

การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตและฟuzzy logic สำหรับการวิเคราะห์ฟอลต์  
ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย

APPLICATIONS OF WAVELET TRANSFORM AND FUZZY LOGIC  
FOR FAULT ANALYSIS IN ELECTRICAL POWER  
TRANSMISSION NETWORK SYSTEMS

ธีระศักดิ์ พัตน์เจริญ  
THEERASAK PATCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตและฟuzzy logic สำหรับการวิเคราะห์ฟอลต์  
ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย

APPLICATIONS OF WAVELET TRANSFORM AND FUZZY LOGIC  
FOR FAULT ANALYSIS IN ELECTRICAL POWER  
TRANSMISSION NETWORK SYSTEMS

ธีระศักดิ์ พัตน์เจริญ

THEERASAK PATCHAROEN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....75121  
วัน,เดือน,ปี.....19 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2550

**APPLICATIONS OF WAVELET TRANSFORM AND FUZZY LOGIC  
FOR FAULT ANALYSIS IN ELECTRICAL POWER  
TRANSMISSION NETWORK SYSTEMS**

**THEERASAK PATCHAROEN**

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

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ดและฟิชชีโลจิกสำหรับการวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย
นักศึกษา	นาย ชีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ
รหัสประจำตัว	47060266
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอรูปแบบการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยและฟิชชีโลจิกสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV สัญญาณฟอลต์ถูกจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังเกิดฟอลต์ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ดแม่ซนิก daubechies4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงจากสัญญาณกระแสฟอลต์ ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อระบุทิศทางของสัญญาณฟอลต์ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ ถูกนำมาคำนวณเพื่อจัดลำดับการป้องกัน การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ ถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับฟิชชีโลจิก เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งและแยกประเภทของฟอลต์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการใหม่นี้มีประสิทธิภาพสำหรับการระบุตำแหน่งและแยกประเภทของฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จึงนำวิธีการที่ได้นำเสนอมาเปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการระบุทิศทางและการจัดลำดับการป้องกันมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% และ 99.8878% ตามลำดับ การระบุตำแหน่งฟอลต์มีความแม่นยำสูงถึง 100% นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์มีค่ามากกว่า 98% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงหลักการที่นำเสนอมีการตอบสนองที่รวดเร็ว, ขั้นตอนการคำนวณที่ง่าย และมีความแม่นยำสูงภายใต้ระบบและสภาวะฟอลต์ต่างๆ อีกทั้งเทคนิคที่นำเสนอยังให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ และมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาแผนการป้องกันสมัยใหม่สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในอนาคต

**Thesis Title** Applications of Wavelet Transform and Fuzzy Logic for Fault Analysis  
in Electrical Power Transmission Network Systems

**Student** Mr. Theerasak Patcharoen

**Student ID.** 47060266

**Degree** Master of Engineering

**Program** Electrical Engineering

**Year** 2007

**Thesis Advisor** Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn

### ABSTRACT

This thesis presents an application of the Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic for fault analysis of 500 kV power transmission network systems. 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 compared in order to identify the direction of fault signals. The coefficient ratio between buses that the fault occurs is calculated so that the proper protective relay sequence can be selected. The variations of first scale high frequency components that can detect fault are considered as inputs for the fuzzy logic. The results obtained from the fuzzy logic are used to locate and identify faults. In addition to indicate that the new approach can be effective for the fault location and identification in transmission network systems, a proposed technique is compared with a combination between wavelet transform and probabilistic neural network. The algorithms used to analyze fault signals is developed on MATLAB. The results show that average accuracies for the identification of the direction and protective relay sequence are 100% and 99.8878% respectively. The precision for fault location is 100%. In addition, the average accuracy for fault identification is more than 98%. Thus, this verification shows effectiveness of the technique with a fast response as well as simplicity, and the technique can perform accurately under various systems and fault conditions. Moreover, the new approach gives satisfactory results, and will be useful in the development of a modern protection scheme for electrical power transmission network systems in the future.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ. ศุภี บรรจงจิตร, รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และดร.ชาย ชมภูอินไหว รวมถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณพิทักษ์ ปิ่นอนงค์, คุณกฤษณะ กิจศิลป์ชัย และคุณสาโรจน์ รัตนสุภา จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้ในการศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณอรรรตพล เก่าพิทักษ์กุล เพื่อนนักศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแนะนำ พร้อมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขสิ่งต่างๆ ที่ผิดพลาดจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท EPRL ทุกท่าน สำหรับกำลังใจที่มอบให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บุคคลที่มีความสำคัญยิ่งต่อข้าพเจ้าได้แก่ คุณพ่อภิรมย์ และคุณแม่ประทีป พัฒน์เจริญ ผู้ซึ่งเป็นบิดาและมารดาที่ได้มอบการอบรมสั่งสอนและสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนตั้งแต่อดีตจวบจนถึงปัจจุบัน รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับกำลังใจที่มีให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	XI
สารบัญรูป .....	XII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ในระบบป้องกันสายส่ง .....	3
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	7
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	8
1.4 ขอบเขตของการศึกษา .....	9
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา .....	10
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา .....	10
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	11
บทที่ 2 การวิเคราะห์สัญญาณพอลต์และระบบป้องกันบนสายส่ง .....	12
2.1 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory) .....	12
2.2 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง .....	18
2.2.1 การป้องกันแบบกระแสเกิน (Over Current Protection) .....	18
2.2.2 การป้องกันแบบรูทิศทาง (Directional Protection) .....	19
2.2.3 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance Protection) .....	23
2.2.4 การป้องกันแบบใช้ระบบสื่อสาร (Pilot Protection) .....	26
2.3 อุปกรณ์หาจุดขัดข้องในสายส่ง (Line fault locator : LFL) .....	27
2.3.1 การทำงานของเครื่อง LFL ในระบบสายส่ง .....	27
2.3.2 หลักการทำงานของเครื่อง LFL .....	28
บทที่ 3 การแปลงเวฟเล็ต .....	30
3.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT) .....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) .....	30
3.1.2 การสเกล (Scaling : a) .....	32
3.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) .....	33
3.1.4 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ต (Decomposition and reconstruction of Wavelet) .....	33
3.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT) .....	34
3.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) .....	36
3.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA) .....	37
3.3.1.1 ทฤษฎีของปริภูมิเวกเตอร์ (Space vector theory) .....	37
3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis) .....	40
3.4 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) .....	42
บทที่ 4 ทฤษฎีเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียมและพีชคณิตเชิงเส้น .....	44
4.1 ระบบโครงข่ายประสาทเทียม .....	44
4.1.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks) .....	45
4.1.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network) .....	45
4.1.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network) .....	46
4.1.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ (Lattice Neural Network) .....	47
4.1.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights) .....	48
4.1.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) .....	48
4.1.4 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs) .....	49
4.1.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network) .....	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ระบบฟัซซี่โลจิก .....	56
4.2.1 คริปส์เซตและฟัซซี่เซต (Crisp Sets and Fuzzy Sets) .....	56
4.2.2 นิยามพื้นฐานของฟัซซี่เซต .....	57
4.2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต .....	58
4.2.3.1 สมการเชิงเส้น .....	58
4.2.3.2 รูปสามเหลี่ยม .....	58
4.2.3.3 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู .....	59
4.2.3.4 เส้นโค้งรูปตัว S .....	59
4.2.3.5 รูปประฆังคว่ำ .....	60
4.2.4 ตัวปฏิบัติการฟัซซี่เซต .....	61
4.2.5 ตัวแปรภาษาพูดหรือลึงค์จีสติก (Linguistic Variable) .....	64
4.2.5.1 การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรลึงค์จีสติก .....	64
4.2.5.2 ขอบเขตของตัวแปรลึงค์จีสติก (Linguistic Hedges) .....	64
4.2.6 กฎของฟัซซี่ (Fuzzy Rules) .....	65
4.2.7 ประพจน์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Proposition) .....	65
4.2.7.1 ประพจน์เดี่ยว .....	65
4.2.7.2 ประพจน์แบบผสม .....	65
4.2.8 แบบจำลองฟัซซี่โลจิก .....	65
4.2.8.1 โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี่ .....	66
4.2.8.2 คริปส์อินพุท และเอาต์พุท .....	66
4.2.8.3 ฟัซซิฟิเคชันโมดูล (Fuzzification Module) .....	66
4.2.8.4 ฐานความรู้ (Knowledge Base) .....	67
4.2.8.5 กลไกการอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference Engine) .....	67
4.2.8.6 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Module) .....	69
บทที่ 5 การจำลองและวิเคราะห์สัญญาณพล็อต .....	71
5.1 การจำลองพล็อต .....	71
5.1.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณพล็อต .....	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 แบบจำลองสายส่ง .....	72
5.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 500 kV .....	73
5.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ .....	75
5.2 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ทและฟuzzy โลกสำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ บนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย .....	77
5.3 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ท .....	77
5.3.1 การตรวจจับฟอลต์ (Fault Detection) .....	79
5.3.2 การระบุทิศทางของฟอลต์ (Fault Direction) .....	86
5.3.3 การจัดลำดับการป้องกัน (Protective Relay Sequence) .....	88
5.4 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาท .....	91
5.4.1 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location) .....	92
5.4.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) .....	93
5.4.2 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault Identification) .....	95
5.4.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) .....	96
5.5 การวิเคราะห์ด้วยฟuzzy โลก .....	98
5.5.1 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location) .....	99
5.5.1.1 ฟuzzy ฟิเคชัน โมดูล (Fuzzification Module) .....	100
5.5.1.2 ฐานความรู้ (Knowledge Base) .....	100
5.5.1.3 กลไกการอนุมานฟuzzy (Fuzzy Inference Engine) .....	104
5.5.1.4 ดีฟuzzy ฟิเคชัน (Defuzzification Module) .....	105
5.5.2 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault Identification) .....	106
5.5.2.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ .....	106
5.5.2.2 การเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ .....	107
5.5.2.3 ฟuzzy ฟิเคชัน โมดูล (Fuzzification Module) .....	112
5.5.2.4 ฐานความรู้ (Knowledge Base) .....	112
5.5.2.5 กลไกการอนุมานฟuzzy (Fuzzy Inference Engine) .....	115
5.5.2.6 ดีฟuzzy ฟิเคชัน (Defuzzification Module) .....	117
5.6 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ .....	118

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ผลการทดลอง .....	124
6.1 รูปแบบการนำเสนอ .....	124
6.1.1 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง .....	124
6.1.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดลอง .....	124
6.2 ผลการทดลองของสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 ความยาวสายส่ง 183 กิโลเมตร .....	125
6.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (18.3 กิโลเมตร) .....	125
6.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (36.6 กิโลเมตร) .....	128
6.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (54.9 กิโลเมตร) .....	131
6.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (73.2 กิโลเมตร) .....	134
6.2.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (91.5 กิโลเมตร) .....	137
6.2.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (109.8 กิโลเมตร) .....	140
6.2.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (128.1 กิโลเมตร) .....	143
6.2.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (146.4 กิโลเมตร) .....	146
6.2.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (164.7 กิโลเมตร) .....	149
6.3 ผลการทดลองของสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 ความยาวสายส่ง 183 กิโลเมตร .....	152
6.3.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (18.3 กิโลเมตร) .....	152
6.3.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (36.6 กิโลเมตร) .....	155
6.3.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (54.9 กิโลเมตร) .....	158
6.3.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (73.2 กิโลเมตร) .....	161
6.3.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (91.5 กิโลเมตร) .....	164
6.3.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (109.8 กิโลเมตร) .....	167
6.3.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (128.1 กิโลเมตร) .....	170
6.3.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (146.4 กิโลเมตร) .....	173
6.3.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (164.7 กิโลเมตร) .....	176
6.4 ผลการทดลองของสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 ความยาวสายส่ง 62 กิโลเมตร .....	179
6.4.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (6.2 กิโลเมตร) .....	179
6.4.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (12.4 กิโลเมตร) .....	182
6.4.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (18.6 กิโลเมตร) .....	185
6.4.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (24.8 กิโลเมตร) .....	188



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.7.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (41.6 กิโลเมตร) .....	269
6.7.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (52 กิโลเมตร) .....	272
6.7.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (62.4 กิโลเมตร) .....	275
6.7.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (72.8 กิโลเมตร) .....	278
6.7.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (83.2 กิโลเมตร) .....	281
6.7.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (93.6 กิโลเมตร) .....	284
6.8 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	287
6.8.1 การตรวจจับฟอลต์ .....	287
6.8.2 การระบุทิศทางฟอลต์ .....	288
6.8.3 การจัดลำดับการป้องกัน .....	289
6.8.4 การระบุตำแหน่งฟอลต์ .....	290
6.8.5 การระบุประเภทของฟอลต์ .....	292
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	295
เอกสารอ้างอิง .....	304
ภาคผนวก ก. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสำหรับการระบุตำแหน่ง และแบ่งประเภทฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย .....	309
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	316
ประวัติผู้เขียน .....	327

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1	แสดงความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งส่วนต่างๆและเมตริกซ์การแปลงของระบบ .....79
5.2	แสดงค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาผลการแปลงเวฟเล็ตขององค์ประกอบ กระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน .....84
5.3	ผลรวมของค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ต .....85
5.4	แสดงผลสรุปของการตรวจจับฟอลต์ .....86
5.5	แสดงผลสรุปของการระบุทิศทางของฟอลต์ .....88
5.6	แสดงผลสรุปของการจัดลำดับการป้องกัน .....90
5.7	แสดงค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) .....94
5.8	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ .....95
5.9	แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์กระแสฟอลต์ในช่วง ¼ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ปลายด้านส่ง (WNIT) ในสเกลที่ 1 .....96
5.10	แสดงค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นสำหรับระบุเฟส .....97
5.11	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ .....98
5.12	กฎของฟิชชีสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์ (สายส่งส่วน T, O และ N) .....104
5.13	เมตริกซ์ของกฎฟิชชีสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์ .....104
5.14	แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตในช่วง ¼ ไซเคิล .....109
5.15	แสดงผลหาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์และค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ องค์ประกอบลำดับศูนย์ของการแปลงเวฟเล็ตในช่วง ¼ ไซเคิล .....109
5.16	แสดงสัมประสิทธิ์ตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองฟิชชีโลจิก .....110
5.17	แสดงสัมประสิทธิ์ตัวแปรอินพุตของแบบจำลองฟิชชีโลจิกทั้ง 11 ประเภทฟอลต์ .....111
5.18	กฎของฟิชชีสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ (สายส่งส่วน T, O และ N) .....116
5.19	เมตริกซ์ของกฎฟิชชีสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ .....117

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง .....4
1.2	แสดงการเปรียบเทียบพัฒนาการของเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ .....5
1.3	วิวัฒนาการในการป้องกันระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง .....6
1.4	แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ .....11
2.1	แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง ณ เฟสใดๆ ( $v$ และ $i$ เป็นฟังก์ชันของ $x$ และ $t$ ) .....13
2.2	แสดงคลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ ที่เวลา $t_1$ และ $t_2$ .....16
2.3	แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสภาวะที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง .....17
2.4	แสดงขนาดของกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน .....18
2.5	แสดงการเปรียบเทียบกระแสฟอลต์ด้วยการแปลงฟูเรียร์ .....18
2.6	แสดงระนาบเชิงซ้อนของกระแสฟอลต์และกราฟเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน .....19
2.7	แสดงลักษณะคุณสมบัติของรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง .....21
2.8	แสดงไดอะแกรมขอบเขตในการทำงานรีเลย์แบบรู้ทิศทาง .....22
2.9	แสดงการใช้งานของรีเลย์กระแสเกินและรีเลย์แบบรู้ทิศทางในการป้องกันสายส่ง .....23
2.10	แสดงการติดตั้งและหลักการการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay) .....24
2.11	แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง .....24
2.12	แสดงการวิเคราะห์แรงดันและกระแสด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสภาวะที่เกิดฟอลต์ .....25
2.13	แสดงการแปลงฟูเรียร์ของกระแสแต่ละเฟสในกรณีฟอลต์ที่เฟส A .....26
2.14	แสดงลักษณะของการป้องกันโดยใช้ระบบสื่อสาร .....27
2.15	แสดงลักษณะการทำงานของ LINE FAULT LOCATOR (LFL) ในระบบสายส่ง .....28
2.16	แสดงทิศทางการเดินทางของกลุ่มพัลส์ (Pulse) ไปยังจุดฟอลต์ในสายส่ง .....29
3.1	แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ตแบบ Morlet .....31
3.2	แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์ .....32
3.3	แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ต .....32
3.4	แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต .....33
3.5	แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต .....33
3.6	แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต .....34
3.7	แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต .....35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ด .....36
3.9	แสดงขั้นตอนที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ด .....36
3.10	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย (decomposition) .....39
3.11	แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ .....41
3.12	แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ดโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ .....41
3.13	แสดงเวฟเล็ดแม่แบบไม่มีชนิดย่อย .....42
3.25	แสดงเวฟเล็ดแม่แบบมีชนิดย่อย .....43
4.1	แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว .....45
4.2	แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น .....46
4.3	แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ .....47
4.4	แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของชุดฝึกสอน ( $e_{train}$ ) กับ ชุดตรวจสอบ ( $e_{val}$ ) .....50
4.5	แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น .....51
4.6	แสดงแบบจำลองพื้นฐานสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น .....52
4.7	แสดง linguistic variable สำหรับกำหนดค่าความเร็วรถ .....64
4.8	แสดงบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของแบบจำลองฟuzzy .....66
5.1	แสดงระบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่ายสามบัสวงจรรู 500 kV .....72
5.2	แสดงโครงสร้างเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งวงจรรู 500 kV .....73
5.3	แสดงระยะหย่อน (sag) ของสายตัวนำบนเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งวงจรรู 500 kV .....74
5.4	แสดงสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยวัดที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าวังน้อย WN1T ....76
5.5	แสดงสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยวัดที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าจอมบึง CBG1T ...76
5.6	แสดงสัญญาณฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายสายส่งในแต่ละด้าน .....78
5.7	แสดงผลการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน WN1T .....80
5.8	แสดงผลการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน CBG1T .....80
5.9	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังสองของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน WN1T ...81
5.10	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังสองของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน CBG1T ..81
5.11	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลที่ 1 ของสัญญาณ องค์ประกอบกระแสลำดับบวก ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่ง .....87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12	แสดงผลตอบสนองของรีเลย์ กรณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG) ที่ระยะทาง 10% (18.3 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 .....89
5.13	แสดงผลตอบสนองของรีเลย์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 20% (36.6 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 .....89
5.14	แสดงผลตอบสนองของรีเลย์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 70% (128.1 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 .....90
5.15	แสดงผลการแปลงเวฟเส้นของกระแสลำดับบวกที่วัดได้จากปลายด้านส่งและรับ .....93
5.16	แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น .....93
5.17	แสดงผลการแปลงเวฟเส้นของกระแสที่วัดได้จากปลายด้านส่ง (WNIT) .....96
5.18	แสดงโครงสร้างของแบบจำลองฟิชชีโลจิกสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์ .....99
5.19	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต Ta, Tb สำหรับสายส่งส่วน T ....101
5.20	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต Ta, Tb สำหรับสายส่งส่วน O ....102
5.21	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต Ta, Tb สำหรับสายส่งส่วน N ....102
5.22	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต (Location) .....103
5.23	แสดงตัวอย่างของกลไกการอนุมานแบบ Mamdani's rule และการทำ ดีฟิชซิฟิเคชันด้วยวิธี COG method สำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์ .....105
5.24	แสดง โครงสร้างของแบบจำลองฟิชชีโลจิกสำหรับการระบุเฟสที่เกิดฟอลต์ .....112
5.25	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับ แบบจำลองฟิชชีโลจิกของสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 และ 2 .....113
5.26	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับ แบบจำลองฟิชชีโลจิกของสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 และ 2 .....114
5.27	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับ แบบจำลองฟิชชีโลจิกของสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 และ 2 .....114
5.28	แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต (Phase) .....115
5.29	แสดงตัวอย่างของกลไกการอนุมานแบบ Mamdani's rule และการทำ ดีฟิชซิฟิเคชันด้วยวิธี COG method สำหรับการระบุประเภทฟอลต์ .....118
5.30	แสดงแผนภาพการตรวจจับฟอลต์ .....119
5.31	แสดงแผนภาพการระบุทิศทางฟอลต์ .....120

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32	แสดงแผนภาพการจัดลำดับการป้องกัน .....120
5.33	แสดงแผนภาพการหาตำแหน่งพอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ....121
5.34	แสดงแผนภาพการระบุประเภทพอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ...122
5.35	แสดงแผนภาพการหาตำแหน่งพอลต์ด้วยพีชชีโลจิก .....123
5.36	แสดงแผนภาพการระบุประเภทพอลต์ด้วยพีชชีโลจิก .....123
6.1	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 18.3 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) ..... 125
6.2	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....128
6.3	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 54.9 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....131
6.4	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 73.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....134
6.5	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 91.5 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....137
6.6	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 109.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....140
6.7	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 128.1 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....143
6.8	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 146.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....146
6.9	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 164.7 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T) .....149
6.10	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 18.3 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T) .....152
6.11	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T) .....155







## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.54	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 93.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N) .....284
6.55	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละประเภท .....287
6.56	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละตำแหน่ง .....287
6.57	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการระบุทิศทางฟอลต์ในแต่ละประเภท .....288
6.58	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการระบุทิศทางฟอลต์ในแต่ละตำแหน่ง .....288
6.59	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละประเภท .....289
6.60	แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละตำแหน่ง .....289
6.61	แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์แต่ละประเภทในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV .....290
6.62	แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์แต่ละตำแหน่งในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV .....291
6.63	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์แต่ละประเภทในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV .....292
6.64	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์แต่ละตำแหน่งในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV .....293
7.1	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละประเภทของฟอลต์ .....298
7.2	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุทิศทางฟอลต์ในแต่ละประเภทของฟอลต์ .....299
7.3	แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละประเภทของฟอลต์ .....299
7.4	แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งฟอลต์ในแต่ละระยะทาง .....300
7.5	แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งฟอลต์ .....300
7.6	แสดงค่าเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์แต่ละประเภทของระบบจำลอง .....301
7.7	แสดงค่าเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ของระบบจำลอง .....301

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สายส่งจึงมีการเชื่อมโยงส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกัน ในลักษณะเป็นโครงข่าย (network) ทำให้มีการขยายตัวของระบบสายส่งเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ต้องมีการเดินสายส่งผ่านไปยังพื้นที่ต่างๆ ในหลายลักษณะ ซึ่งมีโอกาสจะทำให้เกิดความผิดปกติต่างๆ กับสายส่งได้มากขึ้น เช่น การเกิดการลัดวงจรหรือฟอลต์ (fault) เป็นต้น โดยที่สายส่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า (Power plant) ไปยังผู้ใช้โดยผ่านส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สถานีไฟฟ้า (substation), เขตชุมชน และแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ทำให้ระบบสายส่งมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีมากขึ้นตามลำดับ จึงนับได้ว่าพลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ดี การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดต่างๆ นั้น บางครั้งอาจเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ เมื่อเกิดฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้เกิดผลเสียหายอย่างมากต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขณะเกิดการลัดวงจรจะสูงมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้าในส่วนหลักของระบบลดลง, เกิดความร้อนสูง (Overheating) กับอุปกรณ์ภายในระบบ และยังทำให้ระบบขาดเสถียรภาพในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

ความน่าเชื่อถือของระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าก็มีความสำคัญมาก เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่ง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยจะมีประโยชน์อย่างมากทางด้านการออกแบบระบบป้องกัน เพื่อให้ระบบป้องกันนั้นมีความสามารถในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และทราบรูปแบบของฟอลต์ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงทราบตำแหน่งของการเกิดฟอลต์อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนั้นในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบกระแสฟอลต์จะมีทิศทางไหลจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจึงสามารถใช้เลย์แบบระยะทาง เพื่อปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้ แต่ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีวงจรสายส่งเชื่อมโยงกันในลักษณะเป็นแบบโครงข่าย (Network) ซึ่งมีขนาดความซับซ้อนมาก เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบกระแสฟอลต์จะสามารถไหลได้หลายทิศทาง ถ้าพิจารณาในระบบบวงจรขนาน (Parallel feeder) หรือระบบสายส่งวงจรรู (Double circuit) เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งวงจรรใดวงจรหนึ่ง รีเลย์ทุกตัวที่ติดตั้งอยู่ปลายสายส่งแต่ละด้าน จะมองเห็นฟอลต์ที่เกิดขึ้น จึงทำให้สายส่งทั้งสองวงจรถูกปลด

วงจรถูกตัดจากระบบ ส่งผลให้วงจรสายส่งที่ไม่ได้เกิดฟอลต์นั้น ถูกปลดวงจรไปด้วย ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งตามคุณสมบัติของระบบการป้องกันที่ดีนั้น ต้องมีความสามารถในการตรวจจับ และแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบให้เร็วที่สุด ขณะที่สายส่งในส่วนอื่นๆ ที่ไม่เกิดฟอลต์จะต้องสามารถจ่ายโหลดได้ตามปกติ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้รีเลย์แบบรู้ทิศทางที่มีความสามารถในการตรวจสอบทิศทางการเกิดฟอลต์ และเลือกทิศทางการส่งปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้ อีกทั้งยังสามารถกำหนดหน้าที่การทำงานของรีเลย์ว่าจะให้รีเลย์ทางด้านใดส่งปลดวงจรก่อน

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแก้ปัญหาได้โดยตรวจสอบลูกคลื่นฟอลต์ที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยใช้การพิจารณารูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งอย่างแม่นยำ ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีจุดประสงค์หลักอยู่ 5 ประการด้วยกัน คือ

1. ตรวจจับสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง
2. ระบุทิศทางการเกิดฟอลต์ และเลือกทิศทางการส่งปลดวงจรได้
3. จัดลำดับการป้องกัน โดยให้รีเลย์ที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ปลดวงจรก่อน
4. ระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง
5. ระบุสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นรูปแบบใด

การวิเคราะห์ทั้ง 5 ลักษณะนี้ มีประโยชน์อย่างมากต่อระบบการป้องกัน และยังแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ดีอีกด้วย ในส่วนของการซ่อมบำรุงรักษารูปแบบ และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ถ้าทราบรูปแบบและตำแหน่งของฟอลต์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ นอกจากจะทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ออกจากระบบได้อย่างรวดเร็วแล้ว ยังเป็นการอำนวยความสะดวกให้แก่หน่วยงานที่ทำหน้าที่บำรุงรักษาสายส่งให้ทำงานได้อย่างสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น ทำให้สามารถนำสายส่งกลับเข้ามาใช้งานได้อย่างรวดเร็ว เป็นการลดผลกระทบต่อระบบการผลิตและการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้า และระบบเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ ทำให้ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุด

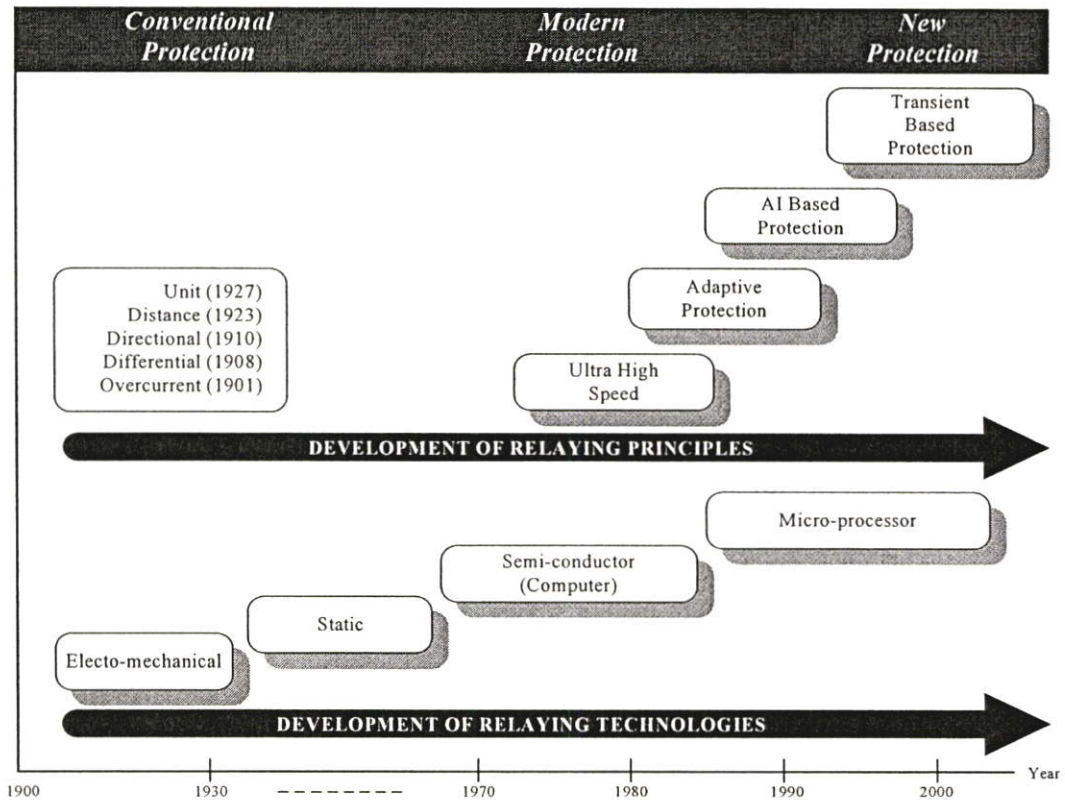
ในอดีต หลายๆวิธีได้ใช้เทคนิคพื้นฐานที่แตกต่างกันเกี่ยวกับทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (travelling wave theory) [1, 2] แต่วิธีคลื่นเดินทางต้องการอัตราสุ่มสูงและมีปัญหาในข้อแตกต่างระหว่างคลื่นสะท้อนส่งกลับจากฟอลต์และจากปลายสายส่งที่ห่างไกล จึงทำให้วิธีแก้ปัญหาข้างต้นกลายเป็นสิ่งที่ซับซ้อนเพราะว่าการจ่ายพลังงานจากที่ตั้งต่างๆ ของระบบไฟฟ้า เพื่อที่จะได้ทำการตรวจสอบและกำจัดฟอลต์ออกจากระบบสายส่งให้ได้เร็วที่สุด ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่แม่นยำจะช่วยให้การระบุทิศทาง และเลือกทิศทางการส่งปลดวงจรได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังทราบประเภทและตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้แม่นยำ โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

## 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในระบบป้องกันสายส่ง [3]

การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อพิจารณาใน โดเมนความถี่ สามารถนำไปสู่องค์ประกอบของสัญญาณทรานเซียนต์และสเปกตรัมความถี่ไฟฟ้ากำลังพื้นฐาน การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังแบบดั้งเดิมตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวัดองค์ประกอบความถี่ไฟฟ้ากำลังสำหรับการตรวจจับฟอลต์ต่อมาสัญญาณความถี่สูงถูกนำมาพิจารณาและอ้างอิงถึง อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงเหล่านี้บรรจุข้อมูลปริมาณมากเกี่ยวกับสัญญาณฟอลต์ และสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยการพัฒนาหลักการป้องกันแบบใหม่ขึ้น เนื่องจากการพัฒนาที่รวดเร็วของเทคโนโลยี ไมโคร โปรเซสเซอร์ สามารถนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการป้องกันแบบต่างๆบนพื้นฐานการตรวจจับการกำเนิดสัญญาณฟอลต์ทรานเซียนต์ หรือการป้องกันแบบทรานเซียนต์ (Transient based protection : TBP)

ปัจจุบันเทคโนโลยีของรีเลย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากระบบ “แม่เหล็กทางกล” (Electromechanical) มาสู่ระบบนิวมเมอร์ริคอล (Numerical) จนถึงระบบที่มีการนำดิจิทัลคอมพิวเตอร์และ ไมโคร โปรเซสเซอร์มาใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรีเลย์ให้มีการตอบสนองและความแม่นยำที่สูงขึ้นในลักษณะของรีเลย์ความเร็วสูง (High speed relay) ดังรูปที่ 1.1 จากรูปในช่วงศตวรรษแรกในปี ค.ศ. 1901 ได้มีการประยุกต์ใช้รีเลย์เหนี่ยวนำแบบแม่เหล็กทางกล สำหรับการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังด้วยพื้นฐานของหลักการกระแสเกิน (over current principle) หลักการของรีเลย์สมัยใหม่แบบต่างๆ กำเนิดขึ้นภายในช่วงระยะเวลา 3 ทศวรรษ ตัวอย่างเช่น การป้องกันแบบผลต่าง (differential relay) ในปี ค.ศ. 1908, รีเลย์แบบระยะทาง (distance relay) ในปี ค.ศ. 1923 และชุดของการป้องกัน (unit protection) ในปี ค.ศ.1927 โดยหลักการของรีเลย์ป้องกันชนิดต่างๆ เหล่านี้สามารถทำงานด้วยพื้นฐานของการวัดความถี่ไฟฟ้ากำลังสำหรับตรวจจับฟอลต์

ในช่วงปี 1960 การพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่และความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้มีการพัฒนาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด (transducer) สัญญาณต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และยังส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์หรือส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบของรีเลย์แบบสถิตย์ (static relay) หลังจากนั้นในช่วงปี 1970 ความก้าวหน้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้นำมาสู่การพัฒนาวงจรรวมหรือไอซี (Integrated circuit) ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ทางด้านไมโคร โปรเซสเซอร์ (Microprocessor) สามารถนำมาใช้ปรับปรุงการวิเคราะห์สัญญาณและการตัดสินใจของรีเลย์ ให้ทำงานได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้รีเลย์มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น จึงนับเป็นการเริ่มเข้าสู่ยุคของรีเลย์แบบดิจิทัลหรือลักษณะของรีเลย์แบบนิวมเมอร์ริคอล ที่มีการทำงานในลักษณะรีเลย์ป้องกันความเร็วสูง (Ultra high speed relay) อย่างแท้จริง

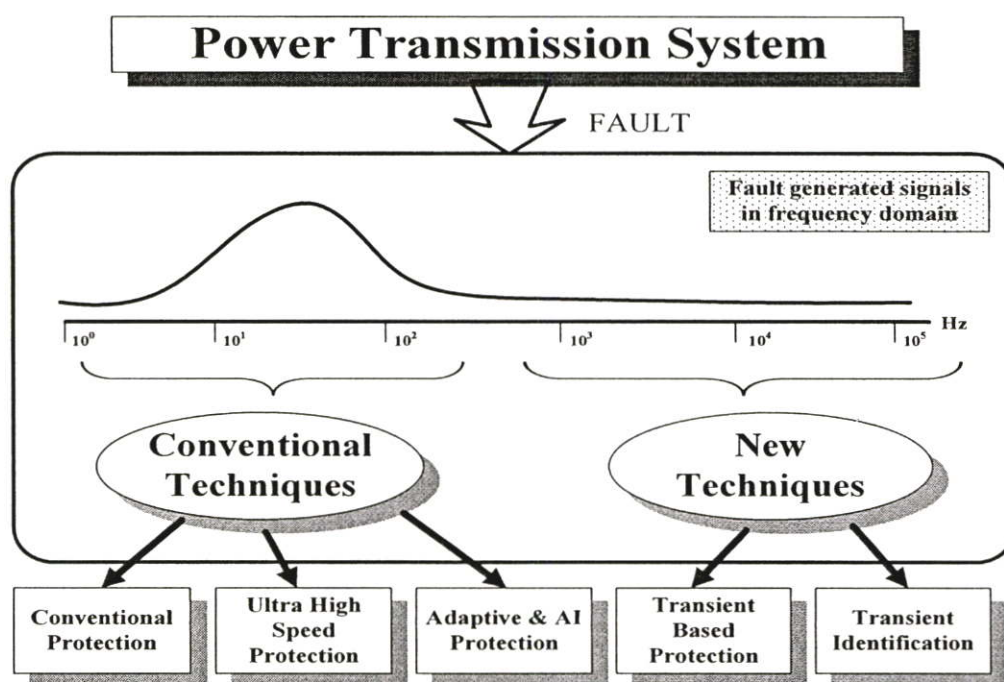


รูปที่ 1.1 แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง [3]

ในช่วงต้นของทศวรรษที่ 90 ในต่างประเทศมีการตื่นตัวในการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับแนวความคิดในการนำเทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent : AI) ในรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งทางด้านทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และตัดสินใจของรีเลย์ ซึ่งเครื่องมือที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ช่วยวิเคราะห์นั้นจะมีความฉลาดมากขึ้นและมีระบบความคิดที่มีการทำงานในลักษณะคล้ายกับมนุษย์ แต่โครงข่ายประสาทเทียมยังมีข้อจำกัดที่ยังคงอาศัยหลักการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานอยู่ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 1 ไซเคิลเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ ในบางครั้งการใช้สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอกับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ รวมทั้งการกำจัดสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนั้นจะเป็นการทิ้งข้อมูลที่สำคัญของสัญญาณฟอลต์ออกไปอีกด้วย

การป้องกันแบบทรานเซียนต์สามารถให้คำนิยามอย่างง่าย ๆ ว่า “การป้องกันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิคพื้นฐานการตรวจจับการกำเนิดฟอลต์แบบทรานเซียนต์ความถี่สูง” ซึ่งการกำเนิดสัญญาณฟอลต์แบบทรานเซียนต์บรรจุข้อมูลไว้อย่างมากมาย เช่น ประเภทและทิศทางฟอลต์, ตำแหน่งและเวลาที่ได้รับ (sustain time) เป็นต้น ความรู้และข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับมาถูกจัดให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ทั้งหมด ประกอบไปด้วยไฟฟ้ากระแสตรง, ความถี่กำลังและความถี่สูง

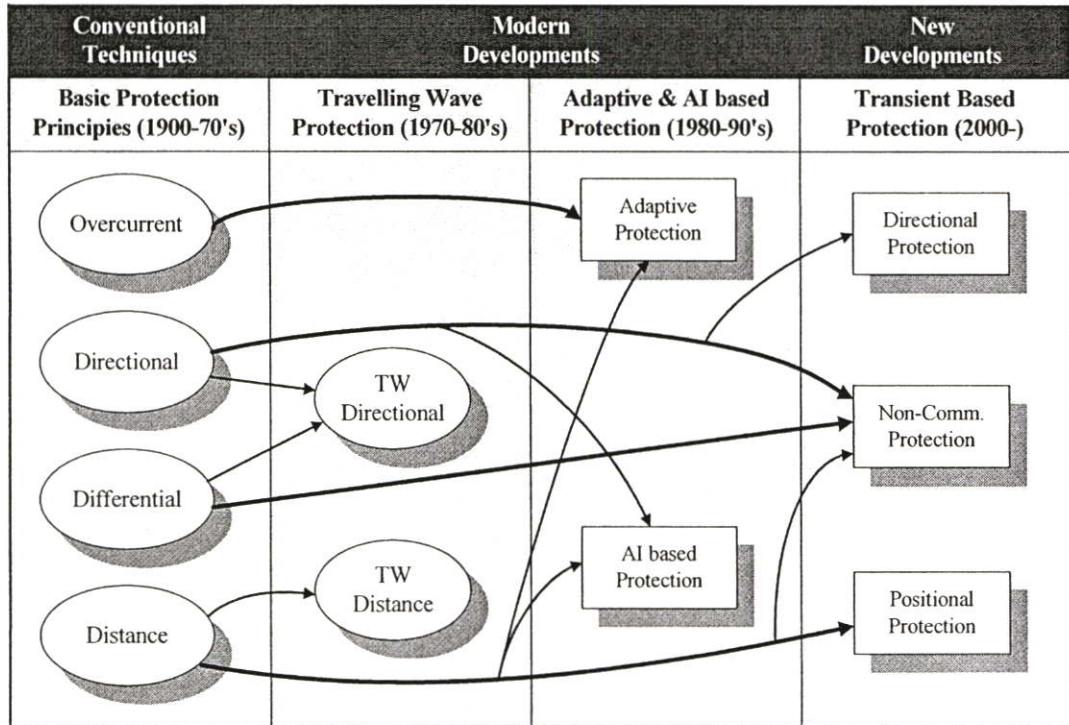
สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นเทคนิคการป้องกันแบบดั้งเดิมที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของความถี่ไฟฟ้ากำลัง ต่อมาสัญญาณความถี่สูงถูกนำมาพิจารณา โดยผลลัพธ์ที่ได้จากผลงานการวิจัยอย่างกว้างขวางจึงได้มีการออกแบบตัวกรองสัญญาณ เพื่อที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนออกไป ซึ่งในปัจจุบันนี้เทคนิคการป้องกันดังกล่าวตั้งอยู่บนพื้นฐานการตรวจจับการกำเนิดสัญญาณพอลต์แบบทรานเซียนต์ เช่น การป้องกันแบบคลื่นเดินทาง (traveling wave protection) ซึ่งถูกจำกัดด้วยช่วงกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ของทรานควิวเซอร์ ทำให้ไม่มีความสามารถในการแยกแยะ และดึงข้อมูลความถี่สูงได้ตามที่ต้องการจากสัญญาณความถี่กำลังที่สำคัญ จากผลที่ได้จึงทำให้เทคนิคการป้องกันต่างๆ เหล่านี้มีความสามารถไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงได้นำเสนอหลักการของรีเลย์สมัยใหม่ เพื่อต้องการเพิ่มความเร็วในการตอบสนองสำหรับการกำจัดพอลต์ออกไปอย่างรวดเร็วที่สุด



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบพัฒนาการของเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ [3]

เทคนิคการป้องกันแบบทรานเซียนต์นี้ใช้การตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งจากการวัดการกำเนิดสัญญาณของกระแสและแรงดันไฟฟ้าพอลต์แบบทรานเซียนต์ความถี่สูง สัญญาณกระแสพอลต์ความถี่สูงถูกดึงโดยตรงมาจากเอาต์พุทของหม้อแปลงกระแส อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการจำกัดความถี่ของ CVT หรือ VT สัญญาณแรงดันที่วัดได้ด้วยการออกแบบลักษณะพิเศษของตัวทรานควิวเซอร์แรงดันความถี่สูง การดำเนินการของสัญญาณอัลกอริทึมความเร็วสูง (fast signal processing algorithms) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวัดสัญญาณเพื่อระบุพอลต์ (fault identification) เมื่อเกิดสัญญาณความถี่สูงขึ้นจากพอลต์แบบทรานเซียนต์ สัญญาณนี้ประกอบ

ไปด้วยข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับฟอลต์มากกว่าการใช้วิธีการตรวจจับจากสัญญาณความถี่ไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อก่อให้เกิดหลักการและเทคนิคของการป้องกันสมัยใหม่ขึ้นได้ การใช้สัญญาณความถี่กำลังนั้นไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานการพัฒนาของเทคโนโลยีไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้วยเทคนิคพื้นฐานการป้องกันแบบทรานเซียนต์ จากรูปที่ 1.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมวิวัฒนาการของการป้องกันแบบทรานเซียนต์ (transient based protection : TBP)



รูปที่ 1.3 วิวัฒนาการในการป้องกันระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 1.3 ในช่วงปลายของทศวรรษที่ 90 ได้มีแนวความคิดใหม่เกิดขึ้นมาโดยเปลี่ยนแนวโน้มของการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานมาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง เนื่องจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสัญญาณฟอลต์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น จึงทำให้แนวความคิดนี้ได้รับความสนใจและมีการนำมาทำการศึกษาและวิจัยมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังจึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50Hz) มาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในลักษณะการป้องกันแบบทรานเซียนต์ (Transient based protection) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง ซึ่งจะส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาที่ลดลงตามไปด้วย

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาการแปลงเวฟเล็ตได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากทางด้าน การประมวลผลสัญญาณ และได้มีการเสนอให้เวฟเล็ตเป็นเครื่องมือการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ (transients) ในระบบไฟฟ้ากำลัง [4] ด้วยประการนี้เองข้อเสนอที่น่าสนใจหลายๆ ข้อของการวิเคราะห์เวฟเล็ตในระบบไฟฟ้ากำลังคือ การประเมินคุณภาพกำลังไฟฟ้า (power quality assessment) [5], สถานที่เกิดฟอลต์ (fault location) [6] เป็นต้น การแปลงเวฟเล็ตจึงเริ่มมีคตินิยมสนใจมากขึ้นในการระบุประเภทและตำแหน่งของฟอลต์ในสายส่ง รวมไปถึงการระบุทิศทางและจัดลำดับการป้องกัน นับได้ว่าเป็นการขยายขอบเขตงานวิจัยและเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังให้ดีขึ้นด้วย

ในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าการแปลงเวฟเล็ตจะมีประสิทธิภาพอย่างมากในการตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ แต่การแปลงเวฟเล็ตอาจจะไม่มีคุณลักษณะอย่างสมบูรณ์เพียงพอ จึงได้มีแนวคิดที่จะนำหลักการของฟuzzy logic เข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นกว่าการประยุกต์ใช้เวฟเล็ตเพียงอย่างเดียว ในขณะที่เดียวกันยังแก้ไขข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้งานร่วมกับการแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ โดยนำการแปลงเวฟเล็ตมาช่วยในการวิเคราะห์แทนการแปลงฟูเรียร์

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษารูปแบบของกระบวนการการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในสัญญาณฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่ง จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์เวฟเล็ตเป็นวิธีแก้ปัญหาได้ดีมากในกระบวนการประมวลผลสัญญาณ เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีความสามารถหลายด้านที่วิเคราะห์ดำเนินการเฉพาะในเวลาและความถี่ นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบกว่าการวิเคราะห์ฟูเรียร์ กล่าวคือ สัญญาณทรานเซียนต์เป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non-stationary signal) ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านเวลาที่ขาดหายไป ด้วยข้อจำกัดในหลายด้านจึงทำให้การแปลงฟูเรียร์อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายความว่า การแปลงเวฟเล็ตจะถูกนำมาแทนที่การแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณช่วงสภาวะคงที่ (Steady state signals) ด้วย แต่การแปลงเวฟเล็ตเป็นเครื่องมืออีกทางเลือกหนึ่งสำหรับวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ หรือสัญญาณช่วงสภาวะไม่คงที่ (Non-steady state signals)

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ระบบป้องกันสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ที่มีใช้ในปัจจุบันคือ รีเลย์ระยะทางหรืออิมพีแดนซ์รีเลย์ซึ่งยังคงใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานอยู่ จากข้อมูลทางสถิติพบว่า รีเลย์แบบนี้จะมีข้อผิดพลาดที่สูง โดยเฉพาะการบอกระยะทางที่คลาดเคลื่อนจากระยะทางจริงมาก นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอื่นๆ อีกด้วย เช่น ไม่มีความสามารถใน

การตรวจสอบทิศทางเกิดการเกิดฟอลต์ และเลือกทิศทางการส่งปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยมาช่วยระบุทิศทางเกิดการเกิดฟอลต์ และเลือกทิศทางการส่งปลดวงจร และนำผลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดไปเป็นข้อมูลอินพุทให้กับแบบจำลองฟิชซีโลจิก เพื่อพัฒนาแผนงานการป้องกันแบบใหม่ สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบโครงข่ายระบบ 500 kV และนำผลที่ได้มาใช้ใน 5 ลักษณะด้วยกันคือ

1. การตรวจจับสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งแบบโครงข่าย
2. การระบุทิศทางเกิดการเกิดฟอลต์
3. การจัดลำดับการป้องกัน
4. ระบุตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าอยู่ที่ตำแหน่งใดบนสายส่ง
5. ระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นฟอลต์ที่เฟสใด

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

รูปแบบเดิมในการวิเคราะห์สัญญาณของรีเลย์แบบระยะทาง (distance relay) คือการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานของกระแสและแรงดันลำดับบวก (Positive sequence) ด้วยการแปลงฟูเรียร์ เพื่อนำมาใช้หาอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ดังนั้นเมื่อเกิดฟอลต์จะทำให้กระแสสูงขึ้นในขณะที่แรงดันลดต่ำลง ผลที่ตามมาคือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลงจากสภาวะปกติ จากหลักการนี้จะนำมาใช้ในการตรวจจับการเกิดฟอลต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำการลดลงของอิมพีแดนซ์มาเทียบเพื่อหาตำแหน่งฟอลต์ ส่วนการระบุประเภทของฟอลต์นั้นจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟส หลักการทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนั้นตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าความต้านทานของฟอลต์เป็นศูนย์ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก ทำให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยเฉพาะการบอกระยะทางที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงค่อนข้างมาก เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงมีการนำ Line Fault Locator (LFL) แบบ radar type (Type C) มาทำงานร่วมกับรีเลย์ระยะทาง [7] แต่ก็ยังมีข้อเสียด้านราคาที่ยังแพง มีอุปกรณ์มากติดตั้งยากและมีข้อจำกัดอื่นๆ อีกมากทำให้มีใช้อยู่เพียงไม่กี่แห่งเท่านั้น นอกจากนี้รีเลย์แบบระยะทางยังขาดความสามารถในการตรวจสอบทิศทางของสัญญาณฟอลต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับระบบการป้องกันไฟฟ้ากำลังสมัยใหม่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมุติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์คือ เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของฟอลต์ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงจะมีค่าสูงขึ้นและยังสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่แพร่มาจากจุดที่เกิดฟอลต์ตามทฤษฎีคลื่นเดินทาง โดยทำการแยกองค์ประกอบ

ความถี่สูง (detail) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในหลายสเกลหรือหลายช่วงความถี่ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะนำมาใช้ในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อระบุทิศทางของสัญญาณฟอลต์ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ ถูกนำมาคำนวณเพื่อจัดลำดับการป้องกัน และนำเอาผลที่ได้จากสเกลแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูง นำไปเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับแบบจำลองฟuzzy Logic โดยมีคำตอบที่ต้องการคือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพ จึงได้นำวิธีการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตเพียงอย่างเดียวและการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นมาเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้นำเสนอสำหรับการระบุตำแหน่งและแยกประเภทฟอลต์ โดยใช้จำนวนข้อมูลทดสอบชุดเดียวกันทั้งหมด ซึ่งคำตอบที่ได้จากแบบจำลองฟuzzy Logic และโครงข่ายประสาทเทียมมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก สอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาของรีเลย์ในอนาคต

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์บนสายส่งด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อศึกษารูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่แตกต่างกัน โดยอาศัยแบบสายส่งวงจรคู่ 500 kV แบบโครงข่ายซึ่งเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าวังน้อย (WN), สถานีไฟฟ้าจอมบึง (CBG) และสถานีไฟฟ้าทหรน้อย (SNO) เป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา
2. ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในสเกลที่ 1-5 ซึ่งจะใช้ Wavelet Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อหาสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้
3. นำผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในขั้นตอนที่ 2 มาวิเคราะห์โดยใช้อัลกอริทึมคำนวณข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ เพื่อระบุทิศทางของสัญญาณฟอลต์ และจัดลำดับการป้องกันของรีเลย์
4. ทำการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมด้วยข้อมูลในสเกลแรกที่ได้จากขั้นตอนในข้อที่ 2 โดยอาศัยโปรแกรม Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการฝึกสอนและวิเคราะห์เพื่อหาค่าตำแหน่งและประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง
5. ทำการสร้างแบบจำลองฟuzzy Logic และทดสอบแบบจำลองที่ได้ด้วยข้อมูลในสเกลแรกที่ได้จากขั้นตอนในข้อที่ 2 โดยอาศัยโปรแกรม Fuzzy Logic Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตำแหน่งและประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

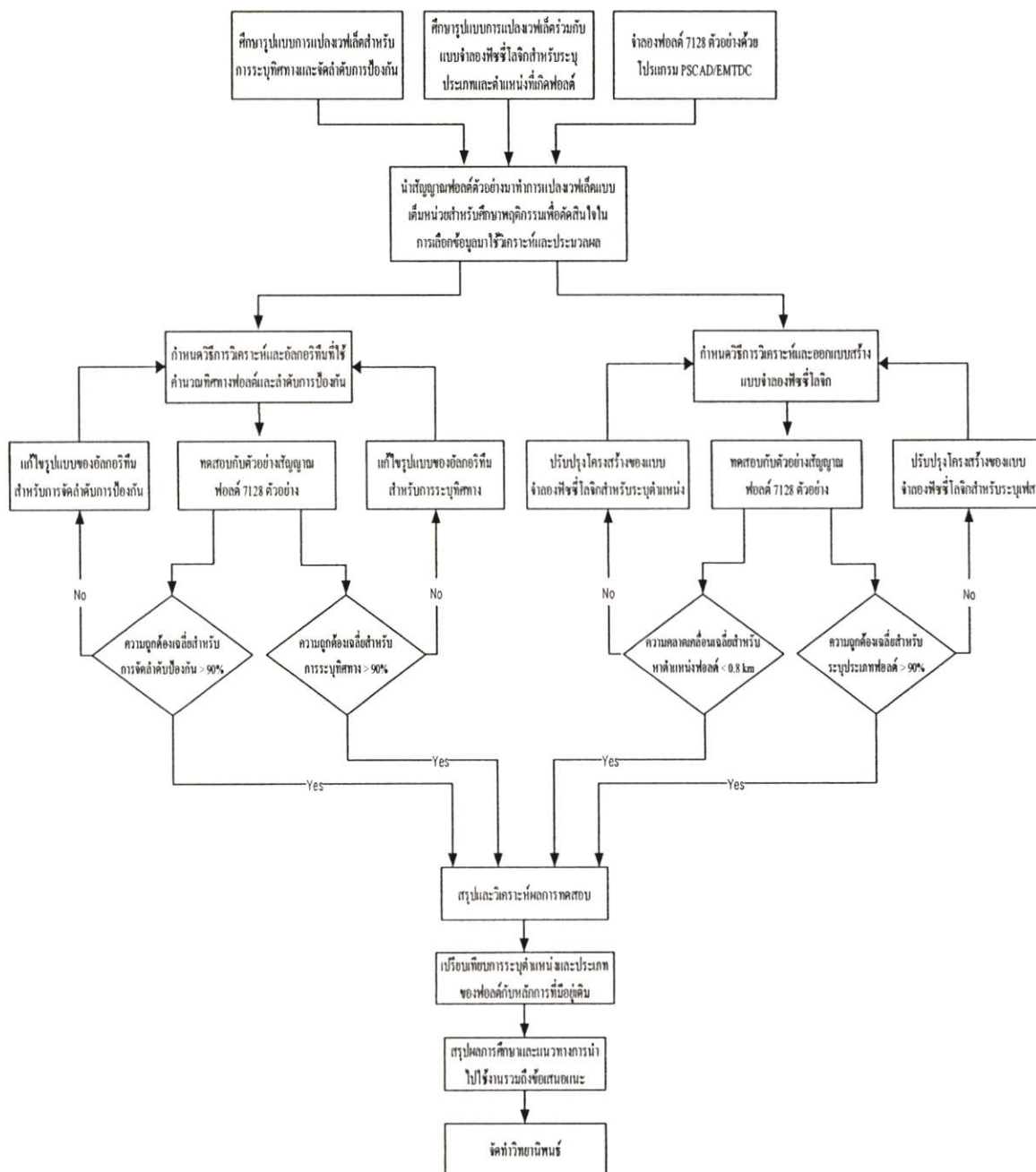
## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ทำการศึกษารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ ขณะเดียวกันศึกษาคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่และโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละชนิดโดยอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา
2. ทำการศึกษารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับพีชชีโลจิกสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ ขณะเดียวกันศึกษาคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่และขั้นตอนการออกแบบระบบจำลองของพีชชีโดยอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา
3. จำลองสัญญาณพอลต์ที่แตกต่างกัน 7128 ตัวอย่างด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC แล้วนำสัญญาณพอลต์มาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการพิจารณาหาข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับพอลต์ได้ รวมถึงช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ เพื่อนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์และตัดสินใจ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป
4. จากขั้นตอนที่ 3 นำผลที่ได้มาทดสอบกับอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้สำหรับการระบุทิศทาง และจัดลำดับการป้องกัน แล้วจึงนำผลที่ได้มาสรุป และประมวลผลความถูกต้องของขั้นตอนที่นำเสนอ
5. เมื่อได้สเกลและขั้นตอนที่เหมาะสมแล้ว จึงนำมาสร้างแบบจำลองและทดสอบกับแบบจำลองพีชชีโลจิกด้วยสัญญาณพอลต์ที่ได้จากระบบที่ได้จำลองไว้ นำผลที่ได้มาสรุปและประมวลผลความถูกต้องของขั้นตอนที่นำเสนอ
6. นำวิธีที่นำเสนอมาเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม สำหรับการระบุประเภทและตำแหน่งของพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและเสนอแนวทางการพัฒนาการศึกษาต่อไป ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 1.4

## 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษารูปแบบของพอลต์ที่มีสมมุติฐานว่าเป็นสัญญาณพอลต์ที่เกิดระหว่างสายส่ง 3 บัสใดๆ ที่มีการเชื่อมโยงกันในลักษณะเป็นแบบโครงข่าย ที่เกิดพอลต์ขึ้นจริง โดยไม่พิจารณาถึงรูปแบบของสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกันเช่น สัญญาณฟ้าผ่า, สัญญาณพอลต์ที่เกิดจากสายส่งเส้นอื่น และสัญญาณสวิตซ์ต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 1.4 แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำการแปลงเฟสและฟิสิกส์ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์หรือสัญญาณในรูปแบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้
2. สามารถนำรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเฟสและฟิสิกส์ที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ เช่น รีเลย์ป้องกันแบบดิจิทัล หรือ เครื่องบันทึกฟอลต์แบบดิจิทัล เป็นต้น

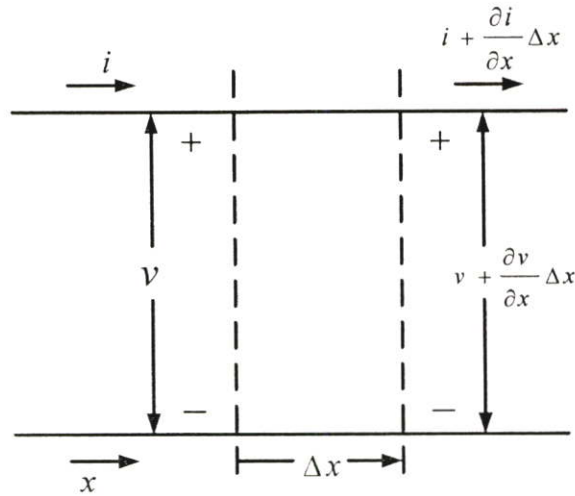
## บทที่ 2

# การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์และระบบป้องกันบนสายส่ง

การมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยระบบการป้องกันและอุปกรณ์ที่มาสับสนุนเป็นจำนวนมาก ระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลากหลายประเภทซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาอย่างเหมาะสมสำหรับการป้องกันสายส่งที่มีความซับซ้อน ยิ่งถ้าระบบสายส่งนั้นมีการเชื่อมโยงกันในลักษณะเป็นแบบโครงข่าย (Network) หรือแบบลูป (Loop line) อุปกรณ์ภายในระบบการป้องกันก็จะมีมากขึ้นไปอีก ยิ่งขึ้นตามไปด้วย แต่ส่วนใหญ่แล้วรีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) ยังคงอาศัยหลักการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานจากกระแสและแรงดันไฟฟ้า โดยที่รูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แต่ละลักษณะนั้น มีหลักการและวิธีการที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน สำหรับเนื้อหาภายในบทนี้จึงเป็นการกล่าวถึงรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แบบดั้งเดิมเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับความเข้าใจ พร้อมทั้งได้อธิบายหลักการทำงานของรีเลย์ป้องกันสายส่งประเภทต่างๆ ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ รวมไปถึงอธิบายหลักการทำงานของเครื่องหาข้อขัดข้องในสายส่งไฟฟ้า (Line Fault Locator : LFL) [7] ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นอุปกรณ์สนับสนุนที่ใช้ควบคู่กับระบบป้องกันที่สำคัญมาอย่างหนึ่ง เพื่อเป็นทฤษฎีอีกแนวทางหนึ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย แต่อย่างไรก็ดี ก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการทำงานเหล่านั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายคลื่นเดินทาง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory)[8]

การศึกษาเสิร์จ (Surge) บนสายส่งนั้นมีความซับซ้อนมาก ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะกรณีของสายส่งที่ไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากเป็นแบบการศึกษาที่ดี โดยเฉพาะเมื่อความสูญเสียจากค่า  $\omega L$  และ  $\omega C$  มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า  $R$  และ  $G$  สำหรับเสิร์จฟ้าผ่า (Lighting surge) บนสายส่งนั้นเป็นการศึกษาสายส่งแบบความสูญเสียต่ำซึ่งเป็นแบบที่ง่ายต่อการศึกษาในขั้นพื้นฐาน และสามารถทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องศึกษาทฤษฎีที่มีความซับซ้อนได้ แต่ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสำหรับสายส่งแบบยาวด้วยการกระจายแบบคงที่ ซึ่งทำการวิเคราะห์ทาง  $x$  ตามความยาวของสายส่งจากปลายด้านส่ง (sending ends) ไปยังส่วนย่อยของความยาวที่แตกต่างกัน  $\Delta x$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง ๓ เฟสใดๆ ( $v$  และ  $i$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$  และ  $t$ )

จากรูปที่ 2.1 แรงดัน  $v$  และกระแส  $i$  เป็นฟังก์ชันของทั้ง  $x$  และ  $t$  ดังนั้นต้องใช้การหาอนุพันธ์บางส่วน (partial derivative) โดยแรงดันอนุกรมที่ตกคร่อมส่วนย่อยของความยาวคือ

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

และสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = -\left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}\right) \Delta x \quad (2.1)$$

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

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = -\left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t}\right) \Delta x \quad (2.2)$$

เมื่อหารสมการที่ 2.1 และ 2.2 ด้วย  $\Delta x$  โดยสมมติว่าเป็นสายส่งที่มีความสูญเสียต่ำจึงกำหนดให้ค่า  $R$  และ  $G$  จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการที่ 2.1 และ 2.2 จึงมีค่าเป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.3)$$

และ

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.4)$$

ในตอนนี้สามารถกำจัดเทอมของ  $i$  ด้วยการหาอนุพันธ์บางส่วนทั้ง 2 เทอมในสมการที่ 2.3 ด้วยตัวแปร  $x$  และสมการที่ 2.4 ด้วยตัวแปร  $t$  ดังนี้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad (2.5)$$

และ

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

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

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

ซึ่งสมการที่ 2.7 นั้นเรียกว่า “ สมการคลื่นเดินทางของสายส่งแบบความสูญเสียต่ำ ” ผลลัพธ์ของสมการจะเป็นฟังก์ชันของ  $x - vt$  และนิพจน์ของแรงดันคงที่เทอมต่อไปนี้

$$v = f(x - vt) \quad (2.8)$$

ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ได้มีการอธิบายความหมายแต่ต้องมีค่าเดียว โดยที่ค่าคงที่  $v$  ต้องมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ถ้า  $x$  มีหน่วยเป็นเมตรและเวลา  $t$  มีหน่วยเป็นวินาที สามารถพิสูจน์คำตอบของสมการนี้ได้โดยแทนที่อนุพันธ์บางส่วนลำดับสองของ  $v$  ลงในสมการที่ 2.7 ในการหาค่า  $v$  ในขั้นแรกนั้นต้องทำการเปลี่ยนตัวแปรซึ่งจะได้

$$u = x - vt \quad (2.9)$$

และเขียนได้เป็น

$$v(x, t) = f(u) \quad (2.10)$$

แล้ว

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial f(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \\ &= -v \frac{\partial f(u)}{\partial u}\end{aligned}\quad (2.11)$$

และ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.12)$$

ในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.13)$$

แทนค่าอนุพันธ์บางส่วนอันดับ 2 ของ  $v$  ในสมการที่ 2.7 ซึ่งจะได้

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad (2.14)$$

และเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมการที่ 2.8 เป็นคำตอบของสมการที่ 2.7 ถ้า

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

เทอมของแรงดันในสมการที่ 2.8 คือคลื่นเดินทางในทิศทาง  $x$  บวก จากรูปที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันของ  $x - vt$  ซึ่งคล้ายกับรูปร่างของคลื่นแรงดันลงที่เดินทางตามความยาวสายส่งซึ่งเกิดจากฟ้าผ่า โดยฟังก์ชันนี้แสดงค่า 2 ค่าของเวลาคือ  $t_1$  และ  $t_2$  ซึ่ง  $t_2 > t_1$  เมื่อผู้สังเกตเดินไปกับคลื่นและอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมบนคลื่นนั้น ซึ่งพบว่ารูปร่างของคลื่นแรงดันที่เดินทางนี้ยังคงรูปร่างเหมือนเดิมตามสมการที่ 2.16

$$x - vt = a \text{ constant} \quad (2.16)$$

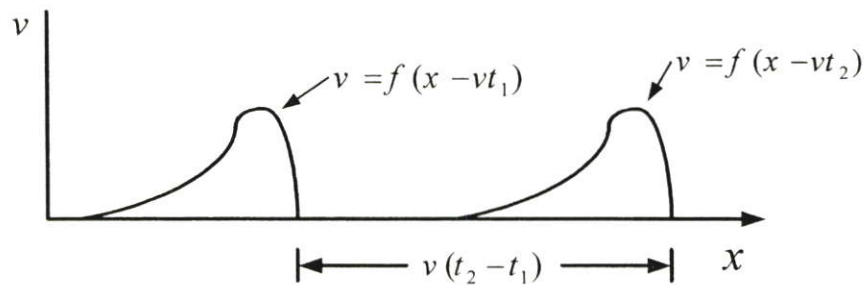
ดังนั้นจากสมการที่ 2.17 คือ

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/s} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $L$  และ  $C$  มีหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร (H/m) และฟารัดต่อเมตร (F/m) ตามลำดับ ดังนั้น คลื่นของแรงดันที่เดินทางในทิศทางบวก  $x$  ด้วยความเร็ว  $v$

ฟังก์ชันของ  $x + vt$  สามารถแสดงเป็นคำตอบของสมการที่ 2.8 และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ สามารถแปลงคลื่นเดินทางในทิศทางลบ  $x$  โดยทั่วไปมีคำตอบของสมการดังนี้

$$v = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $x - vt$  ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  [8]

ซึ่งสมการคำตอบนี้เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งส่วนที่เดินทางไปด้านหน้า และส่วนที่เดินทางไปด้านหลังบนสายส่ง โดยกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตเฉพาะสำหรับส่วนประกอบแต่ละส่วนไว้ ถ้าเราแสดงคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Forward traveling wave) ซึ่งเรียกว่า คลื่นอินซิเดนซ์ (incident) ดังสมการที่ 2.19

$$v^+ = f_1(x - vt) \quad (2.19)$$

คลื่นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุและสามารถนิยามได้เป็น

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{L/C}} f_1(x - vt) \quad (2.20)$$

สามารถพิสูจน์ได้โดยแทนที่ค่าของกระแสและแรงดันในสมการที่ 2.3 โดยให้  $v$  เท่ากับ  $1/\sqrt{LC}$  ในลักษณะเดียวกันคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหลัง (Backward traveling wave) ของแรงดันจะมีสมการดังนี้

$$v^- = f_2(x + vt) \tag{2.21}$$

และลักษณะของกระแส คือ

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{L/C}} f_2(x + vt) \tag{2.22}$$

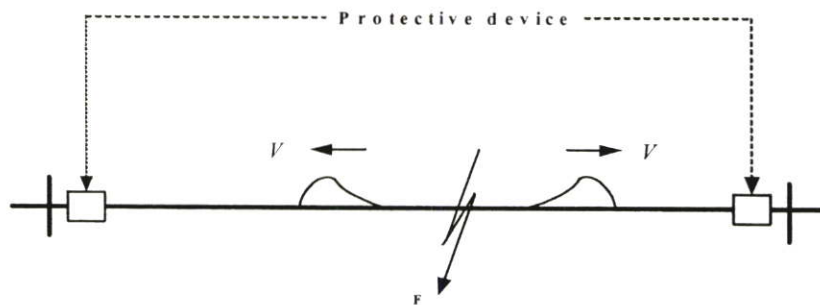
จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้ว่า

$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.23}$$

และจากสมการที่ 2.21 และ 2.22 จะได้ว่า

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.24}$$

ถ้าสมมติให้กระแสวิกขาของ  $i^-$  อยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเดินทางถอยหลัง (back-ward) แล้วเครื่องหมายลบจะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายบวกในสมการที่ 2.22 และ 2.24 เพื่อเลือกที่จะรักษาทิศทางตำแหน่ง  $x$  ให้เป็นกระแสวิกขาทั้งคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Forward moving wave) และคลื่นที่เคลื่อนที่ถอยหลัง (Backward moving wave)



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสถานะที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง

อัตราส่วนของ  $v^+$  และ  $i^+$  เราเรียกว่า อิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่ง (Characteristic Impedance :  $Z_c$ ) เมื่อ  $R$  และ  $G$  มีค่าเป็นศูนย์ จากหลักการของคลื่นเดินทางนี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะของสัญญาณฟอลต์ได้ดังนี้ คือ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น ณ จุดใดๆ บนสายส่งจะมี

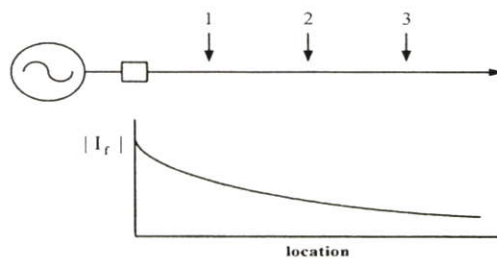
สัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่งด้วยความเร็วซึ่งถูกกำหนดด้วยสมการที่ 2.17 ซึ่งสามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์กับหลักการของอุปกรณ์ป้องกันสายส่งโดยเฉพาะส่วนที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณ

## 2.2 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง

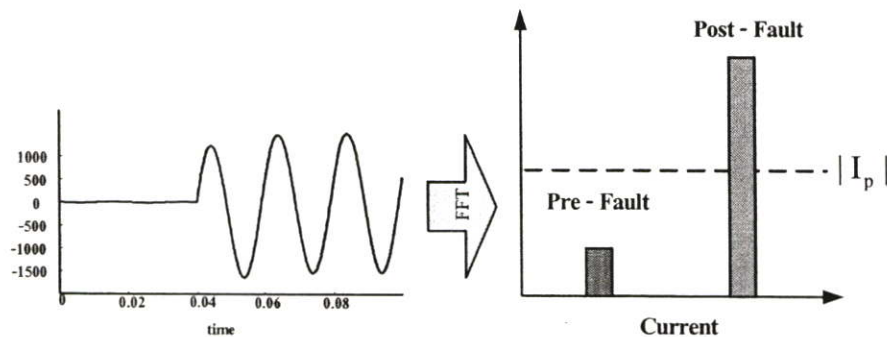
สายส่งเป็นอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ได้มากที่สุดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งมีระยะทางที่ยาวผ่านพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดฟอลต์ได้ เช่น ภูเขา, ป่าเขา รวมไปถึงชุมชนและแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการป้องกันที่ดี และระบบสายส่งส่วนใหญ่เป็นสายส่งที่มีลักษณะเป็นลูป (Loop Line) คือสายส่งที่สามารถรับไฟได้ทั้งสองด้าน ทำให้ฟอลต์มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การป้องกันแบบกระแสเกิน (Over Current Protection) [8]

เป็นระบบการป้องกันพื้นฐานโดยอาศัยหลักการทำงานคือการตรวจวัดกระแสฟอลต์ที่ 50 หรือ 60 เฮิร์ต ที่ปรากฏบนสายส่งในสถานะที่มีฟอลต์เกิดขึ้น ซึ่งกระแสฟอลต์นี้จะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทของฟอลต์ จำนวนเครื่องกำเนิดที่มีอยู่ในระบบ และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์เมื่อวัดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามรูปที่ 2.4



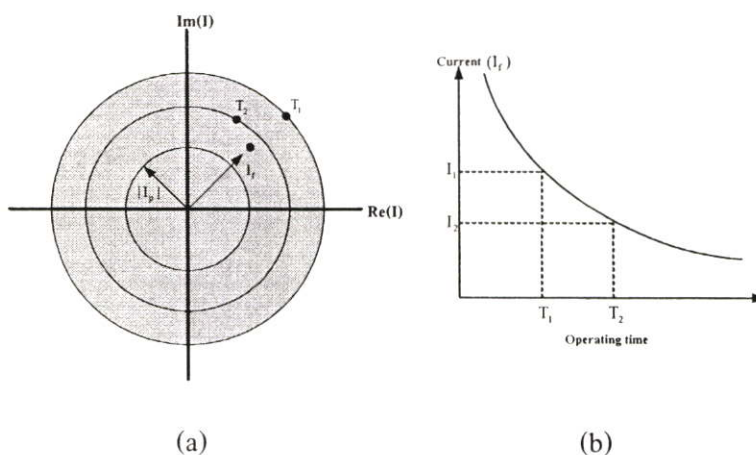
รูปที่ 2.4 แสดงขนาดของกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบกระแสฟอลต์ด้วยการแปลงฟูเรียร์

ซึ่งในระบบการป้องกันแบบกระแสเกินจะอาศัยการเปรียบเทียบขนาดของกระแสที่วัดได้ ( $I_f$ ) จากหม้อแปลงกระแส (CT) กับค่ากระแสที่กำหนดเป็นเกณฑ์ ( $I_p$ ) ซึ่งรีเลย์ที่ทำหน้าที่ในการวิเคราะห์ในรูปแบบนี้คือ รีเลย์กระแสเกิน (Over current relay) โดยมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้คือ ถ้ากระแสที่วัดได้มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ให้รีเลย์จะส่งปลดวงจร แต่ถ้ากระแสที่วัดได้มีค่าน้อยกว่ารีเลย์จะไม่ทำงานดังแสดงในสมการที่ 2.25 และรูปที่ 2.6 (a)

$$\begin{aligned} |I_f| &> |I_p| && \text{trip} \\ |I_f| &< |I_p| && \text{block} \end{aligned} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.6 แสดงระนาบเชิงซ้อนของกระแสฟอลต์และกราฟเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

เนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันของกระแสฟอลต์ จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดความเร็วในการทำงานของรีเลย์กระแสเกินซึ่งจะแปรผกผันกับขนาดของกระแสคือ กระแสฟอลต์มากแสดงว่าฟอลต์มีความรุนแรงมากและอยู่ใกล้จุดที่ติดตั้งรีเลย์มากกว่าจึงต้องมีการทำงานที่รวดเร็วกว่า ในขณะที่กระแสฟอลต์ที่ต่ำลงมาแสดงว่าฟอลต์มีความรุนแรงต่ำกว่าและอยู่ไกลออกไปจะมีการทำงานที่ช้ากว่า ซึ่งเวลาในการทำงานนี้ผู้ใช้จะต้องกำหนด (setting) ให้รีเลย์ ตามรูปที่ 2.6 (b) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนารีเลย์กระแสเกินให้สามารถพิจารณาถึงทิศทางของฟอลต์ได้อีกด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น ในทางปฏิบัติรีเลย์กระแสเกินชนิดนี้นิยมใช้กับการป้องกันสายส่งวงจรย่อย (Sub-transmission line) และสายป้อน (Feeder) เป็นหลัก

### 2.2.2 การป้องกันแบบรู้ทิศทาง (Directional Protection)

การป้องกันแบบรู้ทิศทาง มีลักษณะในการใช้งานคล้ายๆ กับระบบการป้องกันทั่วไป คือมีหน้าที่ตัดวงจรเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ แต่สิ่งที่ทำให้ระบบการป้องกันชนิดนี้แตกต่างจากระบบการป้องกันชนิดอื่นๆ คือ นอกจากการป้องกันดังกล่าวจะสามารถรับรู้ค่ากระแสฟอลต์แล้ว ยังสามารถรับรู้ทิศทางของกระแสได้อีกด้วย และในการที่รีเลย์จะสามารถรับรู้

ถึงทิศทางของกระแส นั้น ต้องอาศัยการเปรียบเทียบเฟสระหว่างปริมาณสองปริมาณ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [9]

- 1) Reference or Polarizing Quantity คือค่าแรงดัน (voltage polarizing) หรือกระแสของระบบ (current polarizing) ที่ใช้เป็นปริมาณอ้างอิง
- 2) Operating Quantity คือค่ากระแส (current operating) ของระบบที่นำมาเปรียบเทียบกับ Polarizing Quantity

ดังนั้นรีเลย์แบบรู้ทิศทางจึงสามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. Current operating และ Current polarizing : เป็นลักษณะการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง ซึ่งจะใช้กระแสเป็นทั้ง Polarizing quantity และ Operating quantity การทำงานของรีเลย์แบบนี้สามารถอธิบายตามสมการแรงบิดของรีเลย์แบบเหนี่ยวนำทางกลดังนี้

$$T = K\varphi_o\varphi_p \sin \alpha \quad (2.26)$$

เมื่อ  $T =$  แรงบิด

$\varphi_o =$  Operating flux

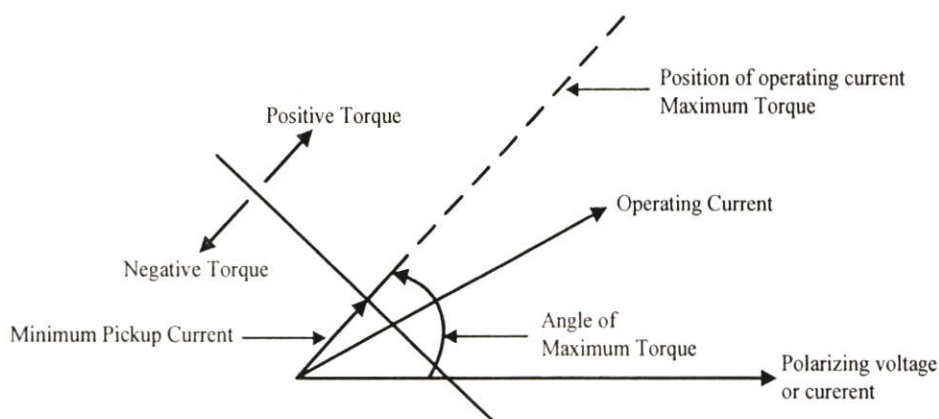
$\varphi_p =$  Polarizing flux

$\alpha =$  มุมระหว่าง flux (มุมระหว่าง Operating และ Polarizing quantity)

2. Current operating และ Voltage polarizing : เป็นลักษณะการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง ซึ่งจะใช้กระแสเป็น Operating quantity และแรงดันเป็น Polarizing quantity การทำงานของรีเลย์แบบนี้สามารถอธิบายในทำนองเดียวกันกับกรณีใช้กระแสเป็น Operating quantity ซึ่งจากสมการที่ 2.26 แทนค่าฟลักซ์ด้วยกระแสจะได้สมการดังนี้

$$T = KI_1I_v \sin \alpha \quad (2.27)$$

การป้องกันการลัดวงจรในกรณีที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งแห่ง (Multiple sources) เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น ณ จุดใดๆ จะมีกระแสฟอลต์ไหลมากกว่าหนึ่งทิศทาง ถ้าใช้รีเลย์กระแสเกินแบบธรรมดา (ไม่มีทิศทาง) อาจไม่สามารถจัดการทำงานประสานกันเพื่อกำจัดฟอลต์ได้ เช่น ในระบบจำหน่ายแบบลูป (Loop) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้รีเลย์ที่มีความสามารถในการตรวจจับทิศทางของกระแสฟอลต์ เพื่อปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบได้อย่างถูกต้อง



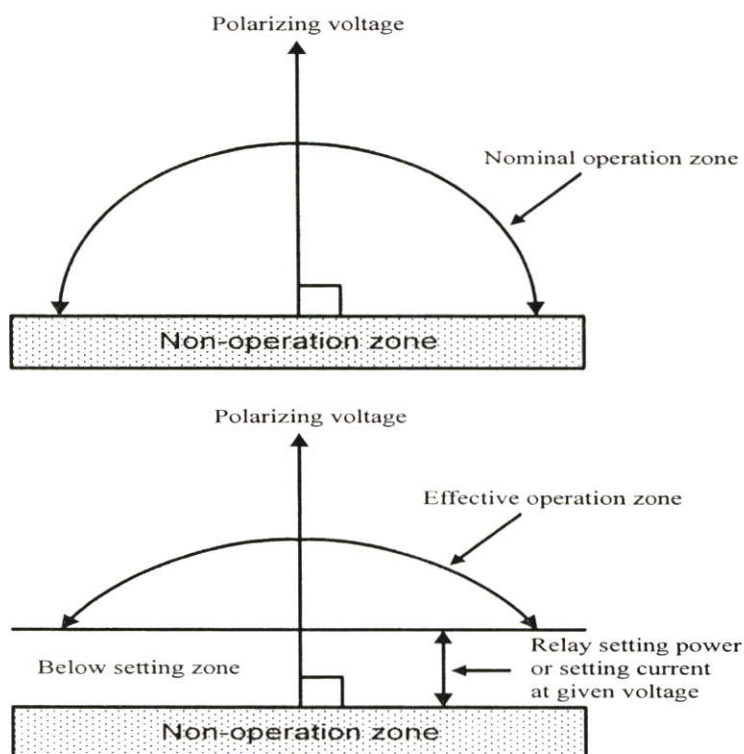
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะคุณสมบัติของรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง [9]

รีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทางจะประกอบไปด้วยหน่วยป้องกันกระแสเกินเหมือนกับรีเลย์ปกติ และหน่วยควบคุมทิศทางที่จะทำการเปรียบเทียบมุมเฟสของกระแสกับแรงดันที่ใช้เป็นปริมาณอ้างอิง (Reference หรือ Polarized source) รีเลย์จะทำงานเมื่อพบว่ากระแสฟอลต์อยู่ในทิศทางที่ตั้งไว้ ลักษณะคุณสมบัติการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทางแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 จากรูป บริเวณแรงบิดบวก (positive torque) คือบริเวณที่เฟสเซอร์ของกระแสทำมุมกับปริมาณอ้างอิง แล้วรีเลย์จึงจะทำงาน โดยแนวเส้นประคือแนวเส้นที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด (maximum torque line) และมุมเฟสของกระแสในแนวนอนนี้เรียกว่า มุมเฟสที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด (maximum torque angle : MTA) รีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) Phase Directional Overcurrent Relay (67) เป็นรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง ใช้ในการป้องกันฟอลต์แบบเฟส เช่น การลัดวงจรระหว่างเฟส (phase to phase fault) และการลัดวงจรสามเฟส (three phase fault)
- 2) Ground Directional Overcurrent Relay (67N) เป็นรีเลย์กระแสเกินแบบรู้ทิศทาง ใช้ในการป้องกันฟอลต์ลงดิน เช่น การลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (single line to ground fault) และการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน (double line to ground fault)

จากรูปที่ 2.8 แรงบิดซึ่งเป็นปริมาณสัดส่วนกับ  $\cos\phi$  จะมีค่าเป็นบวกในขอบเขต  $\pm 90^\circ$  เส้นที่ลากผ่านเฟสเซอร์ของจุดกำเนิด (origin) เป็นเส้นที่ตั้งฉากเรียกว่า เฟสเซอร์ของค่าแรงดันไฟฟ้า (polarizing voltage) ทำหน้าที่เป็นตัวแยกไดอะแกรมระหว่างบริเวณที่ทำงาน (nominal operation zone) และไม่ทำงาน (non-operation zone) ออกจากกัน รีเลย์ส่วนใหญ่ต้องการปริมาณอินพุตของกำลังไฟฟ้าที่แน่นอนในการทำงาน พื้นที่ในการทำงานจริงของรีเลย์จะถูกลดขอบเขตลง อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเส้นกั้นขอบเขต (boundary line) ซึ่งขนานกันกับตำแหน่งจากจุด

กำเนิด ส่งผลให้จำนวนของกำลังไฟฟ้าสำหรับรีเลย์ที่ใช้ในการทำงานลดลง (minimum operating power) ซึ่งไดอะแกรมนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อการอิ่มตัว หรือเกิดความผิดพลาดต่อแรงบิด แต่อาจจะทำให้เส้นกั้นขอบเขต (boundary line) เกิดการผิดเพี้ยนหรือผิดปกติไปจากเดิมเล็กน้อย

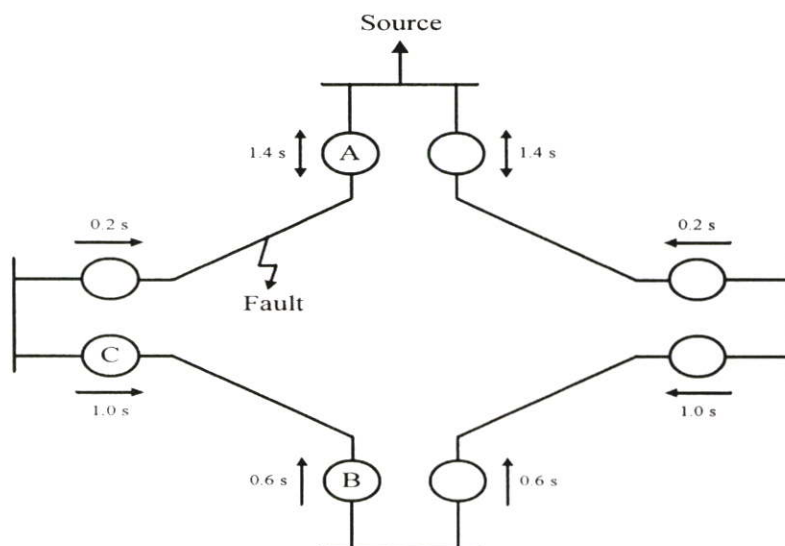


รูปที่ 2.8 แสดงไดอะแกรมขอบเขตในการทำงานรีเลย์แบบรู้ทิศทาง [10]

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือทิศทางของกระแสฟอลต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นสิ่งเดียวเท่านั้นที่จำเป็นและต้องการสำหรับการออกแบบการทำงานของรีเลย์แบบรู้ทิศทางให้มีความสามารถในการรับรู้ และมีความไวในการตัดวงจรที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบอย่างถูกต้อง รีเลย์ทั่วไปจะทำงานที่ 1-2% ของพิกัดกำลังไฟฟ้า (พิกัดกำลังไฟฟ้าคือ พิกัดของกระแสคูณกับพิกัดของแรงดัน) ระหว่างเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่ง แรงดันไฟฟ้าหลักของระบบจะมีค่าตกลง ดังนั้นรีเลย์แบบรู้ทิศทางควรมีคุณสมบัติในการตรวจสอบทิศทางเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงได้ ซึ่งโดยปกติแล้วรีเลย์แบบรู้ทิศทางจะสามารถทำงานได้ที่ 1-2% ของค่าที่พิกัด

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรูปหรือแบบโครงข่าย (Network) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าสองแห่ง ระบบการป้องกันของสายส่งแต่ละสายประกอบไปด้วยรีเลย์กระแสเกิน และรีเลย์แบบรู้ทิศทางที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง เวลาในการทำงานของรีเลย์ที่จุดต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูป โดยสมมุติการทำงานของเบรกเกอร์ใช้เวลา 0.3 วินาที และไม่ว่าจุดลัดวงจรเกิดขึ้น

ในสายส่งใด รีเลย์ที่ป้องกันสายส่งนั้นเท่านั้น จะสามารถสั่งให้เบรกเกอร์ที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน เปิดวงจรออกได้

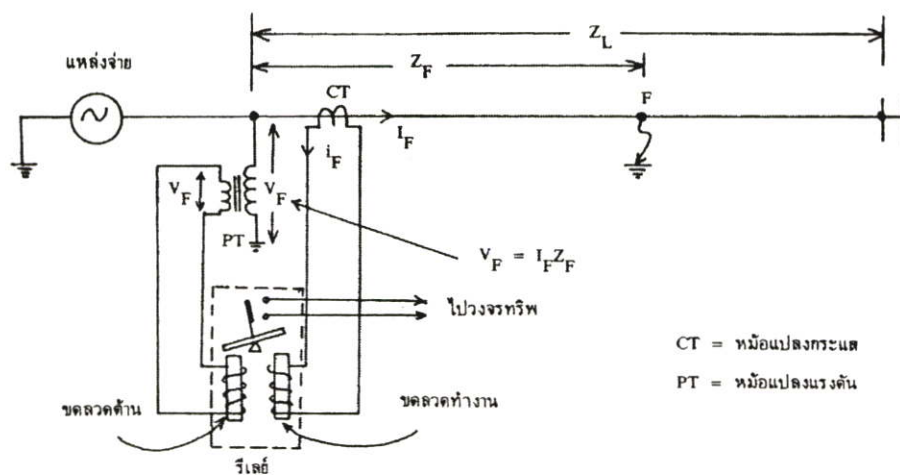


รูปที่ 2.9 แสดงการใช้งานของรีเลย์กระแสเกินและรีเลย์แบบรู้ทิศทางในการป้องกันสายส่ง [11]

ทิศทางของลูกศรที่แสดงในรูปหมายถึง ถ้ากระแสใดๆ ไหลในแนวทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่กำหนดไว้ที่รีเลย์นั้น รีเลย์แบบรู้ทิศทางก็จะสามารถทำงานและปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบได้ และในแต่ละจุดของรีเลย์ซึ่งประกอบไปด้วยรีเลย์กระแสเกินและรีเลย์แบบรู้ทิศทางนั้น รีเลย์ทั้งสองจะต้องทำงานพร้อมกัน จึงจะสามารถสั่งให้เบรกเกอร์เปิดวงจรออกได้ เช่น รีเลย์ B ถ้าหากมีการจ่ายโหลดตามปกติ โดยมีทิศทางตามลูกศรที่รีเลย์แบบรู้ทิศทางกำหนดไว้ รีเลย์แบบรู้ทิศทางก็จะสามารถทำงานได้ แต่รีเลย์กระแสเกิน B ไม่ทำงาน เนื่องจากจ่ายโหลดปกติ ดังนั้นเบรกเกอร์ B จึงไม่เปิดวงจรออก หรือถ้าเกิดการลัดวงจรในสายส่งระหว่างรีเลย์ C และ A กระแสลัดวงจรจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า A ไหลผ่านเบรกเกอร์ A มายังจุดลัดวงจร ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้า B ก็ส่งกระแสลัดวงจรผ่านสายส่งระหว่างรีเลย์ B และ C มายังจุดลัดวงจร ในกรณีนี้รีเลย์กระแสเกินที่ C จะสามารถทำงานได้ แต่รีเลย์แบบรู้ทิศทางที่ C จะไม่ทำงาน เพราะกระแสลัดวงจรไหลสวนทางกับทิศทางที่กำหนดไว้ที่รีเลย์ C ทำให้เบรกเกอร์ที่ C ไม่สามารถเปิดวงจรออกได้เหมือนกัน

### 2.2.3 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)

การทำงานของรีเลย์ชนิดนี้อาศัยการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50 หรือ 60 Hz) จากกระแสและแรงดันด้วยการแปลงฟูเรียร์ตามหลักการของคลื่นเดินทาง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ซึ่งปกติจะอยู่ที่ปลายของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.10



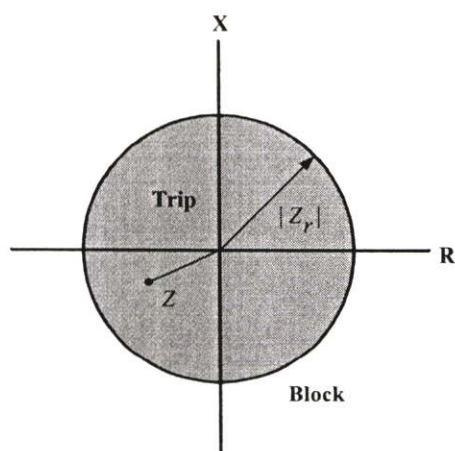
รูปที่ 2.10 แสดงการติดตั้งและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay)

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั้น ได้มาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันและกระแสดังสมการที่ 2.28

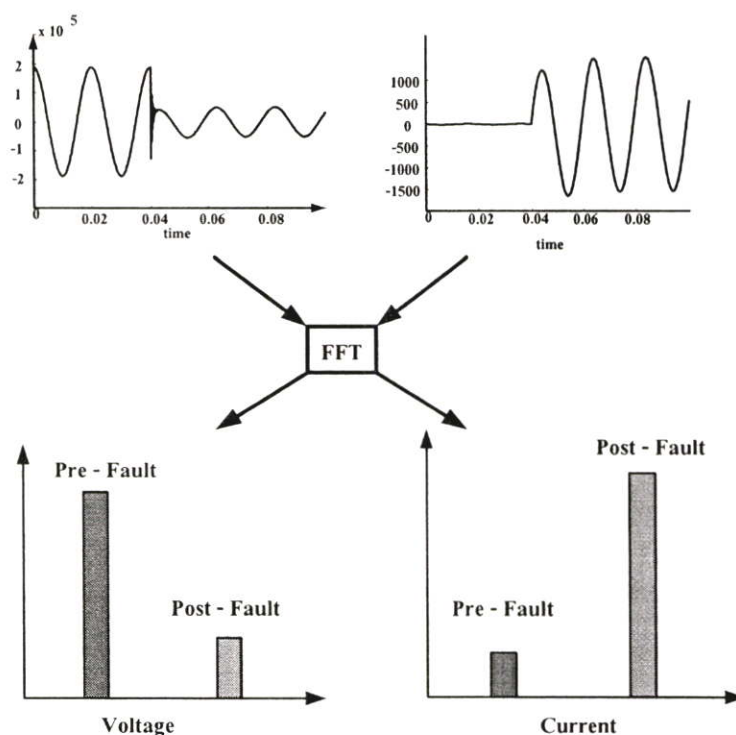
$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.28)$$

ขั้นตอนในการตัดสินใจของรีเลย์จะใช้การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตอบสนองเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ ( $Z_r$ ) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้ [12]

$$\begin{aligned} |Z_r| > |Z| & \quad \text{trip} \\ |Z_r| < |Z| & \quad \text{block} \end{aligned} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.11 แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง



รูปที่ 2.12 แสดงการวิเคราะห์แรงดันและกระแสด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสถานะที่เกิดฟอลต์

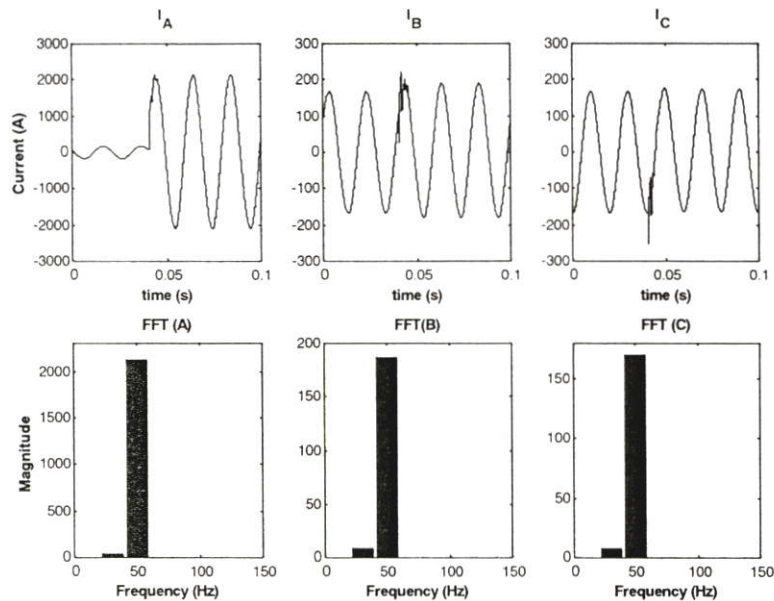
จากการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์นี้เองทำให้บางครั้งจะเรียกรูปแบบนี้ว่า อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) และถ้าพิจารณาในระนาบเชิงซ้อนทางเดินของโลกัส (locus) จะมีลักษณะเป็นวงกลมมีรัศมี  $|Z_r|$  ดังรูปที่ 2.11 ค่าอิมพีแดนซ์ที่หาได้จากสมการที่ 2.28 ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของแรงดันและกระแสที่พิจารณาจากรีเลย์ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งในรูปที่ 2.10 ในสถานะปกติรีเลย์จะมองค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งอยู่นอกวงกลมรัศมี  $|Z_r|$  ดังนั้นจะไม่มีคำสั่งให้เบรกเกอร์ปลดวงจร แต่ในสถานะที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้นค่าของแรงดันจะลดลงในขณะที่ค่าของกระแสเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.28 พบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสถานะปกติ ตามรูปที่ 2.5 และถ้าค่าอิมพีแดนซ์ลดต่ำกว่ารัศมี  $|Z_r|$  รีเลย์ก็จะเริ่มทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ (โหนดของรีเลย์ คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นหรือไม่

ผลการลดลงของอิมพีแดนซ์นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ในสถานะปกติ และค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวก็สามารถที่จะคำนวณหาระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ดังสมการที่ 2.30

$$Location = \frac{Z}{m} = \frac{V}{mI} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $m$  คือค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว (ohm/km)

จากจุดนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในระบบการป้องกันแบบโซน (Zone protection) ได้ สำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ว่าเกิดที่เฟสใดนั้นอาศัยการพิจารณาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟส รวมการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์เพื่อบอกว่าเป็นการลัดวงจรลงดิน (Ground fault) หรือไม่

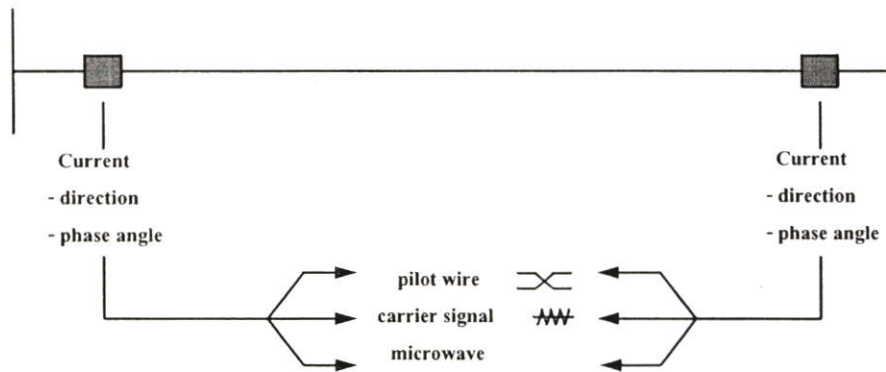


รูปที่ 2.13 แสดงการแปลงฟูเรียร์ของกระแสแต่ละเฟสในกรณีฟอลต์ที่เฟส A

#### 2.2.4 การป้องกันแบบใช้ระบบสื่อสาร (Pilot protection) [12]

เนื่องจากการใช้รีเลย์ระยะทางนั้นพบปัญหาด้านการตอบสนองที่ล่าช้า โดยเฉพาะในกรณีที่สายส่งมีความยาวมากหรือจุดที่เกิดฟอลต์อยู่ไกลปลายสายส่งมากๆ ซึ่งจะส่งผลให้รีเลย์ตัวที่อยู่ไกลจุดที่เกิดฟอลต์มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้ากว่าเมื่อเทียบกับรีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ ในทางปฏิบัติเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งวงจรใดๆ ก็ตามรีเลย์ที่ปลายทั้ง 2 ด้านควรที่จะทำการตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดฟอลต์ที่เกิดขึ้นออกจากระบบ นอกจากนี้ในระบบแรงดันไฟฟ้า 230 kV กรณีสายส่งระยะสั้นๆถ้าใช้รีเลย์ระยะทางในการป้องกันมักประสบกับปัญหาจากแรงดันไฟฟ้าภายนอก เช่น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce Voltage) และค่าผิดพลาดกรณีฟอลต์อิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault) ผลกระทบเหล่านี้ทำให้ระบบรีเลย์ป้องกันลดความน่าเชื่อถือลง เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในระบบการป้องกันสายส่งแรงสูงแบบใหม่จึงมีการนำระบบสื่อสารมาใช้เชื่อมโยงข้อมูลของปลายสายส่งทั้งสองด้านเข้าด้วยกัน โดยใช้หลักการของระบบป้องกันซึ่งเรียกว่า รีเลย์กระแสผลต่าง (Current Differential Relay) มาใช้ร่วมกับ Fiber optic channel ใน Overhead Ground Wire ของสายส่ง เนื่องจาก Fiber optic จะไม่มีผลต่อแรงดันภายนอกที่เกิดจากฟอลต์ และมีความแม่นยำสูง ดังนั้นระบบป้องกันดังกล่าวจึงได้พัฒนาร่วมกับ

ระบบสื่อสาร ซึ่งมีด้วยกันหลากหลายประเภทเช่น ระบบรีเลย์สื่อสาร (Pilot relay), ระบบป้องกันแบบคลื่นพาหะ (Carrier protection), ระบบสัญญาณไมโครเวฟ เป็นต้น โดยที่แต่ละแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปทำให้การนำไปใช้งานต้องพิจารณาความเหมาะสมทางด้านเทคนิคและราคาเป็นหลัก



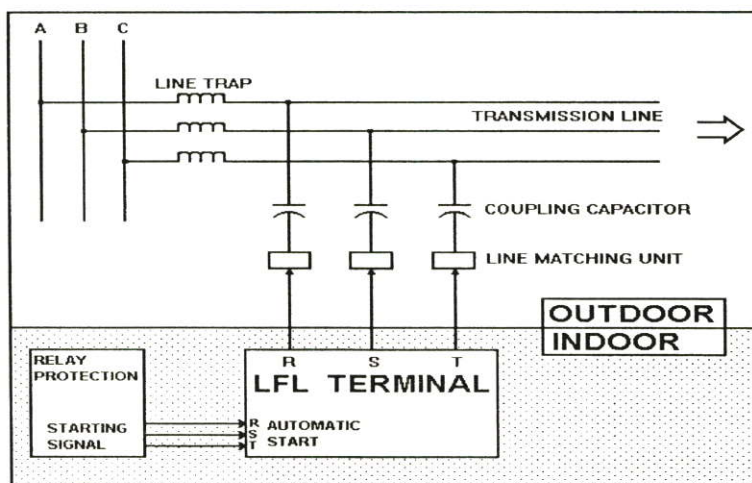
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของการป้องกันโดยใช้ระบบสื่อสาร

จุดประสงค์ของการนำระบบสื่อสารเข้ามาใช้งานในระบบป้องกันสายส่งคือ การเชื่อมโยงข้อมูลของปลายสายส่งแต่ละด้านเพื่อให้ทราบว่าในสถานะที่มีฟอลต์เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นในช่วงใด ถ้าฟอลต์เกิดขึ้นในช่วง (Internal fault) ที่ทำการพิจารณา ก็จะส่งปลดวงจรเพื่อกำจัดฟอลต์ไม่ว่าจะเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่งใด แต่ถ้าเกิดฟอลต์อยู่นอกช่วง (External fault) ที่พิจารณาก็จะบล็อกไม่ให้มีการปลดวงจร ซึ่งการระบุว่าเกิดฟอลต์ในช่วงที่พิจารณาหรือไม่นั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบทิศทาง (Direction comparison) การไหลของกระแสฟอลต์ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน หรือการเปรียบเทียบมุมเฟส (Phase comparison) ของกระแสฟอลต์ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน โดยข้อมูลทั้งหมดจะเชื่อมโยงผ่านระบบสื่อสารดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

## 2.3 อุปกรณ์หาจุดขัดข้องในสายส่ง (Line fault locator : LFL) [7]

### 2.3.1 การทำงานของเครื่อง LFL ในระบบสายส่ง

เมื่อมีเหตุขัดข้องในระบบสายส่ง อุปกรณ์ Relay Protection จะส่งสัญญาณ Starting มาที่เครื่อง LFL เพื่อให้เครื่อง LFL ทำงาน (Operate) ด้วยการส่งสัญญาณ Radar Pulse เข้าไปในสายส่ง โดยส่งผ่าน Line Matching Unit (LMU) และ Coupling Capacitor (CC) เมื่อสัญญาณวิ่งไปถึงจุดที่เกิดเหตุขัดข้องในสายส่ง สัญญาณ Radar Pulse ที่ส่งออกไปนั้นก็สะท้อนกลับมาเข้าที่เครื่อง LFL อีกครั้งหนึ่ง เพื่อนำมาใช้คำนวณระยะทาง และแสดงผลที่ Distance Display ทั้งในรูปของตัวเลข และรูปภาพ ภายในเวลาไม่เกิน 0.5 วินาที



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการทำงานของ LINE FAULT LOCATOR (LFL) ในระบบสายส่ง

### 2.3.2 หลักการทำงานของเครื่อง LFL

เมื่อเครื่อง LFL ได้รับคำสั่งเริ่มต้นการทำงาน (Starting Command) จากระบบรีเลย์ป้องกันสายส่ง (Distance Relay) ภาคควบคุม (Controller) จะประมวลผลข้อมูลที่ได้รับว่าเป็นสายส่งวงจรใดและเฟสอะไร เมื่อทราบแล้วก็แสดงผลออกมาที่ Line and Phase Display ขณะเดียวกันก็สั่งให้ภาคผ่านสัญญาณตรวจสอบสายส่ง (Change Over Relay) และภาคกำเนิดสัญญาณตรวจสอบสายส่ง (Locating Pulse Generator) ทำงาน เพื่อส่งสัญญาณตรวจสอบสายส่งเข้าไปในสายส่ง โดยจะส่ง High Voltage Pulse หรือเรียกว่า Radar Pulse ซึ่งเป็นสัญญาณลักษณะการหน่วงคลื่นไซน์ (Sinewave Damping) ความถี่ 150-450 kHz จำนวน 5 พัลส์ (Pulse) ขนาด 1.4 - 2.0 kV<sub>(0-P)</sub> เข้าไปในสายส่ง สัญญาณพัลส์เรดาร์ (Radar Pulse) นี้จะเดินทางไปในสายส่งซึ่งมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance :  $Z_0$ ) ประมาณ 400 โอห์ม จนถึงจุดขัดข้องของสายส่ง อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ( $Z_0$ ) จะเปลี่ยนแปลงโดยฉับพลัน ซึ่งอาจมีค่าเป็น 0 (ศูนย์) หรือเข้าใกล้  $\infty$  (Infinity) เป็นผลให้พัลส์ (Pulse) ที่ส่งออกไปสะท้อนกลับมายังต้นทาง

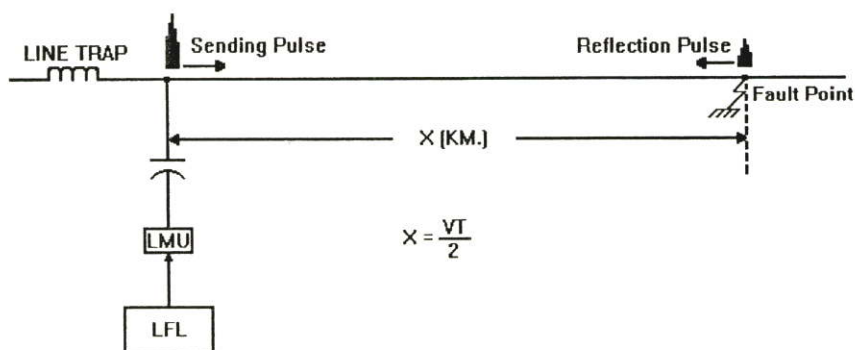
หากทราบเวลาที่พัลส์ใช้ในการเดินทางไป-กลับ และทราบความเร็วของพัลส์ดังกล่าว จะสามารถคำนวณระยะทางของการขัดข้องได้จากสมการที่ 2.31

$$x = \frac{Vt}{2} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $x$  = ระยะของจุดขัดข้องมีหน่วยเป็นกิโลเมตร

$V$  = ความเร็วของพัลส์ (PULSE) ในสายส่งไฟฟ้า ( $2.949 \times 10^8$  กิโลเมตร / วินาที)

$t$  = เวลาที่พัลส์ (PULSE) ใช้ในการเดินทางไป-กลับ เป็นวินาที



รูปที่ 2.16 แสดงทิศทางการเดินทางของกลุ่มพัลส์ (Pulse) ไปยังจุดฟอลต์ในสายส่ง

เมื่อคำนวณระยะทางแล้วเครื่องจะแสดงผลที่ Distance Display ทั้งในรูปของตัวเลข และรูปภาพ ซึ่งผลการทำงานนี้สามารถรับทราบโดยผ่านทางระบบควบคุมระยะไกลได้อีกทางหนึ่งด้วย

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อเครื่องหาข้อขัดข้องในสายส่ง (LFL) จะเห็นได้ว่า เครื่อง LFL นี้มีประโยชน์อย่างมาก ทำให้สามารถทราบจุดที่เป็นปัญหาได้ภายในเวลาไม่กี่วินาที ซึ่งทำให้การดำเนินการแก้ไขข้อขัดข้องนั้นเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ถือได้เป็นการลดความสูญเสีย อันเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งได้ ทั้งยังเป็นการช่วยอำนวยความสะดวกให้กับหน่วยงานที่ทำหน้าที่บำรุงรักษาสายส่งให้ทำงานได้อย่างสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้นด้วย แต่ก็ยังมีปัญหาสำคัญหรือข้อเสียด้านราคาที่ยังแพง มีอุปกรณ์มากติดตั้งยากและมีข้อจำกัดอื่นๆ อีกมากทำให้มีใช้อยู่เพียงไม่กี่แห่งเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นเรื่องยากที่จะนำหลักการการทำงานของเครื่อง LFL มาใช้ในระบบสายส่งได้ทั้งหมด นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ก่อนเครื่อง LFL จะทำงาน จำเป็นต้องรับสัญญาณ Starting จากระบบป้องกันหรือรีเลย์ป้องกันเป็นหลัก ซึ่งถ้าระบบป้องกันมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงมีโอกาสที่เครื่อง LFL จะไม่ทำงาน

จากรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณบนพื้นฐานของรีเลย์ป้องกันแบบเดิมนั้นพบว่าเป็นการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการนำสัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานมาใช้งานเป็นหลัก รวมถึงการนำระบบสื่อสารเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการตอบสนองของการวิเคราะห์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสัญญาณฟอลต์พบว่านอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่ารวมอยู่และยังให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนพื้นฐานขององค์ประกอบความถี่สูง และจากลักษณะของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วจึงสามารถที่จะทำให้ลดช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ โดยจะช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์และตัดสินใจซึ่งสามารถนำไปสู่แผนงานการป้องกันแบบใหม่และสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาของรีเลย์ป้องกันในรูปแบบใหม่อีกด้วย

## บทที่ 3

# การแปลงเวฟเล็ต

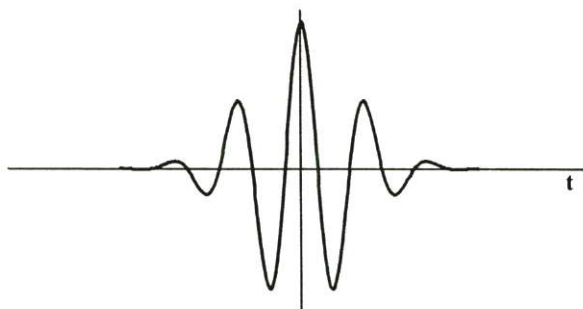
ในทุกหนทุกแห่งรอบๆ ตัวเราประกอบไปด้วยสัญญาณต่างๆ มากมายที่มนุษย์นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การสั่นของแผ่นดินไหว เสียงพูดของมนุษย์ การสั่นของเครื่องยนต์ และการจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ เหล่านี้จะใช้ทฤษฎีเวฟเล็ตเป็นเครื่องมือสำหรับอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณซึ่งมีความสำคัญต่อสาขาการประมวลผลสัญญาณมาก ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของเวฟเล็ต โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต, การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง, การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย, เวฟเล็ตแม่ รวมไปถึงคุณสมบัติของการแยกวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด (Multi Resolution Analysis : MRA) ของการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งทำให้เกิดขบวนการแยกวิเคราะห์ (Decomposition) และการรวมกลับ (Reconstruction) ซึ่งเป็นการนำการแปลงเวฟเล็ตมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย

### 3.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT) [13,14]

การแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น) แต่ได้พัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ สามารถปรับเปลี่ยนขนาดหน้าต่างต่าง (windows) ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์น้อยลงในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

#### 3.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory)

ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ตามแนวแกนอนและขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์ทั้งทางด้านบวกและด้านลบอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตคือการนำกลุ่มของเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการสเกล (Scaling :  $a$ ) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ตแม่นั้นเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting :  $k$ ) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเลตแบบ Morlet

เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น โดยเทียบเคียงกับระบบกล้องจุลทรรศน์ ถ้าให้ท้องฟ้าเป็นสัญญาณอินพุตและเลนส์เป็นเวฟเลตแม่ ในกรณีที่ต้องการดูภาพท้องฟ้าทั้งหมด โดยไม่ต้องมีการเลื่อนตำแหน่งของกล้อง จำเป็นจะต้องใช้โฟกัสที่หยาบมาก เพื่อให้ได้ภาพที่ครอบคลุมท้องฟ้าทั้งหมด ซึ่งภาพที่ได้จะไม่มีรายละเอียดอะไรเลย แต่ถ้าทำการซูม (สเกล) เข้าไป จะทำให้เห็นรายละเอียดต่างๆ ของท้องฟ้ามากขึ้น เช่น กลุ่มดาวกาแล็กซี ฯลฯ แต่ก็เห็นรายละเอียดเป็นบางส่วนของท้องฟ้า ถ้าต้องการเห็นท้องฟ้า ทั้งหมดก็ต้องทำการเลื่อนกล้องไปยังตำแหน่งต่างๆ ยิ่งถ้าต้องการรายละเอียดของท้องฟ้ามากขึ้นเท่าไร ก็จะต้องมีการซูมลึกเข้าไป และจะต้องเลื่อนตำแหน่งของกล้องละเอียดมากยิ่งขึ้นจึงจะได้ภาพท้องฟ้าทั้งหมด

ดังนั้นภาพแต่ละภาพก็จะเป็นสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลต ที่พิจารณาผ่านเลนส์หรือตัวเวฟเลตแม่ที่มีค่าการสเกล (Scaling) (โฟกัสหรือความละเอียด) และตำแหน่งการมอดู (Translation) ในขณะนั้น ถ้านำเซตของภาพทั้งหมดที่ตำแหน่งของ  $a, k$  ต่างๆ กันมารวมกันจะเป็นภาพท้องฟ้าได้ (หมายถึงนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $k$  หลายๆ ตำแหน่งมารวมกันจะเกิดสัญญาณอินพุตที่ระดับความละเอียดนั้น เมื่อนำสัญญาณอินพุตที่ทุกความละเอียดมารวมกันก็จะได้เป็นสัญญาณอินพุตจริง)

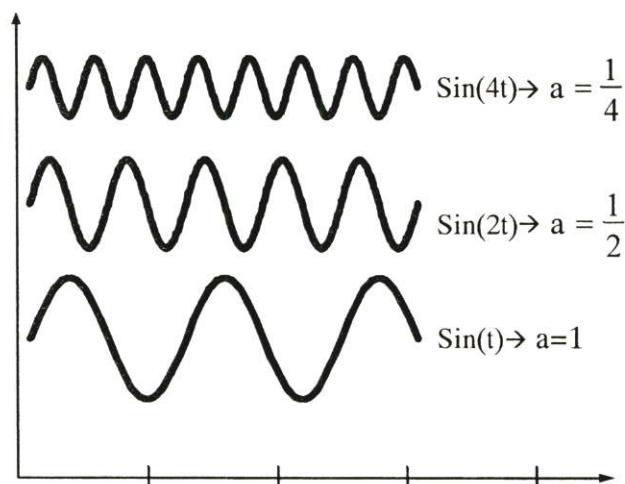
ถ้าให้  $\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ดังนี้

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

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

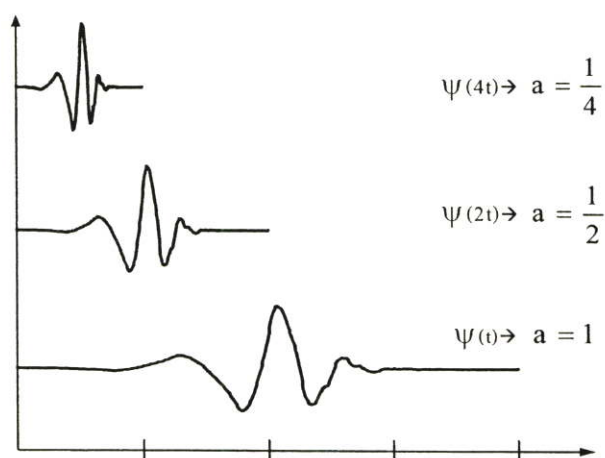
### 3.1.2 การสเกล (Scaling : a)

การวิเคราะห์เวฟเล็ทจะแสดงให้เห็นถึงเวลาและขนาดของสัญญาณ การสเกล (Scaling) จะหมายถึงการหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) ซึ่งเราจะให้ “a” แทนด้วยพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ทนั่นเอง หรืออาจเรียก “a” ว่าเป็นตัวประกอบขนาด (scale factor) และถ้าพิจารณาสัญญาณไซน์ที่มีตัวประกอบขนาดแตกต่างกันจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์

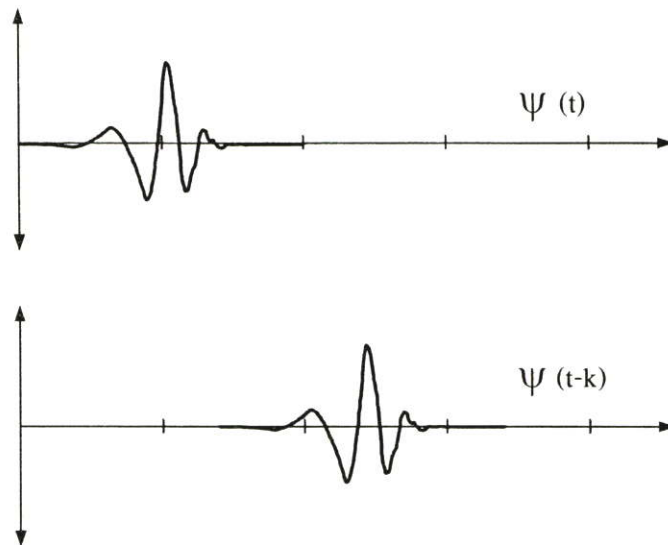
ตัวประกอบขนาด (a) จะมีผลในทางเดียวกันกับเวฟเล็ท ยิ่งถ้าตัวประกอบขนาดน้อยลงเท่าใด เวฟเล็ทจะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาเวฟเล็ทที่มีตัวประกอบแตกต่างกันจะปรากฏลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ท

### 3.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k)

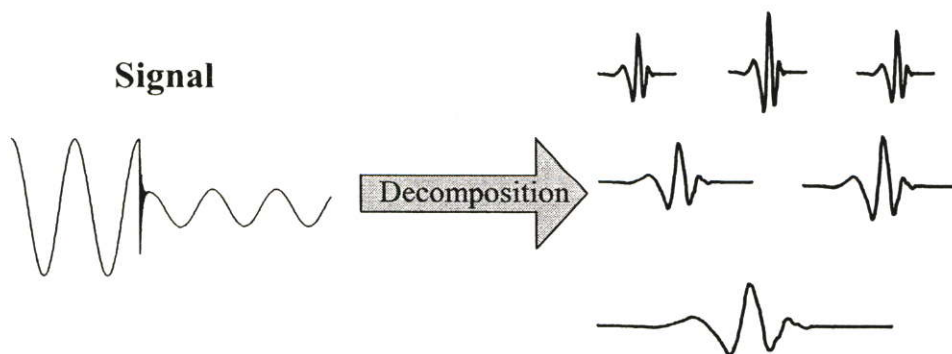
การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ตจะมีความหมายง่ายๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ซึ่ง การเลื่อนของฟังก์ชัน  $\psi(t)$  ด้วย  $k$  จะแสดงได้โดย  $\psi(t-k)$  การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดย พารามิเตอร์ “ $k$ ” ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ตบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ตที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

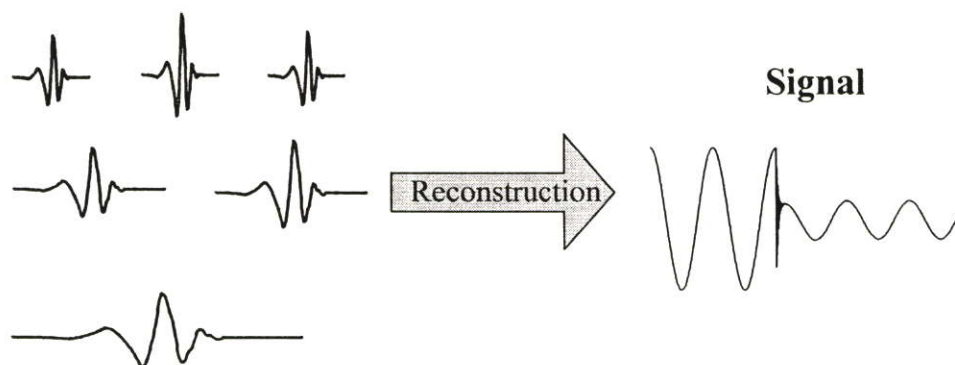
### 3.1.4 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ต (Decomposition and reconstruction of Wavelet)

เมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่าน้ำหนัก (Weight) อยู่นอยู่ ซึ่งรูปแบบในการแตกกระจายสัญญาณนี้เรียกว่าการกระจายเวฟเล็ต (Wavelet decomposition) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ในทางกลับกันการรวมกลุ่มของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิมเรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet reconstruction) ซึ่งก็คือการแปลงกลับของเวฟเล็ต (Inverse wavelet transform) โดยจะเป็นการนำเอาส่วนประกอบย่อยๆ เหล่านี้มาเรียงต่อกันเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

### 3.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT) [14]

จากการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น จะสังเกตเห็นว่าหน้าต่างเวลาความถี่ (Time - frequency window) มีพื้นที่ในการวิเคราะห์ที่คงที่เสมอไม่ว่าจะเป็นการพิจารณาที่ความถี่ในช่วงเวลาใดๆ แต่ในทางปฏิบัติความถี่ของสัญญาณเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนไซเคิลต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นถ้าใช้การแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น และเลือกฟังก์ชันหน้าต่างที่มีช่วงความถี่และช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสม เช่น ช่วงเวลาแคบเกินไปก็ทำให้ต้องมีการทำการแปลงหลายครั้งทีละตำแหน่งเพื่อให้ได้ข้อมูลในช่วงเวลาทั้งหมดที่ต้องการ ฟังก์ชันหน้าต่างที่ดี ความกว้างของช่วงเวลาและความถี่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนผกผันที่สัมพันธ์กัน นั่นคือควรทำให้หน้าต่างเวลา (Time Window) ที่แคบแต่มีหน้าต่างความถี่ (Frequency Window) ที่กว้าง เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณที่ความถี่สูงและ หน้าต่างเวลาที่กว้างแต่มีหน้าต่างความถี่ที่แคบเมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณที่ความถี่ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ระดับข่าวสารข้อมูลที่ครบถ้วนและใช้ช่วงเวลาในการแปลงน้อยลง

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั้นมีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบความถี่สูง และช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบ

ความถี่ต่ำ ซึ่งก็เป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงสมการสำหรับการวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a, k) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) dt \quad (3.2)$$

เมื่อ

$f(t)$  = สัญญาณที่ทำการแปลง

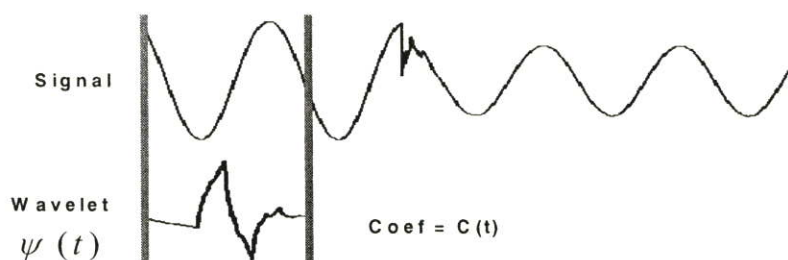
$\psi(t)$  = เวฟเล็ตแม่

$a$  = แพลคเตอร์สเกล (scale)

$k$  = แพลคเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (shifting)

จากสมการที่ 3.2 เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  ซึ่งเป็นเทอมของเวฟเล็ตแม่ที่เทียบได้กับเทอมของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้นเอง แต่เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  จะมีการเปลี่ยนคุณสมบัติไปตามพารามิเตอร์  $a$  และ  $k$  ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

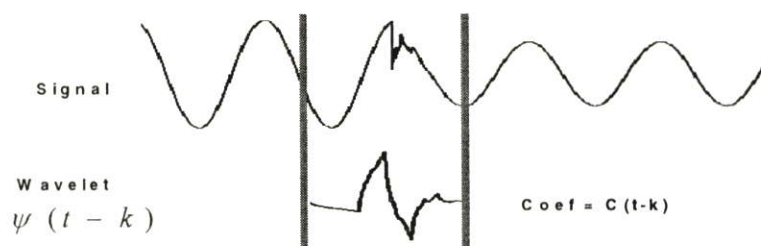
1. นำเวฟเล็ตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต

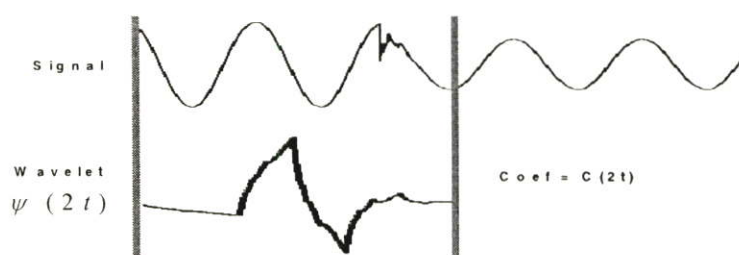
2. กำหนดความสัมพันธ์ (C) ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวฟเล็ตแม่ในสเกลแรกกับสัญญาณในส่วนแรก ซึ่งค่าสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปร่างของเวฟเล็ตแม่ด้วย

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



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต

4. เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำตามขั้นตอนที่ 1 – 3 ใหม่



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ต

5. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล

จากขั้นตอนทั้งหมดผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ของแต่ละสเกลในแต่ละส่วนของสัญญาณ และเนื่องจากการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง

การปรับเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและเวลาที่ดียิ่งขึ้นแต่จะมีข้อเสียคือ ในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องอาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมากและบางครั้งให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมากเกินไปจนความจำเป็น

### 3.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) [15]

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยจำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายก่อน

### 3.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียดคือ การวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $k$  หลายๆ ตำแหน่งมารวมกันให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุทจริง ซึ่งหลักการของการวิเคราะห์สัญญาณหลายระดับความละเอียดนั้นสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของสเปซเวกเตอร์

#### 3.3.1.1 ทฤษฎีของปริภูมิเวกเตอร์ (Space vector theory)

ความหมายของปริภูมิของเวกเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณ คือ ปริภูมิของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณพื้นฐานย่อยๆ ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic function)” โดยสมมติว่า  $V$  เป็นปริภูมิเวกเตอร์ที่มี  $j$  แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้น ซึ่งถ้า  $j$  มีค่าสูงขึ้นก็แสดงว่าที่ระดับความละเอียดสูงขึ้นและมีจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานมากขึ้น ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นจากการประกอบกันจากฟังก์ชันมีความละเอียดมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า  $j$  เป็นค่าแสดงถึงระดับความละเอียดของสัญญาณนั่นเอง โดยสามารถสรุปคุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

- 1).  $V^{-\infty} \dots \subset V^{-1} \subset V^1 \dots \subset V^{\infty}$
- 2).  $\text{Close}_{L^2}(\cup_{j \in \mathbb{Z}} V^j) = L^2(\mathbb{R})$ ;  $\mathbb{R} = \text{เซตของจำนวนจริง}$
- 3).  $\left( \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right) = \{0\}$
- 4).  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ;  $j \in \mathbb{Z}$  ;  $\mathbb{Z} = \text{เซตของจำนวนจริง}$
- 5).  $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}$  ;  $j \in \mathbb{Z}$

จากการที่ฟังก์ชันพื้นฐาน ประกอบกันเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียด  $j$  ภายในสเปซ  $V^j$  จะเรียกฟังก์ชันนี้ว่าเป็น “ฟังก์ชันสเกลลิ่ง (Scaling function :  $\Phi(t)$ )” และฟังก์ชันสเกลลิ่งที่ระดับสูงจะมีความถี่สูงและระดับที่ต่ำลงมาจะมีความถี่ที่ต่ำกว่าตามความสัมพันธ์ที่แสดงในคุณสมบัติข้อที่ 4 ซึ่งทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันสเกลลิ่งในสเปซใดๆ ได้ดังนี้

$$\Phi_{j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \Phi(2^j t - k) \quad ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.3)$$

จากสมการจะพบว่าถ้าระดับความละเอียดลดลงมาหนึ่งระดับ ฟังก์ชันพื้นฐานจะมีความถี่ลดลงมาครึ่งละ 2 เท่า และอาศัยคุณสมบัติ MRA จะทำให้สามารถทำการประมาณสัญญาณ  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  ไปอยู่ในปริภูมิที่ระดับความละเอียด  $j$  ใดๆ ได้ดังนี้

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \Phi_{j,k}(t) \quad (3.4)$$

โดย  $c_k^j$  ที่เป็นสัมประสิทธิ์หรือนำหนักที่คูณกับฟังก์ชันสเกลลิงที่ตำแหน่ง  $k$  ใดๆ แล้วประกอบขึ้นเป็น  $f(t)$  ที่ระดับความละเอียด  $j$

จากคุณสมบัติข้อ 4 ของ MRA การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงจะทำให้พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่อีกปริภูมิอีกอันหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ปริภูมิของเวกเตอร์เวฟเล็ต (Wavelet vector space :  $W^j$ )” ซึ่งจะประกอบด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่เรียกว่า “ฟังก์ชันเวฟเล็ต (Wavelet function:  $\psi(t)$ )” โดยสามารถเขียนสมการฟังก์ชันเวฟเล็ตได้ดังต่อไปนี้

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (3.5)$$

ถ้ากำหนดให้  $g_j(t)$  เป็นสัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันพื้นฐาน ( $\psi_{j,k}(t)$ ) ภายในปริภูมิเดียวกันมารวมเป็นสัญญาณใดๆ จะได้ว่า

$$g_j(t) = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (3.6)$$

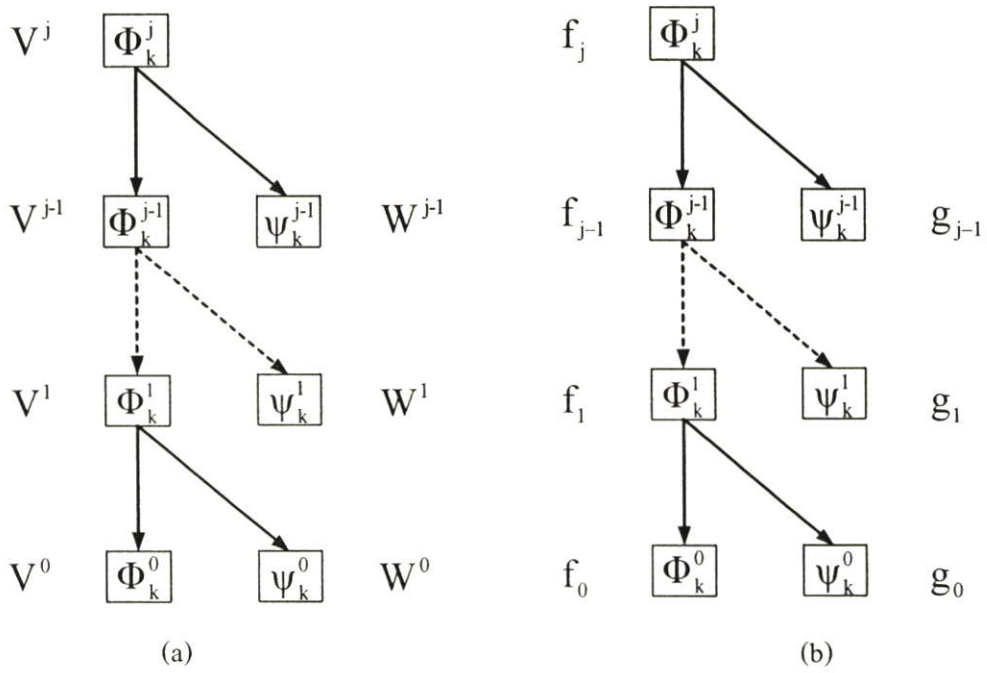
โดยที่  $d_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือนำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ตำแหน่งนั้นๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ  $g(t)$  ดังนั้นจากความสัมพันธ์  $V^j + W^j = V^{j+1}$  จะได้ว่า

$$f_{j+1} = f_j + g_j \quad (3.7)$$

โดยสมมติให้  $f(t) \in V^{j+1}$  จะสามารถแตกกระจายให้  $f(t)$  ให้มีความละเอียดน้อยลงได้จากความสัมพันธ์ของ  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ในขณะเดียวกัน  $V^j$  สามารถแตกต่อไปอีกได้เรื่อยๆ กระทั่ง  $j=0$  ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$V^{j+1} = V^0 + W^0 + W^1 + \dots + W^j \quad (3.8)$$

ในทำนองเดียวกัน  $f_{j+1} = f_j + g_j$  สามารถแตกกระจายเป็น  $f_j$  และ  $g_j$  ได้ดังรูปที่ 3.10



**รูปที่ 3.10** แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย (decomposition) [15] ของ  
 (a) ปริภูมิของเวกเตอร์; (b) สัญญาณที่มีความละเอียดต่างๆ

จากรูปที่ 3.10 (b) สามารถแสดงลักษณะของสัญญาณ  $f(t)$  ในรูปของฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเลตได้ดังนี้

$$f(t) = f_j + g_j + g_{j+1} + g_{j+2} + \dots + g_\infty \tag{3.9}$$

รูปแบบการแตกกระจายสัญญาณ  $f(t)$  ใดๆ ในสเปซ  $V^0$  ไปจนถึงระดับความละเอียดที่  $j$  ในรูปของสัมประสิทธิ์  $c_j(m)$  และ  $d_j(m)$  นี้เรียกว่า “การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform :DWT)” โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [16]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \tag{3.10}$$

- โดยที่  $a_0^m$  คือ การสเกล
- $nb_0 a_0^m$  คือ การเลื่อนตำแหน่ง
- $m, n$  คือ เลขจำนวนเต็มบวก

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้นจากสมการที่ (3.10) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (3.11) [17]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (3.11)$$

เมื่อ  $m, n, k$  เป็นเลขจำนวนเต็มโดยที่

$n$  คือ จำนวนข้อมูล

$m$  คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

$k$  คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ( $a_0 = 2; b_0 = 1$ ) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้ [18]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k 2^m}{2^m}\right] \quad (3.12)$$

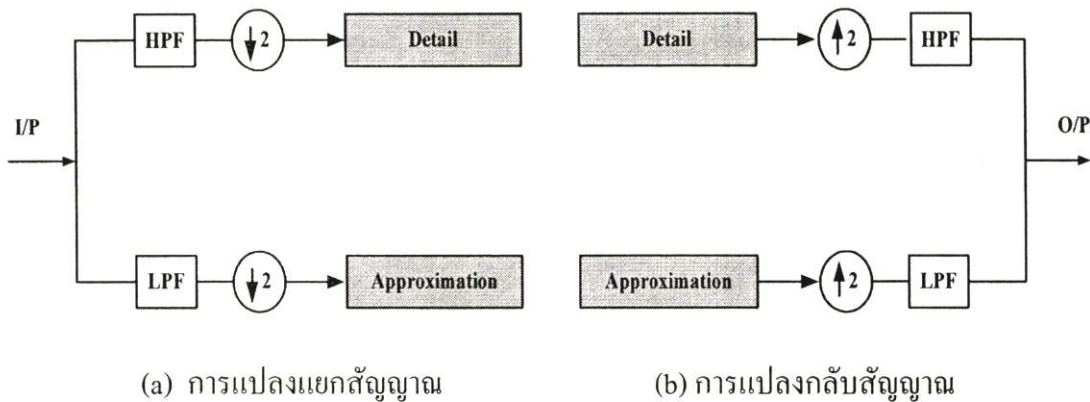
ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์แบงค์ดังนี้

### 3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

ก่อนที่จะอธิบายการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในลักษณะฟิลเตอร์แบงค์นั้น ขออธิบายหลักการพื้นฐานของฟิลเตอร์แบงค์ก่อนฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณ (two channel filter banks) จะเป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของความถี่ต่ำและส่วนของความถี่สูง โดยจะถูกวิเคราะห์ด้วยคู่ชุดกรองซึ่งมีการลดความถี่ออกมาครึ่งหนึ่งดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเทอมของ  $\downarrow 2$  แสดงการลดอัตราสุ่มลง (down sampling) ด้วย 2 หรือลดผลการวิเคราะห์จากตัวกรองออกครึ่งหนึ่งในแต่ละขั้นตอนของการวิเคราะห์ เมื่อนำสัญญาณอินพุตมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสัญญาณจะถูกแยกองค์ประกอบ (Decomposition) โดยตัวกรองแบบ 2 ช่อง (Two channel filter banks) ซึ่งจะแยกความถี่ในแบนด์ที่ต้องการออกเป็น 2 ส่วน คือ

- องค์ประกอบความถี่สูง ซึ่งจะผ่านตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter : HPF) ที่เรียกว่า “Detail (cD)”

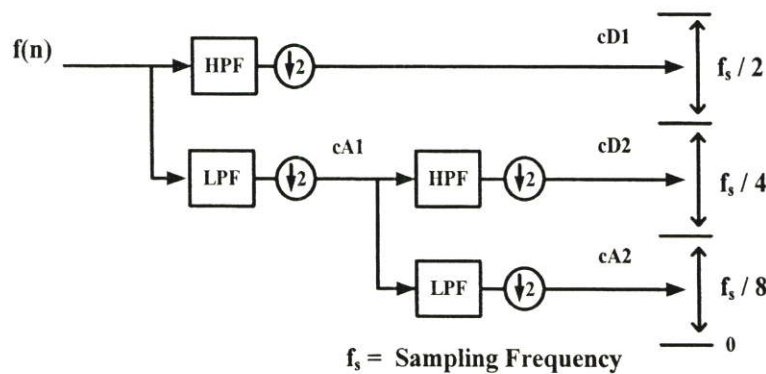
- องค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งจะผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter : LPF) ที่เรียกว่า “Approximation (cA)”



รูปที่ 3.11 แสดงการแปลงแยกและแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ

และในทางกลับกันก็สามารถสังเคราะห์เพื่อสร้างกลับฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ โดยการนำ ส่วนของความถี่ต่ำและความถี่สูงมารวมกันเป็นสัญญาณเดิมได้ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 (b) จะสังเกต ได้ว่าทอม  $\uparrow 2$  แสดงการเพิ่มอัตราสุ่มขึ้น (Up sampling) เป็น 2 เท่า

ลักษณะของตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณในลักษณะนี้เรียกว่า “Quadrature mirror filters (QMF)” ในลักษณะของ dyadic wavelet transform จะเป็นการนำฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณมา เรียงต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนความถี่ต่ำมาทำการแยก ความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave analysis filter banks) โดยที่แต่ละชั้นตอนจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละ 2 เท่า ซึ่ง สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

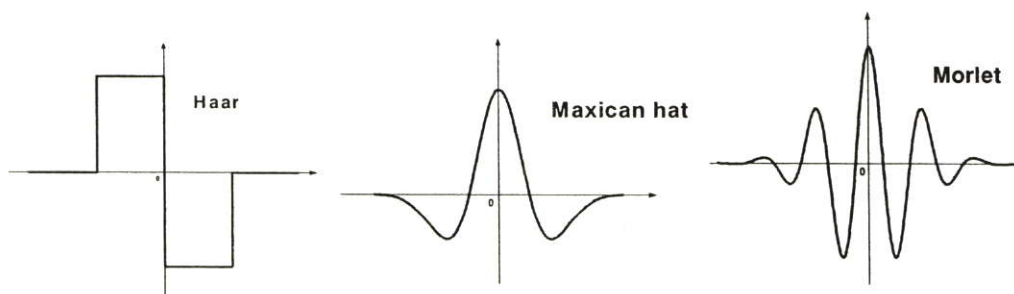


รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ต โดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ [19]

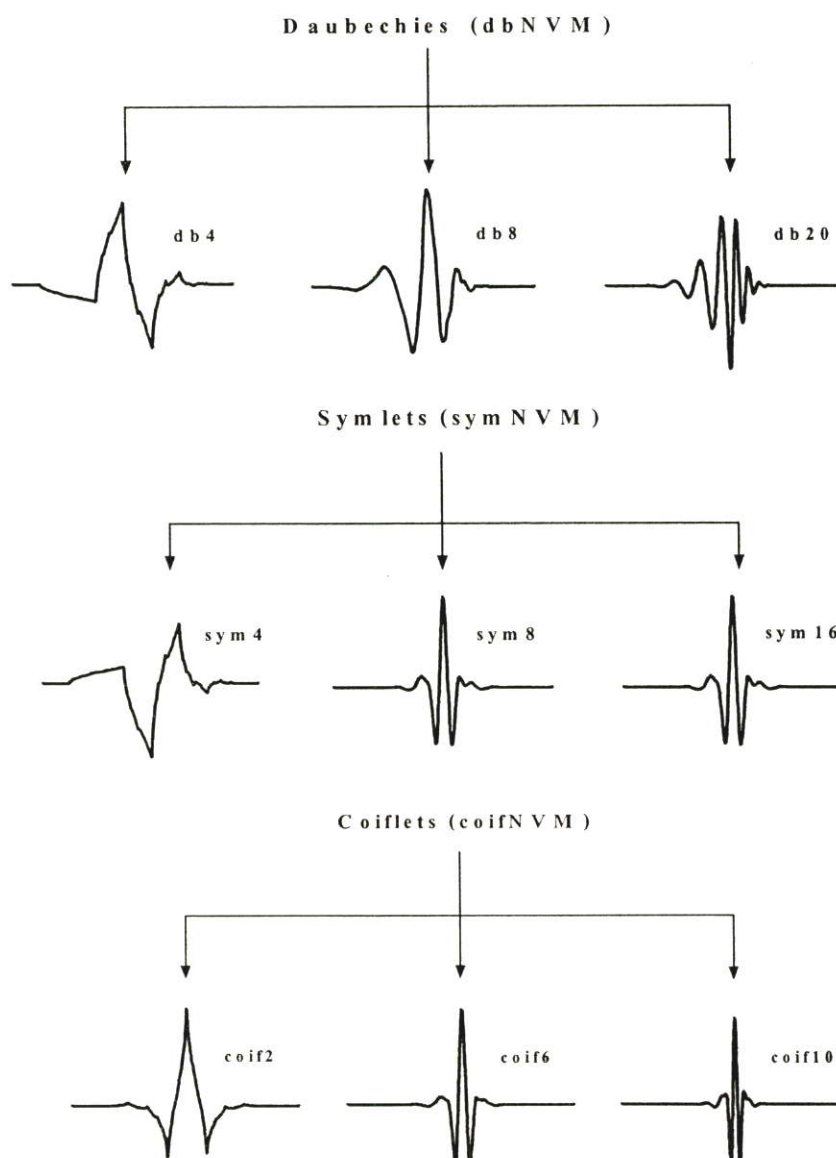
จากรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นลักษณะของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในลักษณะของ dyadic tree structure โดยมีสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยความถี่การสุ่ม =  $f_s$  (sampling rate) จะถูกวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์ 2 ช่องสัญญาณในสเกลที่ 1 ( $2^1$ ) ซึ่งสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 2 ช่วงความถี่ คือส่วนความถี่สูงหรือ detail 1 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{4}$  Hz และส่วนความถี่ต่ำหรือ Approximation 1 มีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - 0$  Hz และในการวิเคราะห์ในสเกลที่ 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 ก็สามารทำได้ซ้ำในลักษณะเดิม ในทางกลับกันก็สามารถที่จะรวมสัญญาณที่ทำการกระจายในหลายๆ ช่วงความถี่ให้กลับมาเป็นสัญญาณเดิมได้

### 3.4 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) [20]

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้ว ยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองสัญญาณนั้นๆ ให้เหมาะสมด้วย สำหรับการแปลงเวฟเล็ตนั้นตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเล็ตแม่นั้นเอง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อยๆ ลงไปอีก ในแต่ละตระกูลจะมีค่า Number of Vanishing Moments (NVM) ที่ายชื่อตระกูล เช่น Daubechies 4, 8, ..., 20, Symmlet 4, 5, 6, ..., 10 เป็นต้น และเนื่องจากรูปแบบของเวฟเล็ตแม่ที่มีความหลากหลายนี้เอง จึงทำให้การแปลงเวฟเล็ตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายประเภท โดยเลือกเวฟเล็ตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่การวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของเวฟเล็ตแม่ได้ดังรูปที่ 3.13 - 3.14



รูปที่ 3.13 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบไม่มีชนิดย่อย



รูปที่ 3.14 แสดงเวฟเลตแม่แบบมีชนิดย่อย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยมาใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้า ซึ่งทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาหลายช่วงความถี่ (สเกล) แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสำหรับการเลือกชนิดของเวฟเลตนั้นได้เลือกใช้เป็นแบบ daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น ฟอลต์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี [21,22] เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ที่น้อยเพียง 4 ตัว โดยสามารถแบ่งลักษณะการประยุกต์การแปลงเวฟเลตมาใช้วิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet Decomposition) โดยจะเลือกพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง (detail) เท่านั้น และการรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction) ให้จำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับสัญญาณต้นแบบที่วิเคราะห์

## บทที่ 4

# ทฤษฎีเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซี่โลจิก

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซี่โลจิกมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เช่น ระบบโครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาใช้กับระบบนักบินอัตโนมัติ (Auto pilot aircraft), เครื่องมือหาปลา (Sonar) ที่มีความฉลาดมากขึ้น และสำหรับฟัซซี่โลจิกนั้นมีการประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งพบได้ในประเทศญี่ปุ่น แต่ค่อนข้างน้อยในประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากในสหรัฐอเมริกามีแนวโน้มในการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการแก้ไขปัญหา เช่นเดียวกันกับระบบผู้เชี่ยวชาญหรือโครงข่ายประสาทเทียมมากกว่า โดยในประเทศญี่ปุ่นนั้นจะใช้ฟัซซี่โลจิกสำหรับงานสร้างเส้นทางเดินรถไฟ, ลิฟท์, การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ, ระบบย่อยในยานพาหนะ เช่น ระบบห้ามล้อแบบกันล้อตาย (ABS) และอุปกรณ์คงความเร็วรถ (cruise control) เป็นต้น นักวิจัยทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม หรือฟัซซี่โลจิกเข้ามาแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load forecasting), ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างมีประสิทธิภาพ (Economics load dispatch) และการคำนวณความเชื่อถือได้ เป็นต้น ในบทนี้จึงเป็นการอธิบายหลักการเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองฟัซซี่โลจิกเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

### 4.1 ระบบโครงข่ายประสาทเทียม

ความพยายามที่จะทำความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของสมองมนุษย์ได้มีมานานนับศตวรรษ เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1890 William James นักสรีรศาสตร์ชาวอเมริกันได้แต่งหนังสือชื่อ Psychology (Briefer Course) ซึ่งอธิบายถึงการทำงานของสมองและยังกล่าวถึงทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยปัจจุบันนี้โครงข่ายประสาทได้ถูกพัฒนาค้นคว้าวิจัยและนำไปใช้งานในด้านต่างๆ อย่างมากมาย อาทิเช่น วิทยาศาสตร์ด้านระบบประสาท, การเงินการธนาคาร, ด้านคณิตศาสตร์, การแพทย์, ระบบสื่อสาร รวมไปถึงงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอีกด้วย จึงถือได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลานี้ และในอนาคตโครงข่ายประสาทเทียมจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของระบบผสม (hybrid systems) จากระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert systems), ฟัซซี่โลจิก (fuzzy logic) และการแปลงเวฟเล็ต (wavelet transform) เป็นต้น จึงอาจกล่าวได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมยังคงได้รับการพัฒนาทั้งทางด้านทฤษฎี, การออกแบบ และการนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาวิชาชีพต่างๆ ต่อไปในอนาคต

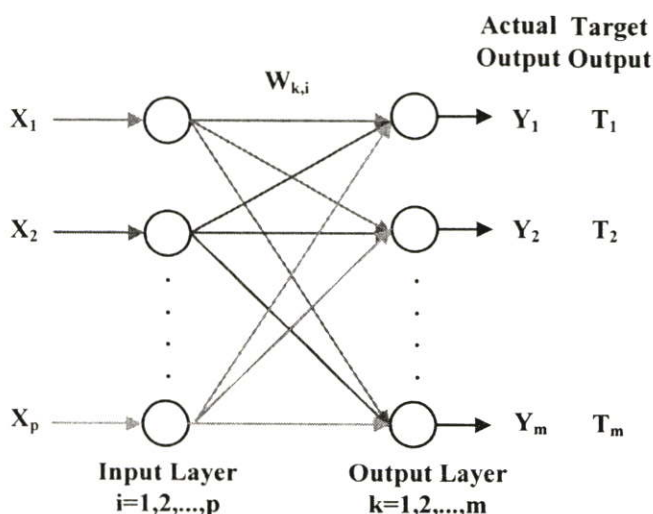
#### 4.1.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks) [23]

การสร้างเซลล์ประสาทเพียงหนึ่งเซลล์ โดยใช้แนวความคิดจากเซลล์ประสาทชีวภาพ การจะนำเซลล์ประสาทเทียมมาใช้งานได้นั้น ต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมที่มีคุณลักษณะต่างๆ กัน (ค่าถ่วงน้ำหนักจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์ประสาทเทียมแต่ละเซลล์มีคุณลักษณะแตกต่างกันไป) มาเชื่อมต่อเซลล์ประสาทหลายๆ ตัวเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่าชั้นหรือเลเยอร์ (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมต่อถึงกัน โดยปกติแล้ว นิวรอนในชั้นเดียวกันมีพฤติกรรมในทางเดียวกัน ดังนั้นตัวตัดสินใจพฤติกรรมของนิวรอนจึงเป็นฟังก์ชันกระตุ้นและรูปแบบการเชื่อมโยงค่าถ่วงน้ำหนักของนิวรอนในชั้นนั้น

การจัดวางนิวรอนเข้าสู่ชั้น (Layer) และการเชื่อมโยงรูปแบบภายในระหว่างชั้นเรียกว่า โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม ประเภทของโครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียม พอดีแบ่งออกเป็น 3 แบบ ซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network)

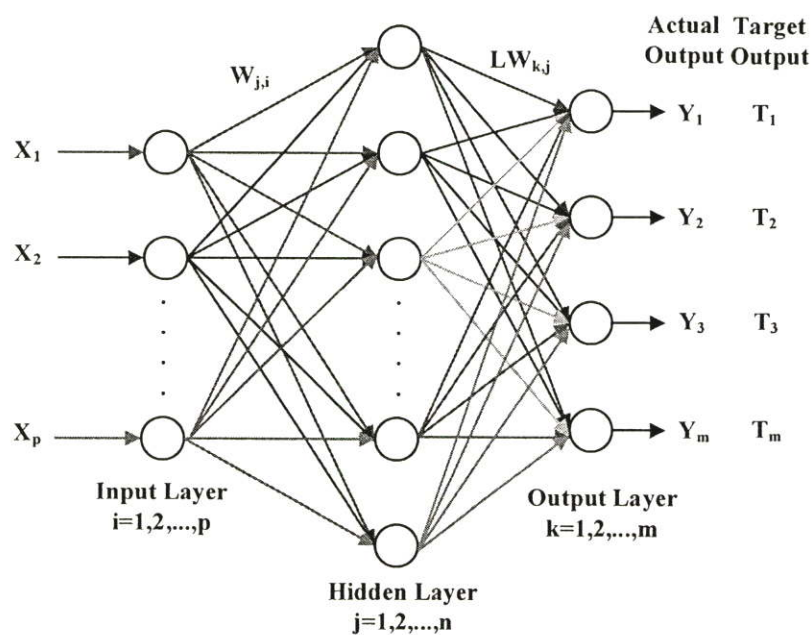
ประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทที่จัดเรียงตัวอยู่ในชั้นต่างๆ อันได้แก่ ชั้นอินพุต และชั้นเอาต์พุต สาเหตุที่จัดโครงสร้างแบบนี้เป็นแบบชั้นเดียว เนื่องจากเรานับชั้นเอาต์พุตเพียงชั้นเดียวเท่านั้นว่าเป็นชั้นของเซลล์ประสาท สำหรับชั้นอินพุตเราไม่พิจารณาว่าเป็นชั้นของเซลล์ประสาทก็เพราะเป็นชั้นที่ไม่มีการประมวลใดๆ จะทำหน้าที่เพียงแต่รับข้อมูลอินพุตเข้ามาและส่งต่อไปกับชั้นถัดไปเท่านั้น จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

#### 4.1.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network)

สืบเนื่องมาจากในปี 1969 Minsky และ Seymour Papert ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวมีข้อจำกัด และไม่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ ในบางกรณีได้ นักวิจัยจึงได้นำเสนอรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ซึ่งโครงสร้างจะประกอบขึ้นจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับรวมชั้นอินพุต) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะประกอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียวหลายๆ ตัวต่ออยู่ในโครงสร้างที่มีลำดับชั้นลดตื้นกันลงไป โดยอยู่ในรูปของการทำงานที่ป้อนไปข้างหน้า (Feedforward) ซึ่งชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งชั้นซ่อนนี้เองที่เป็นตัวเพิ่มขีดความสามารถให้แก่โครงข่าย ทั้งนี้จำนวนของชั้นซ่อนสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้น จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของนิวรอนในแต่ละชั้นจะมีค่าไม่คงที่ โดยแต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน

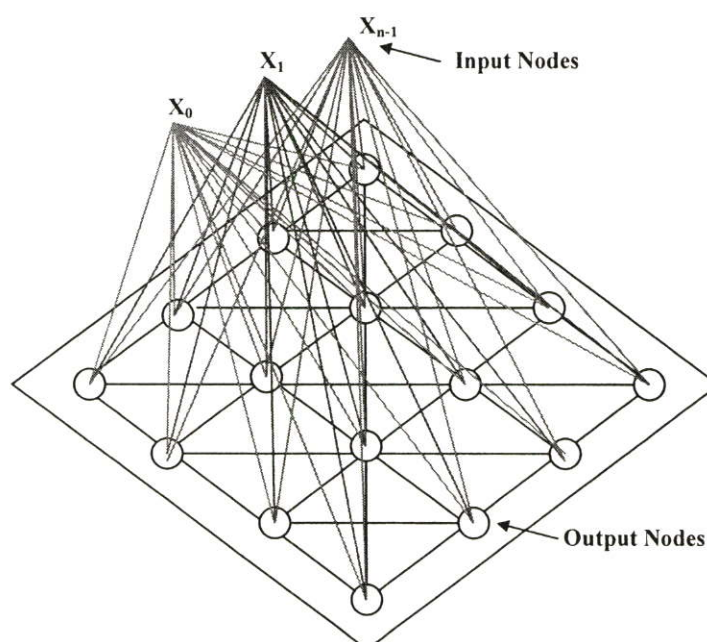


รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

จากรูปที่ 4.2 ชุดข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากชั้นหนึ่งจะถูกส่งให้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับชั้นต่อไป โดยค่าเอาต์พุตในชั้นสุดท้ายซึ่งก็คือ เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ (Target Output) ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้จะถูกนำไปใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมให้เปลี่ยนไปในทางที่ถูกต้องมากขึ้น

#### 4.1.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ (Lattice Neural Network)

โครงสร้างแบบแลตทิซนี้อาจจะประกอบด้วยอาร์เรย์ (Array) ของนิวรอนเพียงมิติเดียว (One Dimension) หรือหลายมิติก็ได้ แต่ละนิวรอนจะรับข้อมูลจากโนคอินพุท มิติของโครงสร้างแบบแลตทิซ คือ มิติการจัดเรียงนิวรอน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับมิติของรูปทรงได้ดังนี้ มิติเดียวสำหรับโครงสร้างแบบแลตทิซหมายถึง การจัดเรียงนิวรอนในแนวนอนหรือแนวตั้งอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงแถวเดียว กรณี 2 มิติสำหรับโครงสร้างแบบแลตทิซเป็นการจัดเรียงนิวรอนทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง และสำหรับรูปทรง 2 มิติหมายถึง รูปทรงนั้นมีทั้งความกว้างและความยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างโครงสร้างแบบ 2 มิติที่มีขนาดนิวรอน 4x4 นิวรอน



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ

ตัวอย่างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการจัดเรียงเช่นนี้ คือ โครงข่ายประสาทเทียมชนิด Self Organizing Maps ซึ่งจะมีโนคคอมแพ็คติฟที่พัวเรียงกันระนาบสองมิติ การเชื่อมโยงภายในระหว่างนิวรอนในชั้นคอมแพ็คติฟมีการเชื่อมโยงอย่างทั่วถึง เมื่อโนคคอมแพ็คติฟที่รับข้อมูลอินพุทจากชั้นอินพุทแล้ว จะนำข้อมูลไปประมวลผลหาโนคที่เป็นตัวแทนอินพุท โดยเลือกโนคที่ค่าอินพุทและค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมกับโนคนั้นแตกต่างกันน้อยที่สุด และเรียกโนคนี้ว่า โนคชนะ (winner node) แล้วปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้โนคชนะและ โนคข้างเคียงที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่ข้างเคียงที่กำหนดไว้เท่านั้น

#### 4.1.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights) [23]

ค่าถ่วงน้ำหนัก มีความสัมพันธ์กับอะไร และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร นั่นก็เช่นเดียวกันกับเด็กที่คลอดออกมาก็มีสมองแล้วแต่สมองยังไม่เจริญเติบโตเพียงพอและยังไม่ได้รับการฝึกสอนและเรียนรู้ เด็กจึงไม่สามารถทำกิจกรรมใดๆ ได้ด้วยตัวเอง เว้นแต่กิจกรรมที่ธรรมชาติสร้างมาพร้อมกับการกำเนิดที่เรียกว่า “สัญชาตญาณ” ซึ่งธรรมชาติใส่คุณลักษณะบางอย่างให้เซลล์สมองบางส่วน ตั้งแต่ทารกเจริญเติบโตอยู่ครรภ์มารดา เช่น ระบบควบคุมการหายใจ, การเรียกร้องเมื่อหิว, ความรู้สึกต่างๆ เป็นต้น เด็กจะพัฒนาการเรียนรู้ไปตามขั้นตอน หลังจากนั้นสมองของเขาจะได้รับการฝึกสอน และเจริญเติบโตไปพร้อมกัน เซลล์สมองจะได้รับการปรับคุณลักษณะสอดคล้องกับการฝึกสอน และจะเจริญเติบโตเป็นโครงข่ายสอดคล้องกัน

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมาจะมีลักษณะเดียวกัน คือเมื่อสร้างเซลล์ประสาทเสร็จแต่ละเซลล์ เซลล์ประสาทที่สร้างขึ้นมานั้น จะไม่มีคุณลักษณะใดๆเลย เนื่องจากยังไม่มีกำหนดค่าซินแนปติกส์เวกท์ที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการให้กับมัน จึงต้องมีการฝึกสอนเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมจะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าซินแนปติกส์เวกท์เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมจดจำรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตได้ โดยในขั้นตอนแรกอาจกำหนดเป็นค่าสุ่มใดๆ (Random weight) ก่อนแล้วถึงปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปตามอัลกอริทึมสมมติฐานหลายๆ รอบ จนกว่าจะได้เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม เหมือนกับเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการ ตามเงื่อนไขความผิดพลาดที่ยอมรับได้

#### 4.1.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

ฟังก์ชันกระตุ้นหรือหนังสือบางเล่มเรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุต จึงกล่าวได้ว่า การเลือกฟังก์ชันกระตุ้นสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมได้อย่างมาก สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบใดนั้นนับถึงปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอน ถึงแม้ว่าสิ่งนี้ไม่ได้กำหนดไว้ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วฟังก์ชันกระตุ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นถูกใช้สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อน ถ้าในชั้นซ่อนนั้นไม่มีความเป็นเชิงเส้น ในชั้นซ่อนไม่สามารถสร้างนิเวศน์ให้มีความสามารถซึ่งเปรียบเสมือนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด perceptrons แบบทั่วไป สำหรับชั้นซ่อนแล้ว ฟังก์ชันชนิดซิกมอยด์และเกาส์เซียน (sigmoid functions and gaussian functions) เป็นฟังก์ชันที่นิยมเลือกนำมาใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่จะเลือกฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันมาตรฐาน หนึ่งในลักษณะเด่นของฟังก์ชันซิกมอยด์นั้นคือฟังก์ชันชนิดนี้สามารถหาอนุพันธ์ได้ ความสามารถนี้เมื่อนำไปใช้ในงานฝึกสอนโครงข่ายที่มีหลายชั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถของโครงข่ายอย่างมาก ในปัจจุบันฟังก์ชันซิกมอยด์มีอยู่หลายประเภท เช่น ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ (tanh) ที่ทำให้เกิดค่าในทั้งบวกและลบ (-1,+1) ซึ่งมีแนวโน้ม

ที่จะฝึกสอนเร็วกว่าฟังก์ชันที่ทำให้เกิดเฉพาะค่าบวก (0,1) เช่น ฟังก์ชันโลจิสติก เนื่องจากเงื่อนไขเชิงตัวเลขและความเป็นสมมาตรของตัวฟังก์ชันดีกว่า

สำหรับชั้นเอาต์พุตควรเลือกฟังก์ชันกระตุ้นให้เหมาะสมกับการกระจายของค่าเอาต์พุตเป้าหมาย เช่น สำหรับค่าเอาต์พุตเป้าหมายต่อเนื่องที่มีช่วงขอบเขต ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์สามารถนำไปใช้งานได้, สำหรับค่าเอาต์พุตเป้าหมายต่อเนื่องที่ไม่ทราบขอบเขต จะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear activation function) เป็นต้น กล่าวโดยสรุปก็คือในการเลือกฟังก์ชันกระตุ้นของชั้นเอาต์พุตควรทราบขอบเขตที่ต้องการและลักษณะของข้อมูลเอาต์พุต รวมไปถึงความเป็นเชิงเส้น หรือไม่เป็นเชิงเส้น

#### 4.1.4 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs)

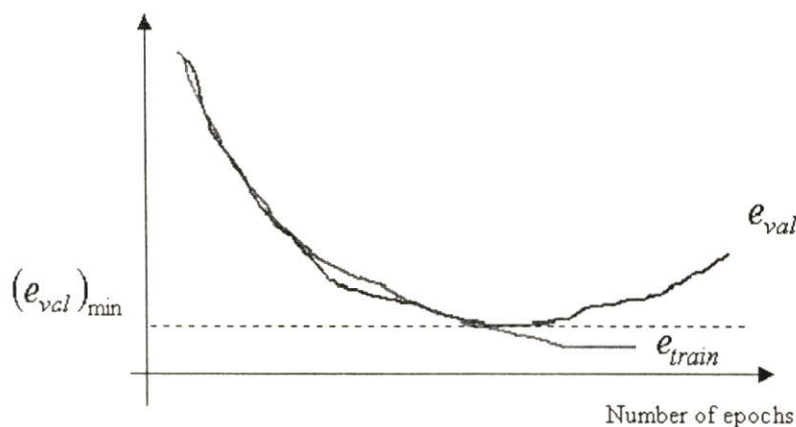
ในโครงข่ายประสาทเทียมนั้นข้อมูลหรือตัวอย่าง (sample) ประกอบไปด้วยชุดข้อมูลฝึกสอน (Training set), ชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation set) และชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) โดยมีรายละเอียดดังนี้ [24,25]

ชุดฝึกสอน (Training set) : ชุดของตัวอย่างใช้เพื่อเรียนรู้ว่ามีพารามิเตอร์ (เช่น ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของการแบ่งประเภท

ชุดตรวจสอบ (Validation set) : ชุดของตัวอย่างใช้ปรับพารามิเตอร์ (เช่น โครงสร้างไม่ใช่ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของการแบ่งประเภท สำหรับตัวอย่างที่เลือกจำนวนของชั้นซ่อนในโครงข่ายประสาทเทียม

ชุดทดสอบ (Test set) : ชุดของตัวอย่างใช้ประเมินการปฏิบัติของการแบ่งประเภทที่ระบุไว้

กล่าวโดยสรุปก็คือ ชุดทดสอบเป็นชุดข้อมูลที่ไม่เคยใช้เพื่อเลือกกระหว่าง 2 โครงข่าย ส่วนชุดตรวจสอบเป็นชุดข้อมูลใดๆ ที่ใช้เพื่อตัดสินใจหยุดการฝึกสอนเท่านั้น โดยตรวจสอบค่าผิดพลาดและค่าผิดพลาดของชุดตรวจสอบที่ได้นี้ จะถูกนำไปใช้ในการเลือกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (จำนวนชั้นซ่อนและจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ) ยกตัวอย่างเช่น จากรูปข้างล่าง ทำการวาดกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ค่าผิดพลาดของชุดตรวจสอบ ( $e_{val}$ ) และฝึกสอน ( $e_{train}$ ) ณ ช่วงสิ้นสุดในแต่ละรอบการฝึกสอน ตามลำดับ ในแต่ละรอบดังแสดงตามรูปที่ 4.4 โดยปกติในการพิจารณาเลือกโครงข่ายที่ดีที่สุด ควรพิจารณากับชุดตรวจสอบ ไม่ควรพิจารณากับชุดทดสอบและชุดฝึกสอน จากรูปข้างล่างนี้ ควรหยุดฝึกสอน ณ ค่าผิดพลาดของชุดตรวจสอบ ( $e_{val}$ ) มีค่าต่ำสุดหรือมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของชุดฝึกสอน ( $e_{train}$ ) กับชุดตรวจสอบ ( $e_{val}$ )

เมื่อทำความเข้าใจกับพารามิเตอร์เหล่านี้ หัวข้อถัดไปจะขอกกล่าวถึงพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox [26]

#### 4.1.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network)

มีข้อดีอยู่หลายข้อที่ถูกนำเสนอโดยโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ซึ่งได้มีการกระตุ้นความพยายามเพื่อแยกประเภทด้วยวิธีเบย์เซียน (Bayesian) เข้าไปสู่แบบจำลองทั่วไป โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) มีโครงสร้างโดยใช้ความคิดจากทฤษฎีความน่าจะเป็นมาทำการแบ่งประเภท (Classical probability theory) เช่น การแบ่งประเภทของเบย์เซียน (Bayesian) และ ตัววิเคราะห์แบ่งประเภทสำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density functions : PDFs) เพื่อทำเป็นรูปแบบให้กับโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับรูปแบบการแบ่งประเภทของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ถูกนำมาใช้จนประสบความสำเร็จเกี่ยวกับการแก้ปัญหาที่หลากหลายกลุ่มของปัญหาสำหรับการแบ่งประเภท ถึงแม้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นยังไม่เคยถูกประเมินอย่างเต็มที่เพื่อจะเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ปฏิบัติตามคุณสมบัติ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นอาจจะปรากฏเป็นอีกหนึ่งแนวทางสำหรับปัญหาการแบ่งประเภทที่แตกต่างมากมาย

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นถูกนำเสนอข้อดีหรือประโยชน์หลักๆ ดังนี้

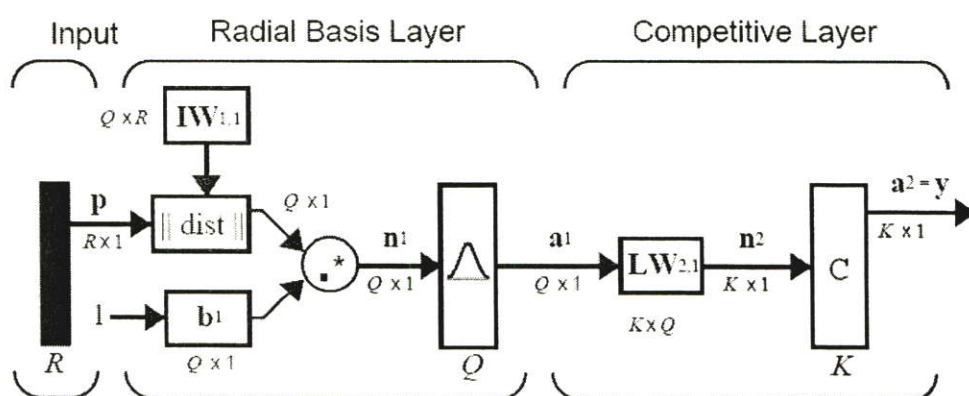
1. การฝึกสอนอย่างรวดเร็ว การฝึกสอนซ้ำๆ ที่ใช้เวลาเป็นวันหรือสัปดาห์ของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) ถูกแทนที่โดยการเรียนรู้หรือฝึกสอนที่น้อยกว่าในชุดฝึกสอน
2. ข้อมูลฝึกสอนเพียงพอ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นถูกรับประกันเพื่อเข้าสู่แยกประเภทด้วยเบย์เซียน (Baysian) ทั้งที่การตัดสินใจตามความพอใจที่ซับซ้อน สัมพันธ์

ระหว่างเวกเตอร์ฝึกสอนและการแบ่งประเภท เหล่านี้ไม่สามารถรับประกันด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP)

3. แนวคิดโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะยอมให้ข้อมูลเพิ่มหรือลบออกจากชุดฝึกสอนโดยปราศจากการฝึกสอนใหม่ที่ใช้เวลาอันยาวนานไป ในขณะที่การแก้ไข (การเปลี่ยนแปลง) ใดๆ ชุดฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) โดยทั่วไปจะต้องทำซ้ำในกระบวนการฝึกสอนทั้งหมด
4. การเรียนรู้ของโครงข่ายมีความสามารถในการเรียนรู้สลับซับซ้อนสัมพันธ์กันระหว่างเวกเตอร์ฝึกสอนและการแบ่งประเภทที่ถูกต้องเหล่านั้น
5. หลักการทั่วไป อินพุตที่คล้ายกันแต่ไม่เหมือนกัน ในชุดฝึกสอนเหล่านั้นจะมีการกำหนดขอบเขตภายในเพื่อแบ่งประเภทอย่างเหมาะสม ดังนั้นข้อผิดพลาดหรือการฝึกสอนที่ไม่สมบูรณ์หรือข้อมูลอินพุตที่ไม่เหมาะสมกันจะไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อความถูกต้องสำหรับการแบ่งประเภท

### 1) โครงสร้าง

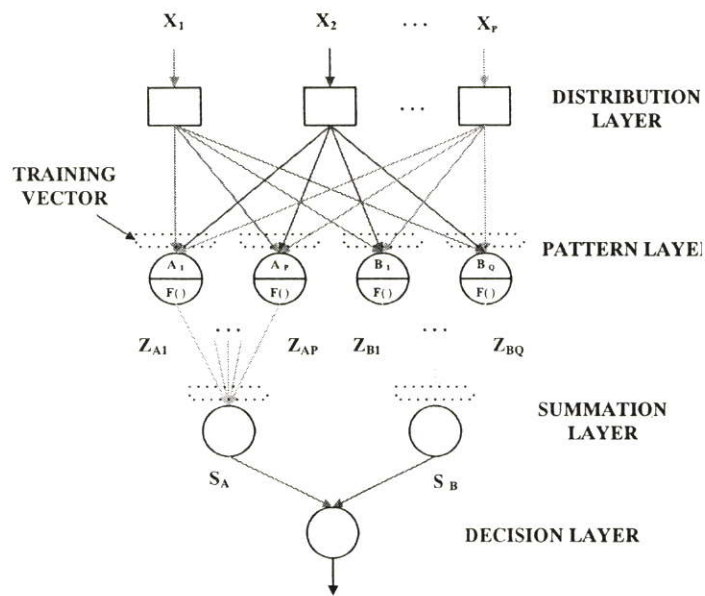
โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic neural network : PNN) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย ชั้นอินพุต (Input layer), ชั้นซ่อนหรือบางครั้งเรียกว่าชั้นฐานรัศมี (Radial basis layer) และ ชั้นเอาต์พุตหรือบางครั้งเรียกว่าชั้นคอมแพติทีฟ (Competitive layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อถึงกันหมด นั่นคือ ทุกๆ นิวรอนในชั้นอินพุตจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมี และทุกๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมีจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุต จากรูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น



รูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น [26]

## 2) แนวคิด [23]

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นในช่วงยุคแรกจะทำงานด้วยตัวแบ่งประเภทของเบย์เซียน (Bayesian) สำหรับแบ่งประเภทเวกเตอร์อินพุตเข้าสู่หนึ่งในสองประเภท (ประเภท A และ B) ประกอบด้วยโครงสร้างสี่ชั้น คือ ชั้นการกระจาย (distribution layer) หรือในบางครั้งเรียกว่าชั้นอินพุต (Input layer), ชั้นรูปแบบ (pattern layer), ชั้นผลรวม (summation layer) และชั้นสุดท้ายเรียกว่า ชั้นการตัดสินใจ (decision layer) หรือบางครั้งเรียกว่าชั้นเอาต์พุต (Output layer) ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองพื้นฐานสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น [27]

จากรูปที่ 4.6 ทฤษฎีเบส์ (Bayes theorem) เตรียมวิธีสำหรับดำเนินการแบ่งประเภทอย่างเหมาะสม กฎการตัดสินใจเบส์ (Bayes) กล่าวไว้ว่า เวกเตอร์อินพุตควรจะถูกแบ่งประเภทเหมาะสมกับประเภท A ถ้า

$$D(x) = \theta_A \text{ ถ้า } h_A l_A f_A(x) > h_B l_B f_B(x) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $D(x)$  คือ การตัดสินใจ (เอาต์พุต) ของเวกเตอร์ทดสอบ  $x$

$\theta_A$  คือ ประเภท A

$h_A$  คือ ความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นของเวกเตอร์ฝึกสอนสำหรับประเภท A มีค่าเป็น  $\frac{n_A}{n_{total}}$

$l_A$  คือ ความสูญเสียจากการวางเวกเตอร์ไม่เหมาะสมเข้าสู่ประเภท B ทั้งที่ควรจะเหมาะสมกับประเภท A

$f_A(x)$  คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสำหรับประเภท A  
 $h_B, l_B, f_B(x)$  และ  $\theta_B$  มีค่านิยามที่เหมือนกันแต่จะประยุกต์ใช้สำหรับประเภท B

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นใช้ตัวประมาณสำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังต่อไปนี้

$$f_A(x) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} \sigma^p} \frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^{n_A} \exp \left[ -\frac{(X - Y_{Ai})^t (X - Y_{Ai})}{2\sigma^2} \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $i$  คือ จำนวนเวกเตอร์ฝึกสอน

$p$  คือ จำนวนขององค์ประกอบในเวกเตอร์ฝึกสอน

$\sigma$  คือ ค่าตัวแปรทำให้ราบเรียบ

$n_A$  คือ จำนวนของเวกเตอร์ฝึกสอนในประเภท A

$X$  คือ เวกเตอร์ทดสอบที่จะนำมาแบ่งประเภท

$Y_{Ai}$  คือ เวกเตอร์ฝึกสอนตัวที่  $i$  สำหรับประเภท A

$t$  คือ การสลับตำแหน่งเวกเตอร์ (vector transpose)

สัมพันธ์ภาพกับโครงข่ายประสาทเทียมปกติ อาจจะเคยพบอย่างชัดเจนเป็นส่วนใหญ่ ถ้าทั้งเวกเตอร์ฝึกสอนและเวกเตอร์ทดสอบถูกนอร์มัลไลซ์ (normalized) ในกรณีนอร์มัลไลซ์เทอมเอกซ์โพเนนเชียล ในสมการที่ 4.2 อาจจะถูกทำให้เข้าใจง่ายเป็น  $(X - X_{Ri})^t (X - X_{Ri})$  และสามารถอธิบายได้เป็น

$$(X^t X - 2X^t X_{Ri} + X_{Ri}^t X_{Ri}) \quad (4.3)$$

แต่  $X^t X = X_{Ri}^t X_{Ri} = 1$  เนื่องจากการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) ดังนั้นสมการนี้กลายเป็น

$$-2(X^t X_{Ri} - 1) \quad (4.4)$$

เพราะฉะนั้น

$$D(X) = \theta_R \quad \text{ถ้า} \quad \sum_{i=1}^{nR} \exp \left[ \frac{X^t X_{Ri} - 1}{\sigma^2} \right] \geq \sum_{i=1}^{nS} \exp \left[ \frac{X^t X_{Si} - 1}{\sigma^2} \right] \quad (4.5)$$

โครงข่ายในรูปที่ 4.6 สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เวกเตอร์อินพุต  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ถูกแบ่งประเภทเพื่อเป็นการประยุกต์นิวรอนในชั้นการกระจาย (distribution layer) ชั้นนี้เหมาะสำหรับเป็นจุดเชื่อมโยงเท่านั้น (นิวรอนไม่มีการคำนวณ)

ชุดของค่าถ่วงน้ำหนักเข้าชั้นรูปแบบ (pattern layer) นิวรอนแสดงเวกเตอร์ฝึกสอนจำเพาะแต่ละค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าองค์ประกอบของเวกเตอร์นั้น นอกจากนี้ นิวรอนชั้นรูปแบบถูกจัดเป็นกลุ่มการแบ่งประเภทที่ไว้วางใจซึ่งสัมพันธ์กับเวกเตอร์ฝึกสอน แต่ละนิวรอนชั้นรูปแบบ (pattern layer) ผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักอินพุตจากทุกๆ นิวรอนชั้นกระจาย (distribution layer) ดังนั้นใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น  $f(\bullet)$  เพื่อผลรวมจนกระทั่งประมวลผลเอาต์พุต  $Z_{ci}$ , เมื่อตัวห้อยตัวแรก ( $c$ ) แสดงชั้นของเวกเตอร์ฝึกสอนที่เชื่อมโยง และตัวห้อยที่สอง ( $i$ ) แสดงนิวรอนชั้นรูปแบบ (pattern layer) ที่คำนวณในชั้นนั้น

เนื่องจากชุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงกับนิวรอนรูปแบบ (pattern neuron) แสดงถึงเวกเตอร์ฝึกสอน  $X_{Ri} = (X_{R1}, X_{R2}, \dots, X_{Rn})$  นิวรอนรูปแบบจะทำการคำนวณ  $X_{R1}X_1 + X_{R2}X_2 + \dots + X_{Rn}X_n = X_{Ri}^t X_i$  ผลคูณแบบจุด (dot product) จำเป็นเพื่อนำไปดำเนินการกับสมการที่ 4.2  $Z_{ci}$  ถูกลบด้วย 1 หารด้วย  $\sigma^2$  และประยุกต์ใช้ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (exponential function) ดังนั้น ผลลัพธ์จึงได้เป็น

$$Z_{ci} = \exp \left[ \frac{X_{Ri}^t X_i - 1}{\sigma^2} \right] \quad (4.6)$$

แต่ละนิวรอนในชั้นผลรวม (Summation layer) ได้รับเอาต์พุตชั้นรูปแบบ (pattern layer) ทั้งหมดเชื่อมโยงกับประเภทที่ยื่นให้ ถ้า 10 นิวรอนในชั้นรูปแบบ (pattern layer) แต่ละตัวคำนวณฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล สำหรับประเภทที่ 1 เอาต์พุตชั้นรูปแบบ (pattern layer) ทั้งหมดถูกรวมตัวด้วยนิวรอนชั้นผลรวม (Summation layer) เพียงหนึ่งเดียว ดังนั้นเอาต์พุตของแต่ละนิวรอนชั้นผลรวม (Summation layer) คือ

$$S_c = \sum_{i=1} \exp \left[ \frac{X^t X_{Ri} - 1}{\sigma^2} \right] \quad (4.7)$$

ในชั้นตัดสินใจ (decision layer) แต่ละนิวรอนที่แทนแต่ละประเภทจะทำการเปรียบเทียบคำตอบเอาต์พุตให้มีเพียงหนึ่งเดียวและมีค่าเป็น 1 กล่าวคือ ถ้า  $S_a$  มีขนาดมากกว่า  $S_b$  จะมีค่าเป็น

หนึ่ง แต่ถ้าไม่ใช่จะมีค่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้ การแสดงประเภทของเวกเตอร์อินพุตปัจจุบัน เทคนิคนี้สามารถถูกนำไปขยายอย่างง่าย ๆ เพื่อตัดสนใจจำนวนของประเภทโดยเพิ่มกลุ่มของนิเวรอนชั้นรูปแบบ (pattern layer) และนิเวรอนชั้นผลรวม (Summation layer) สำหรับแต่ละประเภท

จากที่กล่าวมาข้างต้น เป็นขั้นตอนแนวคิดพื้นฐาน ต่อไปจะเป็นขั้นตอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

จากรูปที่ 4.6 เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ( $P_R, R = 1, \dots, R$ ) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิเวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป ในช่วงรอบแรกๆ แต่ละนิเวรอนในชั้นฐานรัศมี ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ ในชั้นฐานรัศมี ( $iw_{Q,R}^{1,1} = Q = N$ ) ขณะนั้น จะทำการคำนวณสัญญาณเอาต์พุตของนิเวรอนเซลล์ในชั้นฐานรัศมี ( $a^1$ ) ได้จากสมการ

$$a_Q^1 = \exp\left(-\frac{\|P_R - iw_{Q,R}^{1,1}\|^2}{2\sigma_Q^2}\right) \quad (4.8)$$

จากสมการที่ 4.8 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$a^1 = \exp\left(-\sqrt{\sum_{R=1}^R (iw_{Q,R}^{1,1} - P_R)^2} * b_Q^1\right)^2 \quad (4.9)$$

$$\text{โดยที่ } b_Q^1 = \frac{\sqrt{-\ln(0.5)}}{spread} = \frac{0.8326}{spread}$$

*spread* คือ ค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี (พิจารณาตามตารางที่ 4.1)

เมื่อ สัญญาณเอาต์พุต ( $a^1$ ) ในชั้นฐานรัศมี เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุต โดยแต่ละนิเวรอนในชั้นเอาต์พุต ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในชั้นเอาต์พุต ( $lw_{K,Q}^{2,1}$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิเวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุต ได้จากสมการ

$$net_K = \sum_{K=1}^K lw_{K,Q}^{2,1} a_Q^1 \quad (4.10)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อกำหนดสัญญาณเอาต์พุต ( $a^2$ ) ในชั้นเอาต์พุตจะได้

$$a^2 = f(\text{net}_K) \quad (4.11)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับ โดยเพิ่มจำนวนรอบค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัสมิ (spread) ทีละรอบ และดำเนินการปรับค่าไบอัสและค่าถ่วงน้ำหนักเช่นนี้ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหมดจำนวนรอบที่ฝึกสอนจึงจะหยุดการฝึกสอน

## 4.2 ระบบฟัซซีโลจิก [28,29]

ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set) และฟัซซีโลจิกได้ถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1965 โดย ดร. ลอตฟี เอ ซาเดห์ (Lotfi A. Zadeh) ซึ่งนำเสนอแนวคิดการให้ค่าตรรกೆಯคลุมเครือ หรือฟัซซี สำหรับอธิบายเหตุการณ์ต่างๆ โดยใช้หลักการวิเคราะห์หัตถระของเหตุการณ์ที่อาจจะมีความขัดแย้ง หรือคลุมเครือไม่ชัดเจน ซึ่งภายหลังจากนั้น ได้มีผู้นำเอาทฤษฎีนี้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้กับงานระบบควบคุมประมวลผลสัญญาณดิจิทัล, การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และอื่นๆอีกมากมาย เช่น การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ, ระบบไฟก๊สในกล้องดิจิทัล เป็นต้น

### 4.2.1 คริปส์เซตและฟัซซีเซต (Crisp Sets and Fuzzy Sets)

คริปส์เซตคือกลุ่มที่รวบรวมสิ่งของที่แตกต่างกันโดยแยกเอาองค์ประกอบออกเป็นสองกลุ่มต่างๆ กันคือ “เป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิก” เราสามารถกำหนดฟังก์ชันที่เรียกว่า ฟังก์ชันคุณลักษณะ (Characteristic function) หรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยให้ U เป็นเอกภพสัมพัทธ์ (universal set) มีค่าความเป็นสมาชิก  $\mu_A(x)$  ของคริปส์เซต A ใน U จะมีค่าเป็น  $\{0,1\}$  และได้กำหนดค่าความเป็นสมาชิก  $\mu_A(x) = 1$  ถ้า x เป็นสมาชิกของ A เช่น  $x \in A$  และ  $\mu_A(x) = 0$  เราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{If and only } X \in A \\ 0 & \text{If and only } X \notin A \end{cases} \quad (4.12)$$

ฟัซซีเซตจะมีความแตกต่างจากคริปส์เซตคือ ในระบบคริปส์เซตจะสามารถบอกได้เพียงว่า x เป็นสมาชิกของเซต A (ค่าความเป็นสมาชิก=1) หรือไม่เป็นสมาชิกของเซต A (ค่าความเป็นสมาชิก=0) แต่ในฟัซซีเซตนั้น จะสามารถยอมรับสมาชิกที่มีลักษณะถูกต้องเพียงบางส่วนหรือผิดเพียงบางส่วน กล่าวคือ จะมีค่าระดับความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วงระหว่าง  $[0,1]$  สำหรับฟัซซีเซต ถ้า

เรากำหนดให้  $U$  เป็นเซตในลักษณะเอกภพสัมพัทธ์ และฟัซซี่เซต  $A$  ซึ่งมีสมาชิกของเซตเป็น  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  โดยที่  $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  เป็นค่าฟัซซี่เซตแล้ว การแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบฟัซซี่เซตของฟัซซี่เซต  $A$  แทนได้โดย  $\mu_A(x_i)$  ซึ่งทางทฤษฎีเซตเรียกว่า ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i); U \rightarrow [0,1] \quad (4.13)$$

โดยที่  $\mu_A(x_i)$  คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซต  $A$

#### 4.2.2 นิยามพื้นฐานของฟัซซี่เซต

- **นิยาม 3.1** เอกภพสัมพัทธ์ (Universe of Discourse)

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณาจะใช้สัญลักษณ์  $U$  ถ้ากำหนด  $x$  เป็นสมาชิกใดๆของ  $U$  จะสามารถเขียนแทนได้ด้วย  $x \in U$

- **นิยาม 3.2 :** ฟัซซี่เซต (Fuzzy Set)

ถ้า  $A$  เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  จะสามารถเขียนเซต  $A$  แบบแจกแจงสมาชิกได้ในรูปของกลุ่มอันดับ  $x$  และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_A(x)$  ดังนี้ [30]

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (4.14)$$

ถ้า  $U$  เป็นค่าต่อเนื่องจะได้

$$A = \int_U \mu_A(x) / x \quad (4.15)$$

ถ้า  $U$  เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องจะได้

$$A = \sum \mu_A(x) / x \quad (4.16)$$

- **นิยาม 3.3 :** ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต (Membership Function of Fuzzy Set)

ถ้ากำหนดให้  $A$  เป็นฟัซซี่เซต ดังนั้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต  $A$  สามารถแทนได้ด้วย  $\mu_A(x)$  และจะมีค่าอยู่ในย่านเอกภพสัมพัทธ์  $[0,1]$

- **นิยาม 3.4 :** ซัพพอร์ตของฟัซซี่เซต (Support of fuzzy set)

ซัพพอร์ตของฟัซซี่เซต คือคริปส์เซตของสมาชิก  $x$  ในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีอัตราความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตมากกว่า 0 สามารถเขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ดังนี้ [30,31]

$$\sup(A) = \{x \in U / \mu_A(x) > 0\} \quad (4.17)$$

เมื่อ  $A =$  ฟัซซี่ใด ๆ และ  $\sup(A) =$  ซัพพอร์ตของฟัซซี่เซต  $A$

- **นิยาม 3.5 :** ฟัซซี่ซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton)  
ฟัซซี่ซิงเกิลตัน คือซัพพอร์ตของฟัซซี่เซตที่มีสมาชิกเพียงตัวเดียว
- **นิยาม 3.6 :** ศูนย์กลางของฟัซซี่ (Centre of fuzzy)  
ศูนย์กลางของฟัซซี่ คือค่ากึ่งกลางของฟัซซี่เซต หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก
- **นิยาม 3.7 :** จุดแบ่งของฟัซซี่เซต (Crossover point of fuzzy set)  
จุดแบ่งของฟัซซี่เซต คือจุดใดๆในเอกภพสัมพัทธ์ ที่มีอัตราความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5
- **นิยาม 3.8 :** จุดสูงสุดของฟัซซี่เซต (Height of Fuzzy Set)  
ความสูงของฟัซซี่เซต คือค่าสูงสุดของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก
- **นิยาม 3.9 :**  $\alpha$  - cut เซตของฟัซซี่เซต ( $\alpha$  - cut set of fuzzy set)  
 $\alpha$  - cut เซตของฟัซซี่เซต คือคริปส์เซตของสมาชิก  $x$  ทั้งหมดที่มีอัตราความเป็นสมาชิกมากกว่า หรือเท่ากับ  $\alpha$  เขียนแทนด้วย

$$A_\alpha = \{x \in U / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (4.18)$$

### 4.2.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต

สำหรับฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบต่างๆ ที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเซตนั้น มีทั้งที่เป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้น และฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

#### 4.2.3.1 สมการเชิงเส้น

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบสมการเชิงเส้นใช้ในการแปลงค่าความสัมพันธ์จากโดเมนเป็นเรนจ์สำหรับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น แสดงดังสมการที่ 4.19

#### 4.2.3.2 รูปสามเหลี่ยม

เทอมเซตที่กำหนดโดยฟังก์ชันนี้จะต้องมีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวที่ทำให้ค่าการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 สำหรับค่าอื่นๆที่มีค่าห่างจากค่านี้มากเท่าไรก็จะมีค่าการเป็นสมาชิกลดลง

เรื่อยๆ ทั้งนี้ถ้ากำหนดให้  $a$ ,  $b$  และ  $c$  เป็นเลขจำนวนจริงใดๆ โดยที่  $a \leq b \leq c$  เราสามารถแสดงสมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \text{ และ } a \neq b \\ \frac{1}{c-b}(c - x_i) & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \text{ และ } b \neq c \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (4.19)$$

#### 4.2.3.3 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดด้วยสมการรูปสี่เหลี่ยมคางหมู จะมีค่าที่เหมาะสมมากที่สุด อยู่กลุ่มหนึ่งที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซตนั้นๆ มีค่าเท่ากับหนึ่ง นอกจากนั้นจะมีค่าความเป็นสมาน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อยิ่งห่างจากข้อมูลกลุ่มนี้ ถ้ากำหนดให้  $a \leq b \leq c \leq d$  เมื่อ  $a$ ,  $b$ ,  $c$  และ  $d$  เป็นจำนวนจริงใดๆ เราสามารถกำหนดสมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \text{ และ } a \neq b \\ 1 & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \\ \frac{1}{d-c}(d - x_i) & ; \text{ถ้า } c < x_i \leq d \text{ และ } c \neq d \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (4.20)$$

#### 4.2.3.4 เส้นโค้งรูปตัว S

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดด้วยเส้นโค้งรูปตัว S (S-Curve, Sigmoid หรือ Logistic) เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนไปยังเรนจ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ตัวแปรที่เหมาะสมที่จะใช้ฟังก์ชันนี้คือพวกอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ, ตัวแปรที่ใช้ในด้านการประมวลผลภาพ [32] เป็นต้น ตัวแปรพวกนี้มักจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นรูปตัว S หรือ S' ถ้ากำหนดให้  $a$ ,  $b$  และ  $c$  เป็นเลขจำนวนจริงใดๆ โดยที่  $a \leq b \leq c$  เราสามารถแสดงสมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเส้นโค้งรูปตัว S ได้ดังสมการที่ 4.21

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} 0 & ; \text{ถ้า } x_i \leq a \\ 2\left(\frac{x_i - a}{c - a}\right)^2 & ; \text{ถ้า } a < x_i \leq b \\ 1 - 2\left(\frac{x_i - c}{c - a}\right)^2 & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \\ 1 & ; \text{ถ้า } x_i > c \end{cases} \quad (4.21)$$

#### 4.2.3.5 รูปประฆังคว่ำ

เทอมเซตที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูปประฆังคว่ำ จะมีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายกับสมการรูปแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู แต่ข้อมูลของโดเมนที่แปลงไปยังเรนจ์จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น สมการของรูปประฆังคว่ำมีด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ที่ใช้กันมากมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ [32] ได้แก่ ฟังก์ชัน  $\pi$ , ฟังก์ชัน Gaussian และฟังก์ชัน Beta ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละฟังก์ชันดังนี้

1) ฟังก์ชัน  $\pi$  เมื่อ  $\lambda > 0$  เป็นค่ารัศมีของฟังก์ชัน,  $c$  เป็นจุดศูนย์กลาง ฟังก์ชันนี้จึงมีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายสมการรูปสามเหลี่ยม คือให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 สำหรับข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว คือเมื่อข้อมูล  $x_i$  ตก ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง  $c$  นอกนั้นค่าของฟังก์ชันจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างระหว่างข้อมูลและจุดศูนย์กลางลดลง สมการแสดงได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} 2\left(1 - \frac{\|x_i - c\|}{\lambda}\right)^2 & ; \text{ถ้า } \frac{\lambda}{2} \leq \|x_i - c\| \leq \lambda \\ 1 - 2\left(\frac{\|x_i - c\|}{\lambda}\right)^2 & ; \text{ถ้า } 0 < \|x_i - c\| \leq \frac{\lambda}{2} \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (4.22)$$

2) ฟังก์ชัน Gaussian มีคุณสมบัติคล้ายสมการรูปสามเหลี่ยมเช่นกัน กำหนดสมการได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = e^{-K(\bar{x} - x_i)^2} \quad (4.23)$$

เมื่อ  $K = \frac{1}{2\sigma^2}$ ,  $\sigma$  เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันอยู่ที่ค่าเฉลี่ย  $\bar{x}$  ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเป็นสมาชิก = 1

3) ฟังก์ชัน Beta สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_i}{\beta}\right)^p} \quad (4.24)$$

เมื่อ  $Z_i$  เป็นระยะห่างจากข้อมูล  $x_i$  ถึงจุดศูนย์กลาง  $\bar{x}$

สำหรับฟังก์ชัน Beta มีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายสมการรูปสี่เหลี่ยมคางหมู กล่าวคือจะมีช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมอยู่กลุ่มหนึ่ง (มีความกว้างของช่วงเท่ากับค่า  $\beta$ ) ที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซตเข้าใกล้ 1 โดยที่ค่า  $p \rightarrow \infty$  มากเท่าไรก็ยังทำให้ข้อมูลในช่วง  $\beta$  มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $\bar{x}$

#### 4.2.4 ตัวปฏิบัติการพีชชีเซต [30,31,33]

พีชชีเซตและเซตแบบธรรมดา (คริปส์เซต) จะมีตัวปฏิบัติการไม่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ อินเตอร์เซกชัน (Intersect), ยูเนียน (Union), คอมพลีเมนต์ (Complement) ฯลฯ ตัวปฏิบัติการต่างๆ ถูกนำมาใช้ในการอนุมานพีชชีเซตเพื่อช่วยในการตัดสินใจโดยการประมาณค่าของตัวแปร ถ้าให้  $U$  เป็นเซตเอกภพสัมพัทธ์ และ  $A, B$  เป็นเทอมเซตใดๆ ที่อยู่ใน  $U$  เราสามารถกำหนดตัวปฏิบัติการพื้นฐานต่างๆ ให้กับพีชชีเซต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **นิยาม 3.10** : การเท่ากันของพีชชีเซต (Equality)

พีชชีเซต  $A$  และ  $B$  จะเท่ากันก็ต่อเมื่อ พีชชีเซตทั้งสองถูกนิยามบนเอกภพสัมพัทธ์เดียวกันและมีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเหมือนกัน นั่นคือ

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (4.25)$$

- **นิยาม 3.11** : การเป็นสับเซตหรือเซตย่อยของพีชชีเซต (Contain)

พีชชีเซต  $A$  จะบรรจุอยู่ในพีชชีเซต  $B$  ก็ต่อเมื่อ สมาชิก  $x$  ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  มีอัตราความเป็นสมาชิกของพีชชีเซต  $A$  น้อยกว่า หรือเท่ากับอัตราความเป็นสมาชิกของเซต  $B$  สามารถเขียนแทนได้ด้วย

$$A \subset B \quad \text{ก็ต่อเมื่อ} \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (4.26)$$

- **นิยาม 3.12** : คอมพลิเมนต์ (complement)

คอมพลิเมนต์ของฟัซซี่เซต A ที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $\mu_A(x)$  สามารถเขียนแทนได้ด้วย  $A'$  และถูกนิยามความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.27)$$

- **นิยาม 3.13** : ยูเนียน (Union)

ถ้า A และ B เป็นฟัซซี่เซตใน U การรวมสมาชิกทั้งหมดของทั้ง 2 เซต จะสามารถเขียนสมการได้เป็น  $A \cup B$  โดย

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.28)$$

- **นิยาม 3.14** : อินเตอร์เซกชัน (Intersection)

ถ้า A และ B เป็นฟัซซี่เซตใน U การรวมสมาชิกทั้ง 2 เซต จะเขียนได้เป็น  $A \cap B$  โดย

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.29)$$

- **นิยาม 3.15** : กฎของดีมอแกนส์ (Demorgan's law)

กฎของดีมอแกนส์กล่าวว่า คอมพลิเมนต์ของฟัซซี่เซตสองเซตที่ยูเนียนกันจะสมมูลกับการอินเตอร์เซกชันกันระหว่างคอมพลิเมนต์ของแต่ละฟัซซี่เซตซึ่งเขียนแทนได้ด้วย

$$\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B} \quad (4.30)$$

- **นิยาม 3.16** : S – Norm (Triangular co-norms)

กำหนดให้  $S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  เป็นการถ่ายโอนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต A และ B ค่าความเป็นสมาชิกจะเป็นการยูเนียน ระหว่าง A และ B สามารถเขียนได้เป็น

$$S[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cup B}(x) \quad (4.31)$$

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 เงื่อนไข คือ

1. Boundary condition :  $S(1,1) = 1, S(0, a) = S(a, 0) = a$
2. Commutative condition :  $S(a, b) = S(b, a)$
3. Nondecreasing condition :  $s(a, b) \leq s(a', b')$  เมื่อ  $a \leq a'$  และ  $b \leq b'$
4. Associative condition :  $S(S(a, b), c) = S(a, S(b, c))$

- **นิยาม 3.17** : T – Norm (Triangular norms)

ให้  $t : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  เป็นการถ่ายโอนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต A และ B ค่าความเป็นสมาชิกจะเป็นการอินเตอร์เซกชันระหว่าง A และ B สามารถเขียนได้เป็น

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cap B}(x) \quad (4.32)$$

สามารถแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข คือ

1. Boundary condition :  $t(0,0) = 0, t(a,1) = t(1,a) = 0$
2. Commutative condition :  $t(a,b) = t(b,a)$
3. Nondecreasing condition :  $t(a,b) \leq t(a',b')$  เมื่อ  $a \leq a'$  และ  $b \leq b'$
4. Associativity :  $t(t(a,b),c) = t(a,t(b,c))$

- **นิยาม 3.18** : A ยกกำลังด้วยค่า  $\alpha$

A ยกกำลังด้วยค่า  $\alpha$  ( $A^\alpha$ ) สามารถกำหนดเป็นสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$\mu_{A^\alpha}(x_i) = (\mu_A(x_i))^\alpha; \quad \forall x_i \in U \quad (4.33)$$

- **นิยาม 3.19** : Concentration ของเซต A

กำหนดเป็นสมการได้โดย

$$CON(A) \Rightarrow \mu_{CON(A)}(x_i) = (\mu_A(x_i))^2; \quad \forall x_i \in U \quad (4.34)$$

- **นิยาม 3.20** : Dilation ของเซต A

กำหนดเป็นสมการได้โดย

$$DIL(A) \Rightarrow \mu_{DIL(A)}(x_i) = (\mu_A(x_i))^{0.5}; \quad \forall x_i \in U \quad (4.35)$$

- **นิยาม 3.21** : Contrast Intensification ของเซต A

กำหนดเป็นสมการได้โดย

$$INT(A) \Rightarrow \mu_{INT(A)}(x_i) = \begin{cases} 2(\mu_A(x_i))^2 & ; \text{ ถ้า } 0 \leq \mu_A(x_i) \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - \mu_A(x_i))^2 & ; \text{ ถ้า } 0.5 < \mu_A(x_i) \leq 1 \end{cases} \quad (4.36)$$

#### 4.2.5 ตัวแปรภาษาพูดหรือลึงค์จีสติก (Linguistic Variable) [29]

หมายถึงตัวแปรที่กำหนดค่าขึ้น หรือขนาดปริมาณทางฟิสิกส์ที่สามารถกำหนดเป็นภาษามนุษย์ เช่น “อากาศร้อน”, “อุณหภูมิสูง”, “รถมีความเร็วสูง” หรือ “ความดันปานกลาง” เป็นต้น โดยปริมาณต่างๆ เหล่านี้จะใช้เป็นตัวกำหนดชื่อของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซี่

##### 4.2.5.1 การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรลึงค์จีสติก

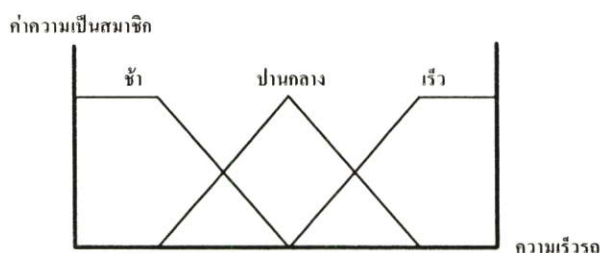
การกำหนดคุณสมบัติของตัวแปร จะใช้เป็น (X,T,U,M)

X ปริมาณ หรือตัวแปรทางฟิสิกส์ที่ใช้แทน เช่น ความเร็ว เป็นต้น

T เซตของตัวแปรทั้งหมดของตัวแปร X เช่น {ช้า, ปานกลาง, เร็ว}

U เอกภพสัมพัทธ์ของ X เช่น  $[0, V_{MAX}]$

M ความสัมพันธ์ของ T แต่ละค่า



รูปที่ 4.7 แสดง linguistic variable สำหรับกำหนดค่าขึ้นความเร็วรถ

จากรูปที่ 4.7 ประกอบด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกฟัซซี่ของความเร็วรถ 3 ฟังก์ชัน คือ ช้า, ปานกลาง และเร็ว ซึ่งค่า Linguistic variable เหล่านี้ ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญและเป็นการจำแนกปริมาณทางฟิสิกส์ โดยความรู้สึกของมนุษย์ หรือประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ เพื่อที่จะนำไปประเมินผลจากเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นแล้วในอดีต

##### 4.2.5.2 ขอบเขตของตัวแปรลึงค์จีสติก (Linguistic Hedges)

การกำหนดค่าขึ้นและขอบเขตของตัวแปรลึงค์จีสติก นอกจากจะกำหนดเป็นระดับของปริมาณแล้ว แต่ละตัวแปรยังสามารถขยาย หรือเพิ่มลดระดับจากความรู้สึกได้ เช่น “เร็วมาก”, “ช้ามาก”, “ช้าปานกลาง” โดยทั่วไปเราจะกำหนดระดับของตัวแปรได้ 3 ระดับ

- 1) ตัวแปรหลัก เช่น “ช้า”, “ปานกลาง” หรือ “ช้ามาก”
- 2) คำตรงข้าม เช่น “ไม่...”, “หรือ” หรือ “และ”
- 3) ขอบเขต เช่น “ช้ามาก” หรือ “ค่อนข้างช้า”

การกำหนดขอบเขต อาจกำหนดค่าของความเป็นสมาชิกได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\mu_{\text{very}A}(x) &= [\mu_A(x)]^2 \\ \mu_{\text{less}A}(x) &= [\mu_A(x)]^{1/2}\end{aligned}\quad (4.37)$$

#### 4.2.6 กฎของฟัซซี่ (Fuzzy Rules) [29]

ในระบบของฟัซซี่ จะเป็นการสรุปจากเหตุและผลตามฐานความรู้ของมนุษย์ โดยเราจะกำหนดให้อยู่ในรูปของชุดคำสั่ง IF – THEN เช่น IF <fuzzy proposition>, THEN <fuzzy proposition> ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบกฎในลักษณะต่างๆ ได้ในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.7 ประพจน์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Proposition)

ประพจน์ หมายถึงการกล่าวถึงความจริงทางคุณสมบัติ หรือค่าปริมาณของวัตถุ หรือตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง ประพจน์แบบฟัซซี่จะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

##### 4.2.7.1 ประพจน์เดี่ยว

หมายถึงการบอกคุณสมบัติของตัวแปรค่าเดียว โดยกำหนดตัวแปรนี้ให้เป็น linguistic เช่น กำหนดให้ X เป็น linguistic variable ของความเร็ว และ S,M,F เป็น linguistic variable จำแนกย่านของความเร็วออกเป็นช้า (Slow), ปานกลาง (Medium) และเร็ว (Fast) ตามลำดับ จะสามารถเขียนกฎได้ว่า X is S, X is M, X is F เป็นต้น

##### 4.2.7.2 ประพจน์แบบผสม

หมายถึง การรวมประพจน์เดี่ยว 2 ประพจน์ หรือมากกว่า โดยเชื่อมด้วยตัวปฏิบัติการ “AND”, “OR” หรือ “NOT” เชื่อมเพื่อใช้ในการสรุปเหตุและผล ลักษณะการเชื่อมด้วยตัวปฏิบัติการจะแบ่งได้หลายชนิด ถ้ากำหนดให้ X และ Y เป็นตัวแปรลึงค์จิสติกอยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ U และ V ตามลำดับ ส่วน A และ B เป็นฟัซซี่เซตจะได้

- การเชื่อมด้วย “AND” :

$$X \text{ is } A \text{ AND } Y \text{ is } B \text{ หรือเขียนได้เป็น } \mu_{A \cap B}(x, y) = t[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

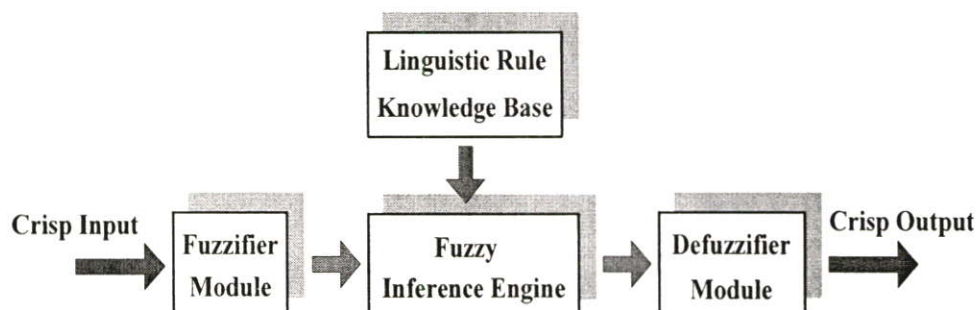
- การเชื่อมด้วย “OR” :

$$X \text{ is } A \text{ OR } Y \text{ is } B \text{ หรือเขียนได้เป็น } \mu_{A \cup B}(x, y) = S[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

#### 4.2.8 แบบจำลองฟัซซี่โลจิก [28,29]

แบบจำลองฟัซซี่ที่กล่าวถึงนี้จะเป็นตัวควบคุมแบบใช้ฐานความรู้ (Knowledge base) หรือประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งเป็นกฎหรือแนวทางที่ใช้ในการควบคุมระบบ จากรูปที่ 4.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานการทำงานของแบบจำลองฟัซซี่ (Fuzzy Model) [34] สำหรับส่วนของการ

ประมวลผลและการตัดสินใจแบบฟัซซี่โลจิก เราจะเรียกว่ากลไกการอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference Engine) หรือกระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ (Fuzzy Inference Process) หรือ Fuzzy Rule based System หรือ Fuzzy Reasoning ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนของแบบจำลอง สามารถอธิบายความหมาย และการออกแบบลักษณะโครงสร้างของแบบจำลอง โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของแบบจำลองฟัซซี่ [34]

#### 4.2.8.1 โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี่

โครงสร้างของแบบจำลอง จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

- 1) ฟัซซิฟิเคชัน โมดูล (Fuzzification Module)
- 2) ฐานความรู้ (Knowledge Base)
- 3) กลไกการอนุมาน (Inference Engine)
- 4) ดีฟัซซิฟิเคชัน โมดูล (Defuzzification Module)

#### 4.2.8.2 คริปส์อินพุท และเอาต์พุท

อินพุท / เอาต์พุทของแบบจำลองฟัซซี่โลจิก ก็คือตัวแปรของฟัซซี่เซต ซึ่งแต่ละตัวแปรสามารถมีได้หลายเทอมเซต โดยอินพุทซึ่งเป็นตัวแปรของระบบ (State Variables) ก็สามารถมีได้หลายตัวแปร โดยขึ้นอยู่กับระบบ ส่วนตัวแปรของเอาต์พุท (Action Variables) เป็นตัวแปรที่ถูกประมาณค่าโดยแบบจำลองฟัซซี่โลจิก เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกฎฟัซซี่ ผลที่ได้จะอยู่ในรูปของคริปส์เอาต์พุทสำหรับการควบคุมระบบต่อไป สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือการกำหนดจำนวนเทอมเซตของแต่ละตัวแปรให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การอนุมานค่าตัวแปรของเอาต์พุทมีความใกล้เคียงกับค่าของตัวแปรที่แท้จริงมากที่สุด ซึ่งจุดนี้ผู้ออกแบบระบบจำลองฟัซซี่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับระบบมากพอสมควร

#### 4.2.8.3 ฟัซซิฟิเคชันโมดูล (Fuzzification Module)

คือการแปลงตัวแปรข้อมูลอินพุทแบบคริปส์เซต ไปเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเซต ซึ่งเป็นค่าแบบฟัซซี่เซต โดยจะนำตัวแปรอินพุทมาหาค่าระดับความเป็นสมาชิกใน

ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุท (Degree of Input membership function) โดยใช้กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบต่างๆตามที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นตัวแปลง การเลือกใช้รูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นต้องเลือกให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของตัวแปร กล่าวคือถ้าตัวแปรที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นจะต้องเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เป็นเชิงเส้น เช่น สมการรูปร่างสามเหลี่ยม หรือสมการรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แต่ถ้าตัวแปรที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วย เช่น ฟังก์ชันรูปตัว S,  $\pi$ , Beta หรือ Gaussian เป็นต้น

#### 4.2.8.4 ฐานความรู้ (Knowledge Base)

ส่วนประกอบของฐานความรู้จะประกอบด้วย

1) ฐานข้อมูล (Data Base) : เป็นที่เก็บข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในส่วนของประกอบของแบบจำลองฟัซซี่ เช่น ค่าคงที่ของส่วนฟัซซี่ฟิเคชัน โมดูล, กฎ, ดีฟัซซี่ฟิเคชัน โมดูล และฟังก์ชันต่างๆ

2) ฐานกฎ (Rules Base) : เป็นที่เก็บกฎการควบคุม ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของ IF – THEN หรือเป็นตารางแสดงความสัมพันธ์แบบฟัซซี่ แนวทางในการออกแบบฐานกฎ จะใช้กลไกการอนุมาน และจากพฤติกรรมตอบสนองของระบบที่จะควบคุม รูปแบบโดยทั่วไปของกฎการควบคุมแบบฟัซซี่ในกรณีของระบบหลายอินพุทและหนึ่งเอาต์พุท (multi-input-single-output system : MISO) คือ

$$R^i : \text{IF } x \text{ is } A_1, \dots, A_n \text{ AND } y \text{ is } B_1, \dots, B_n \text{ THEN } z = C_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.38)$$

โดยที่  $x, \dots, y$  และ  $z$  เป็นตัวแปรฟัซซี่;  $A_1, \dots, B_i$  และ  $C_i$  เป็นเทอมเซตที่สอดคล้องกับตัวแปรฟัซซี่  $x, \dots, y$  และ  $z$  ที่อยู่ในเอกภพ  $U, \dots, V$  และ  $W$  ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วกฎฟัซซี่อาจจะเขียนได้อีกแบบหนึ่ง คือ

$$R^i : \text{IF } x \text{ is } A_1, \dots, A_n \text{ AND } y \text{ is } B_1, \dots, B_n \text{ THEN } z = f(x, \dots, y) \quad (4.39)$$

การสร้างกฎที่ใช้ควบคุมระบบต้องใช้ทั้งความรู้และประสบการณ์ สำหรับจำนวนกฎในระบบของฟัซซี่โลจิกระบบหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรอินพุทและจำนวนเทอมเซตของตัวแปร เช่น ถ้าอินพุทมี 2 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 5 เทอมเซต จะได้จำนวนกฎทั้งหมดเท่ากับ 25 กฎ เป็นต้น

#### 4.2.8.5 กลไกการอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference Engine)

การอนุมานค่าเอาต์พุทแบบฟัซซี่จากกฎต่างๆ ซึ่งกระทำโดยการรวมค่าความเป็นสมาชิก ( $\mu$ ) ที่ได้จากการทำฟัซซี่ฟิเคชันทั้งหมด โดยใช้ตัวโอเปอเรเตอร์หรือตัวปฏิบัติการ อาจจะเป็น min หรือ max มาหาค่าน้ำหนัก (Firing Strength หรือ Weight) ในกฎแต่ละข้อ หากแบ่งเป็นส่วนย่อยในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยส่วนตัวแปรภาษาพูด (Linguistic Variables) เช่น ต่ำ, อุ่น, สูง ฯลฯ เป็นชื่อ

ที่ใช้อ้างเหตุผลของ ฟัชซีเซตที่ซ้อนกันอยู่ ค่าต่างๆที่เป็นรูปสามเหลี่ยมเรียกว่า “ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก” (Membership function) ส่วนต่อมาคือส่วนการตัดสินใจ ซึ่งจะกระทำโดยใช้ตัวโอเปอร์เรเตอร์หรือที่เรียกว่าตัวปฏิบัติการของแต่ละกฎ (Decision-Making Unit) ส่วนที่มาของการอนุมานก็ได้มาจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตนั่นเอง การอนุมานฟัชซีจะอาศัยหลักการของกฎฟัชซีโลจิกในรูปแบบ IF-THEN จากฐานความรู้ของแบบจำลองฟัชซี กฎฟัชซี (Fuzzy Rules) ประกอบด้วยประพจน์ของฟัชซี ดังตัวอย่างเช่น IF X is small THEN Y is positive เป็นต้น ซึ่งจากตัวอย่าง X และ Y เป็นตัวแปรฟัชซี ส่วน small และ positive เป็นเทอมเซตที่สอดคล้องกับตัวแปร X และ Y ส่วนประพจน์ของฟัชซีเซตคือ X is small และ Y is positive โดยประพจน์ที่ตามหลัง IF จะเป็นเงื่อนไขที่เรียกว่าเหตุ (Antecedent) ซึ่งก็คืออินพุตของแบบจำลองฟัชซี ส่วนประพจน์ที่ตามหลัง THEN เรียกว่าผล (Consequent) ก็คือส่วนเอาต์พุตของแบบจำลอง

ประพจน์ที่ตามหลัง IF หรือเหตุ สามารถประกอบไปด้วยหลายประพจน์ โดยขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของอินพุต และจำนวนของเทอมเซตของตัวแปรแต่ละตัว ตัวอย่างเช่น กรณีที่อินพุตมี 2 ตัวแปร Antecedent ก็จะมี 2 ประพจน์เชื่อมต่อกันใน 1 กฎ โดยการเชื่อมกันของประพจน์จะอาศัยตัวเชื่อม ที่มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ ก็คือ ยูเนียน (OR) และ อินเตอร์เซกชัน (AND) สำหรับจำนวนกฎของแบบจำลองฟัชซีโลจิกระบบหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของอินพุตและจำนวนเทอมเซตของตัวแปร ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับเรื่องนี้สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [35,36] ลักษณะของกลไกการอนุมานมีหน้าที่สรุปผล (consequent) จากเหตุ (antecedent) โดยอาศัยการเชื่อมโยงของเหตุผล ซึ่งจะมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ [37,38,39]

- Generalized modus ponens (GMP) คือ การสรุปจากเหตุไปหาผล
- Generalized modus tollens (GMT) คือ การสรุปจากผลไปหาเหตุ

รูปแบบการอนุมานของทั้ง 2 วิธีมีดังต่อไปนี้

**GMP :**

Permise	:	$x \text{ is } A'$
Implication	:	if $x \text{ is } A$ then $y \text{ is } B$
Consequence	:	$y \text{ is } B'$

**GMT :**

Permise	:	$y \text{ is } B'$
Implication	:	if $x \text{ is } A$ then $y \text{ is } B$
Consequence	:	$x \text{ is } A'$

โดย

$$A, A', B, B' = \text{เป็นฟัชซีเซต}$$

$x, y$	=	ตัวแปรลิ่งจีสติก
$\mu_R(x, y)$	=	ค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ของ A และ B
$\mu_A(x), \mu_B(y)$	=	ค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร $x, y$
$f_{imp}$	=	ฟังก์ชันการอิมพลิเคชัน (implication) หรือฟังก์ชันการเชื่อมโยง ค่าความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์ฟัซซี่

$$\mu_R(x, y) = f_{imp}(\mu_A(x), \mu_B(y)); \quad x \in U, y \in V \quad (4.40)$$

โดยทั่วไป ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี่จะนิยมใช้การเชื่อมโยงแบบ GMP และใช้  $f_{imp}$  ด้วยวิธีแมมดानी (Mamdani) [40] โดยสร้างเป็นกฎได้ดังนี้

$R_1$  : IF X IS  $A_1$  AND Y IS  $B_1$  THEN Z IS  $C_1$

$R_2$  : IF X IS  $A_2$  AND Y IS  $B_2$  THEN Z IS  $C_2$

กำหนดให้

$A_1, B_1, A_2, B_2$	=	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต
$C_1, C_2$	=	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต
$R_1, R_2$	=	กฎความสัมพันธ์ฟัซซี่
$z$	=	ตัวแปรลิ่งจีสติกในเอกภพสัมพัทธ์ U, V, W
$\alpha_1, \alpha_2$	=	ระดับความเป็นสมาชิกของ 2 อินพุต (fire strength)

จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของผลสรุป ( $\mu_c$ )

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0))$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0))$$

$$\mu_{c_i}(z) = \min(\alpha_i, \mu_c(z))$$

$$\mu_c(z) = \max(\mu_{c_1}, \mu_{c_2})$$

#### 4.2.8.6 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Module)

ทำหน้าที่แปลงค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าแบบคริปส์เซต หรืออยู่ในรูปของค่าเอาต์พุตในกระบวนการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุต การอนุมานค่าความจริงในส่วนของ Antecedent ในแบบจำลองฟัซซี่โลจิก ค่าที่ได้จะเป็นตัวเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุต และค่านี้เป็นค่าคาดหวัง (Expected value) ของตัวแปรฟัซซี่เซตเพื่อที่จะ

นำไปใช้ควบคุมระบบต่อไป สำหรับการหาค่าคาดหวังของฟัซซี่เซตโดยการทำดีฟัซซิฟิเคชันนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนคร่าวๆ ดังนี้

1) วิธีการหาค่าความจริงที่มีค่าต่ำสุดของ Antecedent (ใช้กับเทอมเซตที่เป็นสมาชิกเท่านั้น ( $\mu_A(x_i) > 0$ )

2) วิธีการเลือกค่าสูงสุดหรือต่ำสุด (Mean of Maximum : MOM) เป็นการเลือกค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดของค่าระดับความเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ ครั้ง แล้วคัดเลือกการกระทำเพียงหนึ่งรูปแบบ ถ้าหากเกิดการกระทำที่มีค่าความเป็นสมาชิก  $\mu$  สูงสุดเท่ากันสองค่า จะต้องใช้รูปแบบการแก้ปัญหาอีกลักษณะหนึ่งคือใช้ค่าเฉลี่ยของค่าเอาท์พุท หรือเลือกการกระทำที่สัมพันธ์กับค่าระดับของระบบพื้นฐาน

3) วิธีการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weight Average) จะใช้ค่าเฉลี่ยของการกระทำหลังจากการกำหนดค่าระดับของความเป็นสมาชิกไว้ล่วงหน้าแล้ว เป็นวิธีที่ง่ายและใช้การคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่ให้ค่าไม่ค่อยชัดเจน

4) วิธีการหาค่าจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนัก (Center of Gravity, Centroid : COG Method) เป็นการหาค่าเอาท์พุทที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์กลาง (centroid) ของเอาท์พุทในระดับที่ทำงาน เพราะว่าค่าขอบของฟังก์ชันระดับการเป็นสมาชิกจะไม่ถูกนำมาใช้และจะไม่เกิดความชัดเจน ค่าศูนย์กลางจะสัมพันธ์กับค่าของเอาท์พุทหนึ่งค่า วิธีการหาค่าจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนัก (COG method) มีสมการดังนี้ [40]

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_c(Z_i) \times Z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_c(Z_i)} \quad (4.41)$$

เมื่อ  $Z_0$  คือตัวแปรเอาท์พุทในรูปของคริปส์เซต,  $Z_i$  คือตัวแปรเอาท์พุทที่ได้จากแต่ละกฎ,  $i$  คือจำนวนกฎที่ถูกประเมินและ  $\mu_c(Z_i)$  คือค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากการประเมิน

รายละเอียดของเนื้อหาทั้งหมดในบทที่ 4 ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ได้อธิบายถึงทฤษฎีเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองฟัซซี่โลจิก ซึ่งในบทถัดไปจะเป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่งไฟฟ้าด้วยการแปลงเวฟเล็กร่วมกับระบบโครงข่ายประสาทเทียมและการแปลงเวฟเล็กร่วมกับแบบจำลองฟัซซี่โลจิก สำหรับใช้ในการระบุตำแหน่งและแยกประเภทของฟอลต์ รวมถึงการระบุทิศทางฟอลต์และการจัดลำดับการป้องกันของรีเลย์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็กร่วมกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่ายต่อไป

## บทที่ 5

# การจำลองและวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองฟอลต์บนสายส่งด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC [41,42] ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองสถานะทรานเซียนต์ในระบบกำลังไฟฟ้า รวมถึงสัญญาณฟอลต์ในลักษณะต่างๆ พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB / Wavelet, Neural Network และ Fuzzy Logic Toolbox [20,26,35] ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยมีเนื้อหาและรายละเอียดของการจำลองฟอลต์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ดังต่อไปนี้

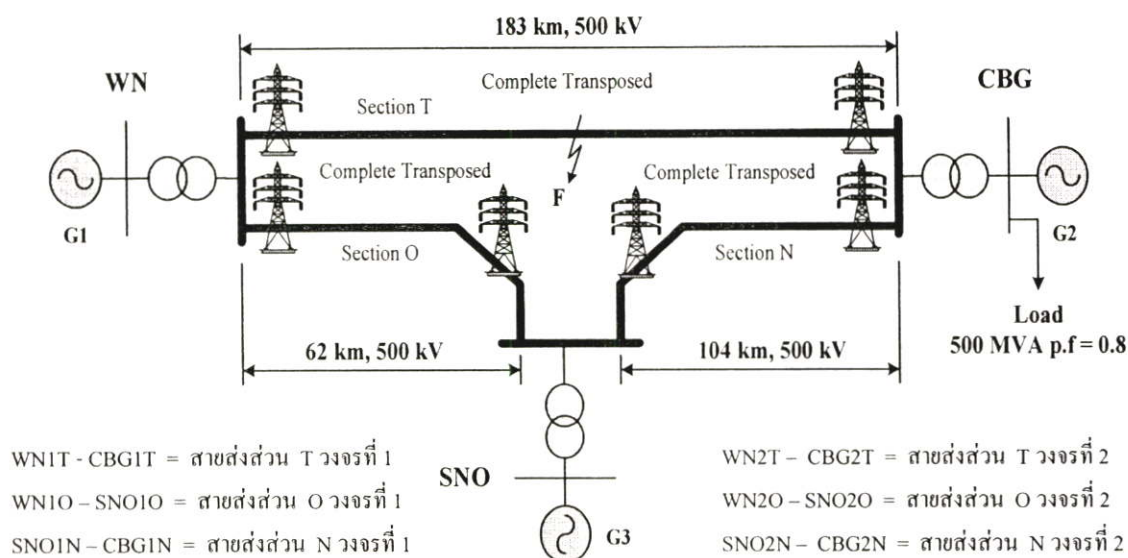
### 5.1 การจำลองฟอลต์

จุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง และเนื่องจากฟอลต์เป็นสิ่งที่ผิดปกติในระบบไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทดลองในระบบจริงได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่ง โดยอาศัยโปรแกรม PSCAD/EMTDC หรือ Power Systems Computer Aided Design / Electromagnetic Transients Including DC Program ที่ได้รับการพัฒนามาจากโปรแกรม ATP/EMTP โดยโปรแกรมดังกล่าวนี้เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการจำลองการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ในส่วนของ PSCAD จะเป็นการเชื่อมต่อกับผู้ใช้คอมพิวเตอร์แบบกราฟฟิค สามารถสร้างวงจรต่างๆ (construct a circuit) และวิเคราะห์ผลที่ได้ รวมถึงการจัดการของข้อมูล ซึ่งนับได้ว่าเป็นการอำนวยความสะดวกในการสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วน EMTDC เป็นชุดของการจำลองผลตอบสนองเชิงเวลา โดยเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป โปรแกรมนี้มีการใช้งานและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีความสามารถในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง และเหมาะสมสำหรับจำลองผลตอบสนองเชิงโดเมนเวลาแบบทันทีทันใดอย่างแม่นยำ (time domain instantaneous responses) โดยเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในชื่อของ electromagnetic transient ซึ่งให้ผลตอบสนองเหมือนกับปรากฏการณ์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของจริงในระบบไฟฟ้ากำลัง [41,42]

#### 5.1.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์ [43]

เนื่องจากในสถานะที่เกิดฟอลต์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ได้ครอบคลุมในหลากหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างระบบจำลองแบบ 3 บัส ระดับแรงดันไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่ และมีการเชื่อมโยงกันของสายส่งใน

ลักษณะเป็นแบบรูปหรือโครงข่าย (Network) ซึ่งมีความยาว 183 กิโลเมตร, 62 กิโลเมตร และ 104 กิโลเมตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงระบบที่ใช้ในการจำลองได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงระบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่ายสามบัสวงจร 500 kV [43]

การจำลองระบบที่เป็นส่วนของสายส่ง ในทางปฏิบัติสายส่งจะมีการไขว้สลับสาย (transposed) เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสเท่ากัน นอกจากนั้นยังมีการติดตั้งรีแอกเตอร์ชาน (Shunt reactor) และนิวทรอลรีแอกเตอร์ (Neutral reactor) ซึ่งในที่นี้ได้อ้างอิงระบบจากสายส่งช่วงสั้นถึงจอมบึง (183 กิโลเมตร) ที่มีการติดตั้งรีแอกเตอร์ชานขนาด 55 MVAR นิวทรอลรีแอกเตอร์ขนาด 0.55 MVAR, ช่วงสั้นถึงไทรน้อย (62 กิโลเมตร) ติดตั้งรีแอกเตอร์ชานขนาด 55 MVAR นิวทรอลรีแอกเตอร์ขนาด 0.55 MVAR และช่วงไทรน้อยถึงจอมบึง (104 กิโลเมตร) ติดตั้งรีแอกเตอร์ชานขนาด 55 MVAR นิวทรอลรีแอกเตอร์ขนาด 0.55 MVAR ตามลำดับ

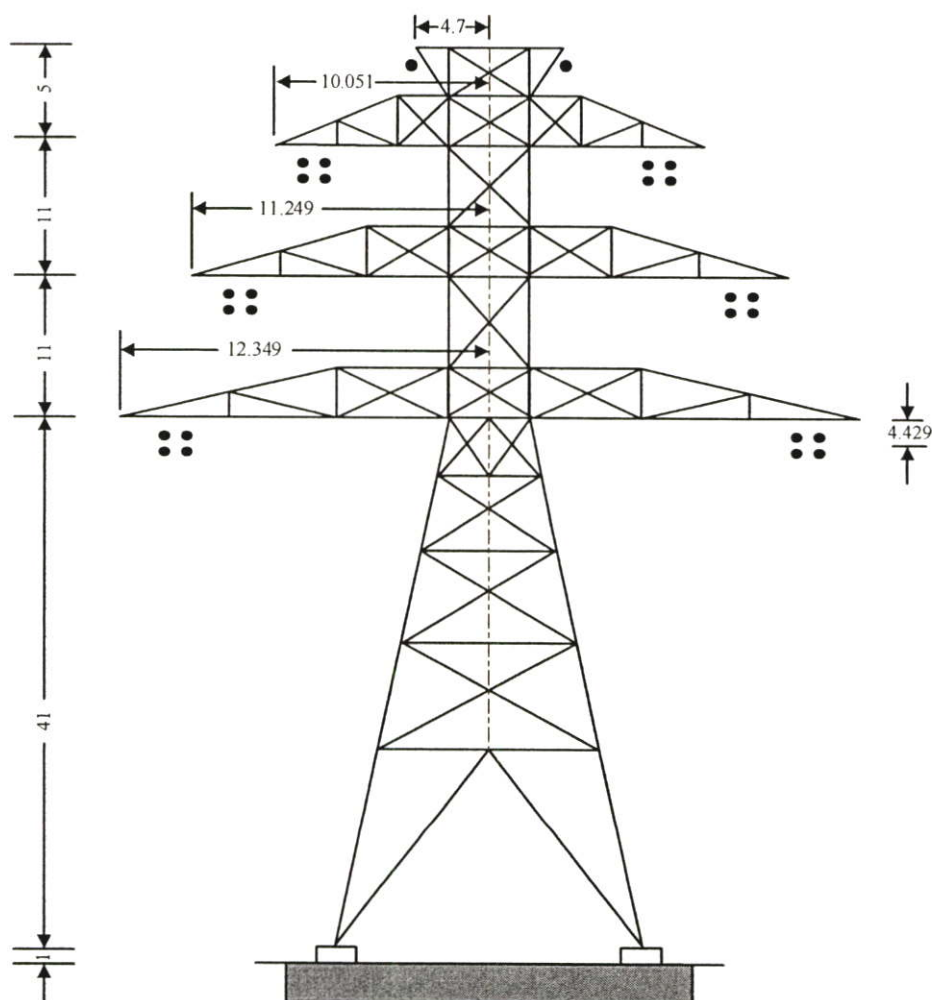
### 5.1.2 แบบจำลองสายส่ง [42]

ในการศึกษาฟอลต์ที่เกิดบนสายส่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่งให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองฟอลต์ การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งนั้นมีให้เลือกใช้อยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบ แต่สำหรับการศึกษาทฤษฎีของคลื่นเดินทางหรือการศึกษาสถานะทรานเซียนต์จะใช้สายส่งในรูปแบบของพารามิเตอร์ขึ้นอยู่ความถี่ (Frequency – dependent parameter) [42,44] หรือนิยมเรียกกันว่า J. marti (ในโปรแกรม EMTP) หรือ Frequency dependent Mode (ในโปรแกรม PSCAD) ซึ่งจะมีการคำนวณอย่างละเอียดโดยพารามิเตอร์ในการคำนวณจะเปลี่ยนไปตามความถี่ที่ใช้คำนวณ รูปแบบของ Frequency dependent Mode model นี้จะเหมาะสมกับการศึกษาผลของคลื่นเดินทาง และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสถานะทรานเซียนต์ต่างๆ รวมถึง

การจำลองพอลดีบนสายส่งที่มีช่วงความถี่ 0-1 MHz ซึ่งจะมีความแม่นยำสูงสำหรับวิเคราะห์ระบบสายส่งที่มีการไขว้สลับสายอย่างสมบูรณ์ (ideally transposed conductors) และไม่เหมาะสมถ้านำแบบสายส่งดังกล่าวไปใช้จำลองสายส่งที่ไม่ได้มีการไขว้สลับสาย (un-transposed) หรือสายส่งที่มีหลายโครงสร้างของเสา สำหรับ Frequency dependent Mode model นี้จะใช้ข้อมูลอินพุตเป็นแบบโครงสร้างของเสา (tower) ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้รูปแบบของ Frequency dependent Mode model ในการสร้างแบบจำลองของสายส่ง

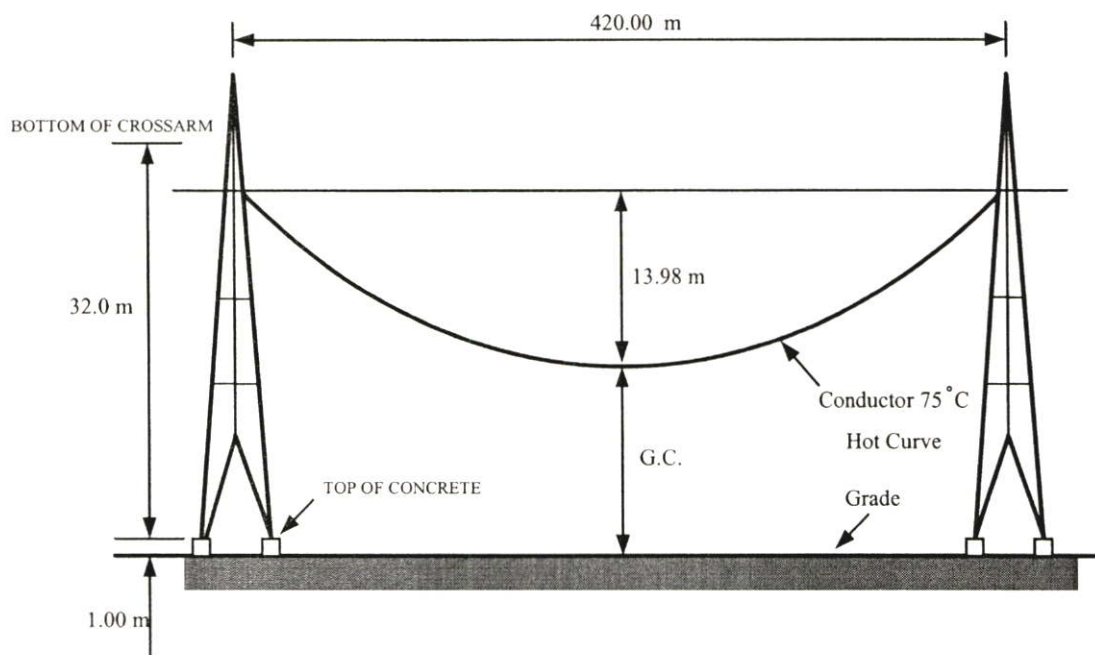
### 5.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 500 kV [43]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบจำลองสายส่งสามบัสแบบโครงข่ายระบบ 500 kV วงจรคู่ (double circuit) ซึ่งเป็นสายส่งที่มีการใช้งานจริงจากสถานีไฟฟ้าวังน้อย (WN), สถานีไฟฟ้าจอมบึง (CBG) และสถานีไฟฟ้าไทรน้อย (SNO) โดยสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างของเสา (Tower) ที่ใช้ในการจำลองได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งวงจรคู่ 500 kV

สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งนั้นเนื่องจากในทางปฏิบัติระยะห่างของเสา (Span) และระยะหย่อน (Sag) จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non – uniform) ขึ้นอยู่กับสถานที่ในการติดตั้ง แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ระยะห่างของเสาและระยะหย่อนของสายตัวนำและสายล่อฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดช่วงระยะทางทั้งหมด



รูปที่ 5.3 แสดงระยะหย่อน (sag) ของสายตัวนำบนเสาแบบ DL ที่ใช้กับสายส่งแรงดัน 500 kV

โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

- โครงสร้างเสาส่ง (Tower) แบบ DL tangent  $3^\circ$
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 4 ตัวนำ (4 bundle)
- ประเภทสาย ACSR 795 cmil (Al54/St7) และ ACSR 1272 cmil (Al42/St7)
- ประเภทของสายล่อฟ้า (Over head ground wire) 3/8 inch, EHS GALV (St7)
- ความต้านทานของสายตัวนำ (DC resistance) ACSR 795 cmil = 0.07185 โอห์มต่อกิโลเมตร, ACSR 1272 cmil = 0.0449 โอห์มต่อกิโลเมตร
- รัศมีของสายตัวนำ (Conductor radius) ACSR 795 cmil = 0.013865 เมตร, ACSR 1272 cmil = 0.016955 เมตร
- ความต้านทานของสายล่อฟ้า 4.19 โอห์มต่อกิโลเมตร
- รัศมีของสายล่อฟ้า (Ground wire radius) 0.00457 เมตร
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวแกนของสายตัวนำต่ำสุด (Horiz. Spacing between lowest conductors) 24.698 เมตร

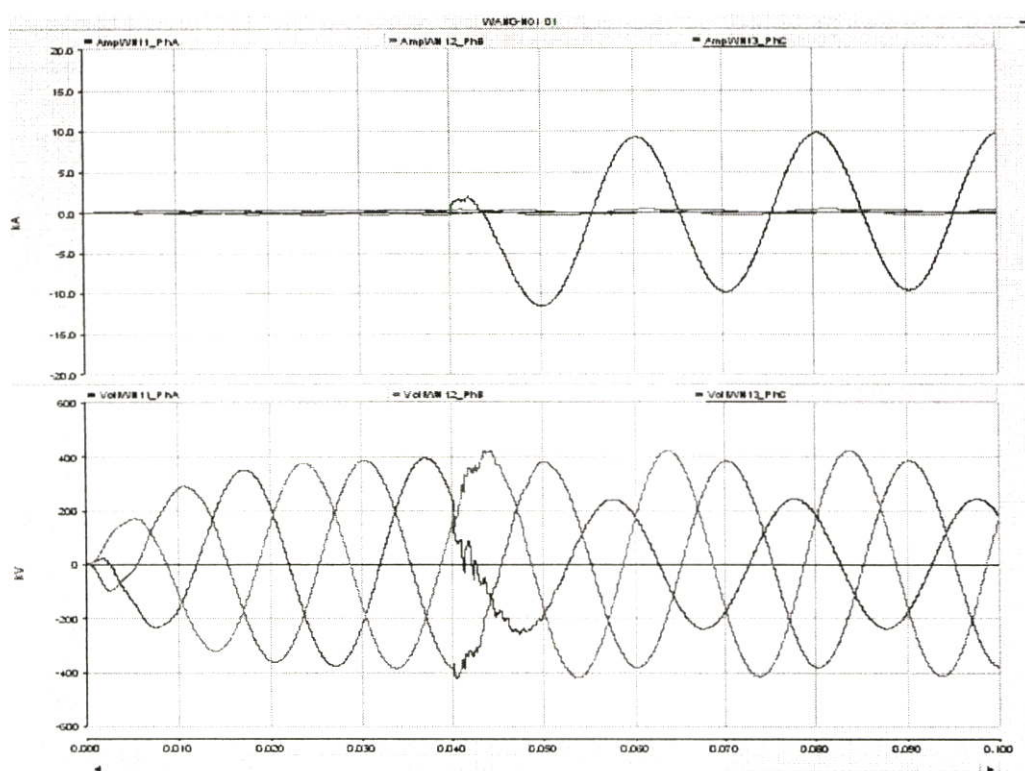
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวแกนของสายตัวนำกลาง (Horiz. Spacing between middle conductors) 22.498 เมตร
- ระยะห่างระหว่างตัวนำในแนวแกนของสายตัวนำบนสุด (Horiz. Spacing between top conductors) 20.102 เมตร
- ระยะห่างระหว่างสายล่อฟ้า (Spacing between ground wires) 9.4 เมตร
- ความสูงของตัวนำล่างสุดที่เสาส่ง 36.571 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่เสาส่ง เหนือสายตัวนำต่ำสุด 31.429 เมตร
- ระยะห่างแนวแกนตั้งของศูนย์กลางสายตัวนำบน (Vertical offset of top conductors) 22 เมตร
- ระยะห่างแนวแกนตั้งของศูนย์กลางสายตัวนำกลาง (Vertical offset of middle conductors) 11 เมตร
- ระยะหย่อนต่ำสุดของสายตัวนำ (Sag) 13.98 เมตร
- ระยะหย่อนต่ำสุดของสายล่อฟ้า (Sag) 13.98 เมตร
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างต้น (Span) 420 เมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม. เมตร

### 5.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

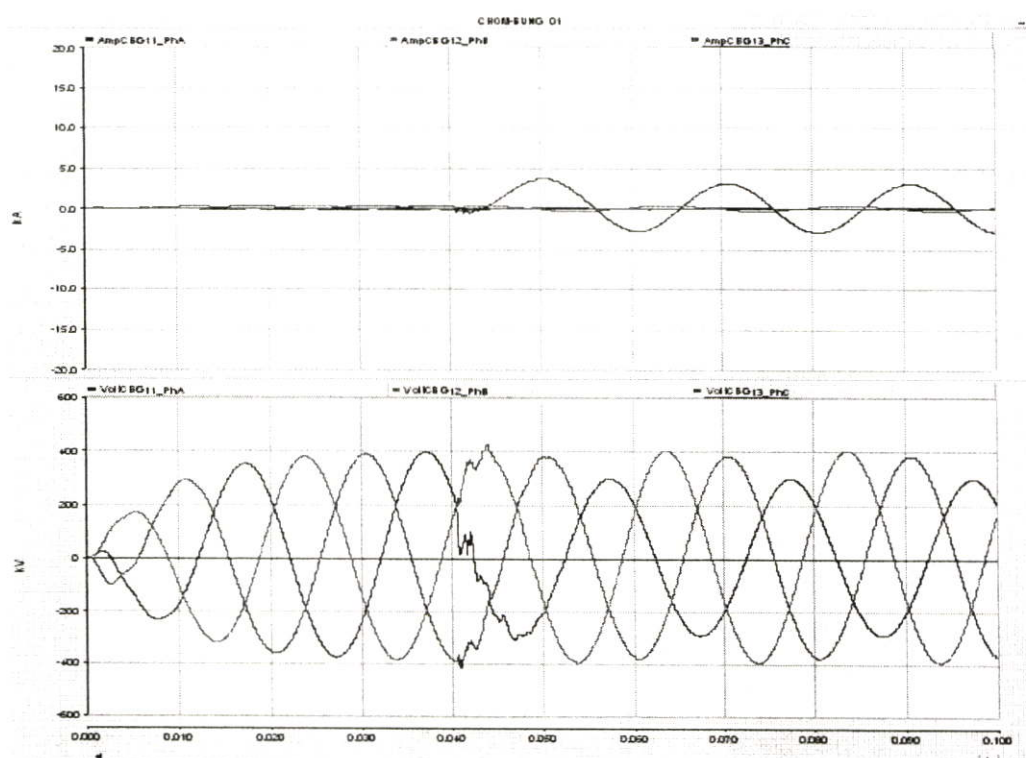
ในการจำลองฟอลต์นั้นเพื่อศึกษาสัญญาณของฟอลต์ที่แตกต่างกันจึงทำการการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลเกี่ยวข้องกับลักษณะของสัญญาณฟอลต์ดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 11 ประเภทได้แก่ AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ 10% - 90% ของระยะทาง 183 กิโลเมตร (ช่วงละ 10%) ของช่วงสถานีไฟฟ้าวังน้อยถึงสถานีไฟฟ้าจอมบึง วงจรที่ 1 และ 2
- ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ 10% - 90% ของระยะทาง 62 กิโลเมตร (ช่วงละ 10%) ของช่วงสถานีไฟฟ้าวังน้อยถึงสถานีไฟฟ้าไทรน้อย วงจรที่ 1 และ 2
- ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ 10% - 90% ของระยะทาง 104 กิโลเมตร (ช่วงละ 10%) ของช่วงสถานีไฟฟ้าไทรน้อยถึงสถานีไฟฟ้าจอมบึง วงจรที่ 1 และ 2
- ขนาดของโหลดเท่ากับ 500 MVA (p.f. = 0.8 )
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์  $0^{\circ}$  -  $330^{\circ}$  เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ  $30^{\circ}$ )
- ความต้านทานของฟอลต์ 10 โอห์ม

กำหนดให้เริ่มเกิดฟอลต์ที่  $t = 0.04$  วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล (0 – 0.1 วินาที) โดยไม่มีการกำจัดฟอลต์ออก สามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณฟอลต์ที่จำลองได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยวัดที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าวังน้อย WN1T



รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองโดยวัดที่ปลายด้านสถานีไฟฟ้าจอมบึง CBG1T

## 5.2 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตและพีชชีโลจิกสำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย

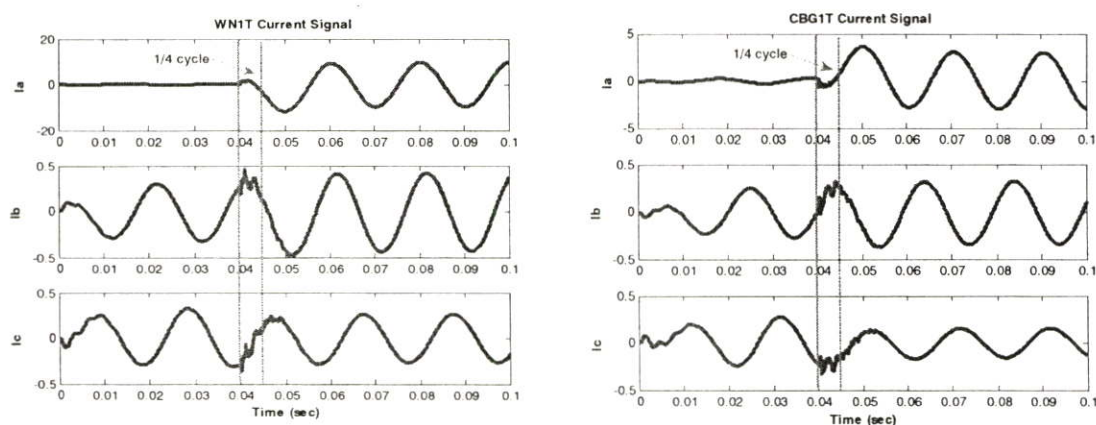
สมมุติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย [45,46] เช่น มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับองค์ประกอบความถี่พื้นฐาน โดยยังคงข้อมูลที่สำคัญต่างๆ ไว้ ดังนั้นการพิจารณาองค์ประกอบความถี่สูงจึงสามารถที่จะลดขนาดของช่วงข้อมูลที่จะใช้วิเคราะห์ และส่งผลให้เวลาที่ใช้คำนวณลดลงอีกด้วย จากการศึกษานี้ได้กำหนดช่วงของข้อมูลพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์โดยใช้สัญญาณในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากเริ่มเกิดฟอลต์

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตและพีชชีโลจิก รวมถึงโครงข่ายประสาทเทียมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และ 4 วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยทำการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะนำมาใช้ในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อระบุทิศทางของสัญญาณฟอลต์ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ ถูกนำมาคำนวณเพื่อจัดลำดับการป้องกัน และนำเอาผลที่ได้จากสเกลแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูง นำไปเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับแบบจำลองพีชชีโลจิกและได้เปรียบเทียบกับวิธีของโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีค่าตอบที่ต้องการคือ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยสามารถแสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในหัวข้อถัดไป

## 5.3 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเล็ตจะนำสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้าน มาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่างๆ โดยใช้เมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation matrix) จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้ความถี่ของการสุ่ม (Sampling frequency rate) 400 kHz เพื่อทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาในสเกลที่ 1-5 โดยจำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่นำมาใช้นั้นมีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์ เนื่องจากการใช้จำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่มีความหลากหลายนั้นจะทำให้ข้อมูลในการวิเคราะห์มีปริมาณมากขึ้นและสะดวกต่อการตัดสินใจ แต่จะทำให้เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณาจำนวนสเกลที่เหมาะสมนั้นควรอยู่บนพื้นฐานที่ว่าจำนวนสเกลที่น้อยที่สุดที่ให้ความถูกต้องตามหลักการวิเคราะห์ที่สามารถ

ยอมรับได้ [14] เมื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกันแล้ว ต่อไปจึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่จากสัมประสิทธิ์ที่ได้ในแต่ละสเกล ผลที่ได้จะนำมาใช้ในการตรวจจับหาฟอลต์ที่เกิดขึ้น, ระบุทิศทางฟอลต์, จัดลำดับการป้องกัน และเลือกข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับได้นำไปเป็นอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียมและพีซีซีโวลจิกต่อไป โดยจะเลือกใช้ข้อมูลในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากที่เริ่มเกิดฟอลต์ (แสดงเป็นเส้นประ) ซึ่งสั้นกว่าเมื่อเทียบกับหลักการเดิมที่ใช้การแปลงฟูเรียร์ที่ต้องใช้ช่วงของข้อมูลในการวิเคราะห์อย่างน้อย 1 ไซเคิล เพื่อความสะดวกในการอธิบายขั้นตอนของการวิเคราะห์จึงได้นำตัวอย่างของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากการจำลองระบบในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นฟอลต์เฟส A ลงดิน ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 วัดจากปลายด้านส่งของสายส่ง (20 % ของระยะทางเต็ม 183 กิโลเมตร) โดยมีลักษณะของสัญญาณกระแสในแต่ละเฟสที่ได้จากการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



(a) พิจารณาที่ด้านส่ง (WNIT)

(b) พิจารณาที่ด้านรับ (CBG1T)

รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายสายส่งในแต่ละด้าน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำสัญญาณกระแสในแต่ละเฟส มาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ดังนั้นก่อนการแปลงจึงต้องทำการหาเมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation matrix) ที่ใช้ในการแปลงค่าของกระแสในแต่ละเฟส ให้อยู่ในเทอมขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ 5.1 [42 ,47]

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $I_0$  หมายถึงองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero sequence)

$I_1$  หมายถึงองค์ประกอบลำดับบวก (Positive sequence)

$I_2$  หมายถึงองค์ประกอบลำดับลบ (Negative sequence)

T หมายถึงเมตริกการแปลงของกระแส (Phase current transformation matrix)

เมตริกการแปลงของระบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งส่วนต่างๆและเมตริกการแปลงของระบบ

Scale	Frequency range (kHz)	Transmission Line	Travelling wave speed (km/s)	Sequence transformation matrix
1	100-200	Section T	294759	$\begin{bmatrix} 0.5773 & 0.5773 & 0.5773 \\ 0.5773 & -0.2886 & -0.2886 \\ 0.5773 & -0.2886 & -0.2886 \end{bmatrix}$
1	100-200	Section O	294747	
1	100-200	Section N	294759	

### 5.3.1 การตรวจจับฟอลต์ (Fault Detection)

การตรวจจับฟอลต์เป็นสิ่งสำคัญสำหรับแผนงานการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าตรวจจับฟอลต์ได้อย่างถูกต้องจะทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว และช่วยลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนั้นการเลือกใช้ข้อมูลในสเกลแรกๆที่ตรวจจับฟอลต์ได้จะถูกนำไปคำนวณหาลำดับการป้องกันของรีเลย์ และระบุทิศทางของสัญญาณฟอลต์ อีกทั้งยังเป็นอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมและฟิชชี่โลจิก เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งและแยกประเภทของฟอลต์ต่อไป ซึ่งการตรวจจับฟอลต์สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณกระแสฟอลต์ในแต่ละเฟส และสัญญาณกระแสฟอลต์ขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ของปลายสายส่งแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ทแม่ซนิก daubechies4 (db4) [21,22] เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกัน แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละสเกลสามารถแสดงค่าของช่วงความถี่ต่างๆ ดังนี้

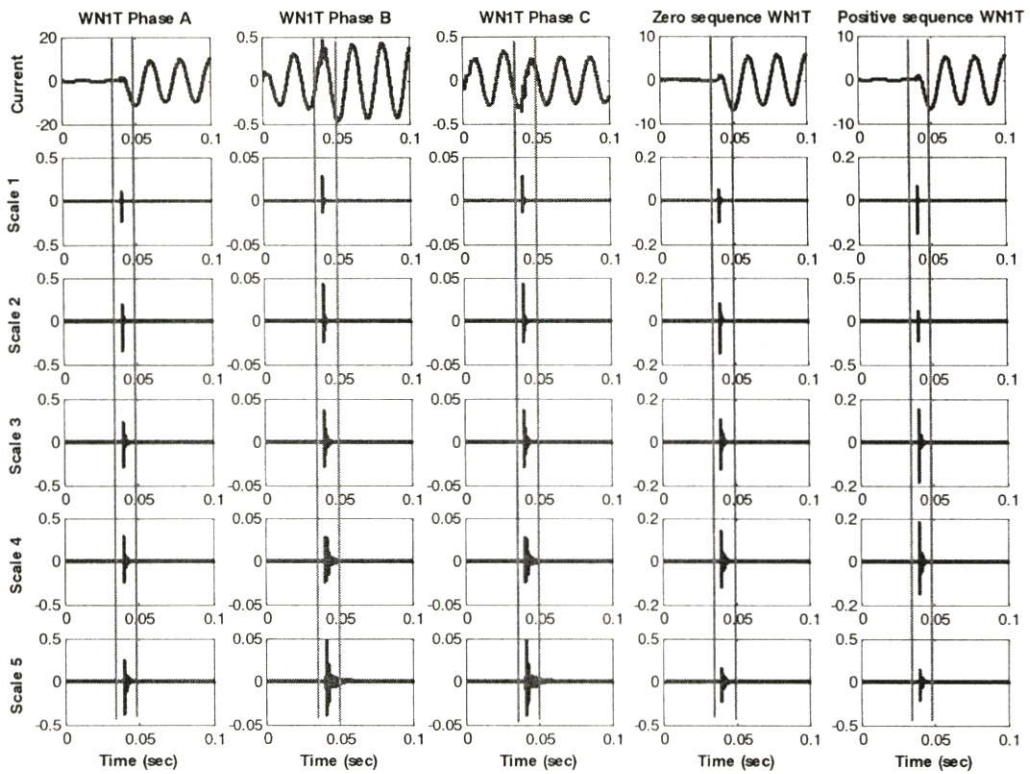
สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 100-200 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

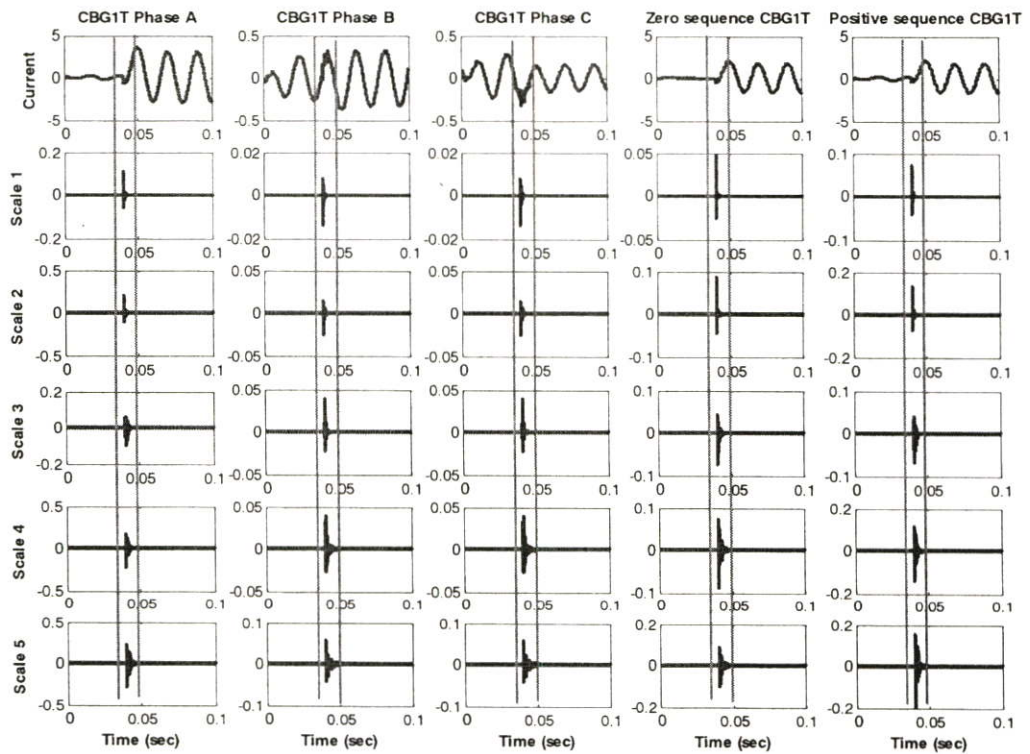
สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

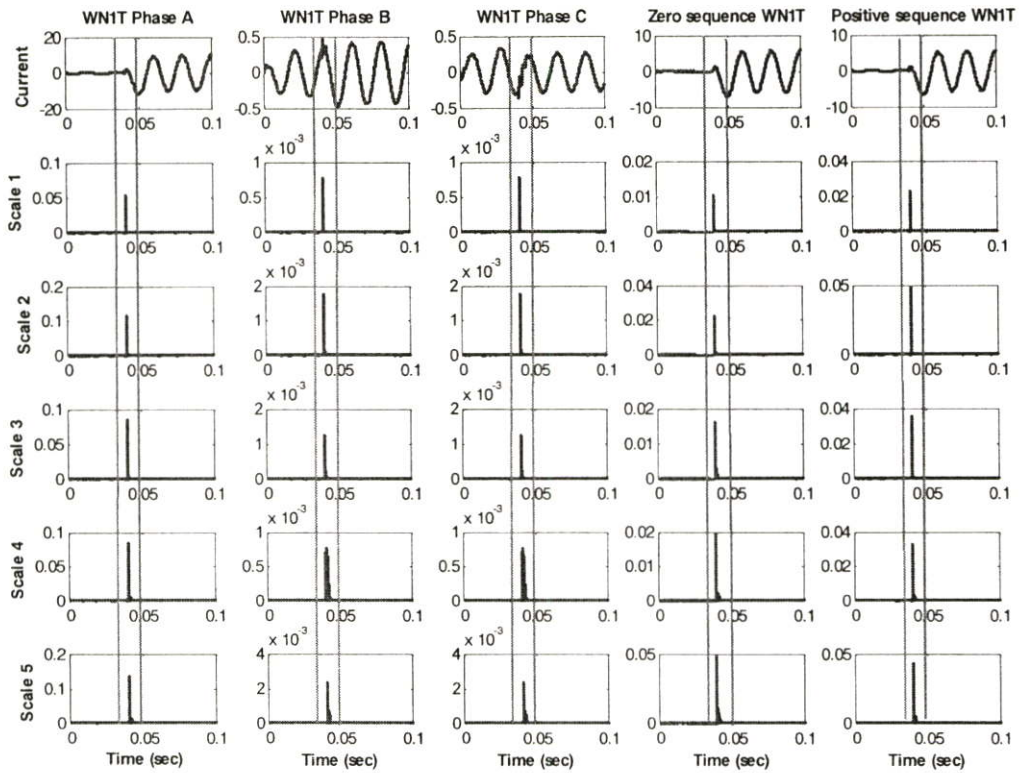
สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz



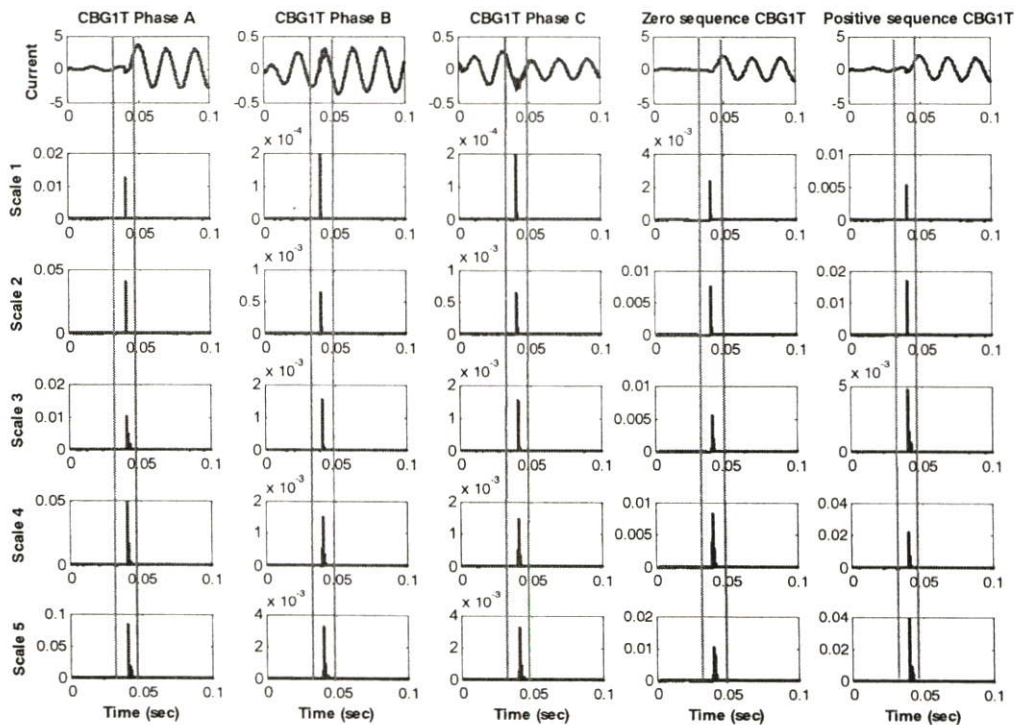
รูปที่ 5.7 แสดงผลการแปลงเวฟเล็กของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน WNIT



รูปที่ 5.8 แสดงผลการแปลงเวฟเล็กของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน CBG1T



รูปที่ 5.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังสองของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน WNIT



รูปที่ 5.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ยกกำลังสองของสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ปลายสายส่งด้าน CBG1T

ลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แตกต่างกัน แต่ในสถานะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้เองจึงได้นำสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดในทุกสเกลมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสถานะก่อนเกิดฟอลต์เป็นจำนวนเท่า ในแต่ละสเกลของกระแสที่ปลายสายส่งแต่ละด้านดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 และเพื่อให้การพิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ จากผลการแปลงเวฟเล็ดสามารถสังเกตได้ว่าในสถานะที่เริ่มมีฟอลต์ ( $t \geq 0.04$  sec) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกลจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสถานะก่อนเกิดฟอลต์ ( $t < 0.04$  sec) ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า “ถ้าสัมประสิทธิ์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ของสเกลใดสเกลหนึ่งของกระแสลำดับบวกเมื่อวัดที่ปลายสายส่งแต่ละด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากช่วงสถานะก่อนเกิดฟอลต์ แสดงว่ามีความผิดปกติ (abnormal) เกิดขึ้นในสายส่ง จากนั้นจึงเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเพียงสองค่าเท่านั้นมาดำเนินการตัดสินใจว่าค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองค่านั้นเกิดขึ้นที่สายส่งส่วนใด กล่าวคือมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งนั่นเอง และใช้ข้อมูลที่ตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลแรกมาระบุทิศทาง และจัดลำดับการป้องกัน รวมทั้งใช้เป็นข้อมูลอินพุทเพื่อนำไประบุตำแหน่งและประเภทฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองพีชชีโลจิก ตามลำดับ”

จากสมมติฐานที่ได้กำหนดเกณฑ์ไว้ จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการตรวจจับฟอลต์ทั้งหมดเป็นลักษณะการเปรียบเทียบของค่าต่างๆ ซึ่งบางครั้งการอธิบายด้วยการลักษณะของค่าพุดนั้นอาจจะทำให้เข้าใจยาก ดังนั้นจึงใช้ลักษณะการอธิบายเชิงบรรยายร่วมกับการอธิบายด้วยลักษณะของการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแบบสากลคือ if ... Then ...else ... end ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการวิเคราะห์ และสามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$L = \text{สเกลของการแปลงเวฟเล็ด ทั้งหมด 5 สเกล}$$

$$I_{P_{\max}(\text{post})}^L = \text{ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดจากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ในช่วง } \frac{1}{4} \text{ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ที่สเกล } L$$

$$I_{P_{\max}(\text{pre})}^L = \text{ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดจากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ที่สเกล } L$$

$P_{chk(post)}^L$  = ค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตของ  
องค์ประกอบกระแสลำดับบวก ระหว่างก่อนเกิดฟอลต์และหลังเกิดฟอลต์  
ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้น

$P_{chk(pre)}^L$  = ค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตของ  
องค์ประกอบกระแสลำดับบวก ระหว่างก่อนเกิดฟอลต์และหลังเกิดฟอลต์  
ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้น

$Sum_{chk(post)}^L$  = ผลรวมของค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลง  
เวฟเล็ตขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกหลังเกิดฟอลต์ สเกลที่ 1-5

$Sum_{chk(pre)}^L$  = ผลรวมของค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลง  
เวฟเล็ตขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกก่อนเกิดฟอลต์ สเกลที่ 1-5

พิจารณาองค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน

if  $I_{P_{max}(post)}^L \geq 5xI_{P_{max}(pre)}^L$

then

$$P_{chk(post)}^L = 1 \quad (5.2)$$

$$P_{chk(pre)}^L = 0 \quad (5.3)$$

else

$$P_{chk(post)}^L = 0 \quad (5.4)$$

$$P_{chk(pre)}^L = 1 \quad (5.5)$$

end

ขั้นตอนการตรวจสอบสถานะผิดปกติบนสายส่งในแต่ละด้าน

$$Sum_{(post)}^L = \sum_{L=1}^5 P_{chk(post)}^L \quad (5.6)$$

$$Sum_{(pre)}^L = \sum_{L=1}^5 P_{chk(pre)}^L \quad (5.7)$$

if  $Sum_{(post)}^L \geq Sum_{(pre)}^L$

then

Abnormal condition

else

Normal condition

end

เมื่อทำตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจนครบทุกสเกลและทุกปลายสายส่งในแต่ละด้านแล้ว จึงทำการเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่มีความผิดปกติ (abnormal) เกิดขึ้น โดยขั้นตอนสุดท้ายคือการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่มีค่ามากที่สุดเพียงสองค่าจากสายส่งที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นมาทำการสรุปว่าสายส่งส่วนใดเป็นสายส่งที่เกิดฟอลต์ โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1-5 ดังต่อไปนี้

1. ถ้าสามารถตรวจจับฟอลต์ในสเกลใด สามารถสรุปได้ว่าเกิดฟอลต์ในสายส่ง และนำข้อมูลในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ไปคำนวณหาทิศทางและจัดลำดับการป้องกันของรีเลย์ รวมทั้งเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองฟิชชีโลจิกต่อไป
2. ถ้าไม่สามารถตรวจจับฟอลต์ในสเกลใดสเกลหนึ่งได้ สามารถสรุปได้ว่า ไม่มีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่ง

เพื่อแสดงขั้นตอนการตรวจจับฟอลต์ที่ชัดเจน จึงยกตัวอย่างของสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นฟอลต์ที่เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 วัดจากปลายด้านส่งของสายส่ง (20% ของระยะทางเต็ม 183 กิโลเมตร) โดยสามารถแสดงการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 5.2 - 5.5

**ตารางที่ 5.2** แสดงค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาผลการแปลงเวฟเล็ตขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน

Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal(L)					Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal(L)				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
WN1T	Max (pre)	3.20E-12	7.28E-12	1.17E-10	2.09E-09	4.96E-06	CBG1N	Max (pre)	2.08E-11	1.90E-11	4.87E-11	7.78E-10	1.15E-08
	Max (post)	0.0223	0.0491	0.0353	0.0331	0.0443		Max (post)	5.82E-04	0.0019	0.0047	0.0045	0.005
	P-Chk (post)	1	1	1	1	1		P-Chk (post)	1	1	1	1	1
	P-Chk (pre)	0	0	0	0	0		P-Chk (pre)	0	0	0	0	0
WN2T	Max (pre)	3.20E-12	7.27E-12	1.17E-10	2.09E-09	5.68E-07	CBG2N	Max (pre)	2.08E-11	1.90E-11	4.87E-11	7.78E-10	1.15E-08
	Max (post)	0.0025	0.0055	0.0046	0.0091	0.0394		Max (post)	5.82E-04	0.0019	0.0047	0.0045	0.005
	P-Chk (post)	1	1	1	1	1		P-Chk (post)	1	1	1	1	1
	P-Chk (pre)	0	0	0	0	0		P-Chk (pre)	0	0	0	0	0
WN1O	Max (pre)	3.10E-12	5.48E-12	5.06E-11	6.87E-10	5.14E-07	SNO1O	Max (pre)	2.79E-11	1.34E-11	4.65E-11	7.56E-10	1.25E-08
	Max (post)	0.0024	0.0054	0.0039	0.0038	0.0095		Max (post)	3.87E-04	0.0017	0.0051	0.0036	0.0047
	P-Chk (post)	1	1	1	1	1		P-Chk (post)	1	1	1	1	1
	P-Chk (pre)	0	0	0	0	0		P-Chk (pre)	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal (L)					Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal (L)				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
WN2O	Max (pre)	3.11E-12	5.50E-12	5.06E-11	6.86E-10	5.14E-07	SNO2O	Max (pre)	2.79E-11	1.35E-11	4.66E-11	7.57E-10	1.25E-08
	Max (post)	0.0024	0.0054	0.0039	0.0038	0.0095		Max (post)	3.88E-04	0.0017	0.0051	0.0036	0.0047
	P-Chk (post)	1	1	1	1	1		P-Chk (post)	1	1	1	1	1
	P-Chk (pre)	0	0	0	0	0		P-Chk (pre)	0	0	0	0	0
CBG1T	Max (pre)	2.07E-11	1.61E-11	1.22E-10	2.13E-09	3.26E-08	SNO1N	Max (pre)	2.74E-11	1.99E-11	6.14E-11	9.70E-10	1.53E-08
	Max (post)	0.0053	0.0169	0.0088	0.0215	0.0432		Max (post)	3.86E-04	0.0016	0.0052	0.0037	0.0054
	P-Chk (post)	1	1	1	1	1		P-Chk (post)	1	1	1	1	1
	P-Chk (pre)	0	0	0	0	0		P-Chk (pre)	0	0	0	0	0
CBG2T	Max (pre)	2.07E-11	1.61E-11	1.22E-10	2.13E-09	3.26E-08	SNO2N	Max (pre)	2.74E-11	1.98E-11	6.14E-11	9.68E-10	1.52E-08
	Max (post)	5.88E-04	0.0019	0.0052	0.0044	0.0108		Max (post)	3.86E-04	0.0016	0.0052	0.0037	0.0054
	P-Chk (post)	1	1	1	1	1		P-Chk (post)	1	1	1	1	1
	P-Chk (pre)	0	0	0	0	0		P-Chk (pre)	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.3 ผลรวมของค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ต

Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal 1 - 5	Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal 1 - 5	Substation	Positive Value Max	Wavelet Scal 1 - 5
WN1T	Sum (pre)	0	CBG1T	Sum (pre)	0	SNO1O	Sum (pre)	0
	Sum (post)	5		Sum (post)	5		Sum (post)	5
	Result	Abnormal		Result	Abnormal		Result	Abnormal
WN2T	Sum (pre)	0	CBG2T	Sum (pre)	0	SNO2O	Sum (pre)	0
	Sum (post)	5		Sum (post)	5		Sum (post)	5
	Result	Abnormal		Result	Abnormal		Result	Abnormal
WN1O	Sum (pre)	0	CBG1N	Sum (pre)	0	SNO1N	Sum (pre)	0
	Sum (post)	5		Sum (post)	5		Sum (post)	5
	Result	Abnormal		Result	Abnormal		Result	Abnormal
WN2O	Sum (pre)	0	CBG2N	Sum (pre)	0	SNO2N	Sum (pre)	0
	Sum (post)	5		Sum (post)	5		Sum (post)	5
	Result	Abnormal		Result	Abnormal		Result	Abnormal

การตรวจจับฟอลต์ คือการตัดสินใจว่าเกิดฟอลต์บนสายส่งหรือไม่นั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การพิจารณาข้อมูลสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่มีค่าสูงสุดสองค่าดังที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ “ถ้าผลการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เพื่อตรวจจับฟอลต์ทั้งสองด้านของปลายสายส่งระบุว่าไม่มีฟอลต์เกิดขึ้นแล้ว ให้ถือว่าสายส่งวงรนั้นมีฟอลต์เกิดขึ้น”

ตารางที่ 5.4 แสดงผลสรุปของการตรวจจับฟอลต์

Wavelet	Coefficient of Positive Sequence Value Max (post)											
	Wang - Noi Substation				Chom - Bung Substation				Sai - Noi Substation			
	WN1T	WN2T	WN1O	WN2O	CBG1T	CBG2T	CBG1N	CBG2N	SNO1O	SNO2O	SNO1N	SNO2N
1	<b>0.0223</b>	0.0025	0.0024	0.0024	<b>0.0053</b>	5.88E-04	5.82E-04	5.82E-04	3.87E-04	3.88E-04	3.86E-04	3.86E-04
2	<b>0.0491</b>	0.0055	0.0054	0.0054	<b>0.0169</b>	0.0019	0.0019	0.0019	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016
3	<b>0.0353</b>	0.0046	0.0039	0.0039	<b>0.0088</b>	0.0052	0.0047	0.0047	0.0051	0.0051	0.0052	0.0052
4	<b>0.0331</b>	0.0091	0.0038	0.0038	<b>0.0215</b>	0.0044	0.0045	0.0045	0.0036	0.0036	0.0037	0.0037
5	<b>0.0443</b>	0.0394	0.0095	0.0095	<b>0.0432</b>	0.0108	0.005	0.005	0.0047	0.0047	0.0054	0.0054
Result	<b>Fault</b>	Un-Fault	Un-Fault	Un-Fault	<b>Fault</b>	Un-Fault	Un-Fault	Un-Fault	Un-Fault	Un-Fault	Un-Fault	Un-Fault

ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ที่จะเลือกสเกลที่จะเป็นข้อมูลอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียมและพีชชีโลจิกไว้โดยใช้ข้อมูลในสเกลแรกที่พบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์มากกว่า 5 เท่า จากสภาวะปกติขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งในแต่ละด้านและมีค่ามากที่สุดเพียงสองค่าเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ในด้านอื่นๆ ซึ่งในบางครั้งอาจจะไม่พบในสเกลที่ 1 หรือมีการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปตามสมมุติฐานก็จะเลื่อนไปใช้ในสเกลที่สูงกว่า ได้ (สเกลที่ 2, 3, 4 และ 5)

จากรูปที่ 5.9 - 5.10 และตารางที่ 5.2 - 5.4 พบว่าเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตจากองค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน และสามารถระบุได้ว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นและตรวจจับฟอลต์ได้โดยใช้สเกลที่ 1 นอกจากจะทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่แล้วยังสามารถทราบว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น เริ่มต้น ณ เวลาใดๆ ซึ่งข้อมูลทางเวลานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ นอกจากนั้นยังสามารถนำข้อมูลสัมประสิทธิ์และค่าเวลาที่ได้ไปเป็นเกณฑ์ตัดสินใจในการนำข้อมูลในสเกลที่ 1 ไปคำนวณหาการจัดลำดับการป้องกันและระบุทิศทาง พร้อมทั้งเป็นข้อมูลอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองพีชชีโลจิกสำหรับระบุตำแหน่งและแยกประเภทฟอลต์ต่อไป

### 5.3.2 การระบุทิศทางของฟอลต์ (Fault Direction)

จากการตรวจจับฟอลต์ ทำให้ทราบขนาดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแยกสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก จากนั้นนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าที่ตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน (เลือกค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์เท่านั้นมาทำการเปรียบเทียบ) เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับรายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์ของการระบุทิศทางฟอลต์ได้ง่ายมากยิ่งขึ้น จึงสามารถอธิบายรูปแบบการเปรียบเทียบ

ค่าสัมประสิทธิ์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน ที่ระยะทาง 20% บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 ด้วยการวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบของการเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```

If  $WN1T_{(post)}^L > \max(WN2T_{(post)}^L, WN1O_{(post)}^L, WN2O_{(post)}^L)$ 

then RELAY  $WN1T$  TRIP

elseif  $WN2T_{(post)}^L > \max(WN1T_{(post)}^L, WN1O_{(post)}^L, WN2O_{(post)}^L)$ 

then RELAY  $WN2T$  TRIP

elseif  $WN1O_{(post)}^L > \max(WN1T_{(post)}^L, WN2T_{(post)}^L, WN2O_{(post)}^L)$ 

then RELAY  $WMO$  TRIP

elseif  $WN2O_{(post)}^L > \max(WN1T_{(post)}^L, WN2T_{(post)}^L, WN1O_{(post)}^L)$ 

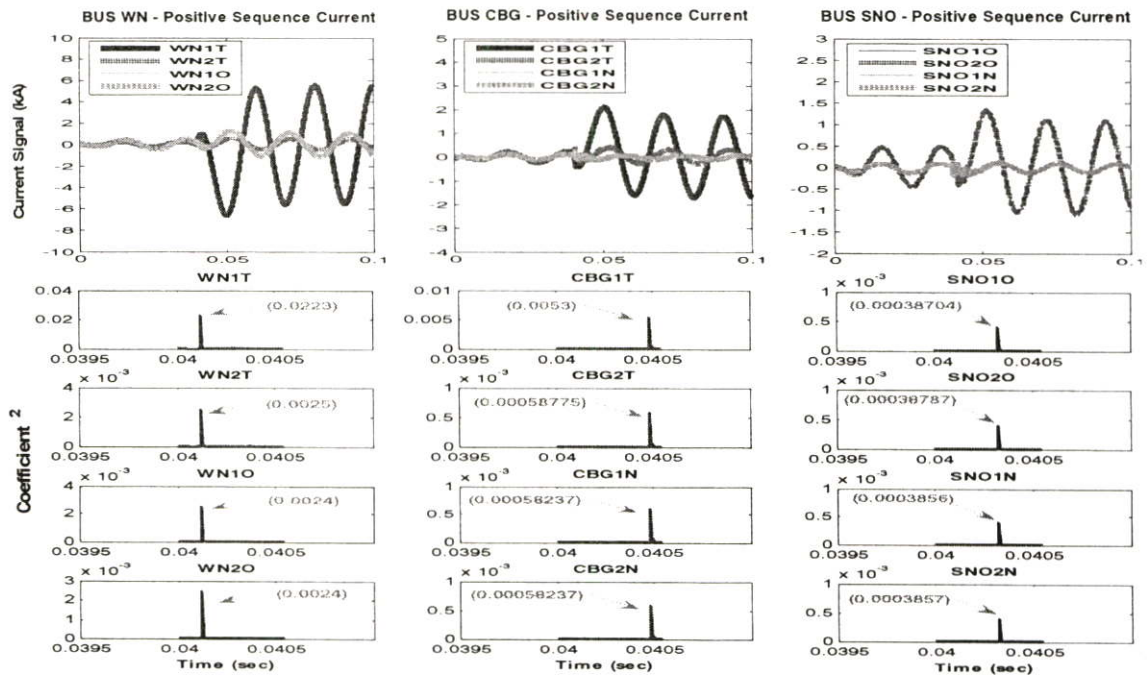
then RELAY  $WN2O$  TRIP

end

```

(5.8)

เมื่อ  $L$  = สเกลที่ใช้ในการวิเคราะห์เวฟเฟิร์ม



รูปที่ 5.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลที่ 1 ของสัญญาณองค์ประกอบกระแสลำดับบวก ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่ง

ตารางที่ 5.5 แสดงผลสรุปของการระบุทิศทางของฟอลต์

ประเภท ฟอลต์	มุมฟอลต์ (องศา)	การระบุทิศทาง (Identify the direction of Fault)											
		Wang - Noi Substation				Chom - Bung Substation				Sai - Noi Substation			
		WN1T	WN2T	WN1O	WN2O	CBG1T	CBG2T	CBG1N	CBG2N	SNO1O	SNO2O	SNO1N	SNO2N
AG	90	0.0592	0.0067	0.0065	0.0065	0.014	0.0016	0.0015	0.0015	0.001	0.001	0.001	0.001
	150	0.0223	0.0025	0.0024	0.0024	0.0053	0.000588	0.000582	0.000582	0.000387	0.000388	0.000386	0.000386
	300	0.0089	0.001	0.000972	0.000972	0.0021	0.000234	0.000231	0.000231	0.000154	0.000154	0.000153	0.000153
	30	0.0514	0.0058	0.0056	0.0056	0.0121	0.0014	0.0013	0.0013	0.000893	0.000895	0.00089	0.00089
ABG	90	0.15	0.0169	0.0164	0.0164	0.0354	0.0039	0.0039	0.0039	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026
	150	0.0105	0.0012	0.0011	0.0011	0.0025	0.000274	0.000274	0.000274	0.000182	0.000183	0.000181	0.000181
	300	0.0812	0.0092	0.0089	0.0089	0.0191	0.0021	0.0021	0.0021	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
	30	0.0799	0.009	0.0088	0.0088	0.0188	0.0021	0.0021	0.0021	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
Result	<b>TRIP</b>	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP	<b>TRIP</b>	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP	Un-TRIP

จากรูปที่ 5.11 และตารางที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าคือ 0.0223 และ 0.0053 (ด้าน WN1T และ CBG1T ตามลำดับ ที่มุมฟอลต์ 150 องศา) แสดงว่าฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งส่วน T ในวงจรที่ 1 ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์คือ ค่าสัมประสิทธิ์จาก WN1T จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของ WN2T, WN1O และ WN2O ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์จาก CBG1T สามารถทำได้ในทำนองเดียวกันกับบัส WN1T จากหลักการดังกล่าวพบว่าทิศทางของฟอลต์มีทิศทางตรงกันกับทิศทางของรีเลย์ทางด้าน WN1T และ CBG1T (Forward line) และจะปลดวงจรที่ 1 ของสายส่งส่วน T ออกจากระบบ ในขณะที่รีเลย์ทางด้านอื่นๆ มีทิศทางไม่ตรงกันกับทิศทางของฟอลต์ (Reverse line) สายส่งในส่วนที่ไม่เกิดฟอลต์จึงสามารถจ่ายโหลดได้ตามปกติ

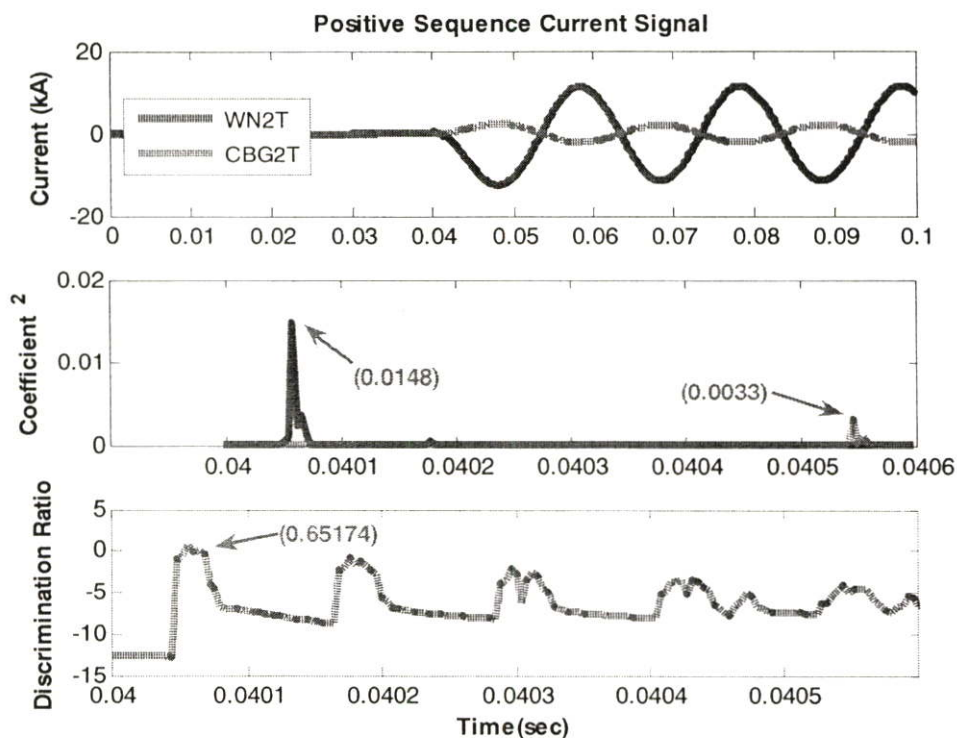
### 5.3.3 การจัดลำดับการป้องกัน (Protective Relay Sequence)

การจัดลำดับการป้องกันหมายถึง การกำหนดหน้าที่การทำงานของรีเลย์ โดยให้รีเลย์ที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ปลดวงจรก่อน และรีเลย์ตัวที่อยู่ห่างออกไป ปลดวงจรทีหลัง ซึ่งจากข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่ปลายแต่ละด้านของสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาลำดับการป้องกัน โดยสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้แทนลงในสมการที่ 5.9 [48]

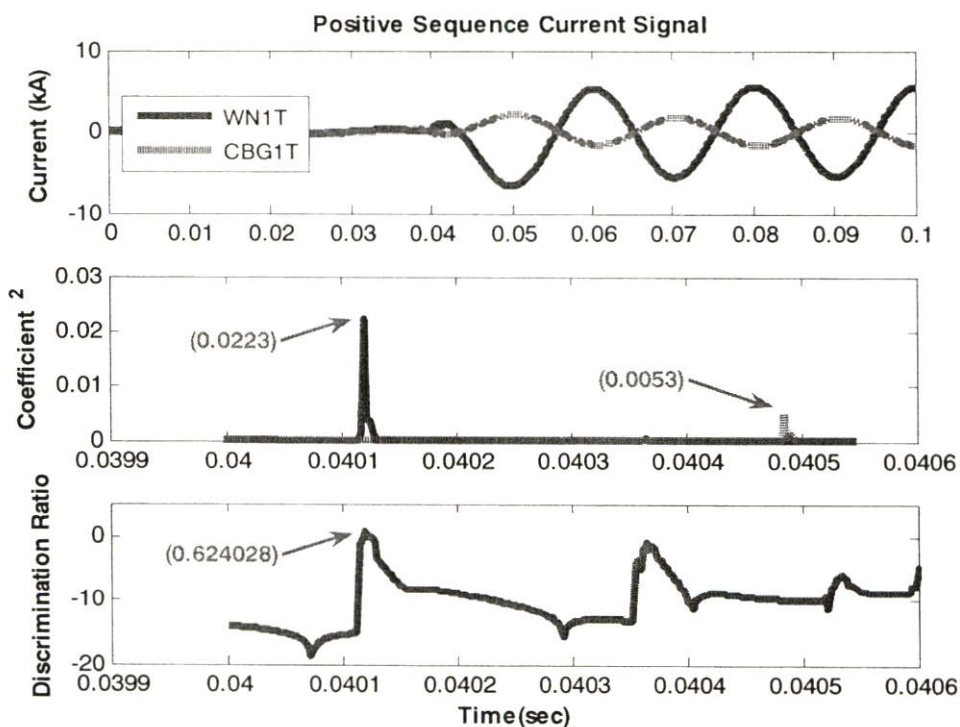
$$\text{Discrimination Ratio} = \log(I_{ef} / I_{er}) \quad (5.9)$$

เมื่อ  $I_{ef}$  = ค่าสัมประสิทธิ์วัดจากปลายด้านส่งในช่วงสายส่งหรือบัส A

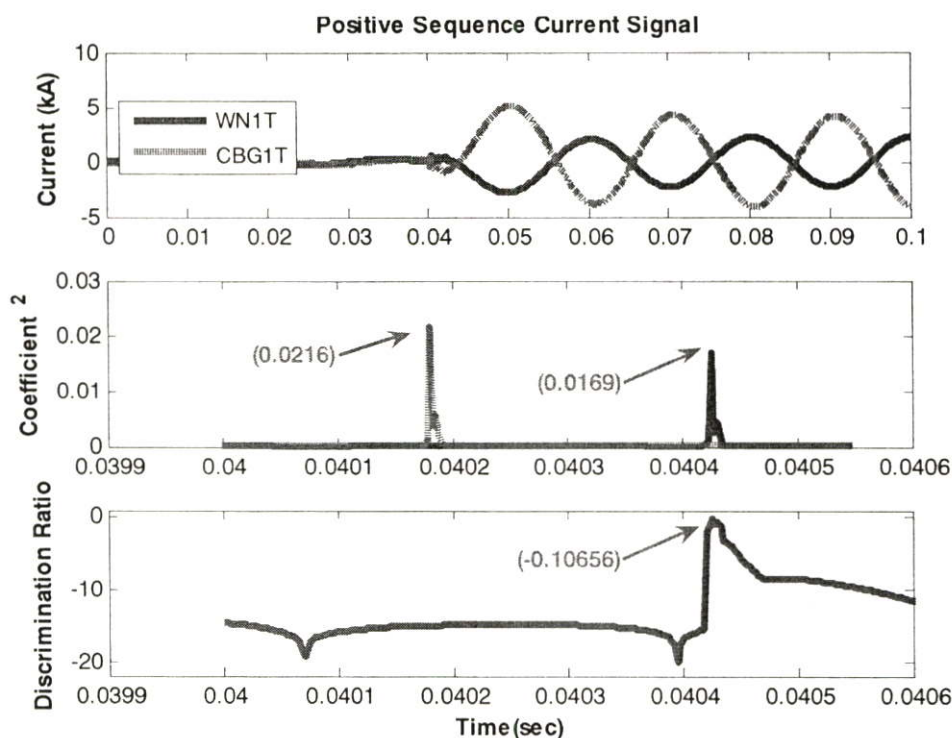
$I_{er}$  = ค่าสัมประสิทธิ์วัดจากปลายด้านรับในช่วงสายส่งหรือบัส B



รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของรีเลย์ igrณีเกิดฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG) ที่ระยะทาง 10% (18.3 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2



รูปที่ 5.13 แสดงผลตอบสนองของรีเลย์ igrณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 20% (36.6 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1



รูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองของรีเลย์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 70% (128.1 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1

ตารางที่ 5.6 แสดงผลสรุปของการจัดลำดับการป้องกัน

ประเภท ฟอลต์	ระยะ ทาง (km)	มุม ฟอลต์ (องศา)	Coefficient of Positive Sequence Value Max (post)								การจัดลำดับการป้องกัน		
			Wang - Noi Substation				Chom - Bung Substation				Ratio	Realy 1st Trip	Realy 2nd Trip
			WN1T	WN2T	WN1O	WN2O	CBG1T	CBG2T	CBG1N	CBG2N			
AG (WN1T-CBG1T)	36.6	90	0.0592	0.0067	0.0065	0.0065	0.014	0.0016	0.0015	0.0015	0.626194	WN1T	CBG1T
		150	0.0223	0.0025	0.0024	0.0024	0.0053	0.00059	0.00058	0.00058	0.624029	WN1T	CBG1T
	128.1	90	0.0428	0.0048	0.0047	0.0047	0.0546	0.0061	0.0061	0.0061	-0.105749	CBG1T	WN1T
		150	0.0169	0.0019	0.0019	0.0019	0.0216	0.0024	0.0024	0.0024	-0.106567	CBG1T	WN1T
ABG (WN2T-CBG2T)	18.3	90	0.0245	0.2165	0.0237	0.0237	0.0053	0.0481	0.0053	0.0053	0.653313	WN2T	CBG2T
		150	0.0017	0.0148	0.0016	0.0016	0.00036	0.0033	0.00036	0.00036	0.651748	WN2T	CBG2T
	109.8	90	0.0029	0.0259	0.0028	0.0028	0.0035	0.0312	0.0035	0.0035	-0.080855	CBG2T	WN2T
		150	0.00022	0.002	0.00022	0.00022	0.00027	0.0024	0.00027	0.00027	-0.079181	CBG2T	WN2T

จากรูปที่ 5.12 - 5.14 และตารางที่ 5.6 สามารถสรุปได้ว่า “ถ้าผลการคำนวณออกมาเป็นบวก รีเลย์ที่ติดตั้งอยู่ทางด้านส่งปลดวงจรก่อน และรีเลย์ทางด้านรับปลดวงจรทีหลัง ในทางกลับกันถ้าผลออกมาเป็นลบรีเลย์ทางด้านรับดำเนินการปลดวงจรก่อนและรีเลย์ทางด้านส่งจึงปลดวงจรทีหลัง”

#### 5.4 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม [49]

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมว่า โครงข่ายประสาทเทียมมีแนวคิดเลียนแบบการทำงานของสมองชีวภาพ โดยเรียนรู้และศึกษาการทำงานของสมองชีวภาพเพื่อกำหนดแนวทางสำหรับการสร้างแบบจำลองขึ้นมา แล้วพยายามสมมติฐานลักษณะการทำงาน โดยจำลองเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเดียวกันแล้วดำเนินการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ ถ้าหากโครงข่ายสามารถคำนวณฟังก์ชันในบางลักษณะที่กำหนด ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตในโครงข่ายได้ สิ่งสำคัญที่ทำให้ผลของการคำนวณนั้นมีความถูกต้องคือจำเป็นต้องมีการฝึกสอนโครงข่าย เพราะฉะนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมจำเป็นต้องมีการฝึกสอนเสียก่อน

การฝึกสอน (Training) เป็นลักษณะที่จะพยายามให้โครงข่ายประสาทเกิดกระบวนการเรียนรู้ในลักษณะที่เราต้องการ โดยลักษณะการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทจะเป็นการป้อนชุดข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายและพยายามปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ จุดให้สอดคล้องกับอินพุตหลายๆ รูปแบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุตเป้าหมายตามที่ต้องการ ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้มีแนวความคิดในการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดมาเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (training pattern) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้และข้อมูลทดสอบ (test pattern) เป็นส่วนที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม แต่ก่อนที่จะทำการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อการเรียนรู้ และประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเนื้อหาและรายละเอียดประกอบไปด้วย

1. จำนวนของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลตรวจสอบ
2. การเลือกตัวแปรหรือกลุ่มของรูปแบบอินพุตและเอาต์พุต
3. จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม
4. ฟังก์ชันกระตุ้น
5. ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสเริ่มต้น
6. วิธีการที่จะปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส
7. ค่าอัตราการเรียนรู้
8. เงื่อนไขที่จะทำให้การประมวลผลหรือการฝึกสอนสิ้นสุดลง

เนื่องจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ Neural Network Toolbox [26] ของโปรแกรม MATLAB ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้นองค์ประกอบบางชนิดที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โปรแกรม MATLAB ได้ทำการกำหนดไว้แล้ว ยกเว้นองค์ประกอบบางชนิด เช่น กลุ่มของรูปแบบอินพุตและเอาต์พุต, จำนวนของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลตรวจสอบ เป็นต้น ตัวผู้ฝึกสอนจะเป็นผู้กำหนดเอง

จุดมุ่งหมายของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์คือ ฝึกสอนเพื่อให้ได้เอาท์พุทตามที่ต้องการ นั่นคือ ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีขั้นตอนการฝึกสอนและการวิเคราะห์ดังนี้

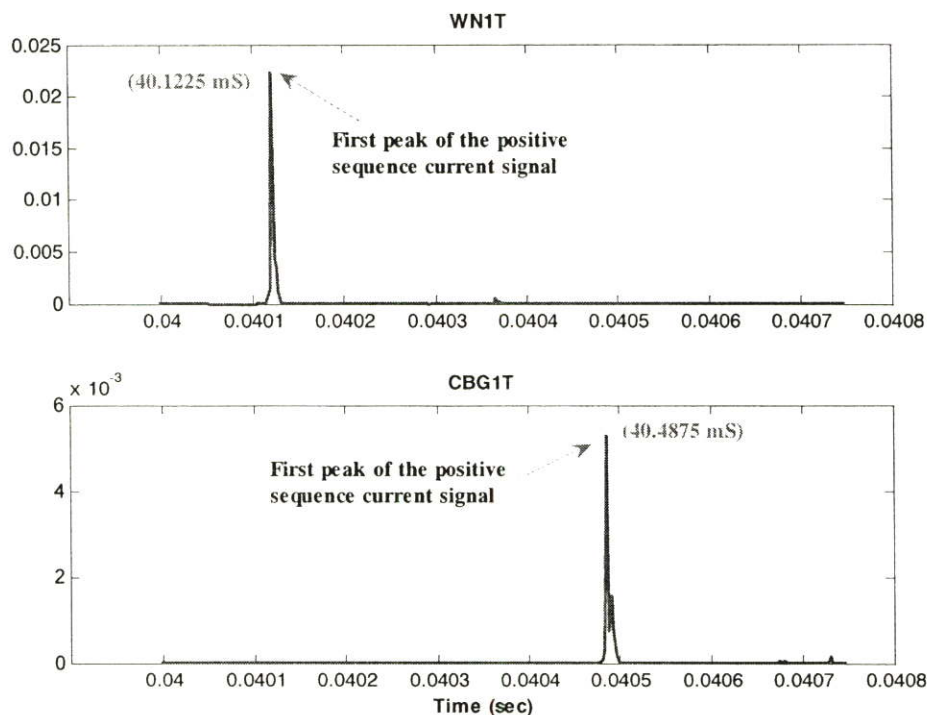
#### 5.4.1 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location) [49]

จากผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน นอกจากจะทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ในแต่ละสเกลแล้ว สิ่งหนึ่งที่สามารถสังเกตได้คือ การเปลี่ยนแปลงนั้นเริ่มเกิดที่เวลาใดบ้างในแต่ละสเกล ซึ่งเวลาที่ได้นี้หมายถึงเวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์นั่นเอง จากทฤษฎีคลื่นเดินทาง (traveling wave) เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนสายส่ง จะส่งผลให้เกิดสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้งสองด้านของสายส่ง ถ้าสามารถตรวจจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมาที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้ ก็สามารถนำเวลาที่ได้นี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการระบุตำแหน่งฟอลต์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการเลือกตัวแปรอินพุทในส่วนของ การหาตำแหน่งฟอลต์ โดยใช้ค่าเวลาของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก ช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์ ซึ่งค่าเวลาที่ได้นี้เป็นค่าเวลาที่สัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์มายังปลายสายส่งแต่ละด้าน ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ซึ่งกลุ่มของตัวแปรอินพุทที่เลือกเป็นผลมาจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง ขณะเกิดฟอลต์ที่เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 วัดจากปลายด้านส่งของสายส่ง (20% ของระยะทางเต็ม 183 กิโลเมตร) ในส่วนของตัวแปรเอาท์พุทจะมีค่าสัมพันธ์กับระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในสายส่ง โดยชุดข้อมูลอินพุทมาจากสายส่งของระบบจำลองในรูปที่ 5.1 ซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลดังนี้

1. ลักษณะการเกิดฟอลต์ได้ 11 ลักษณะ (เฟสเดียวลงดิน, ระหว่างเฟส, สองเฟสลงดิน และฟอลต์ 3 เฟส)
2. ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ 10% - 90% ของระยะทางทั้งหมด โดยมีช่วงของสายส่งทั้งหมด 3 ส่วน คือสายส่งส่วน T, O และ N (ช่วงละ 10%)
3. มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์  $0^\circ - 330^\circ$  เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ  $30^\circ$ )
4. เวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์ 0.04 วินาที

รวมข้อมูลทั้งหมดจำนวน 7128 ชุด จะถูกจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ให้มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Variance) เท่ากับ 1 ก่อนที่นำมาฝึกสอนและทดสอบ

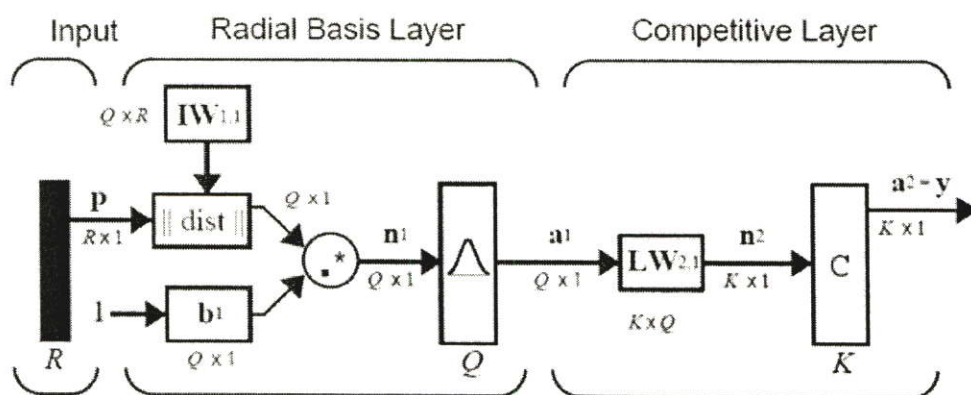
กับโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นจำนวนข้อมูลทั้ง 7128 ชุด จะถูกแบ่งออกเป็น 2376 ชุด สำหรับเป็นข้อมูลฝึกสอน และ 1188 ชุด สำหรับเป็นข้อมูลตรวจสอบ



รูปที่ 5.15 แสดงผลการแปลงเวฟเส้นของกระแสลำดับบวกที่วัดได้จากปลายด้านส่งและรับ

### 5.4.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)

โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox [26] โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic neural network : PNN) แสดงได้ในรูปที่ 5.16 และเอาท์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ตามสมการที่ 5.10



รูปที่ 5.16 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น [26]

เอาท์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ดังนี้

$$o / p_{ANN} = f^4 \left( LW_{2,1} * \exp \left( - \frac{\|p - w_j\|^2}{\sigma_j^2} \right) \right) \quad (5.10)$$

โดยที่  $w_j$  คือ เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน

$\sigma_j$  คือ ค่ากระจายค่าคงที่ (ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าไบอัส  $b = \frac{0.8326}{Spread}$ ) ในชั้นซ่อน

$f^4$  คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดคอมแพติทีฟ (competitive)

$LW_{2,1}$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นเอาต์พุท

$P = [P_1, P_2, \dots, P_R]$  คือ เวกเตอร์อินพุทของโครงข่าย

ก่อนที่จะเริ่มการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN), โครงสร้างก่อนฝึกสอน จะประกอบไปด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ในชั้นอินพุทมี 2 นิวรอนดังแสดงใน รูปที่ 5.15, ในชั้นซ่อนมี 2376 นิวรอน (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะมีค่าเท่ากับจำนวนชุดฝึกสอนเสมอ) และในชั้นเอาท์พุทมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาท์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 9 ซึ่งจะมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งพอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง ดังแสดงในตารางที่ 5.7 ฟังก์ชันกระตุ้นที่อยู่ในชั้นซ่อนจะใช้ชนิดฐานรัศมี (radial basis) ส่วนชั้นเอาท์พุทจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดคอมแพติทีฟ (competitive)

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าเอาท์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)

เอาท์พุทของ PNN	ตำแหน่ง พอลต์ (%)	ระยะทางที่เกิดพอลต์ (km)		
		สายส่ง T	สายส่ง O	สายส่ง N
1	10%	18.3	6.2	10.4
2	20%	36.6	12.4	20.8
3	30%	54.9	18.6	31.2
4	40%	73.2	24.8	41.6
5	50%	91.5	31	52
6	60%	109.8	37.2	62.4
7	70%	128.1	43.4	72.8
8	80%	146.4	49.6	83.2
9	90%	164.7	55.8	93.6

ระหว่างการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (Random initial weight) และเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ (Increase spread) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าไบแอส ( $b = \frac{0.8326}{Spread}$ ) [26] ในชั้นซ่อน ให้กับโครงสร้างเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น หนึ่งรอบการฝึกสอนจะมีการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและปรับเปลี่ยนค่ากระจายค่าคงที่โดยเริ่มต้นที่ 0.0001 เพื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของชุดข้อมูลตรวจสอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.0001 จนถึง 0.1 (เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด)

หลังจากฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น ผลสรุปของการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.8 โดยจะใช้เวลาในการฝึกสอนที่ดีที่สุดประมาณ 0.0721 นาที หรือประมาณ 4.326 วินาที และค่ากระจายค่าคงที่เป็น 0.0001 (รอบที่ 1) จากนั้นจึงนำค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตซึ่งเป็นเมกติกซ์ขนาด (2376,2) และ (9,2376) ตามลำดับ และค่าไบแอสที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงที่สุด (ชุดข้อมูลที่มีค่า MAPE ของชุดตรวจสอบดีที่สุด) นำมาทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบ (ผลสรุปการทดสอบได้แสดงในบทถัดไป)

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

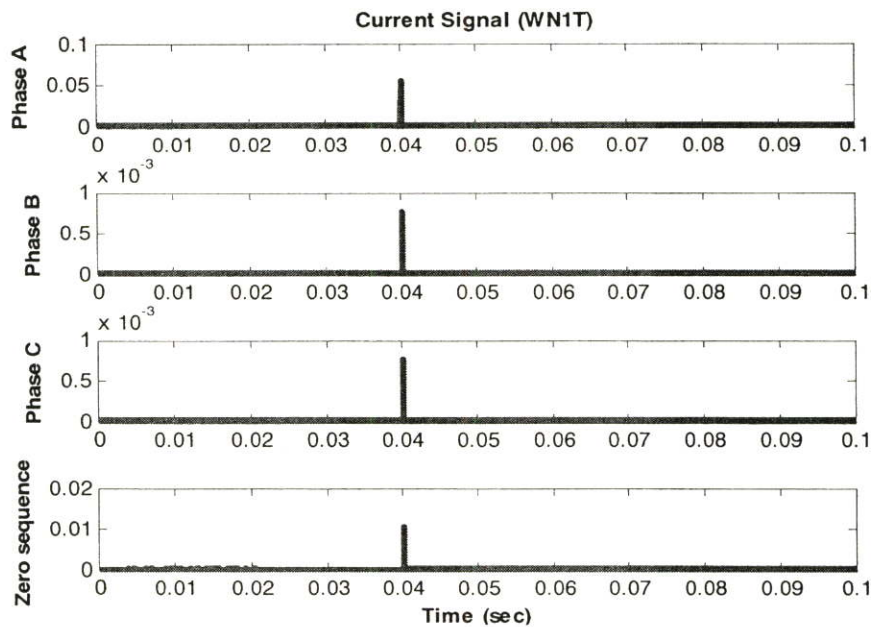
ค่ากระจายค่าคงที่ (Spread)	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001*
MAPE ของชุดฝึกสอน	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAPE ของชุดตรวจสอบ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบ (นาที)	0.0721	0.1502	0.2132	0.2799	0.3591	0.4398	0.5343	0.6393	0.7401	0.825

หมายเหตุ \*0.001 คือ ค่ากระจายค่าคงที่ตั้งแต่ 0.001 จนถึง 0.1 ค่า MAPE ทั้งสองชุดมีค่าเท่ากัน

#### 5.4.2 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault Identification) [49]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเลือกตัวแปรอินพุตในส่วนของการระบุประเภทฟอลต์ โดยใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.17 และตารางที่ 5.9 ซึ่งกลุ่มของตัวแปรอินพุตที่เลือกเป็นผลมาจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) ขณะ

เกิดฟอลต์ที่เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 วัดจากปลายด้านส่ง (20% ของระยะทางเต็ม 183 กิโลเมตร) ในส่วนของตัวแปรเอาท์พุทจะมีค่าสัมพันธ์กับเฟส (A, B, C) และกราวด์ (G) หรือชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง



รูปที่ 5.17 แสดงผลการแปลงเวฟเส้นของกระแสที่วัดได้จากปลายด้านส่ง (WN1T)

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์กระแสฟอลต์ในช่วง ¼ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่ปลายด้านส่ง (WN1T) ในสเกลที่ 1

เวฟเส้น	Phase A	Phase B	Phase C	Zero sequence
สเกลที่ 1	Max (post)	Max (post)	Max (post)	Max (post)
Current	0.0533	7.63E-04	7.63E-04	0.0103

รวมชุดข้อมูลทั้งหมดจำนวน 7128 ชุด ถูกจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ก่อนที่นำมาฝึกสอนและทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นจำนวนข้อมูลทั้ง 7128 ชุด จะถูกแบ่งออกเป็น 3424 ชุด สำหรับเป็นข้อมูลฝึกสอน และ 1188 ชุด สำหรับเป็นข้อมูลตรวจสอบ

#### 5.4.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN)

โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox [26] โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic neural network : PNN) แสดงได้ในรูปที่ 5.16 และเอาท์พุท

ของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ตามสมการที่ 5.10 โดยที่เวกเตอร์อินพุทจะใช้ข้อมูลทั้ง 4 ค่าตามตารางที่ 5.9 ซึ่งมีความแตกต่างจากเวกเตอร์อินพุทของการระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

ก่อนที่จะเริ่มการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) โครงสร้างก่อนฝึกสอนจะประกอบไปด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ในชั้นอินพุทมี 4 นิวรอนดังแสดงใน รูปที่ 5.17 และตารางที่ 5.9, ในชั้นซ่อนมี 3424 นิวรอน (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะมีค่าเท่ากับจำนวนชุดฝึกสอนเสมอ) และในชั้นเอาต์พุทมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 11 ซึ่งจะมีค่าสัมพันธ์กับประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง สามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.10 ฟังก์ชันกระตุ้นที่อยู่ในชั้นซ่อนจะใช้ชนิดฐานรัศมี (radial basis) ส่วนชั้นเอาต์พุทจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดคอมเพทิทีฟ (competitive)

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นสำหรับระบุเฟส

เอาต์พุทของ PNN	ประเภท ฟอลต์	เอาต์พุทของ PNN	ประเภท ฟอลต์	เอาต์พุทของ PNN	ประเภท ฟอลต์
1	AG	5	CAG	9	CA
2	BG	6	BCG	10	BC
3	CG	7	ABCG	11	ABC
4	ABG	8	AB		

ระหว่างการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (Random initial weight) และเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ (Increase spread) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าไบอัส ( $b = \frac{0.8326}{Spread}$ ) [26] ในชั้นซ่อน ให้กับโครงสร้างเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น หนึ่งรอบการฝึกสอนจะมีการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและปรับเปลี่ยนค่ากระจายค่าคงที่โดยเริ่มต้นที่ 0.0001 เพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของชุดข้อมูลตรวจสอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.0001 จนถึง 0.1 (เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด)

หลังจากฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น ผลสรุปของการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.11 โดยจะใช้เวลาในการฝึกสอนที่ดีที่สุดประมาณ 9.708 นาที และค่ากระจายค่าคงที่เป็น 0.002 (รอบที่ 20) จากนั้นจึงนำค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุทซึ่งเป็นเมกติกซ์ขนาด (3424,4) และ (11,3424) ตามลำดับ และค่าไบอัสที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

(ชุดที่มีค่า MAPE ของชุดตรวจสอบดีที่สุด) จะนำมาทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบเพื่อสำหรับหาคำตอบคือเฟสที่เกิดฟอลต์ (ผลสรุปการทดสอบได้แสดงในบทถัดไป)

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

ค่ากระจายค่าคงที่ (Spread)	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.001
MAPE ของชุดฝึกสอน	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MAPE ของชุดตรวจสอบ	9	4	4	4	4	4	4	4	4	4
เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบ (นาที)	0.3213	0.7833	1.2961	1.7765	2.2697	2.7479	3.2302	3.7513	4.2591	4.778

ตารางที่ 5.11 (ต่อ)

ค่ากระจายค่าคงที่ (Spread)	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0015	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019	0.002*
MAPE ของชุดฝึกสอน	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MAPE ของชุดตรวจสอบ	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1
เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบ (นาที)	5.2963	5.8322	6.3838	6.9338	7.3997	7.8846	8.4039	8.8648	9.2804	9.708

หมายเหตุ \*0.002 คือ ค่ากระจายค่าคงที่ตั้งแต่ 0.002 จนถึง 0.1 ค่า MAPE ทั้งสองชุดมีค่าเท่ากัน

## 5.5 การวิเคราะห์ด้วยฟuzzy logic

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของระบบฟuzzy logic ว่า ฟuzzy logic ใช้ตัวเลขแทนตัวแปรที่เป็นภาษาพูดตามธรรมชาติที่คลุมเครือไม่ชัดเจนของมนุษย์ ฟuzzy logic หรือ ฟuzzy เซตจึงถูกใช้เพื่ออธิบายสิ่งที่มีความคลุมเครือและไม่สามารถกำหนดขอบเขตได้อย่างชัดเจน ฟuzzy logic จัดการกับข้อมูลโดยการประมาณอย่างเป็นระบบ ทำให้สามารถนำฟuzzy logic มาใช้ควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรือจำลองระบบที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ฟuzzy เซตจะ

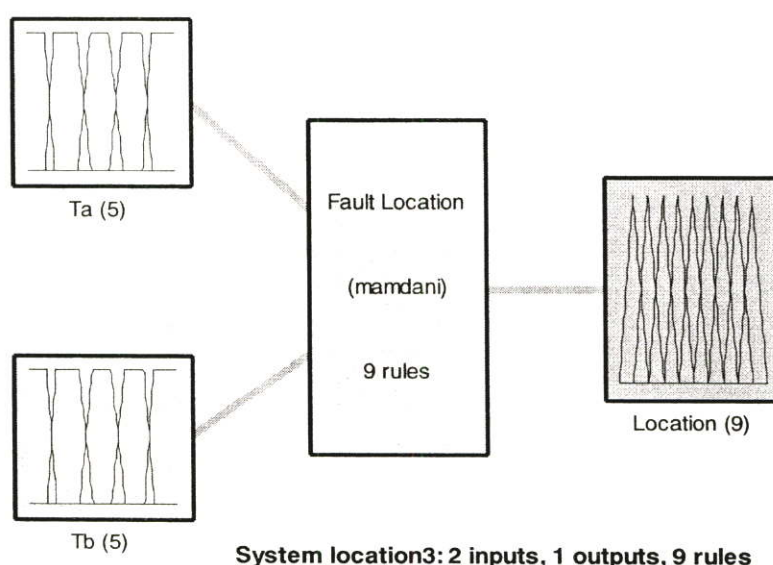
แสดงความสัมพันธ์ในลักษณะของระดับความเป็นสมาชิก โดยสมาชิกภายในเซตจะมีอัตราความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ส่วนการควบคุมแบบฟัซซี่ คือการนำส่วนที่เป็นประสพการณ์หรือความชำนาญของผู้ควบคุมระบบมาสร้างเป็นกฎแบบฟัซซี่ และเก็บไว้เป็นฐานความรู้

ในการออกแบบสร้างแบบจำลองฟัซซี่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ จะเป็นตัวควบคุมแบบใช้ฐานความรู้ (Knowledge base) หรือประสพการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งเป็นกฎหรือแนวทางที่ใช้ในการควบคุมระบบ ซึ่งจุดมุ่งหมายของการสร้างแบบจำลองฟัซซี่โลจิกในวิทยานิพนธ์นี้คือ สร้างแบบจำลองฟัซซี่โลจิกเพื่อให้ได้เอาต์พุตตามที่ต้องการ นั่นคือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีขั้นตอนการออกแบบและการวิเคราะห์ดังนี้

### 5.5.1 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault Location)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการเลือกตัวแปรอินพุตในส่วนของการหาตำแหน่งฟอลต์ โดยใช้ค่าเวลาของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก ช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์ ซึ่งค่าเวลาที่ได้นี้เป็นค่าเวลาที่สัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์มายังปลายสายส่งแต่ละด้าน ดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ข้อมูลอินพุตมีจำนวน 7128 ชุด) จากรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่าเวลาที่ได้อคือ 40.1225 และ 40.4875 ms ถูกเลือกนำไปเป็นข้อมูลอินพุตให้กับแบบจำลองฟัซซี่โลจิกในส่วนของตัวแปรเอาต์พุตจะมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ดังแสดงในตารางที่ 5.7

การสร้างแบบจำลองฟัซซี่โลจิกสำหรับการหาตำแหน่งฟอลต์ มีโครงสร้างประกอบด้วย 2 อินพุต 1 เอาต์พุต และ 9 กฎ ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งอธิบายการออกแบบในแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.18 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี่โลจิกสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์

### 5.5.1.1 ฟัชซิฟิเคชันโมดูล (Fuzzification Module)

เป็นขั้นตอนการแปลงอินพุตแบบคริปส์เซตของค่าเวลาจากสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่ตรวจจับพอลต์ได้ในสเกลแรก ให้อยู่ในรูปของฟัชซิเซต โดยค่าระดับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $T_a$  และ  $T_b$  ถูกกำหนดให้เท่ากับ  $\mu_A$  และ  $\mu_B$  ตามลำดับ และมีค่าอยู่ในช่วง  $[0,1]$  ( $T_a$  คือค่าเวลาที่สัญญาณพอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดพอลต์มายังปลายสายส่งด้านส่งหรือบัส A ;  $T_b$  คือค่าเวลาที่สัญญาณพอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดพอลต์มายังปลายสายส่งด้านรับหรือบัส B)

### 5.5.1.2 ฐานความรู้ (Knowledge Base)

ฐานความรู้ประกอบไปด้วยฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎ (rules base) ในส่วนของฐานข้อมูลนั้นจะเป็นที่เก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ ของทั้งตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ส่วนฐานกฎ เป็นที่เก็บกฎการควบคุมของฟัชซิโลกิ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของชุดคำสั่ง IF-THEN โดยมีเนื้อหารายละเอียดดังนี้

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต

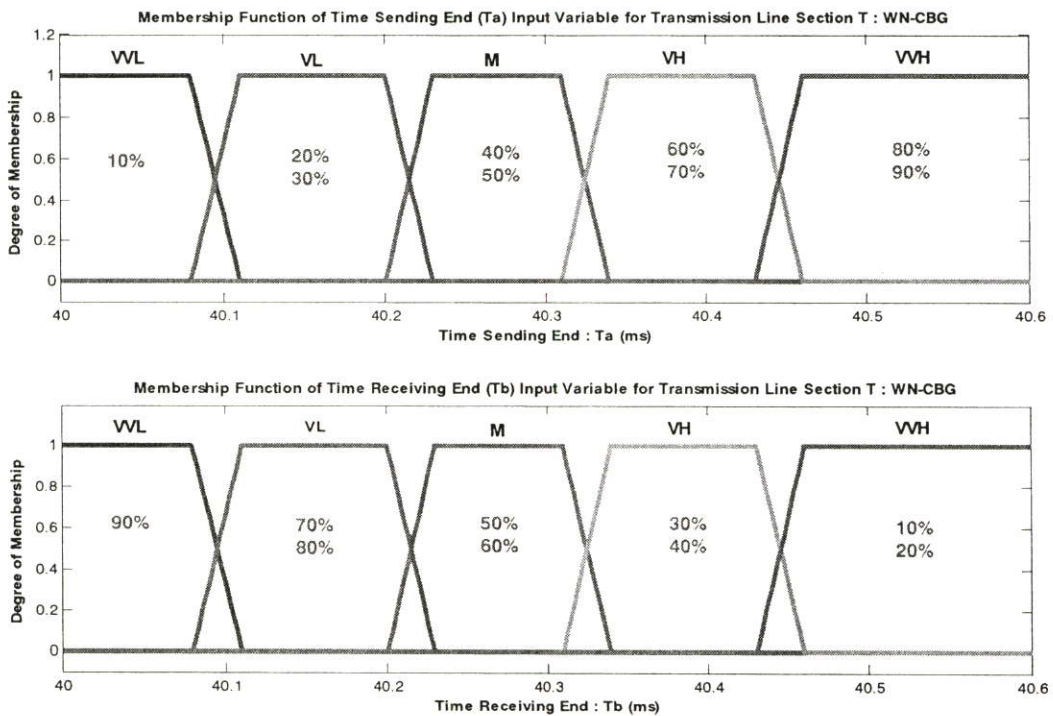
เป็นฟังก์ชันที่ใช้แปลงข้อมูลอินพุตแบบคริปส์เซต  $T_a$  และ  $T_b$  ให้อยู่ในรูปของฟัชซิเซต สำหรับสายส่งส่วน T, O และ N สามารถกำหนดย่านของเอกภพสัมพัทธ์ของ  $T_a$  และ  $T_b$  เท่ากับ  $[40.0,40.6]$ ,  $[40.0,40.2]$  และ  $[40.0,40.3]$  ตามลำดับ (โดยที่ค่าของ  $T_a$  และ  $T_b$  นี้จะมีค่าแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ความยาวสายส่งและชนิดของสายตัวนำเป็นต้น) จำนวนเทอมของฟัชซิเซตมีทั้งหมด 5 เทอม และกำหนดค่าลิงกัจิสติกหรือตัวแปรภาษาพูด (Linguistic variable) ได้ 5 ระดับ ดังนี้

1. VVL คือค่าเวลาของสัญญาณพอลต์ต่ำมากๆ
2. VL คือค่าเวลาของสัญญาณพอลต์ต่ำ
3. M คือค่าเวลาของสัญญาณพอลต์ปานกลาง
4. VH คือ ค่าเวลาของสัญญาณพอลต์สูง
5. VVH คือค่าเวลาของสัญญาณพอลต์สูงมากๆ

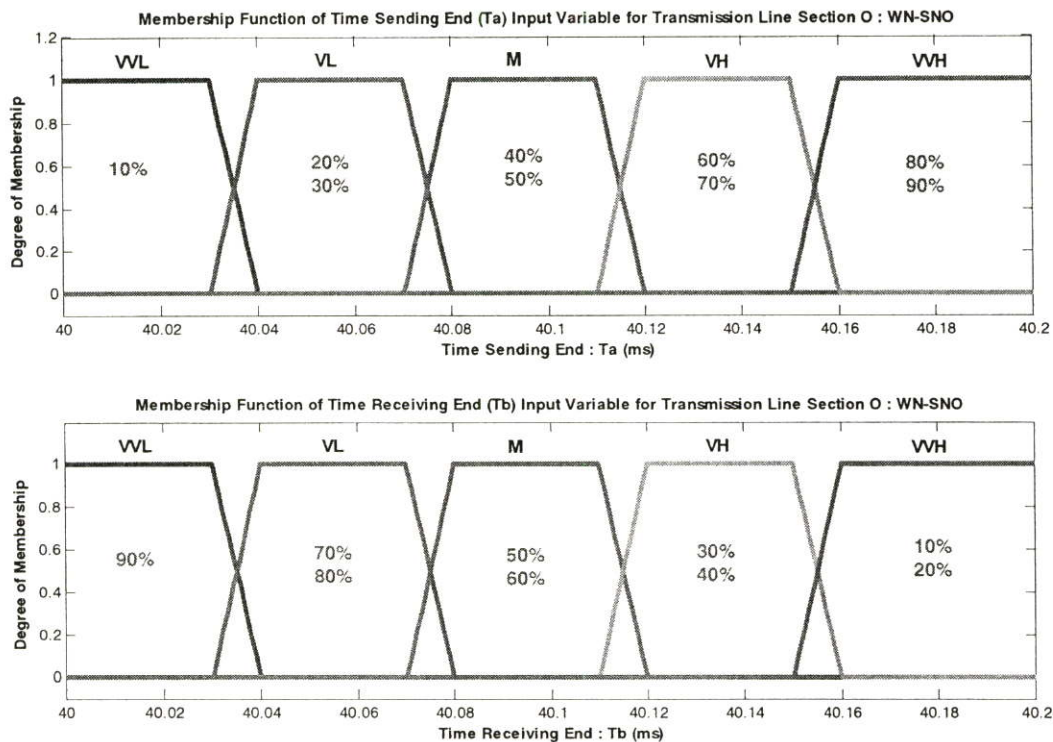
สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรอินพุตเป็นแบบฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function) เนื่องจากจะมีค่าที่เหมาะสมมากที่สุดอยู่กลุ่มหนึ่งที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซตนั้นๆ มีค่าเท่ากับหนึ่ง โดยมีสมการดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \text{ และ } a \neq b \\ 1 & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \\ \frac{1}{d-c}(d - x_i) & ; \text{ถ้า } c < x_i \leq d \text{ และ } c \neq d \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (5.11)$$

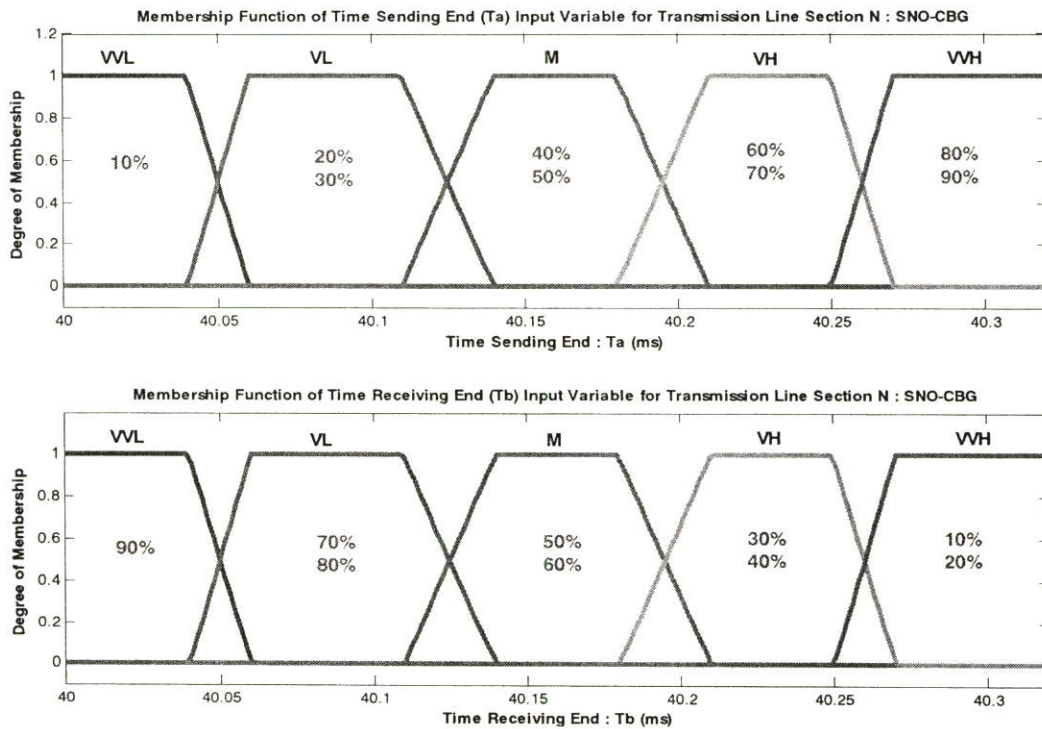
สามารถแสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุทได้ดังรูปที่ 5.19 – 5.21



รูปที่ 5.19 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุท Ta, Tb สำหรับสายส่งส่วน T



รูปที่ 5.20 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต Ta, Tb สำหรับสายส่งส่วน O

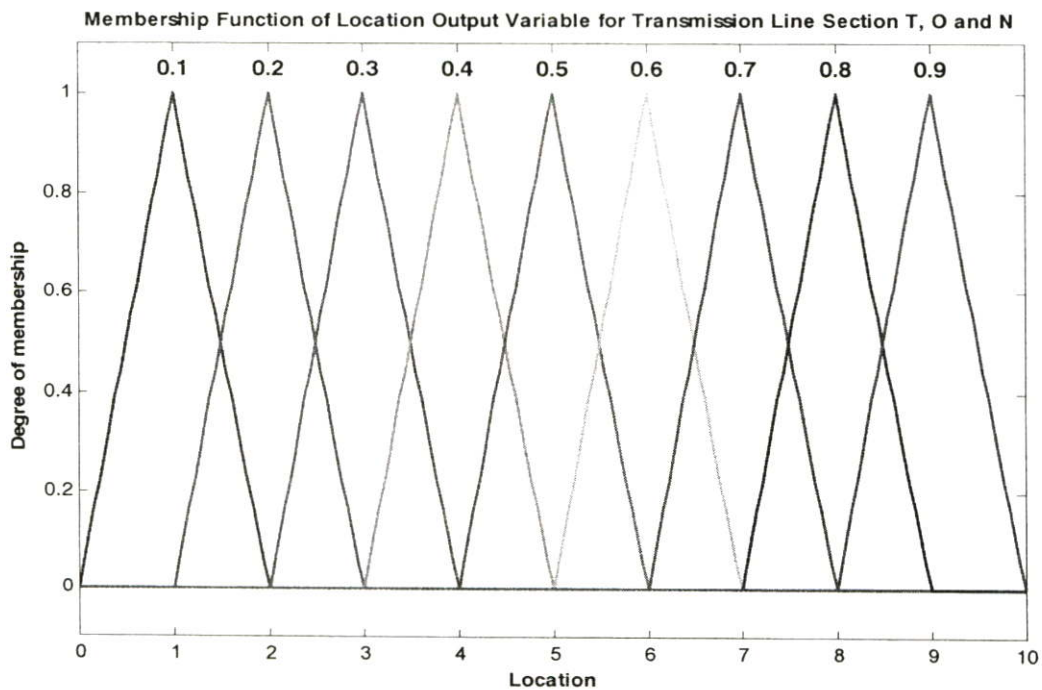


รูปที่ 5.21 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต Ta, Tb สำหรับสายส่งส่วน N

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

เป็นตัวกำหนดค่าตัวแปรเอาต์พุตของพีชซีเซต เพื่อค่าที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการอนุมาน (Inference) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือการกำหนดจำนวนเทอมเซตของแต่ละตัวแปรให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การอนุมานค่าตัวแปรของเอาต์พุตมีความใกล้เคียงกับค่าของตัวแปรที่แท้จริงมากที่สุด ซึ่งจุดนี้ผู้ออกแบบระบบจำลองพีชซีจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับระบบมากพอสมควร โดยตัวแปรเอาต์พุตที่กำหนดขึ้นจะสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในส่วนของดีพีซีซีพีเคชัน และมีย่านเอกภพสัมพัทธ์ของตำแหน่งฟอลต์เท่ากับ  $[0,10]$  มีจำนวนเทอมเซตทั้งหมด 9 เทอมและค่าตัวแปรลิงก์จัสติก 9 ระดับ ดังรูปที่ 5.22 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรเอาต์พุตเป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม โดยมีสมการดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \text{ และ } a \neq b \\ \frac{1}{c-b}(c - x_i) & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \text{ และ } b \neq c \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (5.12)$$



รูปที่ 5.22 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต (Location)

### 5.5.1.3 กลไกการอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference Engine)

การอนุมานฟัซซี่จะอาศัยหลักการของกฎฟัซซี่โลจิกในรูปแบบคำสั่ง IF-THEN จากฐานความรู้ของฟัซซี่ โดยประพจน์ที่ตามหลัง IF จะเป็นเงื่อนไขเรียกว่าเหตุ (antecedent) ซึ่งคืออินพุทของฟัซซี่ ส่วนประพจน์ที่ตามหลัง THEN เรียกว่าผล (consequent) ซึ่งเป็นเอาต์พุทของฟัซซี่ ผลของการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานได้ตามกฎการอนุมานแบบแมมดานี (Mamdani's rule) [40] ซึ่งกฎฟัซซี่แสดงได้ตามตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 กฎของฟัซซี่สำหรับการระบุตำแหน่งพอลต์ (สายส่งส่วน T, O และ N)

ตำแหน่งพอลต์ (%)	กฎฟัซซี่	คำตอบของฟัซซี่
10%	If (Ta is VVL) and (Tb is VVH) THEN (Location is 0.1)	1
20%	If (Ta is VL) and (Tb is VVH) THEN (Location is 0.2)	2
30%	If (Ta is VL) and (Tb is VH) THEN (Location is 0.3)	3
40%	If (Ta is M) and (Tb is VH) THEN (Location is 0.4)	4
50%	If (Ta is M) and (Tb is M) THEN (Location is 0.5)	5
60%	If (Ta is VH) and (Tb is M) THEN (Location is 0.6)	6
70%	If (Ta is VH) and (Tb is VL) THEN (Location is 0.7)	7
80%	If (Ta is VVH) and (Tb is VL) THEN (Location is 0.8)	8
90%	If (Ta is VVH) and (Tb is VVL) THEN (Location is 0.9)	9

ตารางที่ 5.13 เมตริกซ์ของกฎฟัซซี่สำหรับการระบุตำแหน่งพอลต์

mfs Input 1	mfs Input 2	mfs Output	Weight	Connection (AND)	Output Variable
1	5	1	1	1	0.1
2	5	2	1	1	0.2
2	4	3	1	1	0.3
3	4	4	1	1	0.4
3	3	5	1	1	0.5
4	3	6	1	1	0.6
4	2	7	1	1	0.7
5	2	8	1	1	0.8
5	1	9	1	1	0.9

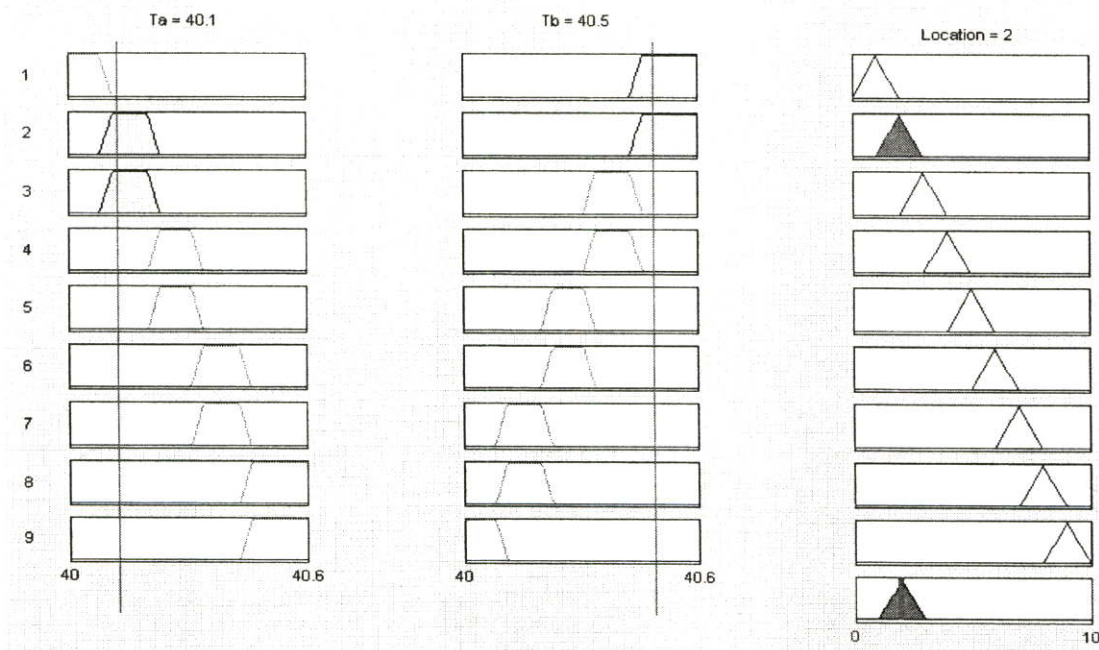
จากตารางที่ 5.13 ในคอลัมน์ 1-2 หมายถึงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุท Ta และ Tb ขณะที่คอลัมน์ที่ 3 คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุท (location) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ สำหรับคอลัมน์ที่ 4-5 คือค่าการถ่วงน้ำหนัก และรูปแบบการเชื่อมโยงกันของประพจน์ โดยอาศัยตัวเชื่อมโยงแบบอินเตอร์เซกชัน (AND) ตามลำดับ

#### 5.5.1.4 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Module)

ทำหน้าที่แปลงค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าแบบคริปส์เซต โดยการอนุมานจากค่าความจริงในส่วนของเหตุในแบบจำลองฟัซซี่ ค่าที่ได้เป็นเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุท ซึ่งนำไปใช้ระบุตำแหน่งฟอลต์ต่อไป ในโปรแกรม MATLAB มีการดีฟัซซิฟิเคชันอยู่หลายวิธีสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อัลกอริทึมการหาค่าจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนัก (COG method) ดังสมการที่ 5.13 [40]

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_c(Z_i) \times Z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_c(Z_i)} \quad (5.13)$$

เมื่อ  $Z_0$  = ตัวแปรเอาต์พุทในรูปของคริปส์เซต,  $Z_i$  = ตัวแปรเอาต์พุทที่ได้จากแต่ละกฎ,  $i$  = จำนวนกฎที่ถูกประเมิน,  $\mu_c(Z_i)$  = ค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากการอนุมาน



รูปที่ 5.23 แสดงตัวอย่างของกลไกการอนุมานแบบ Mamdani's rule และการทำดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี COG method สำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์

### 5.5.2 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault Identification)

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเลือกตัวแปรอินพุทในส่วนของการระบุประเภทฟอลต์ โดยใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ (เช่นเดียวกันกับการระบุประเภทฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น) ดังรูปที่ 5.17 และตารางที่ 5.9 ซึ่งกลุ่มของตัวแปรอินพุทที่เลือกเป็นผลมาจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ในส่วนของตัวแปรเอาต์พุทจะมีค่าสัมพันธ์กับเฟส (A, B, C) และกราวด์ (G) หรือชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง

ก่อนที่จะทำการหาค่าตอบของแบบจำลองพีชชีโลจิกสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ จุดประสงค์เพื่อให้ข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์มีรูปแบบที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และง่ายต่อการกำหนดย่านเอกภพสัมพัทธ์ในส่วนของการแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุทของแบบจำลองพีชชีโลจิก เพื่อสะดวกในการอธิบายขั้นตอนทั้งหมดจึงทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 5.5.2.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์

สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) ตัวแปรค่าสูงสุดในช่วงก่อนและหลังเกิดฟอลต์ [14]

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

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

$I_{A, \max(\text{post})}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส A ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$I_{B, \max(\text{post})}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส B ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$I_{C, \max(\text{post})}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส C ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$I_{A, B \max(\text{post})}^L$  = ผลหาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดระหว่างองค์ประกอบที่เฟส A และ B ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$I_{B, C \max(\text{post})}^L$  = ผลหาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดระหว่างองค์ประกอบที่เฟส B และ C ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$I_{C, A \max(\text{post})}^L$  = ผลหาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดระหว่างองค์ประกอบที่เฟส C และ A ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

## 2) ตัวแปรการตรวจสอบ [14]

$Z_{chk}^L$  = ค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ระหว่างก่อนเกิดฟอลต์และหลังเกิดฟอลต์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้น

## 3) ตัวแปรอินพุทของแบบจำลองฟิซซีโลจิก

$I_{P1, \max}^L, \dots, I_{P4, \max}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L ใช้สำหรับเป็นข้อมูลอินพุทให้กับฟิซซีโลจิก

หมายเหตุ :  $L$  = สเกลที่ใช้ในการวิเคราะห์เวฟเล็ด (สเกลที่ 1)

## 5.5.2.2 การเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

จากเทคนิคการแบ่งประเภทฟอลต์ด้วยพื้นฐานของเวฟเล็ดและฟิซซีโลจิกสำหรับรีเลย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง [50] ได้ใช้การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสในแต่ละเฟสมาคำนวณหาอัตราส่วนของมุมเฟส ( $C_{iab}/C_{ibc}$ ), ( $C_{ibc}/C_{ica}$ ) และ ( $C_{ica}/C_{iab}$ ) เมื่อ C คือมุมระหว่างเฟส ซึ่งวิธีดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อสะดวกในการกำหนดย่านของเอกภพสัมพัทธ์ และกำหนดขอบเขตของข้อมูลได้อย่างชัดเจน เช่น ทราบว่ากลุ่มข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 1 อยู่ในช่วง HIGH และน้อยกว่า 1 อยู่ในช่วง LOW เป็นต้น จากแนวความคิดดังกล่าว จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ โดยเปลี่ยนจากการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสมาเป็นการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ตามลำดับ การกำหนดขอบเขตข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ทำได้โดยใช้สมการที่ 5.14 - 5.26 โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาหาย่านเอกภพสัมพัทธ์ขององค์ประกอบในแต่ละเฟส

$$I_{A,B \max(post)}^L = \frac{I_{A, \max(post)}^L}{I_{B, \max(post)}^L} \quad (5.14)$$

$$I_{B,C \max(post)}^L = \frac{I_{B, \max(post)}^L}{I_{C, \max(post)}^L} \quad (5.15)$$

$$I_{C,A \max(post)}^L = \frac{I_{C, \max(post)}^L}{I_{A, \max(post)}^L} \quad (5.16)$$

$$I_{P1, \max(post)}^L = \frac{I_{A,B \max(post)}^L}{I_{B,C \max(post)}^L} \quad (5.17)$$

$$I_{P2, \max(post)}^L = \frac{I_{B,C \max(post)}^L}{I_{C,A \max(post)}^L} \quad (5.18)$$

$$I_{P3, \max(post)}^L = \frac{I_{C,A \max(post)}^L}{I_{A,B \max(post)}^L} \quad (5.19)$$

สำหรับเงื่อนไขการพิจารณาว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งลงดินหรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยใช้สมการดังนี้ [14]

$$Z_{\text{chk}}^L = \frac{Z_{\max(post)}^L}{Z_{\max(pre)}^L} \quad (5.20)$$

จากนั้นจึงใช้รูปแบบในลักษณะของการเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

$$\text{if } (Z_{\max(post)}^L \geq 5 \times Z_{\max(pre)}^L) \text{ or } (Z_{\text{chk}}^L \geq 0.00005)$$

$$\text{then } I_{P4, \max(post)}^L = 1 \quad (5.21)$$

$$\text{else } I_{P4, \max(post)}^L = 0 \quad (5.22)$$

end

เพื่อแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน จึงขอยกตัวอย่างสัญญาณของฟอลต์เฟส เดียวลงดิน (AG, BG และ CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, CA และ BC), ฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (ABG, CAG และ BCG) และฟอลต์สามเฟส (ABC และ ABCG) ที่ระยะทาง 20% (36.6 กิโลเมตร) บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 ซึ่งเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งตามระบบจำลองในรูปที่ 5.1 โดยนำสัญญาณกระแสที่ปลายด้านส่งมาทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.14 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล

ประเภท พอลต์	ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ด				
	$I_{A,\max(\text{post})}^L$	$I_{B,\max(\text{post})}^L$	$I_{C,\max(\text{post})}^L$	$Z_{\max(\text{post})}^L$	$Z_{\max(\text{pre})}^L$
AG	0.0533	7.63E-04	7.63E-04	0.0103	1.19E-14
BG	3.04E-04	0.0212	3.04E-04	0.0041	1.19E-14
CG	0.002	0.002	0.1418	0.0273	1.19E-14
ABG	0.0391	0.0062	0.0014	0.019	1.19E-14
CAG	0.1377	2.11E-04	0.2285	0.0028	1.19E-14
BCG	5.30E-04	0.0785	0.2023	0.0071	1.19E-14
ABCG	0.1042	0.0415	0.2771	8.19E-13	1.19E-14
AB	0.0038	0.0038	8.45E-15	2.55E-21	1.19E-14
CA	0.1936	9.07E-15	0.1936	2.55E-21	1.19E-14
BC	8.99E-15	0.1431	0.1431	2.55E-21	1.19E-14
ABC	0.1146	0.0456	0.3049	2.55E-21	1.19E-14

ตารางที่ 5.15 แสดงผลหารค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์และค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบลำดับศูนย์ของการแปลงเวฟเล็ดในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล

ประเภท พอลต์	ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ด			
	$I_{A,B \max(\text{post})}^L$	$I_{B,C \max(\text{post})}^L$	$I_{C,A \max(\text{post})}^L$	$Z_{\text{chk}}^L$
AG	69.8961393	1.00001311	0.01430675	8.62E+11
BG	0.01432217	69.8241223	0.99996707	3.43E+11
CG	1	0.01410437	70.9	2.28E+12
ABG	6.30645161	4.42857143	0.03580563	1.59E+12
CAG	652.173913	0.00092403	1.6594045	2.34E+11
BCG	0.00675516	0.38803757	381.496568	5.94E+11
ABCG	2.51084337	0.14976543	2.65930902	6.86E+01
AB	1	4.4958E+11	2.2243E-12	2.13E-07
CA	2.1345E+13	4.6849E-14	1	2.13E-07
BC	6.2818E-14	1	1.5919E+13	2.13E-07
ABC	2.51315789	0.14955723	2.66055846	2.13E-07

ตารางที่ 5.16 แสดงสัมประสิทธิ์ตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองฟิชชีโลจิก

ประเภท	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอินพุตสำหรับฟิชชีเซต			
	$I_{P1,max}^L(post)$	$I_{P2,max}^L(post)$	$I_{P3,max}^L(post)$	$I_{P4,max}^L(post)$
AG	69.8952227	69.8979726	0.00020469	1
BG	0.00020512	69.826422	69.819523	1
CG	70.9	0.00019893	70.9	1
ABG	1.42403746	123.683673	0.00567762	1
CAG	705795.866	0.00055684	0.00254442	1
BCG	0.01740852	0.00101715	56474.8446	1
ABCG	16.7651735	0.05631742	1.05912979	1
AB	2.2243E-12	2.0212E+23	2.2243E-12	0
CA	4.5561E+26	4.6849E-14	4.6849E-14	0
BC	6.2818E-14	6.2818E-14	2.5342E+26	0
ABC	16.8039878	0.05621272	1.05865154	0

จากตารางที่ 5.16 สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์บางตัวแปรจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง จึงกำหนดว่า “ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรใด ( $I_{P1,max}^L(post)$ ,  $I_{P2,max}^L(post)$  และ  $I_{P3,max}^L(post)$ ) มีค่าสูงเกินกว่า 100 แล้ว จะสามารถกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรดังกล่าว นั้น มีค่าเท่ากับ 100” เพื่อบังคับไม่ให้ย่านเอกภพสัมพัทธ์ของแบบจำลองฟิชชีมีช่วงที่กว้างเกินจนเกินไป ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{if } (I_{P1,max}^L(post), \dots, I_{P3,max}^L(post)) \geq 100$$

then

$$(I_{P1,max}^L, \dots, I_{P3,max}^L) = 100 \quad (5.23)$$

else

$$(I_{P1,max}^L, \dots, I_{P3,max}^L) = (I_{P1,max}^L(post), \dots, I_{P3,max}^L(post)) \quad (5.24)$$

end

และจากตารางที่ 5.16 กรณีเกิดฟอลต์สามเฟสค่าสัมประสิทธิ์ของ  $I_{P1,max}^L(post)$ ,  $I_{P2,max}^L(post)$  และ  $I_{P3,max}^L(post)$  จะมีค่าต่ำ เนื่องจากเมื่อมีฟอลต์ชนิดนี้เกิดขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสในเฟส A, B และ C จะมีค่าสูงขึ้นจากสภาวะปกติและจากสมการ 5.14- 5.16 ค่าสัมประสิทธิ์จะถูกนำมาหารกัน จะทำให้องค์ประกอบในแต่ละเฟสเมื่อเกิดฟอลต์สามเฟสมีค่าต่ำ ไม่สามารถกำหนดขอบเขตของข้อมูลได้อย่างชัดเจน จากการสังเกตเบื้องต้นจึงสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า

“กรณีเกิดฟอลต์สามเฟส ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสในเฟส A, B และ C มีค่ามากกว่า 5 เท่าจากช่วงสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ หรือค่าสัมประสิทธิ์ของ  $I_{P1, \max}^L$  (post),  $I_{P2, \max}^L$  (post) และ  $I_{P3, \max}^L$  (post) มีค่ามากกว่า 0.01 แล้วจะสามารถกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรดังกล่าว นั้น มีค่าเท่ากับ 100” ดังสมการที่ 5.25 - 5.26

$$\text{if } \left( I_{P1, \max}^L \text{ (post)}, \dots, I_{P3, \max}^L \text{ (post)} \right) \geq 0.01 \text{ or}$$

$$\left( I_{A, \max}^L \text{ (post)}, \dots, I_{C, \max}^L \text{ (post)} \right) \geq 5 \times \left( I_{A, \max}^L \text{ (pre)}, \dots, I_{C, \max}^L \text{ (pre)} \right)$$

then

$$\left( I_{P1, \max}^L, \dots, I_{P3, \max}^L \right) = 100 \quad (5.25)$$

else

$$\left( I_{P1, \max}^L, \dots, I_{P3, \max}^L \right) = \left( I_{P1, \max}^L \text{ (post)}, \dots, I_{P3, \max}^L \text{ (post)} \right) \quad (5.26)$$

end

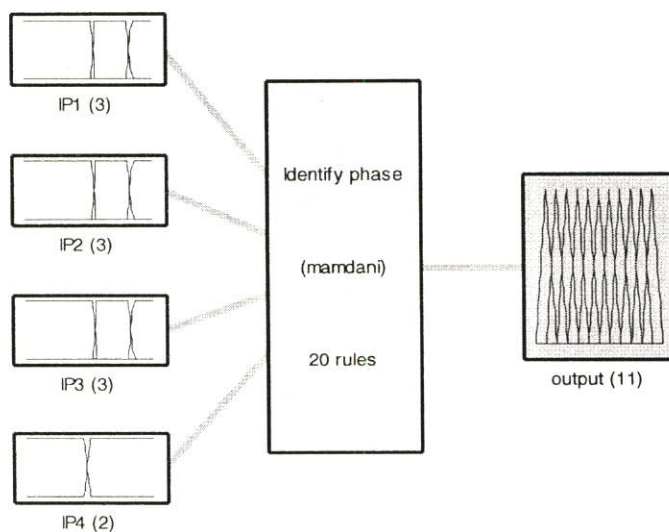
จากขั้นตอนทั้งหมด สามารถแสดงตัวแปรอินพุทของแบบจำลองพีชชีโลจิกได้ตามตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 แสดงสัมประสิทธิ์ตัวแปรอินพุทของแบบจำลองพีชชีโลจิกทั้ง 11 ประเภทฟอลต์

ประเภท	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอินพุทสำหรับพีชชีเซต			
ฟอลต์	$I_{P1, \max}^L$	$I_{P2, \max}^L$	$I_{P3, \max}^L$	$I_{P4, \max}^L$
AG	69.8952227	69.8979726	0.00020469	1
BG	0.00020512	69.826422	69.819523	1
CG	70.9	0.00019893	70.9	1
ABG	1.42403746	100	0.00567762	1
CAG	100	0.00055684	0.00254442	1
BCG	0.01740852	0.00101715	100	1
ABCG	100	100	100	1
AB	2.2243E-12	100	2.2243E-12	0
CA	100	4.6849E-14	4.6849E-14	0
BC	6.2818E-14	6.2818E-14	100	0
ABC	100	100	100	0

เมื่อได้ข้อมูลอินพุทเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (พีชชีโลจิกจะมีชุดข้อมูลอินพุททั้งหมด 7128 ชุดตามลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทและจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แตกต่างกัน)

ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างแบบจำลองฟuzzy logic สำหรับการระบุประเภทของฟอลต์ โดยการสร้างแบบจำลองฟuzzy logic สำหรับการระบุเฟส มีโครงสร้างประกอบด้วย 4 อินพุต 1 เอาท์พุท และ 20 กฎ ดังรูปที่ 5.24 และสามารถอธิบายการออกแบบในแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้



System phase1: 4 inputs, 1 outputs, 20 rules

รูปที่ 5.24 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองฟuzzy logic สำหรับการระบุเฟสที่เกิดฟอลต์

### 5.5.2.3 ฟuzzyfication Module (Fuzzification Module)

เป็นขั้นตอนการแปลงอินพุตแบบคริปส์เซตของค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ แปลงให้อยู่ในรูปของฟuzzyเซต โดยค่าระดับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $I_{P1,max}^L$ ,  $I_{P2,max}^L$ ,  $I_{P3,max}^L$  และ  $I_{P4,max}^L$  ถูกกำหนดให้มีค่าระดับความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง [0,1]

### 5.5.2.4 ฐานความรู้ (Knowledge Base)

ฐานความรู้ประกอบไปด้วยฐานข้อมูล (data base) และฐานกฎ (rules base) ในส่วนของฐานข้อมูลนั้นจะเป็นที่เก็บฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ ของทั้งตัวแปรอินพุตและเอาท์พุท ส่วนฐานกฎ เป็นที่เก็บกฎการควบคุมของฟuzzy logic ซึ่งอาจอยู่ในรูปของชุดคำสั่ง IF-THEN โดยมีเนื้อหารายละเอียดดังนี้

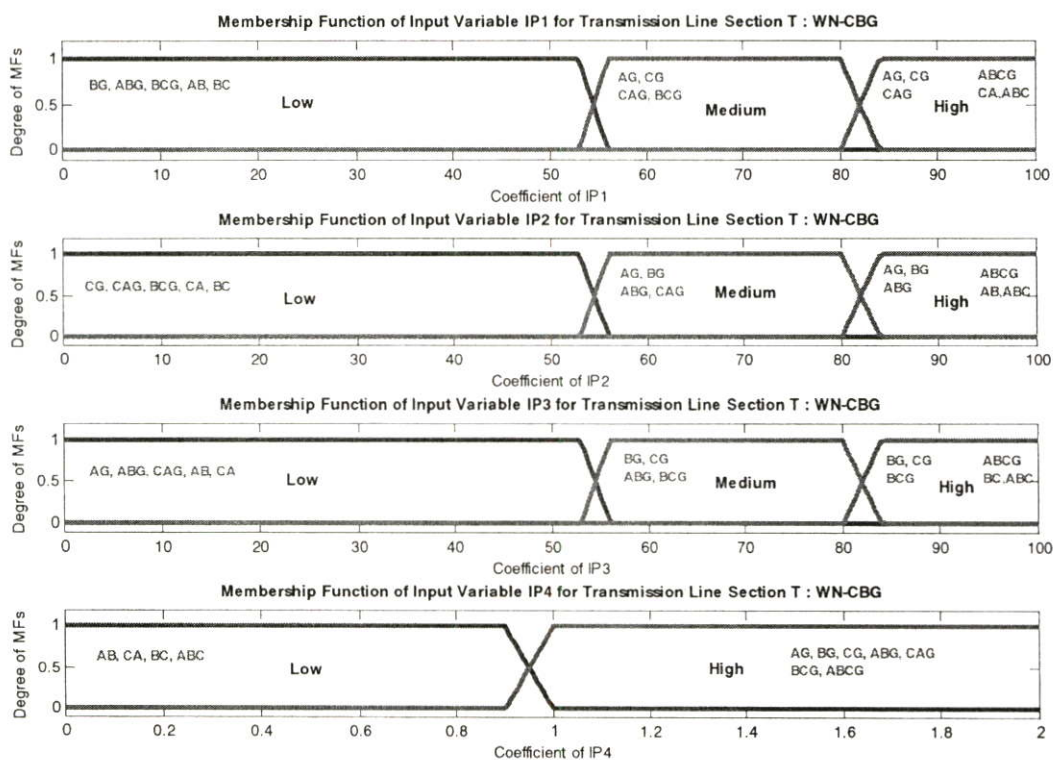
- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต

เป็นฟังก์ชันที่ใช้แปลงข้อมูลอินพุตแบบคริปส์เซต  $I_{P1,max}^L$ ,  $I_{P2,max}^L$ ,  $I_{P3,max}^L$  และ  $I_{P4,max}^L$  ให้อยู่ในรูปของฟuzzyเซต สำหรับสายส่งส่วน T, O และ N จะสามารถใช้ย่านของเอกภพสัมพัทธ์เหมือนกันคือ  $I_{P1,max}^L$ ,  $I_{P2,max}^L$  และ  $I_{P3,max}^L$  มีย่านของเอกภพสัมพัทธ์ [0,100] และจำนวนเทอม

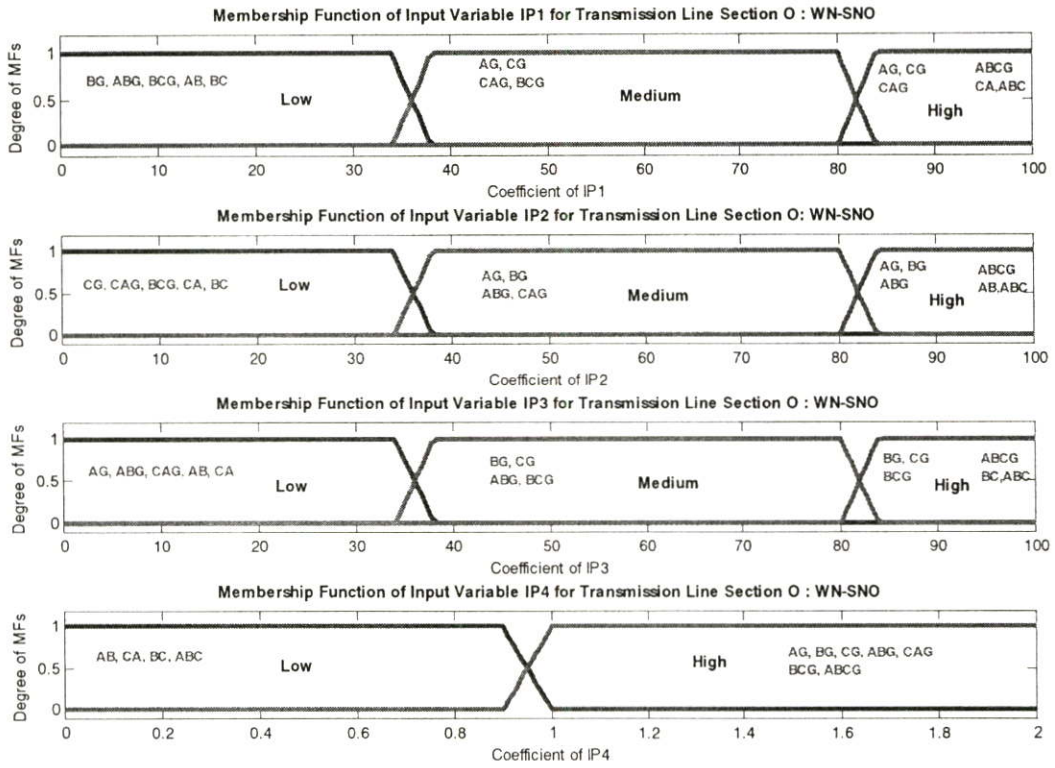
ของฟuzzyเซตทั้งหมด 3 เทอม ในขณะที่  $I_{P4, \max}^L$  มีย่านของเอกภพสัมพัทธ์ [0,2] และเทอมของฟuzzyเซตจะมีเพียง 2 เทอมเท่านั้น กำหนดค่าตัวแปรลิงกจิสติกหรือตัวแปรภาษาพูด (Linguistic variable) ได้ดังนี้

1. LOW คือสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมีค่าต่ำ
2. MEDIUM คือสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมีค่าปานกลาง
3. HIGH คือสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมีค่าสูง

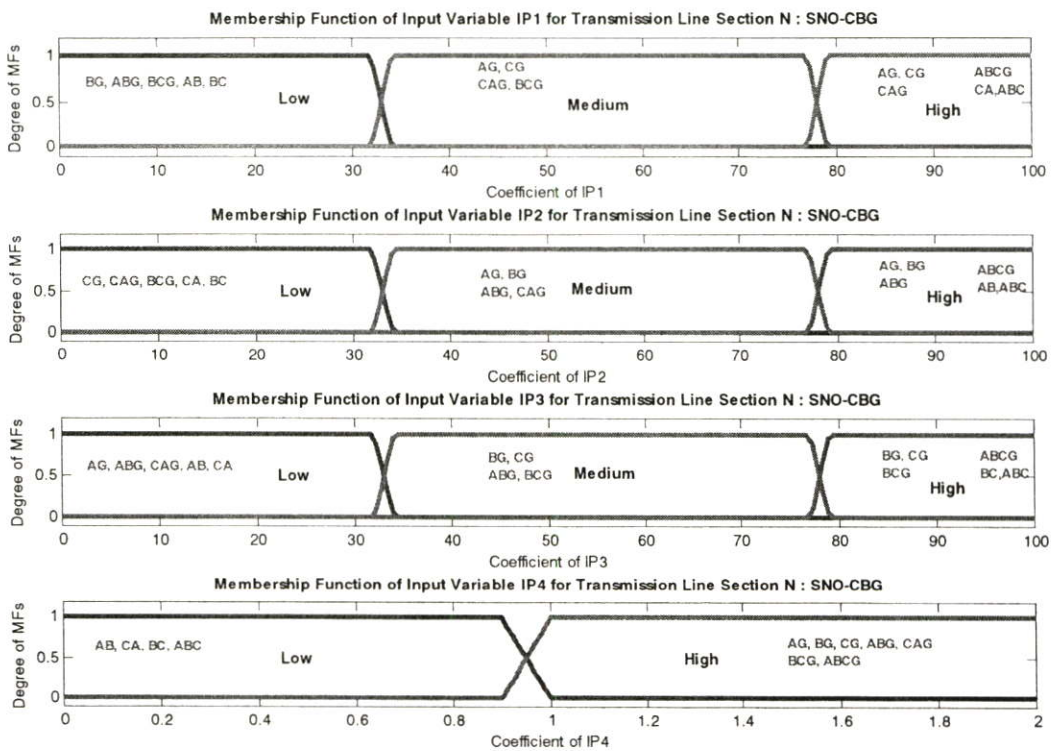
สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรอินพุตเป็นแบบฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังสมการที่ 5.11 และสามารถแสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตได้ดังรูปที่ 5.25 – 5.27



รูปที่ 5.25 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองฟuzzyโลจิกของสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 และ 2



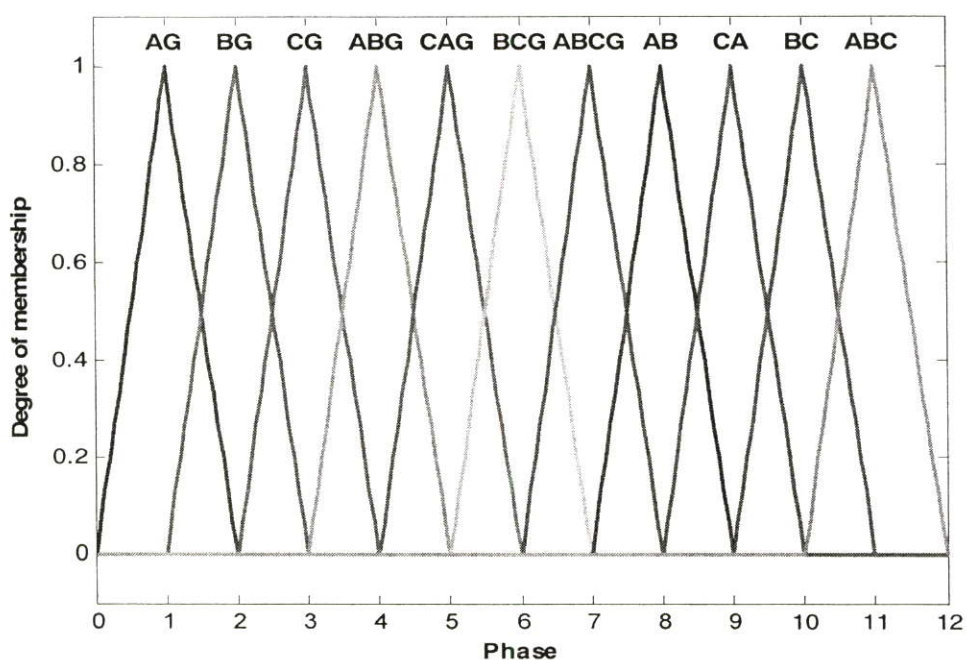
รูปที่ 5.26 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองฟิชชีโลจิกของสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 และ 2



รูปที่ 5.27 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองฟิชชีโลจิกของสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 และ 2

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาท์พุท

เป็นตัวกำหนดค่าตัวแปรเอาท์พุทของฟuzzyเซต เพื่อค่าที่ได้จะถูกนำไปใช้สำหรับการอนุมาน (Inference) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือการกำหนดจำนวนเทอมเซตของแต่ละตัวแปรให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การอนุมานค่าตัวแปรของเอาท์พุทมีความใกล้เคียงกับค่าของตัวแปรที่แท้จริงมากที่สุด ซึ่งจุดนี้ผู้ออกแบบระบบจำลองฟuzzyซึ่งจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับระบบมากพอสมควร โดยตัวแปรเอาท์พุทที่กำหนดขึ้นจะสัมพันธ์กับชนิดของพอลดี กำหนดย่านเอกภพสัมพัทธ์ของประเภทพอลดีเท่ากับ  $[0,12]$  มีจำนวนเทอมเซตทั้งหมด 11 เทอมและค่าตัวแปรลิงกจิสติก 11 ระดับ ดังรูปที่ 5.28 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรเอาท์พุทเป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม เนื่องจากเทอมเซตที่กำหนดโดยฟังก์ชันนี้จะต้องมีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 สำหรับค่าอื่นๆที่มีค่าห่างจากค่านี้มากเท่าไรก็จะมีค่าความเป็นสมาชิกลดลงเรื่อยๆ ตามสมการที่ 5.12



รูปที่ 5.28 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาท์พุท (Phase)

#### 5.5.2.5 กลไกการอนุมานฟuzzy (Fuzzy Inference Engine)

การอนุมานฟuzzyจะอาศัยหลักการของกฎฟuzzy โลกจิกในรูปแบบคำสั่ง IF-THEN จากฐานความรู้ของฟuzzy โดยประพจน์ที่ตามหลัง IF จะเป็นเงื่อนไขเรียกว่าเหตุ (antecedent) ซึ่งคืออินพุทของฟuzzy ส่วนประพจน์ที่ตามหลัง THEN เรียกว่าผล (consequent) ซึ่งเป็นเอาท์พุทของฟuzzy ผลของการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานได้ตามกฎการอนุมานแบบแมมดานี (Mamdani's rule) [40,50] ซึ่งกฎฟuzzyแสดงได้ตามตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 กฎของฟuzzyสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ (สายส่งส่วน T, O และ N)

ประเภทฟอลต์	กฎฟuzzy	คำตอบของฟuzzy
AG	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is AG)	1
	If(IP1 is MEDIUM) and (IP2 is MEDIUM) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is AG)	1
BG	If(IP1 is LOW) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is BG)	2
	If(IP1 is LOW) and (IP2 is MEDIUM) and (IP3 is MEDIUM) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is BG)	2
CG	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is LOW) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is CG)	3
	If(IP1 is MEDIUM) and (IP2 is LOW) and (IP3 is MEDIUM) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is CG)	3
ABG	If(IP1 is LOW) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is ABG)	4
	If(IP1 is LOW) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is MEDIUM) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is ABG)	4
	If(IP1 is LOW) and (IP2 is MEDIUM) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is ABG)	4
CAG	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is LOW) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is CAG)	5
	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is MEDIUM) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is CAG)	5
	If(IP1 is MEDIUM) and (IP2 is LOW) and (IP3 is LOW) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is CAG)	5
BCG	If(IP1 is LOW) and (IP2 is LOW) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is BCG)	6
	If(IP1 is MEDIUM) and (IP2 is LOW) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is BCG)	6
	If(IP1 is LOW) and (IP2 is LOW) and (IP3 is MEDIUM) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is BCG)	6
ABCG	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is HIGH) THEN (Phase is ABCG)	7
AB	If(IP1 is LOW) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is LOW) and (IP4 is LOW) THEN (Phase is AB)	8
CA	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is LOW) and (IP3 is LOW) and (IP4 is LOW) THEN (Phase is CA)	9
BC	If(IP1 is LOW) and (IP2 is LOW) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is LOW) THEN (Phase is BC)	10
ABC	If(IP1 is HIGH) and (IP2 is HIGH) and (IP3 is HIGH) and (IP4 is LOW) THEN (Phase is ABC)	11

ตารางที่ 5.19 เมตริกซ์ของกฎฟัซซีสำหรับการระบุประเภทฟอลต์

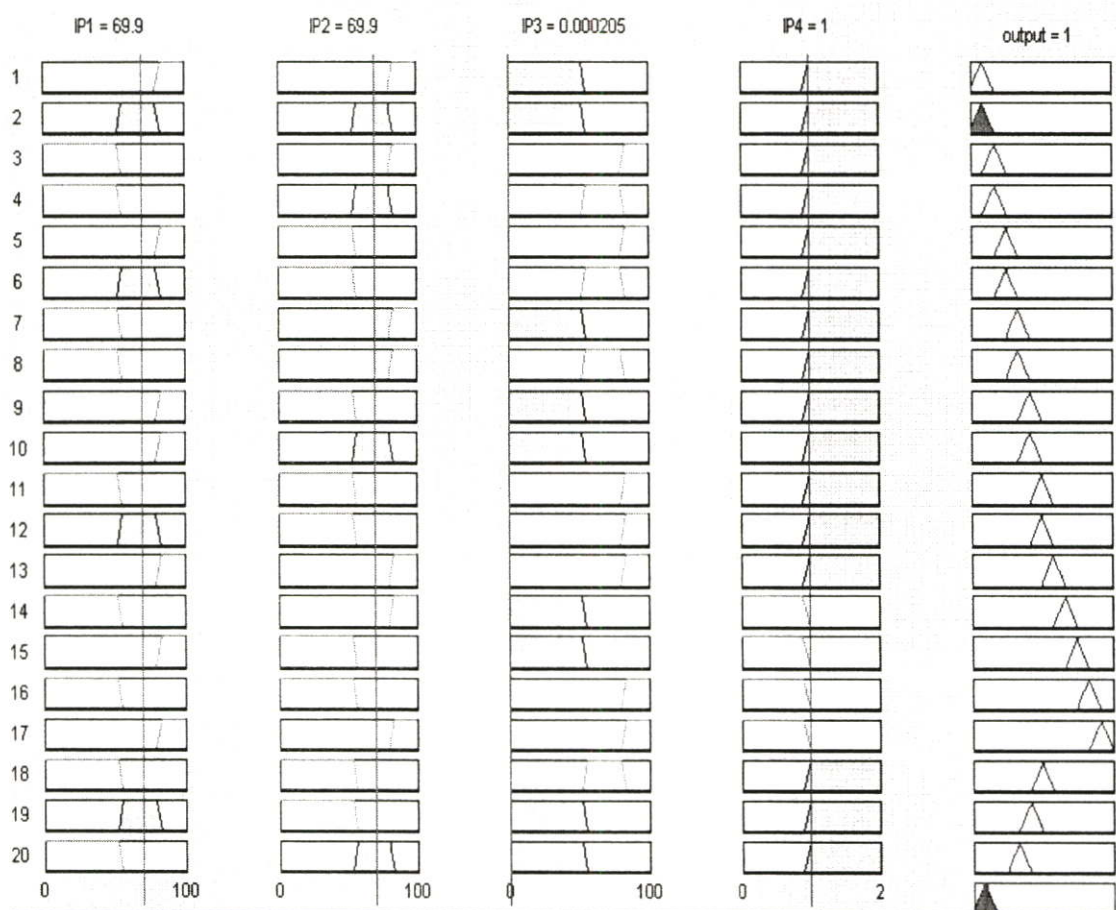
mfs Input 1	mfs Input 2	mfs Input 3	mfs Input 4	mfs Output	Weight	Connection (AND)	Output Variable
2	2	1	2	1	1	1	AG
3	3	1	2	1	1	1	
1	2	2	2	2	1	1	BG
1	3	3	2	2	1	1	
2	1	2	2	3	1	1	CG
3	1	3	2	3	1	1	
1	3	1	2	4	1	1	ABG
1	3	2	2	4	1	1	
1	2	1	2	4	1	1	
3	1	1	2	5	1	1	CAG
3	2	1	2	5	1	1	
2	1	1	2	5	1	1	
1	1	3	2	6	1	1	BCG
2	1	3	2	6	1	1	
1	1	2	2	6	1	1	
3	3	3	2	7	1	1	ABCG
1	3	1	1	8	1	1	AB
3	1	1	1	9	1	1	CA
1	1	3	1	10	1	1	BC
3	3	3	1	11	1	1	ABC

จากตารางที่ 5.19 ในคอลัมน์ 1-4 หมายถึงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต  $I_{P1,max}^L$ ,  $I_{P2,max}^L$ ,  $I_{P3,max}^L$  และ  $I_{P4,max}^L$  ขณะที่คอลัมน์ที่ 5 คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต (phase) ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดฟอลต์ สำหรับคอลัมน์ที่ 6-7 คือค่าการถ่วงน้ำหนักและรูปแบบการเชื่อมโยงกันของประพจน์ โดยอาศัยตัวเชื่อมโยงแบบอินเตอร์เซกชัน (AND) ตามลำดับ

#### 5.5.2.6 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Module)

ทำหน้าที่แปลงค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าแบบคริปส์เซต โดยการอนุมานจากค่าความจริงในส่วนของเหตุในแบบจำลองฟัซซี ค่าที่ได้เป็นเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งนำไปใช้ระบุประเภทฟอลต์ต่อไป ในโปรแกรม MATLAB มีการดีฟัซซิฟิเคชันอยู่หลายวิธีสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อัลกอริทึมการหาค่าจุดศูนย์กลางการถ่วง

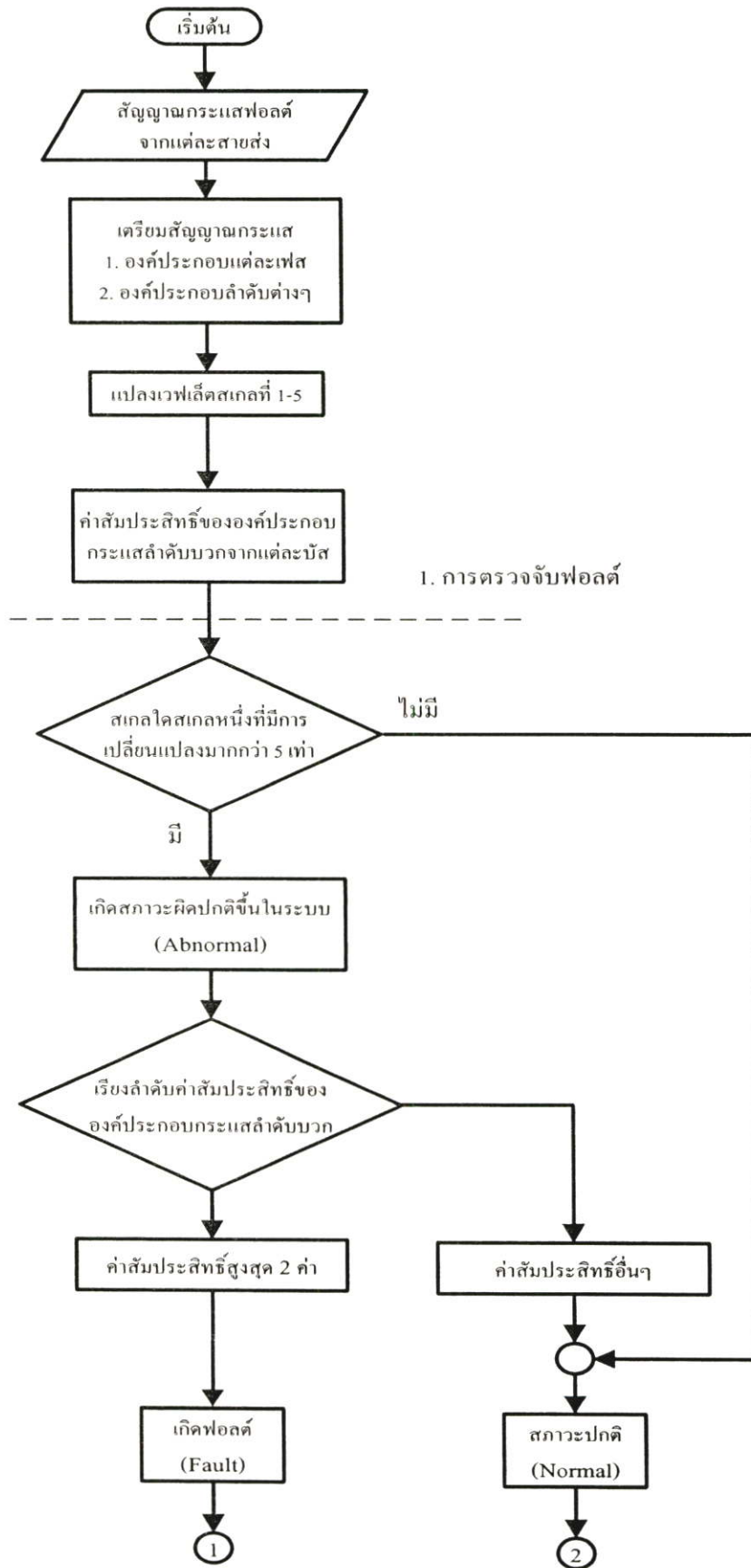
น้ำหนัก (COG method) ดังสมการที่ 5.13 [40] และสามารถแสดงตัวอย่างของกลไกการอนุมานแบบวิธี Mamdani's rule และการทำดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี COG method สำหรับการระบุประเภทฟอลต์ กรณีเกิดฟอลต์ที่เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 วัดจากปลายด้านส่ง (20% ของระยะทางเต็ม 183 กิโลเมตร) ในส่วนของตัวแปรเอาต์พุตจะมีค่าสัมพันธ์กับเฟส (A, B, C) และกราวด์ (G) หรือชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง ดังรูปที่ 5.29



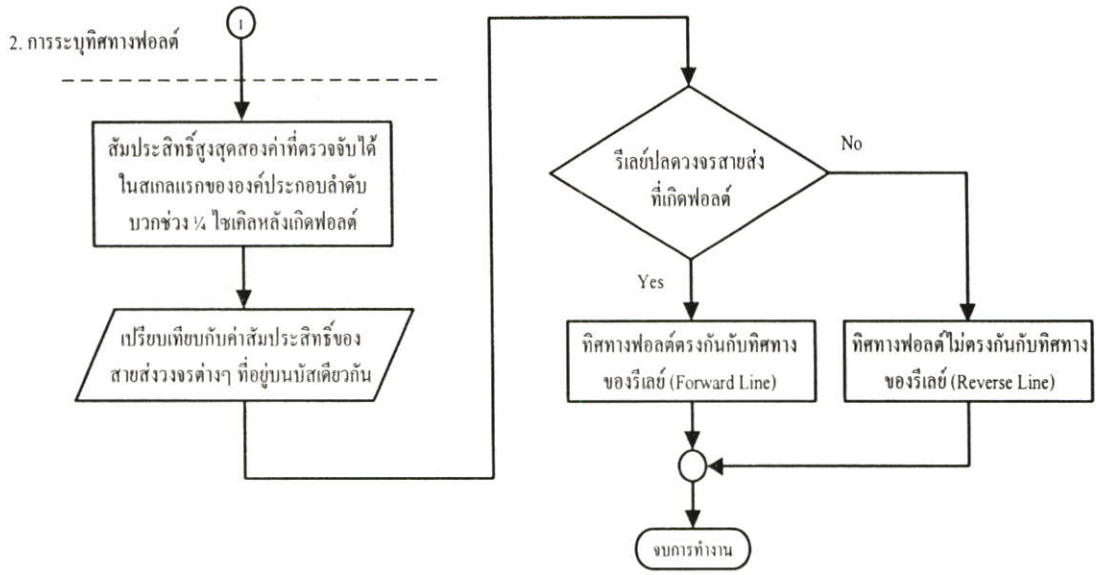
รูปที่ 5.29 แสดงตัวอย่างของกลไกการอนุมานแบบ Mamdani's rule และการทำดีฟัซซิฟิเคชันด้วยวิธี COG method สำหรับการระบุประเภทฟอลต์

## 5.6 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

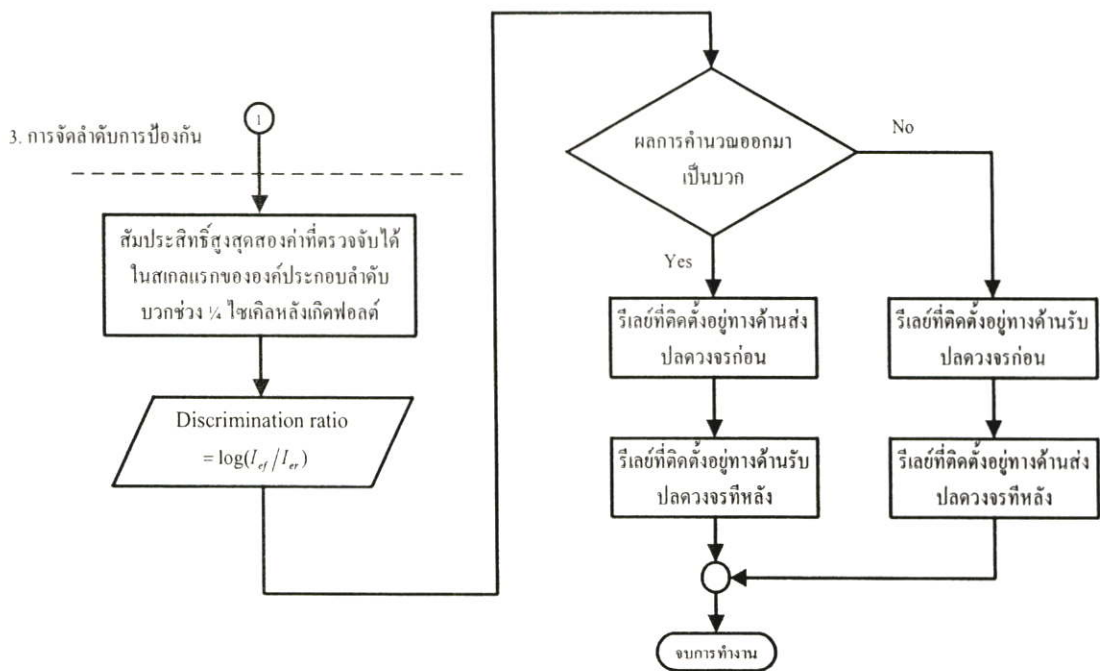
จากรูปแบบขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ได้นำเสนอ นั้น สามารถแสดงสรุปเป็นแผนภาพ (Flow chart) การทำงานได้ดังรูปที่ 5.30 - 5.36



รูปที่ 5.30 แสดงแผนภาพการตรวจจับฟอลต์

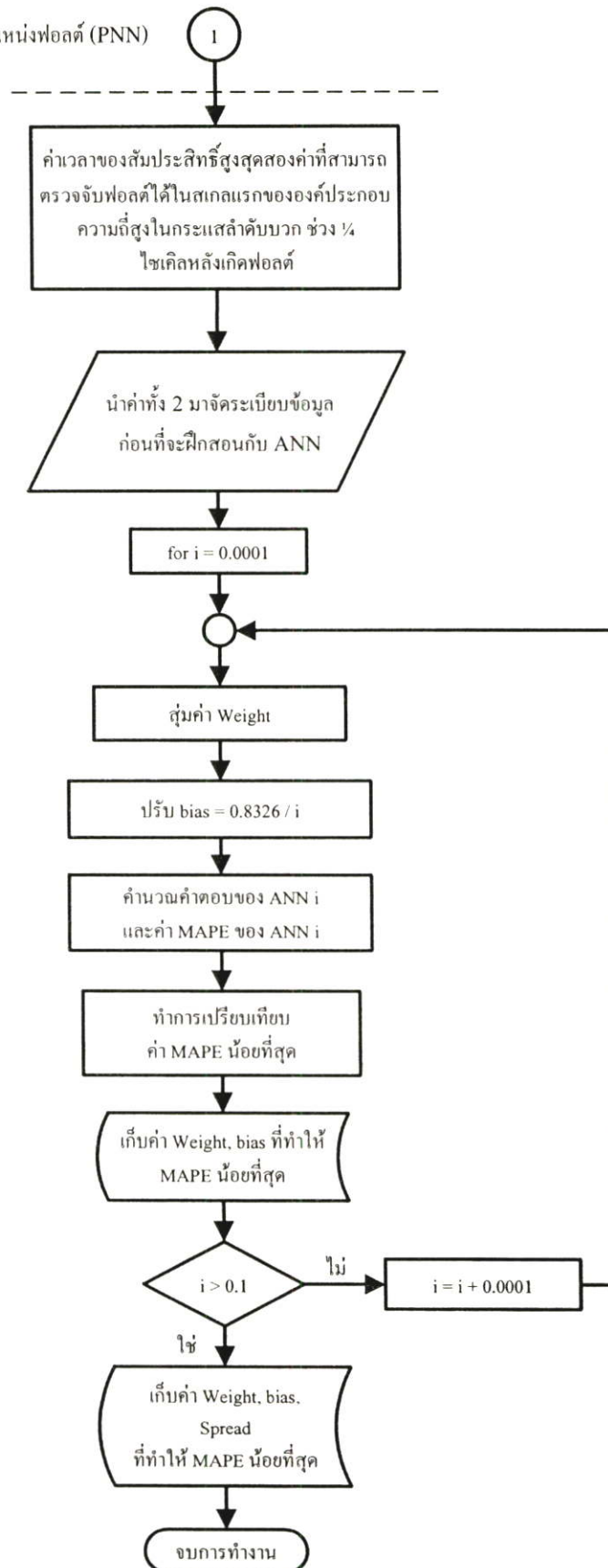


รูปที่ 5.31 แสดงแผนภาพการระบุทิศทางฟอลต์



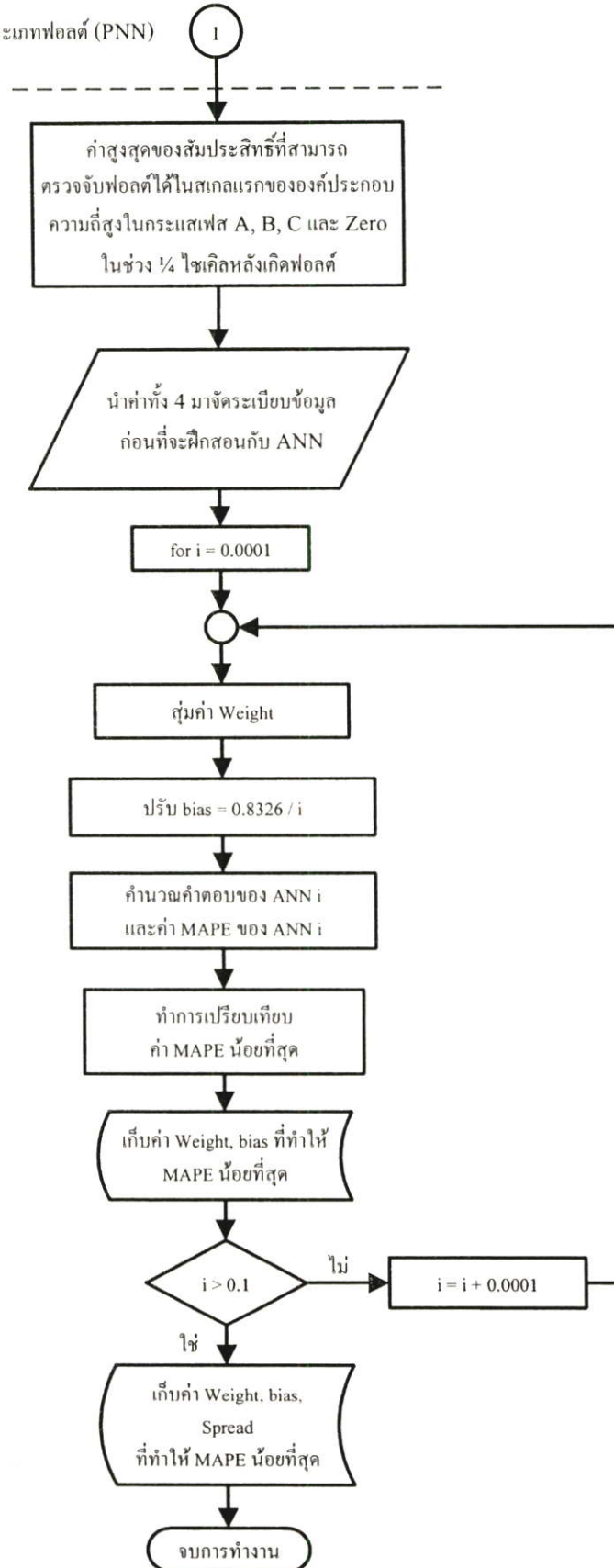
รูปที่ 5.32 แสดงแผนภาพการจัดลำดับการป้องกัน

## 4. การหาตำแหน่งพอลต์ (PNN)

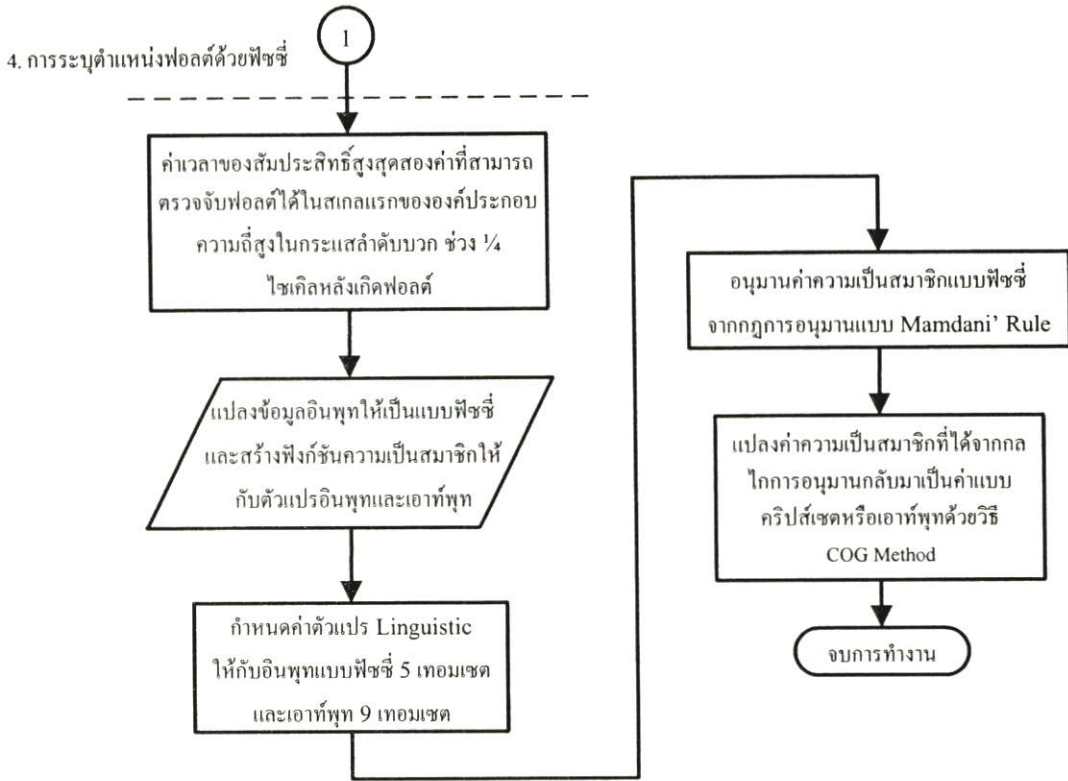


รูปที่ 5.33 แสดงแผนภาพการหาตำแหน่งพอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น

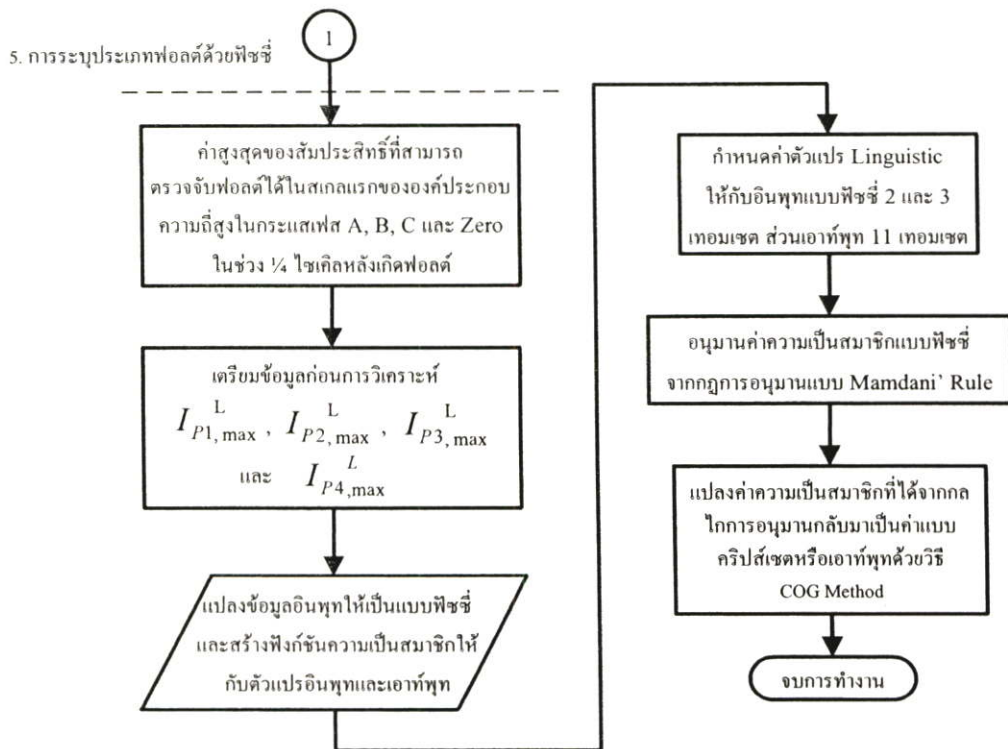
## 4. การระบุประเภทฟอลต์ (PNN)



รูปที่ 5.34 แสดงแผนภาพการระบุประเภทฟอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น



รูปที่ 5.35 แสดงแผนภาพการหาตำแหน่งฟอลต์ด้วยฟัซซี่โลกจิก



รูปที่ 5.36 แสดงแผนภาพการระบุประเภทฟอลต์ด้วยฟัซซี่โลกจิก

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

สำหรับบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 5 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการตรวจจับฟอลต์, การระบุทิศทางฟอลต์, การจัดลำดับการป้องกัน, การระบุตำแหน่งและประเภทของฟอลต์ จะมีจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด 7128 ชุด นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพ จึงได้นำวิธีการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทางและการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นมาเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้นำเสนอ สำหรับการระบุตำแหน่งและแยกประเภทของฟอลต์ โดยใช้จำนวนข้อมูลทดสอบชุดเดียวกันทั้งหมด โดยมีรูปแบบในการนำเสนอ ดังนี้

#### 6.1 รูปแบบการนำเสนอ

##### 6.1.1 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง

การแสดงผลการทดลองจะแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเรียงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์คือ 10% - 90% ของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง) ซึ่งรายละเอียดจะประกอบไปด้วย

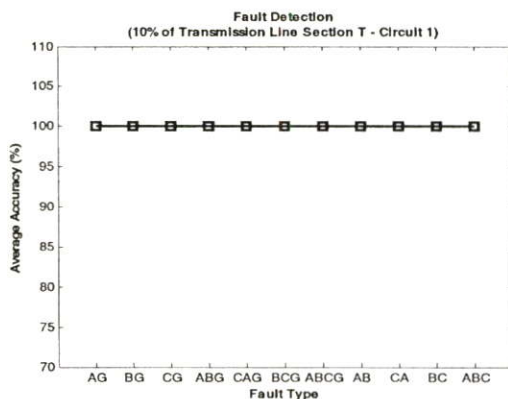
1. การตรวจจับฟอลต์, การระบุทิศทางของฟอลต์และการจัดลำดับการป้องกัน ซึ่งผลที่ได้มาจากการคำนวณผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย
2. ตำแหน่งของฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณและความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิสิกส์โลกิ และผลวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับหลักการเดิมที่มีอยู่
3. การระบุประเภทของฟอลต์ได้มาจากการวิเคราะห์ผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิสิกส์โลกิ และผลวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับหลักการเดิมที่มีอยู่
4. การเรียงลำดับจะเรียงตามประเภทของฟอลต์ คือ AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC ตามลำดับ และมีการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

##### 6.1.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดลอง

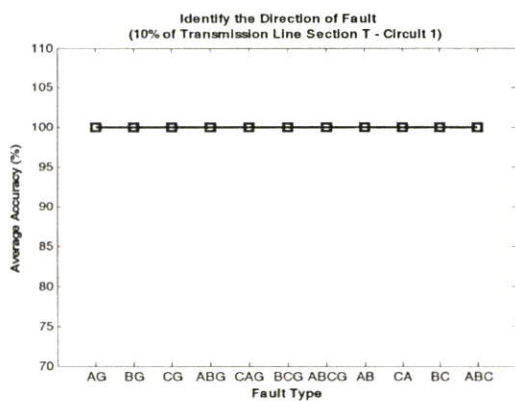
มีระบบการทดลอง 1 ระบบ ดังรูปที่ 5.1 โดยเรียงลำดับการนำเสนอตามการพิจารณาของความยาวสายส่งในแต่ละช่วงคือ สายส่งส่วน T วงจรที่ 1 และ 2, สายส่งส่วน O วงจรที่ 1 และ 2, สายส่งส่วน N วงจรที่ 1 และ 2 ซึ่งแต่ละส่วนของสายส่งมีความยาว 183, 62 และ 104 กิโลเมตร ตามลำดับ

## 6.2 ผลการทดลองของสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 ความยาวสายส่ง 183 กิโลเมตร

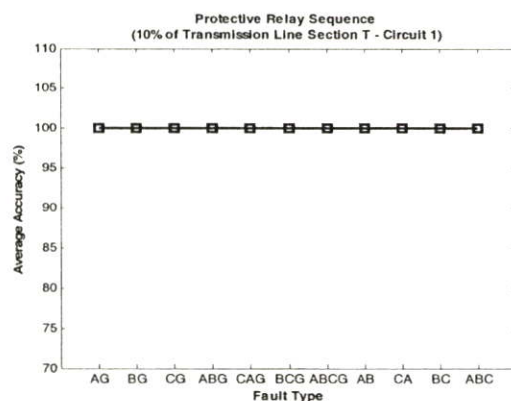
### 6.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (18.3 กิโลเมตร)



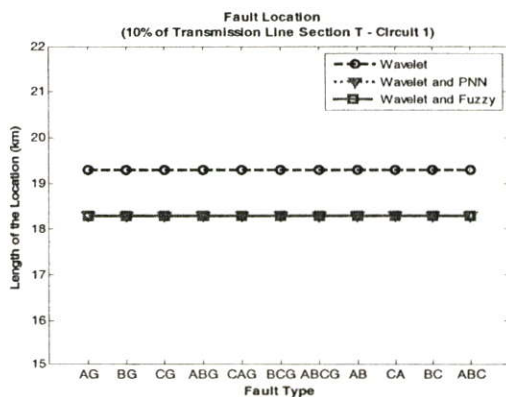
(a) การตรวจจับฟอลต์



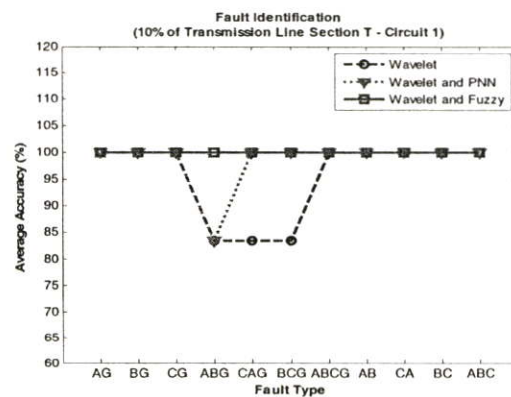
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.3 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.1 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.2 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย และจากรูปที่ 6.1 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 18.3 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.1 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 19.2839 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.9839 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.1 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 18.3 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซ์โลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.1 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.3 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

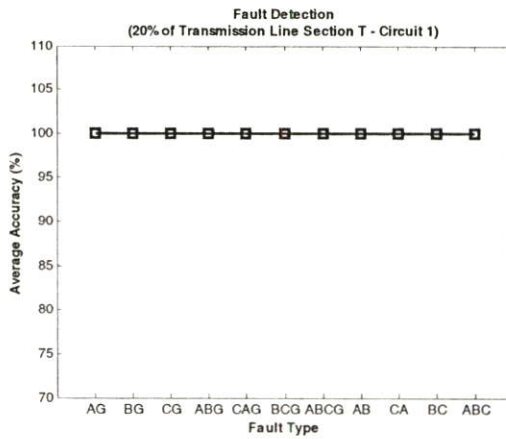
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.1 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซ์โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 18.3 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

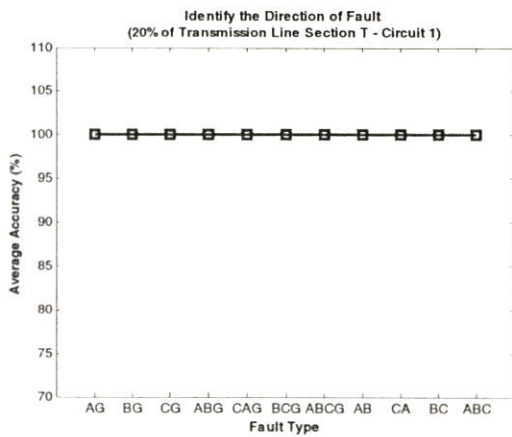
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.1 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.1 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.1 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.1 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

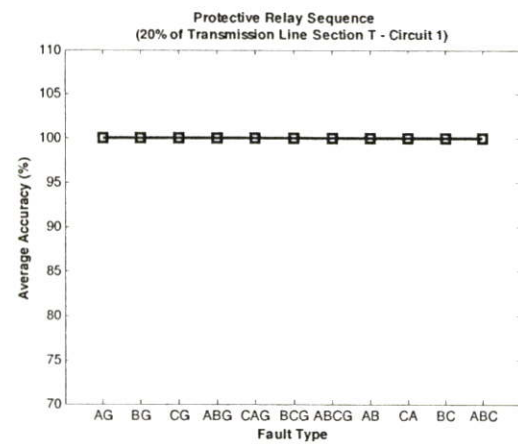
6.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (36.6 กิโลเมตร)



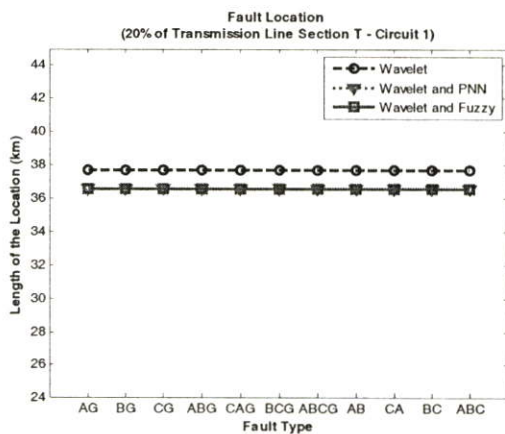
(a) การตรวจจับฟอลต์



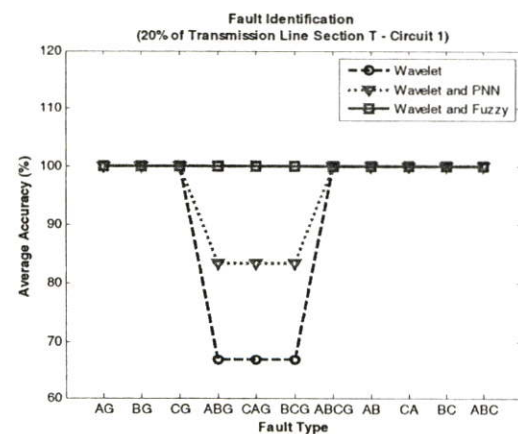
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WNIT-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.2 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.2 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.2 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย และจากรูปที่ 6.2 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 36.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.2 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 37.7064 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 1.1064 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.2 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 36.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.2 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 36.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

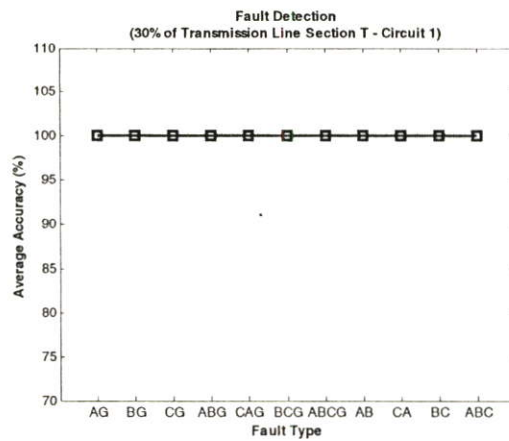
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.2 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 36.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

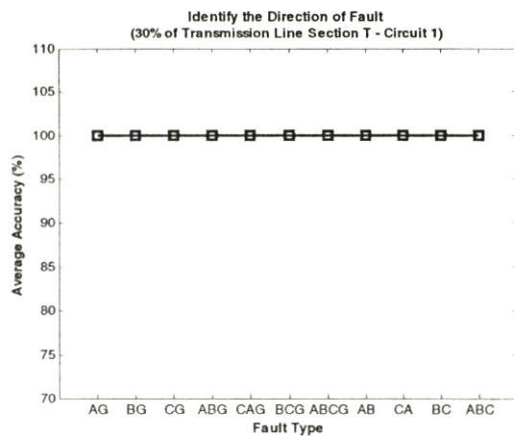
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.2 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.2 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.2 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.2 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

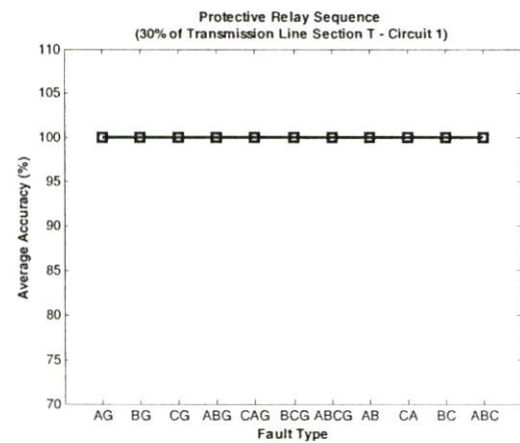
### 6.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (54.9 กิโลเมตร)



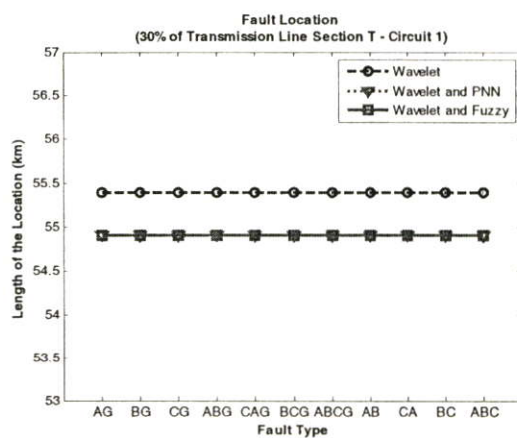
(a) การตรวจจับฟอลต์



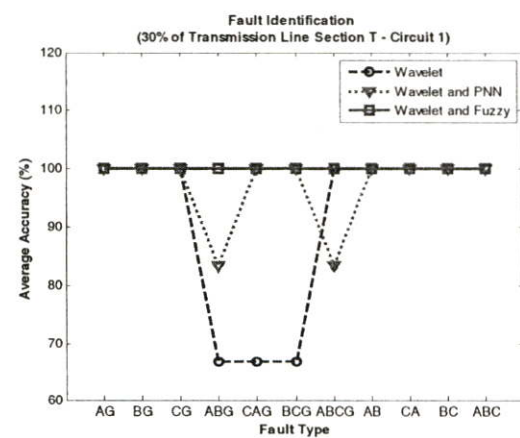
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 54.9 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WNIT-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.3 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.3 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย และจากรูปที่ 6.3 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 54.9 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.3 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 55.3919 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4919 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.3 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 54.9 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.3 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 54.9 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

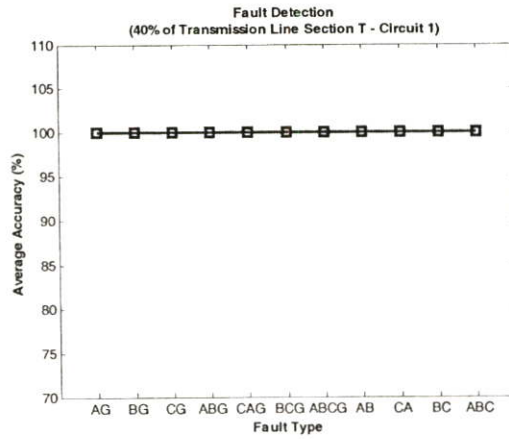
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.3 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 54.9 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

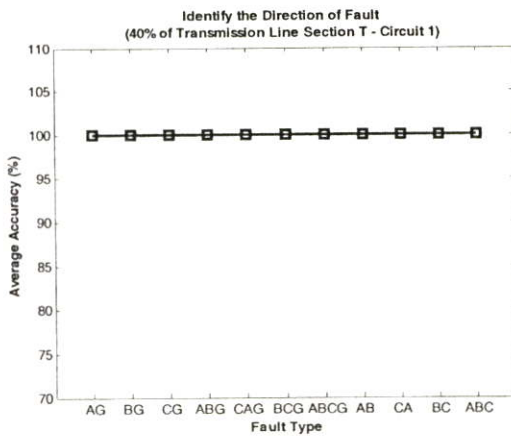
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.3 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.3 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG และ ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.3 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.3 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logicจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

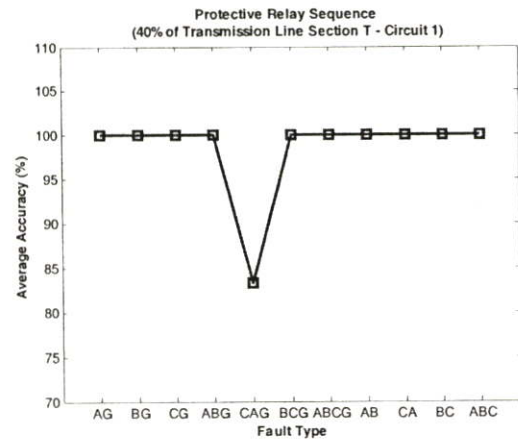
6.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (73.2 กิโลเมตร)



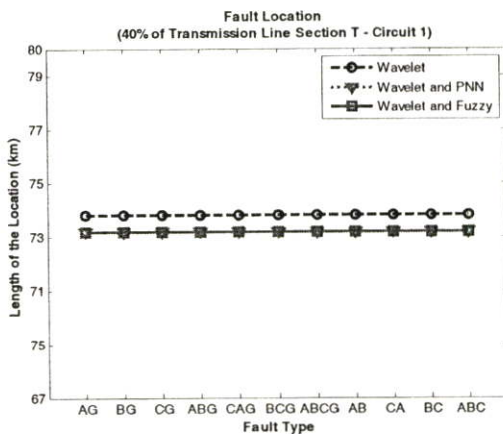
(a) การตรวจจับฟอลต์



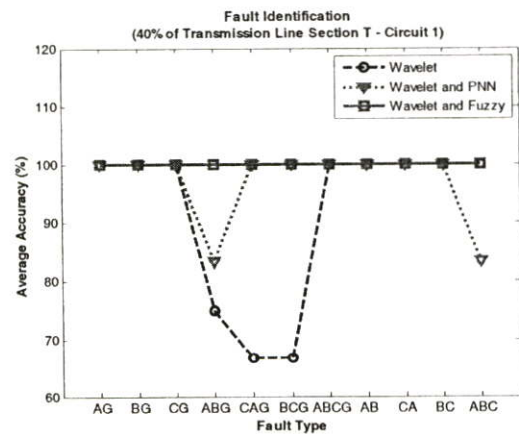
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 73.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.4 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.4 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.4 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ด และจากรูปที่ 6.4 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 98.48%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 73.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.4 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 73.8144 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.6144 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.4 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 73.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy โลกิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.4 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 73.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

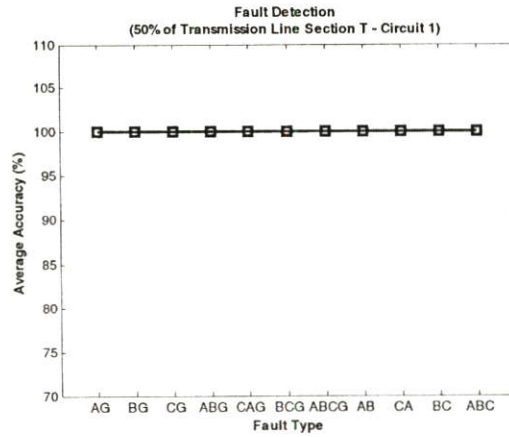
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.4 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy โลกิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 73.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

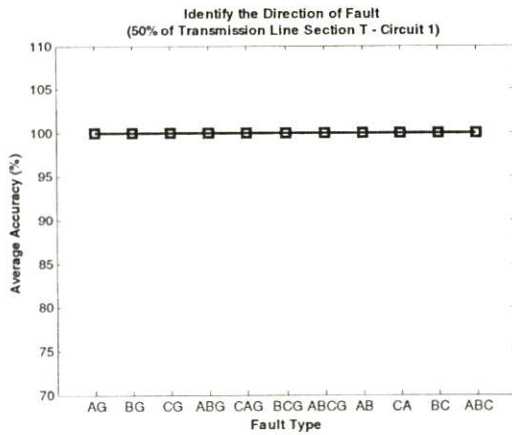
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.4 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 91.66% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทพอลต์ชนิด CAG และ BCG มีความถูกต้องเฉลี่ย 66.66% ในขณะที่พอลต์ชนิด ABG ระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 75%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.4 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.4 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.4 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

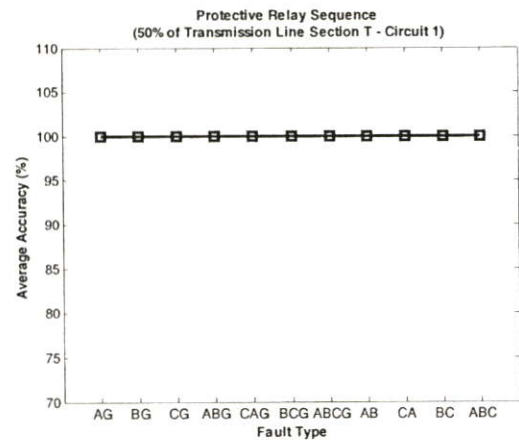
6.2.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (91.5 กิโลเมตร)



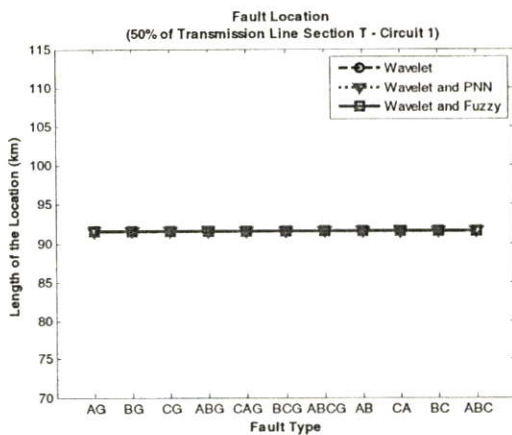
(a) การตรวจจับฟอลต์



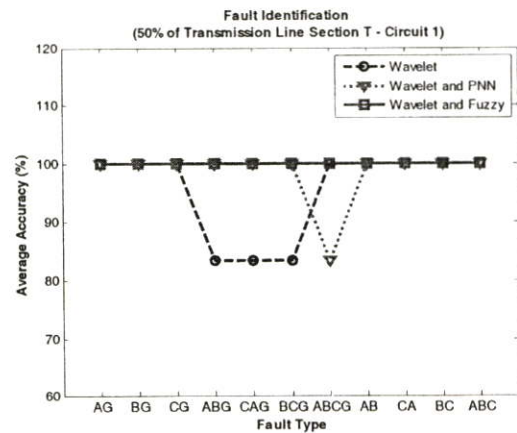
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 91.5 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.5 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.5 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.5 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.5 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 91.5 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.5 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 91.5 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.5 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 91.5 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.5 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 91.5 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

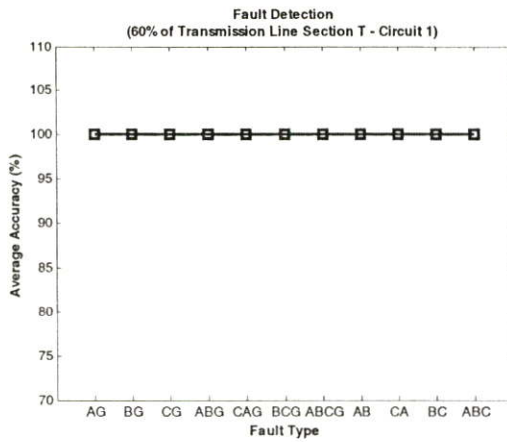
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.5 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก, การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 91.5 กิโลเมตร) ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

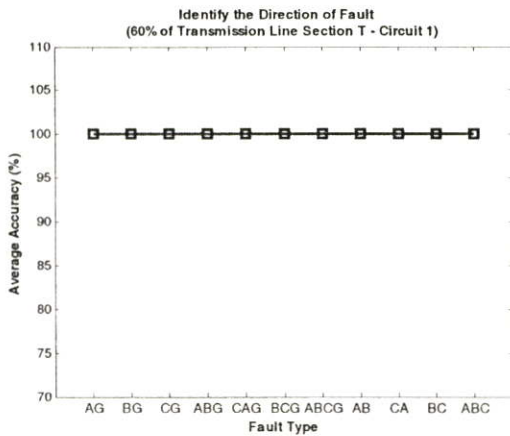
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.5 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.5 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.5 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.5 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

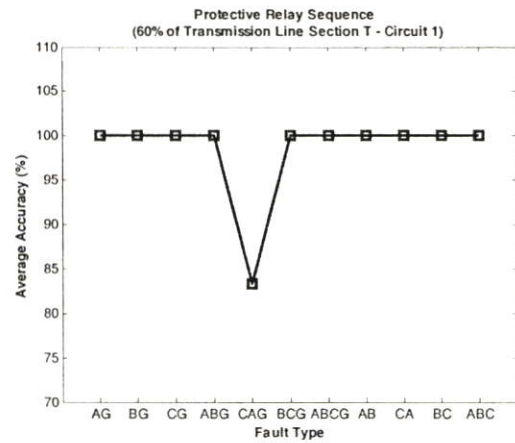
6.2.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (109.8 กิโลเมตร)



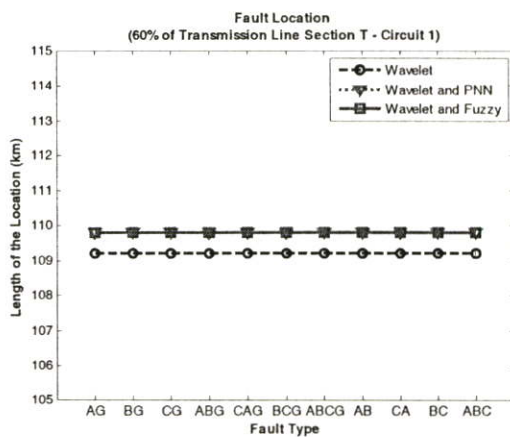
(a) การตรวจจับฟอลต์



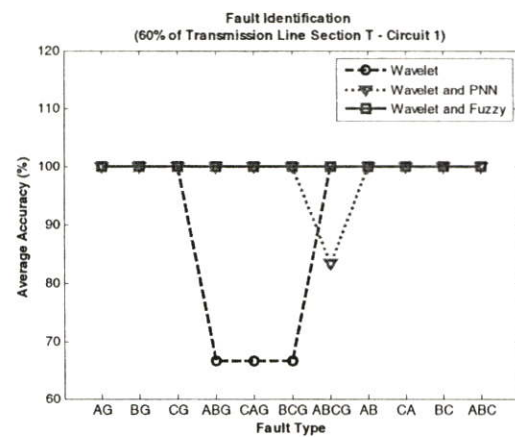
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 109.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.6 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.6 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.6 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.6 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 98.48%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 109.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.6 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 109.1856 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.6144 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.6 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 109.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.6 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 109.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

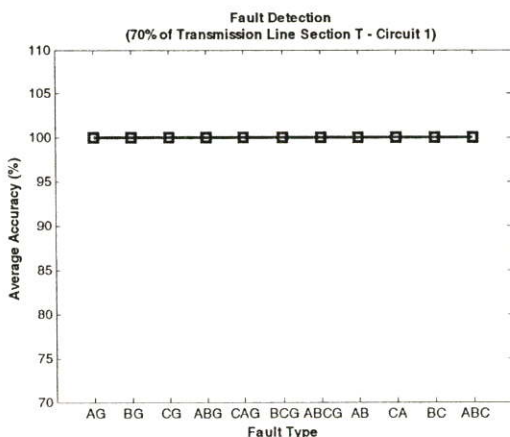
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.6 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 109.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

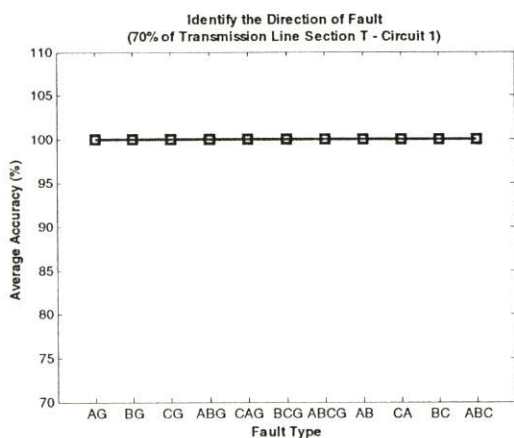
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.6 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.6 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.6 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.6 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

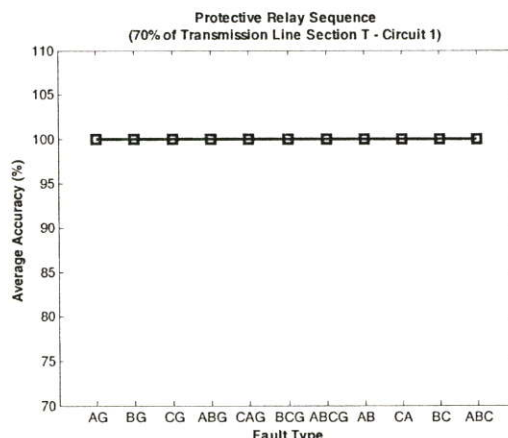
6.2.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (128.1 กิโลเมตร)



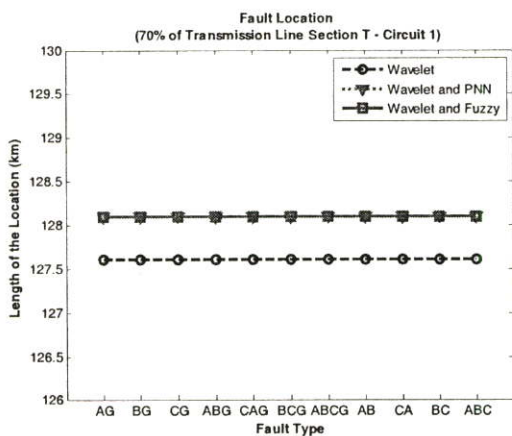
(a) การตรวจจับฟอลต์



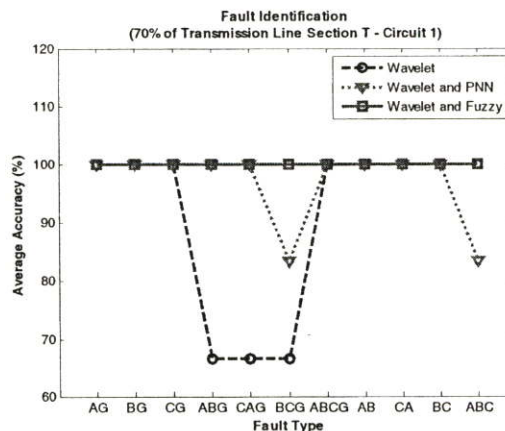
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 128.1 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.7 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.7 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.7 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.7 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 128.1 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.7 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 127.6081 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4919 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.7 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 128.1 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.7 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 128.1 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

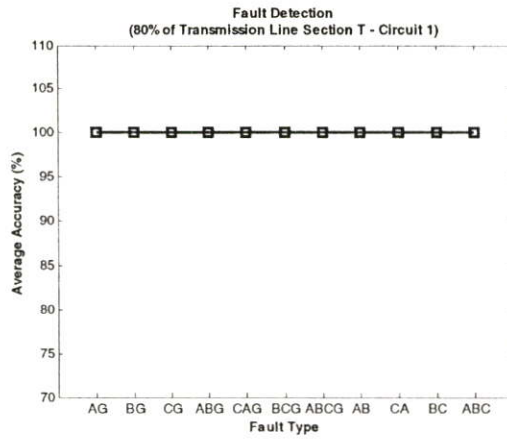
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.7 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 128.1 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

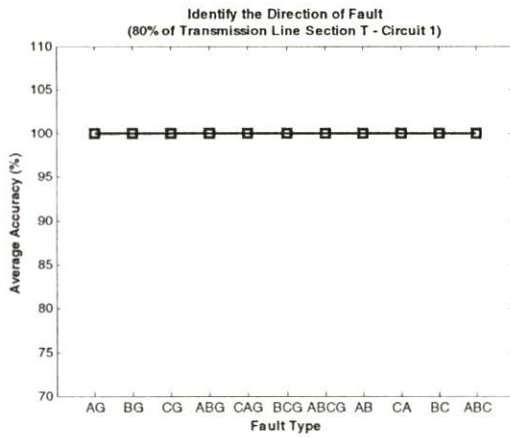
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.7 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.7 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, ABCG, AB, CA, และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.7 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.7 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

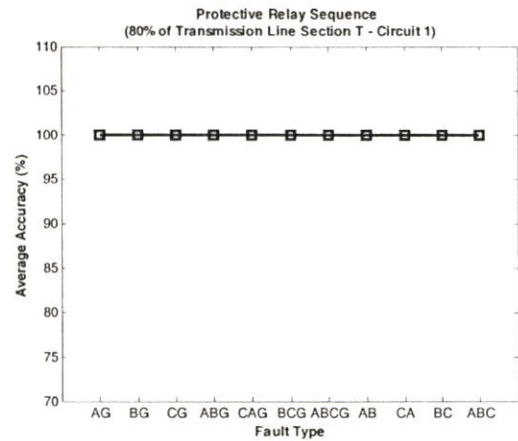
6.2.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (146.4 กิโลเมตร)



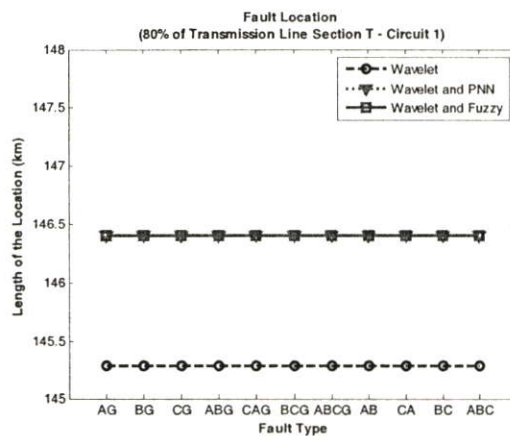
(a) การตรวจจับฟอลต์



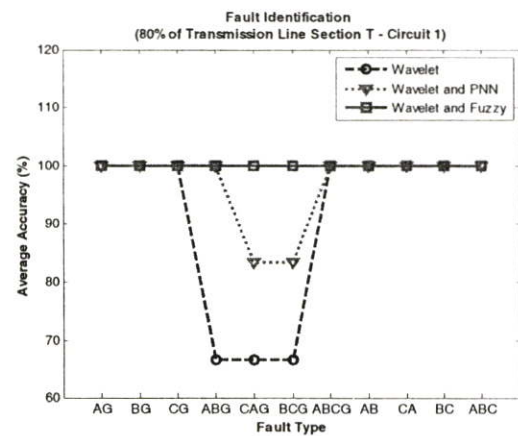
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 146.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WNIT-CBGIT)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.8 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.8 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.8 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.8 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 146.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.8 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 145.2936 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 1.1064 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.8 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 146.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.8 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 146.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

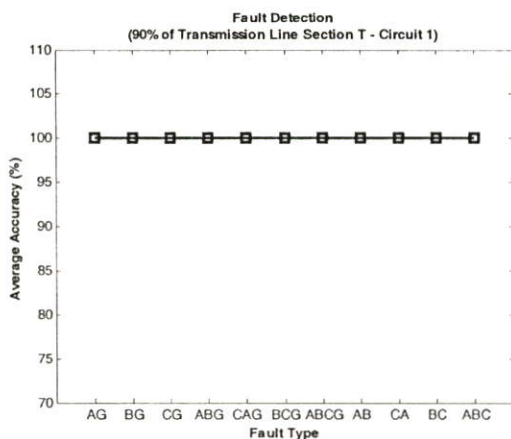
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.8 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 146.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

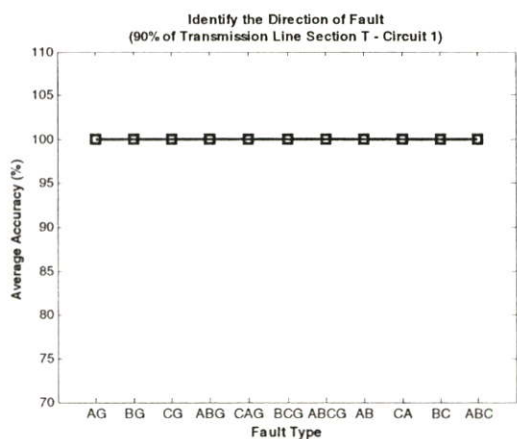
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.8 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.8 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.8 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.8 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

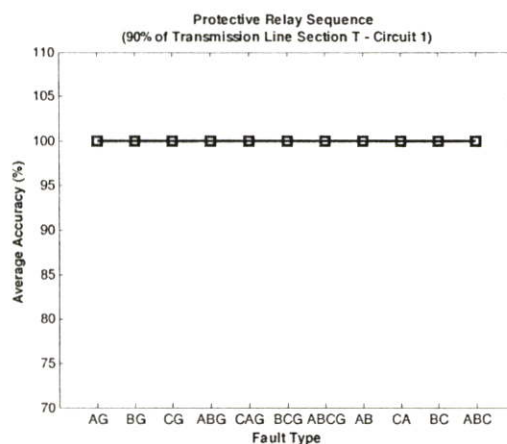
6.2.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (164.7 กิโลเมตร)



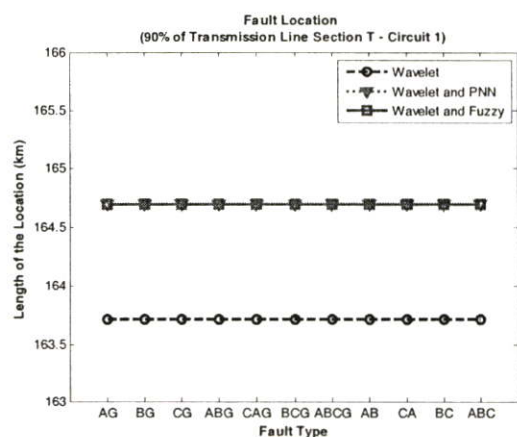
(a) การตรวจจับฟอลต์



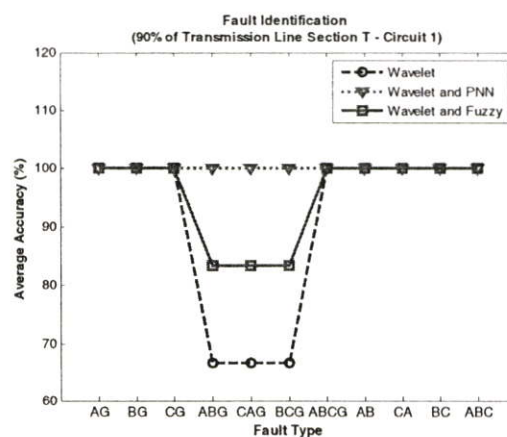
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 164.7 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 (WN1T-CBG1T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.9 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.9 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.9 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.9 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 164.7 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.9 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 163.7161 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.9839 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.9 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 164.7 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.9 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 164.7 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.9 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 164.7 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

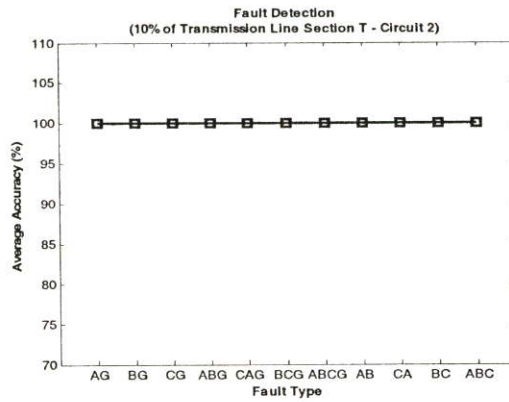
### การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.9 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.9 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.9 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

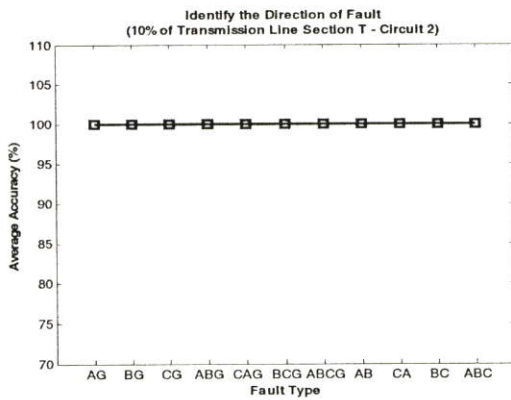
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.9 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### 6.3 ผลการทดลองของสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 ความยาวสายส่ง 183 กิโลเมตร

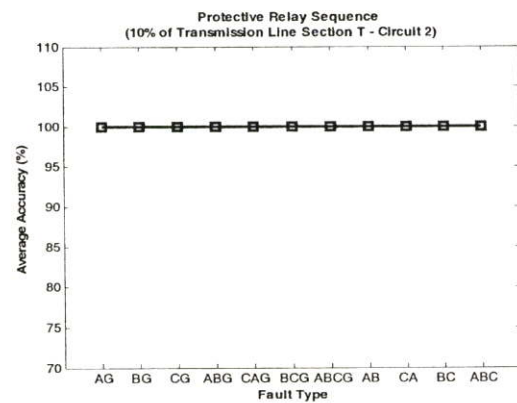
#### 6.3.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (18.3 กิโลเมตร)



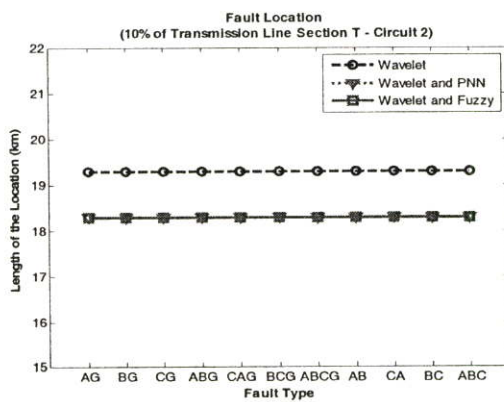
(a) การตรวจจับฟอลต์



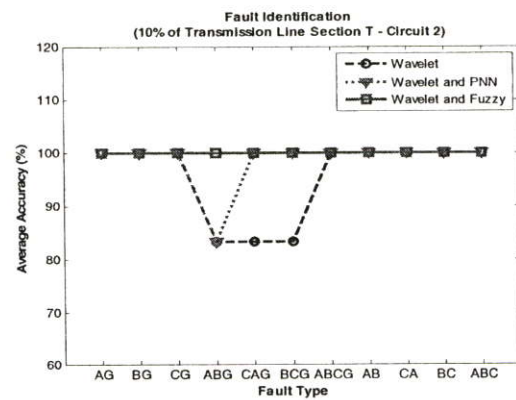
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.3 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.10 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.10 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.10 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.10 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 18.3 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.10 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 19.2839 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.9839 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.10 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 18.3 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.10 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.3 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

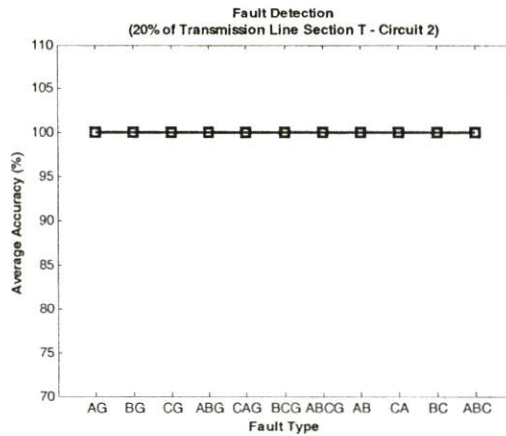
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.10 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 18.3 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

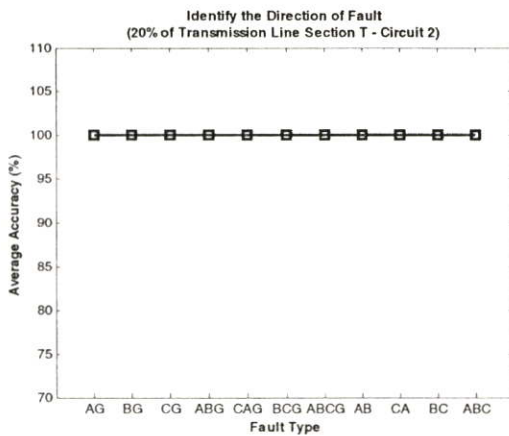
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.10 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100 % ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33 %
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.10 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100 % ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33 %
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.10 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100 %

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.10 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

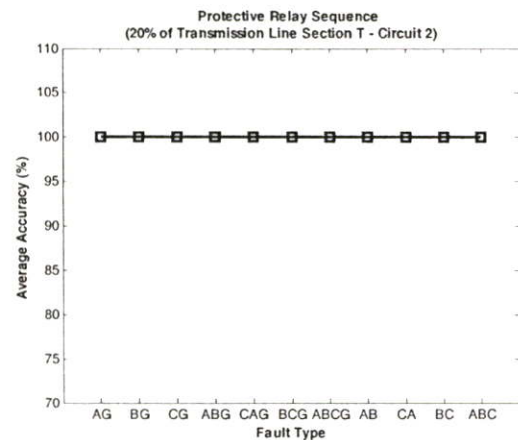
6.3.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (36.6 กิโลเมตร)



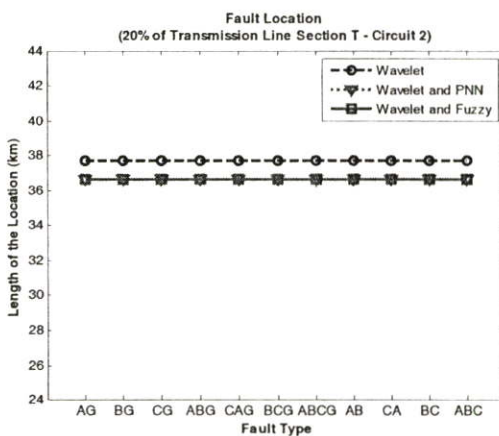
(a) การตรวจจับฟอลต์



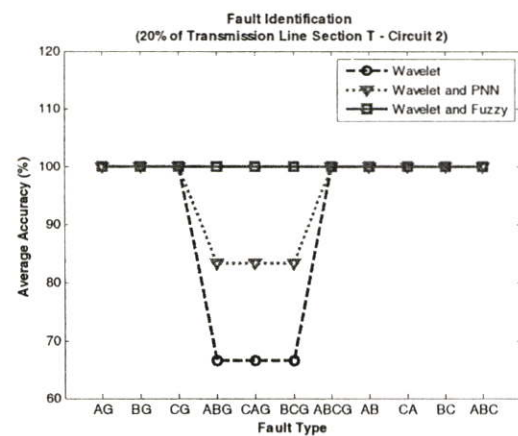
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.11 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.11 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.11 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.11 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 36.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.11 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 37.7064 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 1.1064 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.11 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 36.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.11 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 36.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

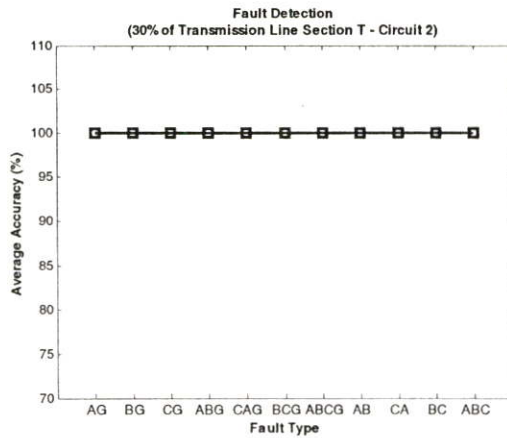
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.11 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 36.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

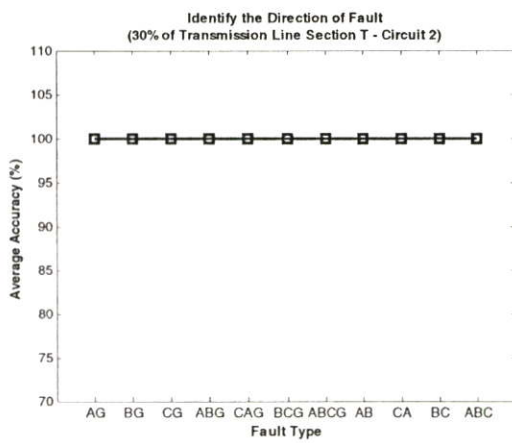
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.11 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.11 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชี่โลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.11 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.11 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชี่โลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

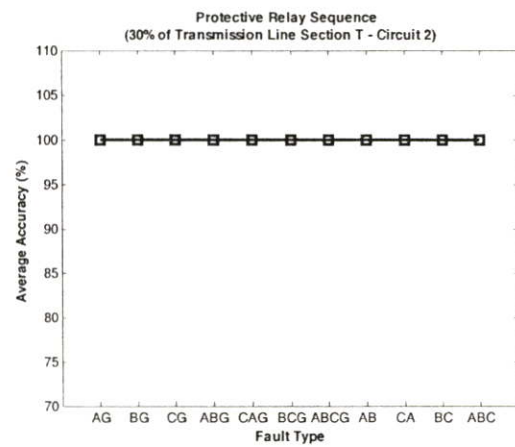
6.3.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (54.9 กิโลเมตร)



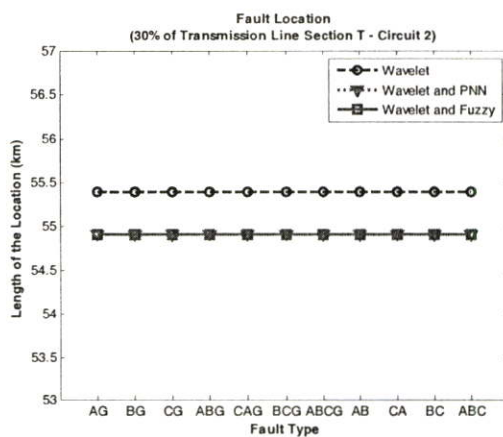
(a) การตรวจจับฟอลต์



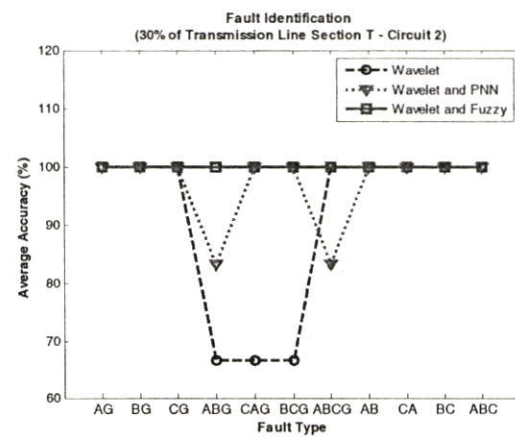
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 54.9 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.12 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.12 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.12 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.12 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 54.9 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาคำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.12 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 55.3919 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4919 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาคำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.12 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 54.9 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาคำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.12 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 54.9 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

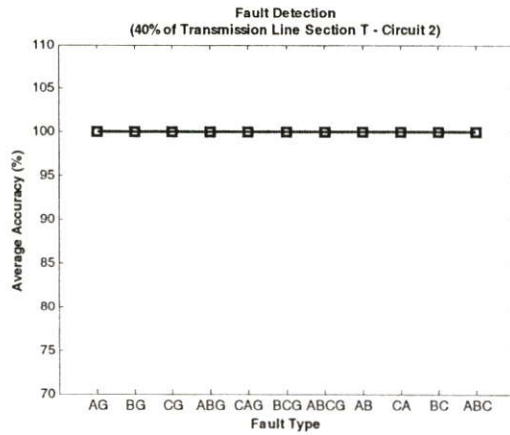
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.12 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 54.9 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

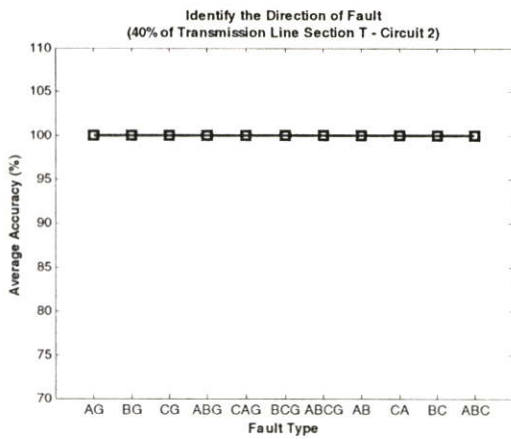
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.12 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.12 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG และ ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.12 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.12 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

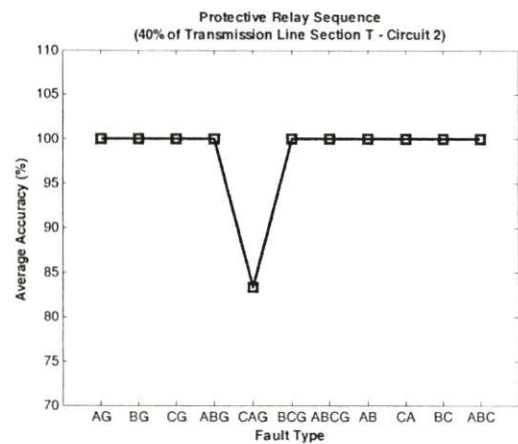
6.3.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (73.2 กิโลเมตร)



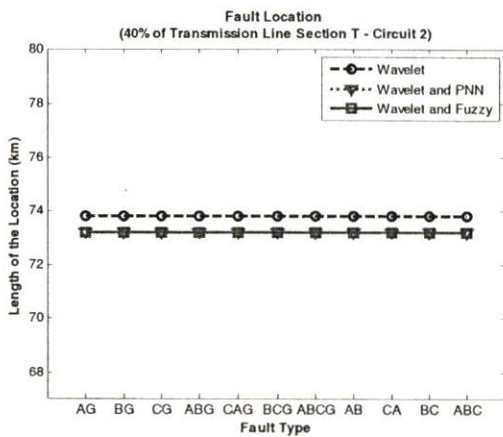
(a) การตรวจจับฟอลต์



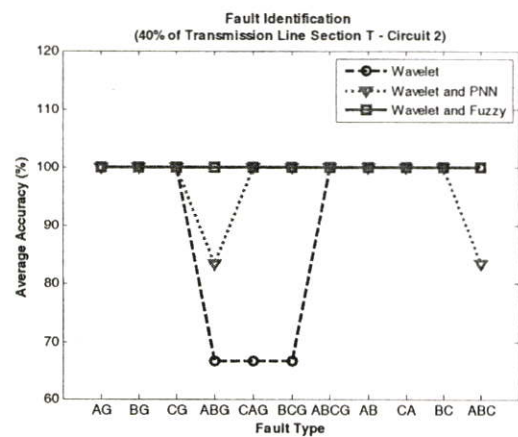
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.13 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 73.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.13 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.13 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.13 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.13 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 98.48%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 73.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.13 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 73.8144 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.6144 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.13 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 73.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.13 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 73.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

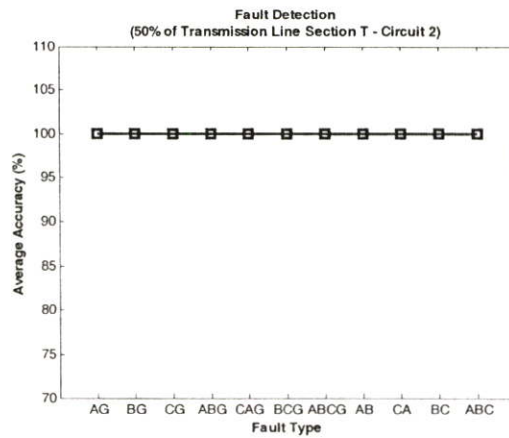
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.13 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 73.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

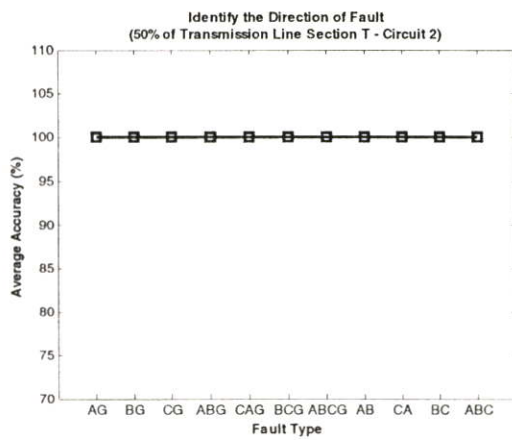
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.13 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.13 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.13 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.13 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

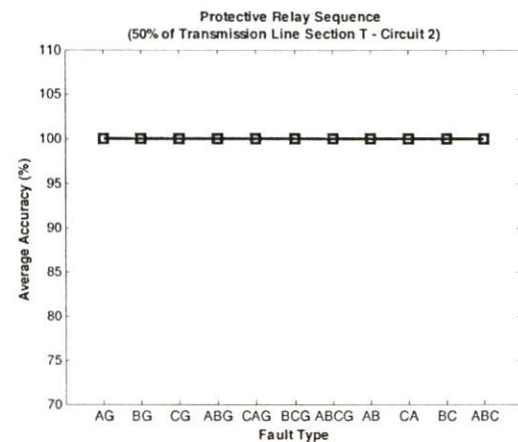
6.3.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (91.5 กิโลเมตร)



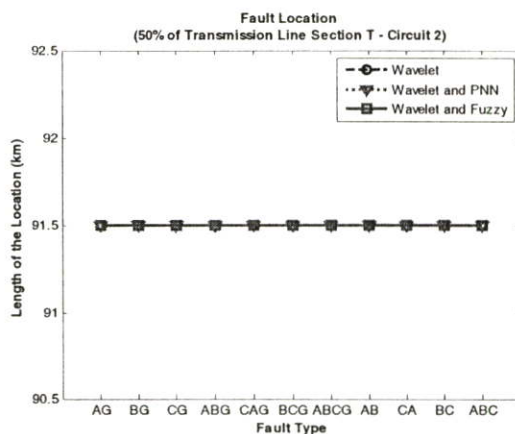
(a) การตรวจจับฟอลต์



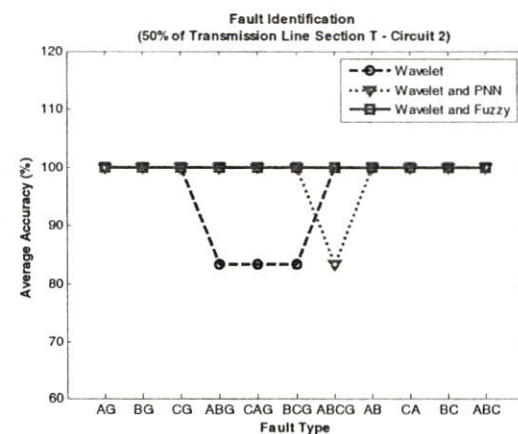
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 91.5 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.14 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.14 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.14 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.14 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 91.5 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.14 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 91.5 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.14 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 91.5 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.14 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 91.5 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

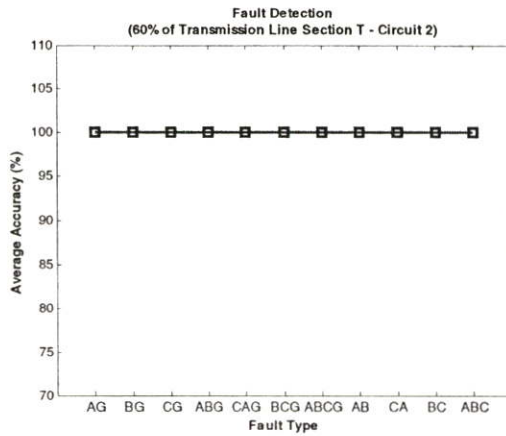
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.14 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก, การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 91.5 กิโลเมตร) ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

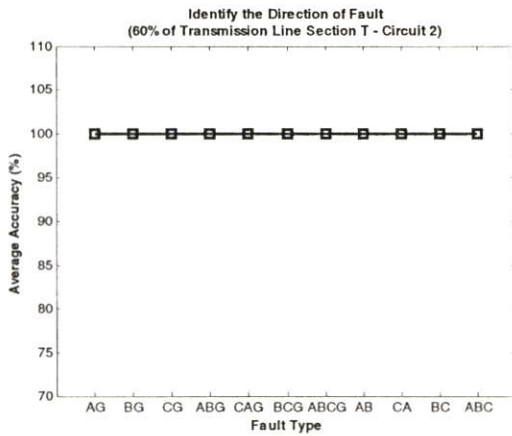
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.14 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.14 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.14 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.14 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

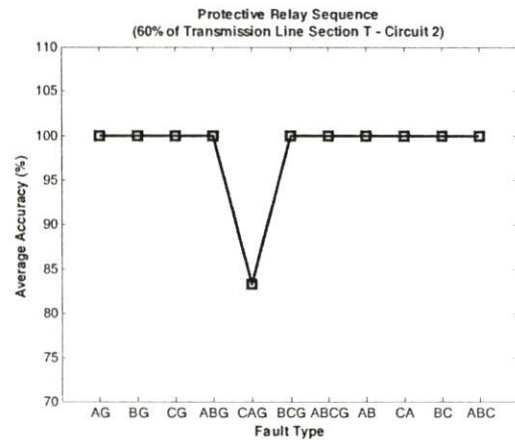
6.3.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (109.8 กิโลเมตร)



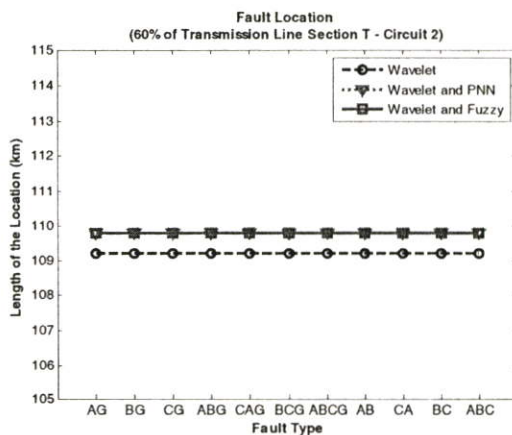
(a) การตรวจจับฟอลต์



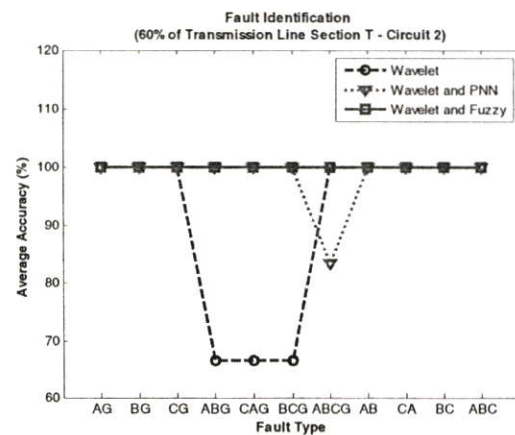
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 109.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.15 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.15 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.15 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.15 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 98.48%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 109.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.15 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 109.1856 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.6144 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.15 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 109.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.15 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 109.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

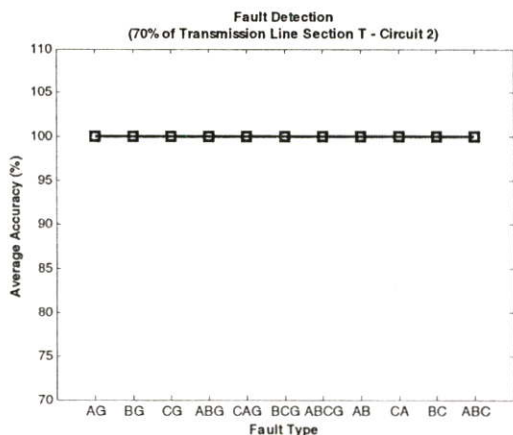
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.15 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 109.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

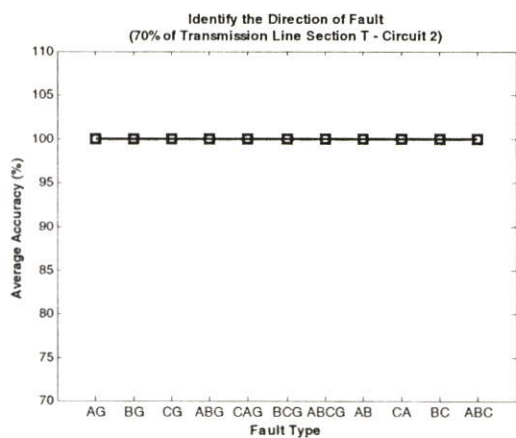
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.15 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.15 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.15 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.15 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

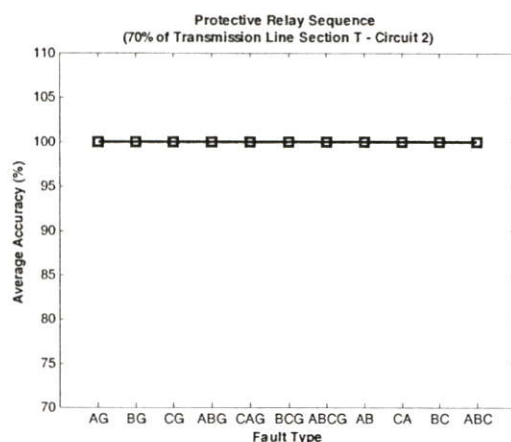
6.3.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (128.1 กิโลเมตร)



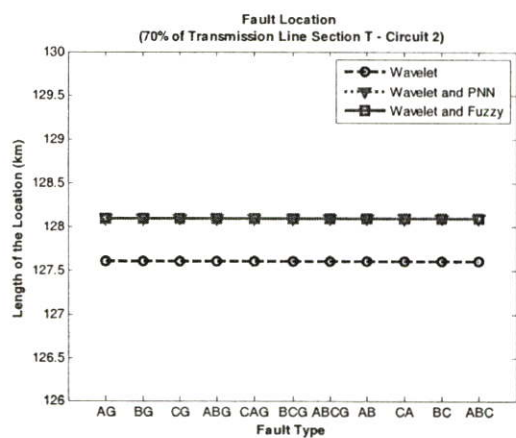
(a) การตรวจจับฟอลต์



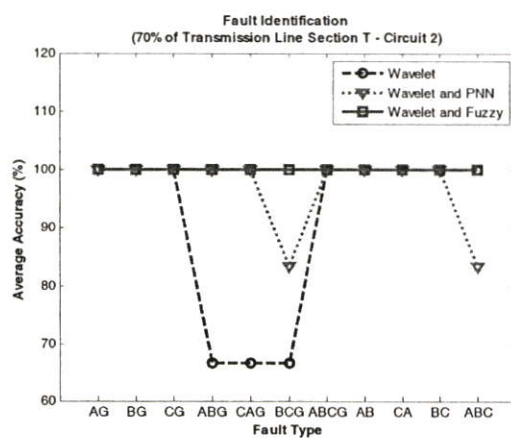
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 128.1 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.16 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

#### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.16 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

#### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.16 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

#### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.16 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

#### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 128.1 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.16 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 127.6081 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4919 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.16 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 128.1 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.16 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 128.1 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

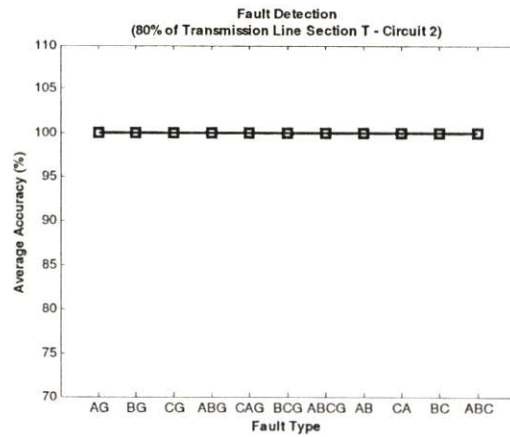
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.16 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 128.1 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

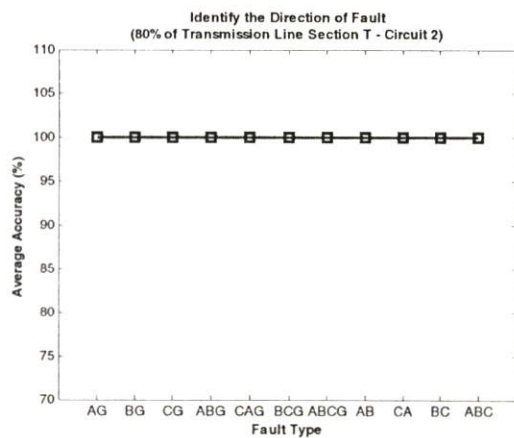
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.16 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.16 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, ABCG, AB, CA, และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.16 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.16 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

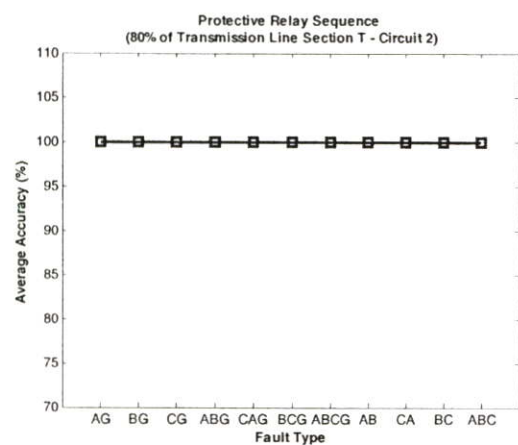
6.3.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (146.4 กิโลเมตร)



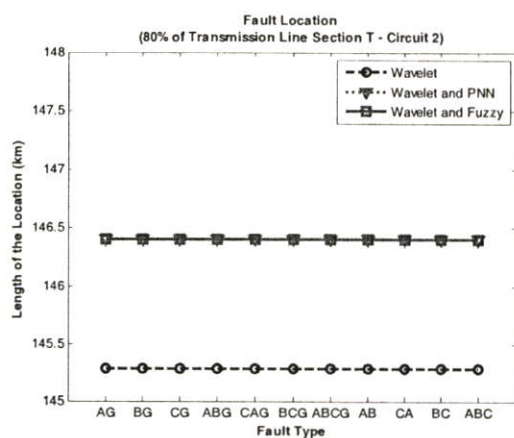
(a) การตรวจจับฟอลต์



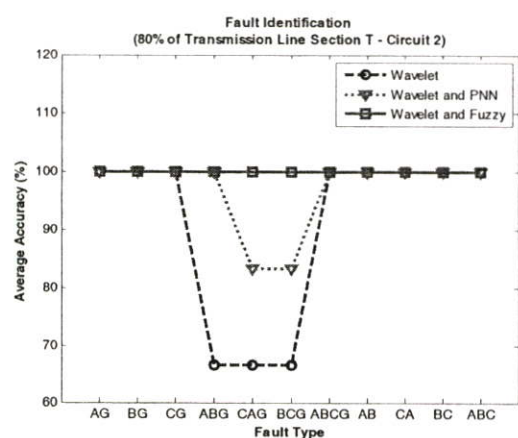
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.17 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 146.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปแบบที่ 6.17 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.17 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.17 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.17 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 146.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.17 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 145.2936 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 1.1064 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.17 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 146.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.17 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 146.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

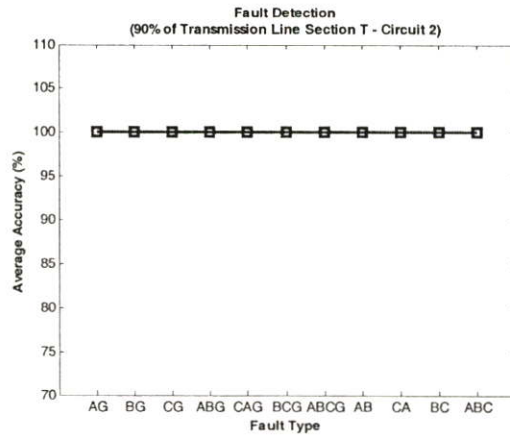
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.17 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 146.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

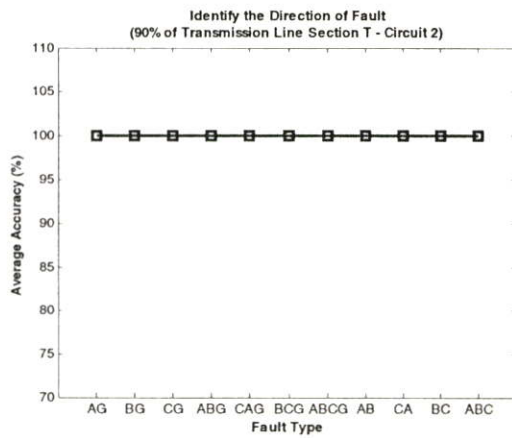
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.17 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.17 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.17 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.17 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิกจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

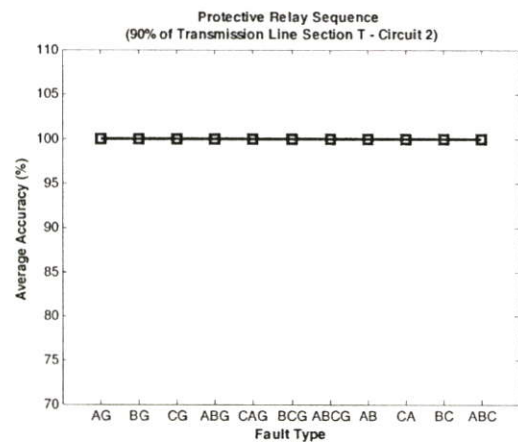
6.3.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (164.7 กิโลเมตร)



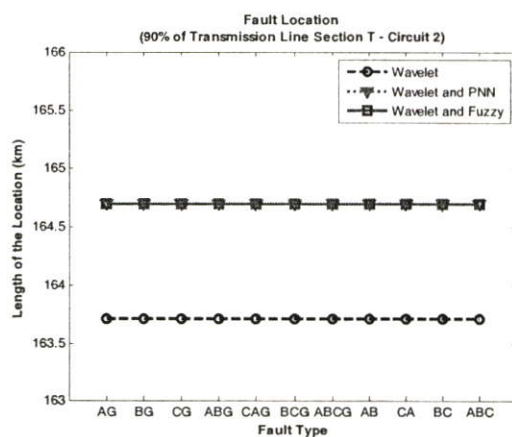
(a) การตรวจจับฟอลต์



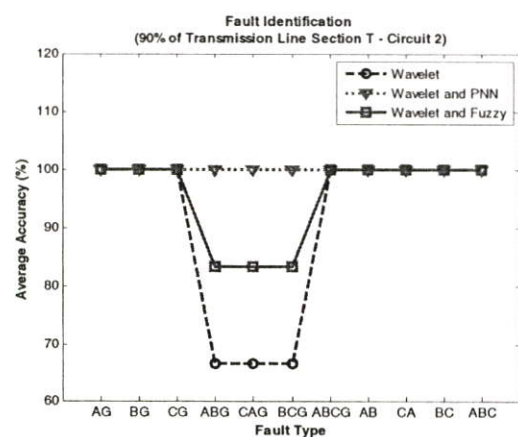
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.18 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 164.7 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 2 (WN2T-CBG2T)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.18 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.18 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.18 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.18 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 164.7 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.18 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 163.7161 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.9839 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 และจากรูปที่ 6.18 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 164.7 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.18 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 164.7 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.18 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 164.7 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

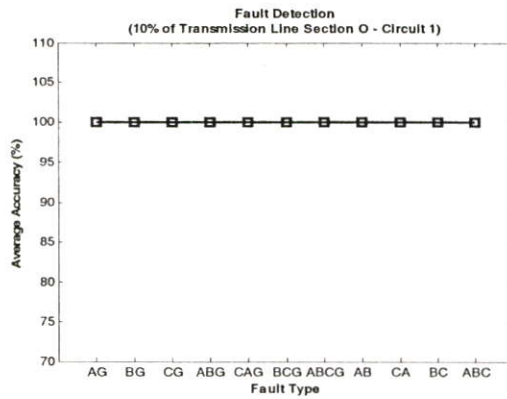
### การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.18 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.18 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.18 (e) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

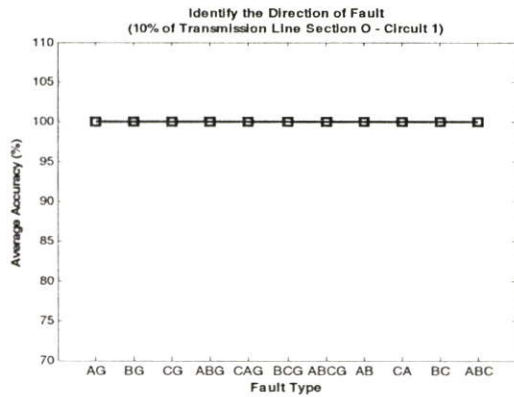
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.18 (e) พบว่า ผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

## 6.4 ผลการทดลองของสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 ความยาวสายส่ง 62 กิโลเมตร

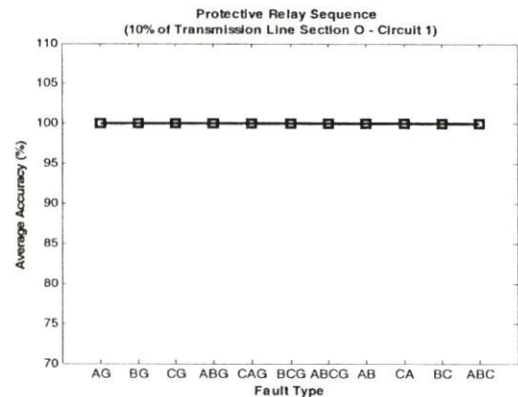
### 6.4.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (6.2 กิโลเมตร)



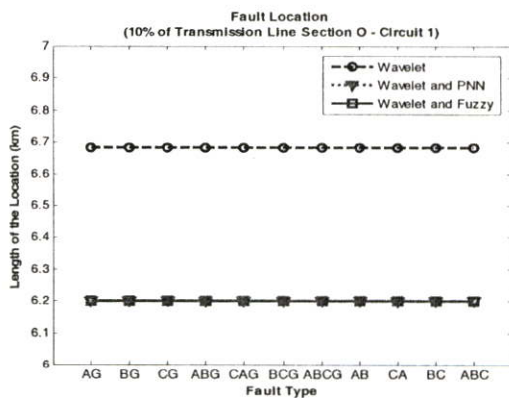
(a) การตรวจจับฟอลต์



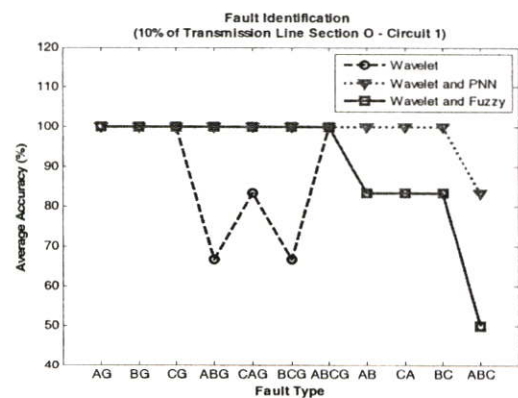
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.19 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 6.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.19 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.19 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.19 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.19 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 6.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.19 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 6.6833 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4833 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.19 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 6.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.19 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 6.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

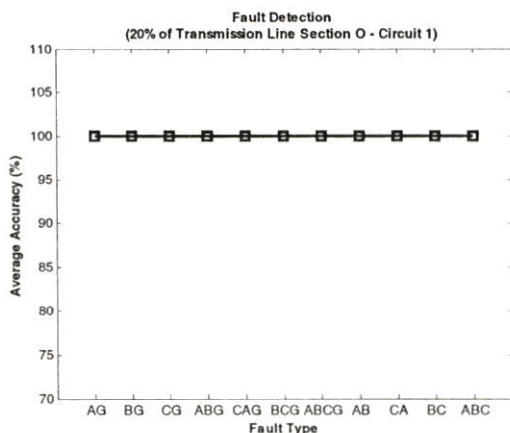
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.19 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 6.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

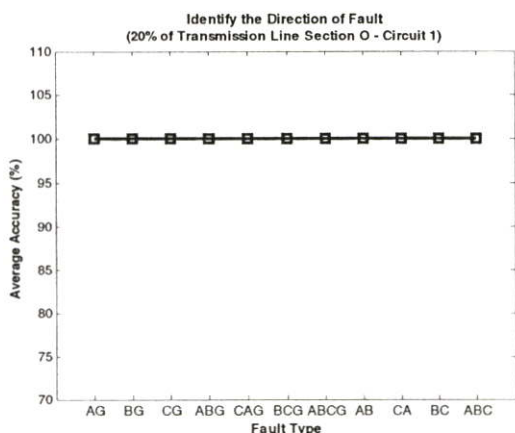
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.19 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 83.33% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG และ ABCG มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG, AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33% , ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66% ในขณะที่ระบุประเภทพอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 50%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.19 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.19 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG และ ABCG มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 50%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.19 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

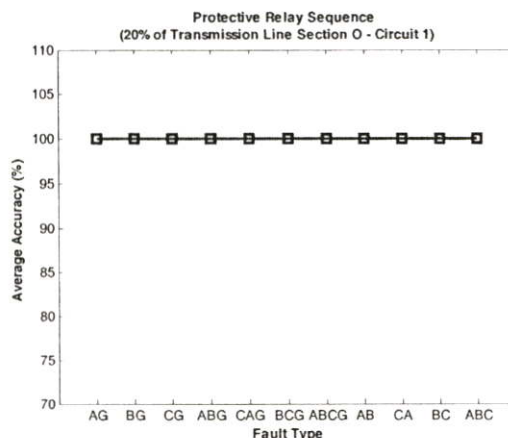
6.4.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (12.4 กิโลเมตร)



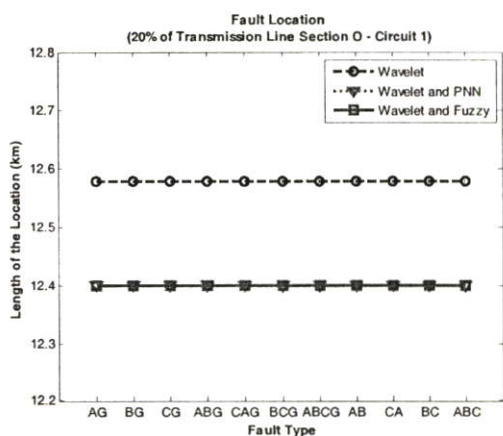
(a) การตรวจจับฟอลต์



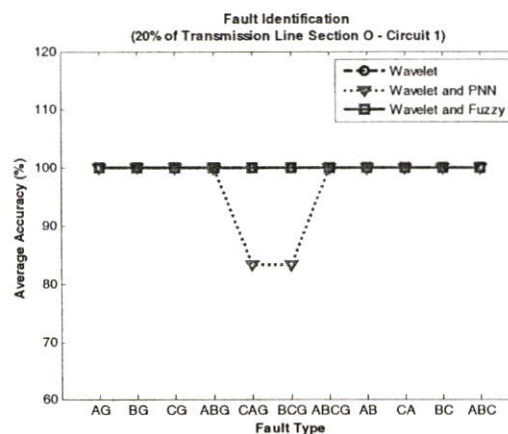
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 12.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.20 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.20 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.20 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.20 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 12.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.20 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 12.5783 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1783 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.20 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 12.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.20 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 12.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

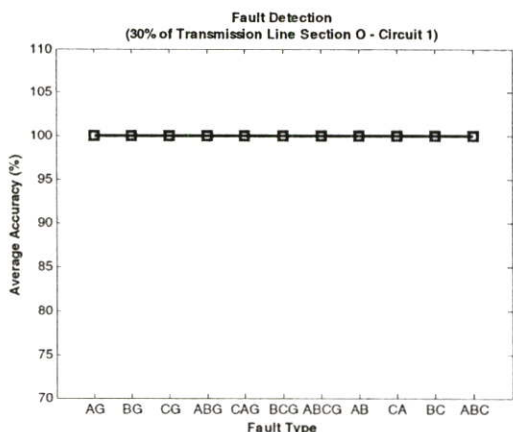
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.20 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 12.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

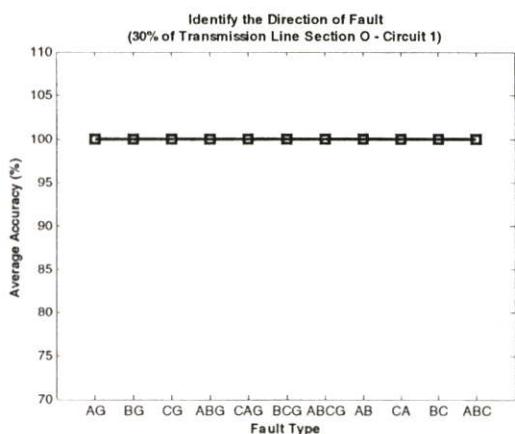
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.20 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.20 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชี่โลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.20 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.20 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ตามลำดับ

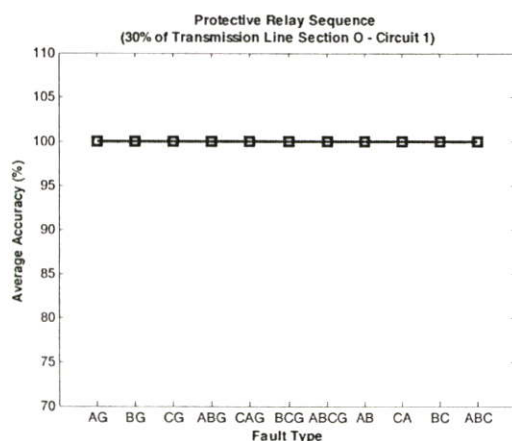
6.4.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (18.6 กิโลเมตร)



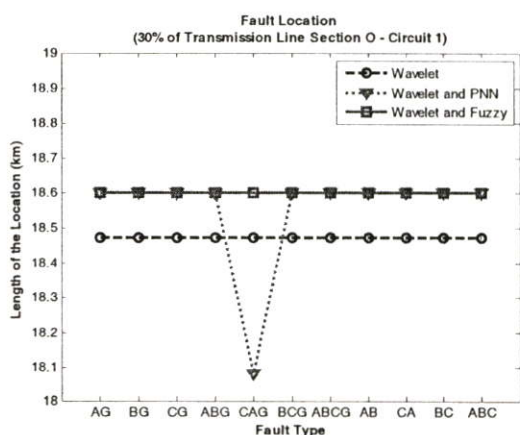
(a) การตรวจจับฟอลต์



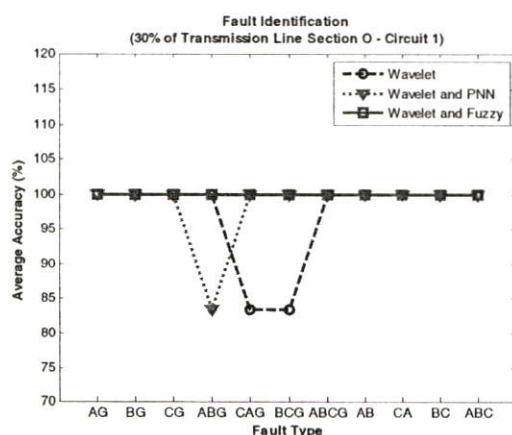
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.21 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.21 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.21 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.21 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.21 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 18.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.21 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 18.4732 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1268 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.21 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 18.553 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.047 กิโลเมตร), ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 18.0833 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.5167 กิโลเมตร) และระยะทางเฉลี่ยสูงสุดที่คำนวณได้คือ 18.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.21 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.21 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด

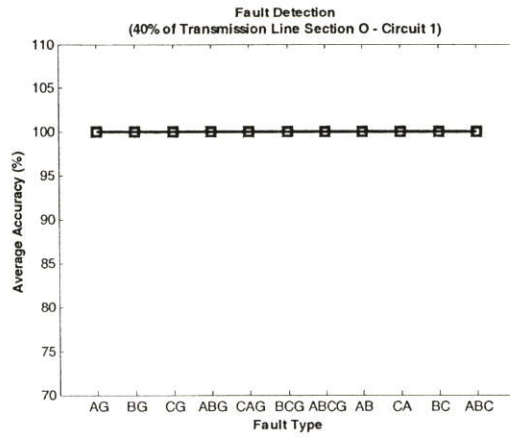
(โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 18.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความนำจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

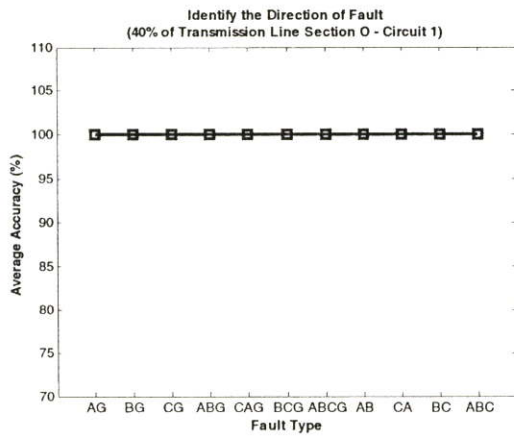
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.21 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความนำจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.21 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.21 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.21 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความนำจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

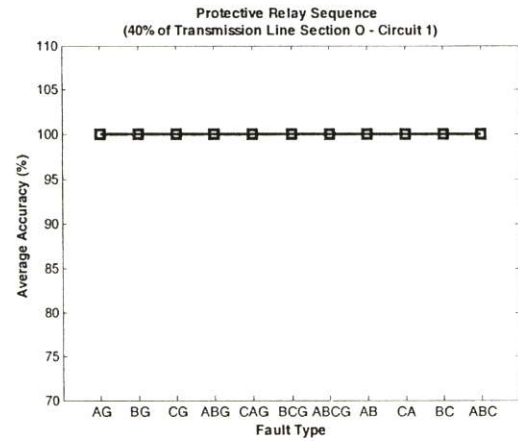
6.4.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (24.8 กิโลเมตร)



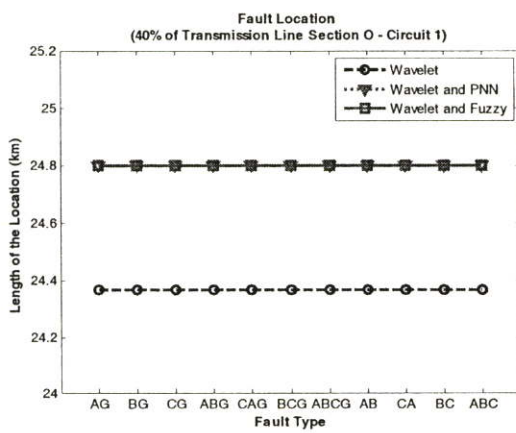
(a) การตรวจจับฟอลต์



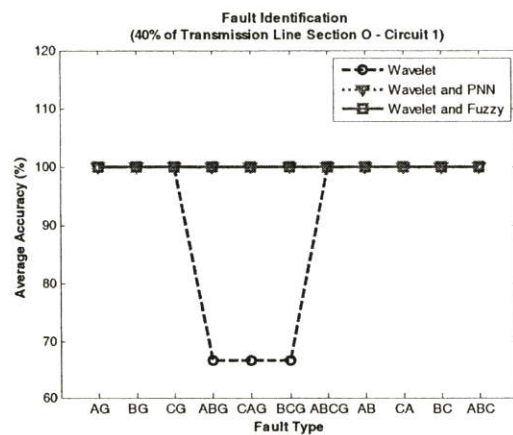
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.22 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 24.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.22 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.22 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.22 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.22 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 24.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.22 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 24.3682 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4318 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.22 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 24.8 (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.22 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 24.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

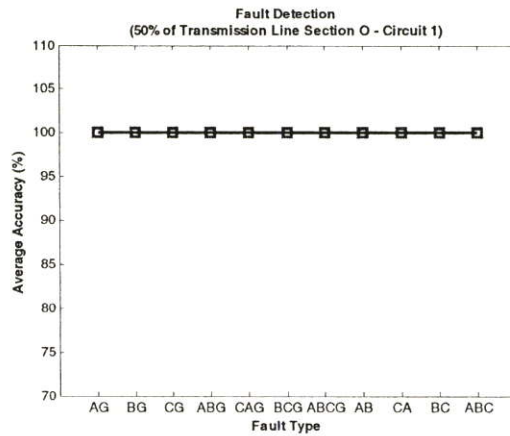
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.22 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 24.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

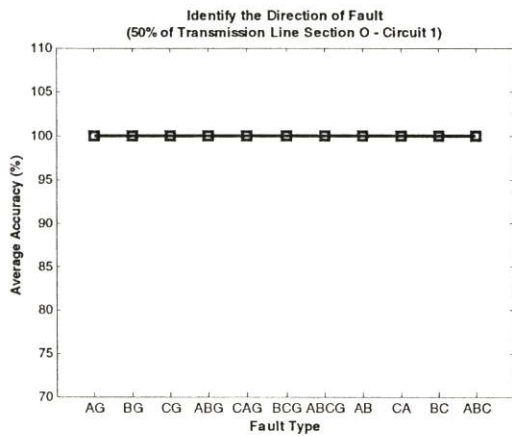
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.22 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.22 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.22 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.22 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

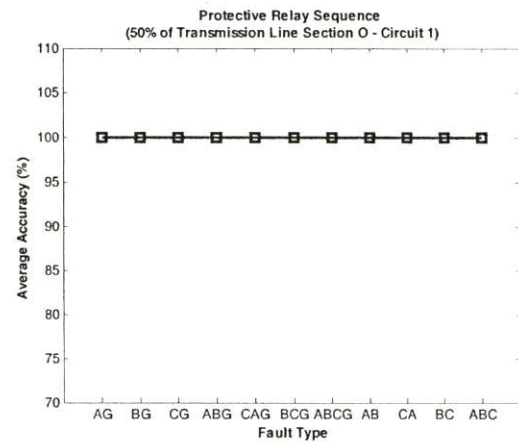
6.4.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (31 กิโลเมตร)



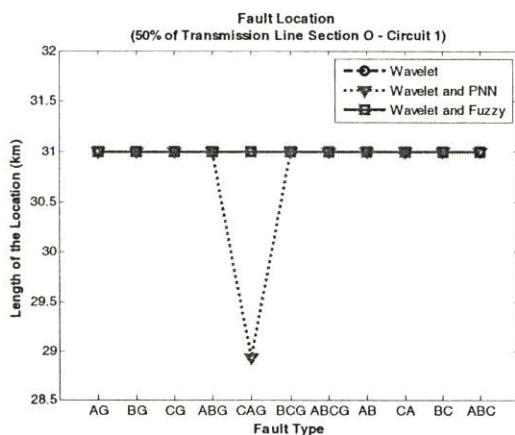
(a) การตรวจจับฟอลต์



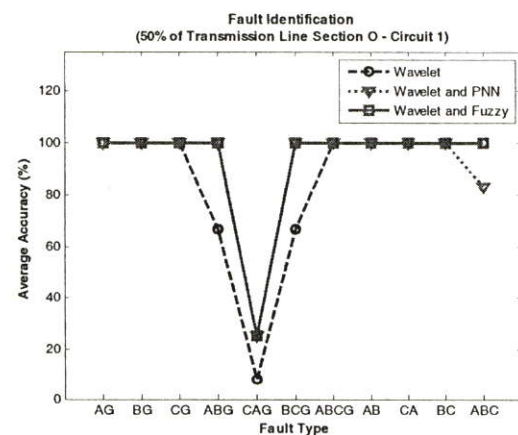
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.23 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 31 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.23 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.23 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรกมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.23 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.23 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 31 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.23 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 31 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.23 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 30.8121 (คลาดเคลื่อน 0.1879 กิโลเมตร), ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 28.9333 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 2.0667 กิโลเมตร) และระยะทางเฉลี่ยสูงสุดที่คำนวณได้คือ 31 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.23 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.23 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จะให้

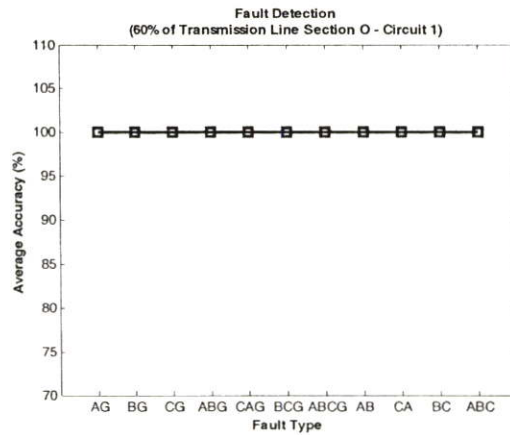
ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 31 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

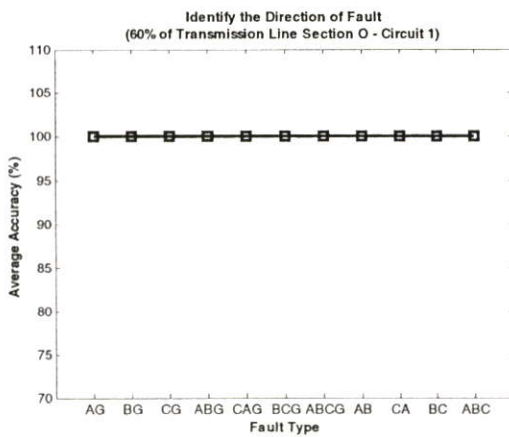
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.23 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 85.6061% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทพอลต์ชนิด ABG และ BCG มีความถูกต้องเฉลี่ย 66.66% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 8.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.23 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 91.66% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, ABCG, AB, CA, และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABC มีความถูกต้องเฉลี่ย 83.33% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 25%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.23 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 93.18% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 25%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.23 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 93.18%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

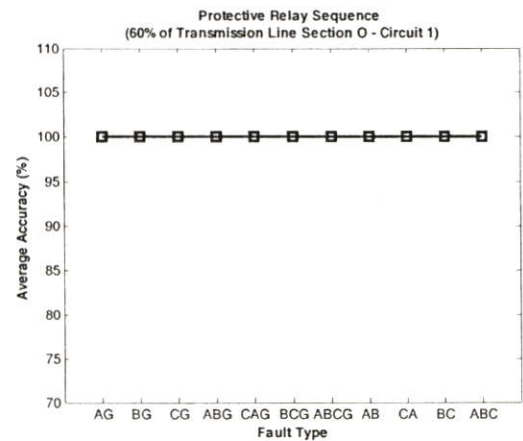
6.4.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (37.2 กิโลเมตร)



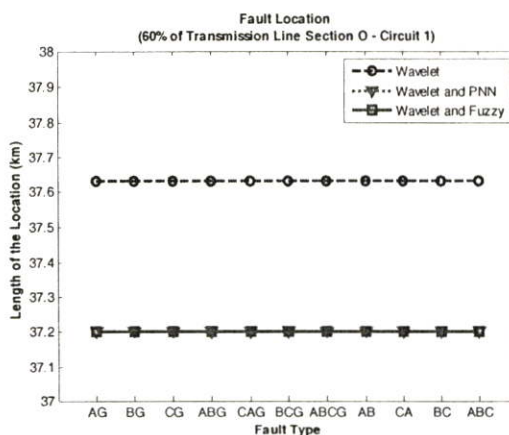
(a) การตรวจจับฟอลต์



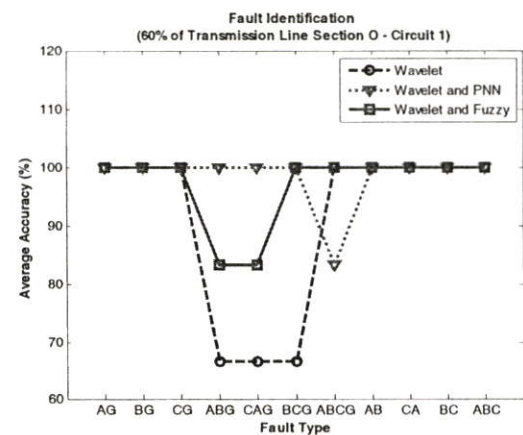
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.24 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.24 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.24 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.24 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.24 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 37.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.24 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 37.6318 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4318 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.24 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 37.2 (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.24 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

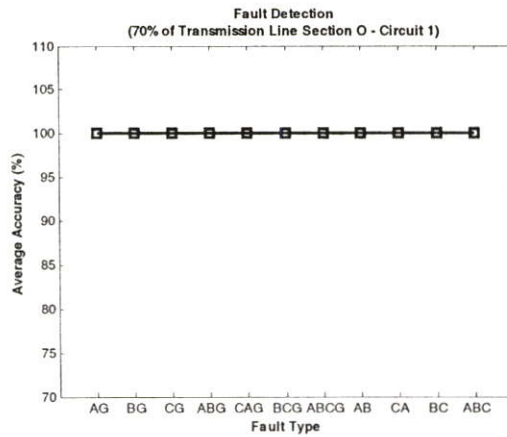
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.24 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 37.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

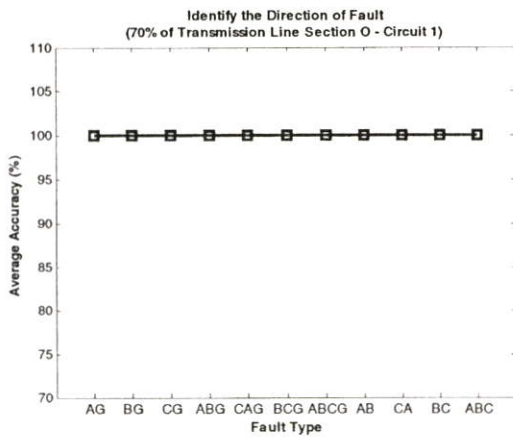
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.24 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.24 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.24 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.24 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

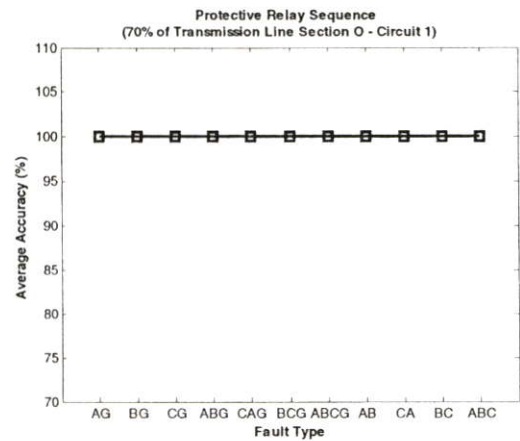
6.4.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (43.4 กิโลเมตร)



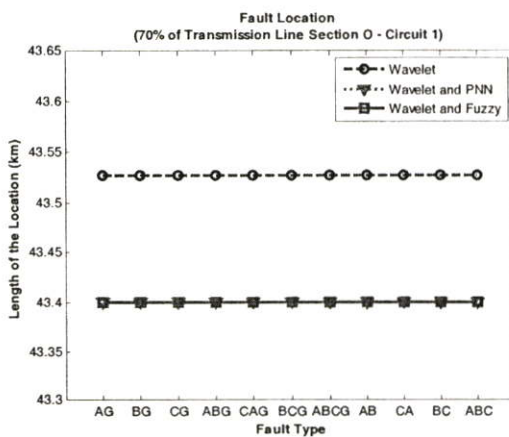
(a) การตรวจจับฟอลต์



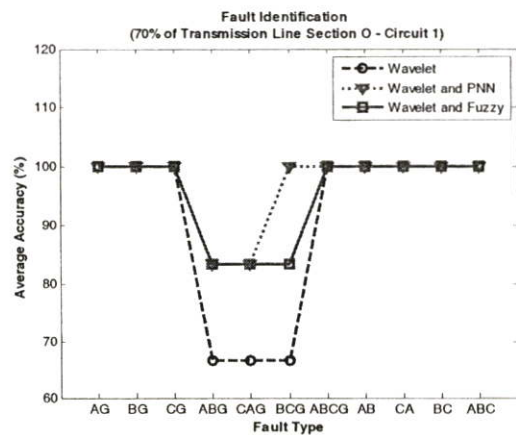
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.25 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 43.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.25 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.25 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.25 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.25 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 43.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.25 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 43.5628 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1268 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.25 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 43.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.25 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 43.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

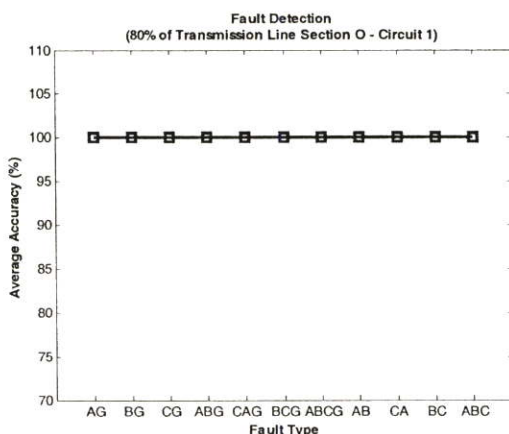
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.25 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 43.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

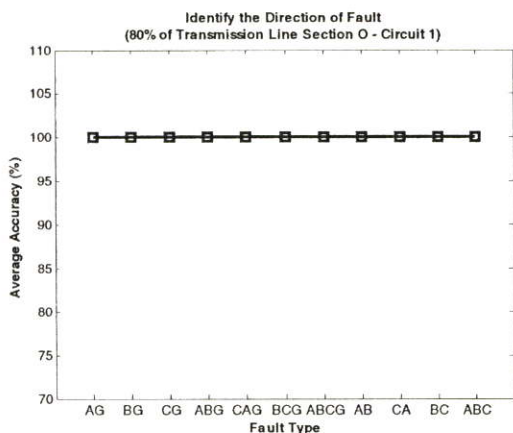
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.25 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.25 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.25 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.25 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

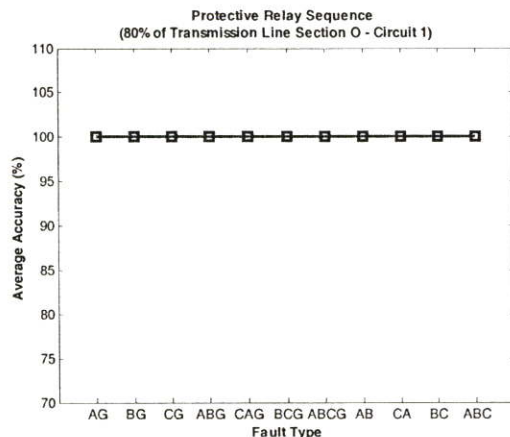
6.4.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (49.6 กิโลเมตร)



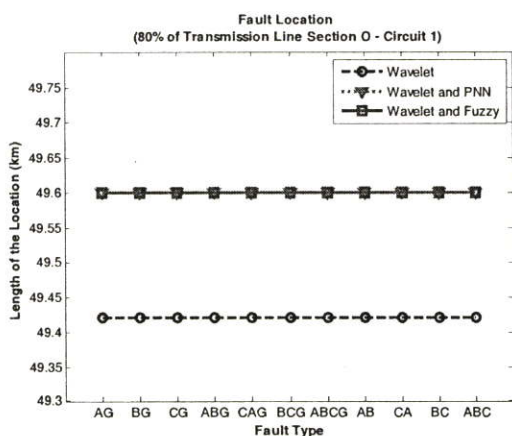
(a) การตรวจจับฟอลต์



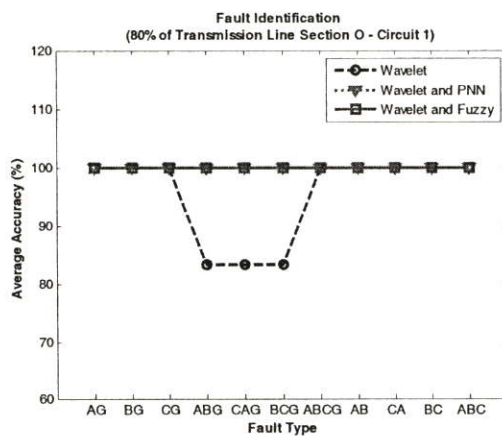
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.26 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 49.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.26 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.26 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.26 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.26 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 49.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.26 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 49.4217 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1783 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.26 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 49.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.26 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 49.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

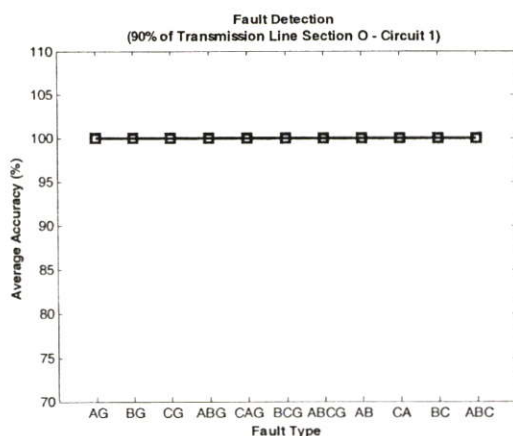
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.26 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 49.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

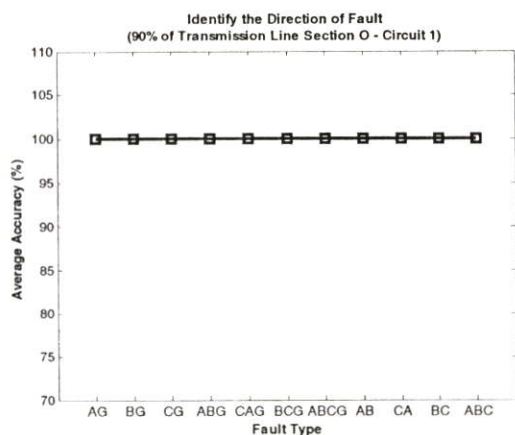
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.26 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.26 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.26 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.26 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยตามลำดับ

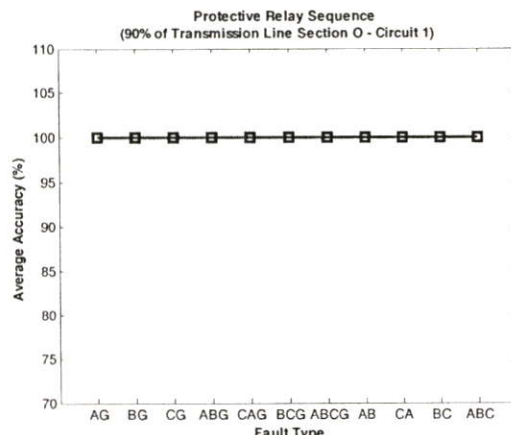
6.4.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (55.8 กิโลเมตร)



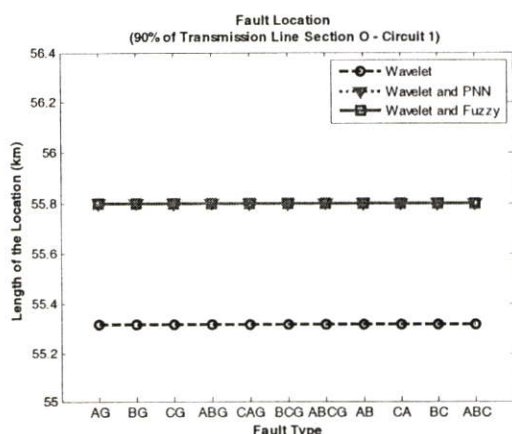
(a) การตรวจจับฟอลต์



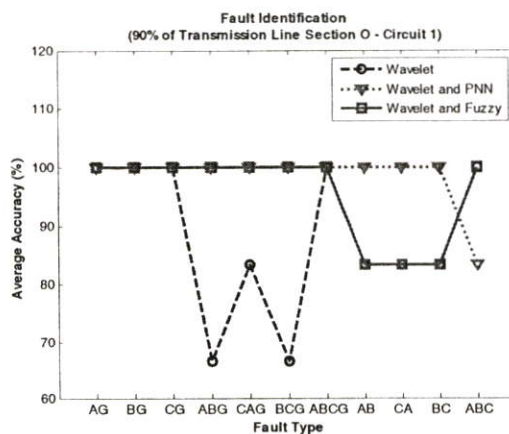
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.27 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 55.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 1 (WN10-SNO10)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.27 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.27 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.27 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.27 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 55.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.27 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 55.3167 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4833 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.27 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 55.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.27 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 55.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.27 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 55.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

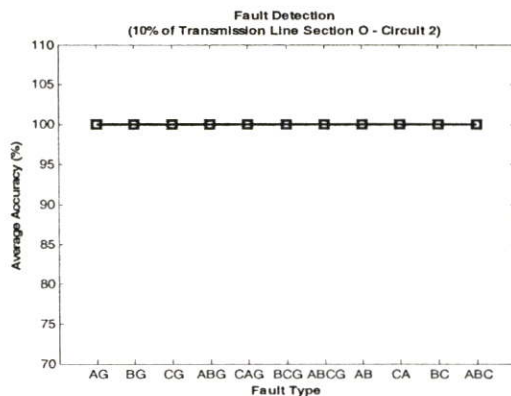
### การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.27 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 87.87% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทพอลต์ชนิด CAG, AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.27 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.27 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG และ ABCG มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

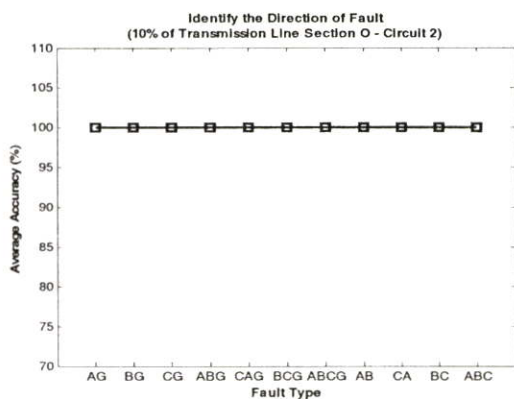
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.27 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

## 6.5 ผลการทดลองของสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 ความยาวสายส่ง 62 กิโลเมตร

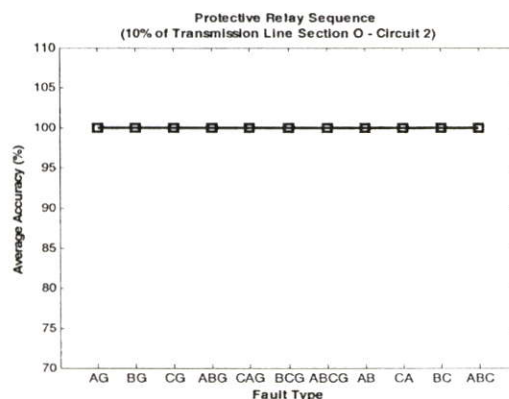
### 6.5.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (6.2 กิโลเมตร)



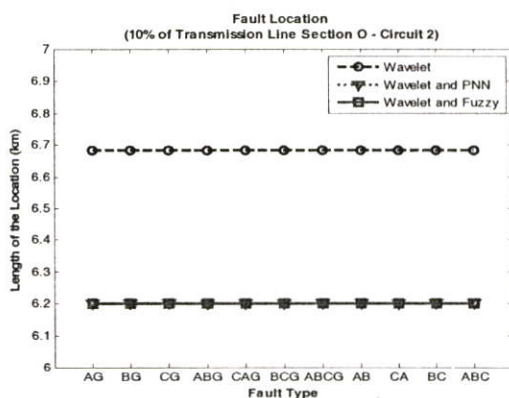
(a) การตรวจจับฟอลต์



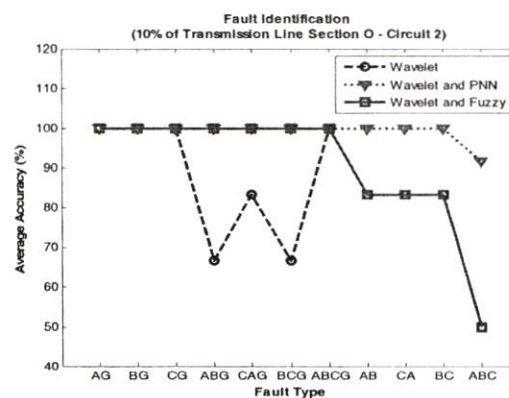
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.28 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 6.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN20-SNO20)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.28 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.28 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.28 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.28 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 6.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.28 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 6.6833 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4833 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.28 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 6.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.28 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 6.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

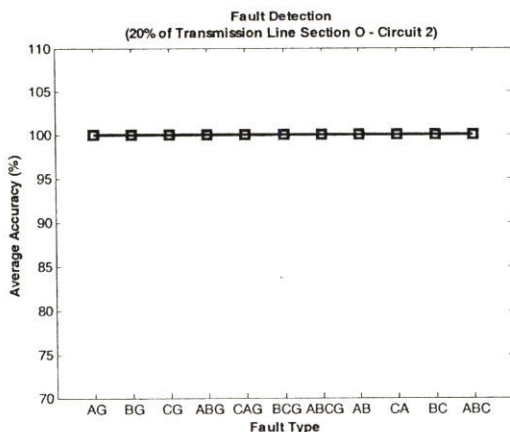
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.28 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 6.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

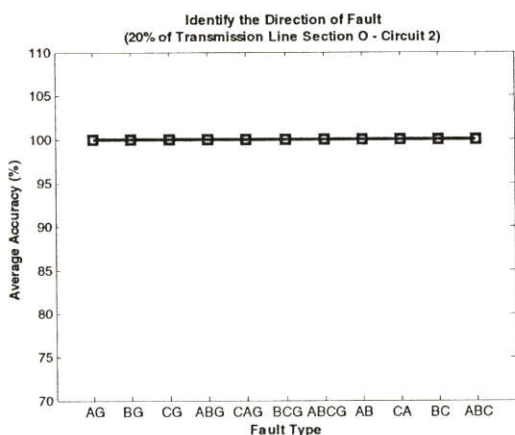
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.28 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 83.33% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG และ ABCG มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG, AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33% , ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66% ในขณะที่ระบุประเภทฟอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 50%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.28 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 99.24% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 91.66%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซ์โลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.28 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG และ ABCG มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 50%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.28 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซ์โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

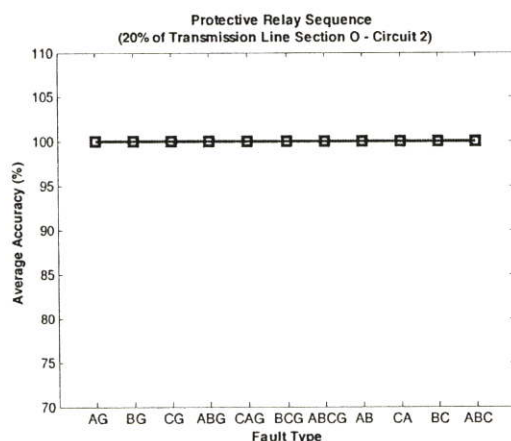
6.5.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (12.4 กิโลเมตร)



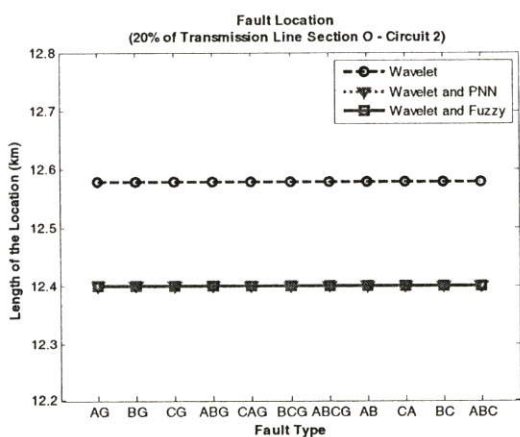
(a) การตรวจจับฟอลต์



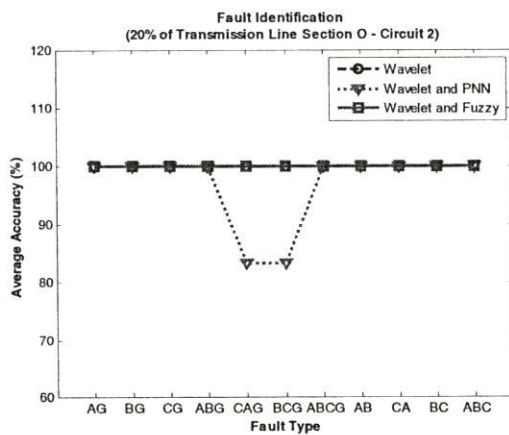
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.29 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 12.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN2O-SNO2O)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.29 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.29 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.29 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.29 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 12.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาดำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.29 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 12.5783 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1783 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาดำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.29 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 12.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic สามารถหาดำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.29 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 12.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

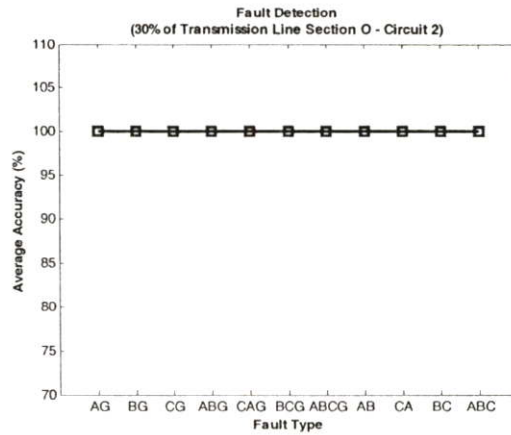
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.29 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 12.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

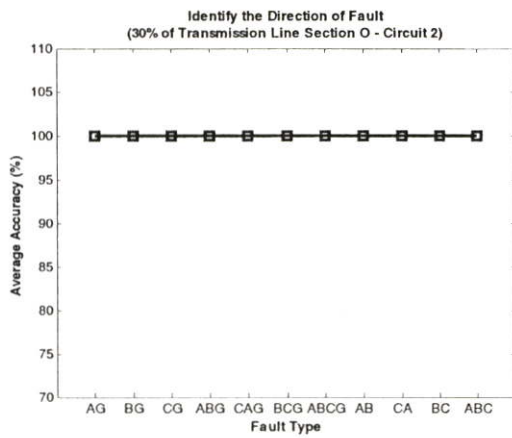
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.29 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.29 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.29 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.29 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ตามลำดับ

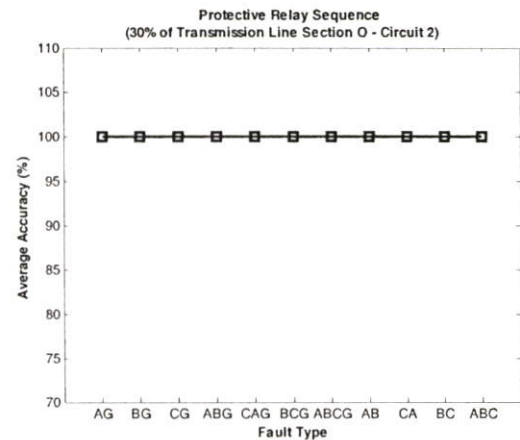
6.5.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (18.6 กิโลเมตร)



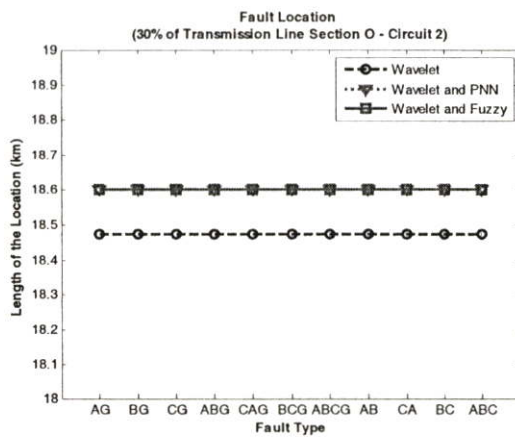
(a) การตรวจจับฟอลต์



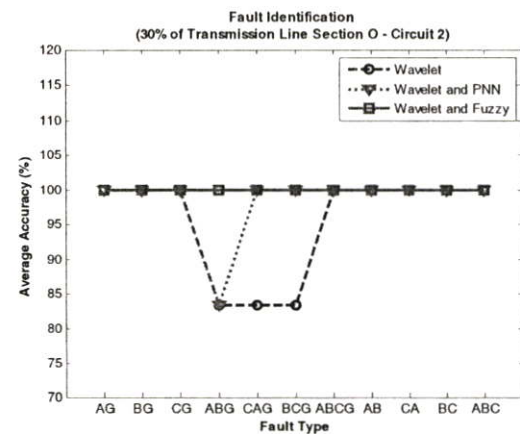
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.30 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN2O-SNO2O)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.30 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.30 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.30 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.30 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 18.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.30 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 18.4732 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1268 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.30 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.30 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

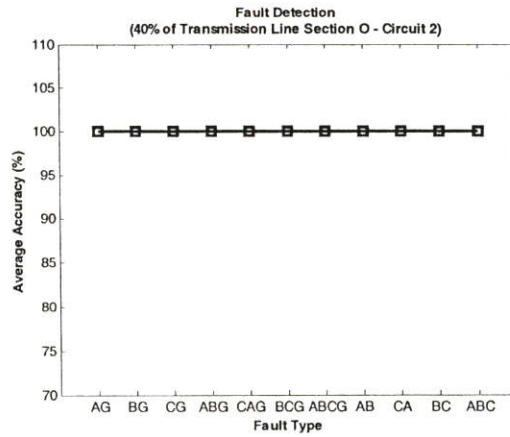
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.30 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 18.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

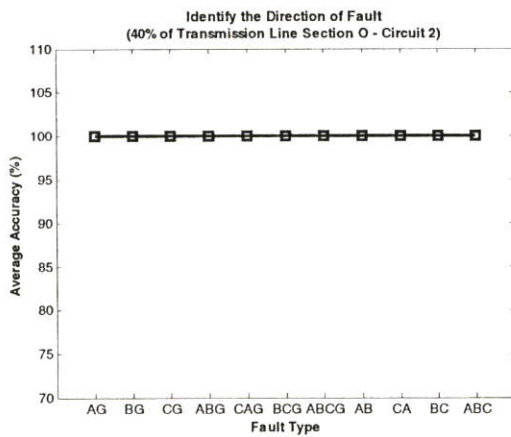
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.30 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.30 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.30 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.30 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

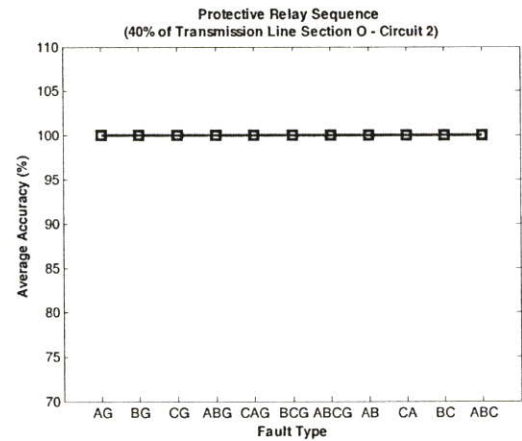
6.5.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (24.8 กิโลเมตร)



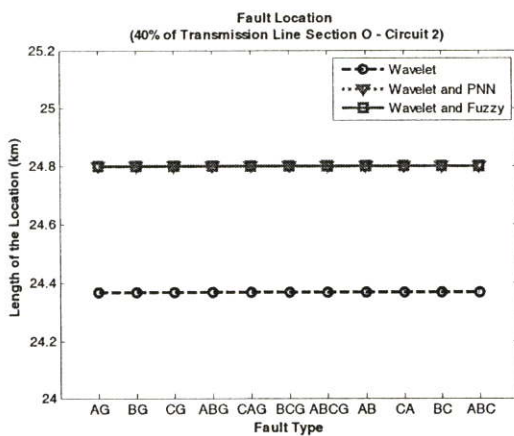
(a) การตรวจจับฟอลต์



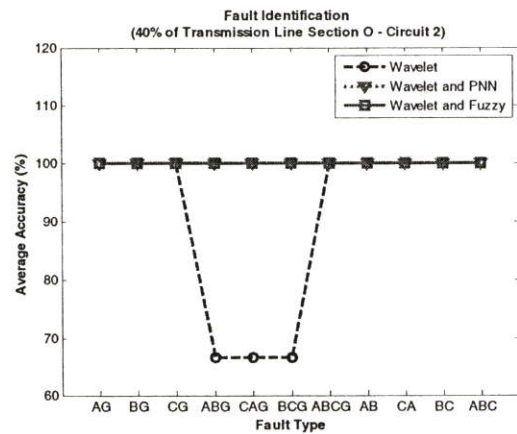
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.31 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 24.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN2O-SNO2O)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.31 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.31 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรกมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.31 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.31 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 24.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.31 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 24.3682 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4318 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.31 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 24.8 (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.31 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 24.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

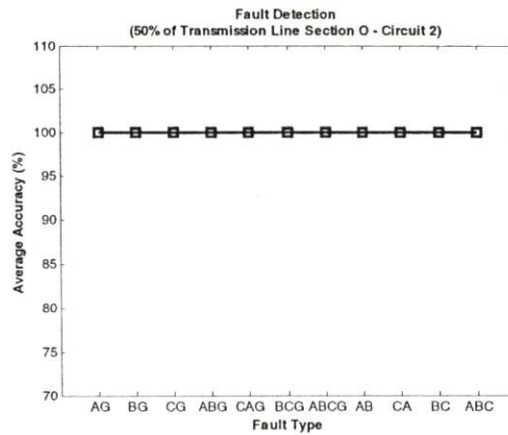
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.31 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 24.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

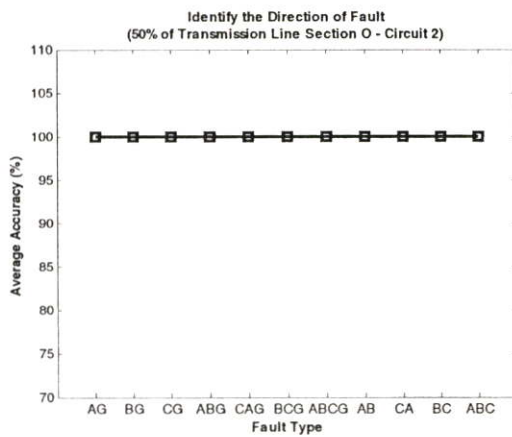
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.31 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.31 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.31 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.31 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

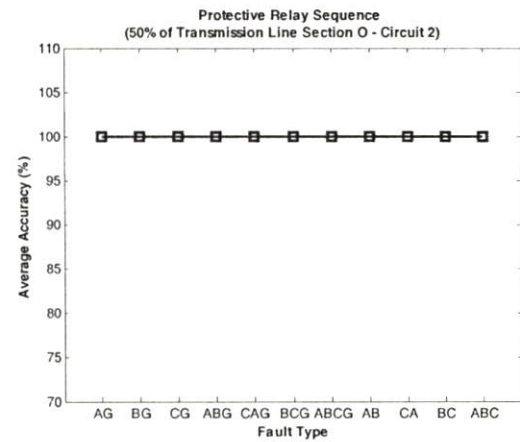
### 6.5.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (31 กิโลเมตร)



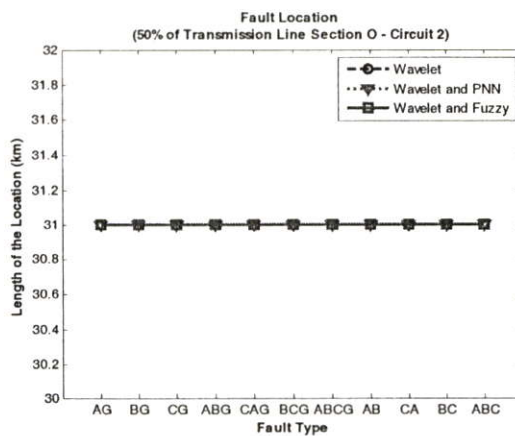
(a) การตรวจจับฟอลต์



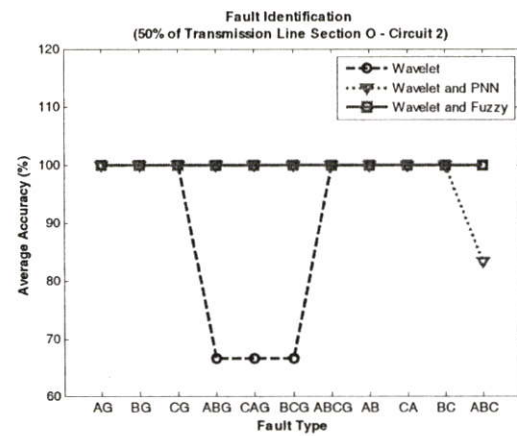
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.32 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 31 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN20-SNO20)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.32 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.32 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรกมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.32 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.32 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 31 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.32 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 31 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.32 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.32 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

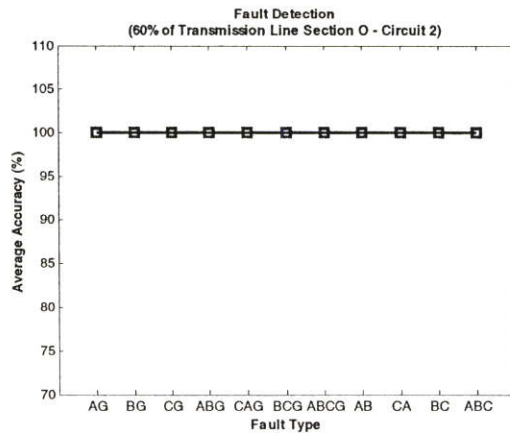
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.32 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก, การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 31 กิโลเมตร)

### การระบุประเภทของฟอลต์

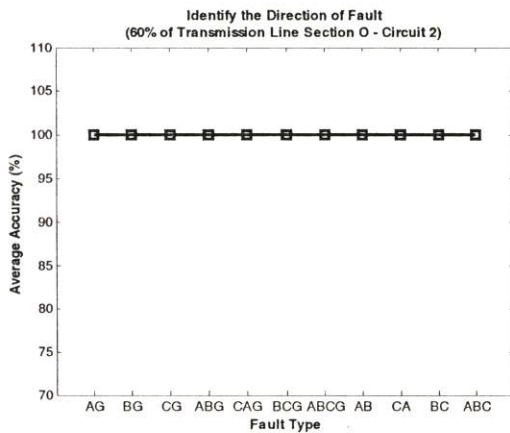
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.32 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG มีความถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.32 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, ABCG, AB, CA, และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABC มีความถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.32 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.32 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

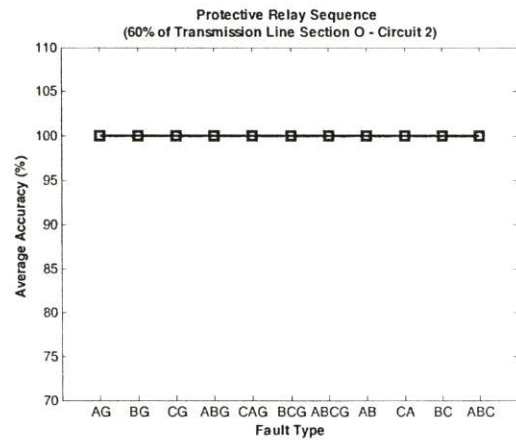
6.5.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (37.2 กิโลเมตร)



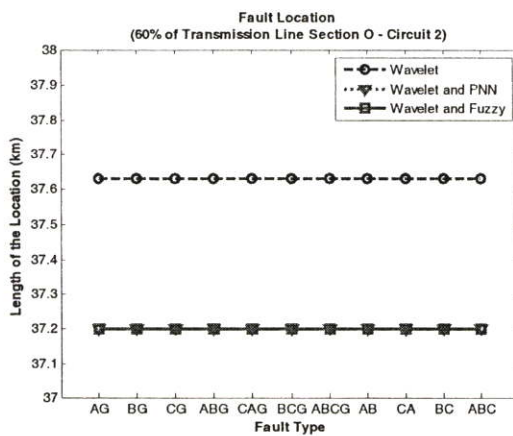
(a) การตรวจจับฟอลต์



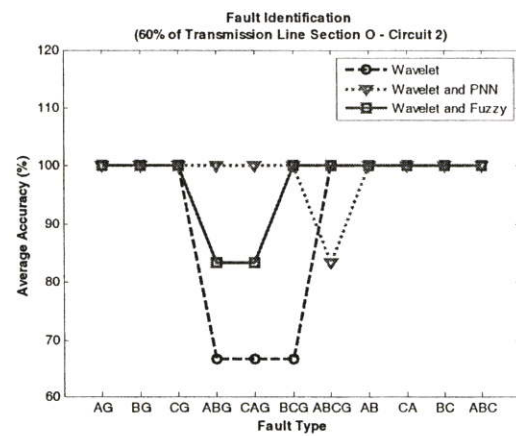
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.33 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN2O-SNO2O)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.33 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.33 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรกมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.33 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.33 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 37.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.33 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 37.6318 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4318 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.33 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 37.2 (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.33 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

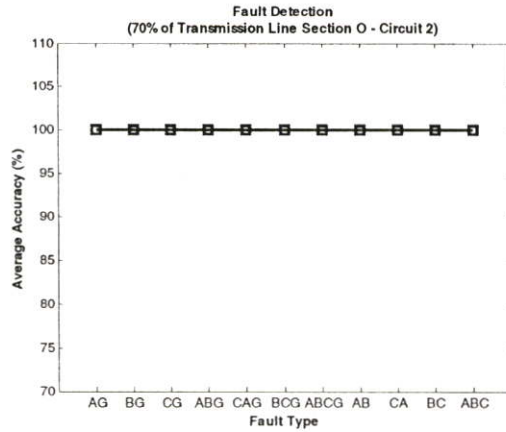
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.33 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 37.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

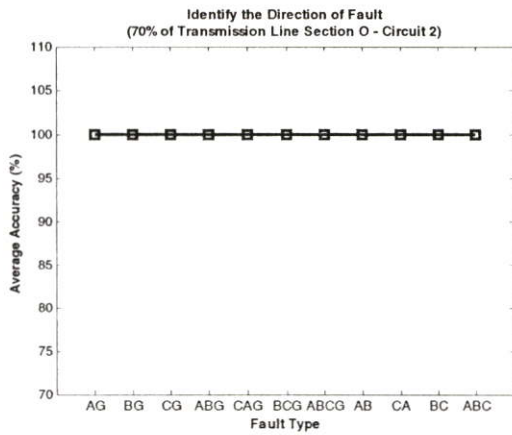
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.33 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.33 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.33 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.33 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

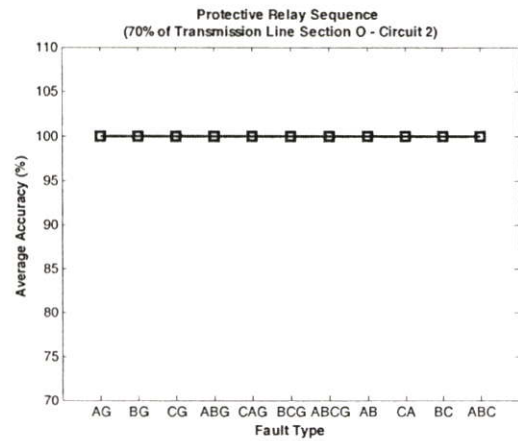
6.5.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (43.4 กิโลเมตร)



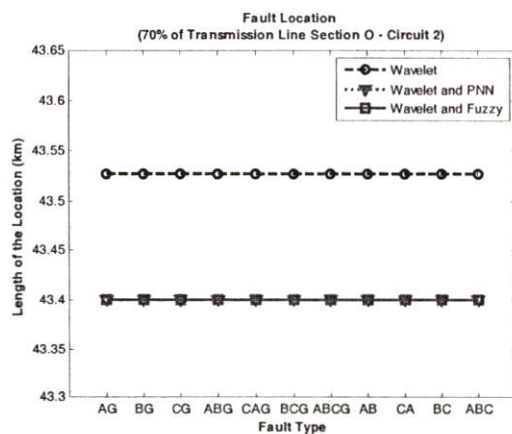
(a) การตรวจจับฟอลต์



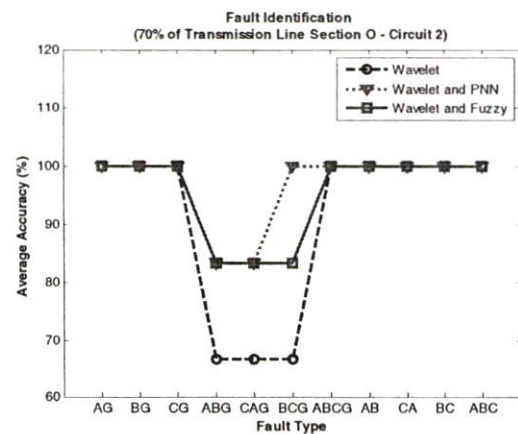
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.34 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 43.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN2O-SNO2O)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.34 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.34 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.34 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.34 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 43.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.34 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 43.5268 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1268 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.34 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 43.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.34 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 43.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

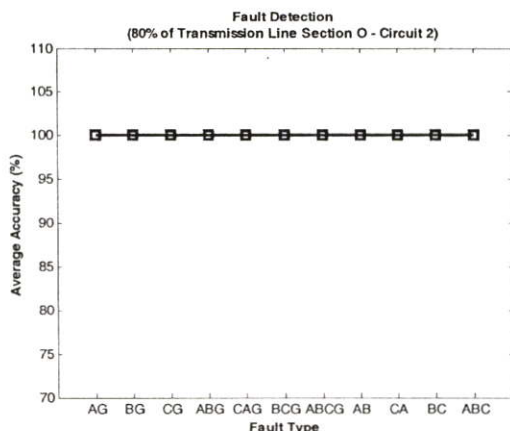
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.34 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 43.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

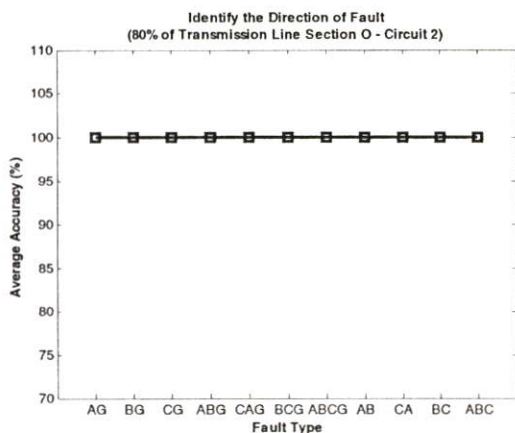
1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.34 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.34 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.34 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.34 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

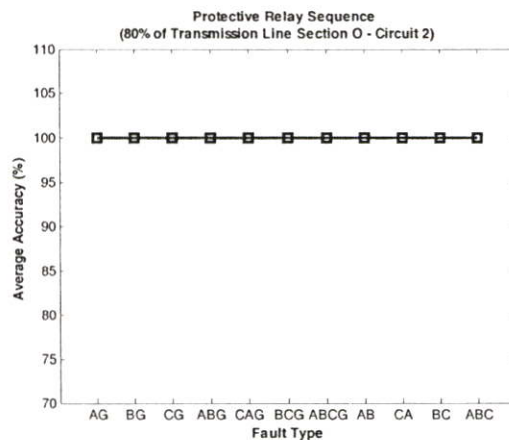
6.5.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (49.6 กิโลเมตร)



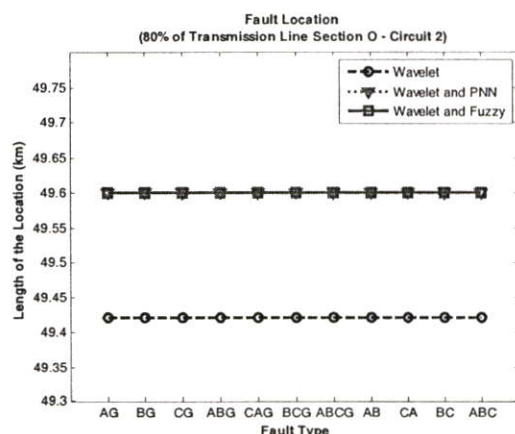
(a) การตรวจจับฟอลต์



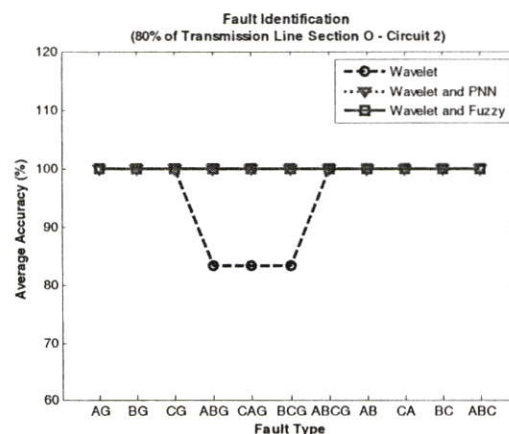
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.35 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 49.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN2O-SNO2O)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.35 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.35 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.35 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.35 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 49.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.35 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 49.4217 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.1783 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.35 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 49.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซ์โลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.35 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 49.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

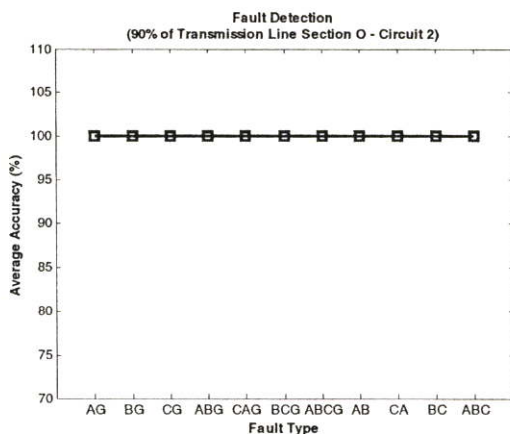
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.35 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซ์โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 49.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

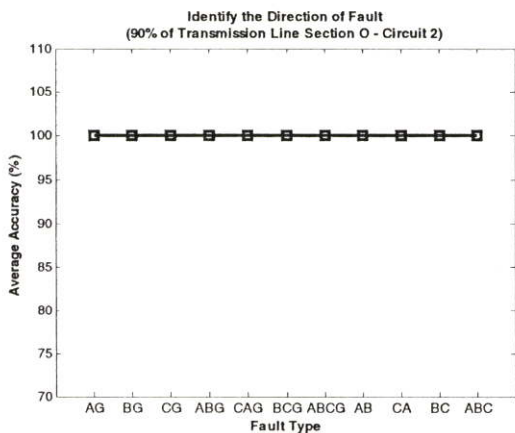
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.35 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.35 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.35 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.35 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยตามลำดับ

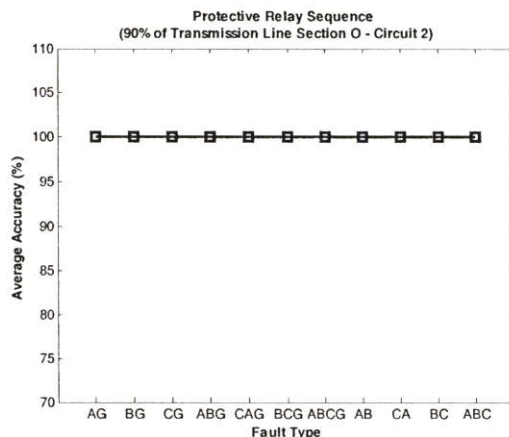
6.5.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (55.8 กิโลเมตร)



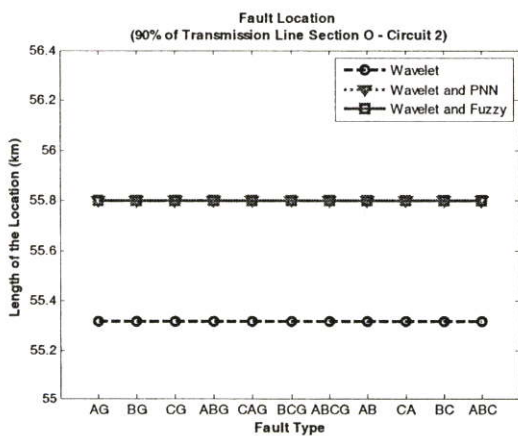
(a) การตรวจจับฟอลต์



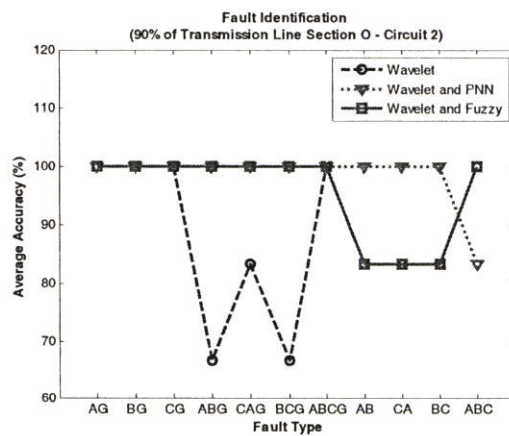
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.36 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 55.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน O วงจรที่ 2 (WN20-SNO20)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.36 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.36 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.36 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.36 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 55.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.36 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 55.3167 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.4833 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.36 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 55.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.36 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 55.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.36 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 55.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

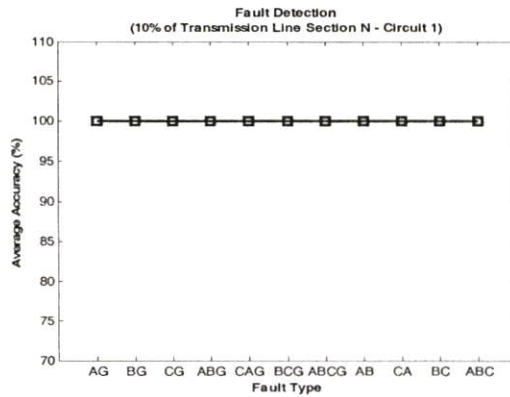
### การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.36 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 87.87% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% , ระบุประเภทพอลต์ชนิด CAG, AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.36 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.36 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG และ ABCG มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AB, CA และ BC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

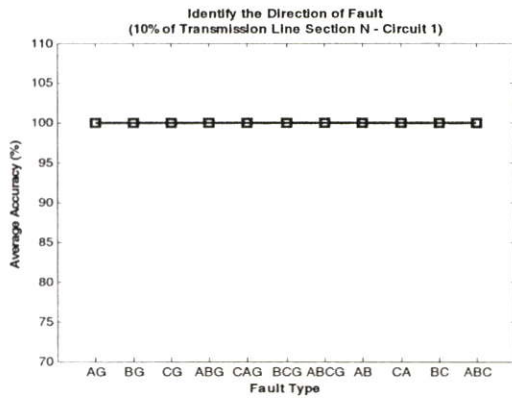
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.36 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 98.48%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

## 6.6 ผลการทดลองของสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 ความยาวสายส่ง 104 กิโลเมตร

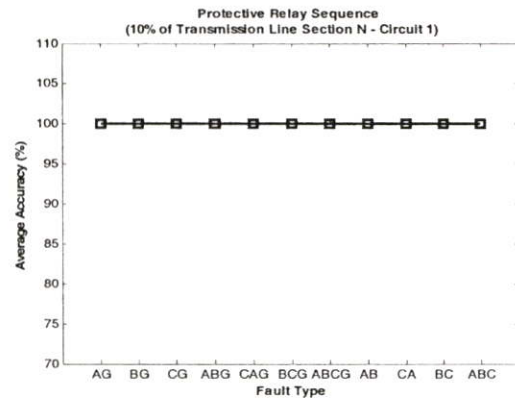
### 6.6.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (10.4 กิโลเมตร)



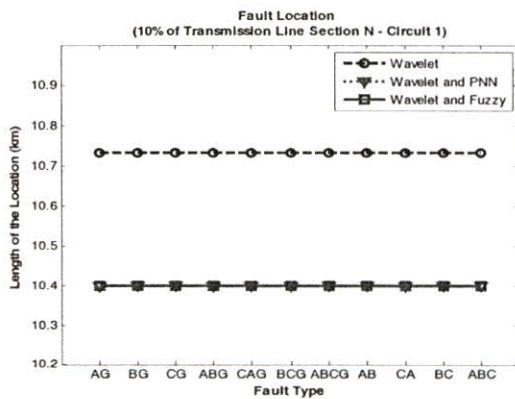
(a) การตรวจจับฟอลต์



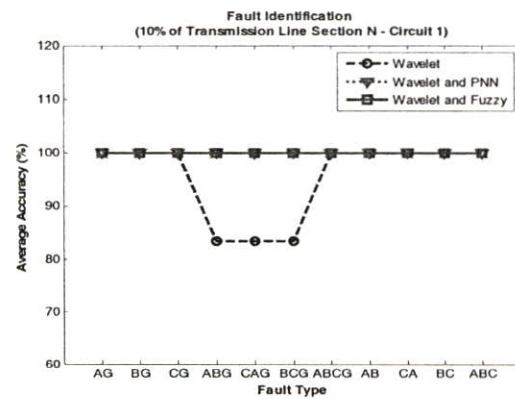
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.37 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.37 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.37 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.37 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.37 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 10.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.37 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 10.7337 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.3337 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.37 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 10.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.37 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 10.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

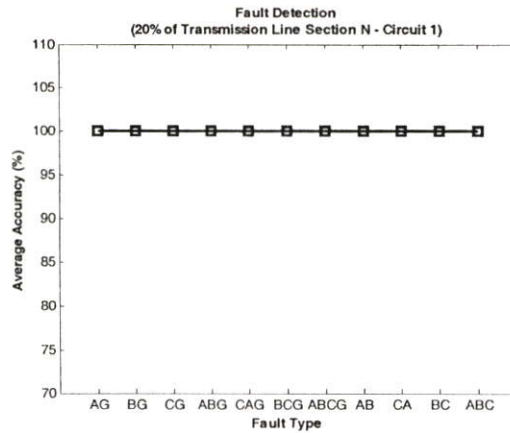
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.37 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 10.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

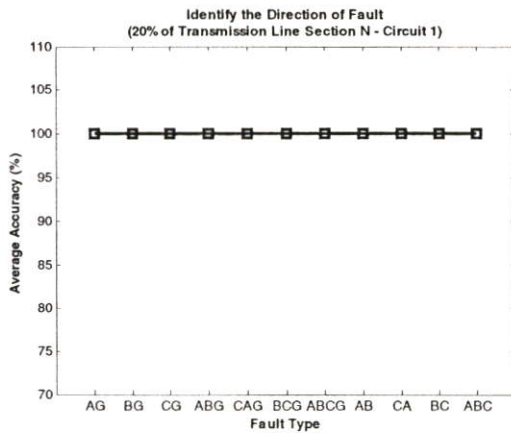
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.37 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.37 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.37 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.37 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

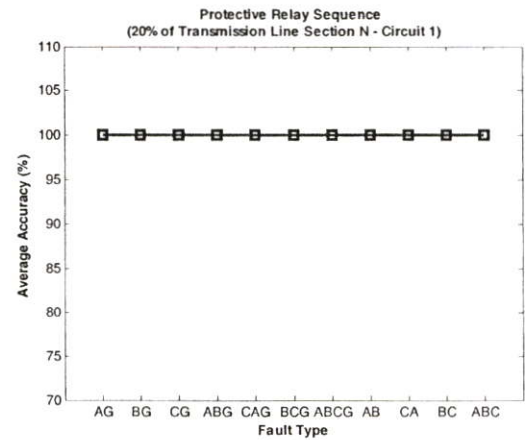
6.6.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (20.8 กิโลเมตร)



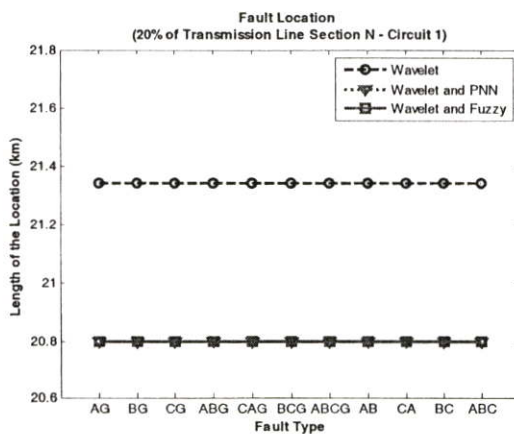
(a) การตรวจจับฟอลต์



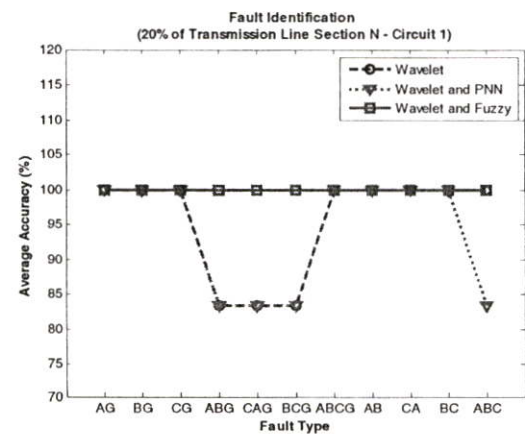
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.38 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.38 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.38 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.38 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.38 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 20.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.38 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 21.3450 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.5450 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.38 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 20.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.38 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 20.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

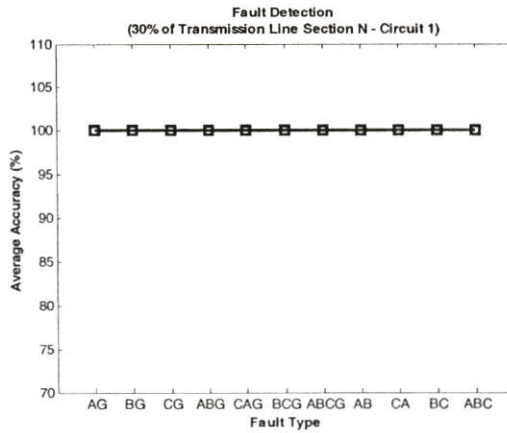
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.38 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 20.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

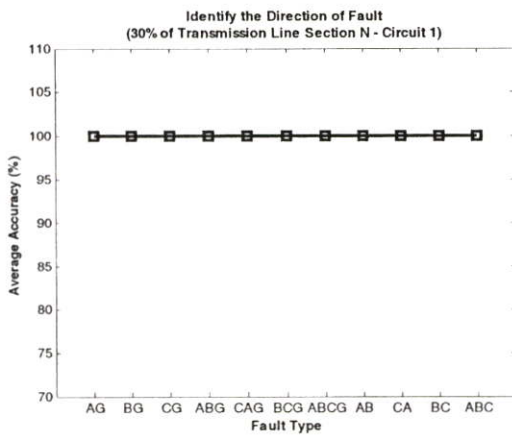
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.38 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.38 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 93.93% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG, BCG และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.38 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.38 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ตามลำดับ

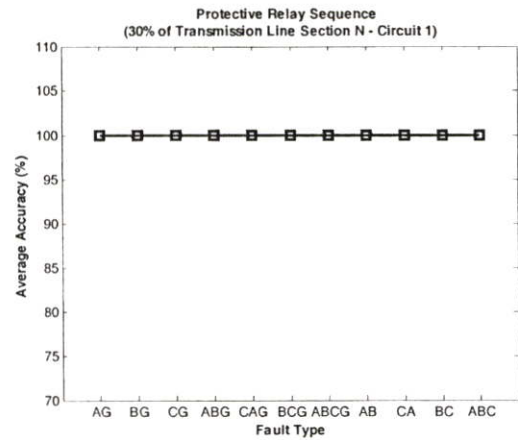
6.6.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (31.2 กิโลเมตร)



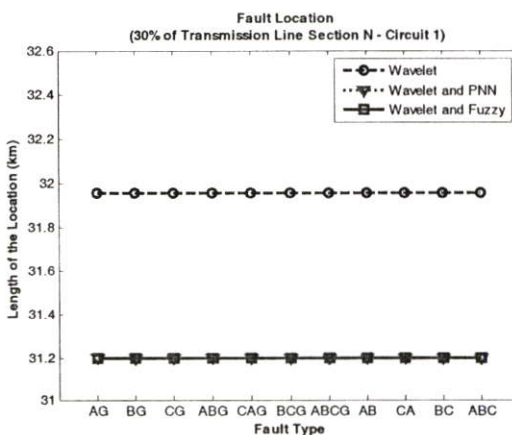
(a) การตรวจจับฟอลต์



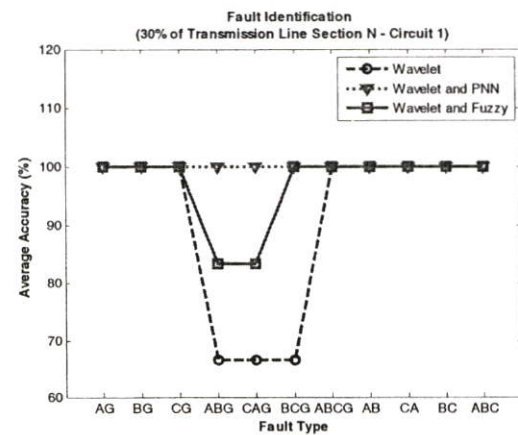
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.39 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 31.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNOIN-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.39 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.39 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.39 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.39 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 31.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.39 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 31.9563 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.7563 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.39 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 31.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.39 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

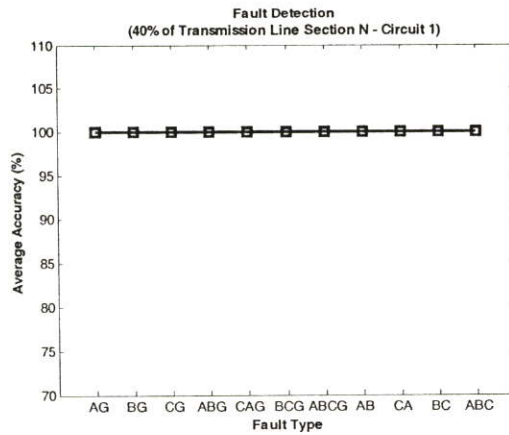
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.39 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 31.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

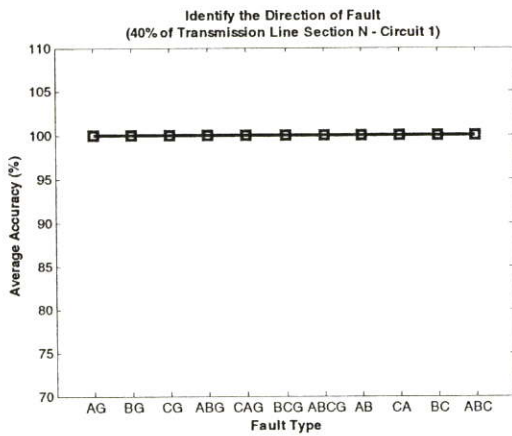
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.39 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.39 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.39 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.39 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

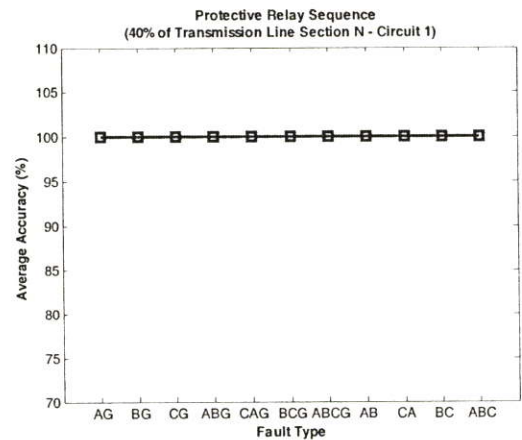
6.6.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (41.6 กิโลเมตร)



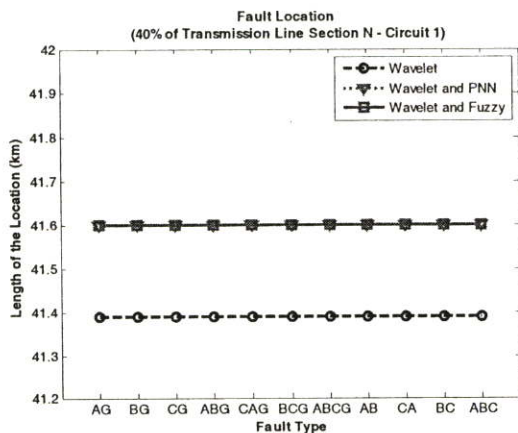
(a) การตรวจจับฟอลต์



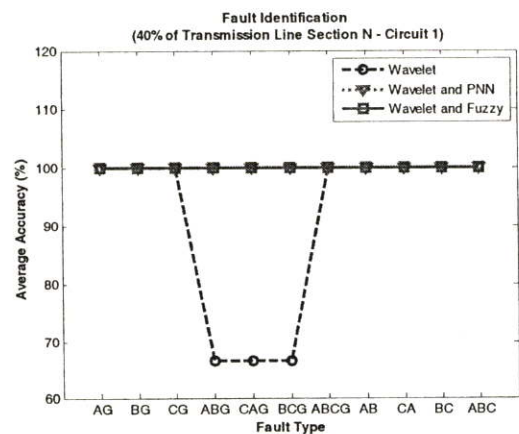
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.40 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 41.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.40 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.40 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.40 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.40 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 41.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.40 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 41.3887 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.2113 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.40 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 41.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.40 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 41.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

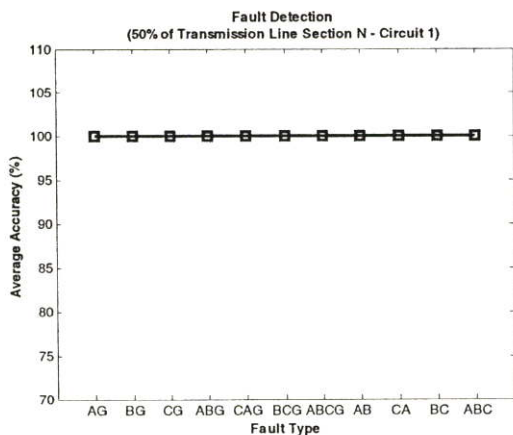
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.40 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 41.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

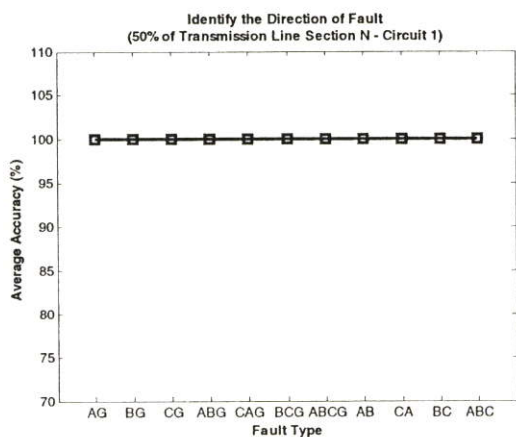
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.40 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.40 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.40 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.40 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

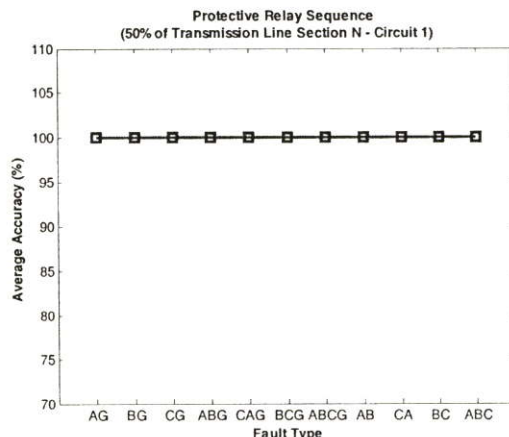
6.6.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (52 กิโลเมตร)



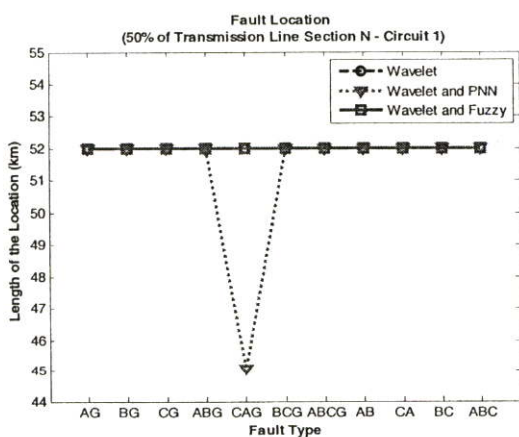
(a) การตรวจจับฟอลต์



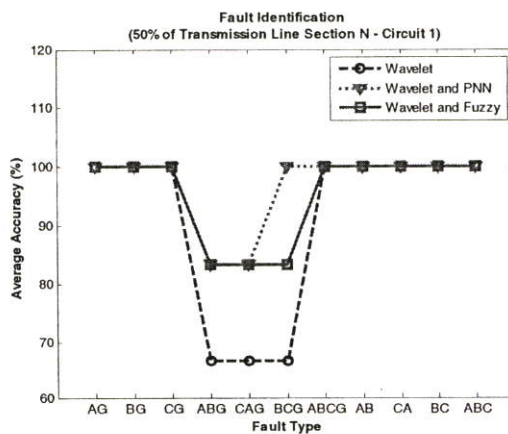
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.41 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 52 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.41 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.41 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.41 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.41 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 52 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.41 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 52 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.41 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 51.3697 กิโลเมตร, ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 45.0667 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 6.9333 กิโลเมตร) และระยะทางเฉลี่ยสูงสุดที่คำนวณได้คือ 52 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.41 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 52 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.41 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จะให้

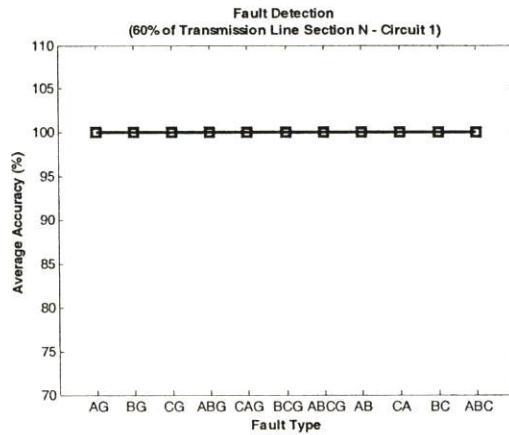
ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 52 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

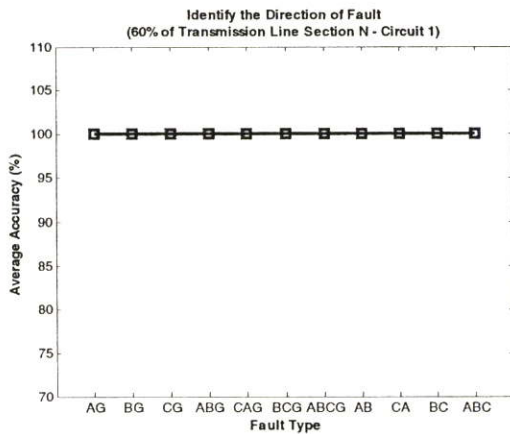
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.41 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.41 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.41 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.41 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

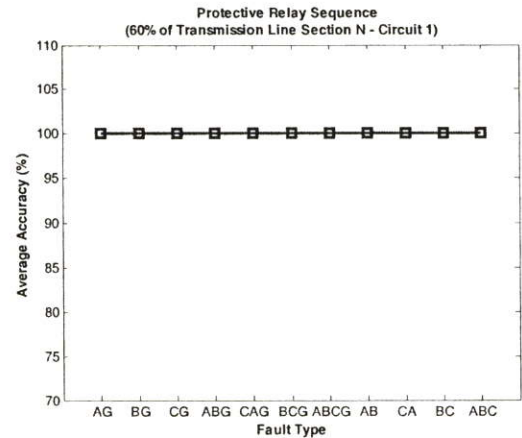
6.6.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (62.4 กิโลเมตร)



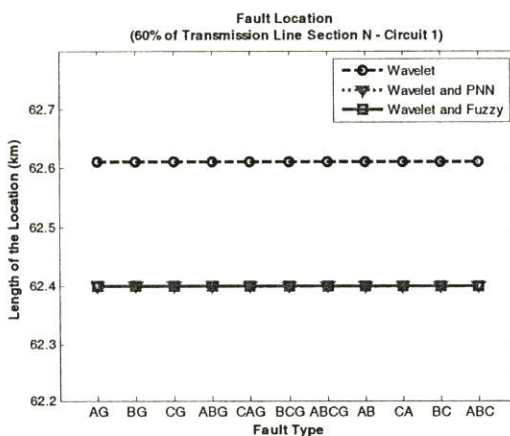
(a) การตรวจจับฟอลต์



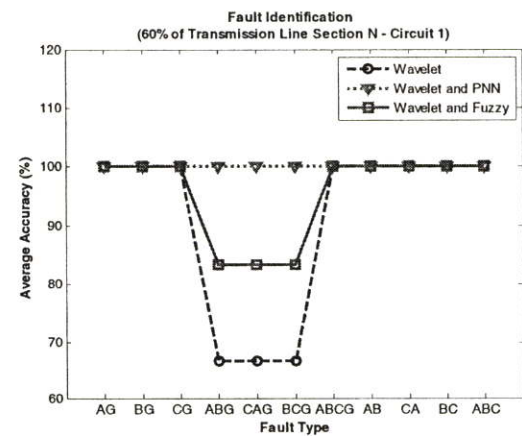
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.42 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 62.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.42 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.42 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.42 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.42 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 62.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.42 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 62.6113 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.2113 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.42 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 62.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.42 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 62.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

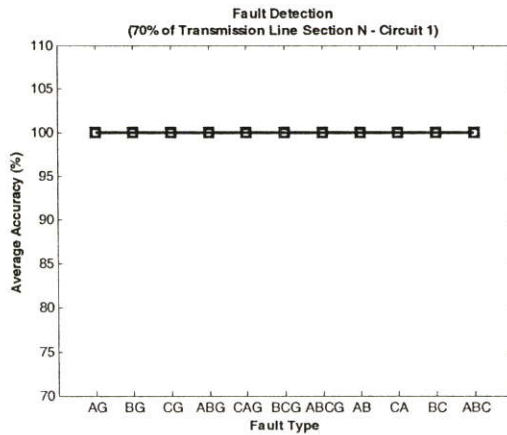
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.42 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 62.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

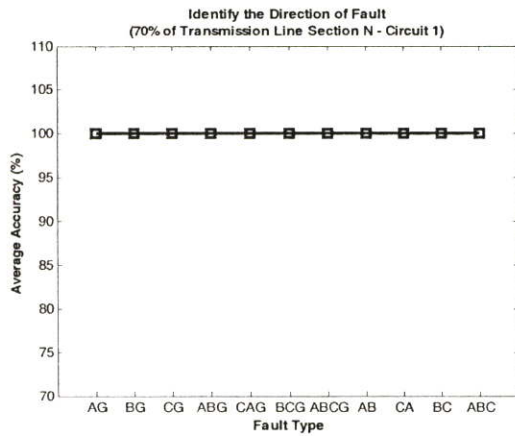
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.42 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.42 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.42 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.42 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

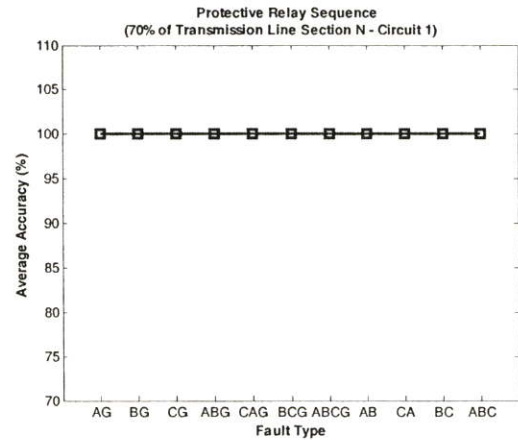
6.6.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (72.8 กิโลเมตร)



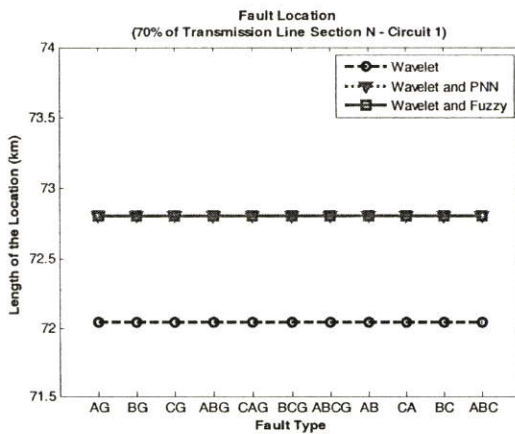
(a) การตรวจจับฟอลต์



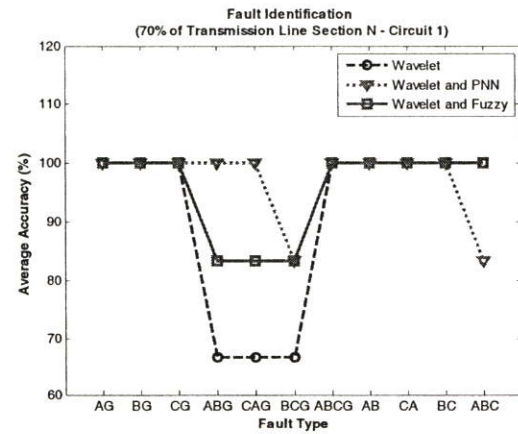
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.43 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 72.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.43 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.43 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.43 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.43 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 72.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.43 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 72.0437 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.7563 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.43 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 72.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.43 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 72.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

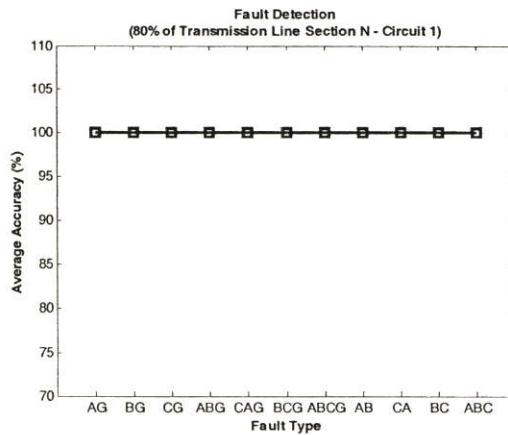
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.43 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 72.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

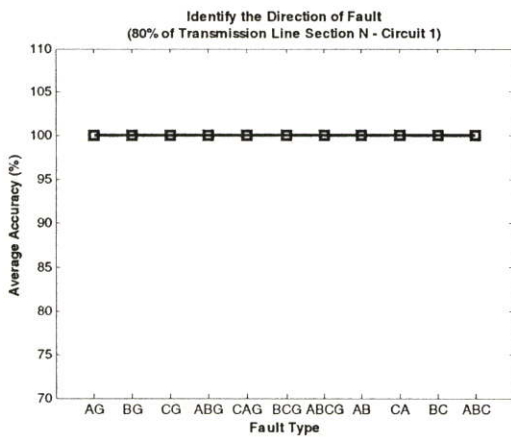
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.43 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.43 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด BCG, และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.43 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.43 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

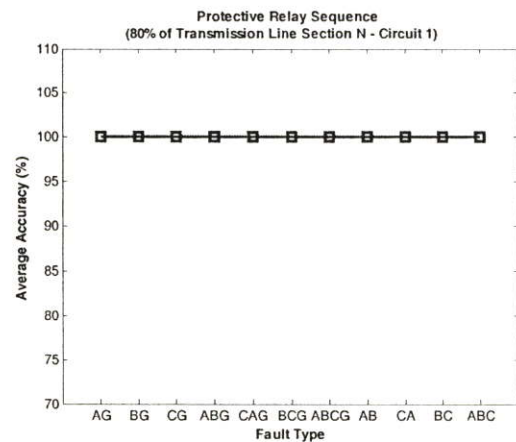
6.6.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (83.2 กิโลเมตร)



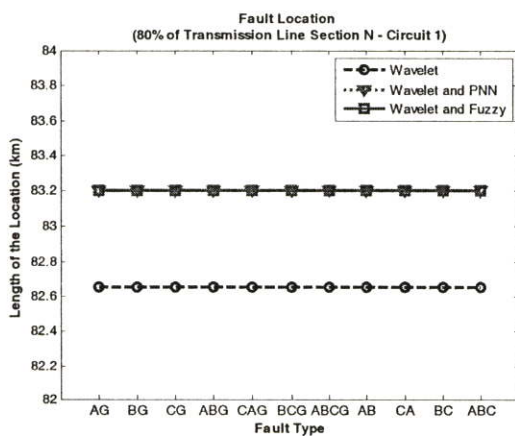
(a) การตรวจจับฟอลต์



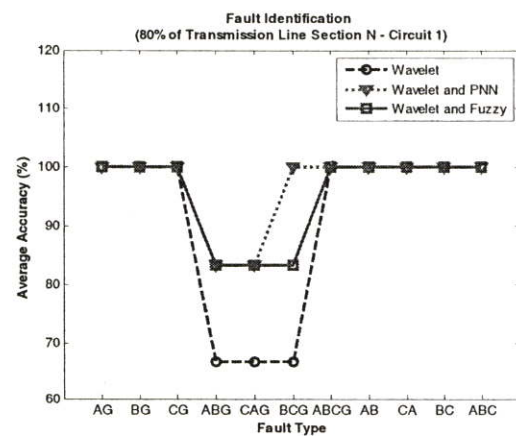
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.44 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 83.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNOIN-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.44 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.44 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.44 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.44 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 83.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.44 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 82.6550 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.5450 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.44 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 83.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.44 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 83.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

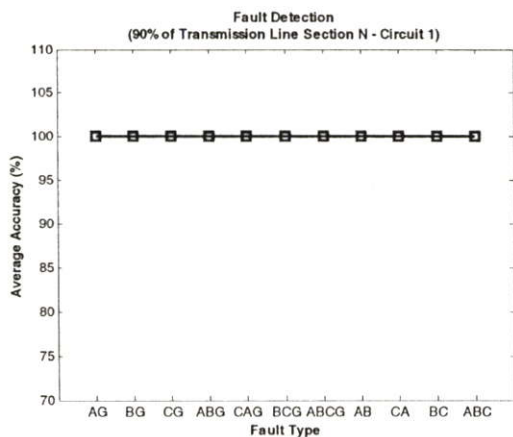
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.44 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 83.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

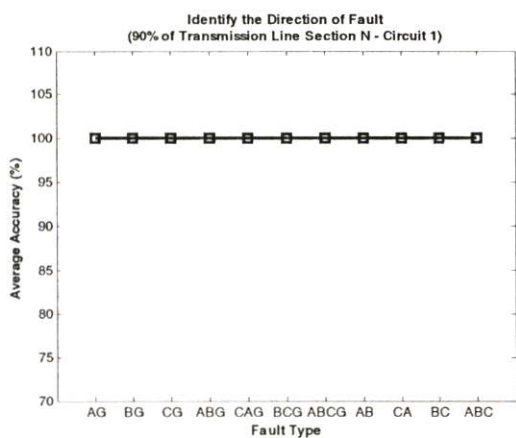
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.44 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.44 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.44 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.44 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

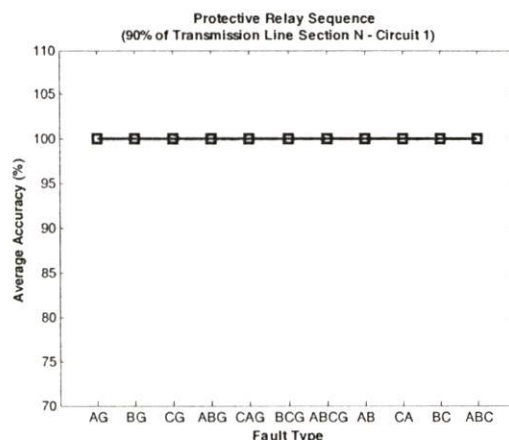
6.6.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (93.6 กิโลเมตร)



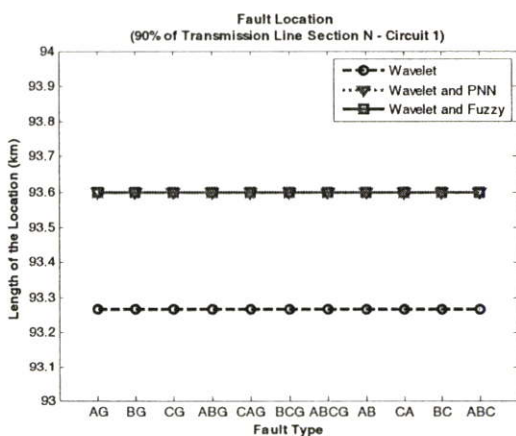
(a) การตรวจจับฟอลต์



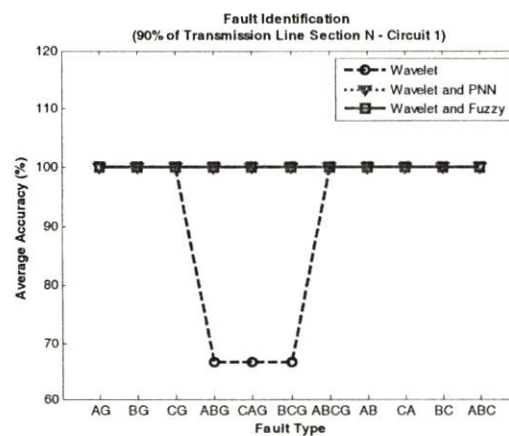
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.45 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 93.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 1 (SNO1N-CBG1N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.45 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.45 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.45 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.45 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 93.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.45 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 93.2663 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.3337 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.45 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 93.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.45 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 93.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.45 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 93.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

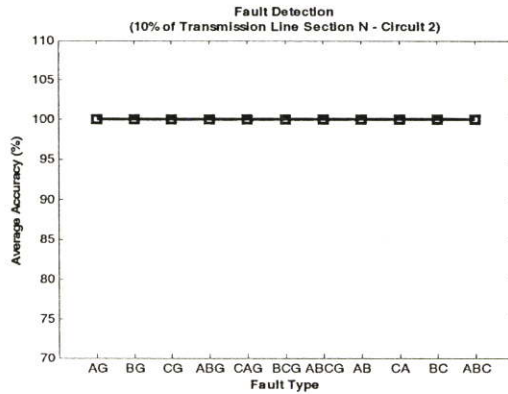
### การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.45 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.45 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.45 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

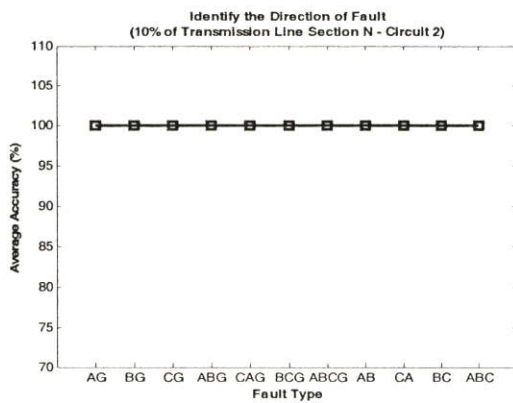
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.45 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

## 6.7 ผลการทดลองของสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 ความยาวสายส่ง 104 กิโลเมตร

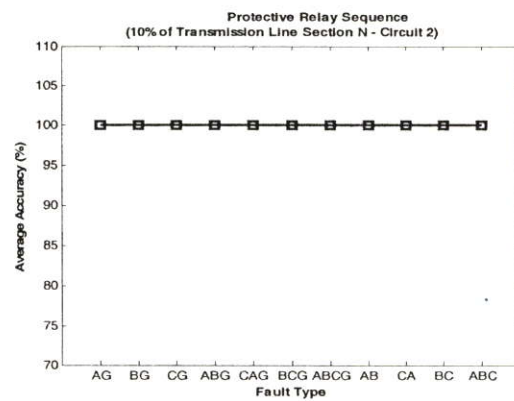
### 6.7.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10% ของความยาวสายส่ง (10.4 กิโลเมตร)



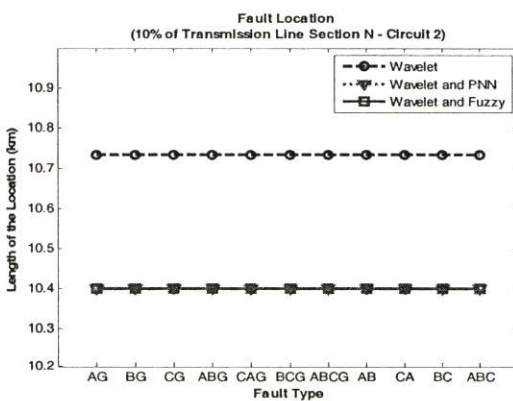
(a) การตรวจจับฟอลต์



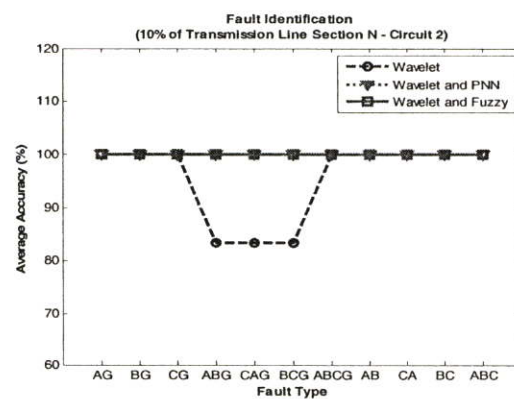
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.46 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 10.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.46 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.46 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.46 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.46 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 10.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.46 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 10.7337 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.3337 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.46 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 10.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.46 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 10.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

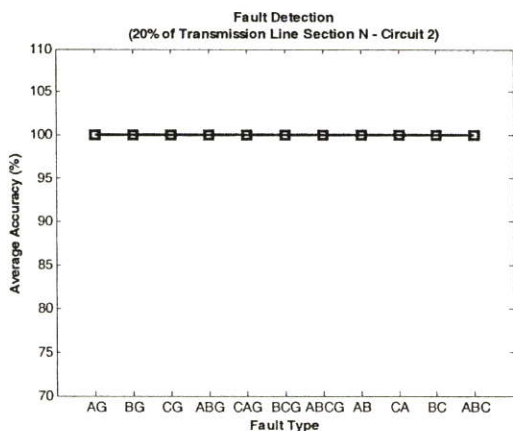
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.46 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 10.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

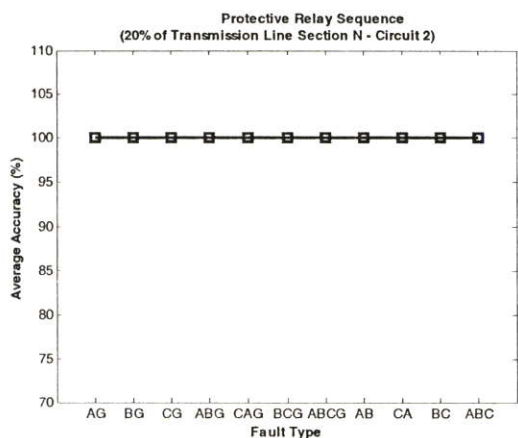
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.46 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.46 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.46 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.46 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

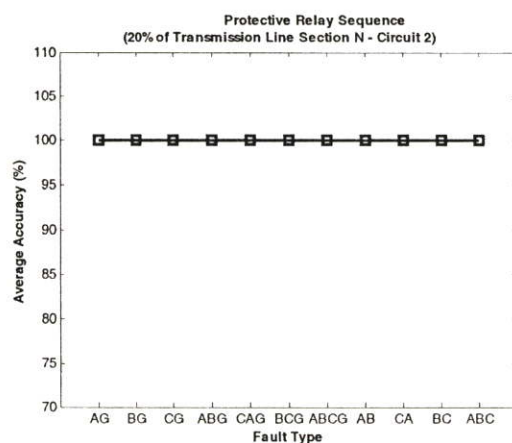
6.7.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20% ของความยาวสายส่ง (20.8 กิโลเมตร)



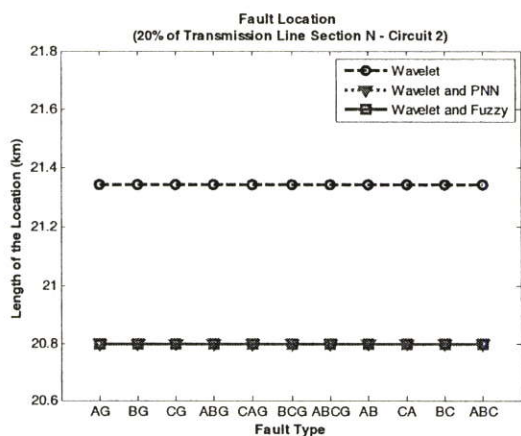
(a) การตรวจจับฟอลต์



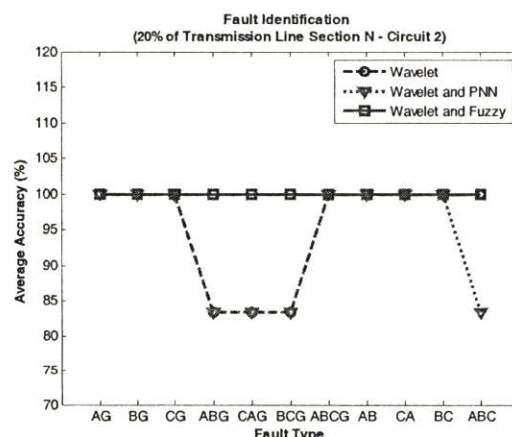
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.47 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 20.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.47 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.47 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.47 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.47 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 20.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.47 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 21.3450 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.5450 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.47 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 20.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.47 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 20.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

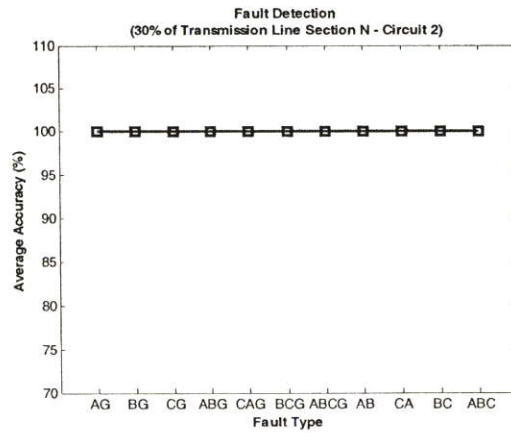
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.47 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 20.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

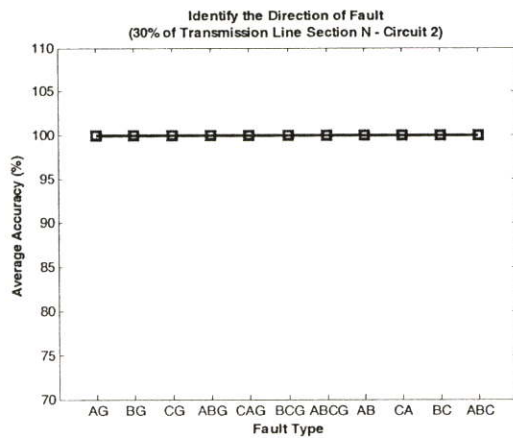
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.47 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.47 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 93.93% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG, BCG และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.47 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.47 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชซีโลจิก จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น ตามลำดับ

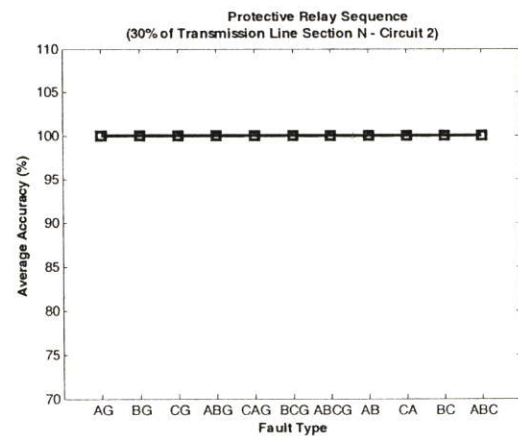
### 6.7.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 30% ของความยาวสายส่ง (31.2 กิโลเมตร)



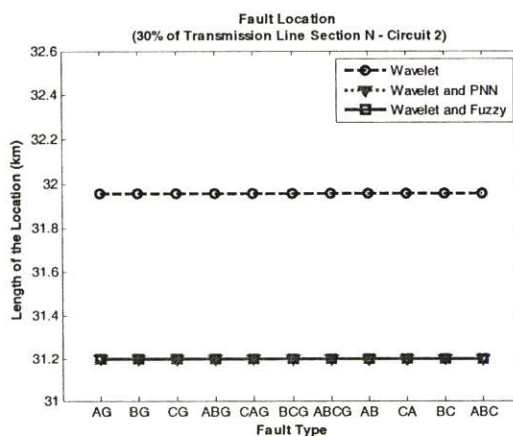
(a) การตรวจจับฟอลต์



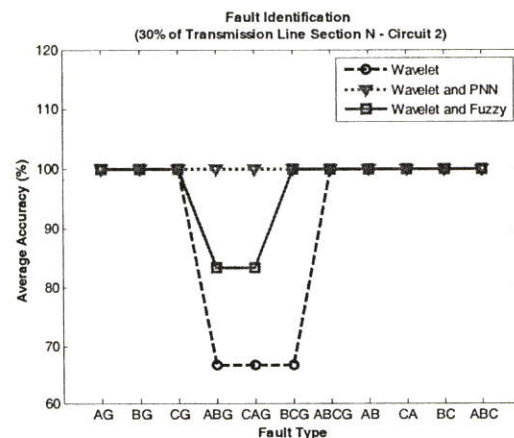
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.48 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 31.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.48 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.48 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.48 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.48 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 31.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.48 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 31.9563 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.7563 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.48 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 31.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.48 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 31.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

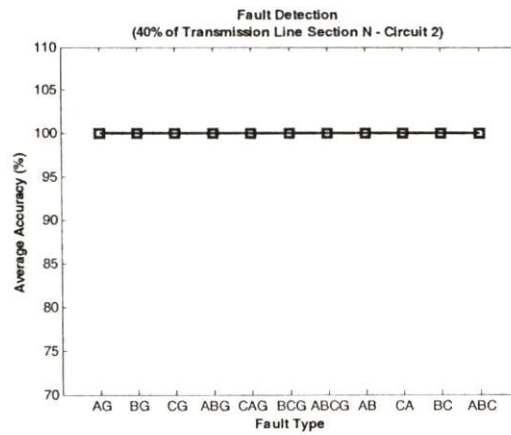
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.48 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 31.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

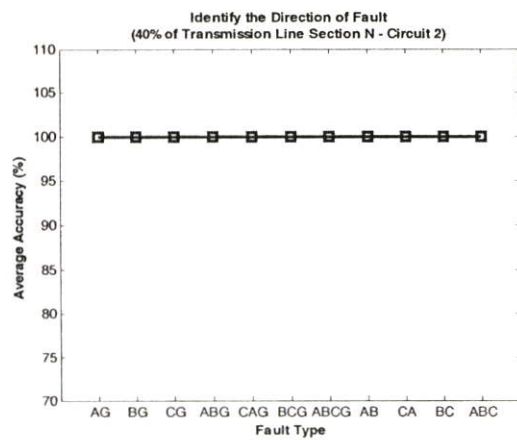
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.48 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.48 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.48 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.48 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

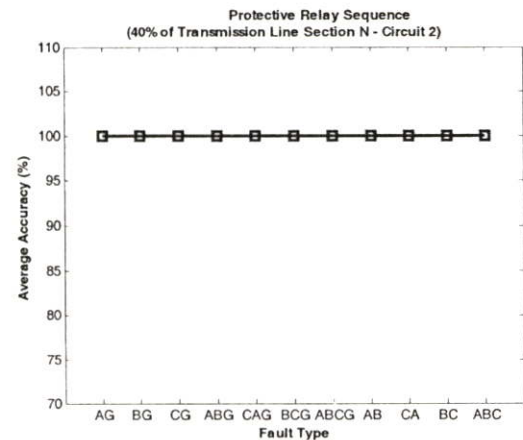
6.7.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% ของความยาวสายส่ง (41.6 กิโลเมตร)



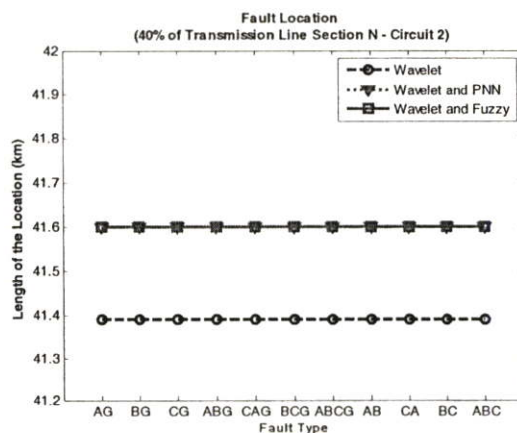
(a) การตรวจจับฟอลต์



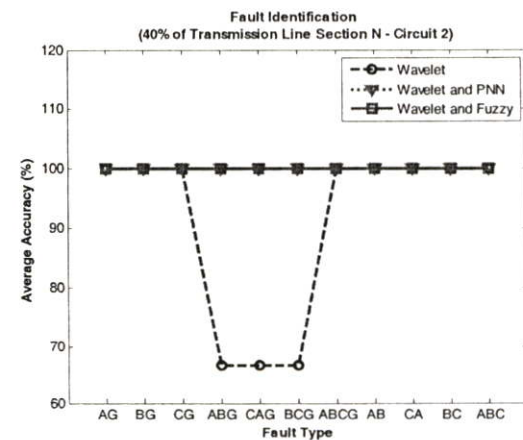
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.49 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 41.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.49 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.49 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.49 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.49 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 41.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.49 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 41.3887 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.2113 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.49 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 41.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.49 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 41.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

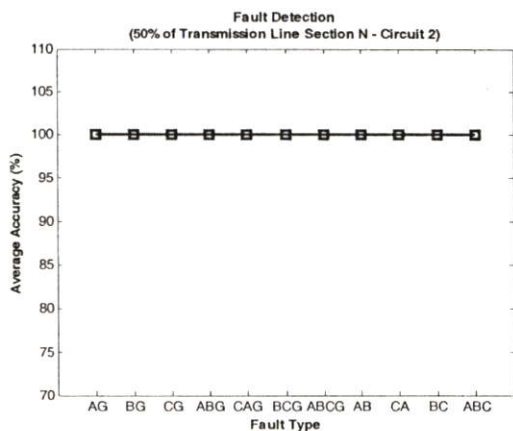
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.49 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 41.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

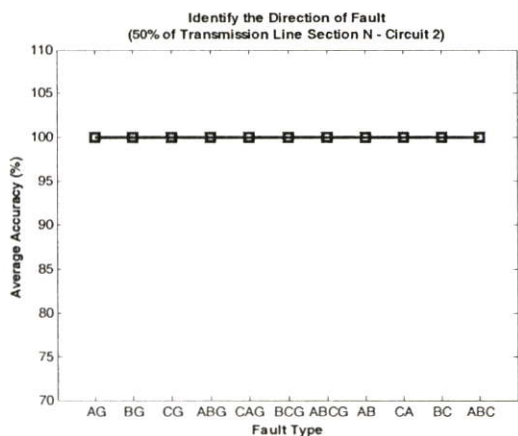
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.49 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.49 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.49 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.49 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

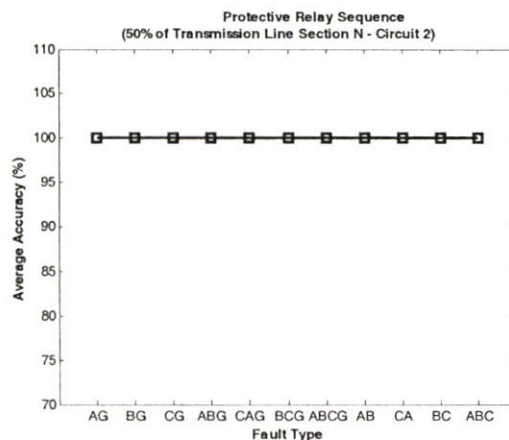
6.7.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 50% ของความยาวสายส่ง (52 กิโลเมตร)



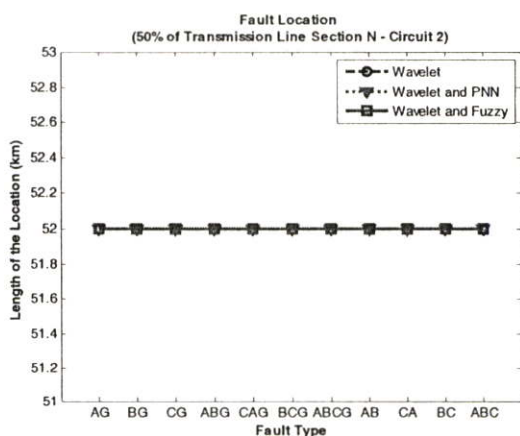
(a) การตรวจจับฟอลต์



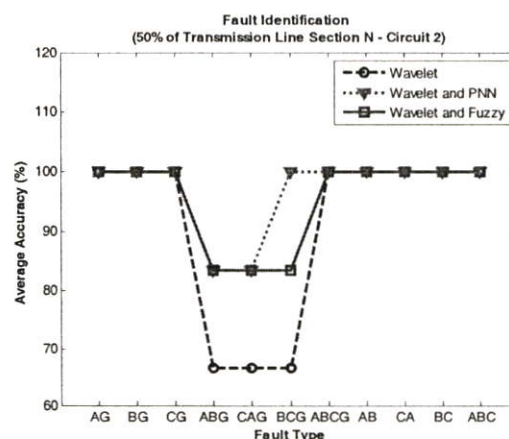
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.50 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 52 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.50 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.50 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.50 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.50 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 52 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.50 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 52 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.50 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 52 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy โลกิ สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.50 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 52 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

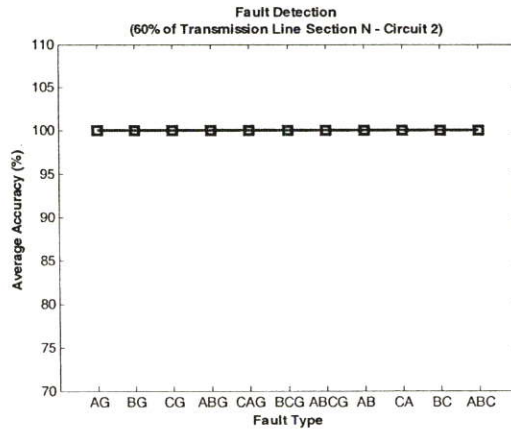
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.50 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟuzzy โลกิ, การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 52 กิโลเมตร)

### การระบุประเภทของฟอลต์

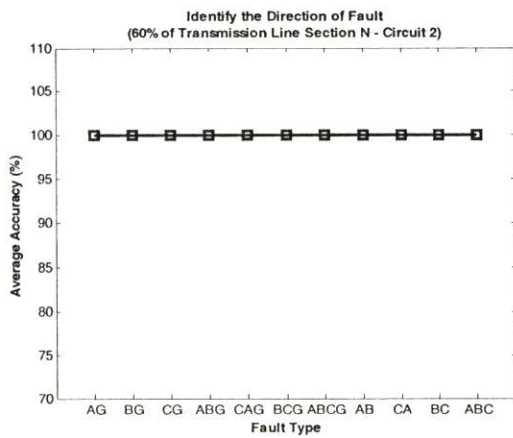
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.50 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.50 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.50 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.50 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

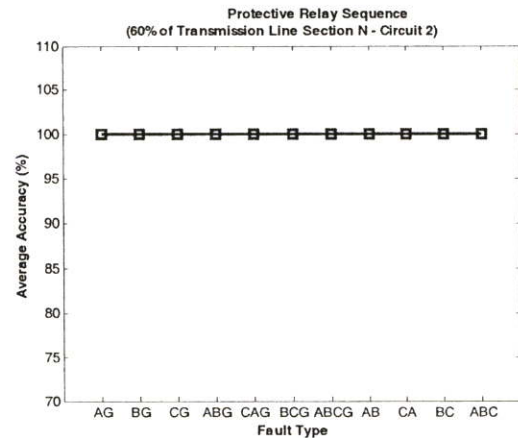
6.7.6 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 60% ของความยาวสายส่ง (62.4 กิโลเมตร)



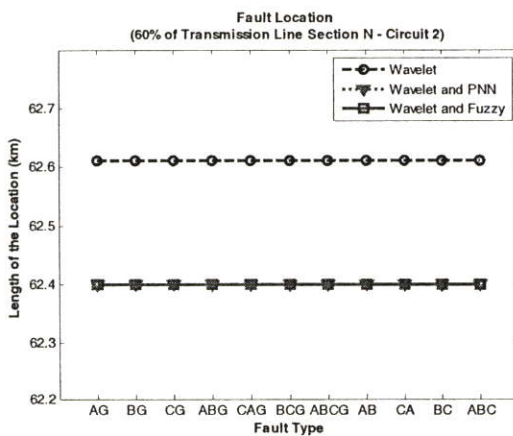
(a) การตรวจจับฟอลต์



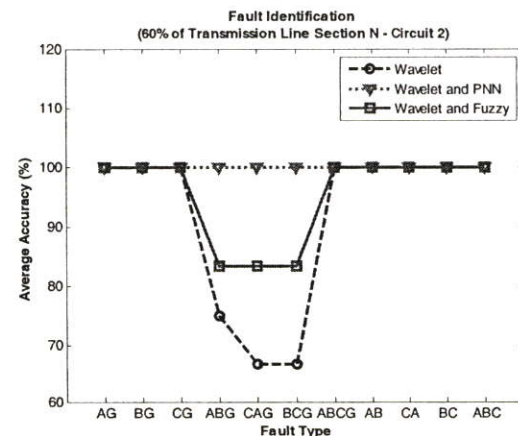
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.51 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 62.4 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.51 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.51 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.51 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.51 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 62.4 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.51 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 62.6113 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.2113 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.51 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 62.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาค่าตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.51 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 62.4 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

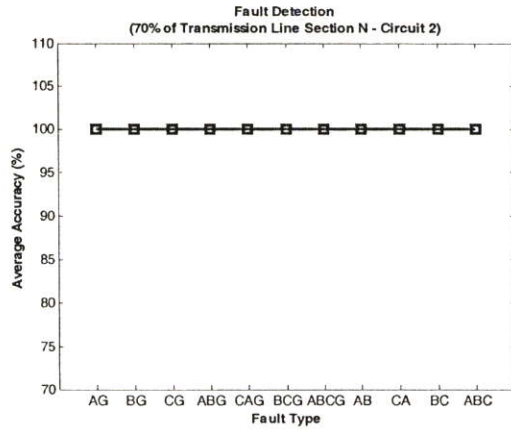
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.51 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 62.4 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

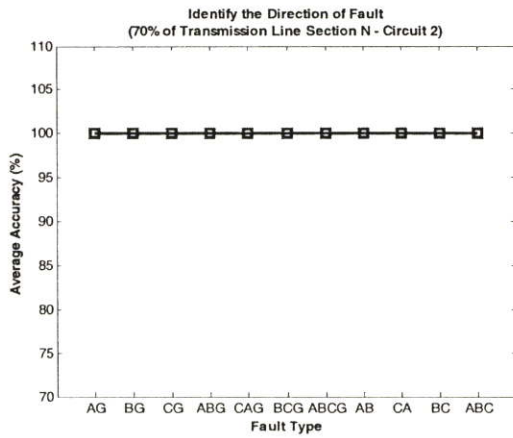
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.51 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 91.66% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%, ระบุประเภทพอลต์ชนิด ABG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 75% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.51 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.51 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.51 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

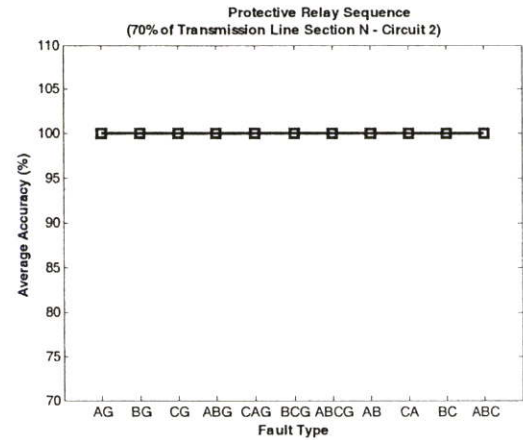
6.7.7 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 70% ของความยาวสายส่ง (72.8 กิโลเมตร)



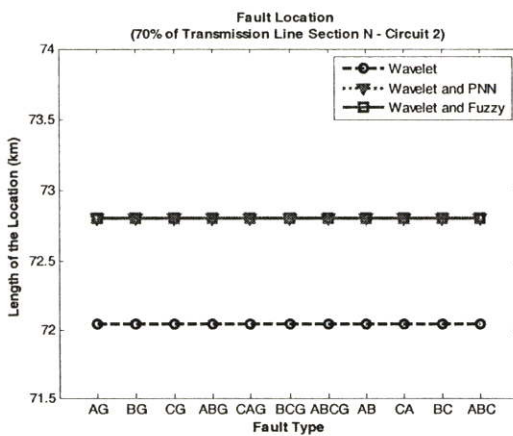
(a) การตรวจจับฟอลต์



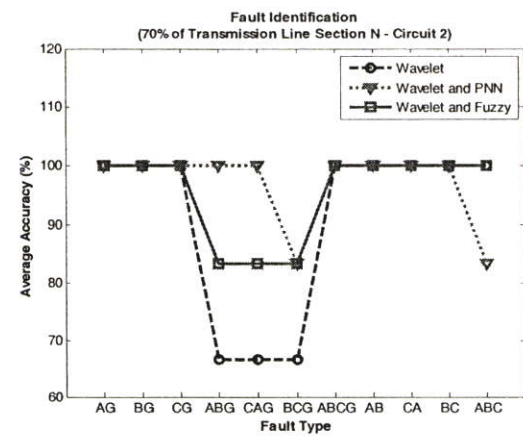
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.52 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 72.8 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.52 สามารถวิเคราะห์ผล ได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.52 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.52 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.52 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 72.8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมด โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.52 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 72.0437 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.7563 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.52 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 72.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.52 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 72.8 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

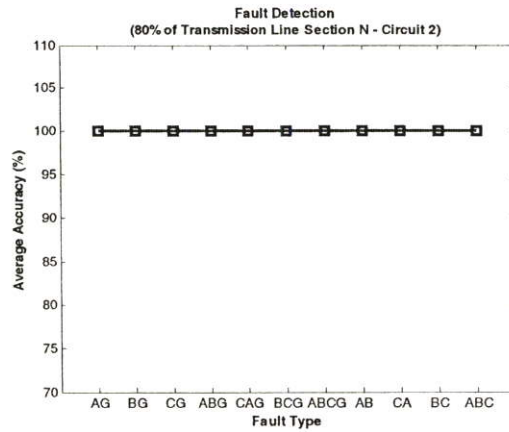
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.52 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 72.8 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของพอลต์

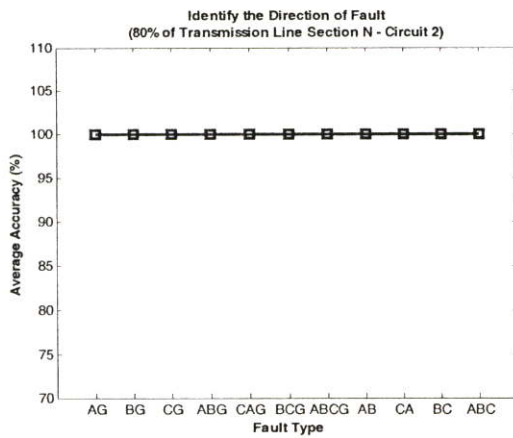
1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.52 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.52 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, ABCG, AB, CA และ BC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด BCG, และ ABC สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของพอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.52 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของพอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของพอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของพอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของพอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.52 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

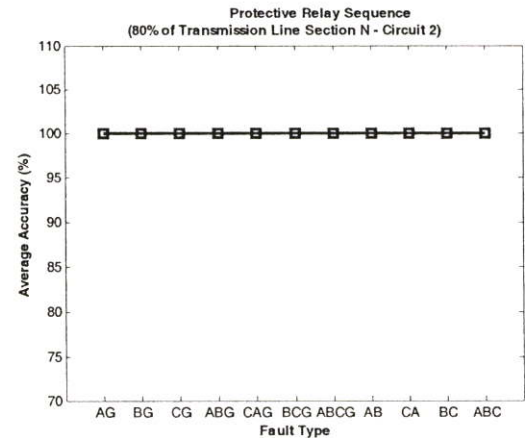
6.7.8 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 80% ของความยาวสายส่ง (83.2 กิโลเมตร)



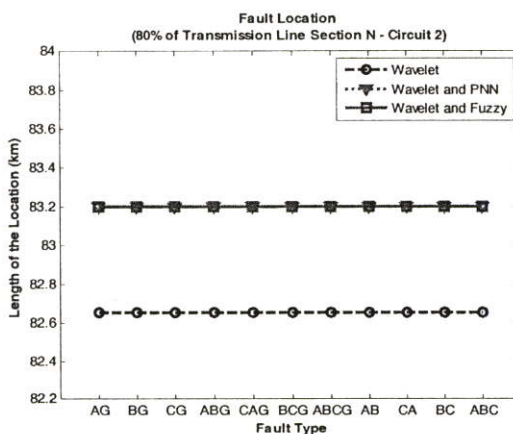
(a) การตรวจจับฟอลต์



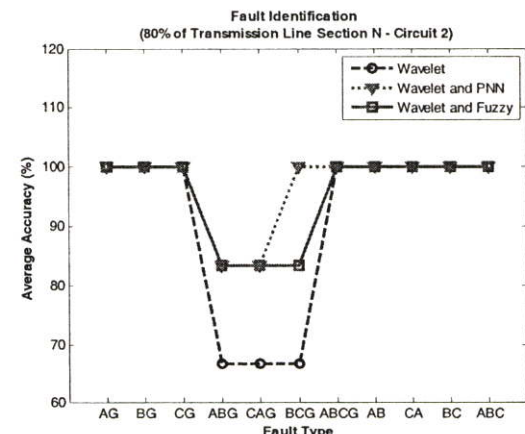
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.53 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 83.2 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.53 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.53 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.53 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.53 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 83.2 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.53 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 82.6550 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.5450 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.53 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 83.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.53 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 83.2 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

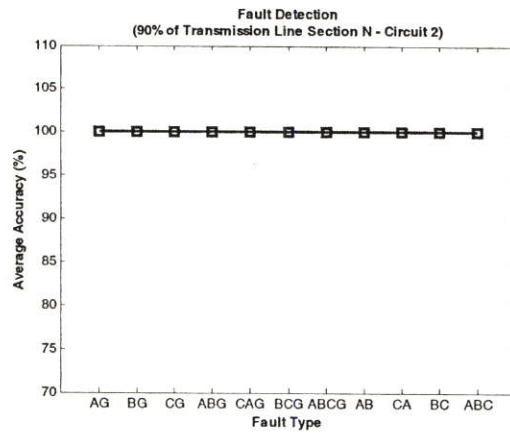
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.53 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 83.2 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

### การระบุประเภทของฟอลต์

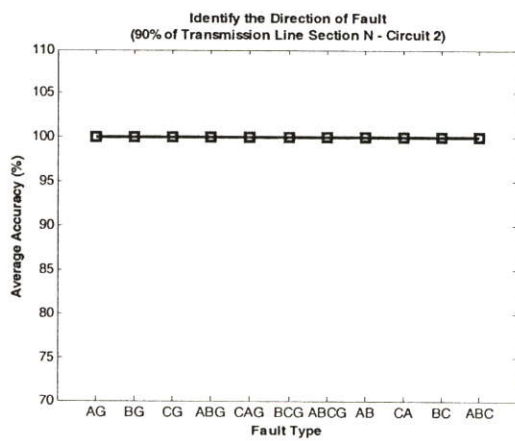
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.53 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.53 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, และ CAG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.53 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 95.45% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 83.33%

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.53 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 96.96%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

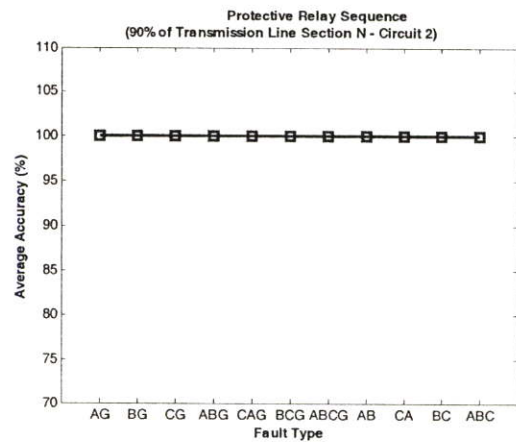
6.7.9 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 90% ของความยาวสายส่ง (93.6 กิโลเมตร)



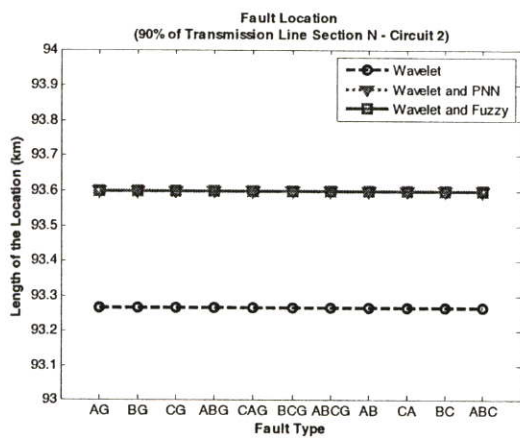
(a) การตรวจจับฟอลต์



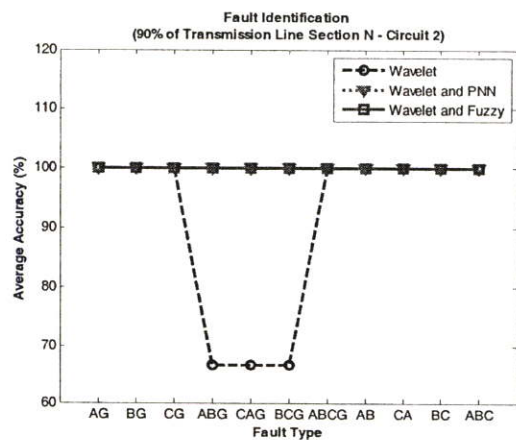
(b) การระบุทิศทางของฟอลต์



(c) การจัดลำดับการป้องกัน



(d) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(e) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 6.54 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 93.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน N วงจรที่ 2 (SNO2N-CBG2N)

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6.54 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 6.54 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุทิศทางของฟอลต์

สามารถระบุทิศทางได้ จากการนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในสเกลแรก มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน และจากรูปที่ 6.54 (b) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การจัดลำดับการป้องกัน

สามารถจัดลำดับการป้องกันจากอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.54 (c) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

### การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 93.6 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.54 (d) จะเห็นได้ว่า ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 93.2663 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.3337 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.54 (d) จะเห็นได้ว่าระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้ทั้งหมด คือ 93.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 6.54 (d) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 93.6 กิโลเมตร (ไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.54 (d) พบว่าผลการระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะทางจริงมากที่สุด (โดยมีระยะทางเฉลี่ยเป็น 93.6 กิโลเมตร) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

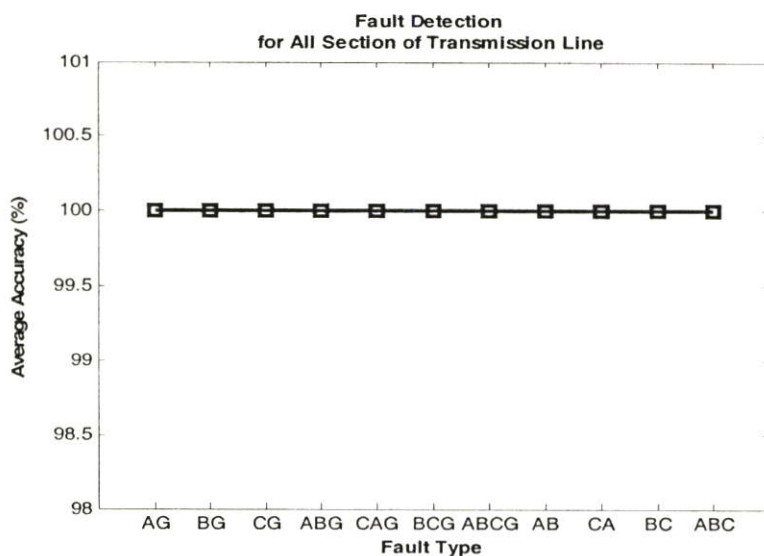
### การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย จากรูปที่ 6.54 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 90.90% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100% ในขณะที่ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด ABG, CAG และ BCG สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องเฉลี่ย 66.66%
2. การแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN) สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.54 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 6.54 (e) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์ทั้งหมดมีความถูกต้องเฉลี่ย 100% โดยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละชนิดได้ดังนี้ ระบุประเภทของฟอลต์ชนิด AG, BG, CG, ABG, CAG, BCG, ABCG, AB, CA, BC และ ABC มีความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 100%

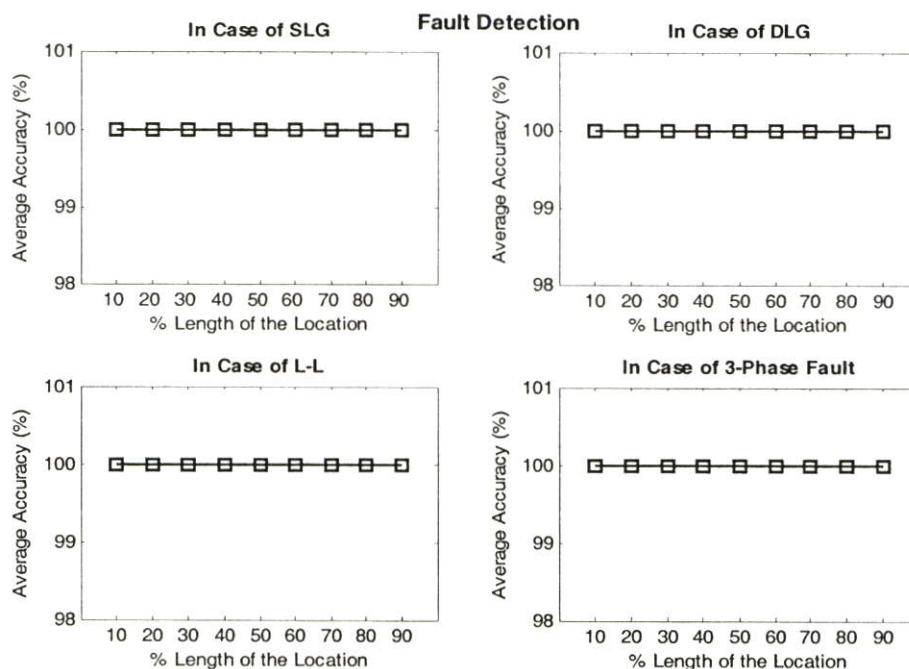
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากรูปที่ 6.54 (e) พบว่าผลการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิชชีโลจิก และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากที่สุด (มีความถูกต้องเฉลี่ย 100%) รองลงมาคือ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ

## 6.8 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 6.8.1 การตรวจจับฟอลต์



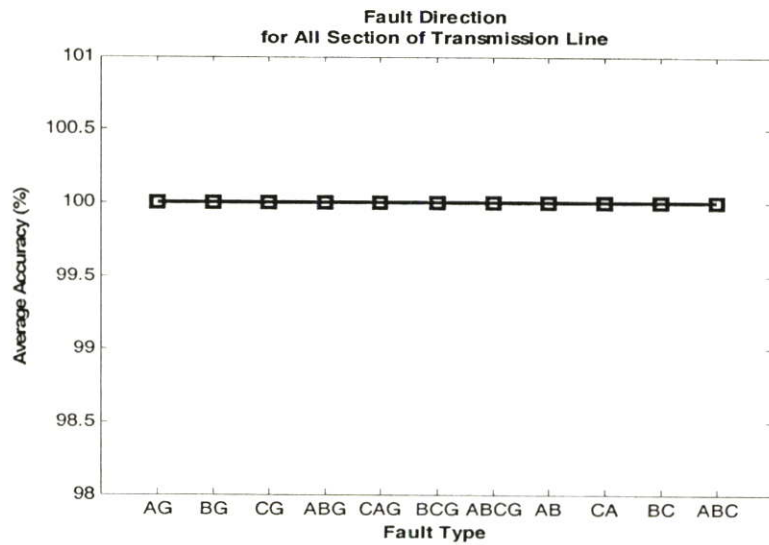
รูปที่ 6.55 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละประเภท



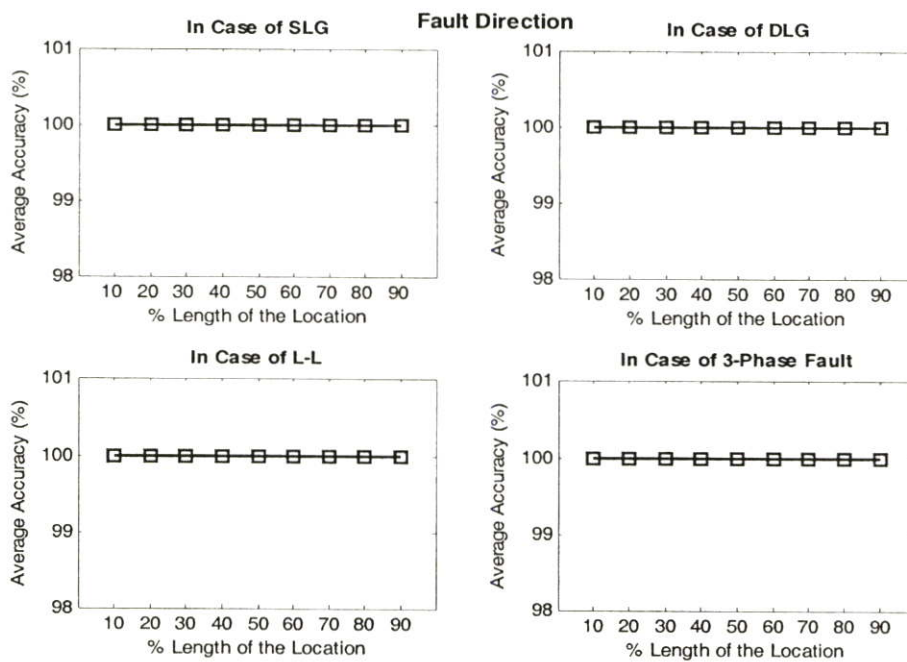
รูปที่ 6.56 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละตำแหน่ง

จากรูปที่ 6.55 และ 6.56 แสดงค่าเฉลี่ยของความถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์แต่ละประเภท และแต่ละตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบทดลอง ซึ่งพบว่าสามารถตรวจจับฟอลต์ได้ทุกประเภทและทุกตำแหน่ง โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 100%

## 6.8.2 การระบุทิศทางฟอลต์



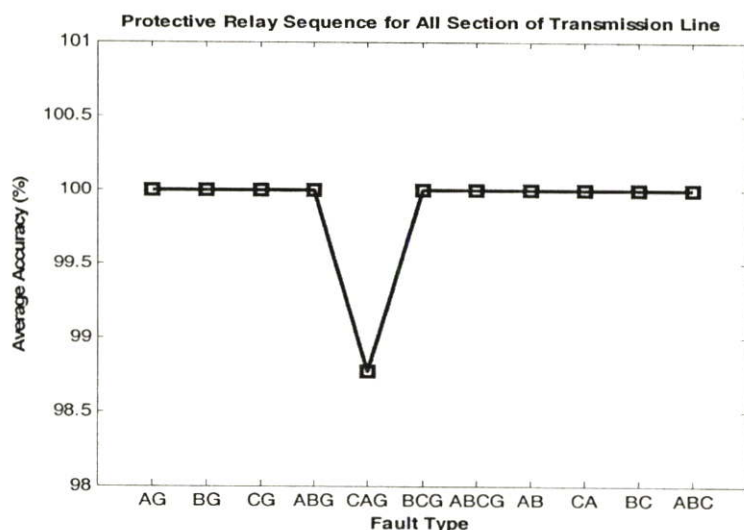
รูปที่ 6.57 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการระบุทิศทางฟอลต์ในแต่ละประเภท



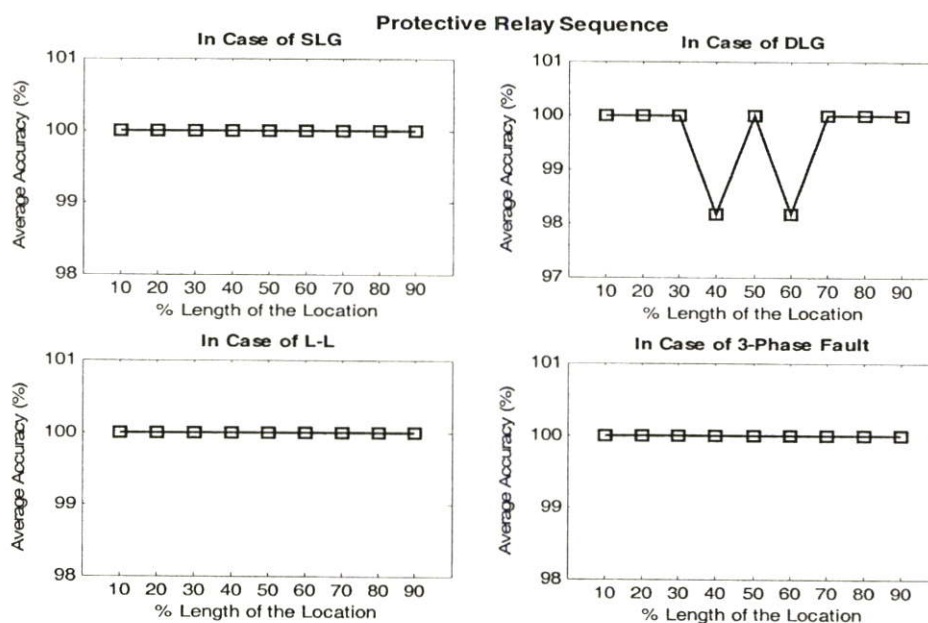
รูปที่ 6.58 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการระบุทิศทางฟอลต์ในแต่ละตำแหน่ง

จากรูปที่ 6.57 และ 6.58 แสดงค่าเฉลี่ยของความถูกต้องในการระบุทิศทางฟอลต์แต่ละประเภท และแต่ละตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบทดลอง ซึ่งพบว่าสามารถระบุทิศทางฟอลต์ได้ถูกต้องทุกประเภทและทุกตำแหน่ง โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 100%

### 6.8.3 การจัดลำดับการป้องกัน



รูปที่ 6.59 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละประเภท

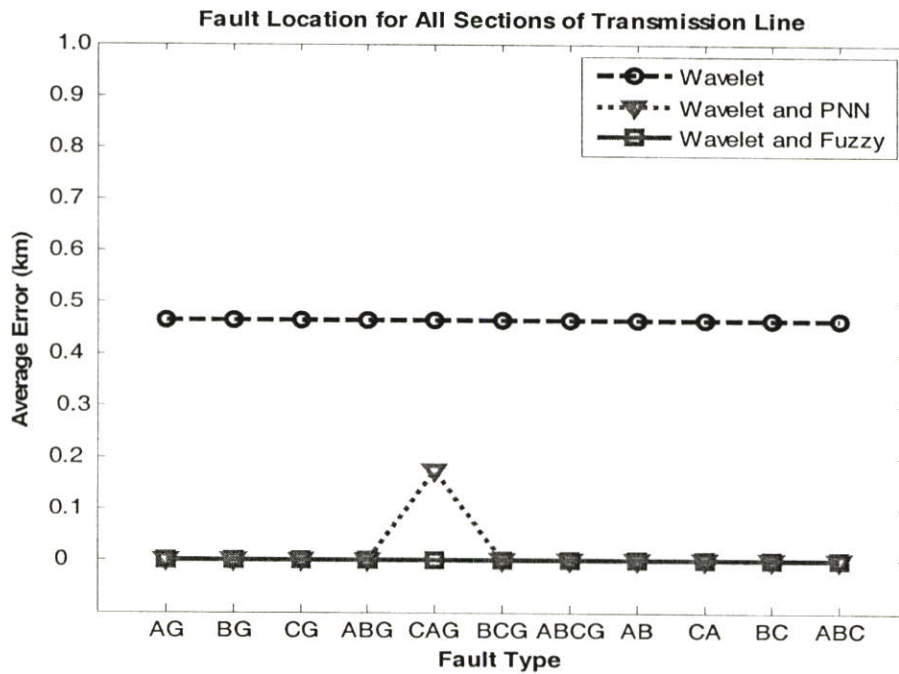


รูปที่ 6.60 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละตำแหน่ง

จากรูปที่ 6.59 และ 6.60 แสดงค่าเฉลี่ยของความถูกต้องในการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละประเภทของฟอลต์ในระบบทดลอง ซึ่งพบว่า

1. สามารถจัดลำดับการป้องกันได้อย่างถูกต้อง โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 99.88%
2. ฟอลต์ชนิดสองเฟสลงดินจะมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 98.14%
3. การจัดลำดับการป้องกันจะมีความถูกต้องลดลง กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 40% และ 60% ของความยาวสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 เท่านั้น

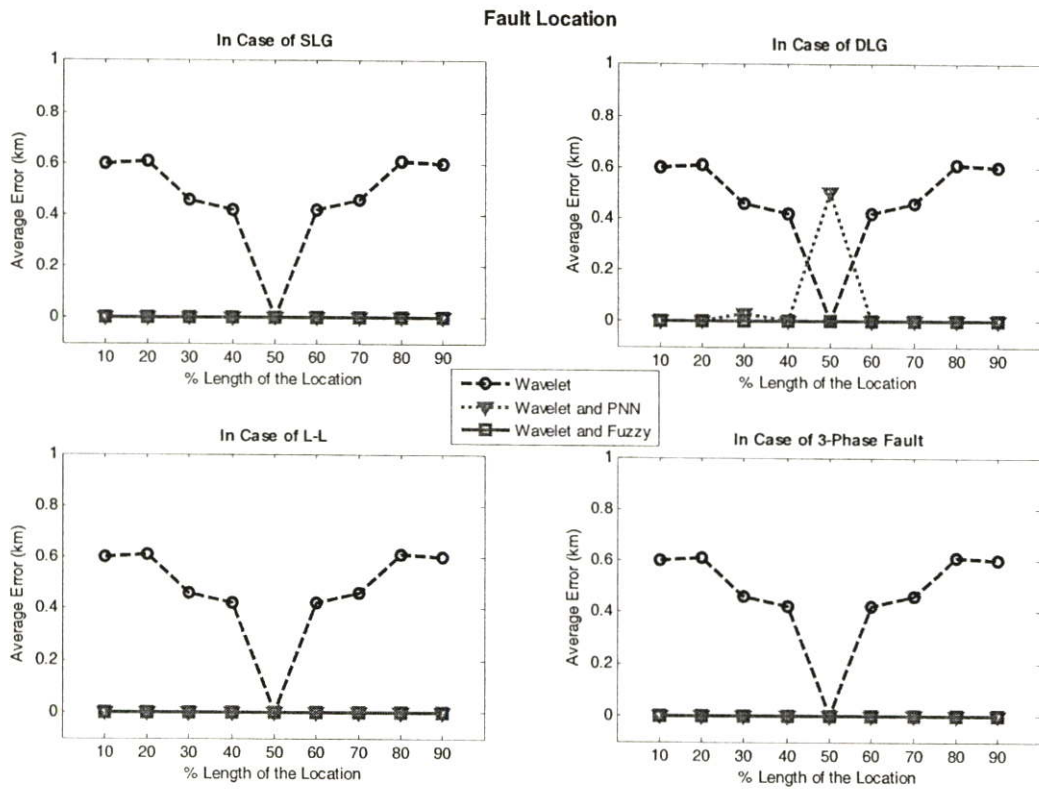
### 6.8.4 การระบุตำแหน่งฟอลต์



รูปที่ 6.61 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์แต่ละประเภทในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV

จากรูปที่ 6.61 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการหาค่าตำแหน่งฟอลต์เทียบกับประเภทของฟอลต์พบว่า

1. ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของแนวความคิดทั้งสามอยู่ในช่วง 0-0.5 กิโลเมตร
2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิกไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร
3. โดยส่วนใหญ่ผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิกจะให้ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง
4. ในกรณีของฟอลต์ชนิด CAG นั้นค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะมีค่าสูงขึ้นมาที่ 0.1762 กิโลเมตร ส่วนฟอลต์ชนิดอื่นๆที่เหลือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยังคงมีค่าเป็นศูนย์ หรือ ไม่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น



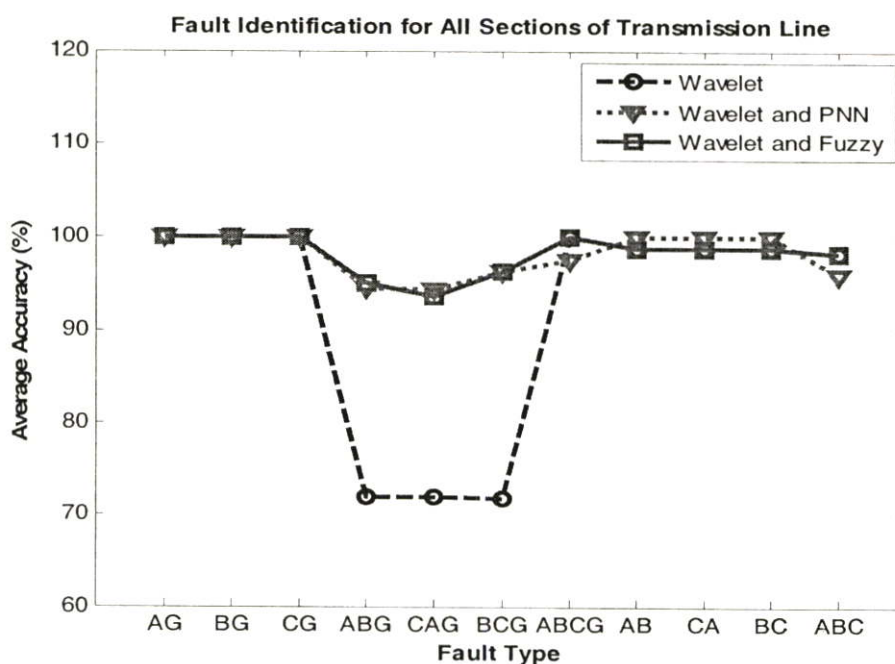
**รูปที่ 6.62** แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์แต่ละตำแหน่งในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV

จากรูปที่ 6.62 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการหาตำแหน่งฟอลต์เทียบกับระยะทางที่เกิดฟอลต์พบว่า

1. ค่าเฉลี่ยของฟอลต์ทุกประเภทจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิก, การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และค่าการแปลงเวฟเล็ตที่อาศัยทฤษฎีคลื่นเดินทางจะมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งจะอยู่ในช่วง 0-0.8 กิโลเมตร
2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีชชีโลจิกไม่มีความคลาดเคลื่อนหรือความคลาดเคลื่อนเป็น 0 กิโลเมตร และโดยส่วนใหญ่วิธีที่นำเสนอจะมีค่าใกล้เคียงกับการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น
3. โดยส่วนใหญ่การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น จะมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์หรือกล่าวได้ว่ามีความแม่นยำที่สุด ยกเว้นตำแหน่ง 30% และ 50% ของความยาวสายส่งส่วน O และ N จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นสำหรับฟอลต์ชนิดสองเฟสลงดิน (DLG)

4. ในขณะที่ขั้วเมื่อพิจารณาการแปลงเวฟเล็ตที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่ง (50%) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนส่วนมากจะลดลงเป็นศูนย์ แต่ในตำแหน่งต่างๆ การแปลงเวฟเล็ตจะมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนมากกว่า 0.6 กิโลเมตร

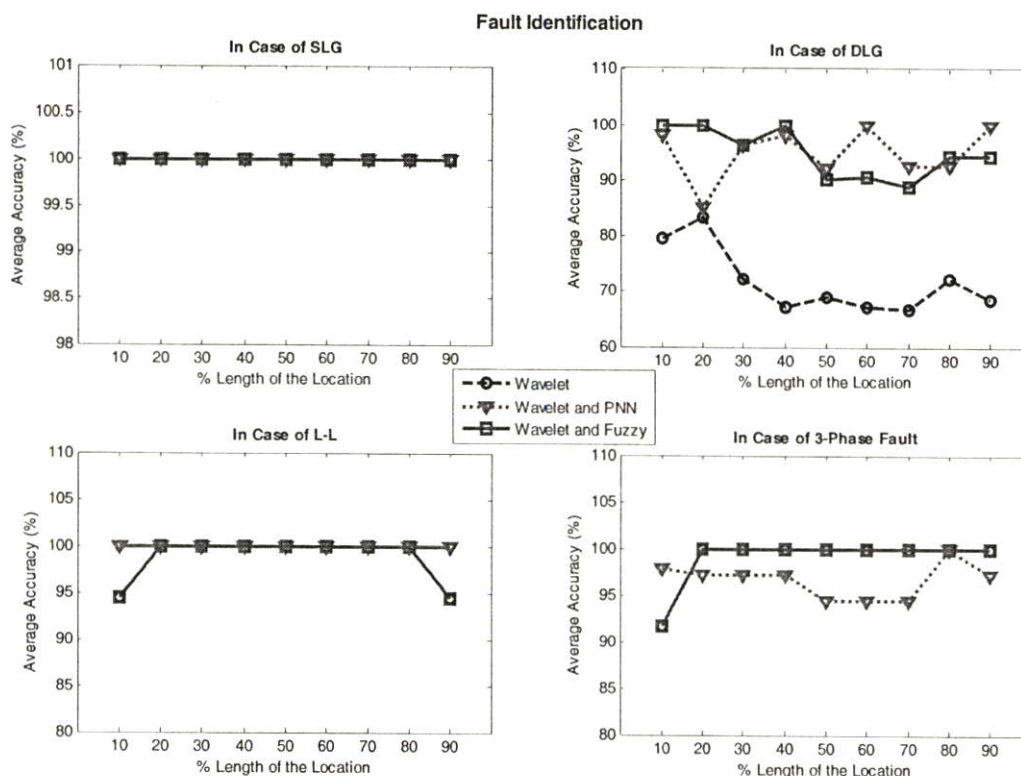
### 6.8.5 การระบุประเภทของฟอลต์



รูปที่ 6.63 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์แต่ละประเภทในระบบจำลองการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV

จากรูปที่ 6.63 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์เทียบกับประเภทของฟอลต์พบว่า

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิกสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ตามลำดับ
2. การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก และการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น สามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยส่วนใหญ่สามารถระบุประเภทฟอลต์โดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมากกว่า 98%
3. การแปลงเวฟเล็ต สามารถระบุประเภทของฟอลต์เฉลี่ยได้น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจะพบว่าฟอลต์สองเฟสลงดินค่าเฉลี่ยความถูกต้องต่ำกว่า 80%



**รูปที่ 6.64** แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องสำหรับการระบุประเภทฟอลต์แต่ละตำแหน่งในระบบจำลอง การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย 500 kV

จากรูปที่ 6.64 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์เทียบกับระยะทางที่เกิดฟอลต์ (วัดจากปลายด้านส่ง) จากระบบจำลอง พบว่า

1. การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับแบบจำลองฟuzzy logic : กรณีของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (SLG) สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องทั้งหมด 100% ยกเว้นฟอลต์สองเฟสลงดิน (DLG) ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะมีค่ามากกว่า 95% และฟอลต์ระหว่างเฟส (L-L) ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะมีค่ามากกว่า 98% โดยที่ระยะทาง 20% ถึง 80% จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% สำหรับกรณีของฟอลต์สามเฟส (3-P) ที่ระยะทาง 10 % ค่าเฉลี่ยลดลงมาเหลือประมาณ 91% โดยที่ระยะทาง 20% ถึง 90% ของความยาวสายส่ง จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า ระยะทางที่เกิดฟอลต์แทบจะไม่มีผลกับค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์
2. การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น : กรณีของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (SLG) และฟอลต์ระหว่างเฟส (L-L) สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องทั้งหมด 100% ยกเว้นฟอลต์สองเฟสลงดิน (DLG) ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะมีค่ามากกว่า 95% และในกรณีของฟอลต์สามเฟส (3-P) ที่ระยะทาง 80% จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% นอกนั้นที่ระยะทางอื่นๆ ค่าเฉลี่ยความถูกต้องลดลงมาเหลือประมาณ 94%-

97% เป็นที่น่าสังเกตว่าระยะทางที่เกิดฟอลต์แทบจะไม่มีผลกับค่าความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์

3. การแปลงเวฟเส้น : กรณีของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (SLG) สามารถระบุประเภทได้ถูกต้องทั้งหมด 100% ยกเว้นฟอลต์ระหว่างเฟส (L-L) ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะมีค่ามากกว่า 98% โดยที่ระยะทาง 20% ถึง 80% จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% สำหรับกรณีของฟอลต์สามเฟส (3-P) ที่ระยะทาง 10% ค่าเฉลี่ยลดลงมาเหลือประมาณ 91% โดยที่ระยะทาง 20% ถึง 90% ของความยาวสายส่ง จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100%

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับแบบจำลองพีซีซีโลจิก และนำผลที่ได้มาประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการวิเคราะห์หาค่าการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณพอลต์ โดยสัญญาณพอลต์ที่ใช้สำหรับศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งอาศัยแบบจำลองสายส่งแรงดัน 500 kV เชื่อมโยงกันในลักษณะเป็นแบบโครงข่ายและเป็นสายส่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจริงจากสถานีไฟฟ้าวังน้อย (WN), สถานีไฟฟ้าจอมบึง (CBG) และสถานีไฟฟ้าไทรน้อย (SNO) เป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจำลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณพอลต์ในหลากหลายรูปแบบที่อัตราการสุ่ม 400 kHz

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เนื่องจากเวฟเล็ตแม่ชนิดนี้มีขั้นตอนการทำงานที่รวดเร็ว (Fast algorithm) และลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ในลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetry) ซึ่งจะสอดคล้องกันกับพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จึงส่งผลให้รูปแบบการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น [51] โดยจะทำการแปลงเวฟเล็ตทำการวิเคราะห์และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณพอลต์ จากนั้นทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาในสเกลที่ 1-5 หรือช่วงความถี่ต่อไปนี้

สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 100-200 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

ผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็นำมาประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง

3. รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจในการตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้นทำได้โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ณ ปลายสายส่งในแต่ละด้านระหว่างก่อนและหลังเกิดพอลต์ (ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากเกิดพอลต์) โดยเป็นการเปรียบเทียบในสเกลที่ 1-5 จากนั้นเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก โดยจะนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเพียงสองค่า ซึ่งเป็นข้อมูลของ

องค์ประกอบความถี่สูงในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับพอลต์ได้ นำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณหาทิศทางของพอลต์ และจัดลำดับการป้องกัน อีกทั้งยังเป็นข้อมูลอินพุตให้กับแบบจำลองฟิซซี่โลจิก เพื่อนำไปวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งและระบุประเภทพอลต์ต่อไป

4. รูปแบบการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ดเพื่อการระบุทิศทางของสัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้น ทำได้โดยนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่ตรวจจับพอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดพอลต์ มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งวงจรต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน ถ้าทิศทางของพอลต์มีทิศทางตรงกันกับทิศทางของรีเลย์ที่ติดตั้งอยู่ทางด้านส่งและด้านรับ (Forward line) รีเลย์จึงจะสามารถปลดวงจรของสายส่งส่วนที่เกิดพอลต์ออกจากระบบได้ ในขณะที่รีเลย์ทางด้านอื่นๆ มีทิศทางไม่ตรงกันกับทิศทางของพอลต์ (Reverse line) รีเลย์ที่ติดตั้งไว้ที่ปลายสายส่งจะไม่สามารถทำงานได้ สายส่งจึงสามารถจ่ายโหลดได้ตามปกติ วิธีที่นำเสนอจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้ในงานการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบโครงข่ายที่มีความซับซ้อน อีกทั้งยังให้การตอบสนองที่ถูกต้องและรวดเร็ว ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น [52]

5. รูปแบบการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ดเพื่อการจัดลำดับการป้องกัน หมายถึงการกำหนดหน้าที่การทำงานของรีเลย์ โดยให้รีเลย์ที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดพอลต์ปลดวงจรก่อน และรีเลย์ตัวที่อยู่ห่างออกไป ปลดวงจรทีหลัง ซึ่งจากข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าค่าที่ตรวจจับพอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดพอลต์มาคำนวณตามสมการ โดยถ้าผลการคำนวณออกมาเป็นบวก รีเลย์ที่ติดตั้งอยู่ทางด้านส่งปลดวงจรก่อน และรีเลย์ทางด้านรับปลดวงจรทีหลัง ในทางกลับกันถ้าผลออกมาเป็นลบรีเลย์ทางด้านรับดำเนินการปลดวงจรก่อนและรีเลย์ทางด้านส่งจึงปลดวงจรทีหลัง

6. รูปแบบการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการระบุตำแหน่งพอลต์จะอาศัยค่าเวลาของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่สามารถตรวจจับพอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก ช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดพอลต์ ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่งส่วนที่เกิดพอลต์ ซึ่งค่าเวลาที่ได้นี้เป็นค่าเวลาที่สัญญาณพอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดพอลต์มายังปลายสายส่งแต่ละด้าน โดยค่าเวลาดังกล่าวจะถูกนำมาเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม และกลุ่มของตัวแปรอินพุตที่เลือกเป็นผลมาจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่งส่วนที่เกิดพอลต์ ซึ่งข้อมูลอินพุตจากค่าเวลาที่ตรวจจับพอลต์ได้นี้มีความแม่นยำสูงสุดและยังใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่ากรณีข้อมูลอินพุตแบบค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ [53] ในขณะที่ตัวแปรเอาต์พุตจะมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งพอลต์ เพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจในการหาตำแหน่งพอลต์บนสายส่ง

7. รูปแบบการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการระบุประเภทของพอลต์จะอาศัยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกที่ตรวจจับพอลต์ได้ของกระแสเฟส A,

B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ โดยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะถูกนำมาเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม ในส่วนของตัวแปรเอาต์พุตจะมีค่าสัมพันธ์กับเฟส (A, B, C) และกราวด์ (G) หรือชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง เพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจในการแยกประเภทฟอลต์บนสายส่ง

8. การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะเป็นการป้อนชุดข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายและพยายามปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ จุดให้สอดคล้องกับอินพุตหลายๆ รูปแบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุตเป้าหมายตามที่ต้องการ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การฝึกสอนเพื่อหาตำแหน่งของฟอลต์และการฝึกสอนเพื่อระบุประเภทของฟอลต์บนสายส่ง หลังจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะนำค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาทดสอบโดยให้เพียงเฉพาะค่าอินพุต ไม่มีค่าเอาต์พุตที่ต้องการ

9. รูปแบบการวิเคราะห์ฟัชชีโลจิกสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์ จะใช้ค่าเวลาของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลแรกเช่นเดียวกันกับวิธีของโครงข่ายประสาทเทียม การสร้างแบบจำลองฟัชชีโลจิกสำหรับการหาตำแหน่งฟอลต์ มีโครงสร้างประกอบด้วย 2 อินพุต 1 เอาต์พุต และ 9 กฎ เลือกใช้การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรอินพุตเป็นแบบฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากมีค่าที่เหมาะสมมากที่สุดอยู่กลุ่มหนึ่งที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซตนั้นๆ มีค่าเท่ากับหนึ่ง และการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรเอาต์พุตเป็นแบบฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม การหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานได้ตามกฎการอนุมานแบบแมมดานี (Mamdani's rule) และการแปลงค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าแบบคริสป์เซต โดยค่าที่ได้เป็นเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งนำไปใช้ระบุตำแหน่งฟอลต์ ได้เลือกใช้อัลกอริทึมการหาค่าจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนัก (COG method)

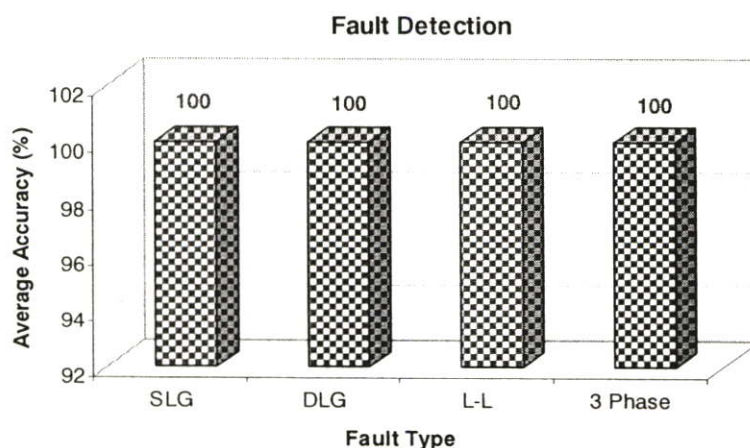
10. รูปแบบการวิเคราะห์ฟัชชีโลจิกสำหรับการระบุประเภทฟอลต์ จะอาศัยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์เช่นเดียวกันกับวิธีของโครงข่ายประสาทเทียม ก่อนที่จะทำการหาคำตอบของแบบจำลองฟัชชีโลจิกจะต้องมีการเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ จุดประสงค์เพื่อให้ข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์มีรูปแบบที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และง่ายต่อการกำหนดย่านเอกภพสัมพัทธ์ในส่วนการแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตสำหรับแบบจำลองฟัชชีโลจิก การสร้างแบบจำลองฟัชชีโลจิกมีโครงสร้างประกอบด้วย 4 อินพุต 1 เอาต์พุต และ 20 กฎ เลือกใช้การสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตเป็นแบบฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ตามลำดับ การหาค่าระดับความเป็นสมาชิกสามารถทำการอนุมานได้ตามกฎการอนุมานแบบแมมดานี (Mamdani's rule) การแปลงค่า

ความเป็นสมาชิกที่ได้จากกลไกการอนุมานกลับมาเป็นค่าแบบคริปส์เซต โดยค่าที่ได้เป็นเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุต ได้เลือกใช้อัลกอริทึมการหาค่าจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนัก (COG method) ซึ่งนำไปใช้ระบุประเภทฟอลต์

11. การทดสอบวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองด้วยการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ได้จากระบบจำลองสายส่งส่วน T, O และ N ซึ่งแต่ละส่วนของสายส่งมีความยาว 183, 62 และ 104 กิโลเมตร ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการตรวจจับฟอลต์, การระบุทิศทางฟอลต์, การจัดลำดับการป้องกัน, การระบุตำแหน่งและประเภทของฟอลต์ จะมีจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด 7128 ชุด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังต่อไปนี้

### 11.1 การตรวจจับฟอลต์

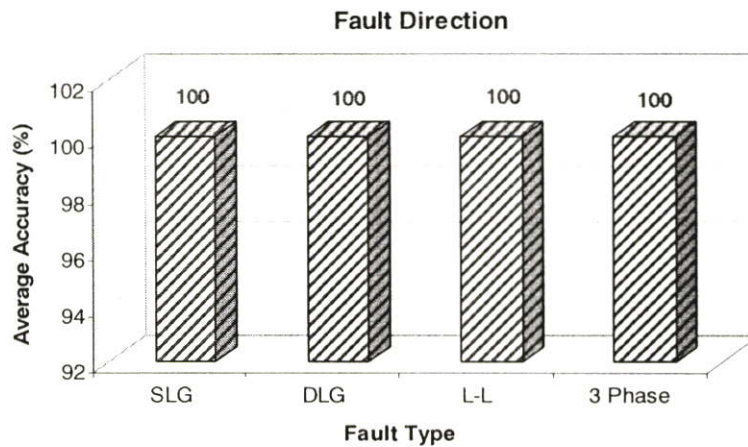
ผลการตรวจจับฟอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถตรวจจับฟอลต์ได้ทุกประเภท และทุกตำแหน่งต่างๆ บนสายส่งโดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% ตามรูปที่ 7.1 ซึ่งระยะทางที่เกิดฟอลต์, ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้น และมุมเริ่มเกิดฟอลต์ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับฟอลต์ เพราะเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้น เมื่อประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยวิเคราะห์จะสังเกตได้ว่าก่อนสภาวะมีฟอลต์นั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมีค่าต่ำมาก แต่ในสภาวะหลังเกิดฟอลต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทั้งสองสภาวะนี้สามารถนำมาสู่ขั้นตอนของการวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ โดยใช้เพียงผลของการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกเท่านั้น นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดฟอลต์บนสายส่งยังมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณฟอลต์ด้วย แต่ในรูปแบบการวิเคราะห์เวฟเล็ตที่มีหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้



รูปที่ 7.1 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละประเภทของฟอลต์

### 11.2 การระบุทิศทางของฟอลต์

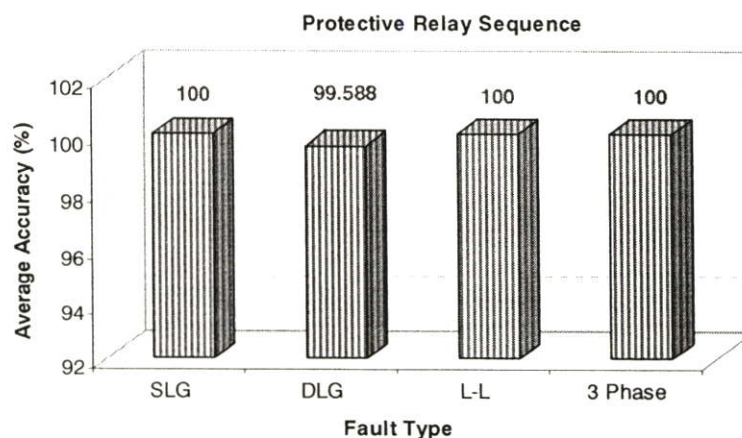
ผลการระบุทิศทางของฟอลต์ด้วยวิธีการการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถระบุทิศทางฟอลต์ได้ทุกประเภท และทุกตำแหน่งบนสายส่ง โดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% ตามรูปที่ 7.2 จึงกล่าวได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถตรวจสอบทิศทางของการเกิดฟอลต์และปลดวงจรสายส่งได้อย่างถูกต้อง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อแผนงานการป้องกันระบบสายส่งไฟฟ้าในปัจจุบัน



รูปที่ 7.2 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุทิศทางฟอลต์ในแต่ละประเภทของฟอลต์

### 11.3 การจัดลำดับการป้องกัน

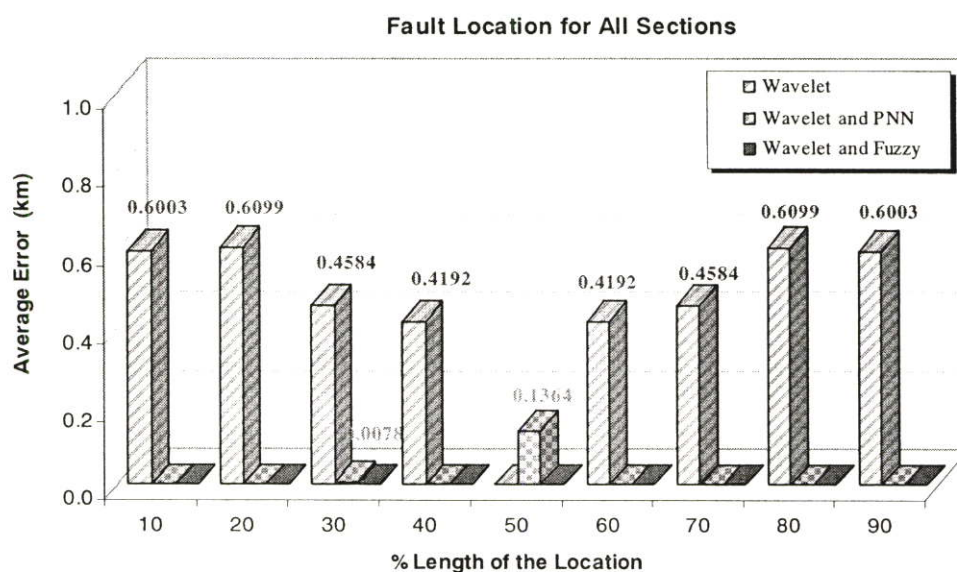
ผลของการจัดลำดับการป้องกันของรีเลย์ด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้น สามารถจัดลำดับการป้องกันได้ทุกประเภทและทุกตำแหน่งของฟอลต์ โดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 99.88% ซึ่งจากรูปที่ 7.3 การเกิดฟอลต์ชนิดสองเฟสลงดิน จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 99.588% โดยความผิดพลาดเกิดขึ้นที่สายส่งส่วน T ทั้งวงจรที่ 1 และ 2 ที่ระยะทาง 40% และ 60% ตามลำดับ



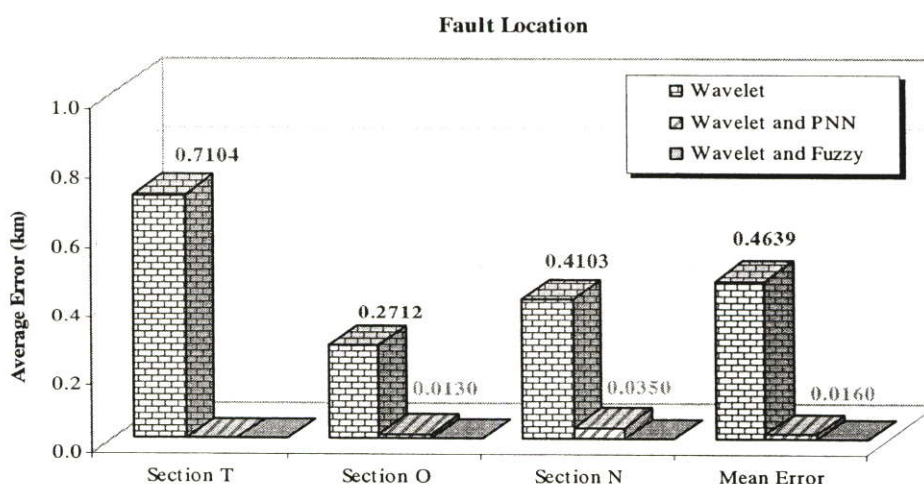
รูปที่ 7.3 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการจัดลำดับการป้องกันในแต่ละประเภทของฟอลต์

#### 11.4 การระบุตำแหน่งฟอลต์

ผลการหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งสามวิธีที่นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0-0.7 กิโลเมตร ซึ่งในทางปฏิบัตินี้เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ โดยที่การแปลงเวฟเล็ตเพียงอย่างเดียวจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่าการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นและการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับฟัซซีลอจิก ตามลำดับ ยกเว้นเมื่อเกิดฟอลต์ที่กึ่งกลางสายส่ง ซึ่งเป็นจุดที่สามารถคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ได้แม่นยำมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7.4 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการหาตำแหน่งฟอลต์ของแต่ละวิธีตามรูปที่ 7.5 พบว่าวิธีการที่นำเสนอจะให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากกว่าอีก 2 วิธีที่นำมาเปรียบเทียบ



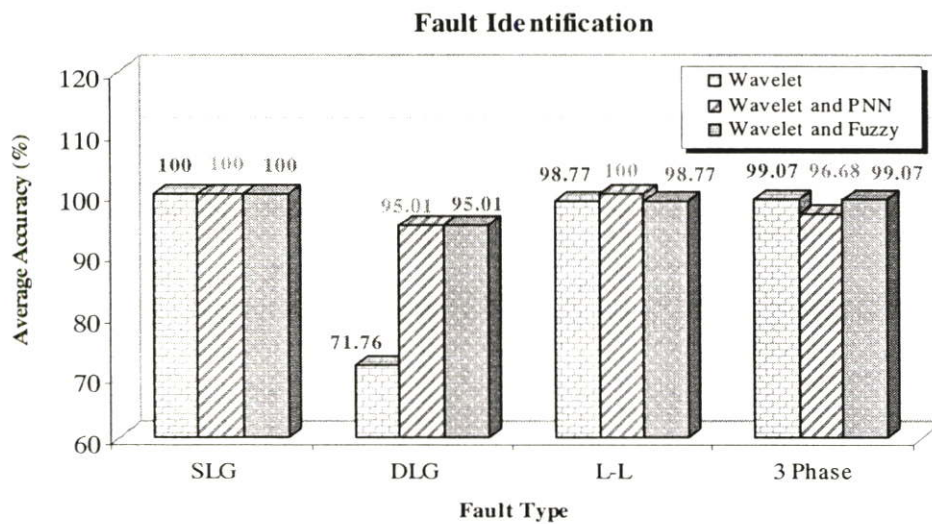
รูปที่ 7.4 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งฟอลต์ในแต่ละระยะทาง



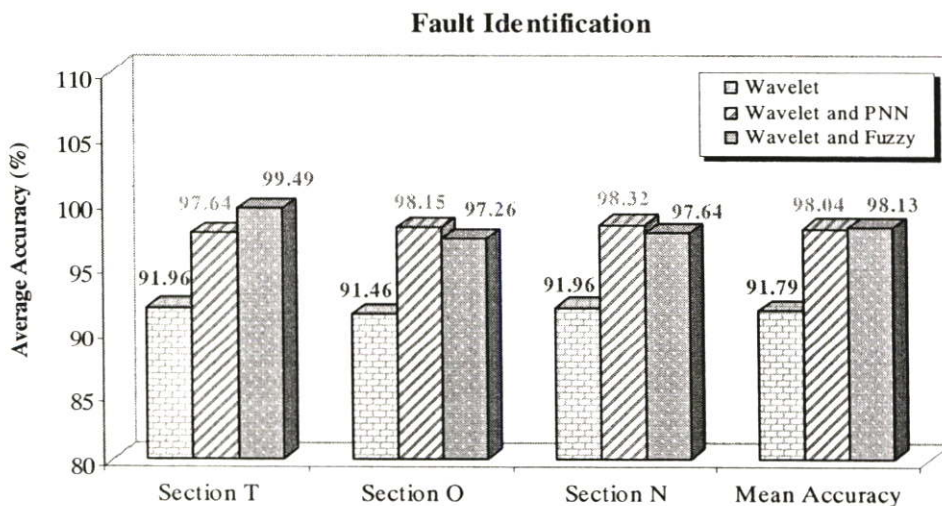
รูปที่ 7.5 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งฟอลต์

### 11.5 การระบุประเภทของฟอลต์

จากรูปที่ 7.6 และ 7.7 เมื่อพิจารณาผลของการระบุประเภทฟอลต์ของทั้งสามวิธี พบว่าวิธีที่นำเสนอและวิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมจะให้ความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 98% และยังมีมีความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 95% ของทุกประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น ในขณะที่การแปลงเวฟเล็เพียงอย่างเดียวจะมีความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 90% โดยจะสามารถระบุประเภทของฟอลต์ชนิดสองเฟสลงดินได้ถูกต้องมากกว่า 70% และจากรูปที่ 7.6 จะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอและวิธีของการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นจะสามารถระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งส่วนต่างๆ โดยมีค่าเฉลี่ยของความถูกต้องในแต่ละส่วนของสายส่งใกล้เคียงกัน แต่การแปลงเวฟเล็จะสามารถระบุประเภทฟอลต์โดยค่ามีค่าเฉลี่ยความถูกต้องแต่ละสายส่งต่ำสุด



รูปที่ 7.6 แสดงค่าเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์แต่ละประเภทของระบบจำลอง



รูปที่ 7.7 แสดงค่าเฉลี่ยของการระบุประเภทฟอลต์ของระบบจำลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นในสัญญาณพอลต์ โดยใช้ช่วงของข้อมูลในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบความถี่สูงนั้นสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับสัญญาณพอลต์ได้อย่างถูกต้องและลดจำนวนของข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดสามารถนำไปสู่การพัฒนาของแผนงานการตรวจจับพอลต์, การระบุทิศทางและการจัดลำดับการป้องกันตามลำดับ โดยสามารถตรวจสอบทิศทางการเกิดพอลต์ได้อย่างแม่นยำและปลดวงจรสายส่งได้อย่างถูกต้อง เป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้น อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลโดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเดิม และเมื่อผสมผสานวิธีของการแปลงเวฟเล็ดมาทำงานร่วมกับพีซีโลจิกสำหรับพัฒนาแผนงานการระบุตำแหน่งและแยกประเภทของพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง กล่าวได้ว่าการระบุตำแหน่ง และประเภทของพอลต์บนสายส่งไฟฟ้าด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมอย่างยิ่ง แต่การใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมีข้อด้อยเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนมาก ซึ่งถ้าเป็นระบบสายส่งที่มีการเชื่อมโยงในลักษณะ โครงข่าย ตัวแปรอินพุตและจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนจะมีจำนวนมากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าความถูกต้องและประสิทธิภาพยังคงเหมือนเดิมก็ตาม นอกจากนี้วิธีที่นำเสนอยังมีข้อดีคือขั้นตอนในการคำนวณที่ใช้เวลาน้อยกว่าโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถนำไปสู่แผนงานการป้องกันแบบใหม่ได้ โดยมีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของคำตอบอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากและวิธีการคำนวณของพีซีโลจิกใช้หลักการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน เวลาที่ใช้ในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ จะสามารถทำการประมวลผลและได้รับคำตอบออกมาอย่างทันทีทันใด เมื่อมีการป้อนข้อมูลอินพุตเข้าไปในระบบ (real-time) [50]

ดังนั้นการวิเคราะห์แผนงานทั้ง 5 ลักษณะตามที่ได้กล่าวมานี้ จึงมีประโยชน์อย่างมากต่อระบบการป้องกันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และยังแก้ไขปัญหาลักษณะเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ดีอีกด้วย โดยเฉพาะเมื่อรีเลย์ตรวจสอบและปลดวงจรสายส่งส่วนที่เกิดพอลต์ออกจากระบบไปแล้ว ต่อไปในส่วนของการซ่อมบำรุงรักษารูปแบบและตำแหน่งที่เกิดพอลต์ ถ้าทราบรูปแบบและตำแหน่งของพอลต์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ก็จะเป็นการอำนวยความสะดวกให้แก่หน่วยงานที่ทำหน้าที่บำรุงรักษาสายส่งให้ทำงานได้อย่างสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น ทำให้สามารถนำสายส่งกลับเข้ามาใช้งานได้อย่างรวดเร็ว เป็นการลดผลกระทบต่อระบบการผลิตและการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ใช้ไฟฟ้า และระบบเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ ทำให้ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้สำหรับระบบการป้องกันสายส่งเช่น อุปกรณ์รีเลย์, เครื่องบันทึกพอลต์แบบดิจิทัล (DFR) ซึ่งรูปแบบของวิธีการที่นำเสนอนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มของ

เทคโนโลยีที่กำลังดำเนินอยู่ในปัจจุบันได้ เป็นการขยายขอบเขตของงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้ากำลังให้ดียิ่งขึ้น

## 12. สิ่ง ที่ควร ได้รับการ พัฒนาต่อไป

12.1 พัฒนารูปแบบการตรวจจับฟอลต์โดยพิจารณาลักษณะของสัญญาณฟอลต์ที่มาจากสายส่งส่วนอื่นๆ เข้ามาประกอบเพื่อให้การตรวจจับมีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้น

12.2 พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์โดยสามารถวิเคราะห์ได้ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสัญญาณฟอลต์หรือเป็นสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณฟอลต์ เช่น สัญญาณจากการสวิตช์รูปแบบต่างๆ (การปลดสับวงจรตัวเก็บประจุ เป็นต้น), สัญญาณที่เกิดจากฟ้าผ่า และผลกระทบจากสภาวะการแกว่งของพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ (Power oscillation)

12.3 พิจารณาผลกระทบของการชดเชย (Compensation) ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

12.4 ปรับปรุงการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้สามารถระบุประเภทของฟอลต์แม่นยำมากขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนข้อมูลอินพุตสำหรับชุดข้อมูลของการฝึกสอน เพื่อให้โครงข่ายเกิดการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของเอาต์พุตได้มากขึ้น หรือใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดอื่น เช่น โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP neural network) เป็นต้น

12.5 ปรับปรุงการพิจารณาลักษณะของการระบุประเภทฟอลต์ โดยเฉพาะฟอลต์ระหว่างเฟสลงดิน (DLG) ให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้ระบบฟัซซี่ที่นำเสนอกับระบบฟัซซี่ชนิดอื่นๆ เช่น ระบบฟัซซี่แบบทาเคจิและซูจินิเอะ (Takagi and Sugeno's Fuzzy System) เป็นต้น หรืออาจจะใช้การประยุกต์วิธีของโครงข่ายประสาทเทียมและฟัซซี่โลจิกเข้าด้วยกัน กล่าวคือ เป็นการนำเอาระบบโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในกระบวนการประเมินผล และใช้ฟัซซี่โลจิกสำหรับกระบวนการตัดสินใจ ปัจจุบันวิธีดังกล่าวมีชื่อเรียกหลากหลาย เช่น ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), Fuzzy neural network, Hybrid neuro-fuzzy models เป็นต้น [54]

12.6 พัฒนาและออกแบบแผนงานการป้องกันสำหรับรีเลย์ป้องกันแบบสำรอง (Backup relay) ในกรณีที่รีเลย์ป้องกันหลัก (primary relay) ส่งสัญญาณทริปให้กับเบรกเกอร์ แต่เบรกเกอร์เกิดความเสียหายไม่สามารถปลดวงจรสายส่งได้ หรือที่เรียกว่า Breaker Failure Relay : BFR [55] (อัตราการความเสียหายของเบรกเกอร์มีค่าสูงสำหรับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 69 kV หรือ EHV Line)

12.7 พัฒนารูปแบบการป้องกันสายส่งแรงสูง โดยใช้แผนงานที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ มาเชื่อมโยงข้อมูลของปลายสายส่งในแต่ละด้านเข้าด้วยกัน โดยใช้ระบบของการสื่อสาร (pilot protection) เพื่อให้รีเลย์สามารถกำจัดฟอลต์ที่ตรวจจับได้ที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์ได้อย่างทันที โดยที่รีเลย์ตัวที่อยู่ไกลจากจุดเกิดฟอลต์ ไม่มีการหน่วงเวลาเกิดขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] “Microprocessor Relays and Protection Systems.” IEEE Tutorial Course, 88EH0269-1-PWR
- [2] E. H. Shehab-Eldin, P. G. McLaren. “Travelling Wave Distance Protection-problem Areas and Solutions.” IEEE Transactions on Power Delivery., vol. 3, No. 3, July 1998. pp. 894-902.
- [3] Bo Z. Q., Jiang F., Chen Z., Dong X.Z., Weller G., Redfern M.A., “**Transient based protection for power transmission systems.**” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. vol. 3, 2000. pp. 1832 –1837.
- [4] P. F. Ribeiro. “Wavelet Transform: An Advanced Tool for Analyzing Non-Stationary Harmonic Distortions in Power Systems.” IEEE ICHPS VI. Bologna, Italy, September 1994. pp. 365-369.
- [5] S. Santoso, E.J. Powers, W.M. Grady and P. Hofmann. “Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis.” IEEE Trans. PWRD. vol. 11, no. 2, April 1996. pp. 924-930.
- [6] H. Fernando, Magnago and Ali Abur. “ Fault Location Using Wavelets.” IEEE Transactions on Power Delivery, PE-303-PWRD-0-12-1997.
- [7] สมชาติ โชติศิลากุล. “Line Fault Locator.” แผนกหาข้อขัดข้องในสายส่ง, กองอุปกรณ์ปลายทาง, ฝ่ายระบบสื่อสาร, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [8] William. D. Stevenson Jr. **Elements of Power System Analysis.** Fourth Edition. Singapore :McGraw - Hill, Inc. 1982.
- [9] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. **การป้องกันระบบไฟฟ้า (Power System Protection).** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์เอ็มแอนด์อีจำกัด, สิงหาคม 2545.
- [10] The Electricity Council. **Power System Protection 2 : Systems and Methods.** 2nd ed, Stevenage, UK : Peter Peregrinus, 1981.
- [11] ชำนาญ ห่อเกียรติ. **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Analysis).** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] B. Ravindranath and M. Chander. **Power System Protection and Swithgear.** Fourth reprint. Wiley Eastern Limit. February 1982.
- [13] Albert Cohen and Jellena Kovacevic. “Wavelet: The Mathematical Background.” Proc. IEEE. vol. 84, no. 4, April 1996. pp. 514-522.

- [14] พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง. “การวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่งด้วยการแปลงเวฟเล็ต.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [15] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, รศ. ดร. มนต์ สัจวรศิลป์. คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ Info press, เมษายน 2543.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo. **Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms.** New Jerce : Prentice-Hall, Inc. 1998.
- [20] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean-Michel Poggi. **Wavelet Toolbox User’s Guide Version 2.1.** First Printing, MathWorks, Inc. March 1996.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Fausett Laurene. **Fundamentals of Neural Networks.** Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall International, Inc. 1994.
- [24] C. M. Bishop. Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford : Oxford University Press. 1995.
- [25] B. D. Ripley. Pattern Recognition and Neural Networks. Cambridge : Cambridge University Press. 1996.
- [26] H. Demuth and M. Beale. **Neural Network Toolbox User’s Guide.** The Math Works, Inc.

- [27] P. D. Wasserman. **Advanced Methods in Neural Computing**. New York : Van Nostrand Reinhold. 1993.
- [28] สมหญิง พรหมเจริญ. “การจำแนกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีฟัซซีนิวรอลเน็ตเวิร์ค.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [29] นิमित บุญภิรมย์. “การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟัซซีชนิดปรับค่าด้วยตัวเอง” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [30] Dimiter Driankov, Hans Hellinckx, and Michael Reimfrank. **An Introduction to Fuzzy Control**. Springer-Verlag Berlin, U.S.A, 1993.
- [31] Jun Yan, Michael Ryan, and James Power. **Using Fuzzy Logic**. Prentice Hall, International (UK) Limited, 1994.
- [32] Pal S.K. and Pramanik P. K. “Fuzzy Measures in Determining Seed Point in Clustering.” *Pattern Recognition Lett.*, vol.4, 1986. pp. 159-164.
- [33] Mohammad Jamshidi, Nader Vadiee, Timothy J. Ross. **Fuzzy Logic and Control**. PTR Prentice Hall Inc., 1993.
- [34] สุเมธ สุขสวัสดิ์, กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ. “การประยุกต์ฟัซซีโลจิกสำหรับระบบควบคุมสัญญาณรบกวนแบบแอดทีฟ” วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 (EECON28), หน้า 909-912.
- [35] The MathWorks, Inc. **Fuzzy Logic Toolbox User's Guide**. March 2001.
- [36] Chen C.H. **Fuzzy Logic and Neural Network Handbook**. USA : McGraw-Hill, 1996, pp. 15.2-15.3
- [37] Liliane Peters, Shuwei Guo, and Raul Camposano. “A Novel Analog Controller for Intelligent Sensors.” *IFSA, Special Issue on Modern Fuzzy Control*, vol.70, no.2-3, March 20, 1995.
- [38] Li-Xin Wang. **A Course in Fuzzy and Control**. Prentice-Hall PTR, 1997.
- [39] Li-Xin Wang. **Adaptive Fuzzy Systems and Control**. Prentice-Hall PTR, 1994.
- [40] Wladyslaw Mielczarski. **Fuzzy logic techniques in power systems**. New York : Physica-Verlag, 1998.
- [41] Manitoba HVDC Research Centre. **Introduction to PSCAD/EMTDC**. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada 2003.

- [42] Manitoba HVDC Research Centre. **EMTDC : Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation.** Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada 2003.
- [43] Equipment and Power System Diagram Section, Transmission System Operation & Planning Department, System Control Operation Division, EGAT, "Switching and Transmission Line Diagram," March 2002.
- [44] C. Dufour and H. Le-Huy. "Highly Accurate Modeling of Frequency-Dependent Balanced Transmission Lines." IEEE Trans. on Power Delivery. vol. 15, no. 2. April 2000. pp. 610–615.
- [45] IEEE Std 1159-1995. "**Recommended practice for monitoring electric power quality.**" November 1995.
- [46] J. Arrillaga, N.R. Watson and S. Chen. **Power System Quality Assessment.** Singapore : John Wiley & Sons, Inc. 2000. pp. 120-130.
- [47] 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.
- [48] Z. Chen, Z. Q. Bo, Xiang-ning Lin, B R J Caunce, "Integrated Line and Busbar Protection Scheme Based on Wavelet Analysis of Fault Generated Transient Current Signals", International conference on power system technology, Singapore, Nov. 2004.
- [49] อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล. "การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่ง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [50] Youssef, O.A.S., "Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 2, April 2004.
- [51] ชีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ, สิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล, อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล, อานันท์วัฒน์ คุณากร, สุทธิ บรรจงจิตร. "การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสำหรับระบุตำแหน่งฟอลต์ในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบสามบัส" วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 (EECON28) , หน้า 393-396.
- [52] ชีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ, วรวิมล พงษ์ชัยศรีกุล, เสกสรรค์ งามศรีตระกูล, อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล, อานันท์วัฒน์ คุณากร. "รีเลย์แบบรู้ทิศทางสำหรับการป้องกันระบบส่งไฟฟ้าแบบโครงข่าย

โดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย” วารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON29) , หน้า 37-40.

- [53] สิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล, จุติพงษ์ นิยมสัจย์, สุทธิ บรรจงจิตร, อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล. “การพิจารณาเลือกข้อมูลอินพุทของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27 (EECON27).
- [54] Detlef Nauck, Frank Klawonn, Rudolf Kruse. **Foundations of neuro-fuzzy systems.** Chichester : John Wiley, 1997.
- [55] Walter A. Elmore. **Protective relaying theory and applications.** New York : Marcel Dekker, 1994.

### ภาคผนวก ก.

การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยสำหรับการระบุตำแหน่งและแบ่งประเภทฟอลต์  
ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย

## การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสำหรับการระบุตำแหน่งและแบ่งประเภทฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโครงข่าย

### 1. การแปลงเวฟเล็ตสำหรับหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault location)

จากทฤษฎีคลื่นเดินทางเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ บนสายส่งจะเกิดสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่ง ซึ่งถ้าสามารถจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมาที่ปลายทั้ง 2 ด้านได้ ก็สามารถนำเวลาที่ได้มาแทนในสมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น จากสมมุติฐานนี้เองจึงได้กำหนดเกณฑ์ในการหาตำแหน่งฟอลต์ไว้โดยใช้ค่าเวลาของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก ช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่งส่วนที่เกิดฟอลต์ ซึ่งค่าเวลาที่ได้นี้เป็นค่าเวลาที่สัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์มายังปลายสายส่งแต่ละด้าน ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ซึ่งกลุ่มของตัวแปรอินพุตที่เลือกเป็นผลมาจากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง จากนั้นจึงนำเวลาที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น

$$d = \frac{(L - v \times (t_B - t_A))}{2} \quad (1)$$

เมื่อ  $d$  = ระยะทางของจุดที่เกิดฟอลต์วัดจากปลาย สายส่งด้าน A

$L$  = ความยาวของสายส่ง

$t_A$  = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายด้าน A

$t_B$  = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายด้าน B

$v$  = ความเร็วการเดินทางของคลื่น

ซึ่งสมการที่ 1 สามารถใช้ได้กับฟอลต์ทุกรูปแบบและมีความแม่นยำที่ดีแต่ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าข้อมูลทางเวลาของปลายทั้ง 2 ด้านต้องอยู่บนฐานเวลาเดียวกัน (Time synchronized) จากรูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณขณะเกิดฟอลต์ที่เฟส A ลงดิน (AG) ที่ระยะทาง 36.6 กิโลเมตร บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 วัดจากปลายด้านส่งของสายส่ง (20% ของระยะทางเต็ม 183 กิโลเมตร) จะเห็นว่าเวลาที่ได้คือ 40.1225 และ 40.4875 ms จะถูกนำไปคำนวณตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } L &= 183 \text{ กิโลเมตร} \\ t_A &= 0.0401225 \text{ วินาที} \\ t_B &= 0.0404875 \text{ วินาที} \\ V_m &= 294759 \text{ กิโลเมตร/วินาที (km/s)} \end{aligned}$$

$$d = \frac{(183 - 294759 \times (0.0404875 - 0.0401225))}{2}$$

$$d = 37.7064 \text{ กิโลเมตร}$$

จากผลการคำนวณจะสามารถคำนวณระยะทางที่เกิดฟอลต์ได้ 37.7064 กิโลเมตร ซึ่งระยะทางที่เกิดฟอลต์จริงเท่ากับ 36.6 กิโลเมตร ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จริงเท่ากับ 1.1064 กิโลเมตร ในทางปฏิบัติสามารถใช้ในสเกลที่สูงขึ้นไปได้ (สเกลที่ 2-5) ขึ้นอยู่กับว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สเกลใด แต่จากการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่สเกลที่ต่ำ (ความถี่สูง) จะให้ความแม่นยำที่ดีกว่า

## 2. การแปลงเวฟเล็ตสำหรับระบุประเภทของฟอลต์ (Fault Identification)

ลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แตกต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ นำการแปลงเวฟเล็ตมาพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส ด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์ เพื่อให้ค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสมีฐานอ้างอิงเดียวกัน (จากการศึกษาตัวอย่างสัญญาณฟอลต์ในเบื้องต้นพบว่าการอ้างอิงกับค่าขององค์ประกอบลำดับศูนย์จะให้ความถูกต้องมากกว่าการใช้องค์ประกอบอื่นๆ) ซึ่งจะช่วยให้ง่ายและสะดวกต่อการเปรียบเทียบมากขึ้น โดยมีรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ดังต่อไปนี้

### 2.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์

เพื่อสะดวกในการอธิบายขั้นตอนทั้งหมดจึงทำการกำหนดตัวแปรต่างๆดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 ตัวแปรค่าสูงสุดในช่วงก่อนเกิดฟอลต์

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

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

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

$C_{\max(\text{pre})}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส C  
ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ที่สเกล L

### 2.1.2 ตัวแปรค่าสูงสุดในช่วงหลังเกิดฟอลต์

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

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

$B_{\max(\text{post})}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส B  
ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

$C_{\max(\text{post})}^L$  = ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบที่เฟส C  
ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ที่สเกล L

### 2.1.3 ตัวแปรค่าเปรียบเทียบ

$A_{\text{com}}^L$  = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส A ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดของ  
องค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

$B_{\text{com}}^L$  = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส B ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดของ  
องค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

$C_{\text{com}}^L$  = ค่าเปรียบเทียบขององค์ประกอบที่เฟส C ซึ่งอ้างอิงกับค่าสูงสุดของ  
องค์ประกอบลำดับศูนย์ในสเกลที่ L

### 2.1.4 ตัวแปรการตรวจสอบ

$Z_{\text{chk}}^L$  = ค่าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์-  
ประกอบลำดับศูนย์ระหว่างก่อนเกิดฟอลต์และหลังเกิดฟอลต์ ซึ่งจะมี  
ค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้น

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

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

และเนื่องจากขั้นตอนทั้งหมดเป็นลักษณะการเปรียบเทียบของค่าต่างๆ ซึ่งบางครั้งการอธิบาย  
ด้วยลักษณะของคำพูดนั้นอาจจะทำให้เข้าใจยาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้ลักษณะการอธิบายเชิง  
บรรยายร่วมกับการอธิบายด้วยลักษณะของการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแบบสากลคือ if ...

Then ... else ... end ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนของการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของพอลต์ดังต่อไปนี้

## 2.2 การเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

เพื่อให้ข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์มีรูปแบบที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องทำการจัดข้อมูลก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ โดยเป็นการพิจารณาในแต่ละสเกลดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การหาค่าสูงสุดในการเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์

พิจารณาค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ซึ่งจะเท่ากับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดพอลต์ ดังแสดงในสมการที่ 2

$$Z_{\max}^L = Z_{\max(\text{post})}^L \quad (2)$$

$$Z_{\text{chk}}^L = \frac{Z_{\max(\text{post})}^L}{Z_{\max(\text{pre})}^L} \quad (3)$$

## 2.3 การหาค่าเปรียบเทียบ

ขั้นตอนนี้เป็นการหาค่าเปรียบเทียบ โดยนำค่าสูงสุดเปรียบเทียบทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว นำมาหารด้วยค่าสูงสุดเปรียบเทียบขององค์ประกอบลำดับศูนย์ดังนี้

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟส A

$$A_{\text{com}}^L = \frac{A_{\max(\text{post})}^L}{Z_{\max}^L} \quad (4)$$

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟส B

$$B_{\text{com}}^L = \frac{B_{\max(\text{post})}^L}{Z_{\max}^L} \quad (5)$$

พิจารณาค่าเปรียบเทียบที่เฟส C

$$C_{\text{com}}^L = \frac{C_{\max(\text{post})}^L}{Z_{\max}^L} \quad (6)$$

โดยสมการที่ 4-6 นั้นค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากองค์ประกอบในเฟสใดๆ ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล หลังเกิดพอลต์ ( $A_{\max(\text{post})}^L, \dots, C_{\max(\text{post})}^L$ ) จะต้องมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสูงสุดจากสัมประสิทธิ์

ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์  $(A_{\max(\text{pre})}^L, \dots, C_{\max(\text{pre})}^L)$  ด้วย จากนั้นจึงจะหาค่าสูงสุดกับต่ำสุดได้จากสมการที่ 7 และ 8 ดังนี้

$$Ph_{\max}^L = \text{ค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง } A_{\text{com}}^L, B_{\text{com}}^L \text{ และ } C_{\text{com}}^L \quad (7)$$

$$Ph_{\min}^L = \text{ค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง } A_{\text{com}}^L, B_{\text{com}}^L \text{ และ } C_{\text{com}}^L \quad (8)$$

จากขั้นตอนนี้ทำให้ได้ค่าเปรียบเทียบของเฟส A เฟส B เฟส C ในสเกล L ใดๆ (วิทยานิพนธ์นี้เลือกพิจารณาเฉพาะสเกลที่ 1 เท่านั้น) รวมทั้งค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ต่อไป โดยพิจารณาแต่ละเฟสในสเกลเดียวกันตามรูปแบบของการวิเคราะห์ได้ในหัวข้อถัดไป

#### 2.4 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์

สามารถทำได้โดยการพิจารณาค่าเปรียบเทียบ  $A_{\text{com}}^L, B_{\text{com}}^L$  และ  $C_{\text{com}}^L$  โดยเฟสที่สามารถระบุได้ว่าเกิดฟอลต์ขึ้นนั้นจะต้องมีรูปแบบเงื่อนไขตามข้อใดข้อหนึ่งใน 2 ข้อต่อไปนี้

- 1) ต้องมีค่าเปรียบเทียบมากกว่า 1 และมากกว่า 40% ของค่า  $Ph_{\max}^L$  หรือมีค่ามากกว่า 5
- 2) หรือมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่า  $Ph_{\min}^L$

ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการพิจารณาในรูปแบบของการเขียนโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

##### พิจารณาฟอลต์ที่เฟส A

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

then

$$\text{Phase A Fault} \quad (9)$$

else

$$\text{Phase A Un-Fault} \quad (10)$$

end

##### พิจารณาฟอลต์ที่เฟส B

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

then

Phase B Fault (11)

else

Phase B Un-Fault (12)

end

### พิจารณาฟอลต์ที่เฟส C

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

then

Phase C Fault (13)

else

Phase C Un-Fault (14)

end

### 2.5 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์นั้นลงดินหรือไม่

จากรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์นั้น จะเห็นได้ว่าไม่สามารถระบุได้ว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ลงดินหรือไม่ ดังนั้นจึงเพิ่มขั้นตอนของการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทของฟอลต์ว่าลงดินหรือไม่ โดยจากหัวข้อ 2.2.2.1 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ดังนี้คือ ถ้าค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์หรืออัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลก่อนและหลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่า 0.00005 แล้ว แสดงว่าเฟสที่เกิดฟอลต์นั้นลงดินสามารถนำมาเขียนเป็นลักษณะของโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

if  $(Z_{max}^L (post) \geq 5 \times Z_{max}^L (pre)) \text{ or } (Z_{chk}^L \geq 0.00005)$

then

Ground Fault (15)

else

Ground Un-Fault (16)

end

**ภาคผนวก ข.**

**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์**

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

## 28<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference



Electrical Engineering  
Electrical Engineering

สาขาบทความที่น่าสนใจในการประชุม

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CM)  
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)  
ไฟฟ้ากำลัง (PW)  
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)  
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)  
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)  
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)  
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



Western  
Digital



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

20 - 21 ตุลาคม 2548

ณ โรงแรม เฟิร์ล วิลเลจ จ.ภูเก็ต

## การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยสำหรับระบุตำแหน่งฟอลต์ในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบสามบัส

### Discrete Wavelet Transforms for Detecting Fault Location in a Three-Bus Transmission System

ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ สิทธิโชค กิตติรัญตระกูล อรรถพล เงามัทย์กุล อานันท์วัฒน์ คุณากร ศุภี บรรจงจิตร  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนจลลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร 0-2326-9902 E-mail : s7060266@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย เพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์ในสายส่งแบบสามบัส โดยศึกษาจากการนำเวฟเลตแม่จำนวน 3 ชนิดมาเปรียบเทียบเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์ด้วยทฤษฎีคลื่นเดินทาง ซึ่งพบว่าเวฟเลตแม่ชนิด 'db4' ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเวฟเลตชนิด 'sym4' และ 'coif4' โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนจากวิธีที่ได้นำเสนอน้อยกว่า 400 เมตร

คำสำคัญ : การแปลงเวฟเลต, ระบุตำแหน่งฟอลต์, สายส่ง

#### Abstract

This paper proposes a technique to detect fault locations in a three-bus transmission system using discrete wavelet transform (DWT). A comparison of results obtained from three different types of mother wavelet is discussed in order to identify the fault locations with an application of travelling wave theory. It is shown that the db4 mother wavelet produces better results than those from 'sym4' and 'coif4', with a mean error of less than 400 m.

Keywords: Wavelet Transform, Fault Location, Transmission Lines

#### 1. บทนำ

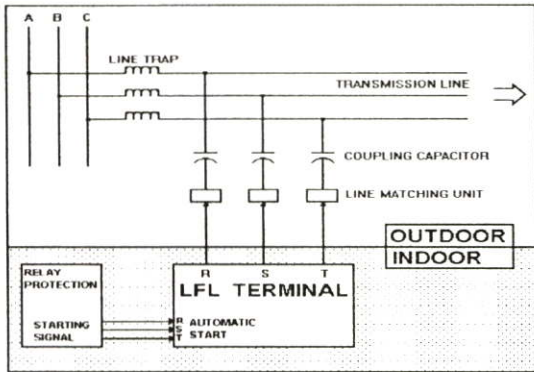
การระบุตำแหน่งฟอลต์ในสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่มีอยู่ในปัจจุบัน คือเครื่องหาข้อขัดข้องในสายส่งไฟฟ้า (Line Fault Locator : LFL)[1] โดยหน้าที่หลักของเครื่อง LFL คือ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น เครื่อง LFL จะตรวจหาข้อขัดข้องโดยแสดงข้อมูลระยะจากตำแหน่งที่เครื่อง LFL ตั้งอยู่จนถึงจุดที่ขัดข้องนั้น ทำให้สามารถทราบจุดหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ภายในเวลาไม่กี่วินาที อย่างไรก็ตาม เครื่อง LFL ยังมีข้อเสียทางด้านราคาที่สูงแพง, ใช้อุปกรณ์มาก ทำให้การติดตั้งยากยิ่งขึ้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีงานวิจัยทางการระบุตำแหน่งฟอลต์โดยใช้การแปลงเวฟเลตร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง [2-3] ซึ่งการแปลงเวฟเลตนี้เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำทางเวลาที่ดี อีกทั้งยังให้การตอบสนองที่รวดเร็ว และช่วยลดค่าใช้จ่ายของเครื่องหาข้อขัดข้องในสายส่งที่มีราคาค่อนข้างแพงได้ดีอีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ได้นำเสนอการระบุตำแหน่งฟอลต์ที่มีแหล่งจ่าย 1 หรือ 2 บัสเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้ว แหล่งจ่ายมีการเชื่อมโยงในลักษณะโครงข่าย (Network) ซึ่งเห็นได้ว่าความซับซ้อนในการระบุตำแหน่งฟอลต์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ประยุกต์การแปลงเวฟเลตร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทางให้สามารถระบุตำแหน่งฟอลต์ได้ในระบบที่ประกอบด้วยสายส่งมากกว่า 2 บัส

อนึ่ง ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเลต นอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้ว ยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกเวฟเลตแม่ให้เหมาะสมด้วย เนื่องจากการใช้เวฟเลตแม่ที่เหมาะสมกับสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบันเวฟเลตแม่มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อยลงไปอีก ด้วยเหตุที่รูปแบบของเวฟเลตแม่ที่หลากหลายนี้เอง จึงทำให้การแปลงเวฟเลตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานโดยเลือกเวฟเลตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่จะวิเคราะห์ เนื่องจากรูปแบบของเวฟเลตแม่มีความหลากหลายนี้เอง ดังนั้นในบทความฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลจากเวฟเลตแม่จำนวน 3 ชนิดด้วยกันคือ Daubechies 4 (db4), Symlets 4 (sym4) และ Coiflets 4 (coif4) เนื่องจากเวฟเลตแม่ทั้งสามชนิดสามารถวิเคราะห์การแปลงเวฟเลตได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบเต็มหน่วย (Continuous and Discrete transform) อีกทั้งมีขั้นตอนที่รวดเร็ว (Fast algorithm) นอกจากนี้ ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ในลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetry) จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมด [4] จึงทำให้เวฟเลตแม่ทั้งสามชนิดมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนด์

2. หลักการอุปกรณ์หาข้อขัดข้องในสายส่ง [1]

เมื่อมีเหตุขัดข้องในระบบสายส่ง อุปกรณ์ป้องกันรีเลย์ส่งสัญญาณทำงานที่เครื่อง LFL เพื่อให้เครื่อง LFL ส่งสัญญาณ Radar Pulse เข้าไปในสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 1

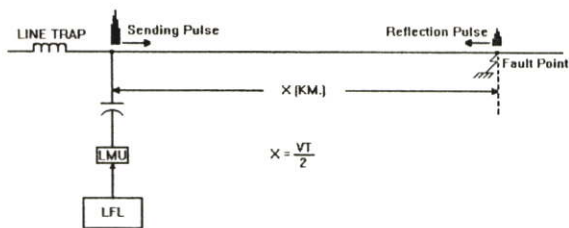


รูปที่ 1 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์หาข้อขัดข้องในระบบสายส่ง

เมื่อสัญญาณวิ่งไปถึงจุดที่เกิดเหตุขัดข้องในสายส่ง สัญญาณ Radar Pulse ที่ส่งออกไปนั้นจะสะท้อนกลับมาเข้าที่เครื่อง LFL อีกครั้งหนึ่ง เพื่อนำมาใช้คำนวณระยะทางของการขัดข้องดังแสดงในรูปที่ 2 และสมการที่ 1 ส่วนการแสดงผลสามารถแสดงผลทั้งในรูปของตัวเลขและรูปภาพ ภายในเวลาไม่เกิน 0.5 วินาที

$$x = \frac{v * t}{2} \tag{1}$$

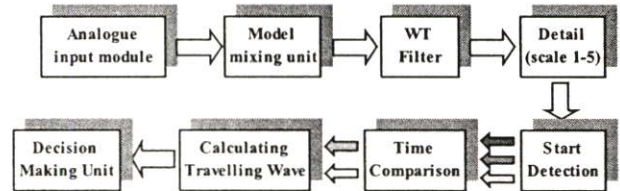
เมื่อ x = ระยะของจุดขัดข้องมีหน่วยเป็นกิโลเมตร  
 v = ความเร็วของ Pulse ในสายส่งไฟฟ้า  
 t = เวลาที่ Pulse ใช้ในการเดินทางไป- กลับ เป็นวินาที



รูปที่ 2 ทิศทางการเดินทางของกลุ่ม Pulse ไปยังจุดฟอลต์ในสายส่ง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการแปลงเวฟเล็คร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทางดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็คสำหรับแยกสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก ชุดตรวจจับฟอลต์

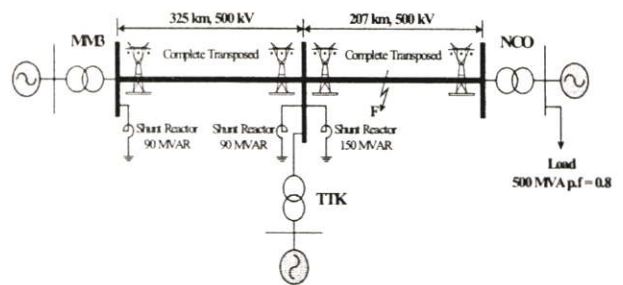
และหาค่าเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ได้ในแต่ละบัส, ชุดเปรียบเทียบเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ได้ และชุดดำเนินการตัดสินใจเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3 เทคนิคที่ได้นำเสนอบนพื้นฐานการแปลงเวฟเล็ค

3. การจำลองฟอลต์

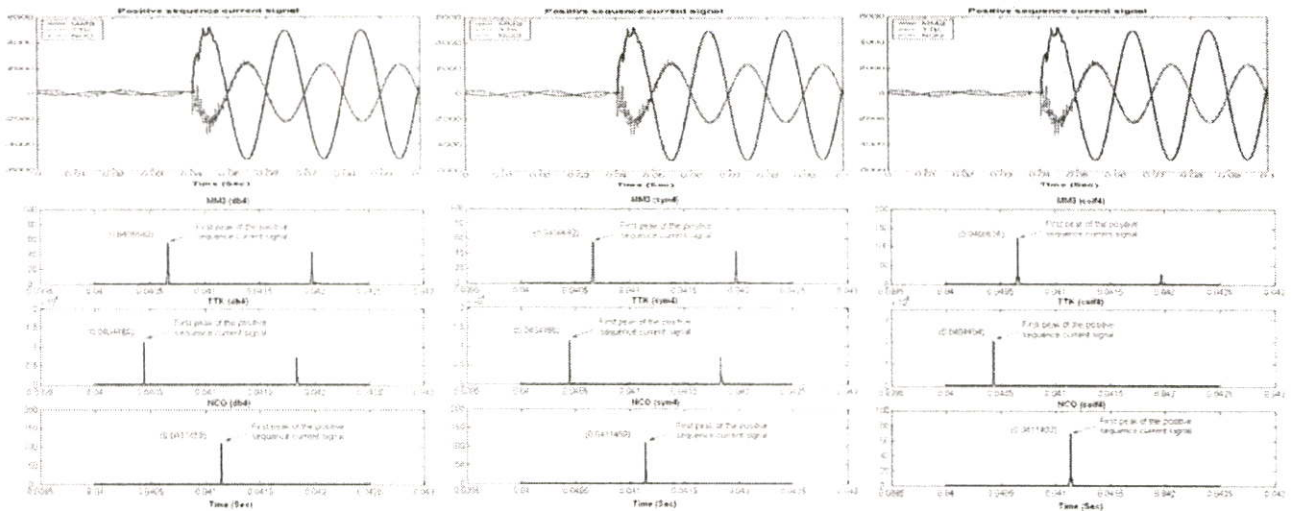
ในการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ได้นำโปรแกรม ATP/EMTP มาใช้เพื่อการจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่งแรงจลน์ 500 kV แบบสามบัส ซึ่งมีมีความยาว 325 และ 207 กิโลเมตรตามลำดับ ดังรูปที่ 4 โปรแกรม ATP/EMTP ได้ทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล (0-0.1 วินาที) เริ่มเกิดฟอลต์ที่ 0.04 วินาที มีอัตราการสุ่ม (sampling rate) 200 kHz เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากของความต้านทานลัดวงจรจึงได้ตั้งสมมติฐานให้มีค่าต้านประมาณ 10 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าโดยทั่วไปที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตเลือกใช้ในการคำนวณและทำการปรับเปลี่ยนมุมเริ่มเกิด, ตำแหน่งและชนิดของฟอลต์



รูปที่ 4 แบบของสายส่งที่ใช้ในการจำลองฟอลต์

4. การระบุตำแหน่งฟอลต์โดยอาศัยทฤษฎีคลื่นเดินทาง

เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดบนสายส่งจะเกิดสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังสายส่งทั้ง 2 ด้าน ซึ่งถ้าสามารถจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมาที่ปลายทั้ง 2 ด้านได้ ก็สามารถนำเวลามาคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง สัญญาณกระแสฟอลต์ลำดับบวกในแต่ละบัสได้นำมาผ่านการแปลงเวฟเล็คแบบเต็มหน่วย [4] ด้วยเวฟเล็คแม่ในแต่ละชนิด (db4, sym4 และ coi4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเปกจากนั้นทำการยกกำลังสองสัมประสิทธิ์ในทุกสเปกเพื่อตรวจจับฟอลต์ [3]



(ก) Daubechies 4 (db4)

(ข) Symlets 4 (sym4)

(ค) Coiflets 4 (coif4)

รูปที่ 5 เวลาที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลที่ 1 ของสัญญาณกระแสลำดับบวก ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่ง

จากการตรวจจับฟอลต์ทำให้สามารถทราบเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ซึ่งเป็นเวลาที่สัญญาณฟอลต์เดินทางมาจากจุดที่เกิดฟอลต์มายังปลายสายส่งในแต่ละบัส ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มาถึงหรือเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ได้ในแต่ละบัสด้วยเวฟเลตแม่ทั้ง 3 ชนิด โดยเวฟเลตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) และ Symlets 4 (sym4) มีค่าขนาด (amplitude) และเวลาที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้มีค่าเท่ากัน แต่เวฟเลตแม่ชนิด Coiflets 4 (coif4) มีค่าขนาดและเวลาที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้มีค่าแตกต่างกันกับอีกสองชนิดข้างต้น

จากรูปที่ 5 ในกรณี db4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ได้เป็นดังนี้

$$T3 (0.0411459) > T1 (0.0406682) > T2 (0.0404460)$$

ดังนั้นเวลาที่เร็วที่สุดสองค่าคือ 0.0404460 และ 0.0406682 ตามลำดับ ถูกเลือกเป็นข้อมูลในการคำนวณต่อไป ในส่วนกรณี sym4 และ coif4 มีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ได้เหมือนกับกรณี db4

ข้อมูลทางด้านเวลานี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาตำแหน่งฟอลต์ได้โดยแทนในสมการที่ 3 [4]

$$d = \frac{[L - v \times (t_B - t_A)]}{2} \quad (2)$$

เมื่อ  $d$  = ระยะทางที่เกิดฟอลต์วัดจากปลายด้านส่งในช่วงสายส่งหรือบัส A  
 $L$  = ความยาวของสายส่งระหว่างบัส A ถึงบัส B (กิโลเมตร)  
 $t_B - t_A$  = ผลต่างระหว่างเวลาที่ตรวจจับฟอลต์ได้เร็วที่สุด 2 ค่า  
 $v$  = ความเร็วการเดินทางของคลื่น

ตารางที่ 1 ผลเปรียบเทียบการแปลงเวฟเลตแบบ db4, sym4 และ coif4 กรณีเกิดฟอลต์ชนิด ABC ณ ตำแหน่งฟอลต์ที่ระยะทางต่างๆ ของความยาวสายส่ง

ระยะจรั้ง (km)	มุมฟอลต์ (องศ)	เวลาที่ตรวจจับฟอลต์			ตำแหน่งฟอลต์(km)		เวลาที่ตรวจจับฟอลต์			ตำแหน่งฟอลต์(km)	
		T1 (ms)	T2 (ms)	T3 (ms)	ค่านวณ	Error	T1 (ms)	T2 (ms)	T3 (ms)	ค่านวณ	Error
97.50 (MM3-TTK)	90	40.3349	40.7681	41.4681	98.1001	0.6001	40.3349	40.7681	41.4681	98.1001	0.6001
	210	40.3349	40.7681	41.4681	98.1001	0.6001	40.3349	40.7681	41.4681	98.1001	0.6001
16250 (MM3-TTK)	90	40.5571	40.5571	41.257	1625000	0.0000	40.5571	40.5571	41.257	1625000	0.0000
	210	40.5571	40.5571	41.257	1625000	0.0000	40.5571	40.5571	41.257	1625000	0.0000
19500 (MM3-TTK)	90	40.6682	40.446	41.1459	1955325	0.5325	40.6682	40.446	41.1459	1955325	0.5325
	210	40.6682	40.446	41.1459	1955325	0.5325	40.6682	40.446	41.1459	1955325	0.5325
16560 (TTK-NCO)	90	41.6569	40.5682	40.146	1662647	0.6647	41.6569	40.5682	40.146	1662647	0.6647
	210	41.6569	40.5682	40.146	1662647	0.6647	41.6569	40.5682	40.146	1662647	0.6647
18630 (TTK-NCO)	90	41.7347	40.6348	40.0793	1860812	0.2188	41.7347	40.6348	40.0793	1860812	0.2188
	210	41.7347	40.6348	40.0793	1860812	0.2188	41.7347	40.6348	40.0793	1860812	0.2188

PW037

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบการแปลงเวฟเลตแบบ db4

ชนิด พอลต์	ระยะจริง (km)	มุมพอลต์ (องศา)	เวลาที่ตรวจจับพอลต์			ตำแหน่งพอลต์(km)	
			T1 (ms)	T2 (ms)	T3 (ms)	จำนวน	Error
AG	97.50 (MM3-TTK)	90	40.2238	40.8792	41.5792	98.0852	0.5852
		210	40.2238	40.8792	41.5792	98.0852	0.5852
ABG	130 (MM3-TTK)	90	40.4460	40.6570	41.3570	131.1325	1.1325
		210	40.4460	40.6570	41.3570	131.1325	1.1325
BCG	16560 (TTK-NCO)	90	40.2238	40.8792	41.5792	166.2647	0.6647
		210	40.2238	40.8792	41.5792	166.2647	0.6647

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบการแปลงเวฟเลตแบบ sym4

ชนิด พอลต์	ระยะจริง (km)	มุมพอลต์ (องศา)	เวลาที่ตรวจจับพอลต์			ตำแหน่งพอลต์(km)	
			T1 (ms)	T2 (ms)	T3 (ms)	จำนวน	Error
AG	97.50 (MM3-TTK)	90	40.3349	40.7681	41.4681	98.1001	0.6001
		210	40.3349	40.7681	41.4681	98.1001	0.6001
ABG	130 (MM3-TTK)	90	40.4460	40.6570	41.3570	131.1325	1.1325
		210	40.4460	40.6570	41.3570	131.1325	1.1325
BCG	16560 (TTK-NCO)	90	41.6569	40.5682	40.1460	166.2647	0.6647
		210	41.6569	40.5682	40.1460	166.2647	0.6647

ตารางที่ 4 ผลเปรียบเทียบการแปลงเวฟเลตแบบ coif4

ชนิด พอลต์	ระยะจริง (km)	มุมพอลต์ (องศา)	เวลาที่ตรวจจับพอลต์			ตำแหน่งพอลต์(km)	
			T1 (ms)	T2 (ms)	T3 (ms)	จำนวน	Error
AG	97.50 (MM3-TTK)	90	40.3404	40.7737	41.4736	98.0852	0.5852
		210	40.3404	40.7737	41.4736	98.0852	0.5852
ABG	130 (MM3-TTK)	90	40.4404	40.6626	41.3625	129.4675	0.5325
		210	40.4404	40.6626	41.3625	129.4675	0.5325
BCG	16560 (TTK-NCO)	90	42.2624	40.5626	40.1515	164.6145	0.9855
		210	42.2624	40.5626	40.1515	164.6145	0.9855

หมายเหตุ

AG = พอลต์เฟส A ถัดวงจรดิน

ABG = พอลต์ระหว่างเฟส A กับ B ถัดวงจรดิน

BCG = พอลต์ระหว่างเฟส B กับ C ถัดวงจรดิน

ABC = พอลต์ชนิดสามเฟส

จากตารางที่ 1-4 แสดงผลเปรียบเทียบการแปลงเวฟเลตแบบชนิดต่างๆ โดยทำการปรับเปลี่ยนมุมเริ่มเกิดพอลต์และตำแหน่งการเกิดพอลต์ซึ่งตำแหน่งพอลต์ได้จากการคำนวณตามวิธีที่ได้นำเสนอ โดยส่วนใหญ่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 กิโลเมตร

## 5. บทสรุป

จากเทคนิคการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทความนี้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งพอลต์มากกว่า 2 บัสในสายส่งโดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย การจำลองและ

ศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณกระแสพอลต์ที่เกิดขึ้นถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP ในขณะที่ขั้นตอนวิเคราะห์พัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ ในบทความนี้พยายามนำเสนอตระกูลของเวฟเลตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบุตำแหน่งพอลต์ที่สายส่งเวฟเลตแม่ที่แตกต่างกัน 3 ชนิดได้ถูกใช้วิเคราะห์ระบุตำแหน่งพอลต์โดยใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทาง จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงมุมเริ่มเกิด, ตำแหน่งและชนิดของพอลต์ สามารถสรุปได้ว่า เวฟเลตชนิด db4 สามารถระบุตำแหน่งพอลต์ได้ดีกว่า เวฟเลตแม่ sym4 และ coif4 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.3763, 0.4248 และ 0.6755 กิโลเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5

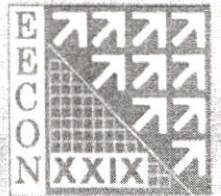
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเวฟเลตแม่แต่ละชนิด (จากข้อมูล 1600 ข้อมูล)

ประเภทของเวฟเลตแม่	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อน	ความคลาดเคลื่อน
	ต่ำสุด (km)	สูงสุด (km)	เฉลี่ย (km)
Daubechies 4 (db4)	0	1.1325	0.3763
Symlets 4 (sym4)	0	2.8354	0.4248
Coiflets 4 (coif4)	0	2.1299	0.6755

ด้วยเหตุนี้เอง วิธีที่นำเสนอเป็นการช่วยอำนวยความสะดวกให้กับหน่วยงานที่ทำหน้าที่บำรุงรักษาสายส่งให้ทำงานได้อย่างสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 1 กิโลเมตร ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกันกับเครื่องหาข้อขัดข้องในสายส่ง (LFL) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งในทางปฏิบัติ นั้นเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ อีกทั้งวิธีดังกล่าวยังช่วยลดค่าใช้จ่ายของราคาอุปกรณ์เครื่องหาข้อขัดข้องในสายส่งที่มีราคาค่อนข้างแพงได้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] "Line Fault Locator" แผนกหาข้อขัดข้องในสายส่ง, กองอุปกรณ์ปลายทาง, ฝ่ายระบบสื่อสาร, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [2] Fernando H. Magnago and Ali Abur, "Fault Location Using Wavelet", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, no.4, October 1998.
- [3] P. Makming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando, "Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transform analysis," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Yokohama, Japan, Oct 2002.
- [4] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. M. Poggi, Wavelet Toolbox User's Guide, The Math Work, Inc., June 2001.



The ECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne

# 29<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference

## การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

### Volume I

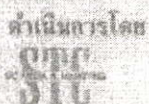
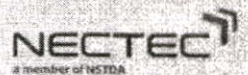


- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)



๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙

ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี



ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## รีเลย์แบบรู้ทิศทางสำหรับการป้องกันระบบส่งไฟฟ้าแบบโครงข่ายโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย

### A Directional Relay for the Protection of Transmission Network Systems Using Discrete Wavelet Transforms

ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ วราวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล เสกสรรค์ งามศรีตระกูล อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล อานันท์วัฒน์ ภูณามาร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-9902 E-mail : [s2060266@kmitl.ac.th](mailto:s2060266@kmitl.ac.th)

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการของรีเลย์แบบรู้ทิศทางแนวใหม่ สำหรับการป้องกันระบบสายส่งไฟฟ้าแบบโครงข่ายโดยการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย สัญญาณฟอลต์จะถูกจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC สัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกจากแต่ละบัสถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อระบุทิศทางของสัญญาณฟอลต์ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์ระหว่างบัสที่เกิดฟอลต์ถูกนำมาคำนวณเพื่อจัดลำดับการป้องกัน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า หลักการที่นำเสนอสามารถใช้ในการตรวจจับฟอลต์ รวมถึงการจัดลำดับการทำงานของรีเลย์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

คำสำคัญ : การแปลงเวฟเลต, รีเลย์แบบรู้ทิศทาง, ระบบสายส่ง, การจัดลำดับการป้องกัน

#### Abstract

This paper proposes a novel directional relay algorithm to protect transmission network systems with an application of discrete wavelet transform (DWT). The fault signals are simulated using PSCAD/EMTDC. The coefficients of the positive sequence current obtained from each bus are compared in order to identify the direction of fault signals. The coefficient ratio between buses that the fault occurs is calculated so that the proper protective relay sequence can be selected. It is shown that the algorithm is capable of performing the fault detection as well as arranging the protective relay sequence, with accurate results.

Keywords: Wavelet Transform, Directional relay, Transmission system, Protective relay sequence

#### 1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ กระแสฟอลต์จะมีทิศทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจึงสามารถใช้รีเลย์แบบระยะทาง เพื่อปลดวงจรสายส่งที่เกิดฟอลต์ได้ แต่ถ้านในระบบไฟฟ้ากำลังที่มี

วงจรสายส่งเชื่อมโยงกันมีลักษณะเป็นแบบโครงข่าย (Network) ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น และยังเป็นระบบที่มีความน่าเชื่อถือสูงด้วยแล้ว ถ้าเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ กระแสฟอลต์จะสามารถไหลได้สองทิศทาง จึงจำเป็นต้องใช้รีเลย์แบบรู้ทิศทางที่มีความสามารถในการตรวจสอบทิศทางการเกิดฟอลต์ และเลือกทิศทางการส่งปลดวงจรได้

รีเลย์แบบรู้ทิศทางได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานการป้องกันสายส่งไฟฟ้า โดยอาศัยเทคนิคการตรวจจับทิศทางของกระแสฟอลต์บนความถี่พื้นฐาน 50 Hz แต่อย่างไรก็ดี ยังมีข้อเสียด้านความเร็วในการตอบสนองที่ช้า ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบเทคโนโลยีการป้องกันระบบไฟฟ้าจึงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีผลงานวิจัยทางด้านเทคนิคการป้องกันแบบรู้ทิศทางแนวใหม่เกิดขึ้น โดยการใช้เทคนิคพื้นฐานการตรวจจับการกำเนิดสัญญาณกระแสหรือแรงดันฟอลต์แบบทรานเซียนต์ [1]

อย่างไรก็ดี งานวิจัยส่วนใหญ่ได้นำเสนอการระบุทิศทางของฟอลต์บนสายส่งวงจรถ้วนเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว ระบบสายส่งมีการเชื่อมโยงกันมีลักษณะเป็นแบบโครงข่าย ทำให้มีวงจรสายส่งมากกว่าสองวงจรขึ้นไป ซึ่งเห็นได้ว่าระบบมีความซับซ้อนต่อการระบุทิศทางของฟอลต์เพิ่มขึ้น

สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอหลักการแนวใหม่ของรีเลย์แบบรู้ทิศทางอีกรูปแบบหนึ่ง สำหรับงานการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบโครงข่ายที่ประกอบไปด้วยวงจรสายส่งมากกว่าสองวงจรขึ้นไป ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณฟอลต์บนสายส่ง และนำค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวกของสเกลแรก ที่ตรวจจับได้ มาใช้เปรียบเทียบและคำนวณ เพื่อระบุทิศทางของฟอลต์ และจัดลำดับการป้องกัน ตามลำดับ ซึ่งการแปลงเวฟเลตนี้เป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ อีกทั้งยังมีความแม่นยำสูง และให้การตอบสนองต่อสัญญาณฟอลต์ที่รวดเร็ว

2. ทฤษฎีการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย

เวฟเลตเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ โดยเวฟเลตแม่ (Mother Wavelets) จะทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความถี่ และการเลื่อนตำแหน่งบนแกนเวลา ซึ่งรูปแบบการแปลงเวฟเลตที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกล การวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า เรียกว่า การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT) ดังแสดงในสมการที่ 1 [2]

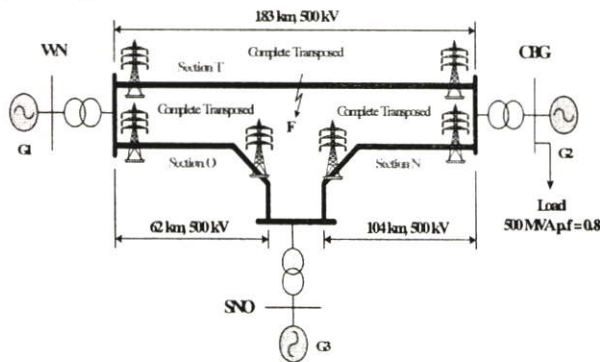
$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k2^m}{2^m}\right] \tag{1}$$

เมื่อ  $\psi\left[\frac{n - k2^m}{2^m}\right]$  เป็นเวฟเลตแม่ (mother wavelet)

- f(k) คือ สัญญาณที่ทำการแปลง
- k คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง
- m คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของการสเกล
- n คือ จำนวนข้อมูล

3. การจำลองฟอลต์

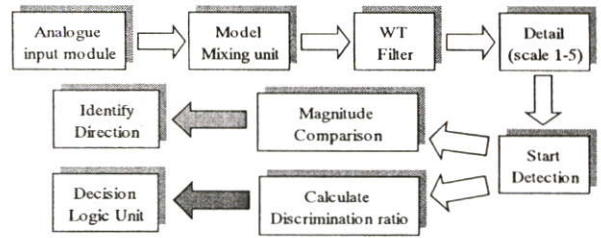
ในการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ได้นำโปรแกรม PSCAD/EMTDC มาใช้เพื่อจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่งแรงดัน 500 kV แบบโครงข่าย ซึ่งเป็นสายส่งในระบบการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าวังน้อย (WN), สถานีไฟฟ้าจอมบึง (CBG) และสถานีไฟฟ้าไทรน้อย (SNO) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยสายส่งแต่ละช่วง T, O และ N มีความยาว 183, 62 และ 104 กิโลเมตรตามลำดับ โดยทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ทั้งหมด 5 ไซเคิล (0-0.1 วินาที) เริ่มเกิดฟอลต์ที่ 0.04 วินาที มีอัตราการสุ่ม (sampling rate) 400 kHz โดยมีการปรับเปลี่ยนมุมเริ่มเกิด, ตำแหน่งและชนิดของฟอลต์



รูปที่ 1 แบบของสายส่งที่ใช้ในการจำลองฟอลต์

4. การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเลต

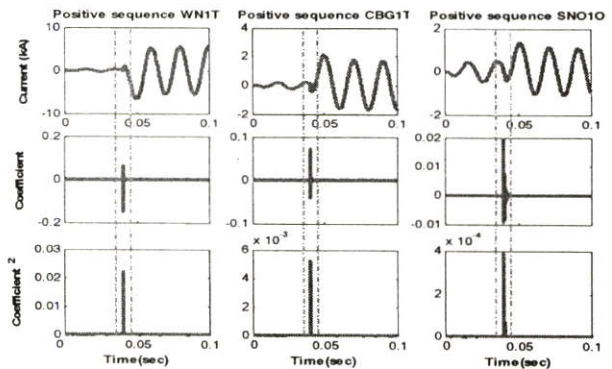
การวิเคราะห์เวฟเลตจะใช้โปรแกรม MATLAB / Wavelet Toolbox [2] โดยนำสัญญาณกระแสที่ได้ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย ให้ผลออกมาอยู่ในรูปขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก (positive sequence current) ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเลต

4.1 การตรวจจับฟอลต์

รูปแบบการตรวจจับฟอลต์ ทำได้โดยการใช้เวฟเลตแม่ชนิด daubechies 4 (db4) แยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกล (detail 1-5) และทำการยกกำลังสองของสัมประสิทธิ์ในทุกสเกลเพื่อตรวจจับฟอลต์ [3] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์เพื่อตรวจจับฟอลต์

4.2 การระบุทิศทางของฟอลต์

จากการตรวจจับฟอลต์ ทำให้ทราบขนาดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแยกสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในกระแสลำดับบวก จากนั้นนำค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สองค่าที่ตรวจจับได้ในสเกลแรกขององค์ประกอบช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสายส่งแรงดันต่างๆ ที่อยู่บนบัสเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายรูปแบบการ

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดิน ที่ระยะทาง 20% บนสายส่งส่วน T วงจรที่ 1 ด้วยการวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบของการเขียนโปรแกรมดังนี้

```

If  $WN1T_{(post)}^L > \max(WN2T_{(post)}^L, WN1O_{(post)}^L, WN2O_{(post)}^L)$ 
    then RELAY  $WN1T$  TRIP
elseif  $WN2T_{(post)}^L > \max(WN1T_{(post)}^L, WN1O_{(post)}^L, WN2O_{(post)}^L)$ 
    then RELAY  $WN2T$  TRIP
elseif  $WN1O_{(post)}^L > \max(WN1T_{(post)}^L, WN2T_{(post)}^L, WN2O_{(post)}^L)$ 
    then RELAY  $WMO$  TRIP
elseif  $WN2O_{(post)}^L > \max(WN1T_{(post)}^L, WN2T_{(post)}^L, WN1O_{(post)}^L)$ 
    then RELAY  $WN2O$  TRIP
end
    
```

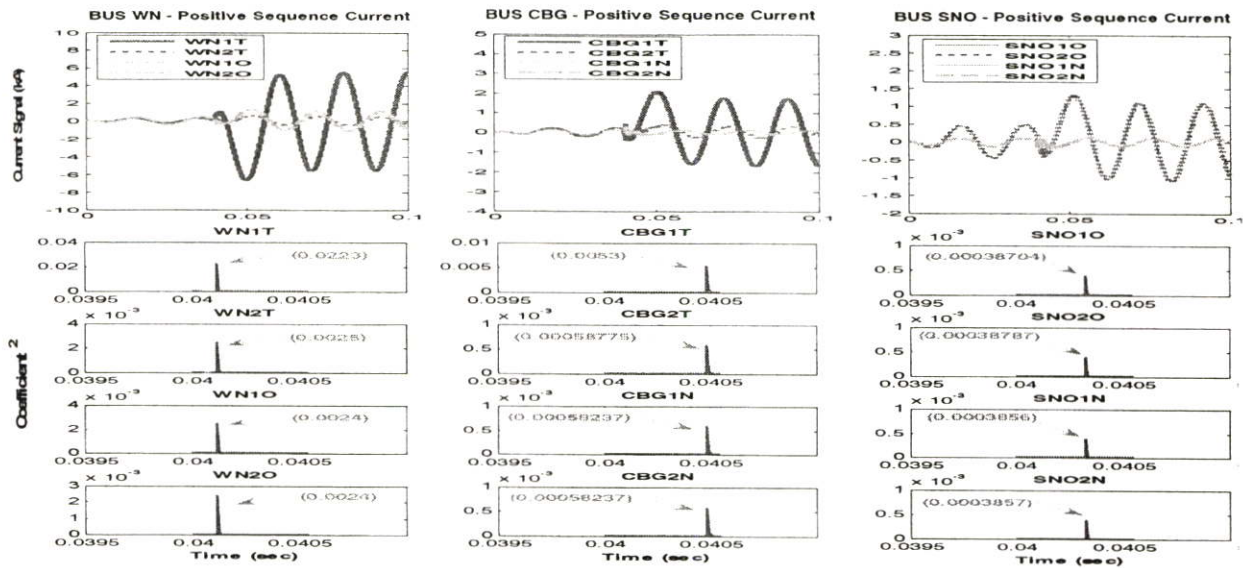
เมื่อ  $L$  = สเกลที่ใช้ในการวิเคราะห์เวฟเล็ด

จากรูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่าคือ 0.0223 และ 0.0053 (ด้าน WN1T และ CBG1T ตามลำดับ) แสดงว่าฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งส่วน T ในวงจรที่ 1 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์จาก WN1T จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของ WN2T, WN1O และ WN2O ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์จาก CBG1T สามารถทำได้ในทำนองเดียวกันกับบัส WN1T จากหลักการดังกล่าวพบว่า ทิศทางของฟอลต์มีทิศทางตรงกันกับทิศทางของรีเลย์ทางด้าน WN1T และ CBG1T (Forward line) และจะปลดวงจรที่ 1 ของสายส่งส่วน T ออกจากระบบ ในขณะที่รีเลย์ทางด้านอื่นๆ มีทิศทางไม่ตรงกันกับทิศทางของฟอลต์ (Reverse line) สายส่งจึงจ่ายโหลดได้ตามปกติ

4.3 การจัดลำดับการป้องกัน

หมายถึงการกำหนดหน้าที่การทำงานของรีเลย์ โดยให้รีเลย์ที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ปลดวงจรก่อน และรีเลย์ตัวที่อยู่ห่างออกไป ปลดวงจรทีหลัง ซึ่งจากข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสองค่า สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาลำดับการป้องกัน โดยแทนลงในสมการที่ 2 [4]

$$\text{Discrimination Ratio} = \log(I_{ef} / I_{er}) \quad (2)$$

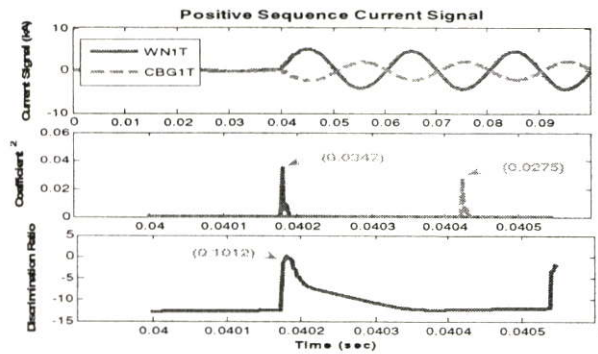


รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ในสเกลที่ 1 ของสัญญาณกระแสลำดับบวก ณ ปลายแต่ละด้านของสายส่ง

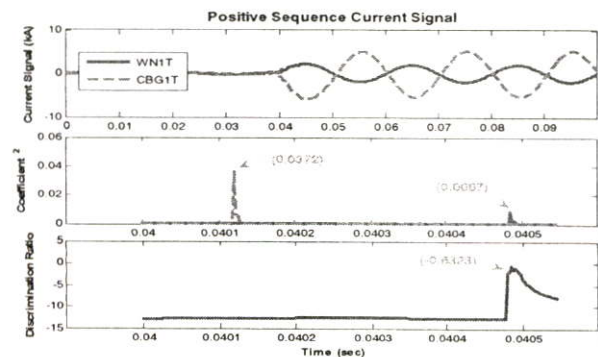
- หมายเหตุ: WN1T - CBG1T = สายส่งส่วน T วงจรที่ 1      WN2T - CBG2T = สายส่งส่วน T วงจรที่ 2
- WN1O - SNO1O = สายส่งส่วน O วงจรที่ 1      WN2O - SNO1O = สายส่งส่วน O วงจรที่ 2
- SNO1N - CBG1N = สายส่งส่วน N วงจรที่ 1      SNO2N - CBG2N = สายส่งส่วน N วงจรที่ 2

เมื่อ  $I_{ef}$  = ค่าสัมประสิทธิ์วัดจากปลายด้านส่งในช่วงสายส่งหรือบัส A  
 $I_{er}$  = ค่าสัมประสิทธิ์วัดจากปลายด้านรับในช่วงสายส่งหรือบัส B

ถ้าผลการคำนวณออกมาเป็นบวก รีเลย์ที่ติดตั้งอยู่ทางด้านส่งปลดวงจรก่อน และรีเลย์ทางด้านรับปลดวงจรทีหลัง ในทางกลับกันถ้าผลออกมาเป็นลบรีเลย์ทางด้านรับ ดำเนินการปลดวงจรก่อน และรีเลย์ทางด้านส่งจึงปลดวงจรทีหลัง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของรีเลย์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดินที่ระยะทาง 30%



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของรีเลย์ กรณีเกิดฟอลต์เฟส A ลงดินที่ระยะทาง 80%

จากรูปที่ 3-6 พบว่า รีเลย์สามารถตรวจจับและระบุทิศทางของฟอลต์ รวมถึงการจลลดับการป้องกันตามวิธีการที่นำเสนอได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ โดยส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมากกว่า 99%

**5. บทสรุป**

จากเทคนิคการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในบทความนี้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาวิธีการระบุทิศทางของฟอลต์บนสายส่งมากกว่าสองวงจร ที่มีลักษณะของวงจรสายส่งเชื่อมโยงกันเป็นแบบโครงข่าย โดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สัญญาณกระแส

ฟอลต์ถูกจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ในขณะที่ขั้นตอนการวิเคราะห์พัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การตรวจจับและระบุทิศทางมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% และการจลลดับการป้องกันมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงถึง 99.691% ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยรูปแบบของฟอลต์เฟสเดียว, ฟอลต์ระหว่างเฟส และฟอลต์สามเฟสให้ค่าความถูกต้อง 100% โดยความผิดพลาดพบในกรณีเกิดฟอลต์สองเฟสลงดิน

ตารางที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสำหรับผลการทดสอบการตรวจจับ, ระบุทิศทาง และจลลดับการป้องกัน (จากชุดข้อมูล 1080 ข้อมูล)

ชนิดฟอลต์	% ความถูกต้อง (% Accuracy)		
	การตรวจจับ	การระบุทิศทาง	จลลดับการป้องกัน
SLG	100%	100%	100%
DLG	100%	100%	98.77%
L-L	100%	100%	100%
ABCG	100%	100%	100%
Average	100%	100%	99.691%

จากผลลัพธ์ที่ได้ วิธีที่นำเสนอจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้ในงานการป้องกันสายส่งไฟฟ้าแบบโครงข่ายที่มีความซับซ้อน อีกทั้งยังให้การตอบสนองที่ถูกต้องและรวดเร็ว ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Z Q Bo, A T Johns, R K Aggarwal, "A New Directional Relay Based on the Measurement of Fault Generate Current transients", Proceeding of the IEE International Conference on Developments in Power System Protection, UK, March, 1997.
- [2] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim and J. M. Poggi, Wavelet Toolbox User's Guide, The Math Work, Inc., June 2001.
- [3] P. Makming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando, "Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transform analysis," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Yokohama, Japan, Oct 2002.
- [4] Z. Chen, Z. Q. Bo, Xiang-ning Lin, B R J Caunce, "Integrated Line and Busbar Protection Scheme Based on Wavelet Analysis of Fault Generated Transient Current Signals", International conference on power system technology, Singapore, Nov. 2004.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤษภาคม 2522 ที่จังหวัดลพบุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2545
การทำงาน	วิศวกรไฟฟ้า Fujitsu (Thailand) Co., Ltd. พ.ศ. 2545 - 2547

### ผลงานทางวิชาการ

“การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยสำหรับระบุตำแหน่งฟอลต์ในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบสามบัส (Discrete Wavelet Transforms for Detecting Fault Location in a Three-Bus Transmission System)”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON-28), 20-21 ตุลาคม 2548, หน้า 393-396

“รีเลย์แบบรู้ทิศทางสำหรับการป้องกันระบบส่งไฟฟ้าแบบโครงข่ายโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (A Directional Relay for the Protection of Transmission Network Systems Using Discrete Wavelet Transforms)”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON-29), 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 37-40