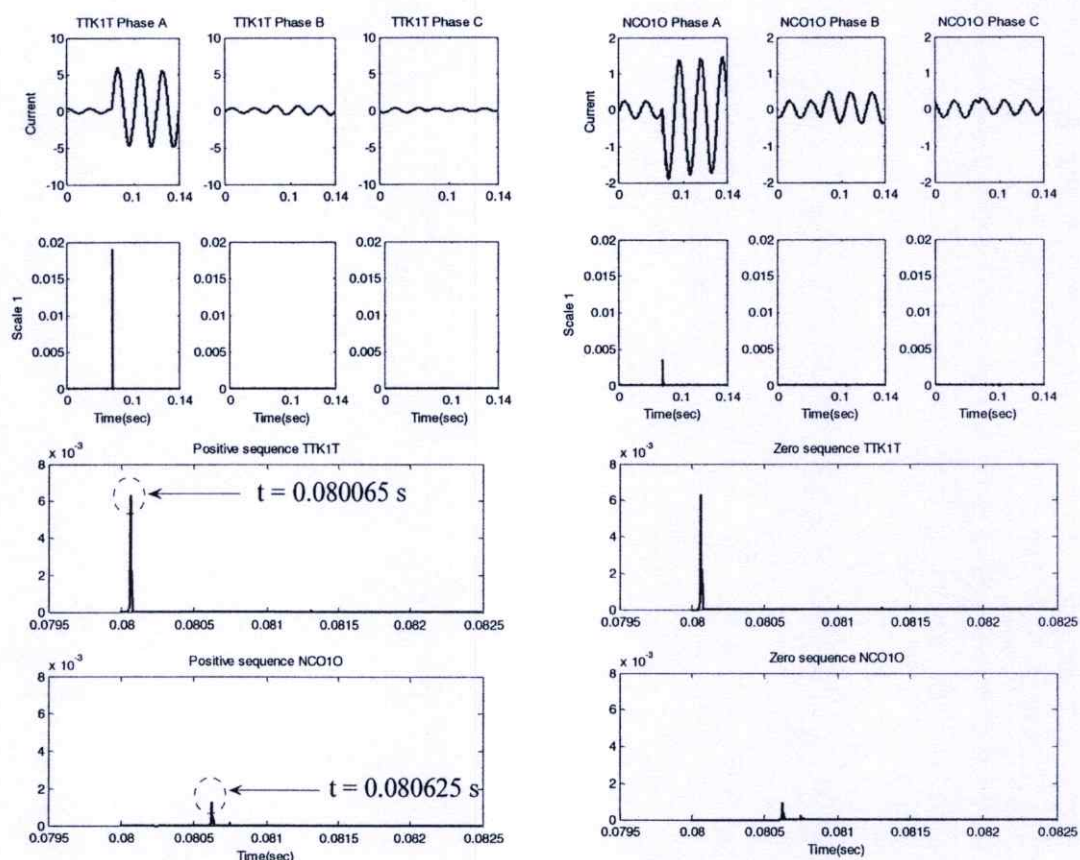


รูปที่ 5.4 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์สามเฟสด้วงจรลงดิน

จากรูปที่ 5.4 เป็นกรณีที่เกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่ารูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 จะมีลักษณะคล้ายกันซึ่งได้จากการแปลเวฟเล็ดเดียวกันแต่เป็นการจำลองฟอลต์ชนิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการเกิดฟอลต์ชนิดฟอลต์สามเฟส และฟอลต์ชนิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน จะมีพฤติกรรมเหมือนกันซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี

5.3.1.3 กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

ในกรณีนี้เป็นการจำลองฟอลต์โดยเกิดที่ตำแหน่ง F_1 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโกเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร และมุมที่เริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A



รูปที่ 5.5 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ที่ปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

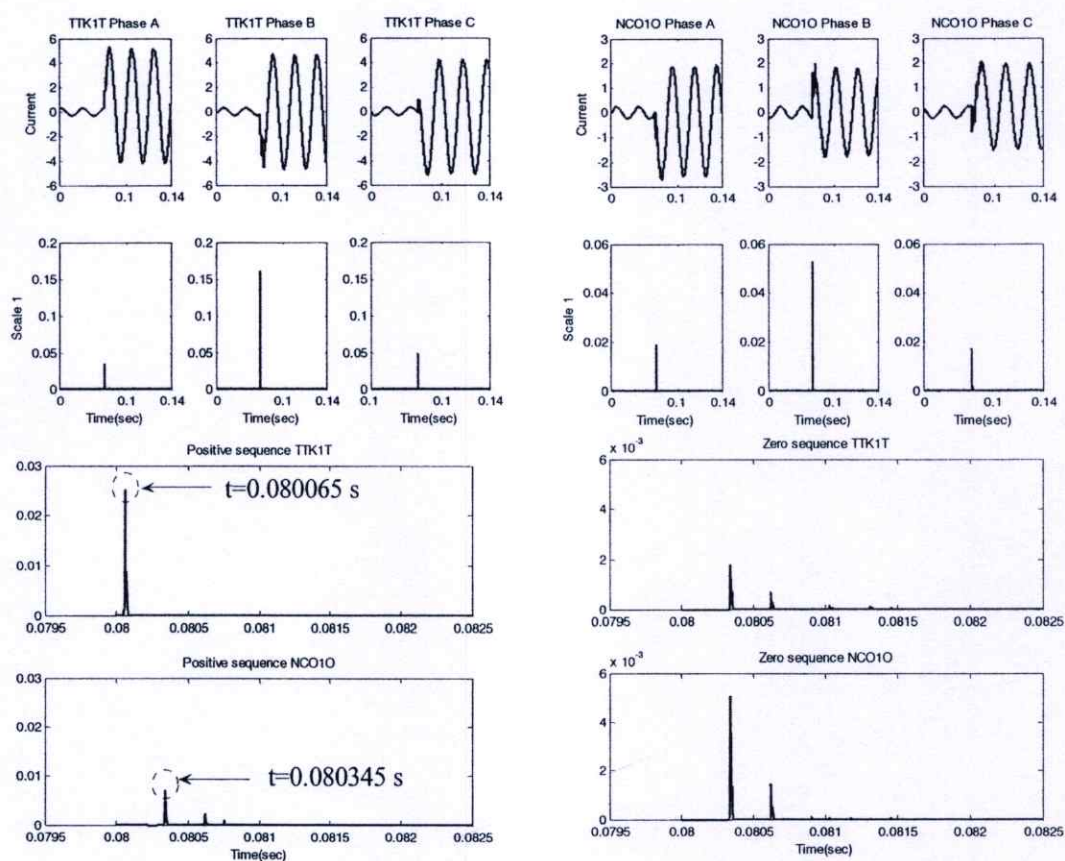
จากรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก พบว่าเฟส A จะมีขนาดที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเฟส B และ C เมื่อพิจารณาทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก พบว่าเฟส A จะมีขนาดที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับเฟส B และ C เหมือนกัน แต่ขนาดของเฟส A ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโกมีค่ามากกว่าสถานีไฟฟ้าหนองจอก เนื่องจาก

ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน ใกล้สถานีไฟฟ้าท่าตะโก และเมื่อพิจารณาทางด้านกระแสลำดับศูนย์ พบว่าสามารถตรวจจับเวลาของค่าสัมประสิทธิ์ของการเกิดฟอลต์ทั้งทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าหนองจอกได้เนื่องจากเกิดฟอลต์ลงดิน

5.3.2 กรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

5.3.2.1 ฟอลต์สามเฟส และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

ในกรณีนี้เป็นการจำลองฟอลต์โดยเป็นกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันเป็นกรณีที่เกิดฟอลต์สามเฟสที่ตำแหน่ง F_1 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ตำแหน่ง F_2 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร



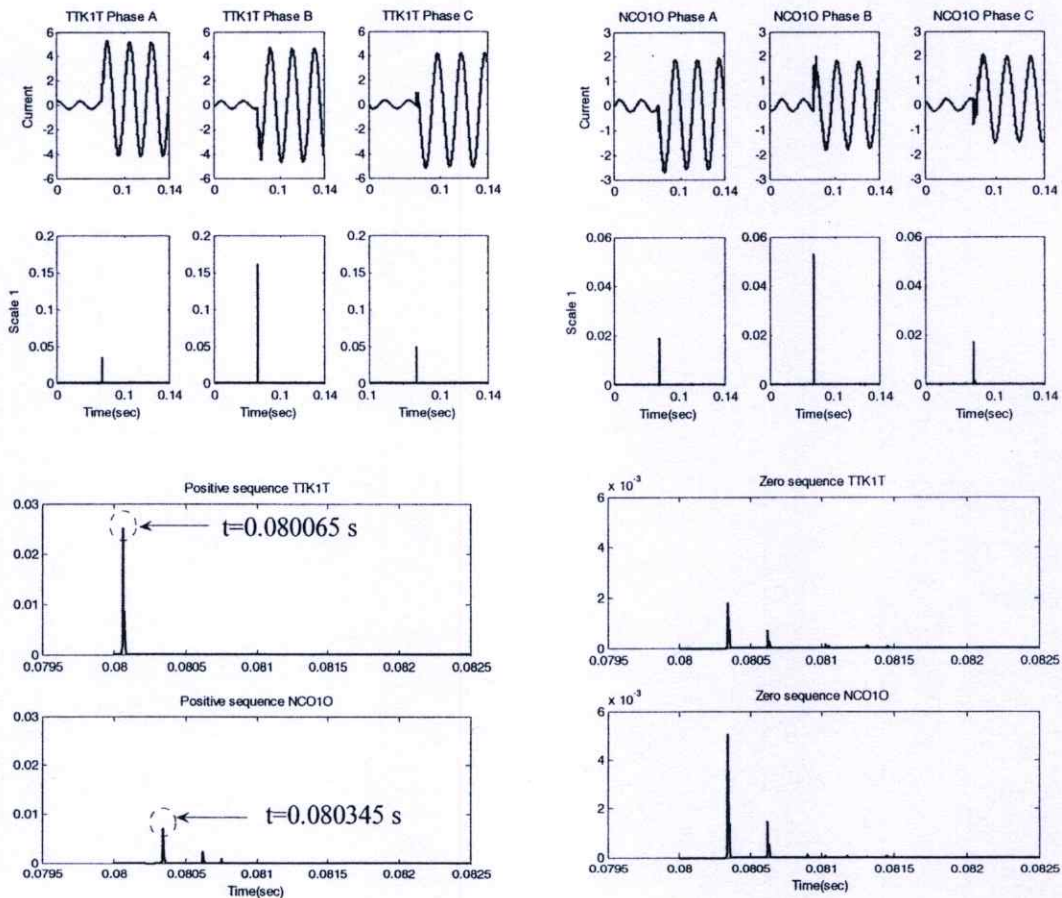
รูปที่ 5.6 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ที่ปลายสายส่ง ทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

จากรูปที่ 5.6 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสเมื่อเทียบกับกรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว (ฟอลต์สามเฟส) ในรูปที่ 5.3 จะไม่เห็นความแตกต่างมากเท่าไรแต่เมื่อพิจารณาทางด้านกระแสลำดับบวก สังเกตเห็นได้ว่าการตรวจจับเวลาและค่าสัมประสิทธิ์ของ

กระแสลำดับบวกทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก จะตรวจจับเวลาได้เร็วกว่ากรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว (ฟอลต์สามเฟส) และขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกก็มีค่ามากกว่า ก็เพราะว่าผลมาจากการเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน เกิดที่ตำแหน่ง F_2 และเมื่อพิจารณาทางด้านกระแสลำดับศูนย์ สังเกตเห็นได้การตรวจจับทางด้านเวลาที่สถานีไฟฟ้าท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าหนองจอกจะตรวจจับเวลาของค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์จะตรวจจับที่เวลาเท่ากันก็เพราะว่าเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน ที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร

5.3.2.2 ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

ในกรณีนี้เป็นการจำลองฟอลต์โดยเป็นกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันเป็นกรณีที่เกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดินที่ตำแหน่ง F_1 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน ที่ตำแหน่ง F_2 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร

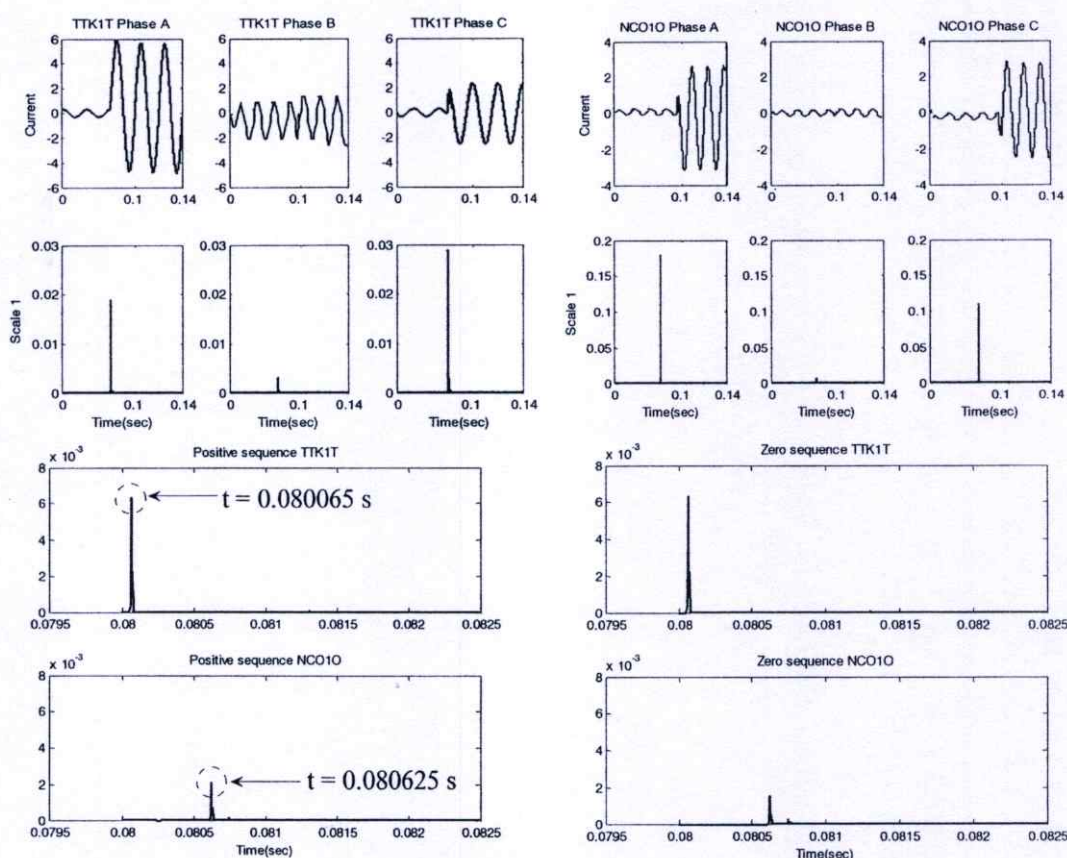


รูปที่ 5.7 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ที่ปลายสายส่ง ทั้ง 2 ด้านในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

จากรูปที่ 5.7 เป็นกรณีที่เกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (ABCG) ที่ตำแหน่ง F_1 และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน ที่ตำแหน่ง F_2 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.6 และ รูปที่ 5.7 สังเกตเห็นได้ว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆคล้ายกันซึ่งได้จากการแปลเวฟเดียวกัน

5.3.2.3 ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน และฟอลต์ระหว่างเฟส C กับ A

ในกรณีนี้เป็นการจำลองฟอลต์โดยเป็นกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เป็นกรณีที่เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ตำแหน่ง F_1 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ระหว่างเฟส C และ A ที่ตำแหน่ง F_2 ห่างจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร



รูปที่ 5.8 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยกระแสลำดับบวกและกระแสลำดับศูนย์ที่ปลายสายส่ง ทั้ง 2 ด้าน ในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

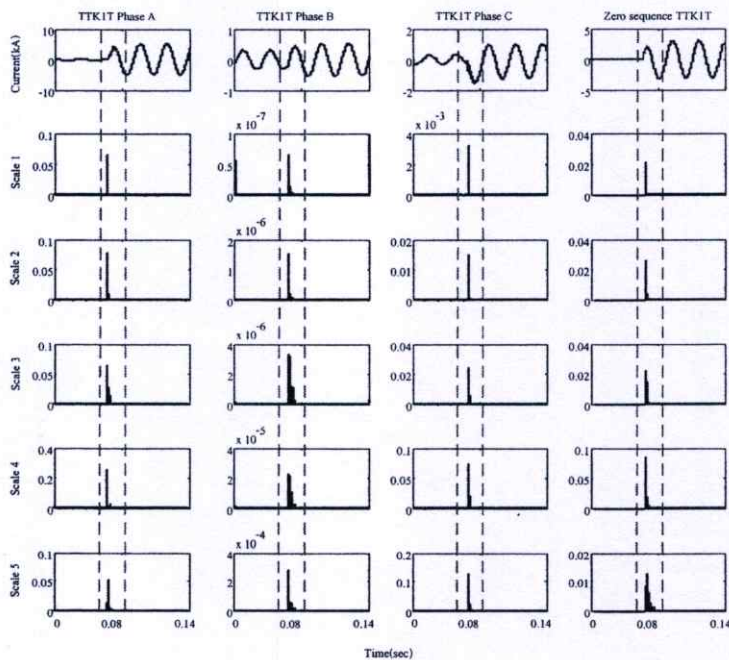
จากรูปที่ 5.8 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก ในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน พบว่าทางสถานีไฟฟ้าท่าตะโก สามารถตรวจจับเฟส A และ เฟส C ได้ เนื่องจากมีผลกระทบมาจากฟอลต์ระหว่างเฟส C และ A ที่ตำแหน่ง F_2

5.4 การระบุประเภทของฟอลต์

การระบุประเภทของฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอด้วยกัน 2 วิธี โดยวิธีที่ 1 เป็นวิธีการตัดสินใจในการระบุประเภทของฟอลต์ [14] ในกรณีฟอลต์จุดเดียวแต่เมื่อนำไปวิเคราะห์ในกรณีที่เกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องไม่ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ จากกรณีศึกษา 2178 ข้อมูล โดยนำเสนอไว้ในบทที่ 6 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีที่ 2 ซึ่งถูกออกแบบวิธีการตัดสินใจใหม่เพื่อรองรับในกรณีฟอลต์จุดเดียวและในกรณีที่เกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำในการระบุประเภทของฟอลต์มากกว่าทั้งในกรณีฟอลต์จุดเดียวและในกรณีที่เกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อแสดงรายละเอียดดังกล่าวจะขอยกตัวอย่างการฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันโดยตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน ที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์ระหว่างเฟส C กับ A ที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร โดยนำเสนอในหัวข้อต่อไป

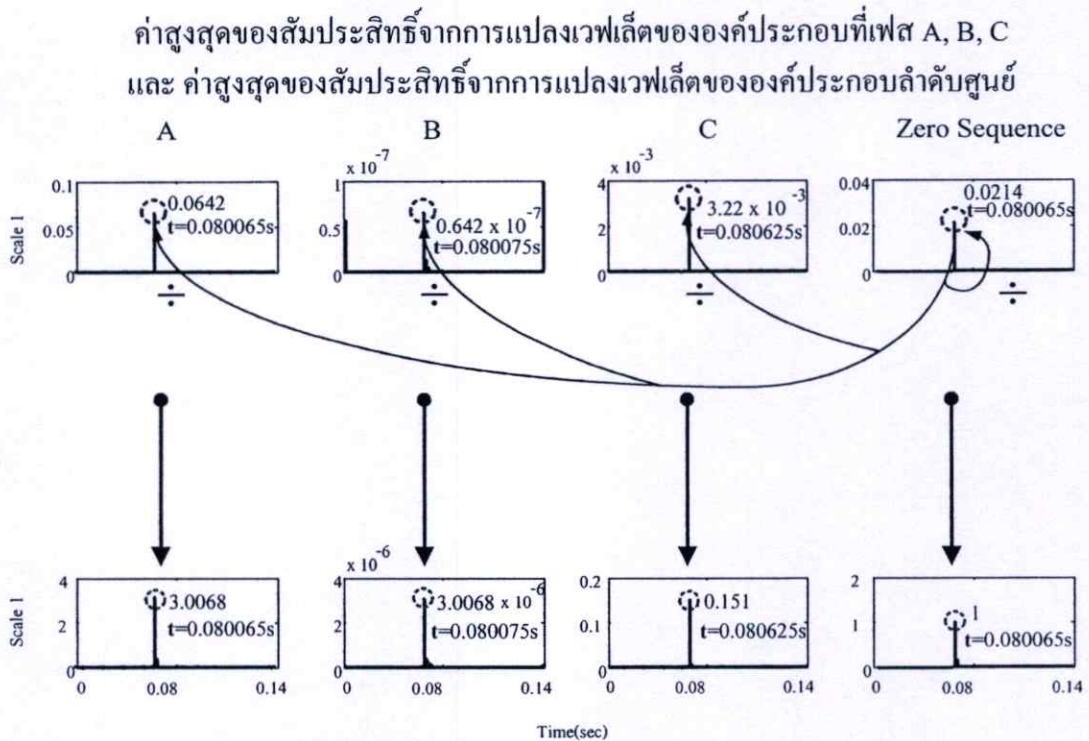
5.4.1 การระบุประเภทของฟอลต์ [14]

รูปแบบการวิเคราะห์สำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ [14] จะอาศัยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ โดยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะถูกนำมาเป็นข้อมูลเพื่อระบุประเภทของฟอลต์ [14] โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.9 การลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1-5 ของปลายด้าน TTK

จากสัญญาณพอลต์ รูปที่ 5.9 สามารถวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสจะพบว่าเฟส A และ เฟส C จะมีขนาดที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเฟส B จากลักษณะดังกล่าวแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงจะมีขนาดที่แปรตามเฟสที่เกิดพอลต์ ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ในการระบุที่เกิดพอลต์ที่เฟสใด โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟส โดยรูปแบบการระบุประเภทของพอลต์ [14] นี้ได้ทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดในสเกลที่ 1-5 จากองค์ประกอบในแต่ละเฟส และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงทำการปรับค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสที่สเกลใดๆ ให้มีค่าอ้างอิงเดียวกันซึ่งทำได้โดยการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากองค์ประกอบลำดับศูนย์มาหารค่าสูงสุดขององค์ประกอบในแต่ละเฟสที่สเกลเดียวกันเพื่อให้ได้ค่าในการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.10 และ สมการที่ (5.2) และ สมการที่ (5.3)



รูปที่ 5.10. การปรับค่าเพื่อให้มีค่าอยู่บนฐานอ้างอิงเดียวกันของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดในสเกลที่ 1

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟสใดๆ

$$X_{\text{com}}^L = \frac{X_{\text{max}}^L}{Z_{\text{max}}^L} \quad (5.2)$$

เมื่อ X_{com}^L = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบ X ใดๆ

X_{\max}^L = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเส้นขององค์ประกอบที่เฟส A, B, C ที่สเกล L ตามลำดับ

$Z_{\max}^L(\text{post})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเส้นขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ที่สเกล L

และทำการหาค่าสำหรับช่วยในการพิจารณาเพิ่มเติมดังนี้

Ph_{\max}^L = ค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง A_{com}^L , B_{com}^L และ C_{com}^L ที่สเกล L

Ph_{\min}^L = ค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง A_{com}^L , B_{com}^L และ C_{com}^L ที่สเกล L

พิจารณาเฟสที่เกิดฟอลต์ในแต่ละสเกล

รูปแบบการวิเคราะห์สามารถแสดงได้โดยใช้รูปแบบการเขียนโปรแกรมดังต่อไปนี้

if [$(X_{\text{com}}^L > 0.4 Ph_{\max}^L)$ or $(X_{\text{com}}^L > 5 Ph_{\min}^L)$ or $(X_{\text{com}}^L > 1 \times 10^{10})$]

then

phase X fault

else

phase X unfault

end

พิจารณาฟอลต์ที่ลงดิน

$$Z_{\text{post}} \geq 5Z_{\text{pre}} \quad (5.3)$$

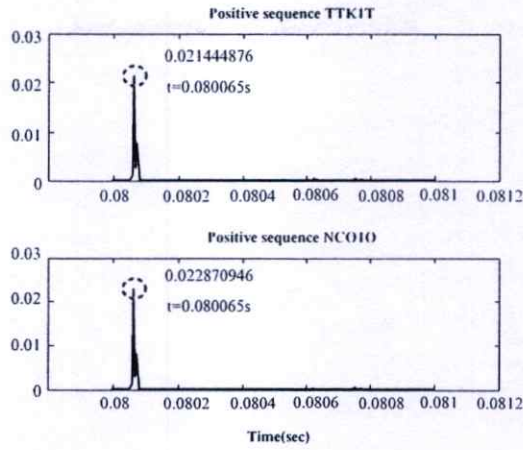
เมื่อ Z_{pre} = ค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์ก่อนเกิดฟอลต์

Z_{post} = ค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์หลังเกิดฟอลต์

5.4.2 การระบุประเภทของฟอลต์ที่น่าเสนอใหม่

ลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แตกต่างกัน ซึ่งในการระบุประเภทของฟอลต์ [14] โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเส้นในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสในแต่ละเฟส มาเปรียบเทียบกับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเส้นขององค์ประกอบกระแสลำดับศูนย์

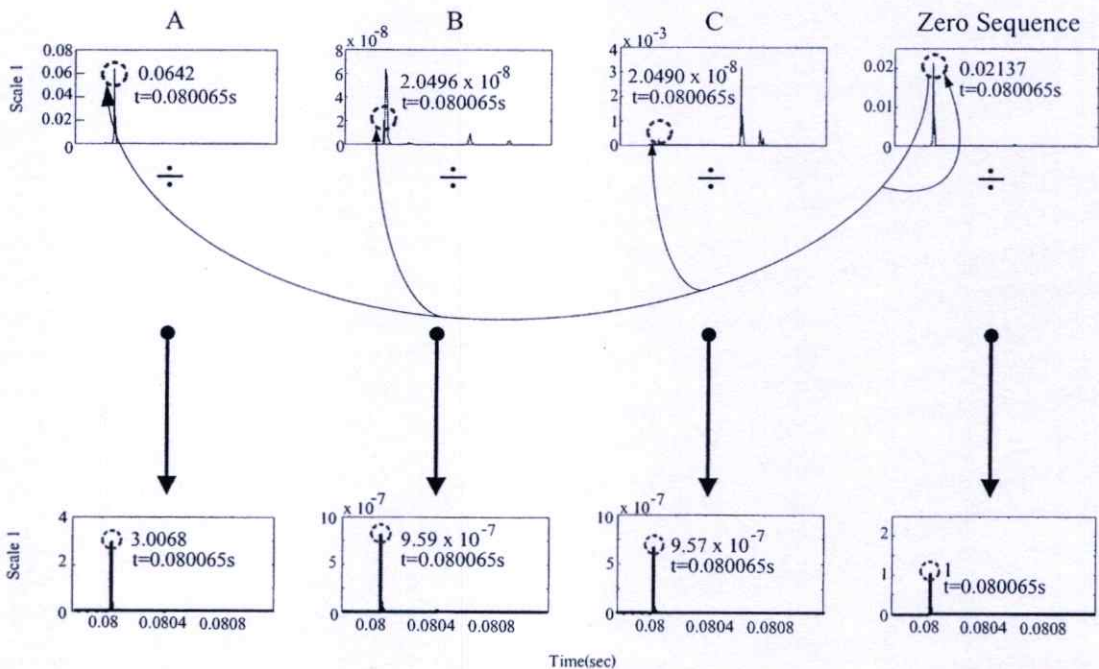
ส่วนการระบุประเภทของฟอลต์ที่น่าเสนอใหม่โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสในแต่ละเฟส และองค์ประกอบกระแสลำดับศูนย์ หลังเกิดฟอลต์ ณ.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก (First Peak of Positive Sequence Current) ตามรูปที่ 5.11



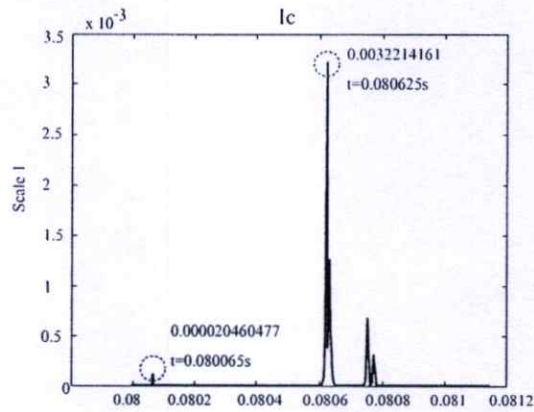
รูปที่ 5.11.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจึงทำการปรับค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสที่สเกลใดๆ ให้มีค่าอ้างอิงเดียวกันซึ่งทำได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์จากองค์ประกอบลำดับศูนย์มาหารค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสที่สเกลเดียวกันเพื่อให้ได้ค่าในการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.12

ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสในแต่ละเฟส และองค์ประกอบกระแสลำดับศูนย์ หลังเกิดฟอลต์ ณ.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก



รูปที่ 5.12.การปรับค่าเพื่อให้มีค่าอยู่บนฐานอ้างอิงเดียวกันของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเส้นในสเกลที่ 1 ณ.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก



รูปที่ 5.13.ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส C

จากรูปที่ 5.12 เมื่อพิจารณาเฉพาะกระแสเฟส C ตามรูปที่ 5.13 จะแสดงให้เห็นความแตกต่างของการตรวจจับค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส C โดยที่เวลาเท่ากับ 0.080625 วินาที เป็นค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส C ซึ่งเป็นการระบุประเภทของพอลด์ [14] และที่เวลาเท่ากับ 0.080065 วินาที เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเฟส C ณ.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกได้ ซึ่งเป็นการระบุประเภทของพอลด์ที่น่าเสนอใหม่ โดยการเปรียบเทียบของการระบุประเภทของพอลด์ที่น่าเสนอใหม่ มีรูปแบบการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟสใดๆ

$$X_{FPcom}^L = \frac{X_{(FPpost)}^L}{Z_{(FPpost)}^L} \quad (4.4)$$

เมื่อ

X_{FPcom}^L = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบ X ใดๆ

$X_{(FPpost)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดของกระแสเฟส A, B, C ณ.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ที่สเกล L

$Z_{(FPpost)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ณ.เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ที่สเกล L

Ph_{FPmax}^L = ค่าสูงสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส (A_{FPcom}^L , B_{FPcom}^L และ C_{FPcom}^L) ที่สเกล L

Ph_{FPmin}^L = ค่าต่ำสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส (A_{FPcom}^L , B_{FPcom}^L และ C_{FPcom}^L) ที่สเกล L

5.4.2.1 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์ในแต่ละสเกล

การระบุว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นที่เฟส โดยพิจารณาค่าเปรียบเทียบ ($A_{com}^L, B_{com}^L, C_{com}^L$) ซึ่งเฟสที่สามารถระบุว่าเกิดฟอลต์ได้นั้น โดยรายละเอียดในการเปรียบเทียบ ($A_{com}^L, B_{com}^L, C_{com}^L$) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ ซึ่งนำเสนอในลักษณะรูปแบบของการเขียนโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาเฟสที่เกิดฟอลต์ในแต่ละสเกล

```

if [ ( $X_{FPcom}^L > 5Ph_{FPmax}^L$ ) or ( $X_{FPcom}^L > 1 \times 10^{11}$ ) or ( $X_{FPcom}^L > 1.1Ph_{FPmin}^L$ ) ]
then
    phase X fault
else
    phase X unfault
end

```

5.4.2.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุการเกิดฟอลต์ลงดินในแต่ละสเกล

การระบุว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ลงดิน โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ณ เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก (First Peak of Positive Sequence Current) หลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L ว่ามีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ก่อนเกิดฟอลต์หรือไม่ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการพิจารณาในรูปแบบของการเขียนโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ลงดิน

```

if  $Z_{(FPpost)}^L > 5Z_{(pre)}^L$ 
then
    Ground fault
else
    Ground unfault
end

```

เมื่อ $Z_{(pre)}^L$ = ค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์ก่อนเกิดฟอลต์
 $Z_{(FPpost)}^L$ = ค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์หลังเกิดฟอลต์ ณ เวลาที่ตรวจจับ
 ค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก

เพื่อแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การระบุประเภทฟอลต์ทั้งสองวิธีให้เข้าใจมากขึ้น จึงขอ ยกตัวอย่างเป็นสัญญาณฟอลต์ในกรณีเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กรณีได้ ดังต่อไปนี้

1. ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์สามเฟสที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร
2. ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร
3. ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์ฟอลต์ระหว่างเฟส C กับ A ที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร
4. ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ ตำแหน่งฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 187 กิโลเมตร

ซึ่งการวิเคราะห์สามารถทำได้ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมด โดยแสดงการวิเคราะห์ การระบุประเภทฟอลต์ทั้งสองวิธีได้ ตามตารางที่ 5.3 ถึง ตารางที่ 5.8 เป็นการวิเคราะห์ประเภทของ ฟอลต์ที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดยวิธีการระบุประเภทของฟอลต์ที่ นำเสนอใหม่ ซึ่งวิธีใหม่นี้ถูกออกแบบให้รองรับในกรณีฟอลต์จุดเดียวและในกรณีที่เกิดฟอลต์ หลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดจากฟอลต์จุดเดียวสามารถระบุ ประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องและแม่นยำเช่นเดียวกัน และในการวิเคราะห์กรณีฟอลต์หลายชนิดใน เวลาเดียวกันซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีความถูกต้องมากกว่าในกรณีใช้การระบุประเภทของฟอลต์ [14]

ตารางที่ 5.4 ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลตของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าทาคะโก

ประเภทของฟอลต์	ระยะทางที่เกิดฟอลต์		มุมเริ่มเกิดฟอลต์	ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดหลังเกิดฟอลต์				เวลาที่ตรวจจับได้ในช่วงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด				
	F1	F2		A	B	C	Zero Seq.	A	B	C	Zero Seq.	
			30	0.018871	0.023368	0.007491	0.006276	80.065	80.625	80.625	80.065	80.065
AG	ABC	20	60	0.064262	0.019086	0.000284	0.021372	80.065	80.625	81.185	80.065	80.065
			90	0.091025	0.007468	0.004397	0.030273	80.065	80.625	80.625	80.065	80.065
			30	0.018871	0.017175	1.88E-08	0.006276	80.065	80.625	80.075	80.065	80.065
AG	ABG	20	60	0.064262	0.016797	6.43E-08	0.021372	80.065	80.625	80.075	80.065	80.065
			90	0.091025	0.008728	9.13E-08	0.030273	80.065	80.625	80.075	80.065	80.065
			30	0.018871	1.89E-08	1.88E-08	0.006276	80.065	80.075	80.075	80.065	80.065
AG	CA	20	60	0.064262	6.43E-08	0.003221	0.021372	80.065	80.075	80.625	80.065	80.065
			90	0.091025	9.1E-08	0.011714	0.030273	80.065	80.075	80.625	80.065	80.065
			30	0.018871	2.21E-08	2.21E-08	0.006276	80.065	80.635	80.635	80.065	80.065
AG	AG	20	60	0.064262	8.08E-08	8.06E-08	0.021372	80.065	80.635	80.635	80.065	80.065
			90	0.091025	1.18E-07	1.18E-07	0.030273	80.065	80.635	80.635	80.065	80.065

ตารางที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟสี่เหลี่ยมของกระบวนการระบุประเภทของฟอลต์ [14] ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก

ประเภทของฟอลต์	ระยะทางที่เกิดฟอลต์		มุมเริ่มฟอลต์	ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดหลังเกิดฟอลต์					เวลาที่ตรงจัมป์ได้ใน ขณะกำลังประสิทธิสูงสุด				
	F1	F2		A	B	C	Zero Seq.	A	B	C	Zero Seq.		
AG	ABC	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
AG	ABG	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
AG	CA	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.625	80.625	80.625	80.625	80.625
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.625	80.065	80.625	80.625
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.625	80.065	80.625	80.625
AG	AG	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.075	80.075	80.065	80.065
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.075	80.065	80.075	80.065
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.075	80.065	80.075	80.065

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์จากกาแปลงเวฟเสถียรของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอนใหม่ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าทะเลโก

ประเภทของพอลต์	ระยะทางที่เกิดพอลต์		มุมเริ่มเกิด	ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสในแต่ละเฟส และองค์ประกอบกระแสลำดับศูนย์					เวลาที่ตรวจจ่ายยอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก										
	F1	F2		A	B	C	Zero Seq.	A	B	C	Zero Seq.								
F1	F2		พอลต์																
AG	ABC	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065
AG	ABG	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
AG	CA	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
AG	AG	20	187	30	0.018871	5.99E-09	6.01E-09	0.006276	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				60	0.064262	2.05E-08	2.05E-08	0.021372	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	
				90	0.091025	2.91E-08	2.9E-08	0.030273	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	80.065	

ตารางที่ 5.8 แสดงผลลัพธ์ของการระบุประเภทของพอลดี [14] และการระบุประเภทของพอลดีที่นำเสนอนี้ ไฟฟ้าทะเล โก

ประเภทของพอลดี	ระยะทางที่เกิดพอลดี		มุมเริ่มเกิด	การระบุประเภทของพอลดี[14]						การระบุประเภทของพอลดีที่นำเสนอนี้ใหม่			
	F1	F2		Acom	Bcom	Ccom	Zcom	Result	Acom	Bcom	Ccom	Zcom	Result
AG	20	187	30	3.007E+00	3.723E+00	1.194E+00	1	ABG	3.007E+00	9.541E-07	9.584E-07	1	AG
AG	20	187	60	3.007E+00	8.930E-01	1.327E-02	1	ABG	3.007E+00	9.590E-07	9.573E-07	1	AG
			90	3.007E+00	2.467E-01	1.452E-01	1	ABG	3.007E+00	9.612E-07	9.568E-07	1	AG
AG	20	187	30	3.007E+00	2.737E+00	2.997E-06	1	ABG	3.007E+00	9.541E-07	9.584E-07	1	AG
AG	20	187	60	3.007E+00	7.859E-01	3.009E-06	1	ABG	3.007E+00	9.590E-07	9.573E-07	1	AG
			90	3.007E+00	2.883E-01	3.015E-06	1	ABG	3.007E+00	9.612E-07	9.568E-07	1	AG
AG	20	187	30	3.007E+00	3.005E-06	2.997E-06	1	AG	3.007E+00	9.541E-07	9.584E-07	1	AG
AG	20	187	60	3.007E+00	3.006E-06	1.507E-01	1	CAG	3.007E+00	9.590E-07	9.573E-07	1	AG
			90	3.007E+00	3.007E-06	3.869E-01	1	CAG	3.007E+00	9.612E-07	9.568E-07	1	AG
AG	20	187	30	3.007E+00	3.516E-06	3.520E-06	1	AG	3.007E+00	9.541E-07	9.584E-07	1	AG
AG	20	187	60	3.007E+00	3.779E-06	3.773E-06	1	AG	3.007E+00	9.590E-07	9.573E-07	1	AG
			90	3.007E+00	3.901E-06	3.891E-06	1	AG	3.007E+00	9.612E-07	9.568E-07	1	AG

หมายเหตุ ผลการระบุประเภทพอลดีในตารางที่ 5.8 ถ้าผลการระบุประเภทพอลดีเป็นอักษรตัวเอียงและหนา (XXX) แสดงว่าเป็นการระบุประเภทพอลดีที่ผิด และถ้าผลการระบุประเภทพอลดีเป็นอักษรปกติ (XXX) แสดงว่าเป็นการระบุประเภทพอลดีที่ถูกต้อง

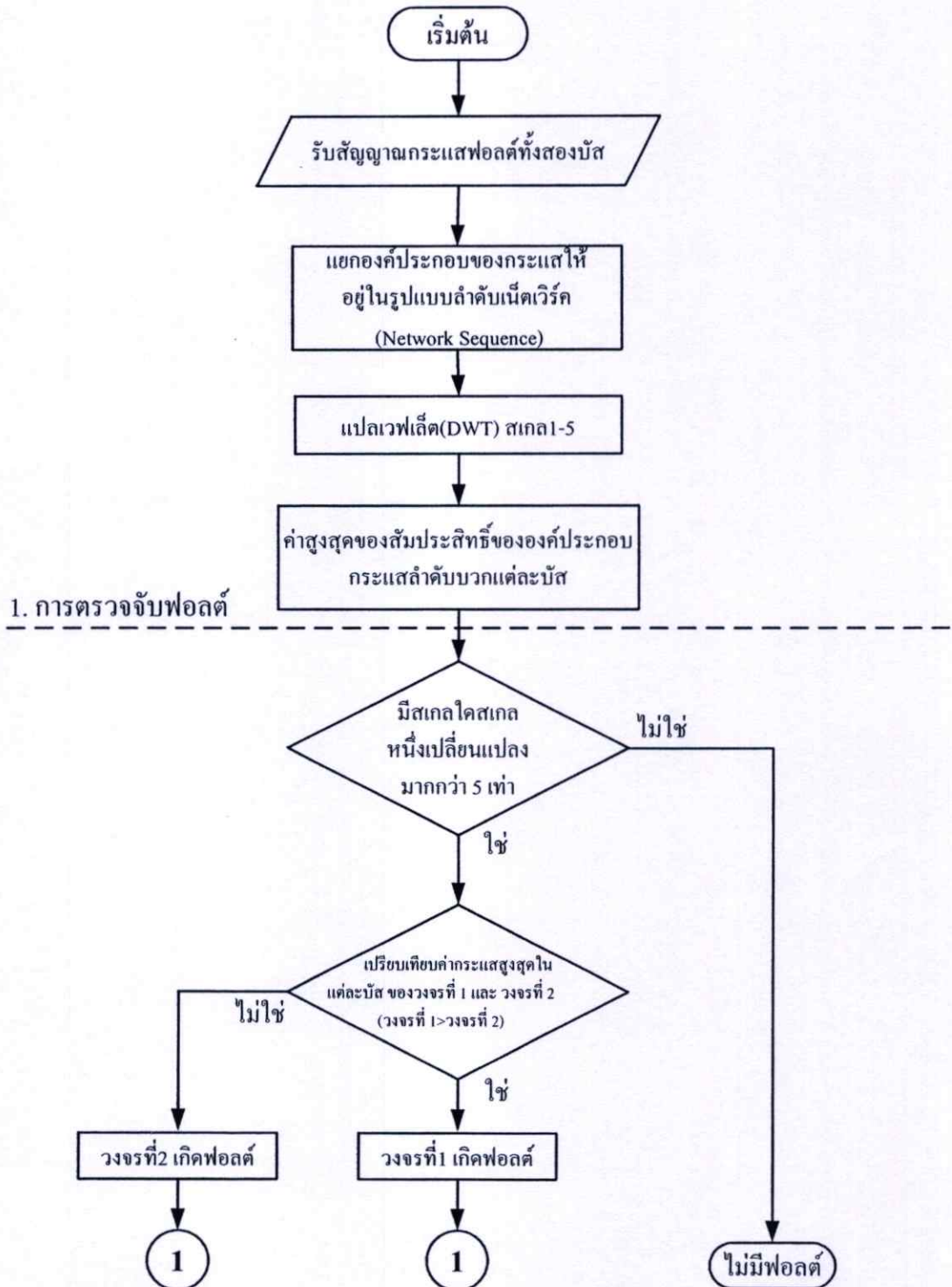
ตารางที่ 5.9 แสดงผลลัพธ์ของการระบุประเภทของพอลิต [14] และการระบุประเภทของพอลิตที่นำเสนอใหม่ ที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก

ประเภทของพอลิต	ระยะทางที่เกิดพอลิต		มุมเริ่มเกิด	การระบุประเภทของพอลิต [14]							การระบุประเภทของพอลิตที่นำเสนอใหม่			
	F1	F2		Acom	Bcom	Ccom	Zcom	Result	Acom	Bcom	Ccom	Zcom	Result	
F1			30	46.28395	246.1053	78.9346	1	BG	3.28E+21	1.75E+22	5.6E+21	1	ABC	
AG	20	187	60	49.60033	59.20497	0.424747	1	ABG	7.17E+23	8.56E+23	6.14E+21	1	ABC	
			90	51.15032	16.4057	9.619616	1	AG	1.26E+22	4.04E+21	2.37E+21	1	ABC	
			30	8.232647	21.83387	0.005636	1	ABG	8.232647	21.83387	0.005093	1	ABG	
AG	20	187	60	150.5338	167.5544	0.022701	1	ABG	1074.107	1195.555	0.005065	1	ABG	
			90	39.46984	20.06171	0.007171	1	ABG	39.46984	20.06171	0.005101	1	ABG	
			30	3.735214	0.010064	0.010061	1	AG	3.735214	0.010064	0.010061	1	CA	
AG	20	187	60	9.959815	0.010063	9.959786	1	CAG	1.91E+22	4.15E+10	1.91E+22	1	CA	
			90	25.63622	0.010063	25.63619	1	CAG	4.55E+21	2.18E+09	4.55E+21	1	CA	
			30	3.515622	0.005662	0.005663	1	AG	3.515622	0.005109	0.005108	1	AG	
AG	20	187	60	3.515444	0.00566	0.00566	1	AG	3.515444	0.005105	0.005105	1	AG	
			90	3.515366	0.005658	0.005659	1	AG	3.515366	0.005104	0.005104	1	AG	

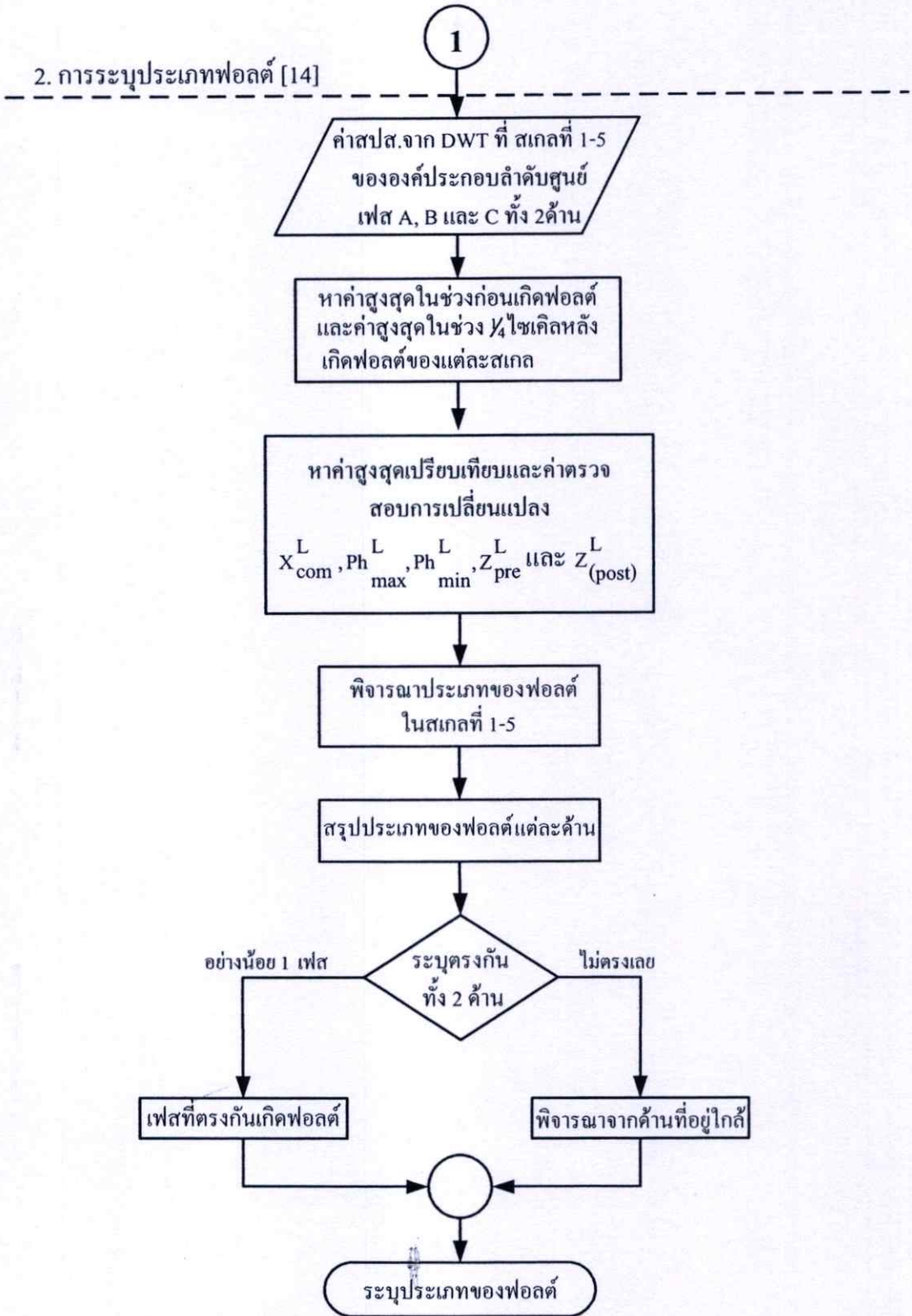
หมายเหตุ ผลการระบุประเภทพอลิตในตารางที่ 5.9 ถ้าผลการระบุประเภทพอลิตเป็นอักษรตัวเอียงและหนา (XXX) แสดงว่าเป็นการระบุประเภทพอลิตที่ผิด และถ้าผลการระบุประเภทพอลิตเป็นอักษรปกติ (XXX) แสดงว่าเป็นการระบุประเภทพอลิตที่ถูกต้อง

5.5 แผนภาพสรุปการประยุกต์ใช้งานการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย

จากรูปแบบและวิธีการที่ได้นำเสนอ นั้นสามารถแสดงสรุปเป็นแผนภาพ (Flow chart) การทำงานได้ดังรูปที่ 5.14 - 5.16

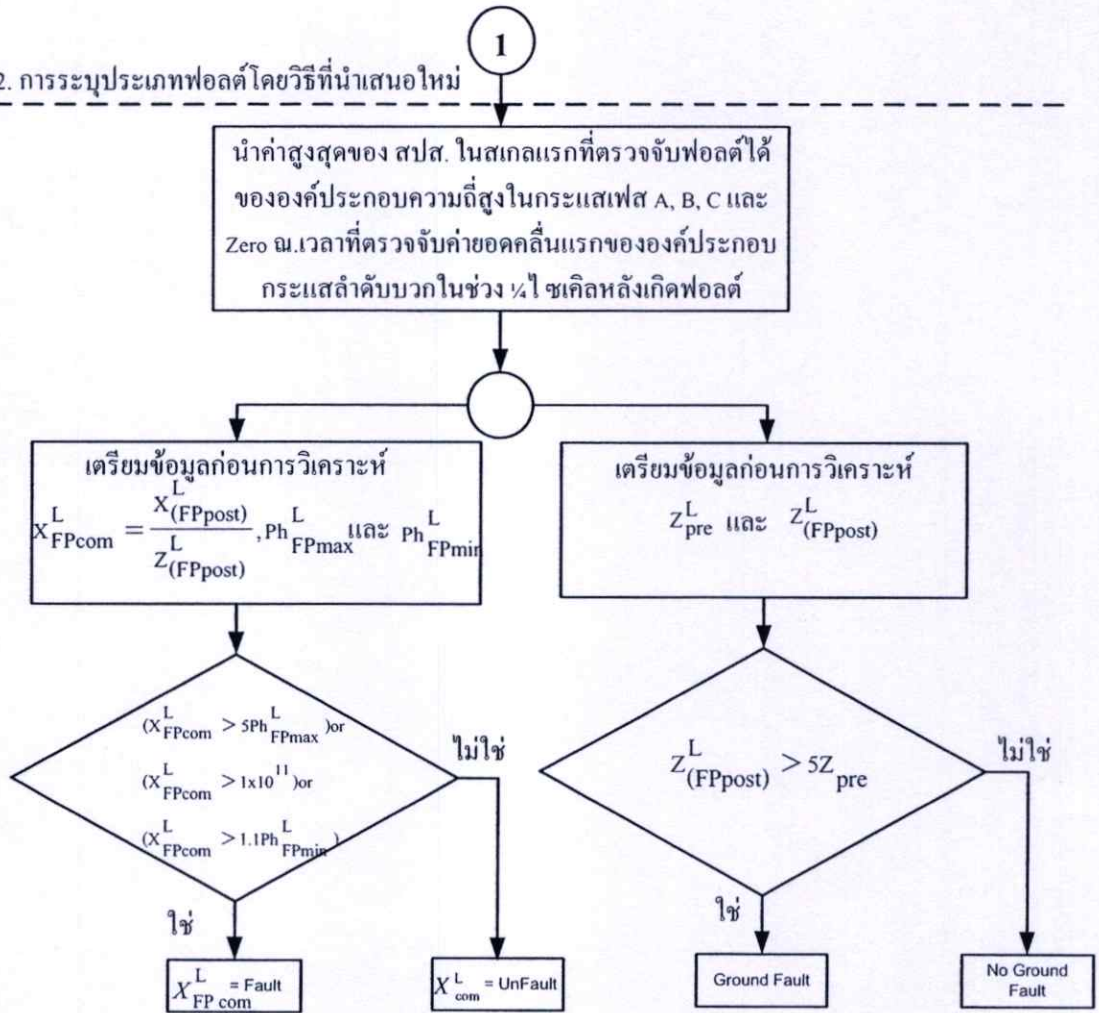


รูปที่ 5.14 แสดงแผนภาพการตรวจจับฟอลต์



รูปที่ 5.15 แสดงแผนภาพการระบุประเภทของฟอลต์ [14]

2. การระบุประเภทฟอลต์โดยวิธีที่นำเสนอใหม่



รูปที่ 5.16 แสดงแผนภาพการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่

บทที่ 6

ผลการทดลอง

สำหรับบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ตามรูปแบบและวิธีการระบุประเภทของฟอลต์ ที่นำเสนอในบทที่ 5 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ จะมีจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด 2178 ชุดในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดยมีรูปแบบในการนำเสนอ ดังนี้

6.1 รูปแบบการนำเสนอ

รูปแบบการนำเสนอจะแสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยของกราฟของผลการทดลองในกรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ผลจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งจะวิเคราะห์โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] เปรียบเทียบกับ การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ตามที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งรายละเอียดจะประกอบไปด้วย

1. การระบุประเภทของฟอลต์ได้มาจากการวิเคราะห์ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งจะวิเคราะห์ด้วย วิธีดังต่อไปนี้

- การระบุประเภทของฟอลต์ [14]
- การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่

2. การแสดงข้อมูลของผลการทดลองในกรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้แบบจำลองสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) และแสดงค่าเฉลี่ยของกราฟของผลการทดลองเรียงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ คือ

- ฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง)
- ฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง)
- ฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง)

หมายเหตุ TTK หมายถึง สถานีไฟฟ้าท่าตะโก

NCO หมายถึง สถานีไฟฟ้าหนองจอก

3. การเรียงลำดับจะเรียงตามประเภทของฟอลต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

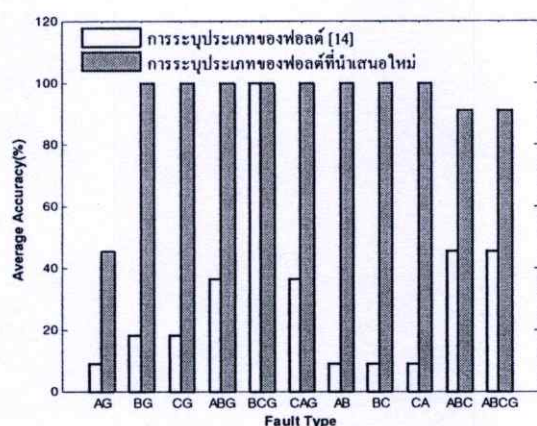
ตารางที่ 6.1 ประเภทของฟอลต์

ตัวย่อของประเภทของฟอลต์	ความหมายของประเภทของฟอลต์
AG	ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน (Phase A to Ground Fault)
BG	ฟอลต์เฟส B ลัดวงจรลงดิน (Phase B to Ground Fault)
CG	ฟอลต์เฟส C ลัดวงจรลงดิน (Phase C to Ground Fault)
ABG	ฟอลต์ระหว่างเฟส A และเฟส B ลัดวงจรลงดิน (Phase A and Phase B to Ground Fault)
BCG	ฟอลต์ระหว่างเฟส B และเฟส C ลัดวงจรลงดิน (Phase B and Phase C to Ground Fault)
CAG	ฟอลต์ระหว่างเฟส C และเฟส A ลัดวงจรลงดิน (Phase C and Phase A to Ground Fault)
AB	ฟอลต์ระหว่างเฟส A และเฟส B (Phase A and Phase B Fault)
BC	ฟอลต์ระหว่างเฟส B และเฟส C (Phase B and Phase C Fault)
CA	ฟอลต์ระหว่างเฟส C และเฟส A (Phase B and Phase C Fault)
ABC	ฟอลต์สามเฟส (Three Phase Fault)
ABCG	ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน (Three Phase to Ground Fault)

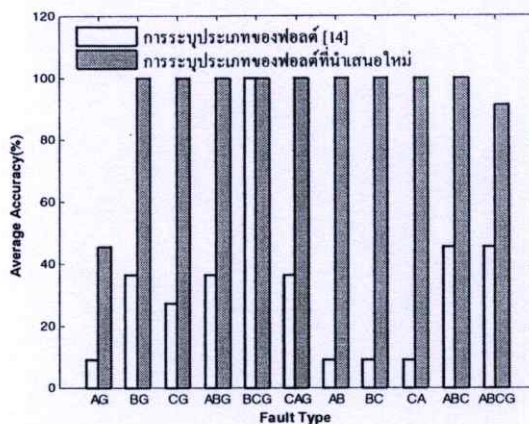
โดยจะแสดงค่าเฉลี่ยของกราฟของผลการทดลองของ การระบุประเภทของฟอลต์ [14] และ การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่เปรียบเทียบกัน

6.2 ผลการทดลอง

6.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.1(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 93.39% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์ [14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC และ CA

ส่วนรูปที่ 6.1(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 94.21% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, ABG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABCG

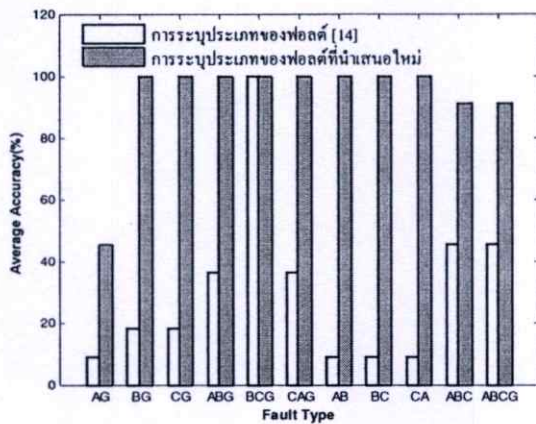
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA และ ABC

การระบุประเภทของพอลต์

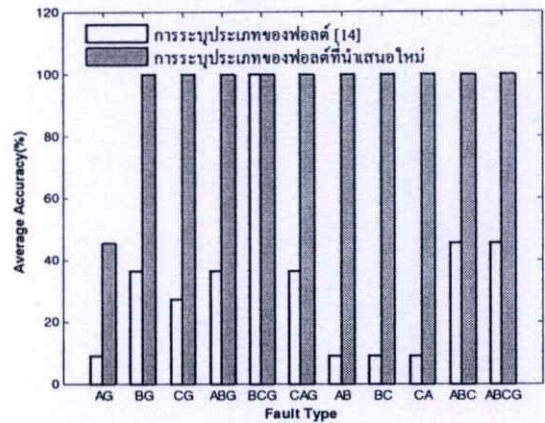
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 0 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 30.58% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 93.80% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 81.82%

6.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตรที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.2(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 93.39% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC, และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, และ

CA

ส่วนรูปที่ 6.2(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 95.04% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, ABG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG

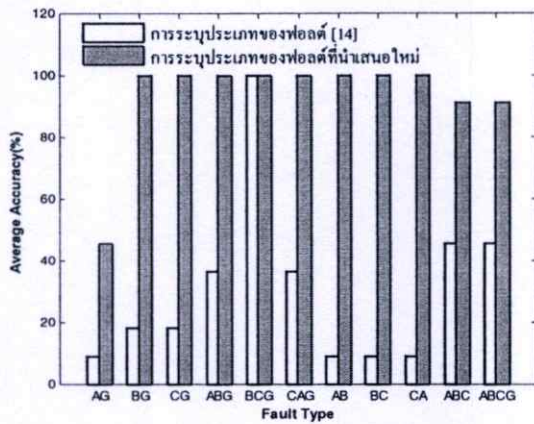
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

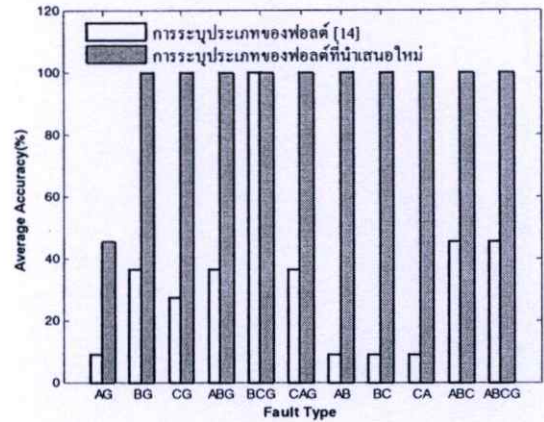
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 0 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 30.58% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 94.21% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 81.82%

6.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 0 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.3(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 93.39% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์ [14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC, และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC และ CA

ส่วนรูปที่ 6.3(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 32.23% และ 95.04% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, ABG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG

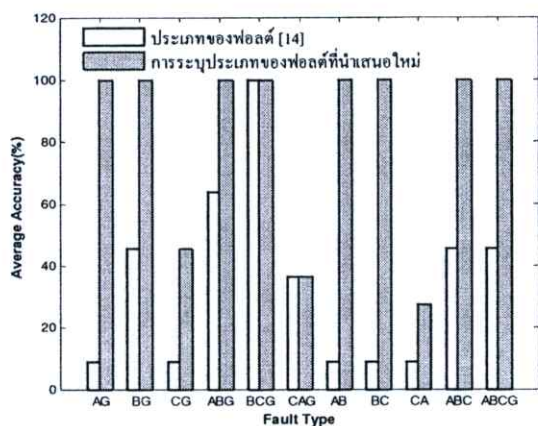
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

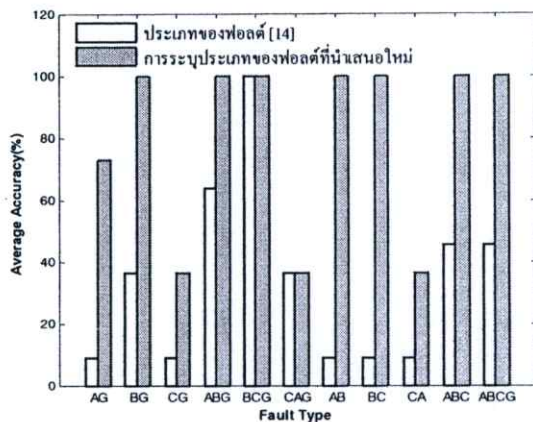
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 0 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.40% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 94.21% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 81.82%

6.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.4(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 82.64% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CAG, ABC และ ABCG

50% - 74 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG, CAG และ CA

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด A AG, BG, ABG, BCG, AB, BC, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.4(b) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.88% และ 80.71% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CAG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG, CAG และ CA

50% - 74 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG

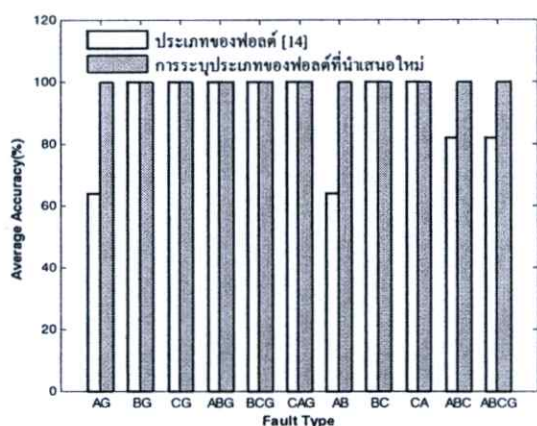
100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, ABG, BCG, AB, BC, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของฟอลต์

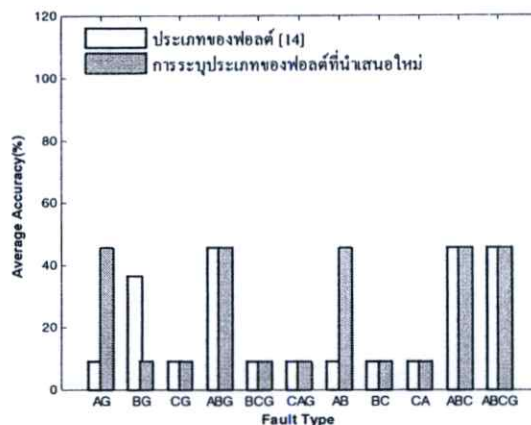
กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา

1. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 34.30% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 66.67% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 81.40% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และฟอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์เฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 75.76%

6.2.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.5(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 90.08% และ 100% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

50% - 74 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG และ AB

75% - 99 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, ABG, BCG, CAG, BC และ CA

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.5(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 21.49% และ 25.62% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, CG, AB, BC, CA, BCG และ CAG

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, ABG, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, BCG, CAG, BCG และ CAG

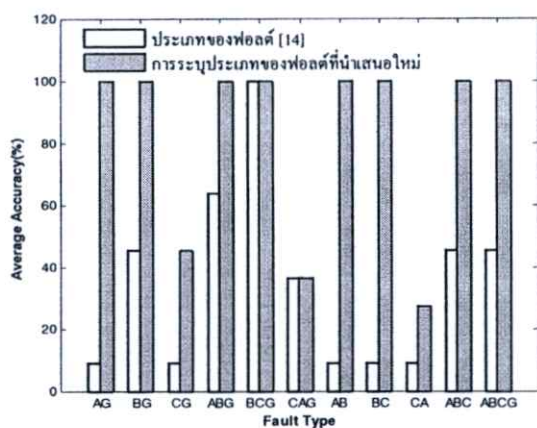
25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, ABG, AB, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

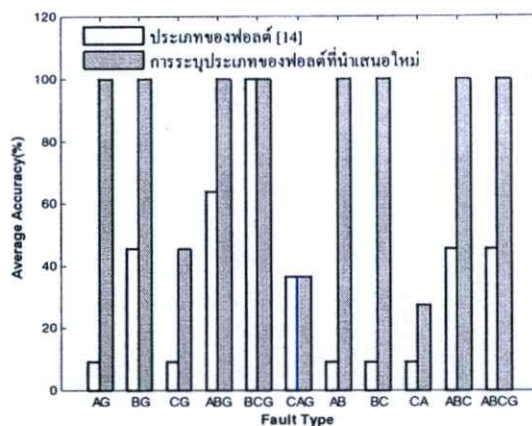
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 30 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 55.79% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 63.64% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 48.48%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 62.81% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 72.73% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสลัดวงจรลงดิน, พอลต์ระหว่างเฟส และ พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 60.61%

6.2.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.6(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 84.30% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CAG, ABC และ ABCG

50% - 74 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CA และ CAG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, AB, BC, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.6(b) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 84.30% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CAG, ABC และ ABCG

50% - 74 % ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CA และ CAG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG

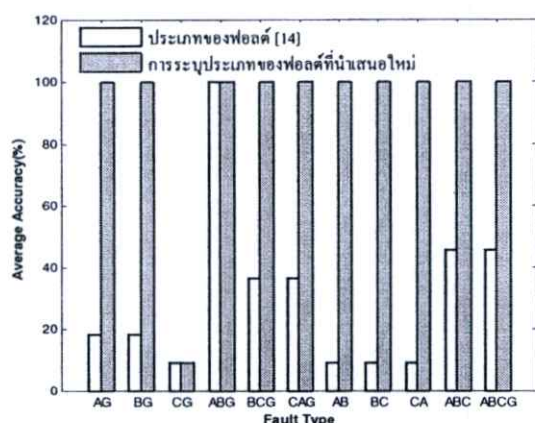
100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, AB, BC, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของฟอลต์

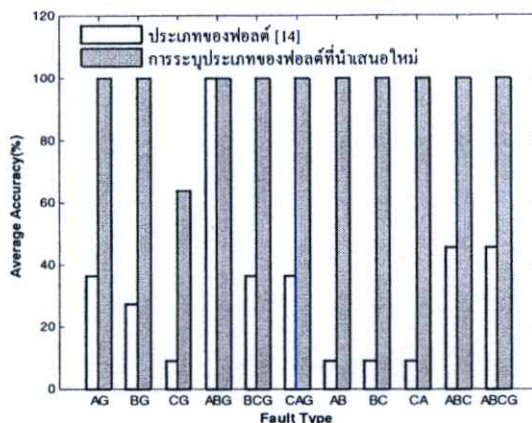
กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 30 องศา

1. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 33.88% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 66.67% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 84.30% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และฟอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟส และฟอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 78.79%

6.2.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.7(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 91.74% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์ [14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, AB, BC และ CA

50% - 74 ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.7(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 96.96% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG, AB, BC, และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG

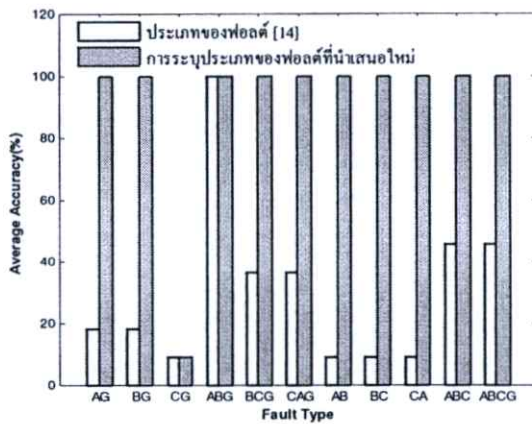
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

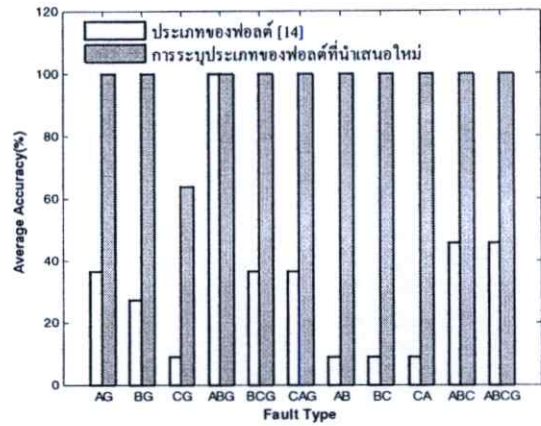
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 60 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.82% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 94.21% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน, พอลต์ระหว่างเฟส, พอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 78.79%

6.2.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.8(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 91.74% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA,

ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.8(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 96.96% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG

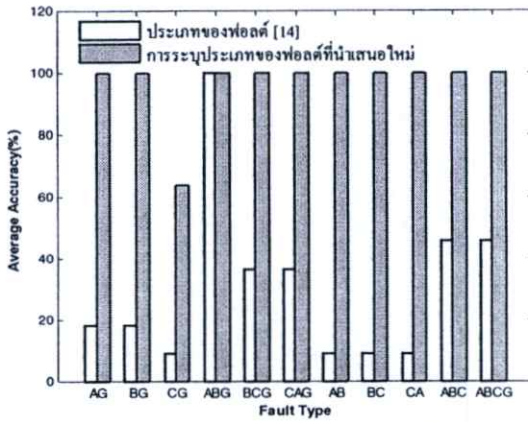
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

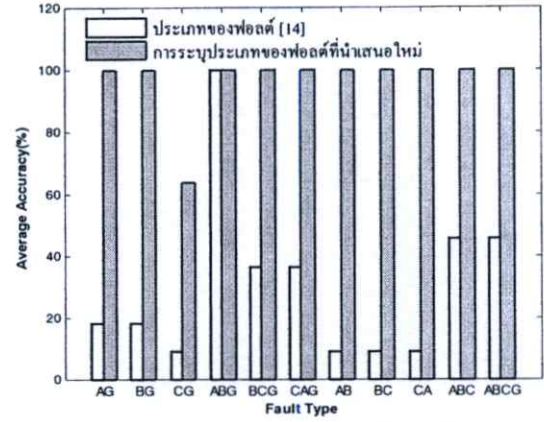
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 60 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.82% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 94.21% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน, พอลต์ระหว่างเฟส, พอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 78.79%

6.2.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.9(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 96.69% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.9(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 32.23% และ 96.96% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG

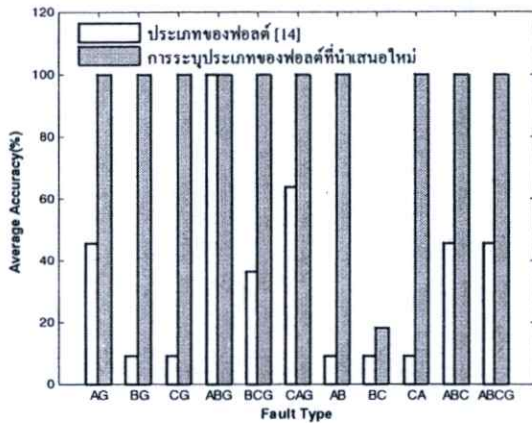
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

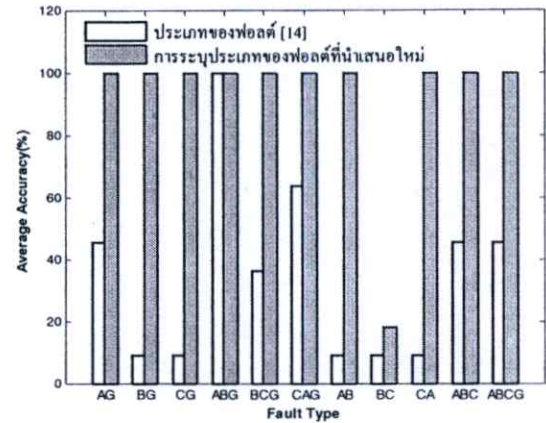
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 60 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.40% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 96.69% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน, พอลต์ระหว่างเฟส, พอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 87.88%

6.2.10 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.10(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 92.56% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG, AB, BC, BG และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BCG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BC

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.10(b) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 92.56% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

- 0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, AB, BC และ CA
- 25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BCG, ABC และ ABCG
- 50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG
- 100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

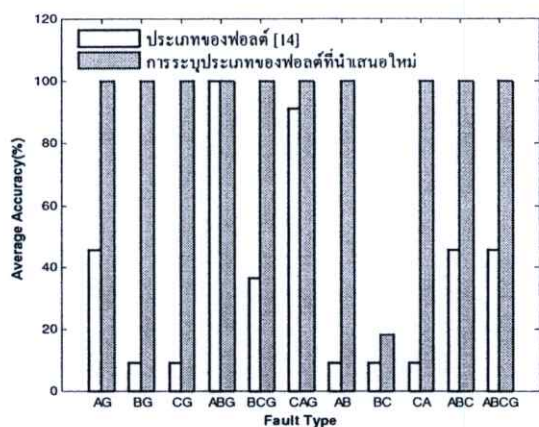
- 0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BC
- 100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของฟอลต์

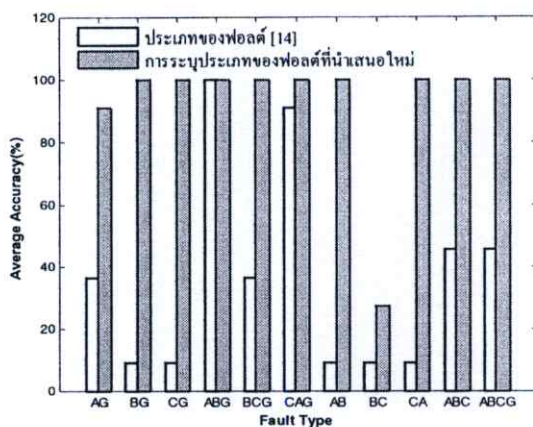
กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา

1. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 34.71% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 67.67% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 92.56% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน, ฟอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน, ฟอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และฟอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 72.73%

6.2.11 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.11(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 37.19% และ 92.56% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BCG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BC

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.11(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 36.36% และ 92.56% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BCG, ABC และ ABCG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BC

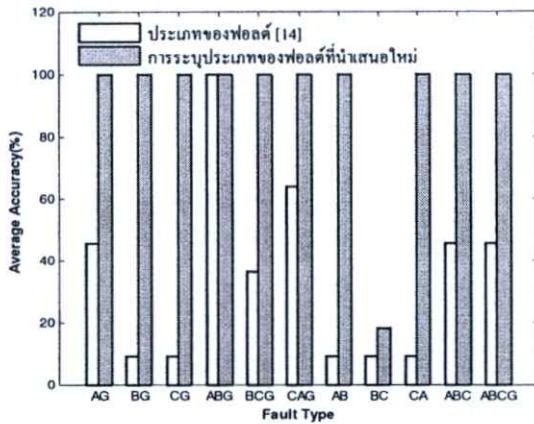
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

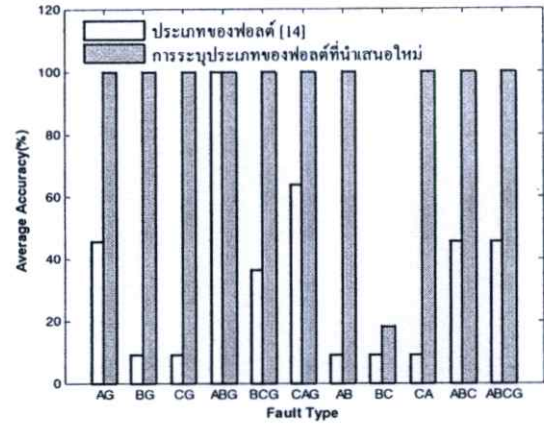
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 90 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 36.78% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 75.76% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 92.56% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน, พอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 74.24%

6.2.12 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 90 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.12(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 92.56% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BCG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BC

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.12(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 92.56% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, CG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BCG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BC

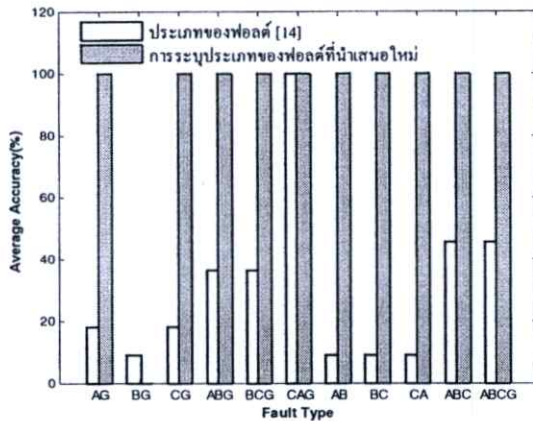
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

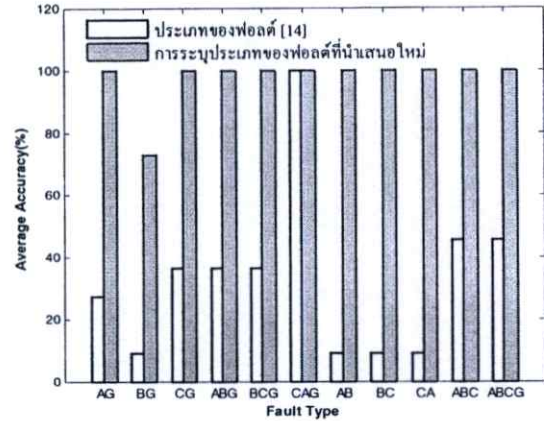
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 90 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 34.71% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 67.67% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 92.56% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน, พอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน, พอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 72.73%

6.2.13 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.13 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.13(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 90.91% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์ [14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.13(b) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 97.52% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG

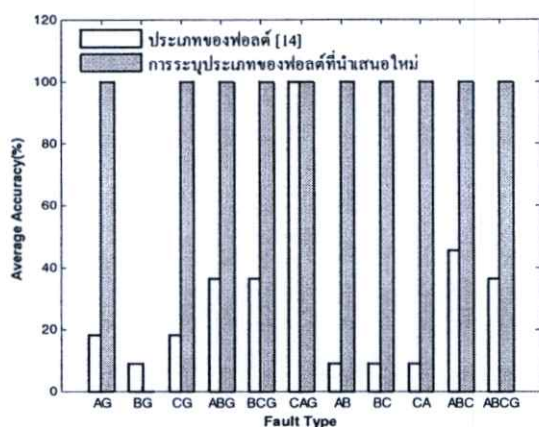
100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของฟอลต์

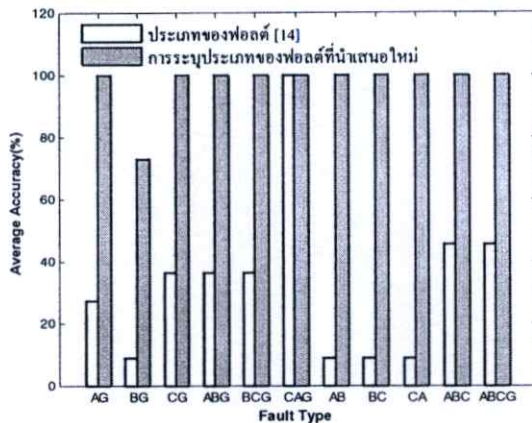
กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา

1. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.82% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 94.21% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน, ฟอลต์ระหว่างเฟส, ฟอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และฟอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 78.79%

6.2.14 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 เท่ากับ 20 กิโลเมตร และ F_2 เท่ากับ 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.14(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 29.75% และ 90.91% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.14(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 33.06% และ 97.52% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG และ CA

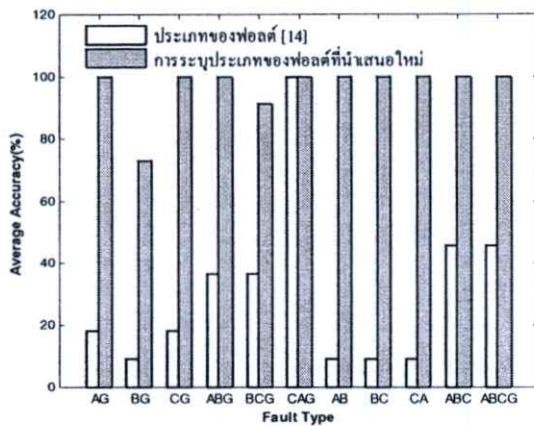
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

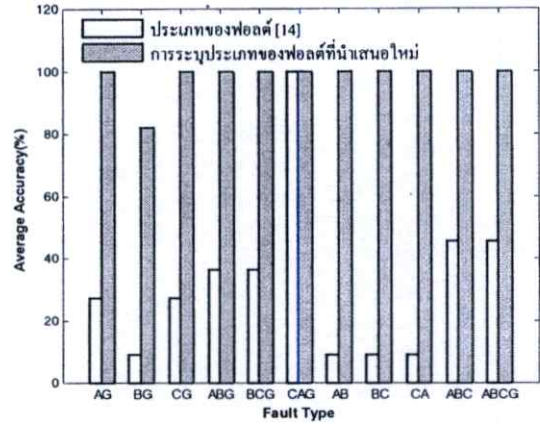
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 120 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.40% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสคควจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 94.21% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสคควจรลงดิน, พอลต์สามเฟสคควจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสคควจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 80.30%

6.2.15 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 120 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.15(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 30.58% และ 96.69% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BG และ BCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, CG, ABG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.15(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 32.23% และ 98.35% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, ABC และ ABCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BG

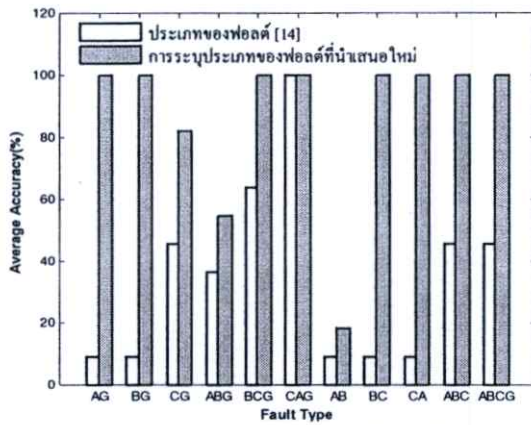
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

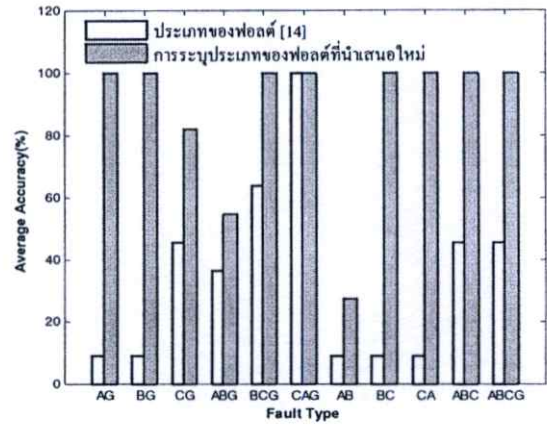
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 120 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 31.40% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 57.58% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 97.52% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟส, พอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 92.42%

6.2.16 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.16(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 86.78% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG, ABG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AB

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG และ ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.16(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 87.60% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG, ABG, ABC และ ABCG

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AB

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG

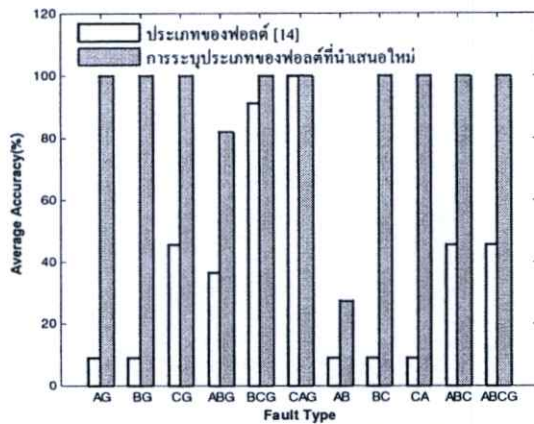
100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

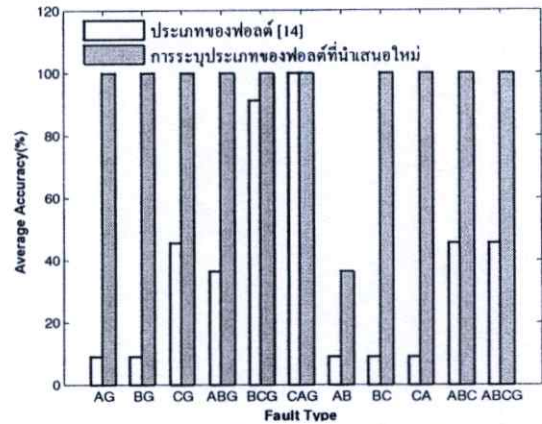
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 150 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 34.71% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 66.67% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 87.19% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 74.24%

6.2.17 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.17 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 20 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.17(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 37.19% และ 91.74% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG, ABG, ABC และ ABCG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AB

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, CAG, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.17(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 37.19% และ 94.21% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG, ABG, ABC และ ABCG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AB

100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, BC, CA,

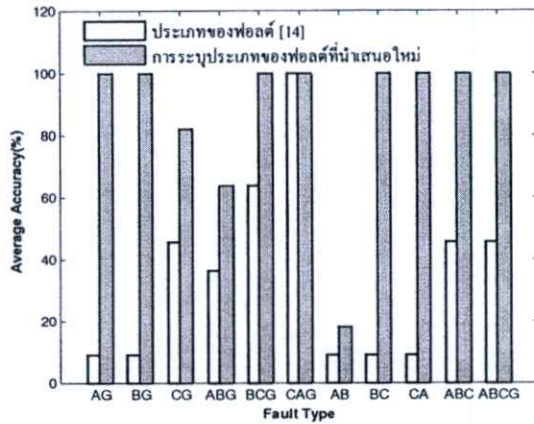
ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

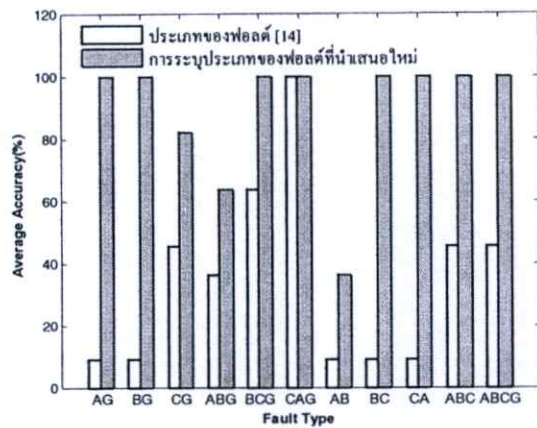
กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 150 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 37.19% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสตัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 75.76% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 92.98% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์เฟสตัดวงจรลงดิน, พอลต์สามเฟสตัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 77.27%

6.2.18 กรณีเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา



(a) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน TTK



(b) การระบุประเภทฟอลต์ทางด้าน NCO

รูปที่ 6.18 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์เท่ากับ 150 องศา

ในการระบุประเภทฟอลต์ โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ตำแหน่ง F_1 ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และ F_2 ระยะทาง 187 กิโลเมตร ในรูปที่ 6.18(a) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 87.60% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของฟอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, AB, BC และ CA

25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG, ABG, ABC และ ABCG

75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AB

50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CG และ ABG

100% ได้แก่การระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG, BC, CA, ABC และ ABCG

ส่วนรูปที่ 6.18(b) สามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 34.71% และ 89.26% ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การระบุประเภทของพอลต์[14] ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

- 0% - 24% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, AB, BC และ CA
- 25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG, ABG, ABC และ ABCG
- 50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG
- 100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG

การระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่ค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่อยู่ในช่วง

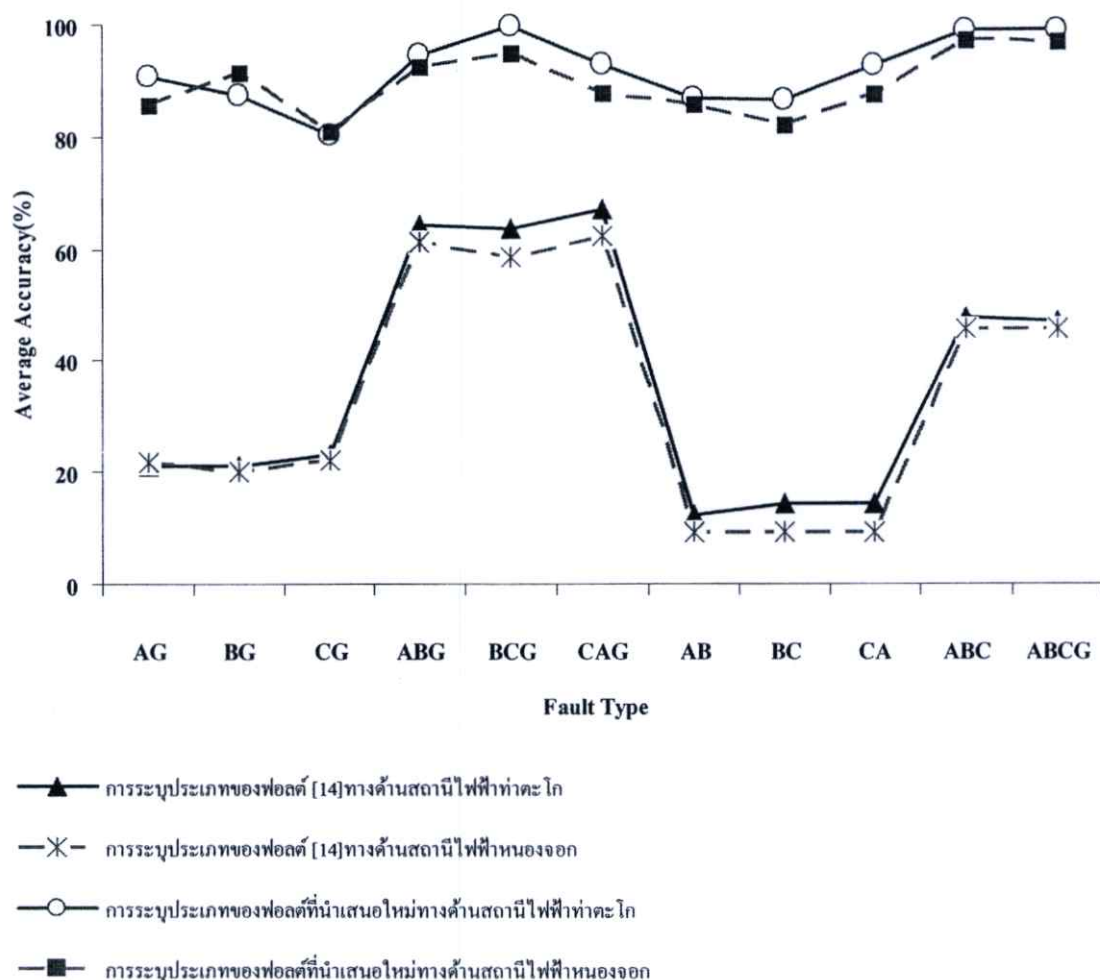
- 25% - 49% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AB
- 50% - 74% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG
- 75% - 99% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด CG
- 100% ได้แก่การระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, BCG, CAG, BC, CA, ABC และ ABCG

การระบุประเภทของพอลต์

กรณีเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 เกิดที่ระยะทาง 103.5 กิโลเมตร และพอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 เกิดที่ระยะทาง 187 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) โดยมุมเริ่มเกิดพอลต์เท่ากับ 150 องศา

1. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 34.71% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 66.67% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 9.09%
2. การระบุประเภทพอลต์ในกรณีการเกิดพอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของพอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 88.43% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน และพอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 100% และการระบุประเภทของพอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า พอลต์ระหว่างเฟสมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 77.27%

6.3 สรุปการระบุประเภทของฟอลต์



รูปที่ 6.19 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์แต่ละประเภท

จากรูปที่ 6.19 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันพบว่า

- การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเซนเซอร์ใหม่ มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าการระบุประเภทของฟอลต์ [14] ทั้งทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าหนองจอก ตามลำดับ
- เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก มีค่าเท่ากับ 35.95% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟส ลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 64.98% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเพียง 13.46% ตามลำดับ

5. เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก มีค่าเท่ากับ 32.92% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 60.60% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเพียง 9.09% ตามลำดับ
6. เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก มีค่าเท่ากับ 91.64% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สามเฟส และ ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 98.48% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์เฟสลัดวงจรลงดินมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 86.19% ตามลำดับ
7. เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก มีค่าเท่ากับ 89.25% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สามเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 96.96% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์ระหว่างเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากับ 85.01% ตามลำดับ

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของสัญญาณฟอลต์ที่เป็นลักษณะสัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ซึ่งมีผลกระทบต่อการใช้วิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่งดังกล่าว โดยรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อวิเคราะห์สัญญาณความถี่สูงที่เกิดจากสัญญาณฟอลต์บนสายส่ง และนำผลที่ได้มาประมวลผล โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] เปรียบเทียบกับ การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ตามที่นำเสนอมาแล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการวิเคราะห์ข้อสรุปการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ โดยสัญญาณฟอลต์ที่ใช้สำหรับศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งอาศัยแบบจำลองสายส่งวงจรคู่ 500 kV ซึ่งเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) ระยะทาง 207 กิโลเมตร เป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจำลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณฟอลต์ในหลากหลายรูปแบบที่อัตราการสุ่ม 200 kHz

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เนื่องจากเวฟเล็ตแม่ชนิดนี้มีขั้นตอนการทำงานที่รวดเร็ว (Fast algorithm) และลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ในลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetry) ซึ่งจะสอดคล้องกันกับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จึงส่งผลให้รูปแบบการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยจะใช้การแปลงเวฟเล็ตทำการวิเคราะห์และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ จากนั้นทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาในสเกลที่ 1-5 หรือช่วงความถี่ต่อไปนี้

สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

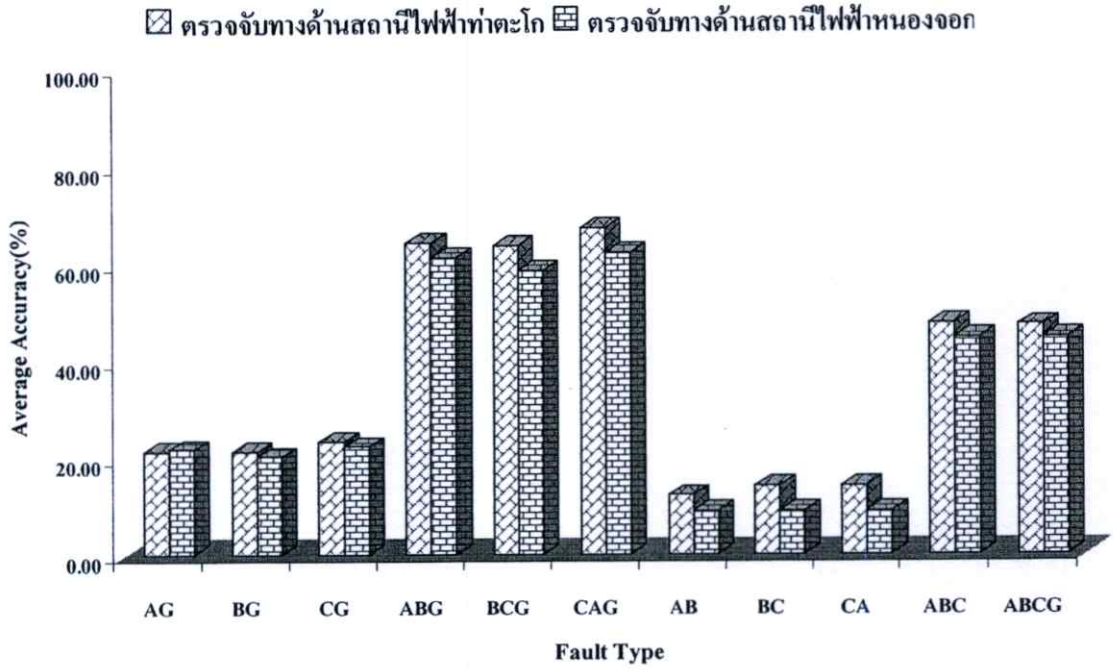
สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz

3. รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้นทำได้โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ณ ปลายสายส่งในแต่ละด้านระหว่างก่อนและหลังเกิดฟอลต์ (ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์) โดยเป็นการเปรียบเทียบในสเกลที่ 1-5 โดยสัมประสิทธิ์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ของสเกลใดสเกลหนึ่งของกระแสลำดับบวก เมื่อวัดที่ปลายสายส่งแต่ละด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากช่วงสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ แสดงว่าเกิดฟอลต์ขึ้นบนสายส่ง” จากนั้นนำค่ากระแสสูงสุดในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ของวงจรที่ 1 และ วงจรที่ 2 มาเปรียบเทียบในแต่ละบัส เพื่อทำการระบุวงจรที่มีฟอลต์เกิดขึ้น

4. รูปแบบการวิเคราะห์สำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ [14] โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกๆที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B และ C เปรียบเทียบกับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบกระแสลำดับศูนย์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ โดยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่เปรียบเทียบดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

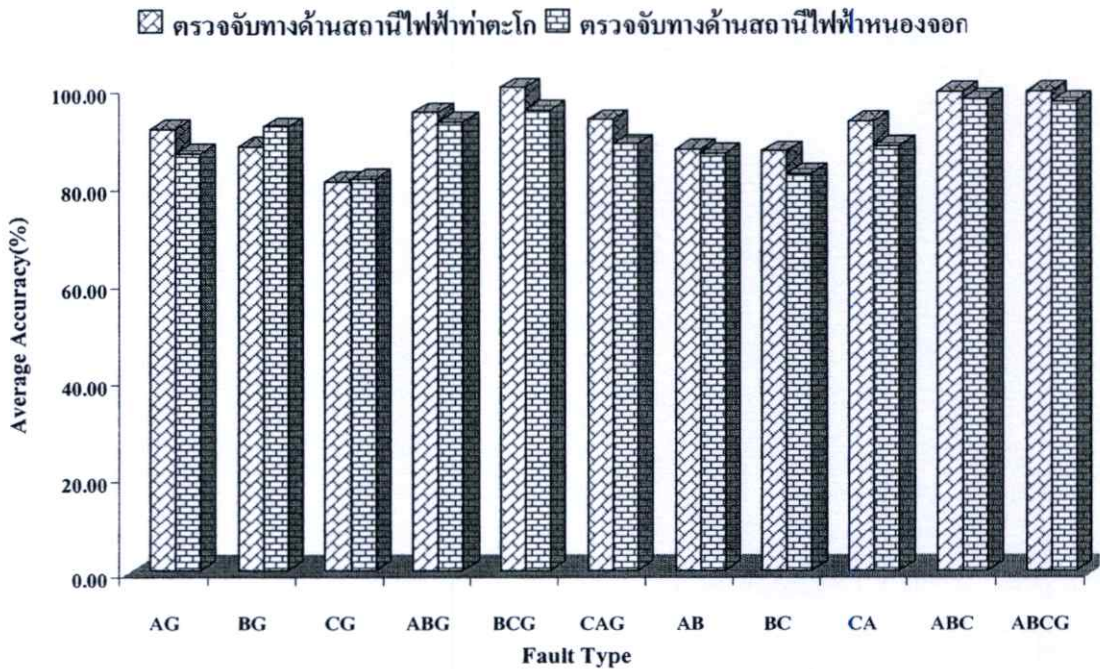
5. รูปแบบการวิเคราะห์สำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกๆที่ตรวจจับฟอลต์ของกระแสเฟส A, B และ C เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบกระแสลำดับศูนย์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ณ เวลาที่ตรวจจับค่ายอดคลื่นแรกขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก (First Peak of Positive Sequence Current) โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่เปรียบเทียบดังกล่าวถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

6. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองด้วยการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันบนสายส่ง ระยะทาง 207 กิโลเมตรซึ่งสายส่งมีการไขว้สลับสายแบบสมบูรณ์จากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) ไปยังสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) โดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ จะมีจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด 2178 ชุด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.1 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องโดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14]

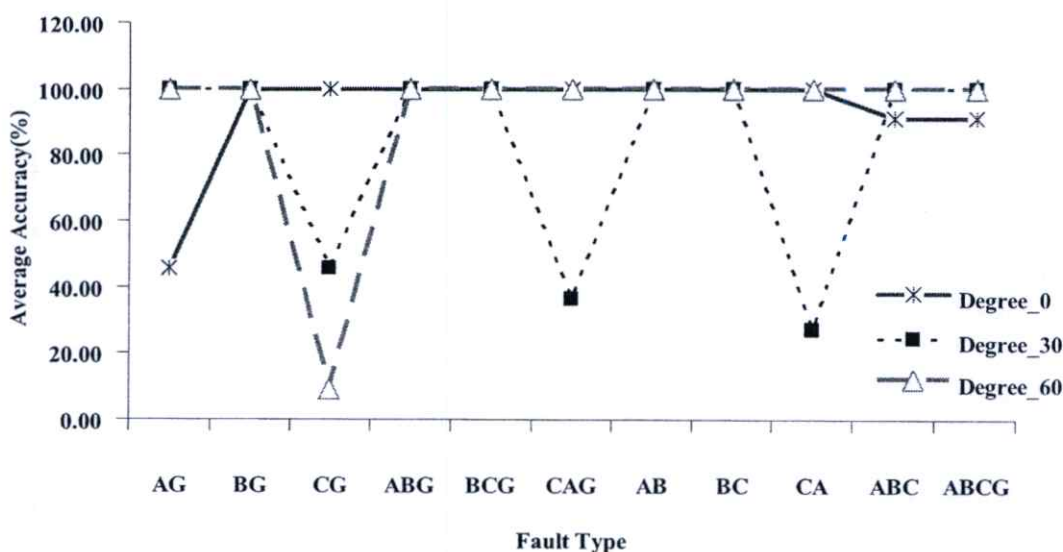
6.1 จากรูปที่ 7.1 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของผลการทดลองโดยใช้ การระบุประเภทของฟอลต์ [14] ในกรณีเกิดการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก มีค่าเท่ากับ 35.95% และทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก มีค่าเท่ากับ 32.92% ตามลำดับ



รูปที่ 7.2 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องโดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่

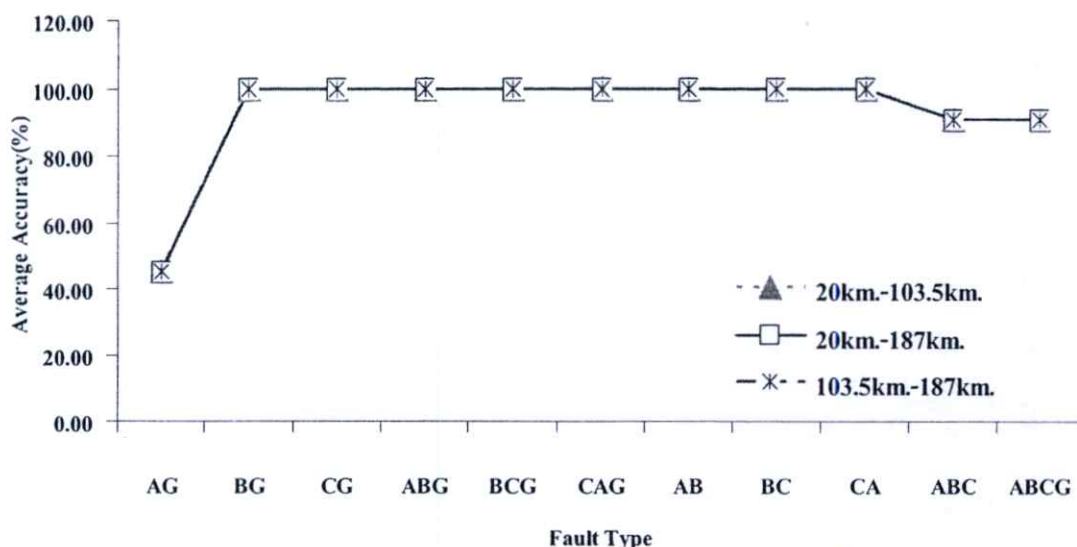
6.2 จากรูปที่ 7.2 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของผลการทดลองโดยใช้ การระบุประเภทของ ฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ในกรณีเกิดการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดย ค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก มีค่าเท่ากับ 91.64% และทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก มีค่าเท่ากับ 89.25% ตามลำดับ

6.3 จากผลการทดลองในบทที่ 6 แสดงการระบุประเภทของฟอลต์โดยการระบุประเภทของ ฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ โดยการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ใน กรณีเกิดสัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ได้นำเสนอพบว่า ระยะเวลาที่เกิดฟอลต์บนสายส่งทั้งสองตำแหน่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฟอลต์ น้อยกว่ามุมเริ่มเกิดฟอลต์และประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทั้งสองตำแหน่งในกรณีที่เกิดสัญญาณ ฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.3 และ รูปที่ 7.4



รูปที่ 7.3 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องโดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่มุมเริ่มเกิดฟอลต์ต่างๆ

จากรูปที่ 7.3 พบว่าที่มุมเกิดฟอลต์เท่ากับ 60 องศาโดยเฟส A เป็นเฟสอ้างอิงนั้น เมื่อพิจารณา พบว่าสัญญาณกระแสที่เฟส C จะมีมุมเท่ากับ 180 องศา ดังนั้นค่าสัญญาณกระแสที่เฟส C จึงมีค่า เท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทของสัญญาณกระแสเฟส C นำไปวิเคราะห์จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุฟอลต์ที่เฟส C ได้



รูปที่ 7.4 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้อง โดยการระบุประเภทของฟอลต์ที่ระยะทางต่างๆ

จากรูปที่ 7.4 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของวิธีการระบุประเภทของฟอลต์ที่ในเสนอใหม่ เมื่อพิจารณา ที่ระยะทางต่างๆ ตามรูปที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องเท่ากัน โดยระยะทางที่เกิดฟอลต์ไม่มีผลต่อการระบุประเภทของฟอลต์ ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน

7. สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

7.1 เนื่องจากการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ ทำการจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันบนแบบจำลองสายส่งวงจรรู 500 kV นั้น และในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะวงจรที่ 1 เท่านั้น ควรพิจารณาผลกระทบในกรณีการเกิดฟอลต์ทั้งวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

7.2 นอกเหนือจากการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดสัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ควรพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ในกรณีการเกิดฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เพื่อให้การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น และพัฒนาไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง

7.3 ปรับปรุงวิธีการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ให้สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องมากขึ้น รวมถึงปรับปรุงรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์โดยพิจารณาลักษณะของสัญญาณฟอลต์ที่มาจากสายส่งส่วนอื่นๆ เข้ามาประกอบเพื่อให้การระบุประเภทมีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Blackburn, J. Lewis, "Protective relaying : principles and applications", 2nd ed, New York : Marcel Dekker, 1998.
- [2] The Electricity Council, "Power system protection 1 : Principles and Components", 2nd ed, Stevenage, UK : Peter Peregrinus, 1981.
- [3] "ข่าวไฟดับของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในช่วง ปี2550-เม.ย. 2551" แผนกศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า, ฝ่ายควบคุมการจ่ายไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- [4] Walter A. Elmore, "Protective relaying theory and applications", New York : Marcel Dekker, 1994.
- [5] IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines
IEEE Std C37.114-2004.
- [6] William. D. Stevenson Jr. **Elements of Power System Analysis**. Fourth Edition.
Singapore :McGraw - Hill, Inc. 1982.
- [7] W.D. Breingan, M.M Chen and T.F. Gallen, "**Laboratory Investigation for a Digital System for the Protection of Transmission Lines**" IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 98, No. 2, March/April 1979, pp. 350-368.
- [8] A.G. Phadke, M. Ibrahim and T. Hlibka, "**Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components,**" IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 100, No. 7, July 1981, pp. 3387-3397.
- [9] T. Sakaguchi, "**A Statistical Decision Theoretical Approach to Digital Relaying,**" IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 99, No. 5, September/October 1980, pp. 1918-1926.
- [10] A. Ferrero, S. Sangiovanni and E. Zappitelli, "**A Fuzzy-set approach to fault-type identification in digital relaying**" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 169-175.
- [11] Whei-Min Lin, Chin-Der Yang, Jia-Hong Lin and Ming-Tong Tsay, "**A Fault Classification Method by RBF Neural Network With OLS Learning Procedure**" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001, pp. 473-477.

- [12] Badrul H. Chowdhury and Kunyu Wang “**Fault Classification Using Kohonen Feature Mapping**” Intelligent Systems Applications to Power System, 1996. Proceedings, ISAP 96 International Conference on 28 Jan.-2 Feb. 1996, pp. 194-198.
- [13] O.A.S. Youssef, “**Fault classification based on wavelet transforms**”, paper #01TD069, IEEE, T&D Conference, 28 October - 2 November, 2001, Atlanta, GA. pp. 531-538
- [14] P. Makming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando “**Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transforms**” IEEE Transmission and Distribution Conference, Yokohama, Japan, October 2002, pp. 2246-2250.
- [15] Grainger J. Jon, Stwenson Jr. D. William. **POWER SYSTEM ANALYSIS**. New York : McGraw-Hill Book Company. 1994. pp. 135-187.
- [16] ชำนาญ ห่อเกียรติ. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (**Power System Analysis**). ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [17] The Electricity Council, “**Power system protection 1: Principles and Components**”, 2nd ed, 1981.
- [18] ธนบูรณ์ ศรีภานุเดช. การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง (**Electric Power System Protection**). สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยุคเคชั่นจำกัด, สิงหาคม 2542.
- [19] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. การป้องกันระบบไฟฟ้า (**Power System Protection**). พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์เอ็มแอนด์อีจำกัด, สิงหาคม 2545.
- [20] B. Ravindranath and M. Chander. **Power System Protection and Swithgear**. Fourth reprint. Wiley Eastern Limit. February 1982.
- [21] Albert Cohen and Jellena Kovacevic. “Wavelet: The Mathematical Background.” Proc. IEEE. vol. 84, no. 4, April 1996. pp. 514-522.
- [22] พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง. “การวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่งด้วยการแปลงเวฟเล็ต.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [23] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, รศ. ดร. มนัส สังวรศิลป์. **คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ Info press, เมษายน 2543.
- [24] Mallat, S. G. “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation.” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 11 July 1989, pp. 674-693.

- [25] Chul Hwan Kim and Raj aggarwal, “Wavelet transforms in power systems: Part. 1 General introduction to the wavelet transform.” Proc. IEEE Power Engineering Journal. 2000. pp. 81-87.
- [26] Robertson D.C., Camps O.I., Mayer J.S. and Gish W.B. “**Wavelets and electromagnetic power system transients.**” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, Issue: 2, April 1996. pp. 1050–1058.
- [27] Santoso S., Powers E.J. and Grady W.M. “**Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods.**” IEEE Trans. on Power Delivery. vol. 12, Issue: 3, July 1997. pp. 1250-1257.
- [28] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean-Michel Poggi. **Wavelet Toolbox User’s Guide Version 2.1.** First Printing, MathWorks, Inc. March 1996.
- [29] Brito, N.S.D., Souza, B.A. and Pires F.A.C. “**Daubechies wavelets in quality of electrical power.**” Proc. IEEE /PES 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. vol. 1, 1998. pp. 511-515.
- [30] Manitoba HVDC Research Centre. **Introduction to PSCAD/EMTDC.** Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada 2003.
- [31] Manitoba HVDC Research Centre. **EMTDC : Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation.** Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada 2003.
- [32] Equipment and Power System Diagram Section, Transmission System Operation & Planning Department, System Control Operation Division, EGAT, “Switching and Transmission Line Diagram,” March 2002.
- [33] Manitoba HVDC Research Centre. **EMTDC : Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation.** Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada 2003.
- [34] IEEE Std 1159-1995. “**Recommended practice for monitoring electric power quality.**” November 1995.
- [35] J. Arrillaga, N.R. Watson and S. Chen. **Power System Quality Assessment.** Singapore : John Wiley & Sons, Inc. 2000. pp. 120-130.
- [36] Tavares M.C., Pissolato J. and Portela C.M. “**Mode domain multiphase transmission line model-use in transient studies.**” IEEE Trans on Power Delivery. vol. 14, Issue : 4. Oct. 1999. pp. 1533–1544.

- [37] H. W. Dommel, Electro – Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book, Bonneville Power Administration (BPA) Portland, Oregon USA, 1986.
- [38] L. L. Lai, E. Vaseekar, H. Subasinghe, N. Rajkumar. “Wavelet Transform and Neural Networks for Fault Location of a Teed-network.” IEEE Power System Technology. 2000. pp. 807– 811.

ภาคผนวก ก.

**การแปลงเวฟเลิตแบบเต็มหน่วยสำหรับการระบุประเภทฟอลต์
ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า**

การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1. การแปลงเวฟเล็ดสำหรับระบุประเภทของฟอลต์

ลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ นำการแปลงเวฟเล็ดมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงสุดลำดับศูนย์ เพื่อให้ค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสมีฐานอ้างอิงเดียวกัน (จากการศึกษาตัวอย่างสัญญาณฟอลต์ในเบื้องต้น พบว่าการอ้างอิงกับค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์จะให้ความถูกต้องมากกว่าการใช้องค์ประกอบอื่นๆ) ซึ่งจะทำให้ง่ายและสะดวกต่อการเปรียบเทียบมากขึ้น โดยมีรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ดังต่อไปนี้

1.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์

เพื่อสะดวกในการอธิบายขั้นตอนทั้งหมดจึงทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.1.1 ตัวแปรค่าสูงสุดในช่วงก่อนเกิดฟอลต์

$Z_{\max}^L(\text{pre})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$A_{\max}^L(\text{pre})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส A ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$B_{\max}^L(\text{pre})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส B ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$C_{\max}^L(\text{pre})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส A ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ที่สเกล L

1.1.2 ตัวแปรค่าสูงสุดในช่วงหลังเกิดฟอลต์

$Z_{\max}^L(\text{post})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$A_{\max}^L(\text{post})$ = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส A ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

B_{\max}^L = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบที่เฟส B ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

C_{\max}^L = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบที่เฟส C ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

1.1.3 ตัวแปรค่าสูงสุดเปรียบเทียบ

Z_{\max}^L = ค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

A_{\max}^L = ค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส A ในสเกลที่ L

B_{\max}^L = ค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส B ในสเกลที่ L

C_{\max}^L = ค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส C ในสเกลที่ L

1.1.4 ตัวแปรค่าเปรียบเทียบ

Z_{com}^L = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

A_{com}^L = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส A ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

B_{com}^L = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส B ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

C_{com}^L = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส C ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

1.1.5 ตัวแปรการตรวจสอบ

Z_{chk}^L = ค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ทขององค์ประกอบลำดับศูนย์ระหว่างก่อนเกิดฟอลต์และหลังเกิดฟอลต์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้น

Ph_{\max}^L = ค่าสูงที่สุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส (A_{com}^L B_{com}^L และ C_{com}^L) ในสเกลที่ L

Ph_{\min}^L = ค่าต่ำที่สุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส (A_{com}^L B_{com}^L และ C_{com}^L) ในสเกลที่ L

และเนื่องจากขั้นตอนทั้งหมดเป็นลักษณะการเปรียบเทียบของค่าต่างๆ ซึ่งบางครั้งการอธิบายด้วยการลักษณะของค่าพุดนั้นอาจจะทำให้เข้าใจยาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้ลักษณะ

การอธิบายเชิงบรรยายร่วมกับการอธิบายด้วยลักษณะของการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแบบสากลคือ if ... Then ...else ... end ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนการระบุประเภทของฟอลต์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1.2 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ขั้นตอนนี้เป็นการนำสัญญาณของกระแสเฟส A เฟส B และ เฟส C รวมทั้งสัญญาณขององค์ประกอบลำดับศูนย์ (zero sequence) มาทำการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมาและทำการยกกำลัง 2 สัมประสิทธิ์ในทุกสเกล

1.2.1 การหาค่าสูงสุดในการเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์

พิจารณาค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์ซึ่งจะเท่ากับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ดังแสดงในสมการที่ (ก1)

$$Z_{\max}^L = Z_{\max}^L(\text{post}) \quad (\text{ก1})$$

และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบลำดับศูนย์ดังนี้คือ ถ้าค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์แล้ว ค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 1 แต่ถ้าน้อยกว่ากำหนดให้เท่ากับ 0 ดังลักษณะของโปรแกรมต่อไปนี้

$$\begin{aligned} &\text{if } Z_{\max}^L(\text{post}) \geq 5 \times Z_{\max}^L(\text{pre}) \\ &\text{then} \\ &\quad Z_{\text{chk}}^L = 1 \end{aligned} \quad (\text{ก2})$$

$$\begin{aligned} &\text{else} \\ &\quad Z_{\text{chk}}^L = 0 \end{aligned} \quad (\text{ก3})$$

end

1.2.2 การหาค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบในแต่ละเฟส

การพิจารณาค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบแต่ละเฟสมีรูปแบบดังนี้ คือ ถ้าค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากองค์ประกอบเฟสใดในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสูงสุดจากสัมประสิทธิ์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์หรือค่า $Z_{\text{chk}}^L = 0$ แล้ว ค่าสูงสุดเปรียบเทียบในเฟส

นั้นจะเท่ากับค่าสูงสุดในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังเกิดฟลัดต์ กรณีอื่นๆ นอกจากนี้จะกำหนดให้เท่ากับศูนย์ โดยสามารถแสดงรูปแบบการพิจารณาได้ดังนี้

พิจารณาที่เฟส A

$$\text{if } (A_{\max}^L(\text{post}) \geq 5A_{\max}^L(\text{pre}) \text{ or } (Z_{\text{chk}}^L = 0))$$

then

$$A_{\max}^L = A_{\max}^L(\text{post}) \quad (\text{ก4})$$

else

$$A_{\max}^L = 0 \quad (\text{ก5})$$

end

พิจารณาที่เฟส B

$$\text{if } (B_{\max}^L(\text{post}) \geq 5B_{\max}^L(\text{pre}) \text{ or } (Z_{\text{chk}}^L = 0))$$

then

$$B_{\max}^L = B_{\max}^L(\text{post}) \quad (\text{ก6})$$

else

$$B_{\max}^L = 0 \quad (\text{ก7})$$

end

พิจารณาที่เฟส C

$$\text{if } (C_{\max}^L(\text{post}) \geq 5C_{\max}^L(\text{pre}) \text{ or } (Z_{\text{chk}}^L = 0))$$

then

$$C_{\max}^L = C_{\max}^L(\text{post}) \quad (\text{ก8})$$

else

$$C_{\max}^L = 0 \quad (\text{ก9})$$

end

จากขั้นตอนที่ 1.2.2 นั้นทำให้ได้ค่าสูงสุดเปรียบเทียบของเฟส A, เฟส B, เฟส C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L ใด ๆ

1.3 การหาค่าเปรียบเทียบ

ขั้นตอนนี้เป็น การหาค่าเปรียบเทียบ โดยนำค่าสูงสุดเปรียบเทียบทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1.2.2 แล้วนำมาหารด้วยค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์ดังนี้

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่องค์ประกอบลำดับศูนย์

$$Z_{\text{com}}^L = \frac{Z_{\text{max}}^L}{Z_{\text{max}}^L} = 1 \quad (\text{ก10})$$

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟส A

$$A_{\text{com}}^L = \frac{A_{\text{max}}^L}{Z_{\text{max}}^L} \quad (\text{ก11})$$

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟส B

$$B_{\text{com}}^L = \frac{B_{\text{max}}^L}{Z_{\text{max}}^L} \quad (\text{ก12})$$

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟส C

$$C_{\text{com}}^L = \frac{C_{\text{max}}^L}{Z_{\text{max}}^L} \quad (\text{ก13})$$

และ

Ph_{max}^L = ค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง A_{com}^L B_{com}^L และ C_{com}^L

Ph_{min}^L = ค่าที่ต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง A_{com}^L B_{com}^L และ C_{com}^L

จากขั้นตอนนี้ทำให้ได้ค่าเปรียบเทียบของ เฟส A, เฟส B, เฟส C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกล L ใดๆ รวมทั้งค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ต่อไป

1.3.1 การวิเคราะห์ในสเกลที่เหลือ

ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1.2 และ 1.3 จนครบทุกสเกลซึ่งทำให้ได้ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ในสเกลที่ 1 – 5 โดยข้อมูลนี้จะเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการระบุประเภทของฟอลต์ต่อไป

1.4 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์ในแต่ละสเกล

โดยพิจารณาแต่ละเฟสในสเกลเดียวกันตามรูปแบบต่อไปนี้

1.4.1 การพิจารณาค่าเปรียบเทียบ ($A_{com}^L, B_{com}^L, C_{com}^L$)

โดยเฟสที่สามารถระบุว่าเกิดฟอลต์ได้นั้นจะต้องมีรูปแบบตามข้อใดข้อหนึ่งใน 2 ข้อต่อไปนี้

- 1.) ต้องมีค่าเปรียบเทียบมากกว่า 1 และมีค่ามากกว่า 40 % ของค่า Ph_{max}^L หรือมีค่ามากกว่า 5
- 2.) หรือมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่า Ph_{min}^L

ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการพิจารณาในรูปแบบของการเขียนโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส A

if $[(A_{com}^L > 1) \text{ and } ((A_{com}^L > 0.4Ph_{max}^L) \text{ or } (A_{com}^L > 5))] \text{ or } (A_{com}^L > 5Ph_{min}^L)$

then

phase A fault

else

phase A unfault

end

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส B

if $[(B_{com}^L > 1) \text{ and } ((B_{com}^L > 0.4Ph_{max}^L) \text{ or } (B_{com}^L > 5))] \text{ or } [(B_{com}^L > 5Ph_{min}^L)]$

then

phase B fault

else

phase B unfault

end

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส C

```

if    $[(C_{com}^L > 1) \text{ and } ((C_{com}^L > 0.4Ph_{max}^L) \text{ or } (C_{com}^L > 5))] \text{ or } (C_{com}^L > 5Ph_{min}^L)$ 
then
    phase C fault
else
    phase C unfault
end

```

1.4.2 กรณีที่ไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสใด

เมื่อพิจารณาตามข้อ 1.4.1 แล้วไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสใด การระบุประเภทของฟอลต์นั้นจะใช้รูปแบบใหม่ในการพิจารณาดังนี้ คือ เฟสที่เกิดฟอลต์ต้องมีค่าการเปรียบเทียบกับมากกว่า 50% ของค่า Ph_{max}^L ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของการพิจารณาในรูปแบบของโปรแกรมได้ดังนี้

```

if {ไม่สามารถระบุผลจากข้อ 1.4.1 ได้}
then
พิจารณาฟอลต์ที่เฟส A
    if  $(A_{com}^L > 0.5Ph_{max}^L)$ 
    then
        phase A fault
    else
        phase A unfault
    end
end

```

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส B

```

if  $(B_{com}^L > 0.5Ph_{max}^L)$ 
then
    phase B fault
else
    phase B unfault
end

```

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส C

```

if (  $C_{com}^L > 0.5Ph_{max}^L$  )
then
    phase C fault
else
    phase C unfault
end

```

end

1.4.3 ขั้นตอนการระบุฟอลต์ลงดิน (Ground fault identification)

การระบุฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ลงดินหรือไม่นั้น สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น

1.4.3.1 ผลจากข้อ 1.4.1 ระบุว่าเป็นฟอลต์เดียว

แสดงว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ลงดินซึ่งก็คือ ฟอลต์เฟสเดียวลงดินนั่นเอง

1.4.3.2 ผลจากข้อ 1.4.1 ระบุว่าเป็นฟอลต์ 3 เฟส

ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดว่าเป็นฟอลต์ไม่ลงดิน (พิจารณาจากค่ากระแสลำดับศูนย์)

1.4.2.3 ผลจากข้อ 1.4.1 ระบุว่าเป็นฟอลต์ 2 เฟส

ในที่นี้จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ

- 1.) ค่า $0 < Ph_{min}^L < 1$ และ $Z_{chk}^L \neq 0$ แสดงว่าเป็นฟอลต์ 2 เฟสลงดิน
- 2.) ค่า $Ph_{min}^L = 0$ หรือ $Ph_{min}^L > 1$ หรือ $Z_{chk}^L = 0$ ในกรณีจะเป็นลักษณะของฟอลต์ระหว่างเฟส

โดยสามารถอธิบายในลักษณะของการเขียน โปรแกรมได้ดังนี้

```

if (  $0 < Ph_{min}^L < 1$  ) and (  $Z_{chk}^L \neq 0$  )
then
    double line to ground fault
else { (  $Ph_{min}^L = 0$  ) or (  $Ph_{min}^L > 1$  ) or (  $Z_{chk}^L = 0$  ) }
    line to line fault

```

1.5 การสรุปข้อมูลจากสเกลที่ 1-5

เมื่อทำตามขั้นตอนที่กล่าวมาจนครบทุกสเกลแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือการสรุปข้อมูลจากสเกลที่ 1-5 ดังต่อไปนี้

1.5.1 สรุปเฟสที่เกิดฟอลต์

1. ในกรณีที่มีเฟสอย่างน้อย 1 เฟสไม่ถูกระบุว่าเกิดฟอลต์เลยในทุกสเกล ดังนั้นเฟสที่มีการระบุว่าจะเกิดฟอลต์มากกว่า 2 สเกลขึ้นไปสามารถสรุปได้ว่าเฟสนั้นเกิดฟอลต์
2. ในกรณีที่ทุกเฟสมีอย่างน้อย 1 สเกลถูกระบุว่าเกิดฟอลต์ ดังนั้นเฟสที่มีการระบุว่าจะเกิดฟอลต์มากกว่า 3 สเกลขึ้นไปสามารถสรุปได้ว่าเฟสนั้นเกิดฟอลต์

1.5.2 การสรุปลักษณะของฟอลต์ลงดิน

ในกรณีที่มีการระบุว่าเป็นฟอลต์ลงดินมากกว่า 3 สเกลขึ้นไปสามารถสรุปได้ว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ลงดิน แต่ถ้าน้อยกว่า 3 สเกลสรุปได้ว่าเป็นฟอลต์ไม่ลงดิน

ภาคผนวก ข.

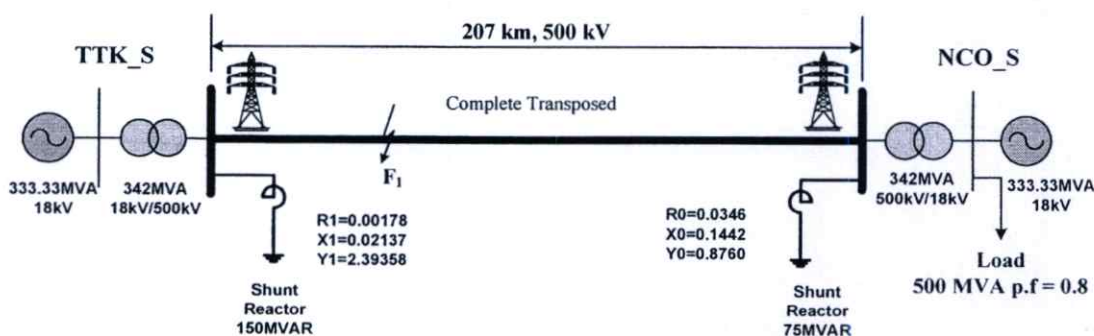
สรุปผลการระบุประเภทของฟอลต์ในกรณีฟอลต์จุดเดียวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

สรุปผลการระบุประเภทของฟอลต์ในกรณีฟอลต์จุดเดียวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

การระบุประเภทของฟอลต์ในกรณีฟอลต์จุดเดียว

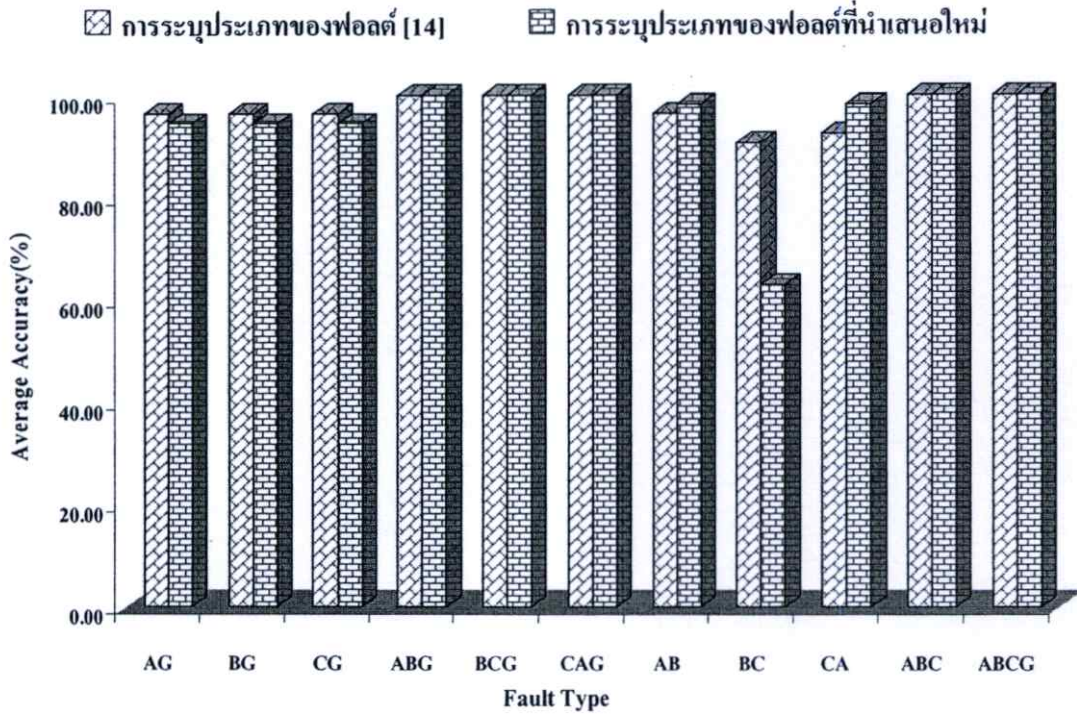
การระบุประเภทของฟอลต์โดยการวิเคราะห์การระบุประเภทของฟอลต์ [14] และ การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 นั้น สามารถทำการวิเคราะห์การระบุประเภทของฟอลต์ โดยการจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่งวงจรคู่ 500 kV ซึ่งเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) ดังแสดงตามรูปที่(ข1) โดยสายส่งมีความยาว 207 กิโลเมตร แต่ละเฟสมีตัวนำ 4 ตัว และประเภทสาย ACSR 795 cmil (AL42/St7) และเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากของทางด้านทานลัดวงจรจึงได้ตั้งสมมุติฐานให้มีค่าต้านประมาณ 10 โอห์ม โดยจำลองสัญญาณฟอลต์ทั้งหมด 7 ไซเคิล (0-0.14 วินาที) เริ่มเกิดฟอลต์ที่ 0.08 วินาที มีอัตราการสุ่ม (Sampling Rate) 200 kHz นอกจากนี้ยังทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษารูปแบบของฟอลต์ที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 11 ประเภท ได้แก่ AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ เกิดที่ระยะทาง 20 กิโลเมตร ถึง 187 กิโลเมตรของสายส่งโดยปรับช่วงละ 20 กิโลเมตรของสายส่ง
- ขนาดของโหลดเท่ากับ 500 MVA (p.f. = 0.8)
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ $0^\circ - 150^\circ$ เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ 30°)

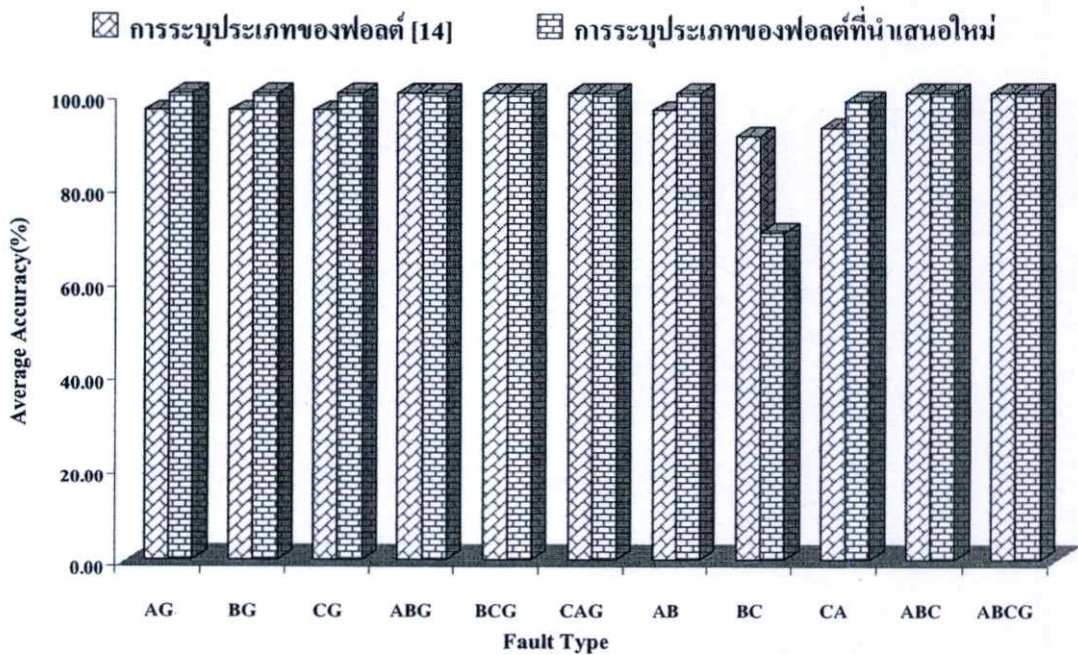


รูปที่(ข1) แสดงระบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรคู่ 500 kV

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จุดเดียวบนสายส่ง ระยะทาง 207 กิโลเมตรซึ่งสายส่งมีการไขว้ สลับสายแบบสมบูรณ์จากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) ไปยังสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) โดย ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ จะมีจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด 594 ชุด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้



รูปที่(ข2) แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภททางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก



รูปที่(ข3) แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภททางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ในกรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว พบว่า

1. ค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภททางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก ดังแสดงในรูปที่(ข2) โดยใช้ การระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ มีค่าเท่ากับ 97.14% และสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาพบว่า ฟอลต์สองเฟสลัดวงจรลงดิน, ฟอลต์สามเฟส และ ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สองเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมีค่าเท่ากับ 93.20% ส่วนการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ เท่ากับ 94.78% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สองเฟสลัดวงจรลงดิน, ฟอลต์สามเฟส และ ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สองเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมีค่าเท่ากับ 86.41%

2. ค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภททางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก ดังแสดงในรูปที่(ข3) โดยใช้ การระบุประเภทของฟอลต์ [14] มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ มีค่าเท่ากับ 97.14% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาพบว่า ฟอลต์สองเฟสลัดวงจรลงดิน, ฟอลต์สามเฟส และ ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สองเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมีค่าเท่ากับ 93.20% ส่วนการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุประเภทของฟอลต์ เท่ากับ 97.14% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สองเฟสลัดวงจรลงดิน, ฟอลต์เฟสลัดวงจรลงดิน, ฟอลต์สามเฟส และ ฟอลต์สามเฟสลัดวงจรลงดิน มีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100% และการระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่า ฟอลต์สองเฟส มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมีค่าเท่ากับ 89.50%

3. จากผลการทดลองการระบุประเภทของฟอลต์โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ ในกรณีเกิดสัญญาณฟอลต์ฟอลต์จุดเดียว เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ได้นำเสนอพบว่า การระบุประเภทของฟอลต์โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] และการระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียวบนสายส่งได้ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อนำทั้ง 2 วิธีดังกล่าวมาทำการระบุประเภทของฟอลต์ในกรณีที่เกิดสัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันบนสายส่งนั้น การระบุประเภทของฟอลต์โดยการระบุประเภทของฟอลต์ [14] ไม่สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้เต็มประสิทธิภาพ แต่การระบุประเภทของฟอลต์ที่นำเสนอใหม่ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้เต็มประสิทธิภาพมากกว่า ตามที่แสดงไว้ในบทที่ 6

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



วิศวกรรมลาดกระบัง

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology - Ladkrabang

ปีที่ 25 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2551

วิศวกรรมโทรคมนาคม

- การวิเคราะห์พฤติกรรมของโหนดเครือข่าย WLAN ด้วยโปรแกรมเขียนแบบเครือข่าย Network Simulation 2 1
กฤษณา เวียงอุรุษัจจ์ ภาวสิทธิ์ เสงฆราช
- การทดสอบประสิทธิภาพของโมดูลขยาย FTTH 7
ณวัฒน์ นิเวศวิวัฒน์ ภาวสิทธิ์ เสงฆราช
- การวิเคราะห์การรบกวนของน้ำที่เข้ามาเข้าไปในตัวส่งของใยแก้วนำแสงในใยแก้ว 13
ยศสิทธิ์ เวียง อุไรทอง สันติวีระวงษ์

วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

- เสถียรภาพของระบบพลังงานในระบบที่มีการเชื่อมต่อที่เปลี่ยนโครงสร้างระบบ 19
ชัชวาลย์ วัฒนวิเศษ
- การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดกับกริดในบริเวณส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC 26
วราวุฒ วัฒนวิเศษ ธีระสิทธิ์ วัฒนวิเศษ ธีระทอง เว่งวัฒนวิเศษ ธานีเสถียรณี สุภาวณิช

วิศวกรรมเคมี

- ผลกระทบจากการผลิตสีย้อมสีกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้สีย้อมสี 31
แบบแยกย่อย
กัญญา นันทิยา ภาวสิทธิ์ วัฒนวิเศษ
- ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย : ปีที่ 1 และ 2 37
กัญญา นันทิยา ภาวสิทธิ์ วัฒนวิเศษ ธีระทอง เว่งวัฒนวิเศษ ธานีเสถียรณี สุภาวณิช
- Kinetic Reaction Analysis by Model-Free Method for EVA-Based Encapsulant for 42
Photovoltaic Modules
Phanomsakhan Sitawon Surat Anant

วิศวกรรมเครื่องกล

- การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องจักรที่ต้องจ่ายแรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าในสภาวะ 47
ณวัฒน์ นิเวศวิเศษ ภาวสิทธิ์ เสงฆราช

วิศวกรรมอุตสาหการ

- การประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติในระบบการผลิตงาน 62
ณวัฒน์ นิเวศวิเศษ ภาวสิทธิ์ เสงฆราช ธีระทอง เว่งวัฒนวิเศษ

การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

Analysis of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using PSCAD/EMTDC

วราวุฒิชัยชัยวัชกุล อธิวัฒน์ พิพัฒน์วิบูลย์ วรวิเศษ เดชาพิทักษ์กุล วาณิชชัยพงษ์ คุณาภา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 kV ขาดการนำส่งกำลังเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง และแสดงผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของระบบป้องกัน ซึ่งการวิเคราะห์ฟอลต์ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC โดยอาศัยสัญญาณกระแสไฟฟ้าในแต่ละตัวที่วัดจากปลายสายส่งแต่ละด้าน จุดนำขั้วตามหลักการของการแปลงโพลของกระแสในระบบส่งจ่ายกำลังจะส่งผลต่อขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นบนขดลวดของตัวแปลงกำลังตามมุมเริ่มต้นของฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิด และชนิดของฟอลต์

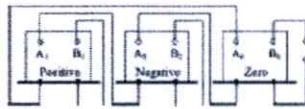
Abstract

This paper presents an analysis of characteristics for simultaneous fault signals in a 500-kV electrical power transmission system. Such fault signals can occur in the transmission system, and have an effect to the operation of the protection system. The fault analysis is performed using PSCAD/EMTDC. Current signals at each end of the transmission system are used, and the positive sequence current is obtained by a transformation matrix. In addition, characteristics of fault current at various fault inception angles, fault locations and fault types are detailed.

1. บทนำ

สายส่งที่มีขดลวดนำส่งที่มีขั้วนำเข้าในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า (power plant) ไปยังผู้รับใช้โดยผ่านสายส่งต่างๆ ที่เมื่อส่งถึง เช่น สถานีไฟฟ้า (substation), เตาอบขน และหม้อแปลงในสถานประกอบการ เป็นต้น ทำให้ระบบสายส่งมีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งผลรวมของแรงดันที่ส่งจ่ายงานไฟฟ้าที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงนับได้ว่าพลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานสำคัญที่สุดของอุตสาหกรรม ซึ่งมีกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก แล้วส่งไปยัง สาระส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยัง โหลดต่างๆ นั้น ขาดที่จะขาดฟอลต์ซึ่ง

ในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ เมื่อเกิดฟอลต์บนสายส่งซึ่งมีผลกระทบที่มีอาจเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง 500 kV ได้ก็เกิดผลเสียหลายอย่างต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้วิธีการระบบทาง ดังนั้นจึงขดลวดที่ได้รับความเสียหายของขดลวดนำเข้าแต่ละขั้ว ซึ่งมีความถี่ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดฟอลต์ และปริมาณของฟอลต์ที่เกิดขึ้น เช่นแรงดันไฟฟ้าในขดลวดฟอลต์ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อขนาดของฟอลต์แตกต่างกัน ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งผลคือในลักษณะที่เปลี่ยนโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยมากในระบบไฟฟ้า ดังนั้น ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันสามารถเกิดขึ้นได้บนสายส่งไฟฟ้า โดยมีผลกระทบหลาย



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเขียนโวลต์จากรูปคลื่นที่ผลิตพร้อมกัน

ซึ่งจากรูปที่ 2 วัฒนธรรมการเขียนโวลต์จากรูปคลื่นที่ผลิตพร้อมกัน A, B และ C (AG) ที่ตำแหน่ง A และโวลต์ที่ตำแหน่ง B (AC) ที่ตำแหน่ง B

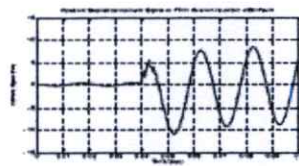
3. การจำลองพ่วง

เนื่องจากพ่วงเป็นสิ่งที่ต้องคิดในระบบไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติถ้าไม่ทราบพ่วงของระบบจริงให้ ไม่พออาจมีผลทำให้เกิดปัญหาการคำนวณพ่วงของระบบที่ผลิตขึ้นบนสายส่งโดยนำโปรแกรม PSCAD/EMTDC มาใช้เพื่อจำลองพ่วงการเกิดพ่วงที่ในสายส่งแรงดัน 200 kV ซึ่งเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าไทย (EGAT) ที่ใช้แรงดันสถานีไฟฟ้าพ่วงโค (TTC) และสถานีไฟฟ้าพ่วงจวด (NCC) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยสายส่งมีจำนวน 207 กิโลเมตร มีแรงดัน 200 kV มีจำนวนพ่วงทั้งหมด 5 พ่วง (0-0.1 ไมล์) เป็นพ่วงพ่วงที่ 0.04 ไมล์ มีอัตราการส่ง (sampling rate) 400 Hz โดยมีวิธีการปรับเทียบเป็นมิลลิ, ตำแหน่ง และชนิดของพ่วง

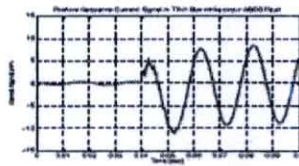


รูปที่ 3 วัฒนธรรมการเขียนที่ใช้ในการจำลองพ่วง

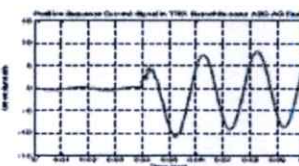
สำหรับระบบการเขียนที่ได้แสดงให้ดูเป็นของระบบพ่วงสายส่งเป็นแบบ Frequency dependent Mode model ซึ่งอาจมีการปรับพ่วงการเขียนพ่วงของสายส่งพ่วง และสายส่งนำไปใช้ในการศึกษาการวิเคราะห์พ่วงต่างๆ ในลักษณะต่างๆ ให้อย่างแม่นยำ



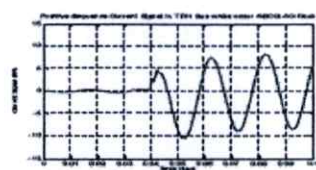
รูปที่ 4 ตัวอย่างการจำลองระบบพ่วงสายส่งขนาด 6 พ่วงสายส่งที่ TTK กรณีผลิตพ่วง ABC ที่ตำแหน่ง A และผลิตพ่วง B สายส่งปกติ



รูปที่ 5 ตัวอย่างการจำลองระบบพ่วงสายส่งขนาด 6 พ่วงสายส่งที่ TTC กรณีผลิตพ่วง ABCG ที่ตำแหน่ง A และตำแหน่ง B สายส่งปกติ



รูปที่ 6 ตัวอย่างการจำลองระบบพ่วงสายส่งขนาด 6 พ่วงสายส่งที่ TTC กรณีผลิตพ่วง ABC ที่ตำแหน่ง A และผลิตพ่วง AG ที่ตำแหน่ง B



รูปที่ 7 ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศ

Fault 1	Fault 2	Positive Sequence Peak Current (kA)			
		TKK1	TKK2	NCK1	NCK2
ABC	Normal	8.304 kA	1.809 kA	3.160 kA	1.893 kA
ABC	Normal	8.302 kA	1.805 kA	3.159 kA	1.893 kA
ABC	AG	8.209 kA	1.870 kA	3.094 kA	1.802 kA
ABC	AG	8.174 kA	1.864 kA	3.779 kA	1.279 kA

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B

Fault 2	Error Value (Normal, ABC (Fault1) and ABCG (Fault2)) (kA)			
	TKK1	TKK2	NCK1	NCK2
Normal	0.0002 kA	0.0000 kA	0.0000 kA	0.0008 kA
AG	0.0133 kA	0.0260 kA	0.0944 kA	0.0231 kA

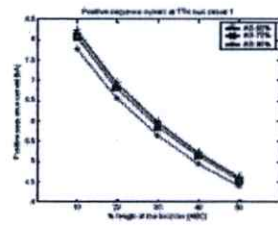
รูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นได้ว่า ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B มีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนในรูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B มีค่าใกล้เคียงกัน

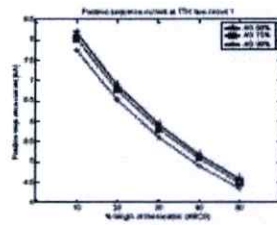
4. การวิเคราะห์ผลการจำลอง

จากการวิเคราะห์ผลการจำลอง พบว่า ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดันประจุกระแสไฟฟ้าขนาด ๗ โวลต์สายส่งที่พิกัด TTK กรณีเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B มีค่าใกล้เคียงกัน

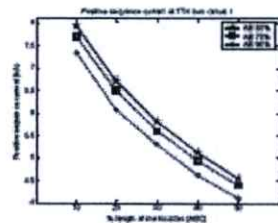
หมายเหตุ :
 Normal = สภาวะไม่มีฟองอากาศในระบบ
 ABC = ฟองอากาศที่ตำแหน่ง A
 ABCG = ฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง B
 AG = ฟองอากาศที่ตำแหน่ง A
 AB = ฟองอากาศที่ตำแหน่ง A และ B
 ABG = ฟองอากาศที่ตำแหน่ง A กับ B และเกิดฟองอากาศที่ตำแหน่ง G
 TKK1 - NCK1 = สายส่งที่พิกัด TTK1
 TKK2 - NCK2 = สายส่งที่พิกัด TTK2



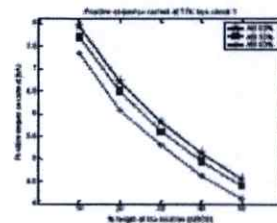
(a) ท่อน ABC ที่ความยาว A และท่อน AG ที่ความยาว B



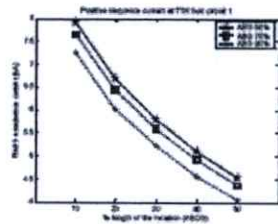
(b) ท่อน ABCG ที่ความยาว A และท่อน AG ที่ความยาว B



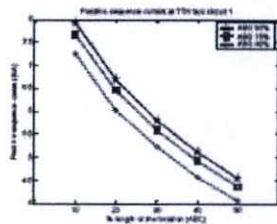
(c) ท่อน ABC ที่ความยาว A และท่อน AB ที่ความยาว B



(d) ท่อน ABCG ที่ความยาว A และท่อน AB ที่ความยาว B



(e) ท่อน ABC ที่ความยาว A และท่อน ABC ที่ความยาว B



(f) ท่อน ABCG ที่ความยาว A และท่อน ABC ที่ความยาว B

รูปที่ 8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่บัสบาร์ที่บัสบาร์ตัวที่ 1

การศึกษาคุณลักษณะของฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยหลักการแปลงเวฟเลต

Studies of Characteristics of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Discrete Wavelet Transform

วรุฒิ พงษ์ชัยศรีกุล อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล อนันต์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-4550 E-mail : knattap@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้แสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณฟอลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน ในระบบส่งจ่าย 500-kV โดยใช้การแปลงเวฟเลต สัญญาณฟอลต์สามารถเกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โปรแกรม PSCAD/EMTDC จะถูกใช้ในการจำลองสัญญาณฟอลต์ การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยใช้เพื่อตรวจจับสัญญาณความถี่สูง คุณลักษณะกระแสฟอลต์ที่มุมที่เกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และเฟสที่เกิดฟอลต์ ได้ถูกวิเคราะห์ ผลที่ได้พบว่าวิธีที่ได้นำเสนอให้ผลลัพธ์การแบ่งประเภทฟอลต์สองชนิดพร้อมกันเป็นที่น่าพอใจมากกว่าวิธีการตัดสินใจที่ผ่านมา

คำสำคัญ : การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย, ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน, สายส่ง

Abstract

This paper presents an analysis of characteristics for simultaneous fault signals in a 500-kV electrical power transmission system using wavelet transform. Such fault signals can occur in the transmission system, and have an effect to the operation of protective devices. The fault signal is simulated using PSCAD/EMTDC. The Discrete Wavelet Transform (DWT) is used in order to detect the high frequency components. In addition, characteristics of fault current at various fault inception angles, fault locations and faulty phases are analysed. It is found that the proposed algorithm gives more satisfactory results with simultaneous faults than those obtained from the previous decision algorithm.

Keywords: Discrete Wavelet Transform, Simultaneous faults Transmission lines

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ระบบสายส่งมีความซับซ้อนมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ สายส่งจึงเป็นแหล่งที่เกิดฟอลต์ได้มาก

ที่สุดเช่นกัน ดังนั้นการตรวจจับ, การระบุตำแหน่งและประเภทของฟอลต์จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะขจัดฟอลต์ออกจากสายส่งให้ได้เร็วที่สุด

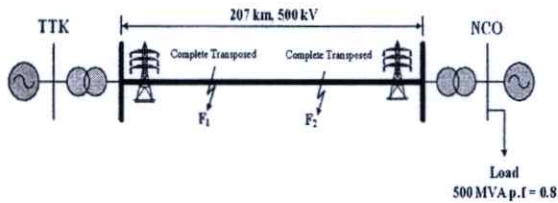
ในช่วงทศวรรษที่ 90 ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้การวิเคราะห์ได้มีพัฒนาใช้เทคนิคทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI) [1-3] มาใช้ในการแบ่งประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ดี ด้วยเหตุที่การวิเคราะห์สัญญาณจะนิยมใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) ซึ่งจะใช้สัญญาณฟอลต์อย่างน้อย 1 ไซเคิล (20 mSec) ดังนั้นจะให้ผลตอบสนองที่ช้าในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ จากข้อเสียดังกล่าว ได้มีการพัฒนาจากการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50Hz) มาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในลักษณะการป้องกันแบบทรานเซียนต์ ซึ่งการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) ถูกนำมาใช้การวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์แทนการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเลต ได้มีการนำเสนออย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น การระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเลต [4] นำเสนอโดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง (Details) และความถี่ต่ำ (Approximation) ของค่ากระแสทั้งสามเฟสในสายส่งจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่กำหนดไว้ (Threshold value) เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง และบทความของ P. Markming et al [5] ได้นำเสนอเทคนิคการแปลงเวฟเลตขั้นเดียวกันเพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเพียงอย่างเดียวและวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์เพียง 1/4 ไซเคิล (5 msec) ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ในการระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟสซึ่งจะให้ผลตอบสนองในการวิเคราะห์ที่เร็วกว่า

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่จะกล่าวถึงการหาประเภทของฟอลต์ในสายส่งที่เป็นฟอลต์จุดเดียว (Single Fault) แต่เมื่อมีฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน (Simultaneous Fault) เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสายส่งเดียวกัน เป็นไปได้ว่า เทคนิคที่ผ่านมานี้จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ถูกต้อง ดังนั้นบทความฉบับนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์สองชนิดพร้อมกันระหว่างฟอลต์ด้วงจรทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยการใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC มาจำลองการเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งต่างๆ กันและวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ด้วยการแปลงเวฟเลต

2. การจำลองฟอลต์

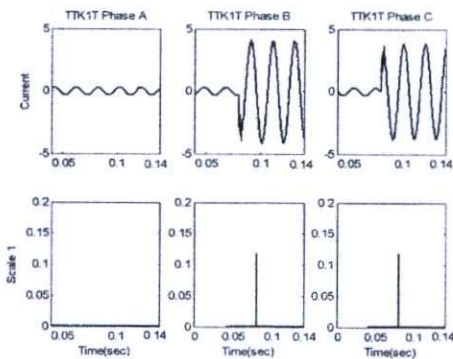
ในการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ได้นำโปรแกรม PSCAD/EMTDC มาใช้เพื่อจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่งแรงจล 500 kV ซึ่งเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจริงจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) และสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยสายส่งมีความยาว 207 กิโลเมตร และ ขนาดของโหลดเท่ากับ 500 MVA (p.f. = 0.8) เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากของทางด้านงานวิศวกรรม จึงได้ตั้งสมมุติฐานให้มีค่าประมาณ 10 โอห์ม



รูปที่ 1 แบบของสายส่งที่ใช้ในการจำลองฟอลต์

โปรแกรม PSCAD/EMTDC ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ทั้งหมด 7 ไซเคิล (0-0.14 วินาที) เริ่มเกิดฟอลต์ที่ 0.08 วินาที มีอัตราการสุ่ม (Sampling Rate) 200 kHz และทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

- 1.) ประเภทของฟอลต์ 5 ประเภท (ABC, ABCG, AB, ABG, AG) และสถานะปกติ (Normal)
- 2.) ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ (ระยะทางที่เกิดฟอลต์จะคิดจากสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) เป็นจุดอ้างอิง)
 - ฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดที่ 20 กม. และฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดที่ 103.5 กม.
 - ฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดที่ 20 กม. และฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดที่ 187 กม.
 - ฟอลต์ที่จุด F_1 เกิดที่ 103.5 กม. และฟอลต์ที่จุด F_2 เกิดที่ 187 กม.



(a) กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C

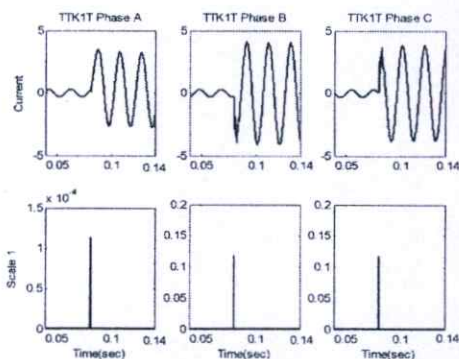
- 3.) มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A

3. การแสดงพฤติกรรมของการเกิดฟอลต์

การวิเคราะห์เวฟเฟิร์มจะใช้โปรแกรม MATLAB/Wavelet Toolbox โดยนำสัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้าน มาผ่านการแปลงเวฟเฟิร์มแบบเต็มหน่วย เวฟเฟิร์มแม่ชนิด daubechies 4 (db4) [5] ถูกนำมาใช้เพื่อแยกสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง (Details)

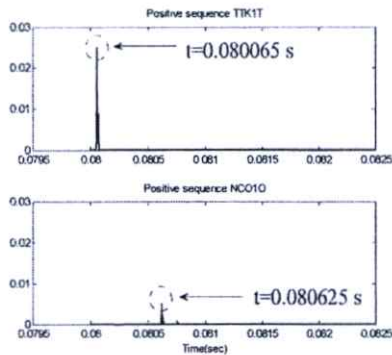
ก่อนที่ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน เพื่อระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นนั้น จำเป็นต้องเข้าใจในพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเฟิร์มแบบเต็มหน่วยในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียวและเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น ในบทความนี้จะยกตัวอย่างในกรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียว (Single Fault) คือ ฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C (BC) เปรียบเทียบกับ กรณีเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน (Simultaneous Fault) คือ ฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C (BC) ที่ตำแหน่งที่ F_1 และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) ที่ตำแหน่งที่ F_2

จากรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในแต่ละเฟส จะพบว่า ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียวค่าสัมประสิทธิ์เฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) จะมีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำมาก แต่เมื่อเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน จะสามารถตรวจจับค่าสัมประสิทธิ์ในเฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ตรวจจับได้นั้น เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) ที่ตำแหน่งที่ F_2 นั่นเอง



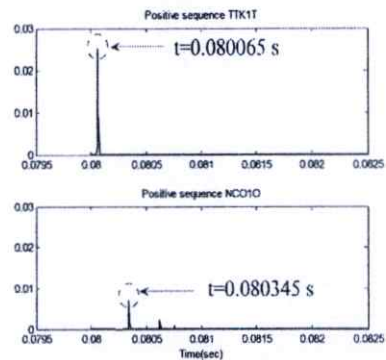
(b) กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C และฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

รูปที่ 2 การตรวจจับกระแสฟอลต์ทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียวและกรณีเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน

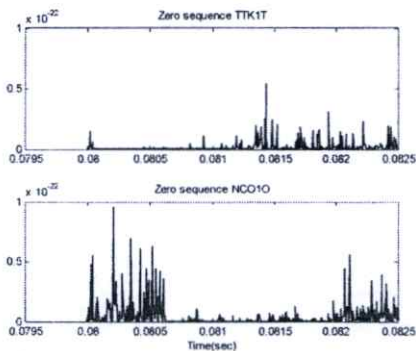


(a) กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C

รูปที่ 3 การตรวจจับกระแสลำดับบวก (Positive sequence) ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียว และกรณีเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน



(b) กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C และ ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

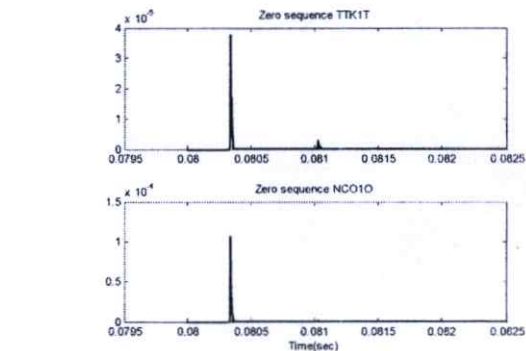


(a) กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C (BC)

รูปที่ 4 การตรวจจับกระแสลำดับศูนย์ (Zero sequence) ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียว และกรณีเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาสัญญาณกระแสลำดับบวก (Positive sequence current) สังเกตเห็นได้ว่าการตรวจจับเวลาและค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกทางด้านสถานีไฟฟ้าท่าตะโก (TTK) ทั้งกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียวและฟอลต์สองชนิดพร้อมกันจะมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งเดียวกันและชนิดเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาทางด้านสถานีไฟฟ้าหนองจอก (NCO) จะเห็นได้ว่า ในกรณีเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกันสามารถตรวจจับเวลาได้เร็วกว่าการเกิดฟอลต์จุดเดียว และขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับบวกก็มีค่ามากกว่า ทั้งนี้เพราะว่าค่าสัมประสิทธิ์และเวลาที่ตรวจจับได้นั้นเป็นเวลาที่เกิดฟอลต์ F_2 ซึ่งเกิดใกล้ปลายสายส่งทางด้านหนองจอก (NCO) เดินทางมา ส่วนขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่ามากกว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) เกิดที่ตำแหน่ง F_2 นั่นเอง

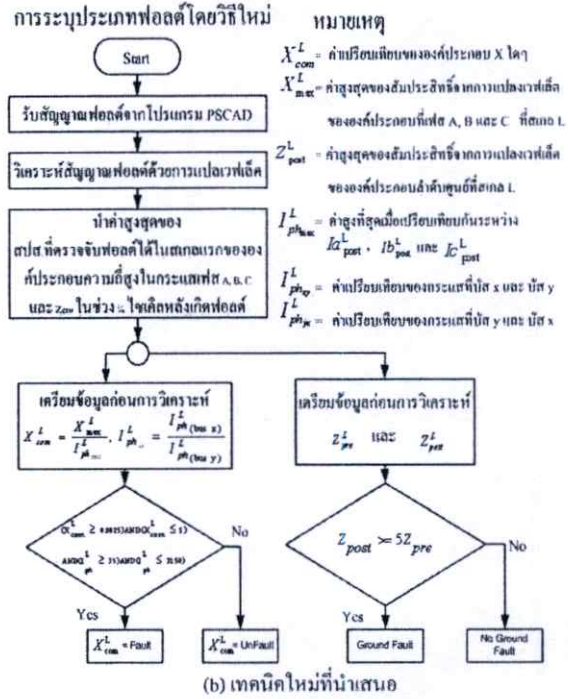
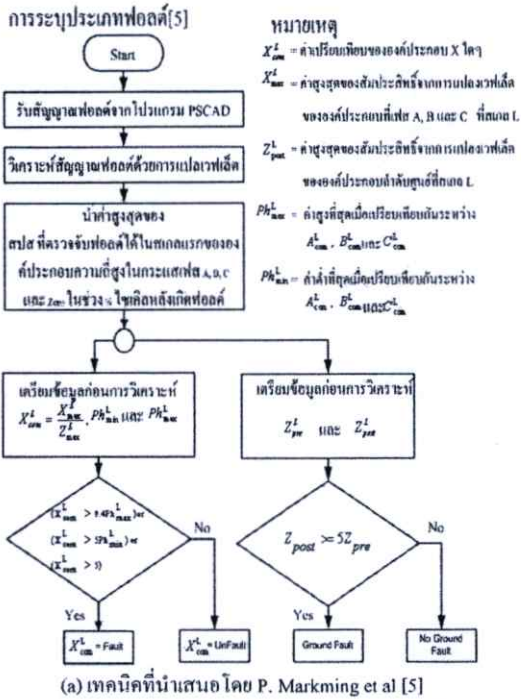
ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาสัญญาณกระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence current) จากรูปที่ 4 ในกรณีการเกิดฟอลต์จุดเดียวซึ่งเป็นฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C สังเกตได้ว่าที่ปลายสายส่งทั้งสองด้าน ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์มีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ฟอลต์ที่เกิดขึ้น ไม่ได้ลัดวงจรลงดิน จึงทำให้ไม่มีค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์ แต่เมื่อพิจารณากรณีฟอลต์สองชนิดพร้อมกันจะพบว่า



(b) กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส B กับ C และ ฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน

สามารถตรวจจับเวลาและค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสลำดับศูนย์ ทั้งนี้เพราะว่า ค่าสัมประสิทธิ์และเวลาที่ตรวจจับได้นั้นเป็นขนาดและเวลาที่เกิดจากฟอลต์ F_2 ซึ่งเป็นฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดิน (AG) นั่นเอง และเวลาที่ตรวจจับได้จะมีค่าเท่ากันก็เพราะเกิดฟอลต์เฟส A ลัดวงจรลงดินที่ระยะทาง 103.5 กม. (50%ของระยะทางสายส่ง)

จากพฤติกรรมของฟอลต์ที่เกิดจุดเดียวกับฟอลต์ที่เกิดสองชนิดพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 2-4 พบว่ามีส่วนสำคัญที่สามารถให้การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอโดย P. Markming et al [5] ดังแสดงในรูปที่ 5(a) เพื่อแบ่งประเภทฟอลต์นั้น มีโอกาสผิดพลาดได้ง่าย ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า การแบ่งประเภทของฟอลต์กรณีฟอลต์จุดเดียวจำนวน 594 ตัวอย่าง สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องและแม่นยำ แต่เมื่อนำเทคนิคนี้ มาวิเคราะห์กรณีฟอลต์สองชนิดพร้อมกันจำนวน 726 ตัวอย่างจะพบว่า เกิดความผิดพลาดในการแบ่งประเภทของฟอลต์ เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดแล้ว เกิดจากผลกระทบกระแสลำดับศูนย์ของฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_2 มากระทำกับฟอลต์ที่ตำแหน่ง F_1 จึงเกิดการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง ในบทความนี้ได้พัฒนาเทคนิคเดิมให้สามารถแบ่งประเภทฟอลต์ได้ทั้งสองกรณีดังแสดงในรูปที่ 5(b)



รูปที่ 5 แผนภาพการระบุประเภทฟอลต์

ตารางที่ 1 ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการแบ่งประเภทฟอลต์

Type Fault	Number of Case Studies	Accuracy	
		Markming algorithm [5]	proposed algorithm
Single Fault	594	98%	99.8%
Simultaneous Fault	726	31.95%	65%

5. บทสรุป

ในบทความฉบับนี้ได้เสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน ในระบบส่งจ่าย 500-kV โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตสัญญาณกระแสฟอลต์ถูกจำลองโดยโปรแกรม PSCAD/EMTDC และนำมาวิเคราะห์ตามเทคนิคที่นำเสนอโดย P. Markming et al [5] พบว่าการระบุประเภทฟอลต์ในกรณีเกิดฟอลต์จุดเดียว (Single Fault) ให้ความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 98% ดังแสดงในตารางที่ 1 แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ในกรณีเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน (Simultaneous Fault) ความสำเร็จเฉลี่ยลดลงเหลือเพียงประมาณ 31.95% แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ผ่านมาน่าจะไม่สามารถแบ่งประเภทฟอลต์ที่เกิดจากฟอลต์สองชนิดพร้อมกันได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งในบทความนี้ได้พัฒนาเทคนิคเดิมให้สามารถระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งทั้งสองกรณี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เทคนิคที่ได้นำเสนอให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ดี ควรมีการพัฒนาเทคนิคใหม่หรือพัฒนาเทคนิคเดิมให้สามารถแบ่งประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้ทั้งสองกรณีได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ferrero, S. Sangiovanni and E. Zappitelli, "A Fuzzy-set approach to fault-type identification in digital relaying," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 169-175.
- [2] T. Dalstein and B. Kulicke, "Neural Network approach to fault classification for high speed protective relaying," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995, pp. 1002-1009.
- [3] Badrul H. Chowdhury and Kunyu Wang, "Fault Classification Using Kohonen Feature Mapping" International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems 1996 (ISAP96), January 1996, pp. 194-198.
- [4] O.A.S. Youssef, "Fault Classification Based On Wavelet Transforms" IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, October 2001, Vol. 1, pp. 531-538.
- [5] P. Makming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando "Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transforms" IEEE Transmission and Distribution Conference, Yokohama, Japan, October 2002, pp. 2246-2250.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล** นายวรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล
- วัน เดือน ปี เกิด** 20 มิถุนายน 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
- ประวัติการศึกษา**
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2545
- การทำงาน**
ปี พ.ศ. 2545 – 2550
SCADA Engineer SNC-Lavalin International Inc.
ปี พ.ศ. 2550
วิศวกรไฟฟ้าระดับ 4 แผนกระบบควบคุมอุปกรณ์ระบบจำหน่าย
กองอุปกรณ์ควบคุม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- ผลงานทางวิชาการ**
“การวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC (Analysis of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using PSCAD/EMTDC)”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 25 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2551, หน้า 25-30
“การวิเคราะห์พฤติกรรมของฟอลต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC (Behavior Analysis of Simultaneous Fault in Electrical Power Transmission Systems Using PSCAD/EMTDC)”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), 29-31 ตุลาคม 2551, หน้า 17-20