

การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์  
ฟอลต์ในสายส่งแรงสูง

WAVELET TRANSFORM AND NEURAL NETWORK FOR FAULT  
ANALYSIS IN DOUBLE-CIRCUIT TRANSMISSION LINES

ฐิติพงษ์ นิยมสัตย์  
THITIPONG NIYOMSAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2289-4

**WAVELET TRANSFORM AND NEURAL NETWORK FOR FAULT  
ANALYSIS IN DOUBLE – CIRCUIT TRANSMISSION LINES**

**THITIPONG NIYOMSAT**

**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**

**2006**

**ISBN 974-15-2289-4**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแปลงเวฟเลตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์  
ในสายส่งแรงดันสูง  
WAVELET TRANSFORM AND NEURAL NETWORK FOR FAULT  
ANALYSIS IN DOUBLE-CIRCUIT TRANSMISSION LINES  
นักศึกษา นายจิตติพงษ์ นิยมสัจจ์  
รหัสประจำตัว 45061015  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศุภี บรรจงจิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.มณฑล	ตีลาจินดาไกรฤกษ์
รศ.นัทสน์	กฤษณจินดา
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ
ดร.ชาย	ชมภูอินไหว
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 เมษายน 2549 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จากรัตน์ เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแปลงเวฟเล็ทและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ ฟอลต์ในสายส่งแรงดัน
นักศึกษา	นาย จูติพงษ์ นิยมศักดิ์
รหัสประจำตัว	45061015
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2459
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุภี บรรจงจิตร

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่งแรงดัน 230 kV โดยใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี โดยทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP และคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งด้วยโปรแกรม ATP-LCC ในรูปแบบของ J.marti จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาทำการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ทแม่ชนิด Daubechies4 (db4) ในการวิเคราะห์เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกจากสัญญาณฟอลต์มา 5 สเกล ค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทจะถูกนำมาพิจารณาและทำการออกแบบการวิเคราะห์ฟอลต์โดยจะทำการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์และประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยในสเกลที่ 1 มาเป็นข้อมูลอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี จากนั้นทำการฝึกสอนและทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายทั้งสองชนิดโดยใช้ข้อมูลชุดเดียวกันและนำผลการทดลองที่ได้ทั้ง 3 วิธีมาเปรียบเทียบกัน จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกันแต่การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการวิเคราะห์สามารถให้คำตอบในการวิเคราะห์ฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วกว่าการใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียว

<b>Thesis Title</b>	Wavelet Transform and Neural Network for Fault Analysis in Double-Circuit Transmission Lines
<b>Student</b>	Mr. Thitipong Niyomsat
<b>Student ID.</b>	45061015
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Sulee Bunjongjit

### ABSTRACT

This thesis presents a signal analysis of 230 kV double circuit transmission line faults, and compares 3 methods between 1) discrete wavelet transform (DWT) , 2) DWT and back-propagation (BP) neural network ,and 3) DWT and radial basis function (RBF) neural network. By performing the simulations of fault signal with ATP/EMTP program and calculate the parameter of transmission line with ATP-LCC program by J.marti model. After that, leading the obtained signal performs discrete wavelet transform by using the mother wavelet daubechies4 (db4), and analyze the result of db4 to be decomposed of high frequency component from signal 5 scales. The obtained values of wavelet transform are brought to design fault analysis by performance indicate the specify fault circuit, fault location and fault type. The outcome of wavelet transform data of first scale is input data of back-propagation neural network and radial basis function neural network. Using the same data of neural network performs the training and tests the efficiency of neural network, and compares the result of 3 methods experiment. The finding of this research shows that the experiment results of the 3 methods evaluate the nearly error values. But the using of neural networks can analyze and reply the fault analysis faster than the using discrete wavelet transform alone.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก รศ. ศุติ บรรจงจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำ แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณ พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ ฝ่ายวิศวกรรมระบบสายส่ง จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณ สิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล รุ่นพี่ปริญญาโทสำหรับความช่วยเหลือให้ คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณ โอฬาร ธรรมานนท์ และ คุณ อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล รุ่นพี่และเพื่อน นักศึกษาร่วมรุ่นปริญญาโทสำหรับให้คำปรึกษาต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ 2 ท่านสุดท้ายที่มีความสำคัญยิ่งต่อข้าพเจ้าคือ บิดา มารดา ซึ่งเป็นผู้ที่ได้ให้ อุดม บัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความ ช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิตติพงษ์ นิยมสัจย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของการวิเคราะห์สัญญาณในระบบป้องกันสายส่ง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	6
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา.....	7
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 การวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่ง.....	9
2.1 ทฤษฎีคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory).....	9
บทที่ 3 การแปลงเวฟเล็ต.....	16
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต.....	16
3.1.1 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform : FT).....	16
3.1.2 การแปลงกาบอร์ (Gabor Transform :GT).....	18
3.1.3 การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short-Time Fourier Transform :STFT).....	18
3.2 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT).....	20
3.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT).....	22
3.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT).....	24

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA).....	25
3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis).....	29
3.5 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet).....	32
3.5.1 Haar Wavelet.....	32
3.5.2 Daubechies Wavelet.....	33
3.5.3 Biorthogonal Wavelet.....	33
3.5.4 Coiflets Wavelet.....	34
3.5.5 Symlets Wavelet.....	35
3.5.6 Morlet Wavelet.....	35
3.5.7 Mexican Hat Wavelet.....	35
3.5.8 Meyer Wavelet.....	36
บทที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียม.....	40
4.1 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม.....	40
4.2 โครงข่ายประสาทตามทัศนคติชีววิทยา.....	41
4.3 โครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติของคอมพิวเตอร์.....	42
4.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks).....	42
4.4.1 คุณลักษณะสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียม.....	43
4.4.2 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม.....	43
4.4.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชั้นเดียว (Single Layer).....	44
4.4.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น (Multi Layer).....	44
4.4.2.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดคอมเพทิทีฟ (Competitive Layer).....	45
4.4.3 การเรียนรู้ของโครงข่าย.....	46
4.4.3.1 การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning).....	46
4.4.3.2 การเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning).....	46
4.4.4 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม.....	46
4.5 ฟังก์ชันกระตุ้น(Activation function).....	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation NN).....	49
4.6.1 โครงสร้าง.....	49
4.6.2 แนวคิด.....	50
4.7 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (Radial Basis Function NN).....	56
4.7.1 โครงสร้าง.....	56
4.7.2 แนวคิด.....	57
บทที่ 5 การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์.....	60
5.1 การจำลองฟอลต์.....	60
5.1.1 แบบจำลองในการสัญญาฟอลต์.....	60
5.1.2 แบบจำลองสายส่ง.....	61
5.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 230 kV.....	61
5.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์.....	63
5.2 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....	66
5.2.1 การตรวจจับและระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ (Detection and specify fault circuit).....	68
5.2.2 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault location).....	71
5.2.3 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault classification).....	73
5.2.3.1 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์.....	73
5.2.3.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุฟอลต์ลงดิน.....	74
5.3 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....	76
5.3.1 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP).....	77
5.3.1.1 การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์.....	78
5.3.1.2 การหาตำแหน่งฟอลต์.....	81
5.3.1.3 การระบุประเภทฟอลต์.....	82
5.3.2 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF).....	84
5.3.2.1 การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์.....	84
5.3.2.2 การหาตำแหน่งฟอลต์.....	86
5.3.2.3 การระบุประเภทฟอลต์.....	87

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	88
6.1 รูปแบบการนำเสนอ.....	88
6.1.1 วิธีการที่ใช้ในการทดลอง.....	88
6.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละตาราง.....	88
6.1.3 รูปแสดงการสรุปผลการทดลองที่ได้จากตาราง.....	89
6.2 ผลการทดลอง.....	89
6.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	178
บทที่ 7 บทสรุป.....	183
เอกสารอ้างอิง.....	185
ประวัติผู้เขียน.....	187

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณของเวฟเล็ตระกูล Daubechies ที่ N มีค่าเป็น 4,6,8,10,12,14,16 และ 20.....	37
3.2 แสดงคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่แต่ละชนิด.....	38
5.1 แสดงความเร็วคลื่นเดินทางและเมตริกซ์การแปลงของระบบจำลอง.....	69
5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสในแต่ละเฟสในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์ ที่ปลายค่าน MM3 กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	75
5.3 ผลการระบุประเภทฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายค่าน MM3.....	76
5.4 แสดงค่าเอาต์พุตในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	79
5.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดฝึกสอนและทดสอบ และเวลาที่ใช้ ในการฝึกสอน.....	80
5.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดฝึกสอนและทดสอบ และเวลาที่ใช้ ในการฝึกสอน.....	82
5.7 แสดงค่าเอาต์พุตในการระบุประเภทฟอลต์ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	83
5.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดฝึกสอนและทดสอบ และเวลาที่ใช้ ในการฝึกสอน.....	83
5.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ.....	85
5.10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ.....	87
5.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ.....	88
6.1 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	89-90
6.2 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	95-96
6.3 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	97-101
6.4 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	105-106
6.5 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	110-111



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....2
1.2	แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาของเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์.....4
1.3	แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์.....8
2.1	แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง ณ. เฟสใด ๆ ( $v$ และ $i$ เป็นฟังก์ชันของ $x$ และ $t$ ).....10
2.2	แสดงคลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ ที่เวลา $t_1$ และ $t_2$ .....13
2.3	แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสภาวะที่เกิดพอลต์บนสายส่ง.....14
3.1	แสดงการแปลงฟูเรียร์.....17
3.2	แสดงการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น.....19
3.3	ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies20.....20
3.4	แสดงลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า $a, b$ ต่าง ๆ กัน.....21
3.5	ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต.....21
3.6	แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต.....22
3.7	แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต.....23
3.8	แสดงขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล.....23
3.9	แสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT).....24
3.10	ลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของสเปซของเวกเตอร์.....27
3.11	ลักษณะการกระจาย (Decomposition) สัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่าง ๆ.....28
3.12	แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ.....30
3.13	แสดงการแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ.....30
3.14	แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์.....31
3.15	แสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) ในสเกลที่.....32
3.16	แสดงลักษณะของ Haar Wavelet.....33
3.17	แสดงลักษณะของ Daubechies Wavelet.....33
3.18	แสดงลักษณะของ Biorthogonal Wavelet.....34
3.19	แสดงลักษณะของ Coiflets Wavelet.....34
3.20	แสดงลักษณะของ Symlets Wavelet.....35
3.21	แสดงลักษณะของ Morlet Wavelet.....35
3.22	แสดงลักษณะของ Mexican Hat Wavelet.....36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 แสดงลักษณะของ Meyer Wavelet.....	36
4.1 แสดงนิเวรอนตามทัศนคติชีววิทยาแบบทั่วไป.....	42
4.2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม.....	43
4.3 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....	44
4.4 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	45
4.5 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดคอมเพททิทิฟว์.....	45
4.6 แสดงไอเดนติตี้ฟังก์ชัน (Identity function).....	47
4.7 แสดงฟังก์ชัน ไบนารีซิกมอยด์.....	48
4.8 แสดงฟังก์ชัน ไฮโปลาร์ซิกมอยด์.....	48
4.9 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน.....	49
4.10 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี.....	57
5.1 แสดงการจำลองระบบสายส่งวงจรคู่.....	61
5.2 แสดงเสาแบบ DAV1 ที่ใช้กับสายส่งวงจรคู่ 230 kV.....	62
5.3 แสดงวงจรในการจำลองฟอลต์แบบ ABG วงจรที่ 2 ที่ 37.72 km ของระบบจำลอง.....	64
5.4 แสดงสัญญาณฟอลต์ของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 1.....	64
5.5 แสดงสัญญาณฟอลต์ของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 2.....	65
5.6 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 1.....	65
5.7 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 2.....	66
5.8 แสดงสัญญาณแรงดันฟอลต์ที่พิจารณาด้านปลายส่งทั้ง 2 วงจร (MM3).....	67
5.9 แสดงสัญญาณกระแสฟอลต์ที่พิจารณาด้านปลายส่งทั้ง 2 วงจร (MM3).....	68
5.10 แสดงผลการแปลงเวฟเล็ทของกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งด้านส่งทั้ง 2 วงจร.....	70
5.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังสองของกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งด้านส่งทั้ง 2 วงจร.....	70
5.13 แสดงพีคแรกทีวัดได้ของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งแต่ละด้านในสเกลที่ 1...72	
5.14 แสดงการแปลงเวฟเล็ทของกระแสฟอลต์ที่วัดได้จากปลายสายส่งด้าน MM3.....	75
5.15 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน.....	78
5.14 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกที่วัดได้จากปลายสายส่งด้านส่ง (MM3) ทั้ง 2 วงจร.....	79

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 แสดงเวลาที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็คของกระแสวิ่งประกอบลำดับบวทที่วัดได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน ทั้ง 2 วงจร.....	81
5.16 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็คของกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับ ศูนย์ที่วัดได้จากปลายสายส่งด้านส่ง (MM3) ทั้ง 2 วงจร.....	82
5.17 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมนชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี.....	84
6.1 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	92
6.2 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	92
6.3 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	93
6.4 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	96
6.5 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	97
6.6 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	97
6.7 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	101
6.8 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	102
6.9 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1.....	102
6.10 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	106
6.11 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2.....	107



# บทที่ 1

## บทนำ

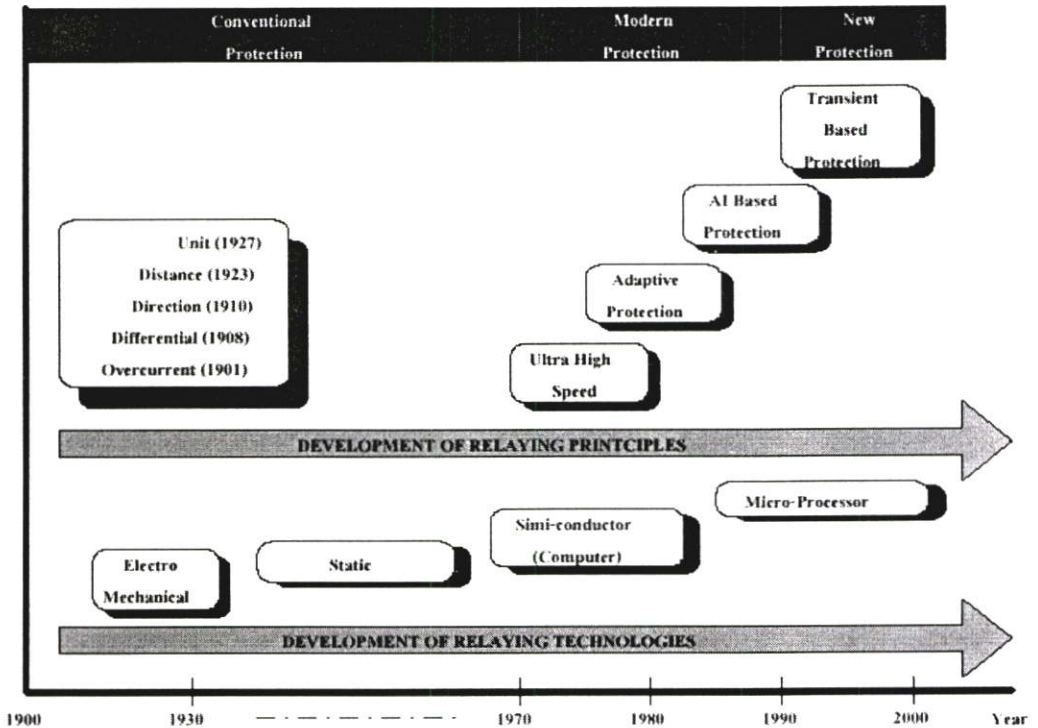
ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่งเป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะทำให้อุปกรณ์หลักในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหายแล้วยังมีผลกระทบต่อการทำงานของไฟฟ้าไปสู่แหล่งอุตสาหกรรมและเขตชุมชน ดังนั้นจึงมีการเน้นความสำคัญไปยังการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องในการปรับปรุงการป้องกันความเสียหายของสายส่งไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการขัดขวางในการเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "ฟอลต์" (Fault)

การพิจารณาฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะพิจารณาในส่วนของโดเมนความถี่ สิ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดทรานเซียนต์จะมีส่วนประกอบของความถี่สเปกตรัมรวมอยู่ องค์ประกอบที่เกิดขึ้นนี้สามารถบ่งบอกฟอลต์และการกระจายของความถี่โดยตลอด สเปกตรัมนี้จะมีแนวตามสัญญาณกระแสตรง (DC) ขององค์ประกอบความถี่สูง การป้องกันระบบไฟฟ้าทำได้โดยการวัดองค์ประกอบความถี่ที่เกิดขึ้นสำหรับการตรวจจับฟอลต์ เทคนิคเดิมที่ใช้ในการป้องกันจะพิจารณาสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นโดยทำการกรองออกมาวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบความถี่สูงนอกจากจะทำหน้าที่บ่งบอกเกี่ยวกับฟอลต์ที่เกิดขึ้นแล้วยังสามารถใช้ประโยชน์ในการพัฒนาหลักการป้องกันของอุปกรณ์ที่ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดความถี่ที่เกิดขึ้นได้ การนำประโยชน์ขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นไปใช้งานนั้น ปัญหาเดียวที่เกิดขึ้นก็คือ การพัฒนาความเร็วในการตรวจจับของเทคโนโลยีไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคพื้นฐานต่าง ๆ ในการตรวจจับฟอลต์ในลักษณะต่าง ๆ หรือ "การป้องกันพื้นฐานด้วยสัญญาณทรานเซียนต์" (Transient Based Protection "TBP") เทคนิคการป้องกันพื้นฐานด้วยสัญญาณทรานเซียนต์จะทำหน้าที่โดยการดึงเอาสัญญาณความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณฟอลต์มาทำการออกแบบอุปกรณ์ในการตรวจจับ เทคนิคนี้มีความแตกต่างไปจากเทคนิคพื้นฐานอื่น เช่น เทคนิคการป้องกันแบบทฤษฎีคลื่นเดินทาง เทคนิคการป้องกันพื้นฐานด้วยสัญญาณทรานเซียนต์นี้ไม่มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์และยังสามารถให้ความถูกต้องในการแยกและดึงเอาความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณความถี่มาพิจารณา

### 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของการวิเคราะห์สัญญาณในระบบป้องกันสายส่ง [1]

จากรูปที่ 1.1 ได้แสดงแผนภาพการพัฒนาการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมานับตั้งแต่การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กที่เรียกว่า "แม่เหล็กทางกล" (Electro-mechanical) เป็นอันดับแรกในปี 1901 ในระบบการป้องกันไฟฟ้าซึ่งใช้พื้นฐานหลักการทำงานของกระแสเกิน ซึ่งหลักการทำงานของรีเลย์ก็มีลักษณะต่างๆ

กันออกไป โดยจะทำการแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาของการพัฒนาภายใน 30 ปีแรก ดังตัวอย่างคือ การป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection) ในปี 1908, การป้องกันแบบทิศทาง (Direction protection) ในปี 1910, การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection) ในปี 1923 และการป้องกันแบบหน่วย (Unit protection) ในปี 1927 หลักการของรีเลย์ที่ได้กล่าวไปนั้นจะใช้พื้นฐานจากการวัดความถี่กำลังจากการตรวจจับฟอลต์ จากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม พื้นฐานของอุปกรณ์ป้องกันเบื้องต้นจะกล่าวถึงการปรับปรุงการพัฒนาของแม่เหล็กทางกล, รีเลย์แบบสถิตย์ (Static relay), อุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor), วงจรรวม (Intregated circuit) และไมโครโปรเซสเซอร์ อย่างไรก็ตามในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา การศึกษาค้นคว้าพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเพิ่มความสมบูรณ์ของเทคโนโลยีรีเลย์ ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานที่ยังคงใช้กันอยู่จนถึงทุกวันนี้



รูปที่ 1.1 แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง [1]

การนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้เป็นประวัติศาสตร์หน้าใหม่ของการป้องกันระบบไฟฟ้า ซึ่งมีเป้าหมายที่จะพัฒนาระบบป้องกันให้ทันสมัยขึ้น นับตั้งแต่ช่วงปี 1960 จึงมีแนวคิดริเริ่มในการพัฒนาความเร็วของรีเลย์ป้องกันโดยใช้การป้องกันแบบดิจิทัลนำมาป้องกันสายส่งไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่น ๆ ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านคอมพิวเตอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ สามารถนำมาใช้ปรับปรุงการวิเคราะห์สัญญาณและการตัดสินใจ

ของรีเลย์ให้มีความรวดเร็วและถูกต้องทำให้รีเลย์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จึงนับเป็นการเริ่มเข้าสู่ยุคของรีเลย์แบบดิจิทัลหรือลักษณะของรีเลย์แบบนิวเมอรัลรีเลย์ (Numerical relay) ที่มีการทำงานในลักษณะรีเลย์ป้องกันความเร็วสูง (Ultra high speed) อย่างแท้จริง

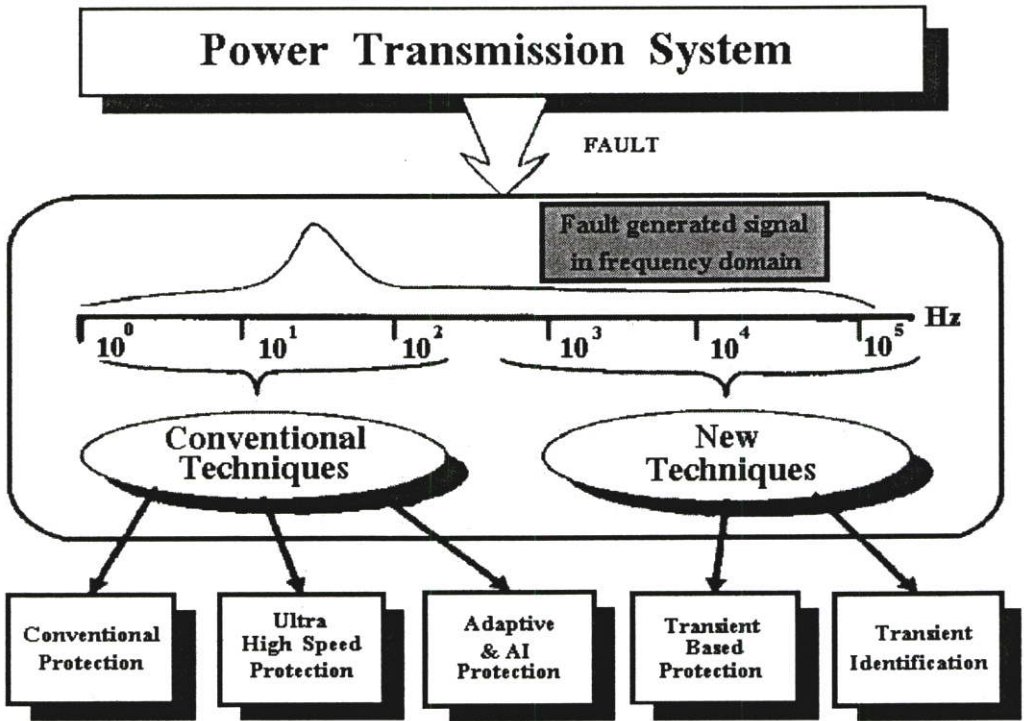
ต่อมาได้มีการพัฒนารีเลย์ป้องกันความเร็วสูง โดยใช้พื้นฐานทฤษฎีคลื่นเดินทางและเพิ่มองค์ประกอบสำหรับป้องกันสายส่งเริ่มใช้ตั้งแต่ปี 1970 โดยมีวัตถุประสงค์คือ ใช้ประโยชน์จากฟอลต์ในลักษณะต่างๆ เพื่อทำการป้องกันเป็นเป้าหมายหลัก การค้นคว้าวิธีการเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของรีเลย์เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเสถียรภาพ จากการศึกษาพบว่าการเดินทางของคลื่นที่เป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นจากองค์ประกอบทั่วไปที่ได้จากสัญญาณฟอลต์ สามารถใช้ในการตรวจจับฟอลต์ได้อย่างรวดเร็ว

หลักการป้องกันแบบปรับตัวได้ (Adaptive protection) ได้พัฒนาในระหว่างปี 1980 จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหลักการนี้มีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การป้องกันแบบระยะทาง การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า และระบบปิดวงจรซ้ำอัตโนมัติ (Autoreclosure) โดยมีจุดเด่นก็คือ การปรับปรุงผลตอบสนองของระบบ การเพิ่มความเร็วและลดต้นทุน

นอกจากนี้ในช่วงต้นของทศวรรษที่ 90 ยังมีการนำเสนอแนวความคิดในการนำเทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent : AI) ในรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิเคราะห์และตัดสินใจของรีเลย์ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการสอนและความหลากหลายของข้อมูลรูปแบบทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นเพียงการพัฒนาในรูปแบบของอุปกรณ์และเทคนิคการตัดสินใจของรีเลย์เพียงเท่านั้น แต่ยังคงอาศัยหลักการสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์เพื่อวิเคราะห์ความถี่พื้นฐานที่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตอยู่ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 1 ไซเคิล เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และตัดสินใจ เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นพบว่าจะมีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงรวมอยู่ด้วยซึ่งโดยทั่วไปจะถือว่าเป็นสัญญาณรบกวนและต้องกำจัดออก จึงทำให้ต้องพิจารณาถึงการกำจัดสัญญาณรบกวนเพื่อให้มีข้อมูลที่ถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วย และเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าองค์ประกอบความถี่พื้นฐานเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอกับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ รวมทั้งการกำจัดสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนั้นจะเป็นการทิ้งข้อมูลที่สำคัญของสัญญาณฟอลต์ออกไปอีกด้วย

ในช่วงปลายของทศวรรษที่ 90 ได้มีแนวความคิดใหม่เกิดขึ้นมาโดยเปลี่ยนแนวโน้มของการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานมาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง เนื่องจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสัญญาณฟอลต์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น และเมื่อพิจารณาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของอุปกรณ์การวัดและไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันพบว่าสามารถสนับสนุนแนวความคิดนี้ให้มาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้มากขึ้น จึงทำให้แนวความคิดนี้ได้รับความสนใจและมีการนำมาทำการศึกษาและวิจัยเพื่อใช้ในการพัฒนาหลักการวิเคราะห์สัญญาณของระบบป้องกันรูปแบบใหม่ในลักษณะการ

ป้องกันพื้นฐานด้วยสัญญาณทรานเซียนต์ (Transient base protection) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลงซึ่งจะส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาที่ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาของเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ [1]

คำจำกัดความของการป้องกันทรานเซียนต์คือ "การป้องกันระบบสายส่งไฟฟ้าโดยการตรวจจับความถี่สูงที่เกิดจากฟอลต์ในลักษณะต่าง ๆ" สัญญาณทรานเซียนต์ที่เกิดจากฟอลต์สามารถบ่งบอกถึง ชนิด, ทิศทาง, ตำแหน่ง และเวลาที่เกิดฟอลต์ ข้อมูลทั้งหมดได้มาจากโดเมนความถี่ดังรูปที่ 1.2 เทคนิคการป้องกันด้วยความถี่พื้นฐานจะพิจารณาจากสัญญาณความถี่สูงที่ถูกรบกวนและทำการกรองออกมา ผลที่ได้สามารถนำมาศึกษาออกแบบตัวกรองเพื่อทำการตรวจจับฟอลต์ แต่ก็มีข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่ไม่สามารถดึงเอาความถี่สูงที่ต้องการได้ นอกจากนั้นการค้นคว้ายังแสดงให้เห็นว่าสัญญาณความถี่สูงในระบบไฟฟ้า ถ้าสามารถตรวจจับได้ยังสามารถใช้เป็นประโยชน์ไม่เพียงแต่การพัฒนาเทคนิคการป้องกันแบบใหม่ ๆ แต่ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาใน ส่วนต่าง ๆ ของงานวิศวกรรมดังแสดงในรูปที่ 1.2 ที่แสดงพฤติกรรมของปรากฏการณ์ทรานเซียนต์ของระบบไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาถึงรูปแบบของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง รูปแบบเดิมในการพิจารณาฟอลต์จะใช้การแปลงฟูเรียร์ที่

เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีความแม่นยำด้านความถี่ และเหมาะสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่แน่นอน (Stationary signal) แต่ข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์คือ ในกรณีที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non-Stationary signal) เช่น สัญญาณทรานเซียนต์รูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านเวลาที่ขาดหายไป ซึ่งข้อมูลทางด้านเวลาเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ และต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 1 ไซเคิล จากการศึกษาพบว่า การแปลงเวฟเล็ตมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น ฟลัด อันเนื่องมาจากคุณสมบัติการปรับระดับความละเอียดและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์ จึงทำให้สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียก็คือ ไม่สามารถบอกถึงลักษณะฟลัดได้ด้วยตัวมันเองจึงต้องทำการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ ซึ่งต้องใช้ข้อมูลจากตัวอย่างสัญญาณฟลัดจำนวนมากและต้องคอยปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการออกแบบไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ครอบคลุมในทุก ๆ ลักษณะของสัญญาณฟลัด จึงทำให้มีการนำประโยชน์ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่เรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียม ที่เป็นการประมวลผลข้อมูลที่มีพฤติกรรมเหมือนกับโครงข่ายประสาทชีวภาพโดยมีอัลกอริทึมที่เลียนแบบการเรียนรู้ของสมองมนุษย์ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตในการวิเคราะห์สัญญาณฟลัดในระบบไฟฟ้ากำลัง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประยุกต์การใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อวิเคราะห์ฟลัดที่เกิดขึ้นบนสายส่งแรงจูงระบบ 230 kV และนำผลที่ได้มาระบุการเกิดฟลัดใน 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. การตรวจจับแรงจูงที่เกิดฟลัดขึ้นบนสายส่งแรงจูง
2. การหาดำแหน่งฟลัดที่เกิดขึ้นว่าอยู่ตำแหน่งใดบนสายส่ง
3. การระบุประเภทของฟลัดที่เกิดขึ้นว่าเป็นฟลัดที่เฟสใด

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมุติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณฟลัดคือ เมื่อมีฟลัดเกิดขึ้นบนสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของฟลัด โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูง ซึ่งองค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นนี้สามารถให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับฟลัดที่เกิดขึ้นได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อวิเคราะห์การ

เปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในหลายสเกลหรือหลายช่วงความถี่ และทำการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ร่วมกันอ้างอิงหลักการที่ใช้กับการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานที่มีอยู่เดิม นอกจากนี้ยังนำเทคโนโลยีความก้าวหน้าของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์โดยนำข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเป็นข้อมูลการฝึกสอนให้แก่โครงข่ายประสาทเทียม โดยตัดขั้นตอนการออกแบบการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นเพื่อลดความยุ่งยากในการพิจารณา ผลที่ได้สามารถตรวจจับวงจรที่เกิดฟอลต์ การหาตำแหน่งฟอลต์ และการระบุประเภทของฟอลต์บนสายส่งได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกัน

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์บนสายส่งวงจรคู่ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อศึกษารูปแบบของสัญญาณในขณะที่เกิดฟอลต์ที่แตกต่างกันโดยอาศัยแบบสายส่งวงจรคู่ระหว่างโรงไฟฟ้าแม่เกาะ 3 ถึงสถานีไฟฟ้าเรียงรายเป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา
2. ศึกษาารูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากข้อ 1 แล้วนำมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในสเกลที่ 1-5 โดยใช้ Wavelet Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้
3. นำข้อมูลที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในข้อ 2 มาทำการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความถูกต้อง โดยอาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB
4. ทำการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม 2 ชนิดด้วยกัน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนในข้อ 2 โดยอาศัยโปรแกรม Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB ใช้ในการวิเคราะห์ความถูกต้อง
5. จากนั้นนำผลที่ได้จากข้อ 3 และ 4 มาทำการเปรียบเทียบความถูกต้อง

#### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการใช้โปรแกรม ATP/EMTP ในการจำลองสัญญาณฟอลต์ในรูปแบบต่าง ๆ ในระบบสายส่งวงจรคู่และดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของฟอลต์ในลักษณะต่าง ๆ
2. ศึกษาารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ และเวฟเล็ตที่เหมาะสมโดยอาศัยผลการวิจัยที่ผ่านมา
3. ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ที่แตกต่างกันจำนวน 2160 ตัวอย่างแล้วนำสัญญาณฟอลต์มาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการพิจารณารูปแบบความเหมือนและแตกต่างกันของสัญญาณฟอลต์แต่ละแบบโดยอ้างอิงกับหลักการที่มีอยู่เดิม รวมถึงจำนวนสเกลและช่วงของข้อมูล

ที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ เพื่อนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์และตัดสินใจ

4. ศึกษาประโยชน์ของโครงข่ายประสาทเทียมในการใช้วิเคราะห์บ่งบอกถึงชนิดและแยกแยะประเภทเพื่อนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์พอลต์ในลักษณะต่าง ๆ ของระบบสายส่ง เพื่อตัดความยุ่งยากในการศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์และตัดสินใจในขั้นตอนที่ 3

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองและเสนอแนวทางการพัฒนาการศึกษาต่อไป ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงเป็นแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 1.3

## 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

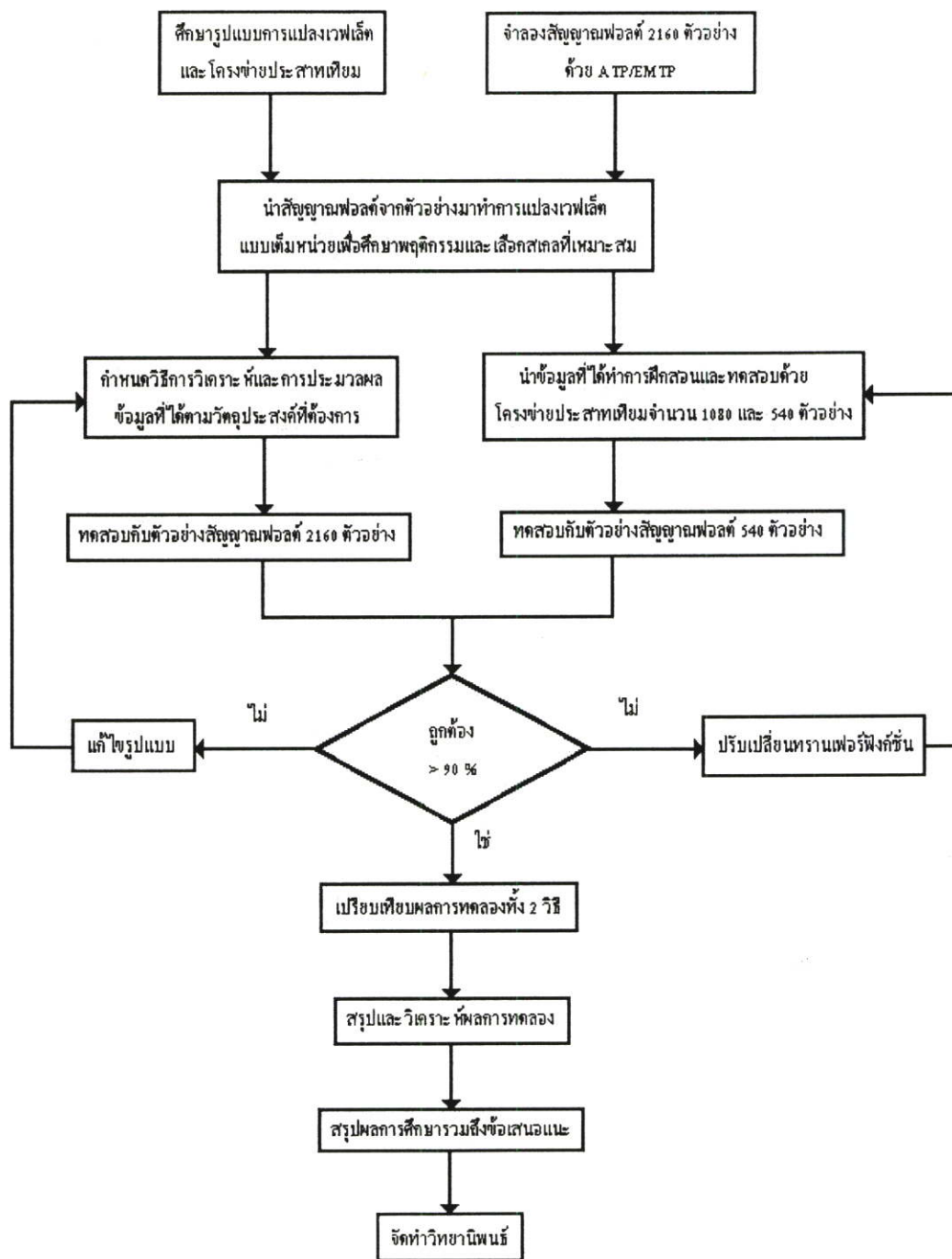
การศึกษานี้เป็นการจำลองรูปแบบของพอลต์ที่มีสมมุติฐานว่าเป็นสัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งวงจรคู่แบบ 2 บัสใด ๆ ที่เกิดพอลต์ขึ้นจริง โดยไม่พิจารณาถึงรูปแบบของสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกันเช่น ไฟผ่า

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นในส่วนอื่นของระบบไฟฟ้า หรือ สัญญาณในรูปแบบอื่น ๆ

2. สามารถนำหลักการดังกล่าวไปพัฒนาเพื่อทำการวิเคราะห์ระบบสายส่งในรูปแบบของโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อกันหลายบัส

3. สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่าง ๆ เช่น รีเลย์ป้องกันแบบดิจิทัล หรือเครื่องบันทึกพอลต์แบบดิจิทัล เป็นต้น



รูปที่ 1.3 แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### การวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่ง

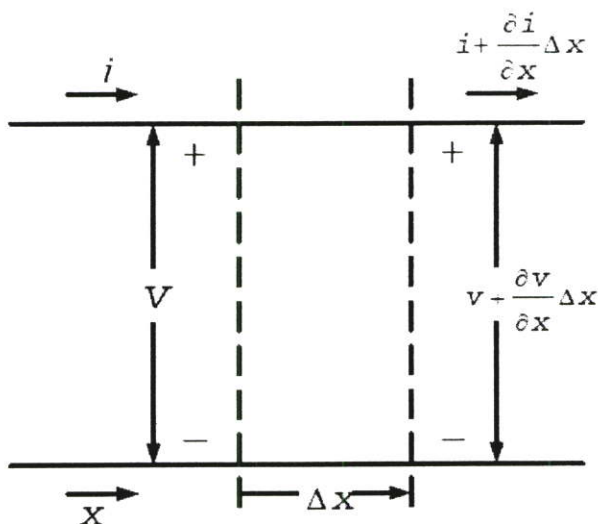
ในปัจจุบันระบบไฟฟ้าได้มีการส่งจ่ายไฟฟ้าโดยใช้ระบบสายส่งวงจรคู่เป็นอย่างมาก ซึ่งสายส่งวงจรคู่ก็มีลักษณะสำคัญโดยการเพิ่มจำนวนสายส่งที่มีอยู่เดิม ดังนั้นการป้องกันจึงเป็นเรื่องที่ยากมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งจึงจำเป็นต้องตรวจจับฟอลต์และระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ขึ้นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำเพื่อสะดวกในการซ่อมแซมแก้ไขให้ระบบสายส่งกลับเข้ามาใช้งานตามปกติได้อย่างรวดเร็วที่สุด แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งวงจรคู่ก็คือส่วนมากเฟสที่เกิดฟอลต์ในวงจรใดวงจรหนึ่งจะมีผลกระทบกับเฟสอีกวงจรที่ไม่มีการเกิดฟอลต์เนื่องจากอิทธิพลที่มีต่อกันทั้ง 2 วงจร หากเกิดฟอลต์ขึ้นในวงจรใดวงจรหนึ่ง วงจรที่ไม่เกิดฟอลต์อาจถูกวินิจฉัยว่าเป็นวงจรที่เกิดฟอลต์ได้จึงต้องมีการออกแบบขั้นตอนในการตรวจจับฟอลต์ให้ระบุวงจรและตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ให้มีความถูกต้อง ในบทนี้จึงเป็นการกล่าวถึงรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แบบเดิมเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับความเข้าใจ ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการดำเนินงานนั้นจำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายคลื่นเดินทางดังต่อไปนี้

#### 2.1 ทฤษฎีคลื่นเดินทาง (Traveling wave theory) [2]

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

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

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



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของส่วนย่อยของสายส่ง ฃ. เฟสใด ๆ ( $v$  และ  $i$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$  และ  $t$ )

และสามารถเขียนได้เป็น

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

เครื่องหมายลบมีความจำเป็นเพราะว่าค่าของ  $v + (\partial v / \partial t) \Delta x$  ต้องน้อยกว่าค่าของ  $v$  สำหรับค่าบวกของ  $i$  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  $\Delta x$  โดยสมมุติว่าเป็นสายส่งที่มีความสูญเสียต่ำจึงกำหนดให้  $R$  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  $x - vt$  และนิพจน์ของแรงดันดังเทอมต่อไปนี้

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

ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ได้มีการอธิบายความหมายแต่ต้องมีค่าเดียว โดยที่ค่าคงที่  $v$  ต้องมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ถ้า  $x$  มีหน่วยเป็นเมตรและเวลา  $t$  มีหน่วยเป็นวินาที เราสามารถพิสูจน์คำตอบของสมการนี้ได้โดยแทนที่อนุพันธ์บางส่วนลำดับสองของ  $v$  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  $x - vt$  ซึ่งคล้ายกับรูปร่างของคลื่นแรงดันคงที่ เดินทางตามความยาวสายส่งซึ่งเกิดจากฟ้าผ่า โดยฟังก์ชันนี้แสดงค่า 2 ค่าของเวลาคือ  $t_1$  และ  $t_2$  ซึ่ง  $t_2 > t_1$  เมื่อผู้สังเกตเดินไปกับคลื่นและอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมบนคลื่นนั้น ซึ่งพบว่ารูปร่างของคลื่นแรงดันที่เดินทางนี้จะยังคงรูปร่างเหมือนเดิมตามสมการที่ 2.16

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

จากจุดนี้จะเป็นไปตามสมการที่ 2.17 คือ

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

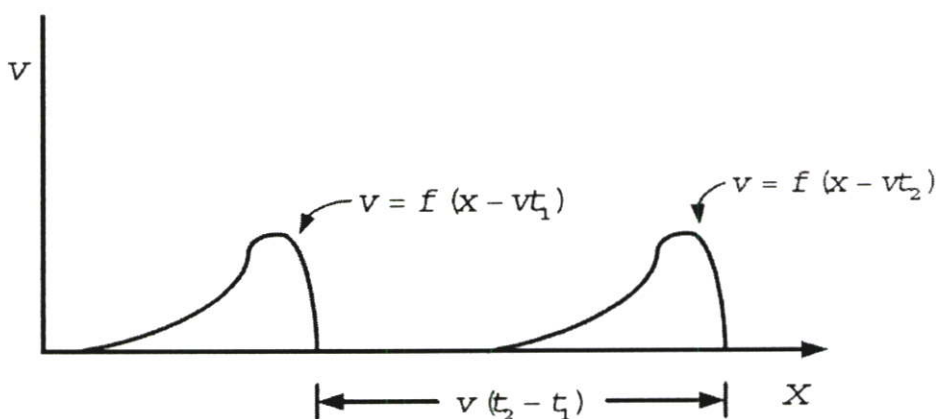
เมื่อ  $L$  และ  $C$  มีหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร (H/m) เป็นฟารัดต่อเมตร (F/m) ตามลำดับดังนั้นคลื่นของแรงดันที่เดินทางในทิศทางบวก  $x$  ด้วยความเร็ว  $v$

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

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

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

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



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $x - vt$  ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  [2]

คลื่นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุและสามารถนิยามได้เป็น

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

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

$$v^- = f_2(x + vt) \quad (2.21)$$

และลักษณะของกระแส คือ

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

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้ว่า

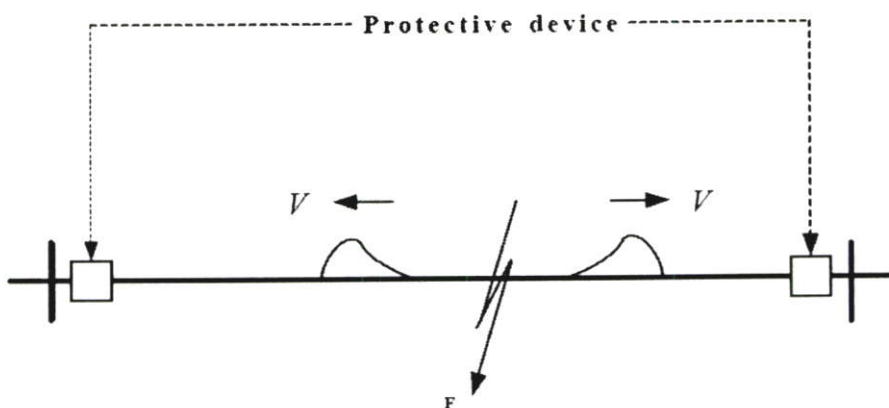
$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.23)$$

และจากสมการที่ 2.21 และ 2.22 จะได้

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.24)$$

ถ้าสมมติให้กระแสทิศทางบวกของ  $i^-$  อยู่ในทิศทาง การเคลื่อนที่ของคลื่นเดินทางถอยหลัง (back-ward) แล้วเครื่องหมายลบจะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายบวกในสมการที่ 2.22 และ 2.24 เพื่อเลือกที่จะรักษาทิศทางตำแหน่ง  $x$  ให้เป็นกระแสบวกทั้งคลื่นที่เคลื่อนไปข้างหน้า (Forward moving wave) และเคลื่อนที่ถอยหลัง (Backward moving wave)

อัตราส่วนของ  $v^+$  และ  $i^+$  เราเรียกว่า อิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่ง (Characteristic Impedance :  $Z_c$ ) เมื่อ  $R$  และ  $G$  มีค่าเป็นศูนย์ จากหลักการของคลื่นเดินทางนี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะของสัญญาณฟอลต์ได้ดังนี้ คือ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น ณ จุดใด ๆ บนสายส่งจะมีสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่งด้วยความเร็วซึ่งถูกกำหนดด้วยสมการที่ 2.17 ซึ่งสามารถนำปรากฏการณ์นี้มาใช้ประโยชน์กับหลักการของอุปกรณ์ป้องกันสายส่งโดยเฉพาะส่วนที่ทำการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของคลื่นเดินทางในสถานะที่เกิดฟอลต์บนสายส่ง

จากรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณบนพื้นฐานของรีเลย์ป้องกันแบบเดิมนั้นพบว่าเป็นการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานมาใช้งานเป็นหลัก รวมถึงการนำระบบสื่อสารเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการตอบสนองของการวิเคราะห์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสัญญาณพอลต์พบว่านอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่ารวมอยู่และยังให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับพอลต์อีกด้วย ซึ่งถ้าสามารถนำการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นมาพิจารณาโดยอ้างอิงกับหลักการของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐานก็สามารถนำข้อมูลนั้นมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้ และจากลักษณะของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วจึงสามารถที่จะทำให้ลดช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ โดยจะช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์และตัดสินใจซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนาอีเลย์ในรูปแบบใหม่ได้ในที่สุด

### บทที่ 3

## การแปลงเวฟเล็ต

การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) เป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ลักษณะของสัญญาณซึ่งมีประโยชน์มากในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ทฤษฎีเวฟเล็ตสามารถนำมาประยุกต์เพื่ออธิบายลักษณะของสิ่งต่าง ๆ หรือระบบใด ๆ ได้ เช่น อธิบายการแก้ปัญหาสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่จำลองระบบใดระบบหนึ่ง การเดินของหัวใจ การไหลเวียนของเลือดผ่านร่างกาย การหาขอบภาพ การลดขนาดข้อมูล (ภาพ สัญญาณ) และใช้แก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมการแพทย์

### 3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต

เมื่อใช้การแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะบางช่วงเวลาและความถี่เท่านั้นจะเสียเวลาในการคำนวณมากเพราะต้องคำนวณใหม่ตลอดย่าน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการแปลงที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้เฉพาะช่วงเวลาและความถี่ที่สนใจเท่านั้นทำให้สามารถพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะช่วงได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว การแปลงที่พัฒนาขึ้นนี้เรียกว่า "การแปลงเวฟเล็ต"

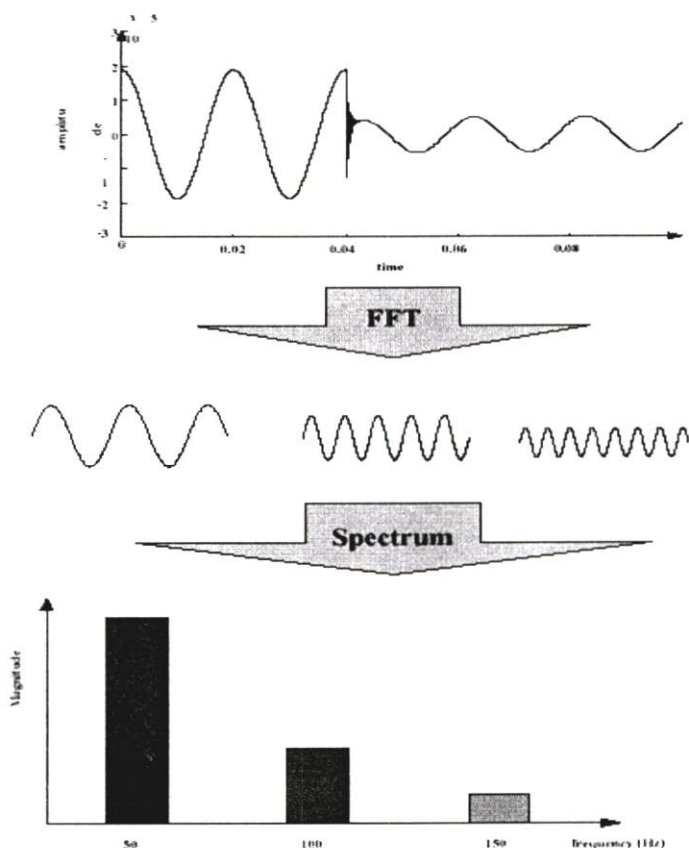
การแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณที่ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม แต่ได้พิจารณารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายความหมายและความแตกต่างของการแปลงเวฟเล็ตกับการแปลงสัญญาณในแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจและนำไปใช้งานต่อไป

#### 3.1.1 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform : FT)

การแปลงฟูเรียร์เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ ในสาขาการประมวลผลสัญญาณจึงนิยมการแปลงฟูเรียร์มาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพราะการแปลงฟูเรียร์จะมีสัญญาณไซน์และโคไซน์เป็นองค์ประกอบซึ่งโดยทั่วไปแล้วสัญญาณทั้งสองจะมีความสำคัญมากเพราะเป็นสัญญาณพื้นฐานสำหรับพิจารณาสัญญาณอื่น ๆ โดยจะทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time-domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency-domain) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นการหาสเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณนั่นเอง บางครั้งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยฟังก์ชันพื้นฐาน (basic function) ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปของการแตกองค์ประกอบของสัญญาณใด ๆ ให้อยู่ในรูป

ของฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ที่มีขนาดและความถี่ที่แตกต่างกันตลอดย่านความถี่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ดังแสดงในสมการที่ 3.1 [3]

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 แสดงการแปลงฟูเรียร์ (FFT)

ซึ่งมีสมการในเทอมของการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสุ่ม (sampling data) ที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) ดังสมการที่ 3.2 [3]

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot e^{-\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right)} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, \dots, N$

ผลการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีแม่นยำด้านความถี่ และเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่แน่นอน (Stationary signal) แต่ข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์คือ ในกรณีที่สัญญาณมีการ

เปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non - stationary signal) เช่น สัญญาณทรานเซียนต์รูปแบบต่าง ๆ การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านเวลาที่ขาดหายไป ซึ่งข้อมูลทางด้านเวลาเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์

### 3.1.2 การแปลงกาบอร์ (Gabor Transform :GT)

เป็นการแปลงสัญญาณที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นแบบแรกเพื่อแก้ปัญหาของการแปลงฟูเรียร์ โดยทำการแปลงฟูเรียร์เฉพาะช่วงเวลาและช่วงความถี่ที่กำหนดผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Windows function) ซึ่งจะเป็นลักษณะของฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian function) ซึ่งแสดงอยู่ในสมการที่ 3.3 [4]

$$g_a(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} e^{-\frac{t^2}{4a}} \quad (3.3)$$

ซึ่งมีสมการการแปลงกาบอร์ดังนี้ [4]

$$(G_b^a f)(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t) g_a(t-b) dt \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 เป็นสมการของการแปลงกาบอร์จะเห็นได้ว่าการแปลงในรูปแบบนี้สามารถเลือกตำแหน่งในการวิเคราะห์ได้โดยการกำหนดพารามิเตอร์  $b$  ซึ่งจะให้ผลของข้อมูลทางเวลา และเลือกช่วงความถี่ด้วยพารามิเตอร์  $a$  แต่เนื่องจากการแปลงกาบอร์ให้ฟังก์ชันหน้าต่างแบบเดียว จึงอาจจะไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์สัญญาณในทุกรูปแบบได้

### 3.1.3 การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short-Time Fourier Transform :STFT)

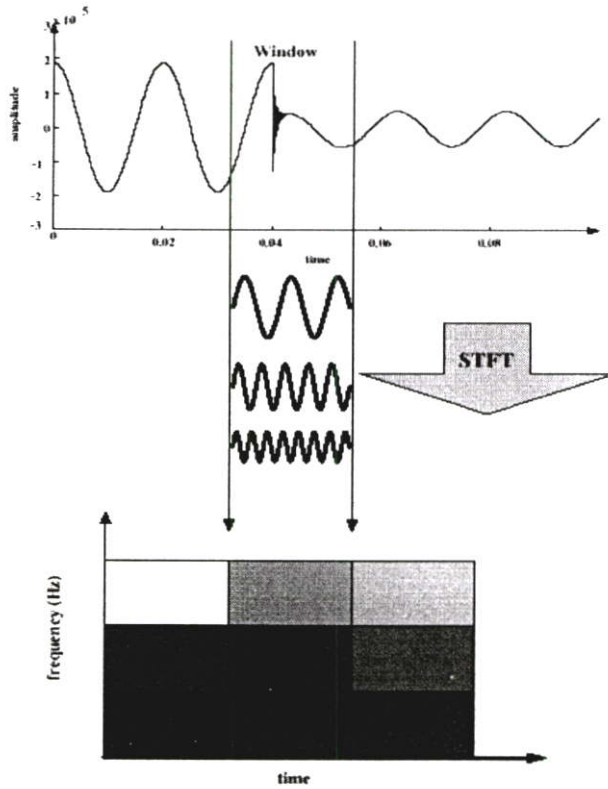
จากข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์และการแปลงกาบอร์ จึงมีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณมาสู่การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ฟังก์ชันหน้าต่างเหมือนการแปลงกาบอร์ แต่สามารถเลือกฟังก์ชันหน้าต่างที่ใช้ได้จึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์สัญญาณมากยิ่งขึ้น สมการการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.5 [5]

$$STFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t-\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

เมื่อ

$w(t-\tau)$  = Window function ที่ใช้ในการวิเคราะห์

โดยที่ตำแหน่งเวลาในการวิเคราะห์ถูกกำหนดโดยค่า  $\tau$  และช่วงความถี่การวิเคราะห์กำหนดด้วยความถี่หรือความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่างต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของการแตกองค์ประกอบสัญญาณในลักษณะการแปลงฟูเรียร์ในช่วงเวลาที่ทำกรวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (STFT)

สังเกตได้ว่าทั้งการแปลงกาบอร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น มีลักษณะของช่วงเวลาการวิเคราะห์ที่คงที่ (Fixed resolution transform) ดังนั้นการใช้ช่วงการวิเคราะห์สัญญาณที่คงที่ในการวิเคราะห์สัญญาณทุก ๆ ช่วงความถี่จึงอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่สูงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วกว่าจึงควรจะใช้ช่วงเวลาที่แคบในการวิเคราะห์ ในขณะที่มีความถี่ต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าจึงควรใช้ช่วงเวลาที่กว้างกว่าในการวิเคราะห์ จากเหตุผลนี้จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์ซึ่งเรียกว่า "การแปลงเวฟเล็ต" ซึ่งความหมายและรูปแบบทางทฤษฎีของเวฟเล็ตนั้นได้แสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป

### 3.2 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT) [6]

การแปลงเวฟเล็ตจะใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหรือระบบนั้น ๆ โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็ก ๆ ที่เรียกว่า "เวฟเล็ต" ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นเวฟเล็ตชนิดหนึ่งที่เรียกว่าเวฟเล็ตแบบ Daubechies20

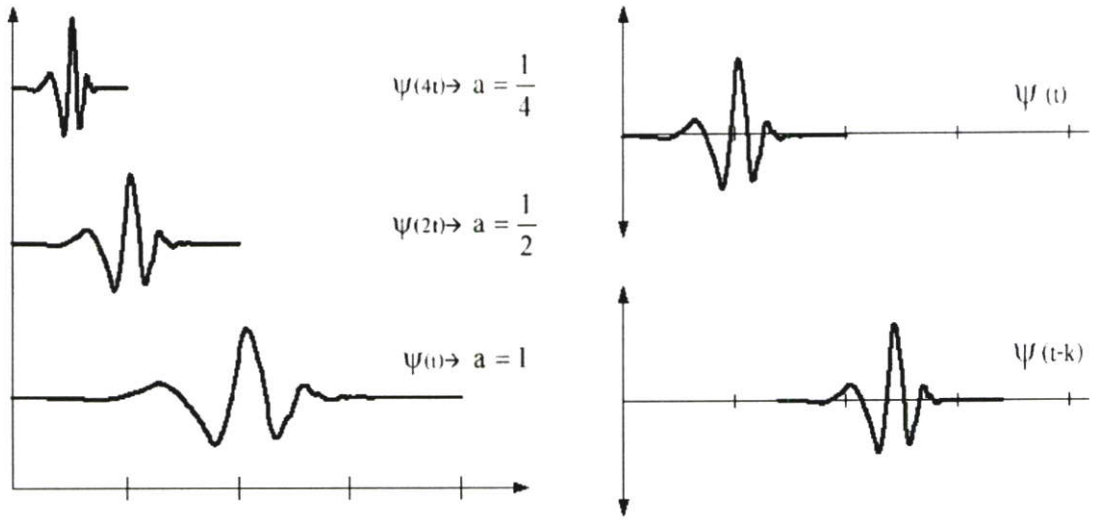


รูปที่ 3.3 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies20

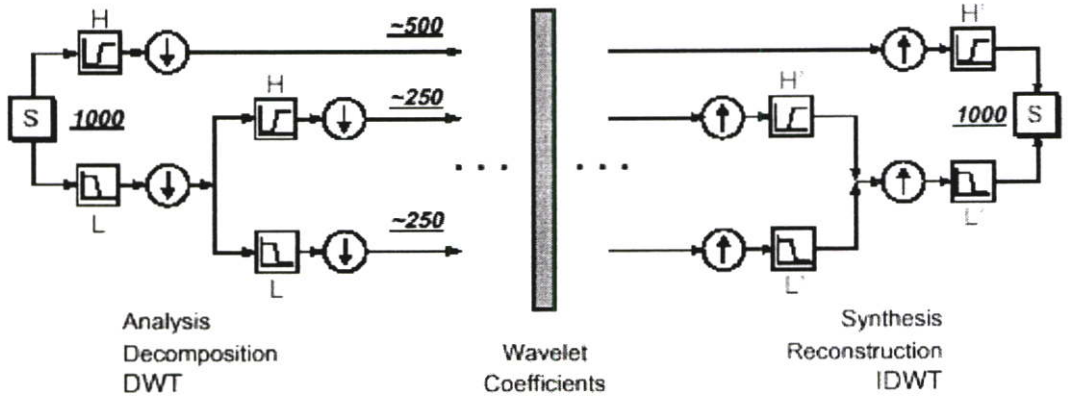
การนำเวฟเล็ตหลาย ๆ อันมารวมกันเป็นกลุ่มเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของสัญญาณใด ๆ โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า "เวฟเล็ตแม่" (Mother Wavelets) คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันจะอยู่ภายในเขตของเวฟเล็ตนี้โดยแต่ละคลื่นจะเกิดจากการสเกล (Scaling : "a") และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation : "b") ดังนั้นถ้าให้  $\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปของเวฟเล็ตที่ตำแหน่ง "a", "b" ไค ๆ ที่สัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.6)$$

$\psi(t)$  จะเป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่ถูกเลื่อนตำแหน่งและถูกสเกลโดยพารามิเตอร์ "a" และ "b" ตามลำดับ โดยที่ช่วงเวลาและความถี่ในการแปลงจะสัมพันธ์กันและเพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ด้วย  $1/\sqrt{a}$  เสมอ



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า  $a, b$  ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.5 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและการรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต

ทฤษฎีเวฟเล็ตจะใช้อธิบายสิ่งใดสิ่งหนึ่งเหมือนการแตกสิ่งนั้นออกเป็นส่วนประกอบเล็ก ๆ ที่สัมพันธ์กัน โดยที่ชิ้นส่วนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่าสัญญาณใด ๆ สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยมีฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) การแตกกระจายเวฟเล็ต (Wavelet Decomposition) ก็คือการทำการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform: WT) นั่นเอง ในทำนองเดียวกันการรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet Reconstruction) จะเป็นการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform: IWT) ซึ่งเป็นการนำส่วนประกอบย่อย ๆ เหล่านี้มารวมกันเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังในรูปที่ 3.5

### 3.3 การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT)

รูปแบบของการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่องนั้นมีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณ โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเวฟเลตแม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูง และช่วงในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งก็เป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งสามารถแสดงสมการสำหรับการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้[7]

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (3.7)$$

เมื่อ

$f(t)$  = สัญญาณที่ทำการแปลง

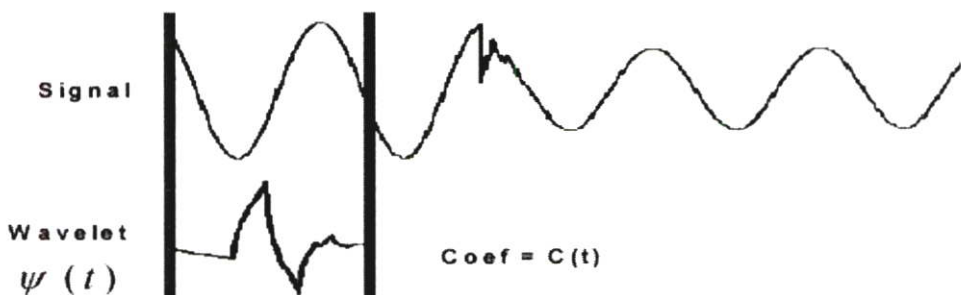
$\psi(t)$  = เวฟเลตแม่

$a$  = แฟคเตอร์สเกล (scale)

$b$  = แฟคเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (shifting)

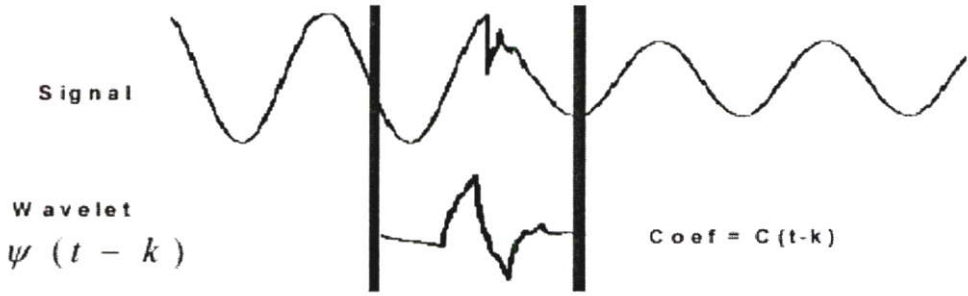
จากสมการที่ 3.7 เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  ซึ่งเป็นเทอมของเวฟเลตแม่ที่เทียบได้กับเทอมของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้นเอง แต่เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  จะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติไปตามพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ได้ดังนี้ [8]

1. นำเวฟเลตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก
2. คำนวณสัมประสิทธิ์ (C) ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวฟเลตแม่ในสเกลแรกกับสัญญาณในส่วนแรก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้รูปร่างของเวฟเลตแม่ด้วย



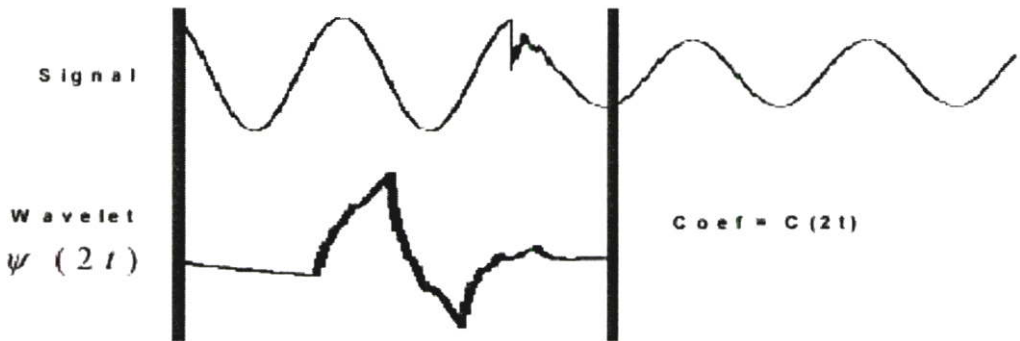
รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเลต

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



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต

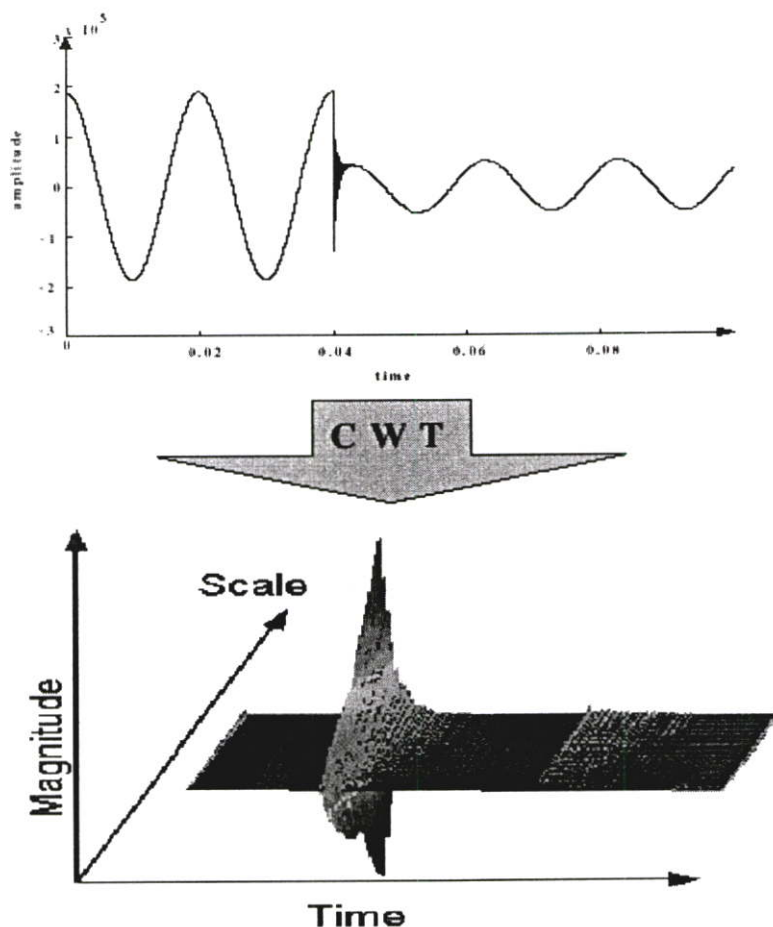
4. เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำตามขั้นตอนที่ 1 – 3 ใหม่



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล

5. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 4 จนกระทั่งครบทุกสเกล

จากขั้นตอนทั้งหมดผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปแบบสัมประสิทธิ์ที่ได้การวิเคราะห์ของแต่ละสเกลในแต่ละส่วนของสัญญาณ และเนื่องจากการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลาและความถี่ (Time - Scale) ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT)

จากรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะออกมาในรูปของพื้นผิวที่ต่อเนื่องกันซึ่งการปรับเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่ที่ดีแต่จะมีข้อเสียคือ ในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องอาจไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมากและบางครั้งให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

### 3.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) [6]

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยจำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายก่อน

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

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Analysis : MRA) จะเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $b$  หลาย ๆ ตำแหน่งมารวมกันเกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันจะเกิดเป็นสัญญาณอินพุทจริง

ก่อนที่จะศึกษาถึงการวิเคราะห์สัญญาณแบบ MRA จะขออธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของสเปซเวกเตอร์ (Vector space) ก่อนเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบ MRA

สเปซของเวกเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณคือ สเปซหรือปริภูมิของสัญญาณใด ๆ ที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณพื้นฐานย่อย ๆ ที่เรียกว่า "ฟังก์ชันพื้นฐาน" Basis function (b.f) ถ้ากำหนดให้  $a, b$  เป็นจำนวนจริงใด ๆ และ  $\hat{i}, \hat{j}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในสเปซเวกเตอร์  $V$  เสมอ ดังนั้นถ้าเวกเตอร์ใดประกอบขึ้นจากหลายเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะได้ว่าเวกเตอร์นั้นยังคงอยู่ในสเปซเวกเตอร์นี้ ดังนั้น  $a\hat{i} + b\hat{j} + c\hat{k} + \dots \in V$  โดยที่เวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\hat{i}, \hat{j}$  จะเป็นลักษณะเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) ซึ่งกันและกัน ถ้าพิจารณาในลักษณะของสัญญาณอาจมองได้ว่า  $\hat{i}, \hat{j}$  คือฟังก์ชันพื้นฐานที่เป็นสัญญาณเล็ก ๆ ที่นำมาประกอบกันเป็นสัญญาณใด ๆ

สมมติให้  $V^j$  เป็นสเปซเวกเตอร์ที่มี  $j$  แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้น ถ้า  $j$  มีค่าสูงขึ้นก็แสดงว่าที่ระดับความละเอียดสูงขึ้นจะมีจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานมากขึ้นทำให้สัญญาณที่เกิดจากการประกอบกันจากฟังก์ชันพื้นฐานมีความละเอียดมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า  $j$  เป็นค่าแสดงถึงระดับความละเอียดของสัญญาณนั่นเอง จากข้อกำหนดเหล่านี้สามารถสรุปเป็นลักษณะสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1)  $V^{-\infty} \dots \subset V^{-1} \subset V^1 \dots \subset V^{\infty}$
- 2)  $Close_{L^2} \left( \bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right) = L^2(\mathbb{R})$  ;  $\mathbb{R}$  = เซตของจำนวนจริง
- 3)  $\left( \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V^j \right) = \{0\}$
- 4)  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ;  $j \in \mathbb{Z}; \mathbb{Z} :=$  เซตของจำนวนเต็ม
- 5)  $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}$  ;  $j \in \mathbb{Z}$

จากการที่ฟังก์ชันพื้นฐานประกอบกันเป็นสัญญาณการประมาณที่ระดับความละเอียด  $j$  ภายในสเปซ  $V^j$  จะเรียก ฟังก์ชันพื้นฐานเหล่านี้ว่า ฟังก์ชันสเกลลิ่ง (Scaling function :  $\phi(t)$ ) สัญญาณเหล่านี้จะเกิดที่ตำแหน่งเวลาต่าง ๆ กันของสเปซและมีความถี่เท่ากันภายในสเปซเดียวกัน

ฟังก์ชันสเกลลิงที่ระดับสเปซสูง (ระดับความละเอียดสูง) จะมีความถี่สูงและที่ระดับต่ำกว่าจะมีความถี่ต่ำกว่า ดังนั้นความสัมพันธ์กันระหว่างฟังก์ชันสเกลลิงของแต่ละสเปซจะเป็นดังนี้

$$f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1} \quad ; j \in \mathbb{Z} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 ทำให้สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันสเกลลิงภายในสเปซใด ๆ ได้ดังนี้

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k) \quad ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.9 จะพบว่าระดับความละเอียดต่ำลงมาหนึ่งระดับ ฟังก์ชันพื้นฐานจะมีความถี่ลดลงมาครึ่งละสองเท่า อาศัยลักษณะคุณสมบัติ MRA จะทำให้สามารถทำการประมาณสัญญาณ  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  ไปอยู่ในสเปซที่ระดับความละเอียด  $j$  ใดๆ ก็ได้ดังนี้

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \phi_{j,k}(t) \quad (3.10)$$

โดยที่  $c_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือนำหนักที่คูณกับฟังก์ชันสเกลลิงที่ตำแหน่ง  $k$  ใดๆ แล้วประกอบขึ้นเป็น  $f(t)$  ที่ระดับความละเอียด  $j$  นั้นๆ

จากคุณสมบัติข้อ 4 ของ MRA การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงจะทำให้พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่ในสเปซอีกอันหนึ่งซึ่งจะเรียกว่า "สเปซของเวกเตอร์เวฟเล็ต" (Wavelet vector space :  $W^j$ ) สเปซชนิดนี้จะคล้ายกับสเปซของเวกเตอร์ ดังนั้นสัญญาณภายใน  $W^j$  จะประกอบด้วย ฟังก์ชันพื้นฐานเช่นเดียวกันจะเรียกว่า "ฟังก์ชันเวฟเล็ต" (Wavelet function :  $\psi(t)$ ) ดังนั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ระดับความละเอียดใด ๆ ได้ดังนี้

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.6 ซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีการเลื่อนตำแหน่งและเปลี่ยนความถี่อย่างต่อเนื่องจะเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันเวฟเล็ต  $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$  ที่มีการเลื่อนตำแหน่งและเปลี่ยนความถี่แบบเต็มหน่วยโดยที่  $a = 2^{-j}$ ,  $b = 2^{-j} k$

ถ้ากำหนดให้  $g_j(t)$  เป็นสัญญาณที่เกิดจากฟังก์ชันพื้นฐานและ  $\psi_{j,k}(t)$  ภายในสเปซเดียวกันมารวมกันเป็นสัญญาณใด ๆ จะได้ว่า

$$g_j(t) = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (3.12)$$

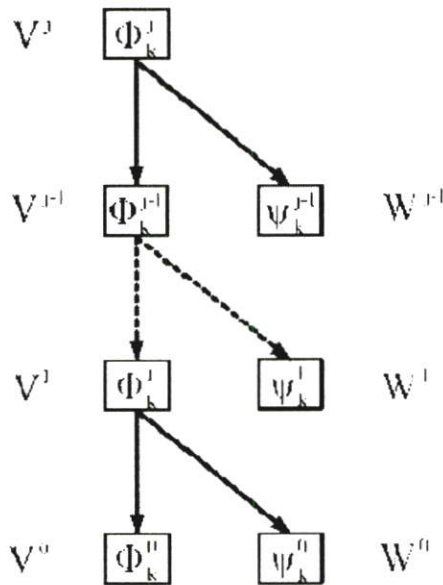
โดยที่  $d_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือค่านำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเล็ดที่ตำแหน่งนั้นๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ  $g_j(t)$  ดังนั้นจากความสัมพันธ์  $V^j + W^j = V^{j+1}$  และจากสมการที่ 3.10 และ 3.11 จะได้ว่า

$$f_{j+1} = f_j + g_j \quad (3.13)$$

สมมติให้  $f(t) \in V^{j+1}$  จะสามารถแตกกระจายให้  $f(t)$  ให้มีความละเอียดน้อยลงได้จากสมการ  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ซึ่งในขณะเดียวกัน  $V^j$  สามารถแตกต่อไปได้เรื่อยๆจนกระทั่ง  $j=0$  ดังนั้นจะได้เป็นความสัมพันธ์ว่า

$$V^{j+1} = V^0 + W^0 + W^1 + \dots + W^j \quad (3.14)$$

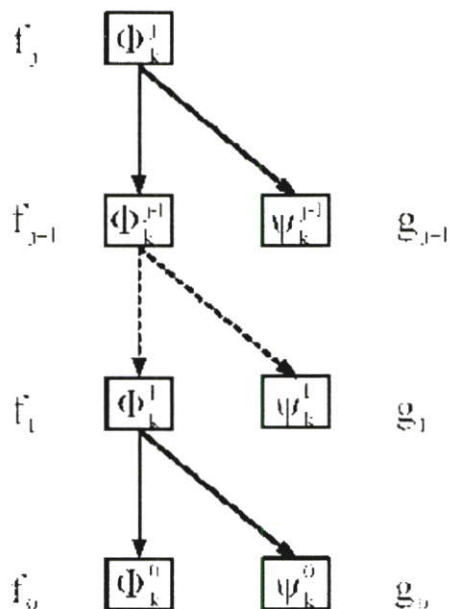
ในทำนองเดียวกัน  $f_{j+1}$  ก็สามารถแตกกระจายเป็น  $f_j$  และ  $g_j$  ซึ่งสามารถแสดงเป็นภาพการแตกกระจายสเปซและสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 ลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของสเปซของเวกเตอร์

$f$  และ  $g$  ที่ลดระดับความละเอียดลงมาจะมีความถี่ของฟังก์ชันพื้นฐานลดลงครึ่งละสองเท่าเสมอและเราสามารถแจกแจงสัญญาณ  $f(t)$  ที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเลตได้ดังนี้

$$f(t) = f_j + g_j + g_{j+1} + g_{j+2} + \dots + g_\infty \quad (3.15)$$



**รูปที่ 3.11** ลักษณะการกระจาย (Decomposition) สัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่าง ๆ

รูปแบบการแตกกระจายสัญญาณ  $f(t)$  ใดๆ ในสเปซ  $V^0$  ไปจนถึงระดับความละเอียดที่  $j$  ในรูปของสัมประสิทธิ์  $c_j(m)$  และ  $d_j(m)$  นี้เรียกว่า "การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT)" โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [9]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (3.16)$$

โดยที่  $a^m$  คือ การสเกล  
 $nb_0 a_0^m$  คือ การเลื่อนตำแหน่ง  
 $m, n$  คือ เลขจำนวนเต็ม

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้นสมการที่ (3.15) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (3.16) [9]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (3.17)$$

เมื่อ  $m, n, k$  เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่

$n$  คือ จำนวนข้อมูล

$m$  คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

$k$  คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

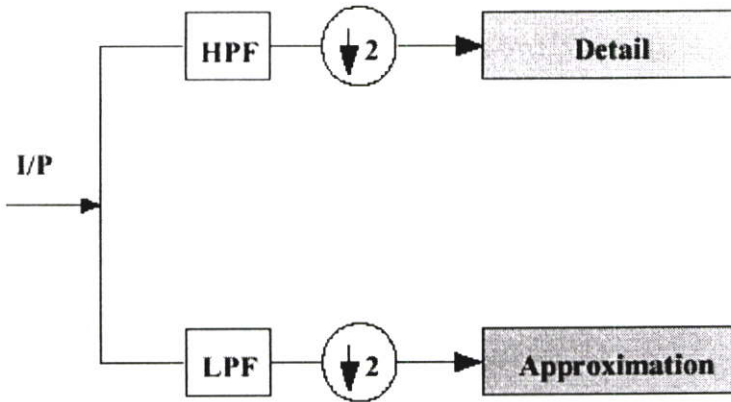
เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้ว โดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ( $a_0 = 2; b_0 = 1$ ) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้ [10]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k2^m}{2^m}\right] \quad (3.18)$$

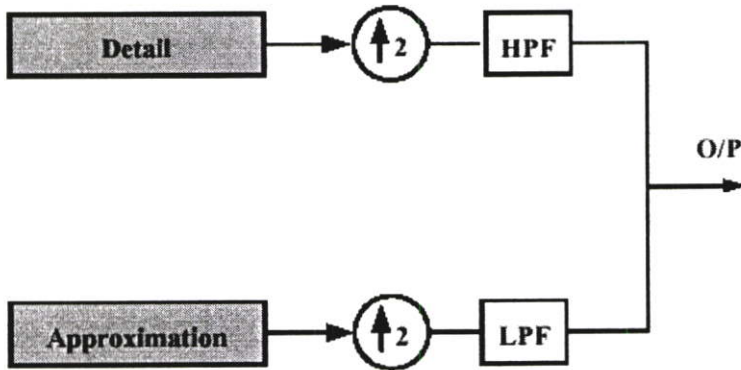
ซึ่งสามารถอธิบายหลักการการทำงานได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์แบงก์ดังนี้

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

ขบวนการแปลงเวฟเล็ตจะมีลักษณะคล้ายกับขบวนการออกเทพฟิลเตอร์แบงก์ (Octave filter banks) เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (window function) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่าซึ่งเปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ที่มีแบนวิธที่มีอัตราการลดลงสองเท่าเหมือนกับแบนวิธของฟังก์ชันหน้าต่างในขณะนั้นนั่นเอง ดังนั้นจะสามารถนำเอาหลักการของฟิลเตอร์แบงก์มาใช้ในการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในทางปฏิบัติได้ ก่อนที่จะอธิบายการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในลักษณะฟิลเตอร์แบงก์จะขออธิบายหลักการพื้นฐานของฟิลเตอร์แบงก์ก่อน

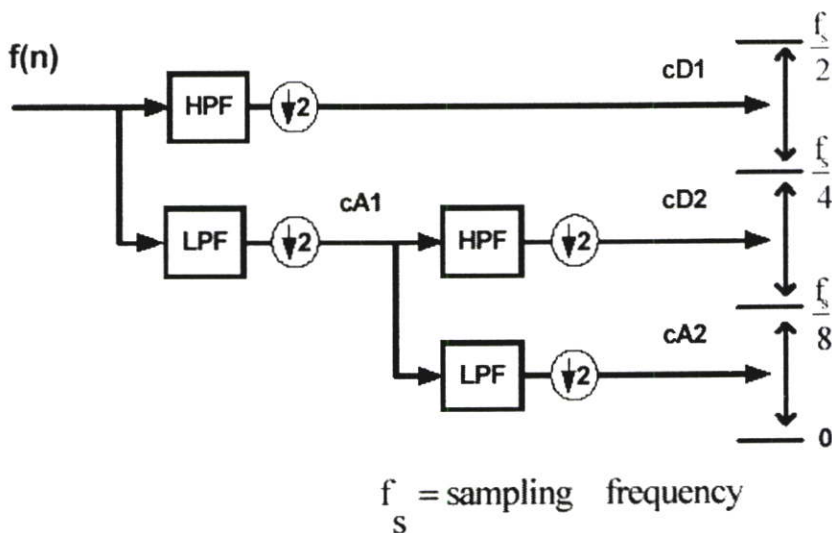


รูปที่ 3.12 แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ



รูปที่ 3.13 แสดงการแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ

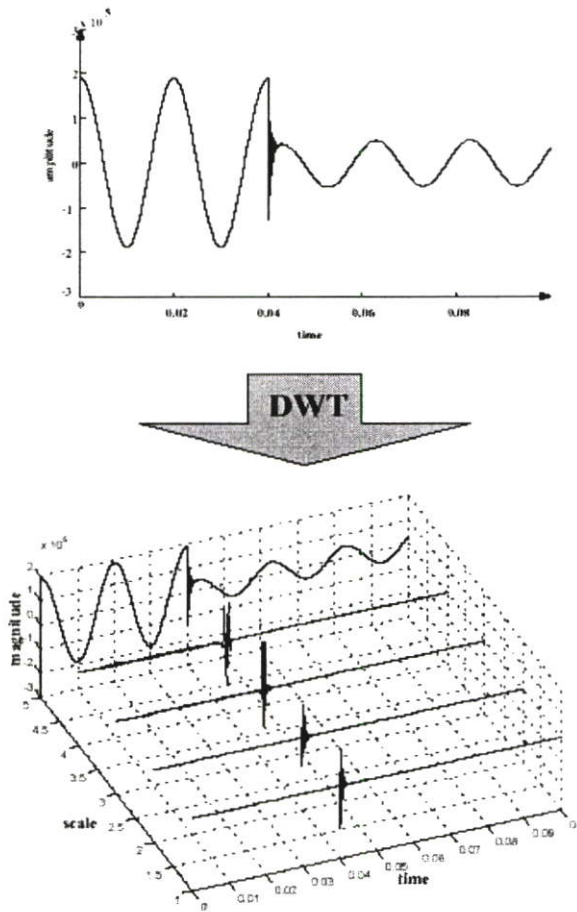
ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (two channel filter banks) เป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสองส่วน โดยแบ่งเป็นส่วนของความถี่ต่ำและส่วนของความถี่สูง ดังนั้นฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณจึงประกอบด้วยส่วนที่เป็น ตัวกรองความถี่ต่ำ (low pass filter : L) และ ตัวกรองความถี่สูง (high pass filter : H) ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์ ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (two - channel analysis filter banks) และเป็นโครงสร้างที่กลับกันกับการสังเคราะห์การสร้างกลับฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (reconstruction two - channel synthesis filter banks) ดังรูปที่ 3.13 โดยที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่ต่ำและความถี่สูง คือ L และ H กับตัวกรองการสร้างกลับ (Reconstruction) ความถี่ต่ำและความถี่สูงคือ L', H' มีความสัมพันธ์กันในลักษณะที่เรียกว่า "Quadrature mirror filters"



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ [10]

ลักษณะของการวิเคราะห์ออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave analysis filter banks) จะเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree Structure) ซึ่งเป็นการสร้างเอาฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณมาต่อเรียงกัน โดยใช้สัญญาณเอาต์พุตในส่วนที่เป็นความถี่ต่ำมาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ในกรณีที่ทำการแปลงเวฟเล็ตซ้ำในแนวของส่วนความถี่ต่ำจะเป็นลักษณะของ Dyadic tree structure ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งโครงสร้างในรูปนี้จะเป็นการแปลงแบบเต็มหน่วย (Discrete Eavelet Transform : DWT)

จากรูปที่ 3.14 ซึ่งเป็นลักษณะของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในลักษณะของ dyadic tree structure โดยมีสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยความถี่การสุ่ม =  $f_s$  (sampling rate) จะถูกวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์ 2 ช่องสัญญาณในสเกลที่ 1 ( $2^1$ ) ซึ่งสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 2 ช่วงความถี่ คือ ส่วนความถี่สูงหรือ detail 1 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{4}$  Hz และความถี่ต่ำ หรือ Approximation 1 มีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - 0$  Hz และในการวิเคราะห์ในสเกลที่ 2 ( $2^2$ ) ก็ทำได้โดยการคู่กรองชุดเดิมมาวิเคราะห์ต่อจาก Approximation 1 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะออกมาเป็นส่วนความถี่สูงสเกลที่ 2 หรือ detail 2 ซึ่งมีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - \frac{f_s}{8}$  Hz และส่วนความถี่ต่ำสเกลที่ 2 หรือ Approximation 2 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{8} - 0$  Hz ถ้าทำการวิเคราะห์ต่อในสเกลที่ 3 ก็สามารถทำซ้ำในลักษณะเดิม ในทางกลับกันก็สามารถที่จะรวมสัญญาณที่ทำการกระจายในหลายๆ ช่วงความถี่ให้กลับมาเป็นสัญญาณเดิมได้ ซึ่งผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.15



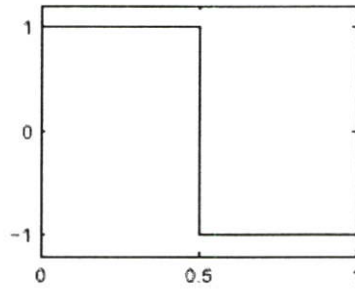
รูปที่ 3.15 แสดงการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (DWT) ในสเกลที่ 1-4

### 3.5 เวฟเลตแม่ (Mother wavelet) [8]

ในการวิเคราะห์สัญญาณใด ๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้วยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองนั้น ๆ ให้เหมาะสมด้วย สำหรับการแปลงเวฟเลตนั้นตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเลตแม่นั้นเอง ซึ่งจะมียูต์ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อย ๆ ลงไปอีก และเนื่องจากรูปแบบของเวฟเลตแม่ที่หลากหลายนี้เองจึงทำให้การแปลงเวฟเลตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเลือกเวฟเลตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงเวฟเลตแม่ดังต่อไปนี้

#### 3.5.1 Haar Wavelet

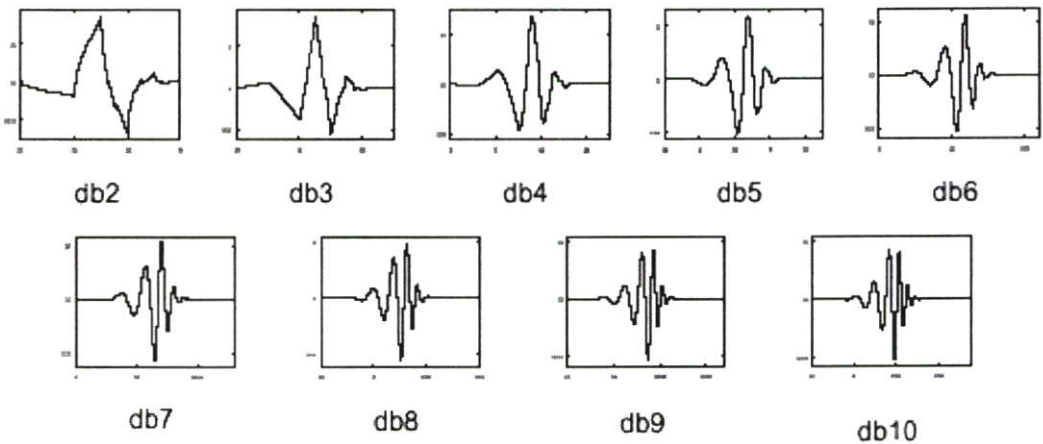
เวฟเลต Heer เป็นเวฟเลตเป็นเวฟเลตชนิดแรกที่เริ่มต้นใช้กันและง่ายที่สุด เวฟเลตชนิดนี้เป็นชนิดที่ไม่ต่อเนื่องกันและมีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของ Haar Wavelet

### 3.5.2 Daubechies Wavelet

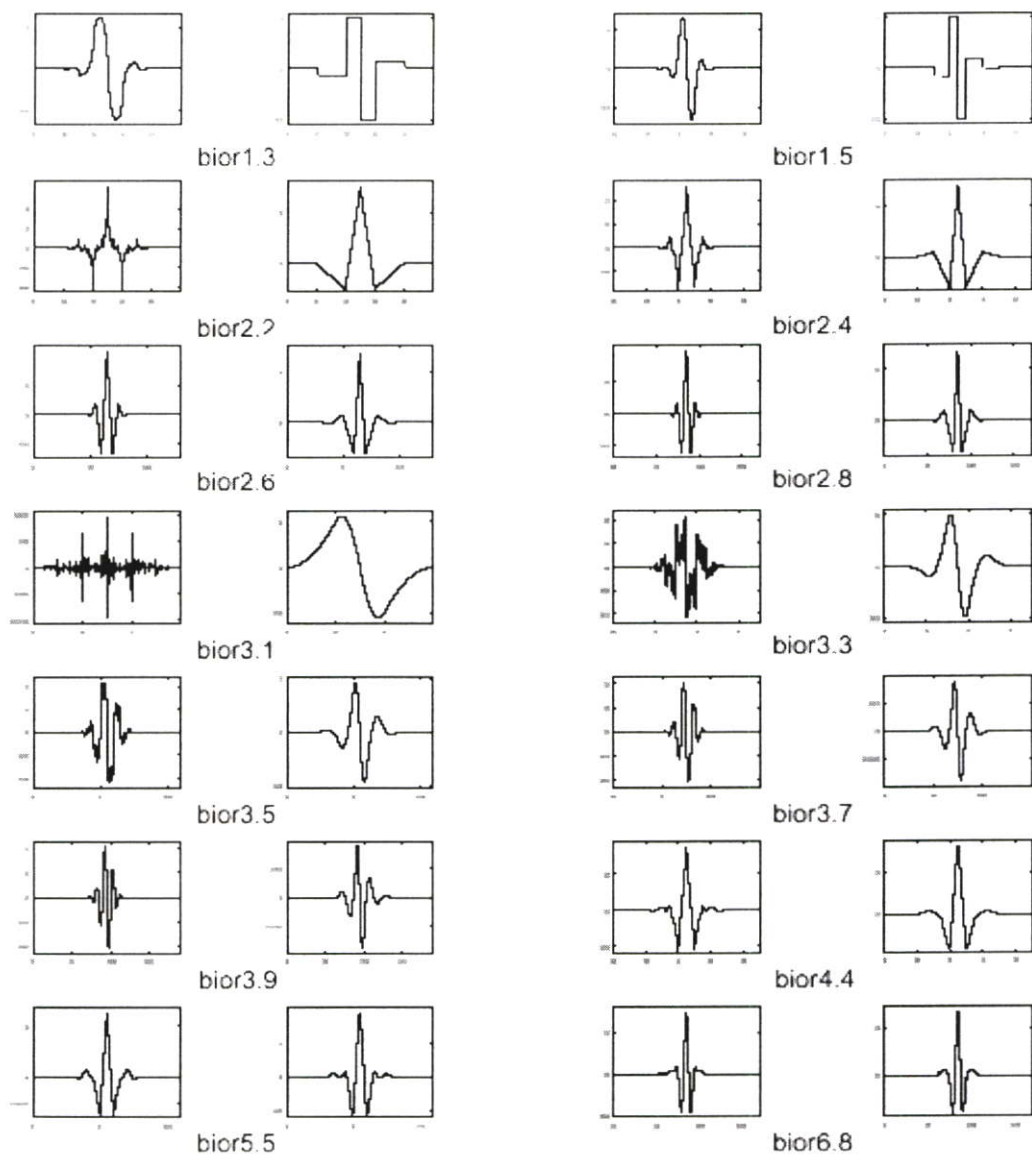
Ingrid Daubechies เป็นนักวิจัยทางด้านเวฟเลตหนึ่งคนสำคัญของโลกที่ได้ค้นพบสิ่งที่เรียกว่า "ขอบเขตที่แน่นอนของเวฟเลตเชิงเส้นตั้งฉากกติก" (compactly-supported orthonormal wavelet) เป็นการสร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์เวฟเลตที่ไม่ต่อเนื่องในทางปฏิบัติ โดยใช้ชื่อเวฟเลตตระกูลนี้ว่า "Daubechies" ซึ่งเขียนในรูป dbN โดยที่ N คือ การแสดงถึงลำดับ (order) หรือค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะของ Daubechies Wavelet

### 3.5.3 Biorthogonal Wavelet

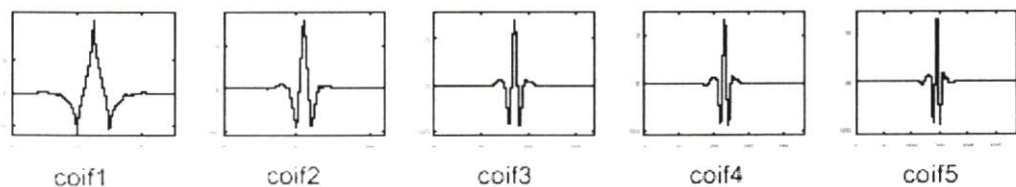
เวฟเลตตระกูลนี้แสดงคุณสมบัติของเฟสเชิงเส้น ซึ่งใช้ในการฟื้นฟูสัญญาณและภาพ โดยใช้เวฟเลต 2 ตัว ตัวหนึ่งสำหรับแยกตัวประกอบ และอีกตัวหนึ่งสำหรับการสร้างใหม่แทนที่อีกตัวหนึ่งที่เหมือนกัน ที่ได้รับความสนใจในคุณสมบัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงลักษณะของ Biorthogonal Wavelet

### 3.5.4 Coiflets Wavelet

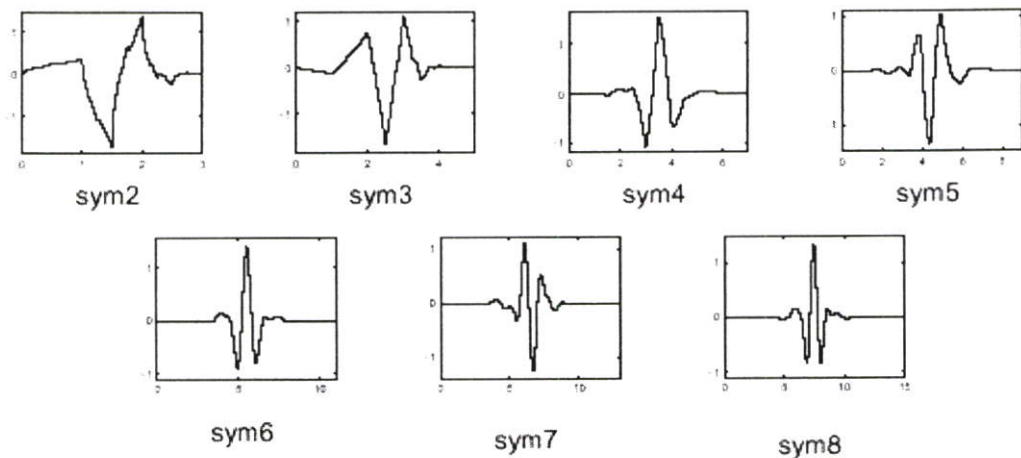
เวฟเลตชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นโดย I. Daubechies โดยความต้องการของ R. Coifman เวฟเลตชนิดนี้จะมีฟังก์ชันพื้นฐานในลักษณะเกือบไม่สมมาตร (Nearly Asymmetric) ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของ Coiflets Wavelet

### 3.5.5 Symlets Wavelet

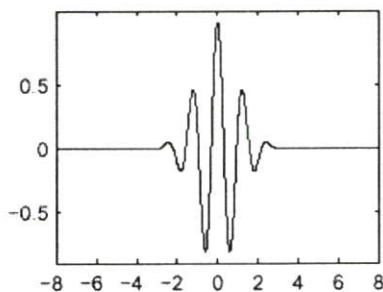
เวฟเลตชนิด Symlets จะมีสัดส่วนที่สมมาตรเกือบทั้งหมด ซึ่งเวฟเลตนี้ถูกนำเสนอโดย I.Daubechies ได้ปรับปรุงมาจากเวฟเลตตระกูล db ซึ่งคุณสมบัติของเวฟเลตทั้งสองตระกูลนี้มีความคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะของ Symlets Wavelet

### 3.5.6 Morlet Wavelet

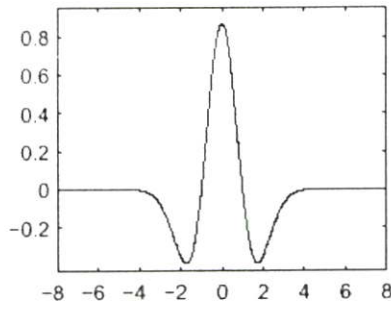
เวฟเลตชนิดนี้จะไม่มีฟังก์ชันการสเกลลิง (scaling function) แต่จะมีความแน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของ Morlet Wavelet

### 3.5.7 Mexican Hat Wavelet

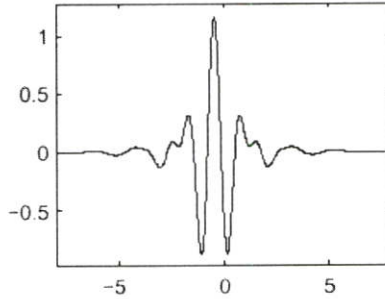
เวฟเลตนี้ไม่มีฟังก์ชันการสเกลลิง (scaling function) และมีที่มาจากฟังก์ชันอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเกาส์เซียน (the second derivative function of the Gaussian probability density function) ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะของ Mexican Hat Wavelet

### 3.5.8 Meyer Wavelet

เวฟเลตชนิด Meyer และฟังก์ชันการสเกลลิ่งถูกกำหนดด้วยโดเมนความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะของ Meyer Wavelet

จากรูปที่ 3.17 ค่า  $N$  เป็นเลขจำนวนเต็ม que แสดงถึงลำดับ (Order) ของเวฟเลตแม่ ในบางครั้งได้มีความจำกัดความว่า  $N$  เป็นตัวเลขที่ใช้แสดงจำนวนของสัมประสิทธิ์ตัวกรอง (Filter) ของเวฟเลตแม่ นั้น ๆ และแสดงควมราบเรียบ (Smooth) ของเวฟเลตแม่ตัวนั้น ๆ อีกด้วย เช่น db4 หมายถึงเวฟเลตแม่แบบ daubechies ที่มีสัมประสิทธิ์การกรอง 4 ตัว , db20 หมายถึงเวฟเลตแม่แบบ daubechies ที่มีสัมประสิทธิ์การกรอง 20 ตัว โดยที่ db20 จะมีรูปร่างที่ราบเรียบกว่า db4 ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์ได้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณของเวฟเล็ตตระกูล Daubechies ที่ N มีค่าเป็น 4,6,8,10,12,14,16 และ 20 [11]

Order	n	Filter coefficients	Order	n	Filter coefficients	Order	n	Filter coefficients
N=4	0	0.4829629131	N=14	0	0.0778520541	N=18	0	0.0380779474
	1	0.8365163037		1	0.3965393195		1	0.2438346746
	2	0.2241438680		2	0.7291320908		2	0.6048231237
	3	-0.1294095226		3	0.4697822874		3	0.6572880781
N=6	0	0.3326705530		4	-0.1439060039		4	0.1331973858
	1	0.8068915093		5	-0.2240361850		5	-0.2932737833
	2	0.4598775021		6	0.0713092193		6	-0.0968407832
	3	-0.1350110200		7	0.0806126092		7	0.1485407493
	4	-0.0854412739		8	-0.0380299369		8	0.0307256815
	5	0.0352262919		9	-0.0165745416		9	-0.0676328291
N=8	0	0.2303778133		10	0.0125509986		10	0.0002509471
	1	0.7148465706		11	0.0004295780		11	0.0223616621
	2	0.6308807679		12	-0.0018016407		12	-0.0047232048
	3	-0.0279837694		13	0.0003537138		13	-0.0042815037
	4	-0.1870348117	N=16	0	0.0544158422		14	0.0018476469
	5	0.0308413818		1	0.3128715909		15	0.0002303858
	6	0.0328830117		2	0.6756307363		16	-0.0002519632
	7	-0.0105974018		3	0.5853546837		17	0.0000393473
N=10	0	0.1601023980		4	-0.0158291053	N=20	0	0.0266700579
	1	0.6038292698		5	-0.2840155430		1	0.1881768001
	2	0.7243085284		6	0.0004724846		2	0.5272011889
	3	0.1384281459		7	0.1287474266		3	0.6884590395
	4	-0.2422948871		8	-0.0173693010		4	0.2811723437
	5	-0.0322448696		9	-0.0440882539		5	-0.2498464243
	6	0.0775714938		10	0.0139810279		6	-0.1959462744
	7	-0.0062414902		11	0.0087460940		7	0.1273693403
	8	-0.0125807520		12	-0.0048703530		8	0.0930573646
	9	0.0033357253		13	-0.0003917404		9	-0.0713941472
N=12	0	0.1115407434		14	0.0006754494		10	-0.0294575368
	1	0.4946238904		15	-0.0001174768		11	0.0332126741
	2	0.7511339080					12	0.0036065536
	3	0.3152503517					13	-0.0107331755
	4	-0.2262646940					14	0.0013953517
	5	-0.1297668676					15	0.0019924053
	6	0.0975016056					16	-0.0006858567
	7	0.0275228655					17	-0.0001164669
	8	-0.0315820393					18	0.0000935887
	9	0.0005538422					19	-0.0000132642
	10	0.0047772575						
	11	-0.0010773011						

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่แต่ละชนิด [8]

Property	morl	mexh	meyr	haar	dbN	symN	coifN	biorNr.Nd
Crude	●	●						
Infinitely regular	●	●	●					
Arbitrary regularity					●	●	●	●
Compactly supported orthogonal				●	●	●	●	●
Compactly supported biorthogonal								●
Symmetry	●	●	●	●				●
Asymmetry					●			
Near symmetry						●	●	
Arbitrary number of vanishing moments					●	●	●	●
Ortdogonal analysis			●	●	●	●	●	
Biotdogonal analysis			●	●	●	●	●	●
Exact reconstruction		●	●	●	●	●	●	●
FIR filters				●	●	●	●	●
Continuous transform				●	●	●	●	●
Discrete transform	●	●	●	●	●	●	●	●
Fast algorithm			●	●	●	●	●	●

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมาใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ซึ่งทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาหลายช่วงความถี่ (สเกล) แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ สำหรับการเลือกเวฟเล็ตนั้นได้เลือกใช้เป็นแบบ daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนด์ เช่น พอลต์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี [12] เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ที่น้อยเพียง 4 ตัว โดยแบ่งการนำการแปลงเวฟเล็ตมาใช้วิเคราะห์สัญญาณพอลต์ออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

#### 1) การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet decomposition)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณกระแสและแรงดันออกมาในสเกลที่ 1 – 5 ซึ่งในที่นี้เราจะเลือกพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง (detail) เท่านั้น

## 2) การรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstuction)

เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลให้มีขนาดเดียวกันหรืออยู่บนฐานเวลาเดียวกันจึงต้องทำการรวมกลับสัญญาณในแต่ละสเกลให้มีจำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับสัญญาณต้นแบบที่ทำการวิเคราะห์ และนอกจากนี้เพื่อให้การพิจารณาเห็นความแตกต่างมากขึ้นจึงยกกำลังสองสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกล ซึ่งสัมประสิทธิ์ทั้งหมดก็จะอยู่ในด้านบวก [13] โดยที่รายละเอียดทั้งหมดจะได้กล่าวอยู่ในบทที่ 5

## บทที่ 4

# โครงข่ายประสาทเทียม

### 4.1 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม [14]

การพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมเกิดขึ้นเมื่อมีการเสนอแบบจำลองทางตรรกะของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นครั้งแรกในปีค.ศ.1943 โดย Warren McCulloch และ Walter Pitts แนวคิดสำคัญคือการคำนวณค่าสัญญาณเอาต์พุตโดยพิจารณาจากระดับกระตุ้นกล่าวคือ นิวรอนจะให้สัญญาณเอาต์พุตก็ต่อเมื่อ ผลรวมของสัญญาณอินพุตมีค่ามากกว่าระดับกระตุ้นซึ่งแนวคิดนี้ยังคงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมมาจนทุกวันนี้

ในปี 1949 Dinal Hebb จากคณะฟิสิกส์มหาวิทยาลัยแมคกริลได้สร้างกฎการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นเป็นครั้งแรก ทฤษฎีของ Hebb กล่าวว่าถ้านิวรอน 2 หน่วยทำงานพร้อมกันค่าน้ำหนักระหว่างสายการเชื่อมโยงของทั้งสองนิวรอนต้องลดลง

ในช่วงปี ค.ศ.1950 ถึง 1960 ถือว่าเป็นช่วงที่มีการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมกันอย่างกว้างขวาง เมื่อ John van Neumann บิดาแห่งวงการคอมพิวเตอร์ยุคใหม่ได้นำเอาแบบจำลองของสมองที่เสนอโดยนักวิจัยที่ทำงานเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียมไม่ว่าจะเป็น Warren McCulloch และคนอื่น ๆ มาเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ยุคต่อมา จนในปี ค.ศ.1956 ก็ได้มีการสร้างแบบจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ขึ้นสำเร็จ

ในปี ค.ศ.1962 Frank Rosenblatt ได้เสนอทฤษฎีการเรียนรู้ของโครงข่ายที่เรียกว่า Perceptrons การเรียนรู้ใช้การปรับค่าน้ำหนักภายในโครงข่ายจนกระทั่งได้ค่าสัญญาณเอาต์พุตตรงกับสัญญาณเอาต์พุตตัวอย่าง

ในปี ค.ศ.1972 Kohonen ได้พัฒนาการเรียนรู้ของโครงข่ายด้วยการแก้ไขค่าน้ำหนักแบบเมตริกซ์ โดยอาศัยพื้นฐานจากทฤษฎีของ Hebb และในปีเดียวกันเขาก็ได้เสนอทฤษฎีการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Self-organizing โดยการจัดรวมนิวรอนเป็นกลุ่มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสียงพูดและต่อมา James Anderson ก็ได้พัฒนาโครงข่ายแบบ Brain-State-in-a-box เพื่อใช้ในการวินิจฉัยโรคและเรียนรู้สูตรคูณต่าง ๆ

ในช่วงปี ค.ศ.1985-1990 Carpenter และ Grossberg ได้เสนอทฤษฎี Adaptive resonance สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลแบบไบนารี (ART1) และข้อมูลอินพุตแบบต่อเนื่อง (ART2) David Parker ได้เสนอทฤษฎีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ ทฤษฎีการเรียนรู้ของเขาใช้การนำค่าผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุตที่คำนวณได้กับสัญญาณเอาต์พุตตัวอย่างกลับมากำหนดค่าน้ำหนัก

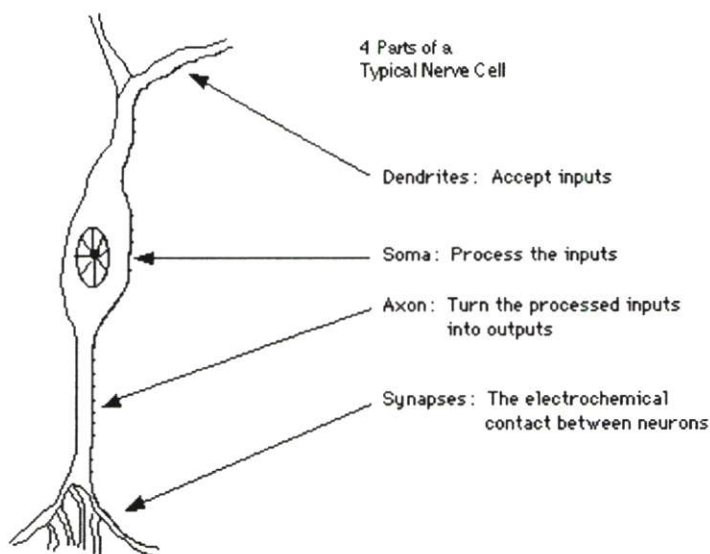
## 4.2 โครงข่ายประสาทตามทัศนคติชีววิทยา

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีรายละเอียดไม่เหมือนกันกับระบบประสาทตามทัศนคติชีววิทยา ซึ่งก็แล้วแต่ให้ความสำคัญใดเป็นหลัก แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเน้นความสามารถของโครงข่ายที่นำคุณสมบัติมาใช้งาน มากกว่าเหตุผลตามทัศนคติชีววิทยาของโครงข่าย ถึงแม้ว่าเกือบทั้งหมดจะให้ความสนใจเป็นอย่างมากกับความสามารถในการคำนวณของโครงข่ายประสาทยังก็ตามต่อไปนี้จะได้อธิบายถึงลักษณะบางอย่างของโครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติชีววิทยา ซึ่งอาจจะช่วยให้เข้าใจอย่างชัดเจนถึงลักษณะพิเศษที่สำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อเข้าถึงจุดแรกเริ่มสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม ในระบบโครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติชีววิทยาได้ให้แนวคิดลักษณะสำคัญถึงสิ่งที่ประ โยชน์ต่อการคำนวณอย่างพิเศษ อุปมาเหมือนมีความใกล้เคียงกันมากระหว่าง โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติชีววิทยา (สมอง หรือ เซลล์ประสาท) และส่วนประมวลผล (หรือโครงข่ายประสาทเทียม) ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละเซลล์จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

โครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติชีววิทยา มีส่วนประกอบที่สำคัญและให้ความสนใจเป็นพิเศษ เพื่อที่จะทำความเข้าใจถึงโครงข่ายประสาทเทียม มีด้วยกัน 3 ส่วน คือ เดนไดรต์ (Dendrite) โซมา (Soma) และแอกซอน (Axon) สำหรับ เดนไดรต์จะรับสัญญาณมาจากนิวรอนอื่น สัญญาณก็คือแรงกระตุ้นประจุไฟฟ้า ที่ถูกส่งผ่านเข้ามายังช่องไซแนปติก (Synaptic) นั้นหมายถึงการส่งผ่านตามกระบวนการทางเคมี พฤติการณ์ของการแปรเปลี่ยนส่งผ่านทางเคมี สัญญาณที่เข้ามา มีวิธีการคล้ายกับพฤติกรรมของน้ำหนักรในโครงข่ายประสาทเทียม

โซมา หรือลำตัวเซลล์ จะทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามา ภายในตัวของโซมาจะทำให้เกิดแรงที่ต้องการส่งสัญญาณข้ามผ่านบนแอกซอนไปยังเซลล์อื่น การส่งสัญญาณจากนิวรอนได้เป็นผลสำเร็จนั้นก็ด้วยพฤติกรรมที่เป็นผลระดับความดันของไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อที่ต่างกันของไอออน (Ion) บนแอกซอนของนิวรอนอีกด้านหนึ่ง ในรูปที่ 4.1 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติชีววิทยาแบบทั่วไป เงื่อนไขที่พิเศษหลายอย่างของการประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียม ที่สำเร็จได้ด้วย คุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติชีววิทยา มีดังนี้

1. ส่วนประมวลผล ที่รับสัญญาณเข้ามาหลายส่วน
2. สัญญาณอาจถูกแปรเปลี่ยนโดยน้ำหนักร ณ ที่การรับไซแนป
3. ส่วนประมวลผล ทำการรวมอินพุตน้ำหนักร
4. ภายใต้พฤติกรรมที่เหมาะสม นิวรอนจะส่งสัญญาณเอาต์พุต
5. เอาต์พุตจากนิวรอนที่พิเศษอาจจะส่งไปยังนิวรอนอื่นได้หลายเซลล์ (ตามกิ่งแขนงแอกซอน)



รูปที่ 4.1 แสดงนิวรอนตามทัศนคติชีววิทยาแบบทั่วไป

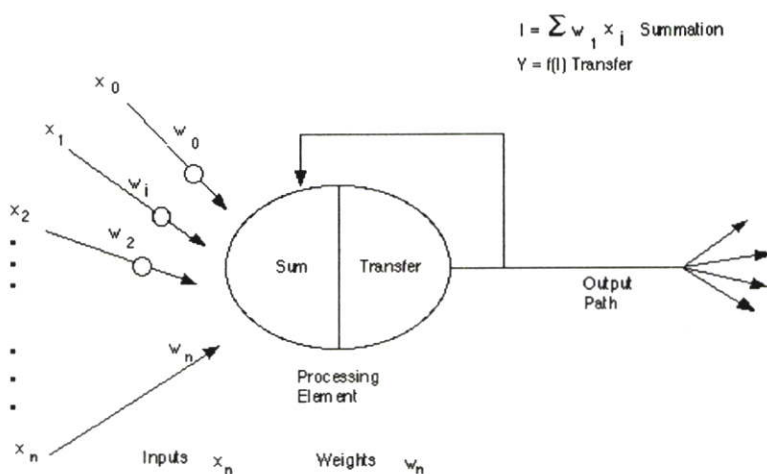
### 4.3 โครงข่ายประสาทเทียมตามทัศนคติของคอมพิวเตอร์

ปัจจุบันวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ได้พยายามพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีความฉลาดมากยิ่งขึ้น โดยพยายามให้เครื่องคอมพิวเตอร์มีการเรียนรู้และสามารถทำการตัดสินใจได้เอง หรือเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยในการตัดสินใจในขั้นต้น ระบบการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมหรือระบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์ค (Artificial Neural Network System: ANNS) โครงข่ายประสาทเทียมในทางทัศนคติของคอมพิวเตอร์แล้ว ก็จะประกอบด้วยส่วนประมวลผล ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันหลาย ๆ ตัว ทำงานกันในลักษณะคู่ขนานคล้ายกันนิวรอนในสมองมนุษย์ เพื่อแปลงข้อมูลจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง การใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นไปในรูปแบบของการสอนแทนการป้อนโปรแกรม การสอนโดยให้ตัวเลขที่แสดงถึงน้ำหนักความสำคัญกำกับไว้ ณ จุดเชื่อมต่อต่างๆ ที่อยู่ในสถาปัตยกรรมของโครงข่าย ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมทำงานอยู่ จะมีการปรับค่าตัวเลขที่แสดงน้ำหนักความสำคัญ โดยการใช้เกณฑ์ต่าง ๆ เข้ามาช่วยปรับเปลี่ยน จนทำให้ผลของเอาต์พุตนั้น ๆ ถูกต้องเป็นไปตามกลไกของโครงข่ายประสาทเทียมจนสามารถเรียนรู้และจดจำได้

### 4.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เป็นระบบประมวลผลข้อมูลที่มีคุณลักษณะการทำงานเทียบได้กับโครงข่ายประสาทจริงทางชีววิทยา โครงข่ายประสาทเทียมนี้ได้พัฒนาการรู้จักหรือระลึกจำของมนุษย์ให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. โครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลจำนวนมากมาย เรียกว่า นิวรอน (Neuron, Unit, Cell หรือ Nodes) การประมวลผลข้อมูลจะเกิดขึ้นได้ที่นิวรอนนี้
2. สัญญาณต่าง ๆ ส่งผ่านนิวรอนได้ด้วยการเชื่อมต่อกันเป็นลิงค์ (Link)
3. แต่ละลิงค์จะมีความสัมพันธ์กับค่าน้ำหนัก (Weight) ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นค่าที่ให้โครงข่ายในการตัดสินใจแก้ปัญหา โดยทั่วไป ค่าน้ำหนักนี้จะถูกคูณเข้ากับสัญญาณอินพุตเพื่อส่งออกไปยังนิวรอนอื่น ๆ
4. แต่ละนิวรอนจะมีค่าสถานะภายใน (Internal State) เรียกว่าระดับการกระตุ้น (Activation หรือ Activity Level) ที่จะให้ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation Function) ของสัญญาณอินพุตผลลัพธ์ เพื่อส่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตออกไปให้แก่นิวรอนตัวอื่น ๆ ฟังก์ชันการกระตุ้นนี้



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

#### 4.4.1 คุณลักษณะสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียม

จากหลักการเบื้องต้นของโครงข่ายประสาทเทียม จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกกำหนดโดย

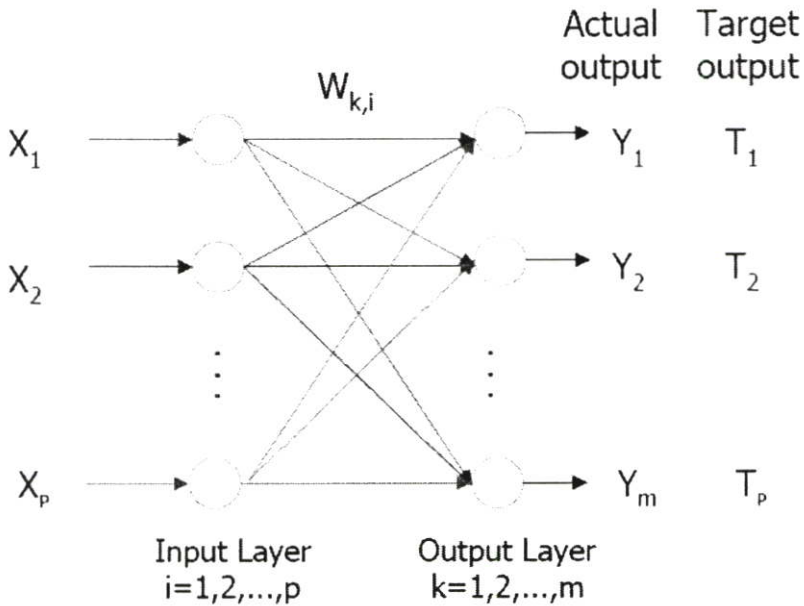
1. รูปแบบของการเชื่อมต่อ (Connection) ระหว่างนิวรอน เรียกว่า สถาปัตยกรรมโครงข่าย (Net Architecture)
2. วิธีกำหนดค่าน้ำหนักบนการเชื่อมต่อ เรียกว่าการเรียนรู้ (Training, Learning หรือ Algorithm)
3. ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation Function)

#### 4.4.2 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม สามารถจำแนกได้ตามลักษณะโครงสร้างของโครงข่าย หรือจำแนกตามกระบวนการเรียนรู้ ซึ่งในหัวข้อนี้จะจำแนกตามลักษณะโครงสร้างที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายประสาทเทียม สามารถจำแนกออกได้เป็นสามประเภท ดังนี้

#### 4.4.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชั้นเดียว (Single Layer)

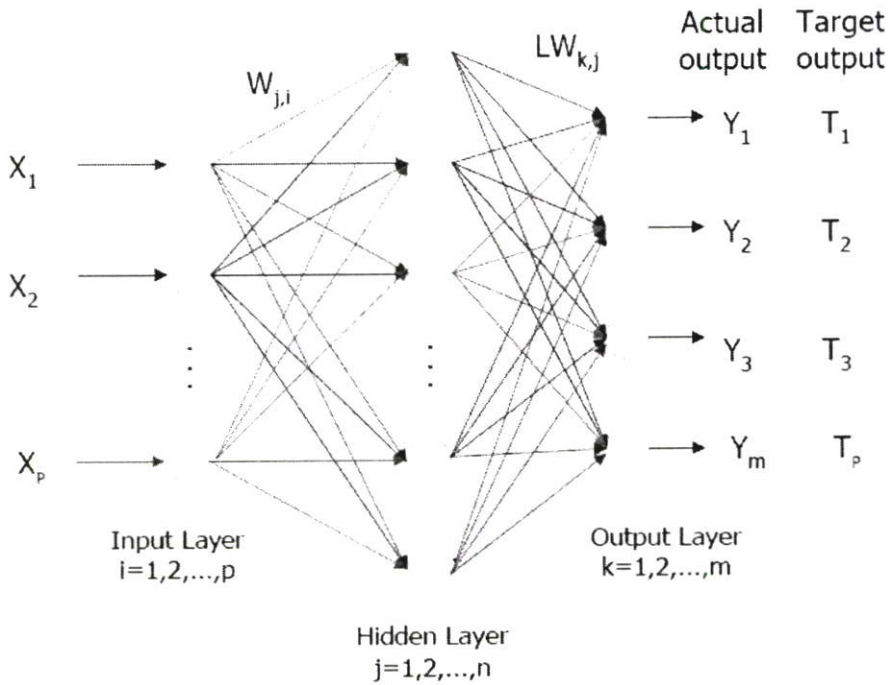
สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ ประกอบด้วยอินพุตนิวรอน ( $X_1, X_2, \dots, X_p$ ) เชื่อมต่ออยู่กับเอาต์พุตนิวรอน ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ ) โดยมีค่าน้ำหนัก ( $W_{k,i}$ ) เป็นตัวปรับระดับสัญญาณอินพุต ดังรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว ส่วนค่าน้ำหนักที่คำนวณได้จากเอาต์พุต ถือว่าเป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม จะสังเกตได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดชั้นเดียวนี้มีค่าน้ำหนักเชื่อมอยู่ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเพียงชั้นเดียว ค่าน้ำหนักแต่ละค่าจะเป็นอิสระต่อกัน ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการปรับค่าน้ำหนักตัวอื่น จึงมักใช้กับการประมวลผลข้อมูลที่ไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

#### 4.4.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดหลายชั้น (Multi Layer)

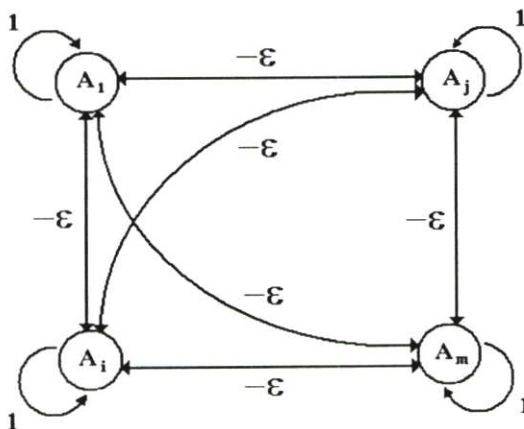
สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ ประกอบด้วยค่าน้ำหนักมากกว่าหนึ่งชั้นขึ้นไป โครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้มีชั้นซ่อนเป็นตัวเชื่อมระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต โครงข่ายประเภทนี้สามารถไขว้เคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าชนิดชั้นเดียว แต่กระบวนการเรียนรู้ก็จะยุ่งยากมากกว่า รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

#### 4.4.2.3 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดคอมเพทิทีฟ (Competitive Layer)

สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ เป็นการเชื่อมโยงโครงข่ายหลาย ๆ โครงข่ายเข้าด้วยกัน โครงข่ายย่อย ( $A_1, A_i, A_j, A_k$ ) ที่ประกอบกันเป็นโครงข่ายใหญ่ จะเชื่อมต่อกันด้วยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าคงที่ ( $-\epsilon$ ) แต่ละโครงข่ายย่อยมีสถาปัตยกรรมภายในของตัวเอง ไม่จำเป็นต้องเหมือนกันและเมื่อโครงข่ายย่อยประมวลผลภายในแล้ว จะส่งสัญญาณเอาต์พุตไปเป็นสัญญาณอินพุตของโครงข่ายอื่นผ่านค่าน้ำหนัก  $-\epsilon$  จนกระทั่งเหลือเพียงโครงข่ายย่อยโครงข่ายเดียวที่ให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตไม่เท่ากับศูนย์



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดคอมเพทิทีฟ

### 4.4.3 การเรียนรู้ของโครงข่าย

การกำหนดน้ำหนักของโครงข่าย มีวิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นของน้ำหนัก (ในช่วงการฝึกสอน) เป็นการหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่าย ที่สามารถฝึกสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมเกิดการเรียนรู้ได้ โดยการป้อนชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตตัวอย่างที่ถูกต้องให้กับนิวรอนแต่ละเซลล์และนิวรอนจะมีกระบวนการปรับค่าน้ำหนักในระบบให้สอดคล้องกับกลุ่มตัวอย่างของชุดข้อมูลอินพุตที่จุดเชื่อมโยงค่าน้ำหนักจะถูกปรับแต่งเป็นไปตามฟังก์ชันการทำงานของระบบ ตามลักษณะพิเศษของกลุ่มตัวอย่างที่ป้อนให้ ขั้นตอนนี้อาจเป็นมากที่จะแบ่งแยกคุณลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม กระบวนการเรียนรู้จะจำแนกออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

#### 4.4.3.1 การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning)

ในการกำหนดแบบโครงข่ายประสาทเทียมส่วนมาก ได้รับความสำเร็จจากการฝึกสอน ก็โดยการนำเสนออย่างเป็นลำดับของเวกเตอร์การฝึกสอนหรือรูปแบบที่ดี (Pattern) ในแต่ละเวกเตอร์เอาต์พุตเป้าหมายที่มีความสัมพันธ์กัน และได้ค่าน้ำหนักที่ผ่านการปรับแต่งได้อย่างเหมาะสมดี ในช่วงขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ กระบวนการนี้เป็นที่รู้จักอย่างเดียวกัน คือ การเรียนรู้แบบควบคุม

#### 4.4.3.2 การเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning)

การฝึกสอนวิธีนี้ใช้หลักการปรับน้ำหนักด้วยตัวเอง ที่จุดเชื่อมต่อต่างๆ จะมีการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณเอาต์พุตที่ถูกต้อง นั้นหมายถึงการปรับน้ำหนักนั้นจะไม่มี การกำหนดค่าสัญญาณที่ถูกต้องไว้ ว่าควรตั้งน้ำหนักในแต่ละจุดอย่างไร แต่อาศัยการป้อนกลับของสัญญาณแล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าของเซลล์นิวรอนเอง

### 4.4.4 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับโครงข่ายประสาท ทั้งที่เป็นแบบจำลองและเป็นโครงข่ายของเซลล์ประสาทจริงของมนุษย์ จะมีการเชื่อมต่อกันของโหนดในลักษณะของโครงข่ายอย่างหนาแน่น เพื่อให้โครงข่ายสามารถเรียนรู้และจดจำสิ่งที่เรียนรู้มาแล้วได้ จากการเชื่อมโยงของโครงข่ายจะมีสองลักษณะด้วยกัน คือ

1) โครงข่ายที่ส่งสัญญาณแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Network) โครงข่ายชนิดนี้จะประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ของโครงข่าย โดยชั้นแรกจะเป็นชั้นอินพุต และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของเอาต์พุต ส่วนระหว่างทั้งสองชั้นจะมีหรือไม่มีก็ได้ จะมีชั้นที่แทรกอยู่ภายในอีกก็ได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขั้นตอนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่าย เช่น ถ้าเป็นโครงข่ายเปอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron) ก็จะมีชั้นที่อยู่ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตอีก ซึ่งอาจจะมากกว่าหนึ่งชั้นก็ได้

ได้ ส่วนโครงข่าย Self – Organizing Map ของโคโฮเนนจะมีเพียงชั้นอินพุตกับเอาต์พุตเท่านั้น การเชื่อมต่อระหว่างชั้นของโครงข่ายแบบส่งสัญญาณป้อนไปข้างหน้า จะมีค่าน้ำหนักเป็นตัวเชื่อม และสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจะถูกส่งไปตามทิศทางไปข้างหน้าจนถึงชั้นเอาต์พุต โดยไม่มีการป้อนกลับ

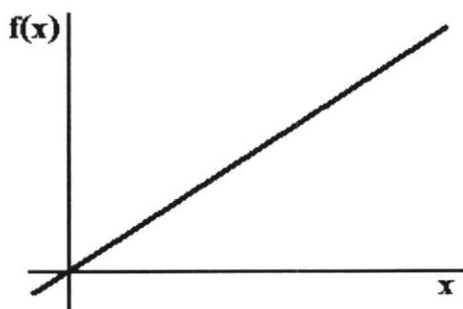
2) โครงข่ายที่ส่งสัญญาณแบบป้อนกลับ (Feedback Network) ในส่วนแรกของโครงข่ายนี้จะเป็นโครงข่ายแบบส่งสัญญาณไปข้างหน้าเหมือนกับแบบแรก แต่มีส่วนที่เพิ่มเข้ามา คือ ส่วนของการป้อนกลับ (Feedback)

#### 4.5 ฟังก์ชันกระตุ้น(Activation function)

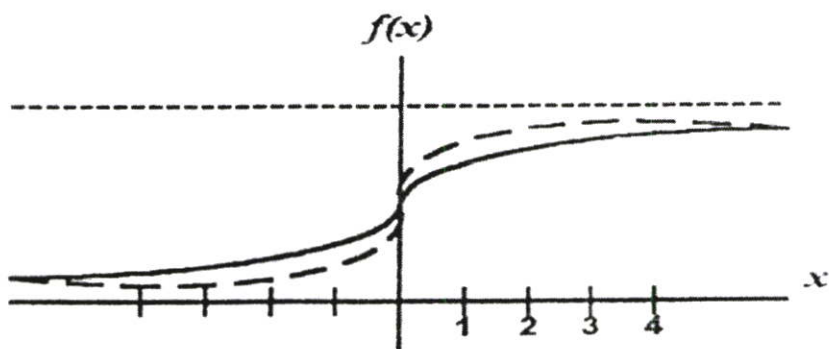
ฟังก์ชันกระตุ้นคือ ฟังก์ชันคำนวณค่าสัญญาณเอาต์พุตของนิวรอน โดยพิจารณาระดับผลรวมของสัญญาณอินพุตที่ส่งมายังนิวรอนแต่ละหน่วยสำหรับอินพุตนิวรอน ฟังก์ชันกระตุ้นจะมีลักษณะเป็น Identity function ดังรูปที่ 4.6

สมการของ Identity function :  $f(x)=x$  for all  $x$

ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้กันมากอีกฟังก์ชันหนึ่งคือ ฟังก์ชันของซิกมอยด์ ฟังก์ชันนี้ให้ความละเอียดในการพิจารณาค่าเอาต์พุตสูงเพราะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและค่าอนุพันธ์ของสัญญาณอินพุต ในกรณีที่ฟังก์ชันกระตุ้นของโครงข่ายมีขอบเขตของข้อมูลในการวิเคราะห์อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หรือสัญญาณไบนารีเรียกว่า ฟังก์ชันไบนารีซิกมอยด์ (Binary sigmoid function) ดังรูปที่ 4.7

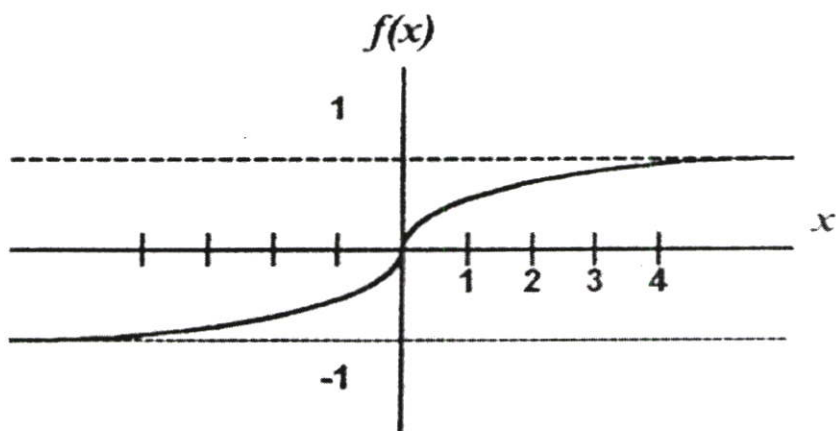


รูปที่ 4.6 แสดงไอเดนติตี้ฟังก์ชัน (Identity function)



รูปที่ 4.7 แสดงฟังก์ชันไบนารีซิกมอยด์

ในกรณีที่ต้องวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีความซับซ้อนมาก การใช้ขอบเขตข้อมูลในช่วง 0 ถึง 1 อาจให้คำตอบที่ไม่ละเอียดพอ ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดต่อการคำนวณค่าสัญญาณเอาต์พุตได้จึงจำเป็นต้องขยายขอบเขตของข้อมูลเป็น -1 ถึง 1 เพื่อขยายช่วงความชันของกราฟให้มีความละเอียดมากขึ้น ฟังก์ชันของซิกมอยด์ที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลโดยมีขอบเขตอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 เรียกว่า ฟังก์ชันไบโพลาร์ซิกมอยด์ (Bipolar sigmoid function) ดังรูปที่ 4.8



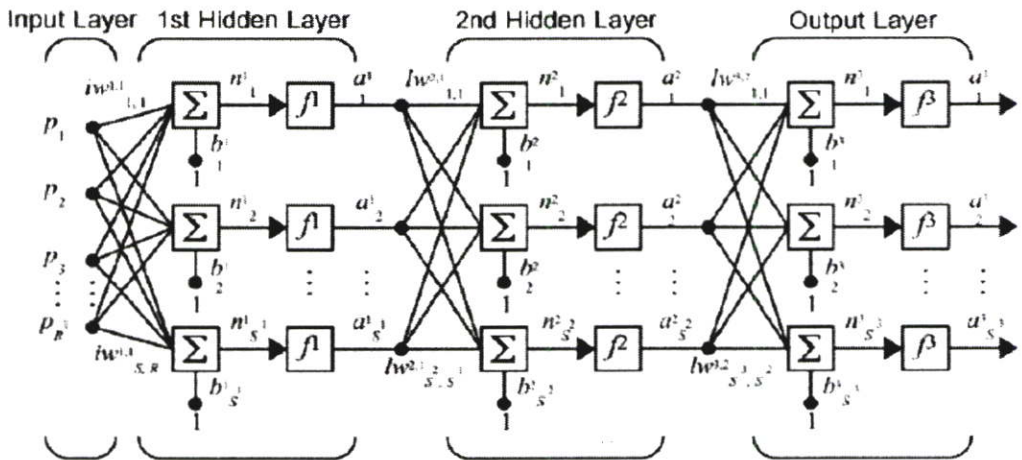
รูปที่ 4.8 แสดงฟังก์ชันไบโพลาร์ซิกมอยด์

ฟังก์ชันกระตุ้นของโครงข่ายประสาทเทียมมีคุณสมบัติสำคัญหลายประการคือ ต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง (Continuous function) ให้ค่าผลลัพธ์จากการคำนวณเป็นค่าเฉพาะเพียงค่าเดียวและสามารถคำนวณค่าอนุพันธ์ของข้อมูลได้ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าต้องการให้การคำนวณมีประสิทธิภาพควรเลือกสมการของฟังก์ชันกระตุ้นที่สามารถคำนวณค่าอนุพันธ์ได้ง่ายและในการปรับค่าน้ำหนักหรือไบอัสจะต้องคำนวณค่าอนุพันธ์ด้วยทุกครั้ง

## 4.6 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation NN)[15]

### 4.6.1 โครงสร้าง

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back-propagation neural network : BP) ประกอบด้วยนิวรอนเซลล์ที่เรียงกันอยู่มากกว่า 2 ชั้น กล่าวคือมีได้ตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วยชั้นอินพุท (Input layer), ชั้นซ่อน (Hidden layer) และ ชั้นเอาต์พุท (Output layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อกันหมด นั่นคือ ทุก ๆ นิวรอนในชั้นอินพุทจะส่งสัญญาณไปยังทุก ๆ นิวรอนในชั้นซ่อนชั้นแรกและทุก ๆ นิวรอนในชั้นซ่อนชั้นแรกจะส่งสัญญาณไปยังทุก ๆ นิวรอนในชั้นถัดไปจนในที่สุดทุก ๆ นิวรอนในชั้นซ่อนสุดท้ายจะส่งสัญญาณไปยังทุก ๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุท จากรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายที่มี 3 ชั้น



รูปที่ 4.9 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน [16]

รูปที่ 4.9 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ชั้นซ่อน มีอินพุท R จุด, นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เท่ากับ  $S^1$  และ  $S^2$  และมีเอาต์พุท  $S^3$  จุด สมาชิกของอินพุทเวกเตอร์ P แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^1$  (เรียกว่า Input weight,  $IW^{1,1}$ ) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด  $S^1 \times R$  และเวกเตอร์  $a^1$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นซ่อนที่ 1 และมีขนาด  $S^1$  จะเป็นอินพุทของชั้นซ่อนที่ 2 สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^1$  ก็จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^2$  (เรียกว่า Layer weight,  $LW^{2,1}$ ) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด  $S^2 \times S^1$  อินพุทของชั้นข้อมูลเอาต์พุท สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^2$  จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละตัวในชั้นข้อมูลเอาต์พุทด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^3$  ( $LW^{3,2}$ ) ซึ่งเป็น

เมตริกซ์ขนาด  $S^3 \times S^2$  โดยที่เวกเตอร์  $a^3$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^3$  จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

#### 4.6.2 แนวคิด [14]

ขั้นตอนการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ป้อนข้อมูลอินพุตไปข้างหน้า, แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้องและปรับค่าถ่วงน้ำหนัก

ระหว่างป้อน ไปข้างหน้า จะเริ่มต้นด้วยการนำค่าอินพุตที่ได้รับจากชั้นอินพุตมาคำนวณหาผลรวมที่ได้รับในแต่ละนิวรอน แล้วจึงส่งผลลัพธ์ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่ 1 แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่อยู่ถัดไป ในชั้นซ่อนที่ 2 แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นนั้น จากนั้นส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นถัดไป สุดท้าย แต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุตจะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุต เพื่อหาค่าตอบหรือผลตอบสนองของโครงข่ายสำหรับแต่ละรูปแบบข้อมูลที่ป้อนให้ ทิศทางการไหลของข้อมูลเหล่านี้จะเป็นลักษณะเคลื่อนไปข้างหน้าจากชั้นของอินพุต ผ่านชั้นของนิวรอนเซลล์ภายในไปสู่ชั้นเอาต์พุต วิธีการคำนวณของโครงข่ายลักษณะนี้ จึงมีชื่อตามลักษณะดังกล่าวว่า forward-propagation

ขั้นต่อไปจะเป็นการคำนวณแบบ backward-propagation สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายมาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมายเพื่อคำนวณค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง แล้วค่าผลต่างระหว่างเอาต์พุตของโครงข่ายกับเอาต์พุตเป้าหมายที่ได้จากโครงข่ายจะถูกส่งถอยหลังกลับมาถึงชั้นซ่อนที่ 2 และส่งต่อไปยังนิวรอนต่างๆ ภายในชั้นซ่อนที่ 2 แต่ละโนดจะได้รับค่าผิดพลาดเพียงบางส่วนขึ้นอยู่กับนิวรอนเซลล์นั้นเป็นตัวที่ส่งผลมากหรือน้อยไปสู่เอาต์พุตนั้น เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นซ่อนที่ 2 กระบวนการของการส่งค่าความผิดพลาดกลับมาจะซ้ำกับชั้นถัดลงมาอีกจนกระทั่งทุกโนดในโครงข่ายได้รับส่วนแบ่งค่าความผิดพลาดนั้น

ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเปลี่ยนไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของค่าผิดพลาดที่ได้รับ กระบวนการจะกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนแรกจนกระทั่งค่าผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่ค่าผิดพลาดค่าสุดท้ายที่กำหนดไว้ต่อไปเป็นรายละเอียดของการทำงานในแต่ละขั้นตอน

##### 1. แพร่ค่าป้อนไปข้างหน้า (Forward-propagation)

เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ( $P_R, R = 1, \dots, R$ ) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 ถูก

เชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $iw_{S^1,R}^{1,1} = S^1 = 1, \dots, S^1$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุทของ นิวรอนเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 1 ได้จากสมการ

$$net_{S^1} = b_{S^1}^1 + \sum_{R=1}^R iw_{S^1,R}^{1,1} P_R \quad (4.1)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุท ( $a^1$ ) ในชั้นซ่อนที่ 1

$$a^1 = f(net_{S^1}) \quad (4.2)$$

เมื่อสัญญาณเอาต์พุท ( $a^1$ ) ในชั้นซ่อนที่ 1 เอาต์พุทที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นซ่อนที่ 2 โดยแต่ละ นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $lw_{S^2,S^2}^{2,1} = S^2 = 1, \dots, S^2$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุทของนิวรอนเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 2 ได้จากสมการ

$$net_{S^2} = b_{S^2}^2 + \sum_{S^1=1}^{S^1} lw_{S^2,S^1}^{2,1} a^1 \quad (4.3)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุท ( $a^2$ ) ในชั้นซ่อนที่ 2

$$a^2 = f(net_{S^2}) \quad (4.4)$$

เมื่อสัญญาณเอาต์พุท ( $a^2$ ) ในชั้นซ่อนที่ 2 เอาต์พุทที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุท โดยแต่ละ นิวรอนในชั้นเอาต์พุท ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $lw_{S^3,S^2}^{3,2} = S^3 = 1, \dots, S^3$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุทของนิวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุทได้จากสมการ

$$net_{S^3} = b_{S^3}^3 + \sum_{S^2=1}^{S^2} lw_{S^3,S^2}^{3,2} a^2 \quad (4.5)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุท ( $a^3$ ) ในชั้นเอาต์พุท

$$a^3 = f(net_{S^3}) \quad (4.6)$$

## 2) แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาด (Back-propagation of error)

ในแต่ละนิเวรอนของชั้นเอาต์พุท ค่าผิดพลาดของโครงข่ายจะเป็นผลต่างระหว่างเอาต์พุทเป้าหมายกับเอาต์พุทของโครงข่าย ( $t^3 - a^3$ ) ค่าผิดพลาดที่ได้จะถูกส่งกลับเข้ามายังโครงข่ายในรูปของสัญญาณค่าผิดพลาด (error signal) การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นเอาต์พุท หาได้จากสมการ

$$\delta^3 = (t^3 - a^3)f'(net_{s^3}) \quad (4.7)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนัก  $lw_{s^3,s^2}^{3,2}$  หลังจากนั้น) โดยที่  $\alpha$  คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

$$\Delta lw_{s^3,s^2}^{3,2} = \alpha \delta^3 a^2 \quad (4.8)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับ  $b_{s^3}^3$  หลังจากนั้น)

$$\Delta b_{s^3}^3 = \alpha \delta^3 \quad (4.9)$$

และส่ง  $\delta^3$  ไปที่ชั้นซ่อนที่ 2

ในแต่ละนิเวรอนของชั้นซ่อนที่ 2 การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นซ่อนที่ 2 หาได้จากสมการ

$$\delta^2 = \sum_{s^3=1}^{s^3} \delta^3 lw_{s^3,s^2}^{3,2} f'(net_{s^2}) \quad (4.10)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนัก  $lw_{s^2,s^1}^{2,1}$  หลังจากนั้น)

$$\Delta lw_{s^2,s^1}^{2,1} = \alpha \delta^2 a^1 \quad (4.11)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับ  $b_{s^2}^2$  หลังจากนั้น)

$$\Delta b_{s^2}^2 = \alpha \delta^2 \quad (4.12)$$

และส่ง  $\delta^2$  ไปยังชั้นชอนที่ 1

ในแต่ละนิเวรอนของชั้นชอนที่ 1 การหาสัญญาณค่าผิดพลาดที่ชั้นชอนที่ 1 หาได้จากสมการ

$$\delta^1 = \sum_{S^2=1}^{S^2} \delta^2 lw_{S^2,S^1}^{2,1} f'(net_{S^1}) \quad (4.13)$$

คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก  $\Delta lw_{S^1,R}^{1,1}$  หลังจากนั้น)

$$\Delta lw_{S^1,R}^{1,1} = \alpha \delta^1 P_R \quad (4.14)$$

คำนวณค่าไบอัส (bias) ที่เกี่ยวข้อง (ใช้เพื่อปรับปรุง  $b_{S^1}^1$  หลังจากนั้น)

$$\Delta b_{S^1}^1 = \alpha \delta^1 \quad (4.15)$$

### 3. ขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

ถ้าหากมีข้อผิดพลาดขึ้น ค่าผิดพลาดที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ในการปรับน้ำหนักเพื่อให้โครงข่ายได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง การปรับน้ำหนักสำหรับแต่ละนิเวรอนในชั้นเอาต์พุท คำนวณได้จาก

$$lw_{S^3,S^2}^{3,2(new)} = lw_{S^3,S^2}^{3,2(old)} + \Delta lw_{S^3,S^2}^{3,2} \quad (4.16)$$

ส่วนการปรับน้ำหนักของชั้นชอนที่ 2 การทำงานจะเป็นเช่นเดียวกับสมการที่ 4.16 แต่ตัวแปรต่าง ๆ จะเป็นของชั้นชอนอยู่ สำหรับแต่ละนิเวรอนในชั้นชอนที่ 2 ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$lw_{S^2,S^1}^{2,1(new)} = lw_{S^2,S^1}^{2,1(old)} + \Delta lw_{S^2,S^1}^{2,1} \quad (4.17)$$

สำหรับแต่ละนิเวรอนในชั้นชอนที่ 1

$$lw_{S^1,R}^{1,1(new)} = lw_{S^1,R}^{1,1(old)} + \Delta lw_{S^1,R}^{1,1} \quad (4.18)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับทีละชั้นเอาต์พุทกลับไปยังชั้นอินพุท เมื่อเสร็จสิ้นก็จะกลับไปส่วนของป้อนไปข้างหน้าอีกครั้ง เพื่อหาค่าเอาต์พุทของโครงข่ายใหม่มาเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุท

เป้าหมาย และดำเนินการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในส่วนของการแพร่ค่าย้อนกลับเช่นนี้สลับกันไป โดยวัฏจักรของการคำนวณหาค่าความผิดพลาดและการปรับน้ำหนักจะคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งค่าความผิดพลาดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดกระบวนการ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับทุกคู่ของอินพุตและค่าเป้าหมาย ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ การคำนวณหาความผิดพลาดรวมของตัวอย่าง หาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean-square error, MSE) ระหว่างคำตอบที่แท้จริง ( $t_i^3$ ) กับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม ( $a_i^3$ ) ในสมการ (4.19)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i^3 - a_i^3)^2 \quad (4.19)$$

โดยที่  $N$  = จำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน

ในขั้นตอนการปรับน้ำหนักที่กล่าวมาข้างต้น เป็นหลักการพื้นฐานแต่ลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสของการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิด Feed-forward Neural Networks โดยใช้ Neural Network Toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น Levenberg-Maquardt algorithm, Resilient Backpropagation, Conjugate Gradient เป็นต้น แต่ละวิธีจะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนแตกต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน Neural Network Toolbox User's Guide นั้น Levenberg-Maquardt algorithm มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนสูงที่สุดในการศึกษานี้จึงได้นำเอาลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสวิธีนี้มาใช้ โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส ดังสมการที่ 4.20

$$X_{(new)} = X_{(old)} + \Delta X = X_{(old)} + [J^T \cdot J + \alpha I]^{-1} \cdot J^T \cdot e \quad (4.20)$$

- โดยที่
- $X$  คือค่าถ่วงน้ำหนัก ( $w$ ) และค่าไบแอส ( $b$ )
  - $J$  คือ จาคอบีเยนเมตริกซ์ (Jacobian matrix) ของอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาด (แต่ละค่า) ต่อค่า  $X$  (แต่ละค่า)
  - $J^T$  คือ Transpose matrix ของ  $J$
  - $e$  คือ เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด (Error) ระหว่างคำตอบ (Target,  $t^3$ ) กับค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมคำนวณได้ (Answer,  $a^3$ )
  - $I$  คือ Identity matrix

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของ } (W) \quad J(W) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,1}} & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,2}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_{1,S^2}} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,1}} & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,2}} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_{2,S^2}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial e_{S^3}}{\partial w_{S^3,1}} & \frac{\partial e_{S^3}}{\partial w_{S^3,2}} & \dots & \frac{\partial e_{S^3}}{\partial w_{S^3,S^2}} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\text{จาโคเบียนเมตริกซ์ของค่า } (b) \quad J(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial b_1} \\ \frac{\partial e_2}{\partial b_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_{S^3}}{\partial b_{S^3}} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\text{เมตริกซ์ของค่าผิดพลาด} \quad \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{S^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1^3 - a_1^3 \\ t_2^3 - a_2^3 \\ \vdots \\ t_{S^3}^3 - a_{S^3}^3 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

โครงข่ายประสาทเทียมที่ฝึกสอนด้วยกฎการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับนั้น จะมีจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลอินพุต และชั้นข้อมูลเอาต์พุตคงที่ ซึ่งเท่ากับจำนวนของอินพุตและเอาต์พุตของปัญหานั้นเอง ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม และไม่มีจำนวนที่เป็นสูตรสำเร็จ ดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้ค่าผิดพลาดระหว่างคำตอบที่แท้จริงกับผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียมต่ำที่สุด (มีประสิทธิภาพสูงที่สุด) จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วยังมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนอีกด้วย โครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย จะใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าโครงข่ายที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมาก เมื่อฝึกสอนด้วยเงื่อนไขเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถสรุปได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนมากจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าในโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนน้อย

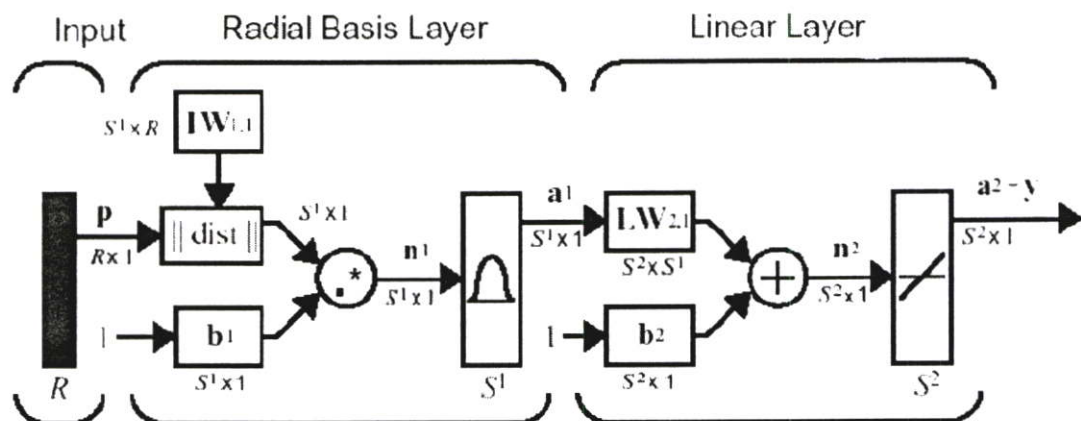
## 4.7 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (Radial Basis Function NN)[15]

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีเป็นสองชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมป้อนไปข้างหน้าที่นิยมใช้กัน โดยทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานและการประมวลผลที่แตกต่างกัน กล่าวคือ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับมีจำนวนชั้นซ่อนมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งชั้น และฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนสามารถใช้ได้ทั้ง Log-sigmoid หรือ Tangent-sigmoid นอกจากนี้ในชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะทำการประมวลผลระหว่างค่าอินพุตกับค่าถ่วงน้ำหนักโดยใช้ผลคูณภายใน (Inner products) ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีมีจำนวนชั้นซ่อนเพียงแค่ชั้นเดียว และใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิด Radial basis เท่านั้น ส่วนการประมวลผลระหว่างอินพุตกับค่าถ่วงน้ำหนักจะใช้การคำนวณระยะห่างยูคลิดีส (Euclidean distance)

### 4.7.1 โครงสร้าง

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (Radial basis function neural network : RBF) ประกอบด้วยนิวรอนเซลล์ที่เรียงกันอยู่มากกว่า 2 ชั้น กล่าวคือ มีได้ตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วย ชั้นอินพุต (Input layer), ชั้นซ่อนหรือบางครั้งเรียกว่า ชั้นฐานรัศมี (Radial basis layer) และ ชั้นเอาต์พุตหรือบางครั้งเรียกว่าชั้นเชิงเส้น (Linear layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อกันหมดนั่นคือ ทุก ๆ นิวรอนในชั้นอินพุตจะส่งสัญญาณไปยังทุก ๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมี และทุก ๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมีจะส่งสัญญาณไปยังทุก ๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุต จากรูปที่ 4. แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี

รูปที่ 4.10 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี มีอินพุต  $R$  ชุด, นิวรอนในชั้นฐานรัศมี เท่ากัน  $S^1$  และมีเอาต์พุต  $S^2$  ชุด สมาชิกของอินพุตเวกเตอร์  $P$  แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นฐานรัศมีด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^1$  (เรียกว่า Input weight,  $IW^{1,1}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^1 \times R$  และเวกเตอร์  $a^1$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของชั้นฐานรัศมี โดยมีขนาด  $S^1$  จะเป็นอินพุตของชั้นเชิงเส้นหรือชั้นเอาต์พุต สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์  $a^1$  ก็จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นเชิงเส้น ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก  $W^2$  (เรียกว่า Layer weight,  $IW^{2,1}$ ) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^2 \times S^1$  เช่นเดียวกันกับชั้นฐานรัศมี โดยที่ เวกเตอร์  $a^2$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด  $S^2$  จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4.10 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี [16]

#### 4.7.2 แนวคิด [14]

ขั้นตอนการฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี จะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ป้อนข้อมูลอินพุตไปข้างหน้าและกระบวนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักด้วย OLS

ระหว่างป้อนไปข้างหน้า จะเริ่มต้นด้วยการนำค่าอินพุตที่ได้รับจากชั้นอินพุตมาคำนวณหาระยะห่างกับค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละนิวรอน แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปคำนวณฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี จากนั้นส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุตซึ่งอยู่ถัดไป ในชั้นเอาต์พุต แต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต จะทำการคำนวณหาผลรวมที่ได้รับในแต่ละนิวรอนกับค่าไบอัส แล้วจึงส่งผลลัพธ์ที่ได้ส่งไปคำนวณกับฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น เพื่อหาค่าตอบหรือผลตอบสนองของโครงข่ายสำหรับแต่ละรูปแบบข้อมูลที่ป้อนให้ ทิศทางการไหลของข้อมูลเหล่านี้จะเป็นลักษณะเคลื่อนไปข้างหน้า

ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักด้วยกระบวนการเรียนรู้ Orthogonal Least Squares (OLS) โดยในกระบวนการนี้ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นฐานรัศมีจะเปลี่ยนไปตามจำนวนนิวรอนในชั้นฐานรัศมี ( $MN = 1, \dots, N$ ) และจะทำซ้ำกระบวนการนี้ไปจนกระทั่งจำนวนนิวรอนในชั้นฐานรัศมีมีค่าเท่ากับจำนวนชุดฝึกสอน หรือจนกว่าค่าผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดผลรวมยกกำลังสอง (Sum-square error, SSE) ที่ได้กำหนดไว้ ในสมการ (4.24) จึงไม่มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักใด ๆ ทั้งสิ้น

$$SSE = \sum_{i=1}^N (t_i^2 - a_i^2)^2 \quad (4.24)$$

ต่อไปเป็นรายละเอียดของการทำงานในแต่ละขั้นตอน

เมื่อข้อมูลอินพุตปรากฏบนชั้นอินพุต ( $P_R, R = 1, \dots, R$ ) สัญญาณจากชั้นอินพุตทั้งหมดจะถูกส่งไปตามสายเชื่อมโยงไปยังนิวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป ในช่วงรอบแรกๆ แต่ละนิวรอนในชั้นฐานรัศมี ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในชั้นฐานรัศมี ( $iw_{MN,R}^{1,1} = MN = 1, \dots, N$ ) (โดยจะกำหนดให้มีขนาดของค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นฐานรัศมีมีขนาดเล็กแล้วจึงค่อย ๆ เพิ่มขนาดของค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นฐานรัศมีเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่คำนวณ) ขณะนั้น จะทำการคำนวณสัญญาณเอาต์พุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นฐานรัศมี ( $a^1$ ) ได้จากสมการ

$$a_{MN}^1 = \exp\left(-\frac{\|P_R - iw_{MN,R}^{1,1}\|^2}{2\sigma_{MN}^2}\right) \quad (4.25)$$

จากสมการที่ 4.25 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$a^1 = \exp\left(-\sqrt{\sum_{R=1}^R (iw_{MN,R}^{1,1} - P_R)^2 * b_{MN}^1}\right)^2 \quad (4.26)$$

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

*Spread* คือ ค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี

เมื่อสัญญาณเอาต์พุต ( $a^1$ ) ในชั้นฐานรัศมี เอาต์พุตที่ได้ส่งต่อไปยังชั้นเอาต์พุต โดยแต่ละนิวรอนในชั้นเอาต์พุต ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในชั้นเอาต์พุต ( $lw_{S^2,MN}^{2,1} = S^2 = 1, \dots, S^2$ ) จะทำการคำนวณสัญญาณอินพุตของนิวรอนเซลล์ในชั้นเอาต์พุตได้จากสมการ

$$net_{S^2} = b_{S^2}^2 + \sum_{S^1=1}^{S^1} lw_{S^1=1,MN}^{2,1} a_{MN}^1 \quad (4.27)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต ( $a^2$ ) ในชั้นเอาต์พุต

$$a^2 = f(net_{S^2}) \quad (4.28)$$

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับ โดยเพิ่มจำนวนรอบที่ละรอบ และดำเนินการปรับค่าถ่วงน้ำหนักเช่นนี้ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าความผิดพลาดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดกระบวนการเรียนรู้ OLS ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี นอกจากนี้จะปรับค่าถ่วงน้ำหนักโดยเพิ่มจำนวนรอบแล้ว ยังสามารถทำการเพิ่มค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดรัศมี (*spread*) ควบคู่กันไป เพื่อค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสที่ได้จะเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับทุกคู่ของอินพุตและค่าเป้าหมาย

## บทที่ 5

# การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์

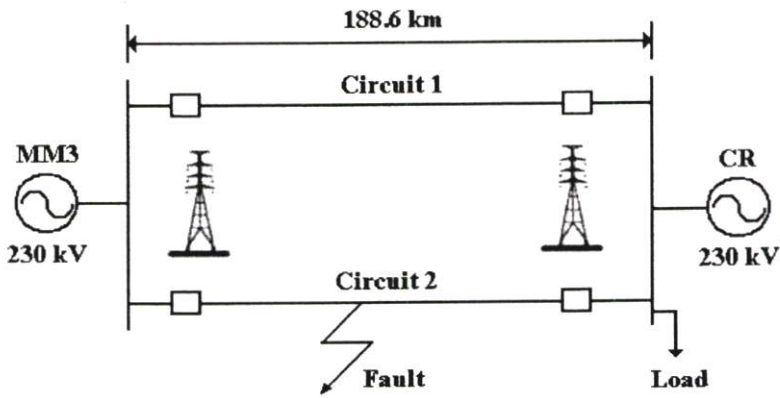
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบโดยทำการจำลองฟอลต์บนสายส่งวงจรคู่ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP [17] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงสัญญาณฟอลต์ด้วย พร้อมทั้งนำข้อมูลสัญญาณฟอลต์ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับโปรแกรม MATLAB ด้วย Wavelet and Neural Network Toolbox ในการวิเคราะห์ฟอลต์โดยมีรายละเอียดในการจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์ดังต่อไปนี้

### 5.1 การจำลองฟอลต์

ในการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นเรื่องที่ยากมากเนื่องจากไม่สามารถทดลองได้ในระบบจริง จึงมีความจำเป็นที่ต้องสร้างแบบจำลองทางระบบไฟฟ้าขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการและเรียนรู้เกี่ยวกับสิ่งที่เกิดขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่ง โดยอาศัยโปรแกรม ATPDraw for Windows version 1.4 ที่ได้รับการพัฒนามาจากโปรแกรม ATP/EMTP หรือ Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program ซึ่งช่วยในการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนไป โปรแกรมนี้มีการใช้งานและได้รับการยอมรับแบบกว้างขวางว่ามีความเหมาะสมในด้านการจำลองแบบดิจิทัลและให้ผลตอบสนองเหมือนจริงสำหรับปรากฏการณ์ทรานเซียนต์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

#### 5.1.1 แบบจำลองในการสัญญาณฟอลต์

เนื่องจากในสถานะที่เกิดฟอลต์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของเหตุการณ์เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ได้ครอบคลุมในหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างระบบจำลองแบบ 2 บัส โดยใช้สายส่งวงจรคู่ (Double circuit) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการจำลองระบบสายส่งวงจรรู

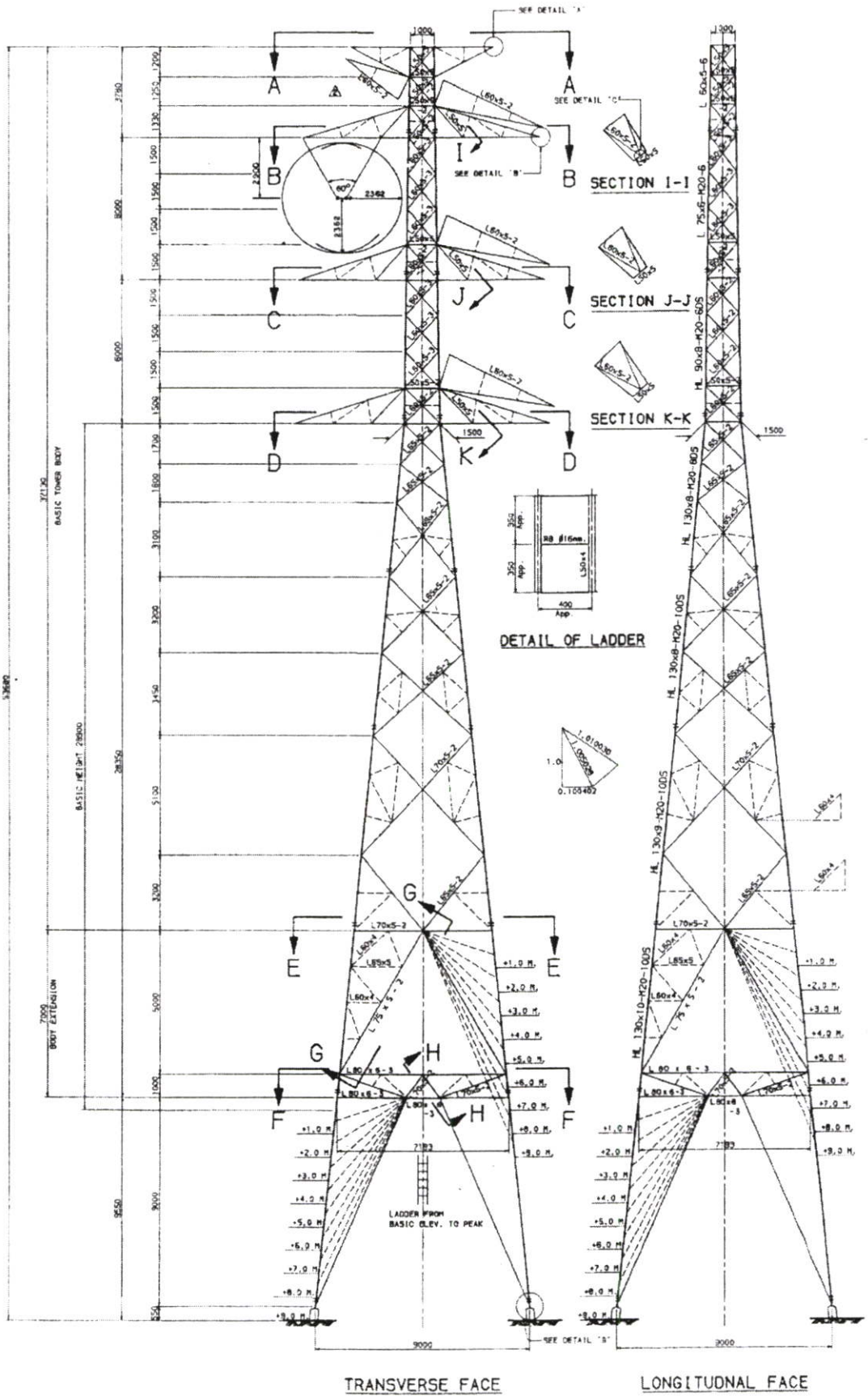
### 5.1.2 แบบจำลองสายส่ง [18]

ในการศึกษาฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่งให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองฟอลต์ ดังนั้นจึงต้องเลือกรูปแบบในการคำนวณให้เหมาะสมด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งนั้นมีให้เลือกใช้ด้วยกันหลายรูปแบบเช่น แบบวงจรรพาย (Pi - mode) แต่ก็มีข้อจำกัดและความยุ่งยากในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการนำรูปแบบการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งในรูปแบบของพารามิเตอร์ขึ้นอยู่ความถี่ (Frequency - dependent parameter) หรือนิยมเรียกกันว่า J.marti ซึ่งจะมีการคำนวณอย่างละเอียดโดยพารามิเตอร์ในการคำนวณจะเปลี่ยนไปตามความถี่ที่ใช้คำนวณ โดยคำนวณด้วยโปรแกรม ATP - LCC รูปแบบของ J.marti นี้จะเหมาะสมกับการศึกษาผลของคลื่นเดินทางและสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ต่าง ๆ รวมไปถึงการจำลองฟอลต์บนสายส่ง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้รูปแบบของ J.marti ในการสร้างแบบจำลองสายส่ง

สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งนั้นเนื่องจากในทางปฏิบัติระยะห่างของเสา (Span) และระยะหย่อน (Sag) นั้นจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non - uniform) ขึ้นอยู่กับสถานที่ในการติดตั้ง แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ระยะห่างของเสาและระยะหย่อนของสายตัวนำและสายล่อฟ้ามีค่าสม่ำเสมอตลอดช่วงระยะทางทั้งหมด

#### 5.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 230 kV [19]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบจำลองสายส่งระบบ 230 kV แบบวงจรรู (Double circuit) ซึ่งเป็นสายส่งที่มีใช้งานจริง จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะถึงสถานีไฟฟ้าเชิงรย (MM3 - CR) โดยสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างของเสา (Tower) ที่ได้ใช้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงเสาแบบ DAV1 ที่ใช้กับสายส่งแรงจลู่ 230 kV

โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

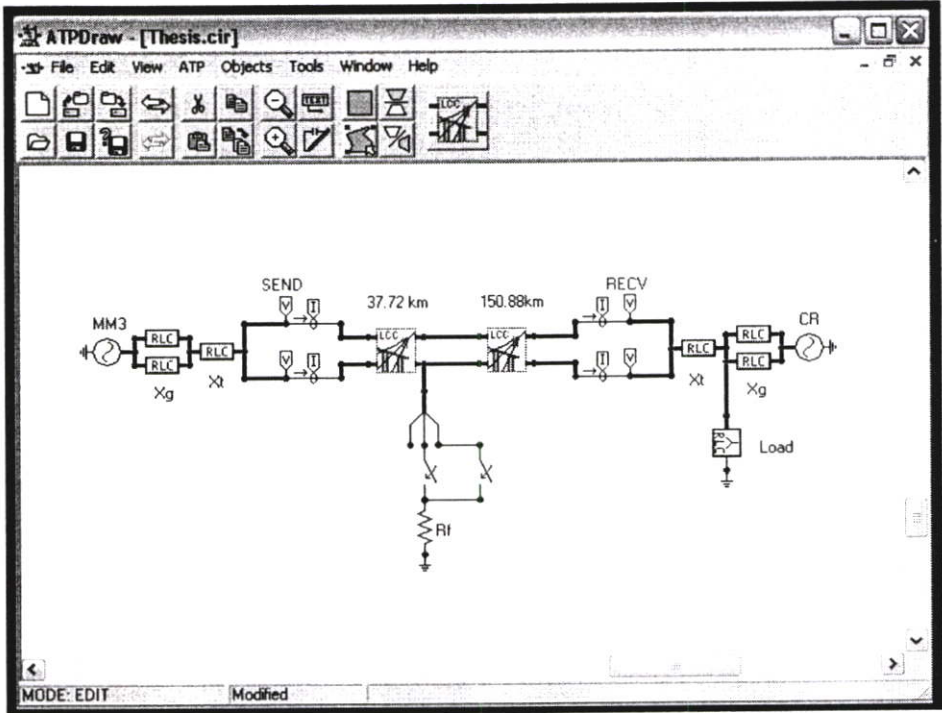
- โครงสร้างเสา (Tower) แบบ DAV1
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 4 ตัวนำ (4 bundle)
- ประเภทสาย ACSR 795 cmil (Al42/St7)
- ประเภทของสายล่อฟ้า (Over head ground wire) 3/8 inch , EHS GALV (St7)
- ความต้านทานของสายตัวนำ 0.0449 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ความต้านทานของสายล่อฟ้า 4.194 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ระยะห่างของตัวนำเฟส A (วัดจากกึ่งกลางเสา) 5 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำเฟส B (วัดจากกึ่งกลางเสา) 5.2 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำเฟส C (วัดจากกึ่งกลางเสา) 5.4 เมตร
- ระยะห่างของสายล่อฟ้า (วัดจากกึ่งกลางเสา) 3 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส A ที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 47 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส B ที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 41 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส C ที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 35 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 53.68 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส A ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 35.2 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส B ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 29.2 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส C ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 23.2 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 41.88 เมตร
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างดิน (Span) 430 เมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม.เมตร

### 5.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

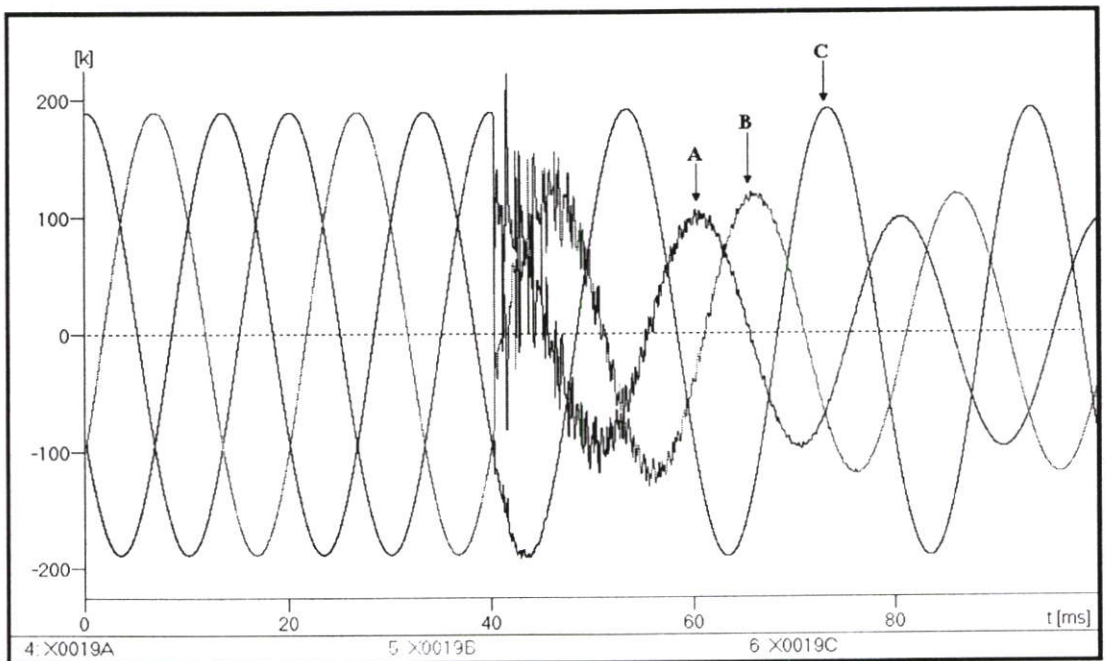
ในการจำลองฟอลต์นั้นเพื่อศึกษาฟอลต์ที่แตกต่างกันจึงทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลเกี่ยวข้องกับดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 10 ประเภท ได้แก่ AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ 10%-90% ของระยะทางทั้งหมด (ช่วงละ 10%)
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์  $0^{\circ}$ - $330^{\circ}$  เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ  $30^{\circ}$ )
- ขนาดของโหลดเท่ากับ 500 MVA (p.f.=0.8)
- ความต้านทานของฟอลต์ 10 โอห์ม
- เกิดฟอลต์ขึ้นทั้ง 2 วงจร

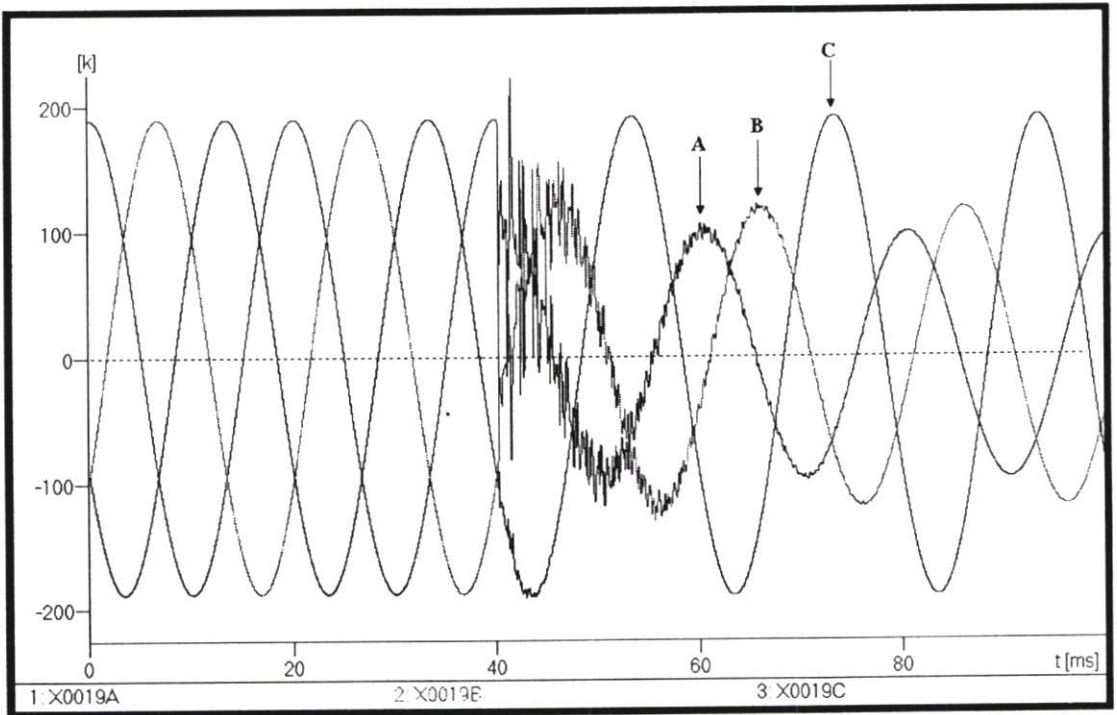
โดยใช้สวิตช์ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบและเวลาของการเกิดฟอลต์ ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เริ่มเกิดฟอลต์ที่  $t = 0.04$  วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล (0-0.1 วินาที) โดยไม่มีการกำจัดฟอลต์ออก กำหนดความถี่การสุ่ม (Sampling frequency rate) 200 kHz ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 5.3



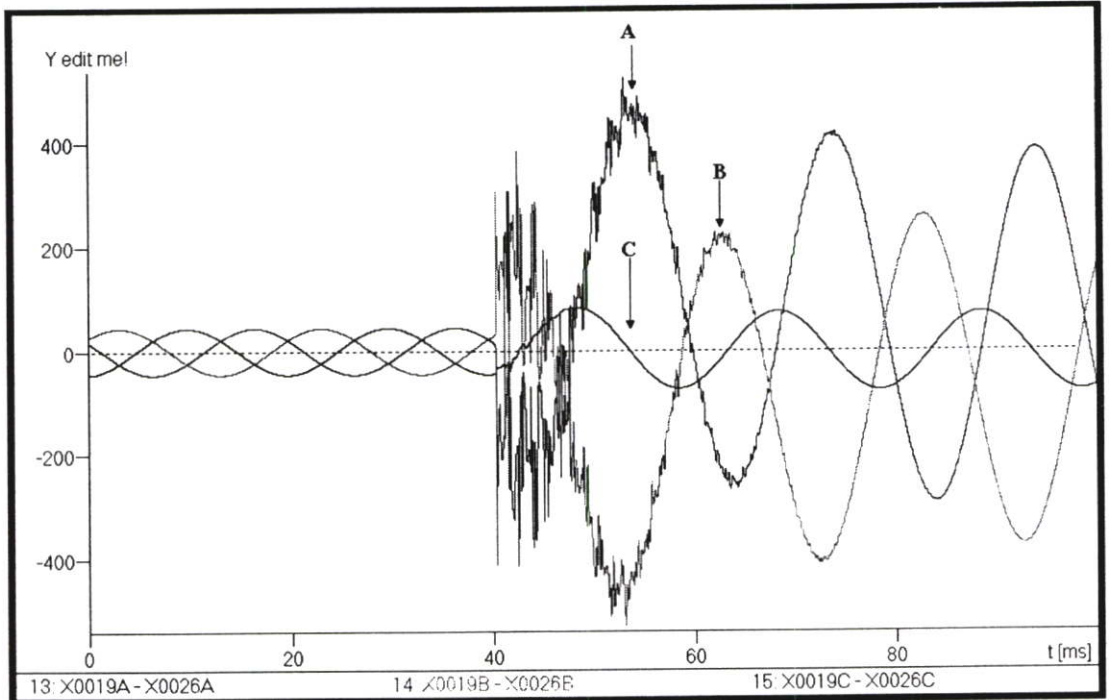
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรในการจำลองฟอลต์แบบ ABG วงจรที่ 2 ที่ 37.72 km ของระบบจำลอง



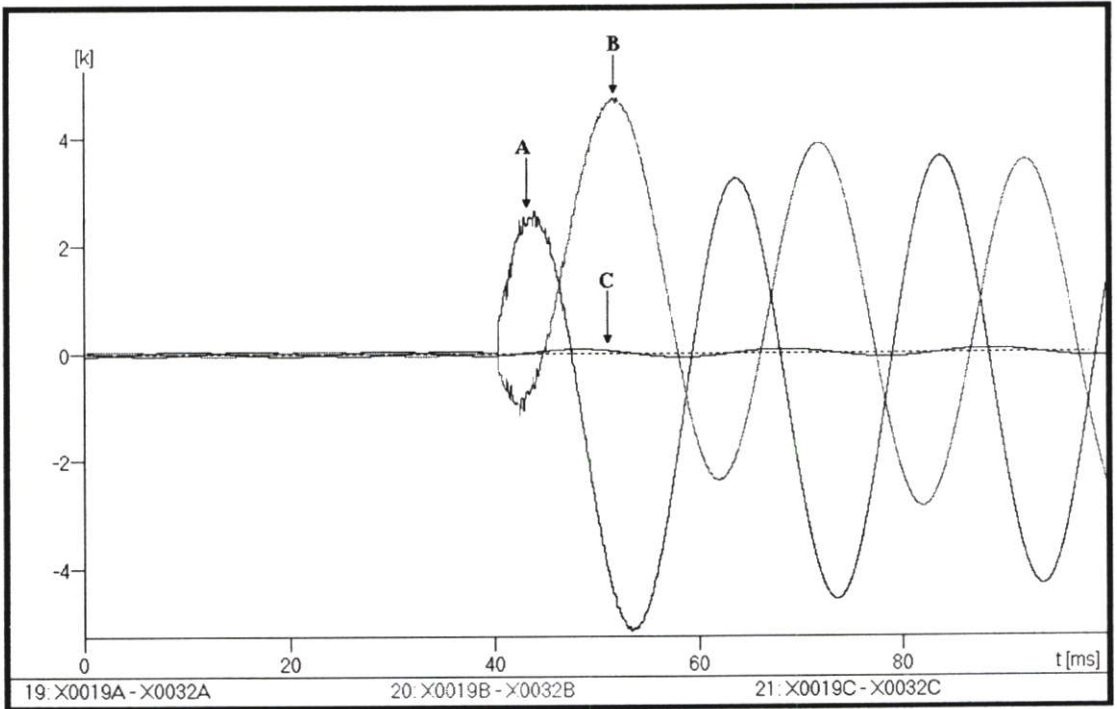
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณฟอลต์ของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 1



รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณพลตซ์ของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 2



รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณพลตซ์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 1

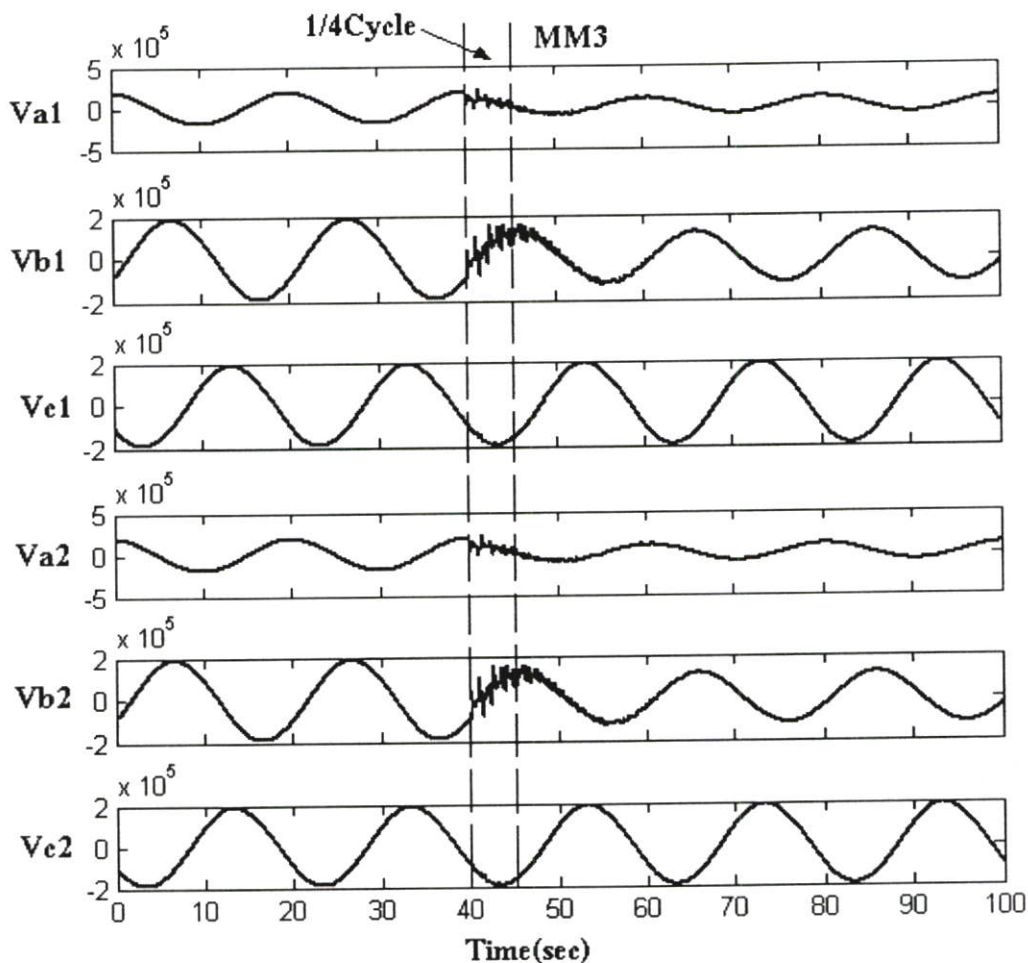


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 2

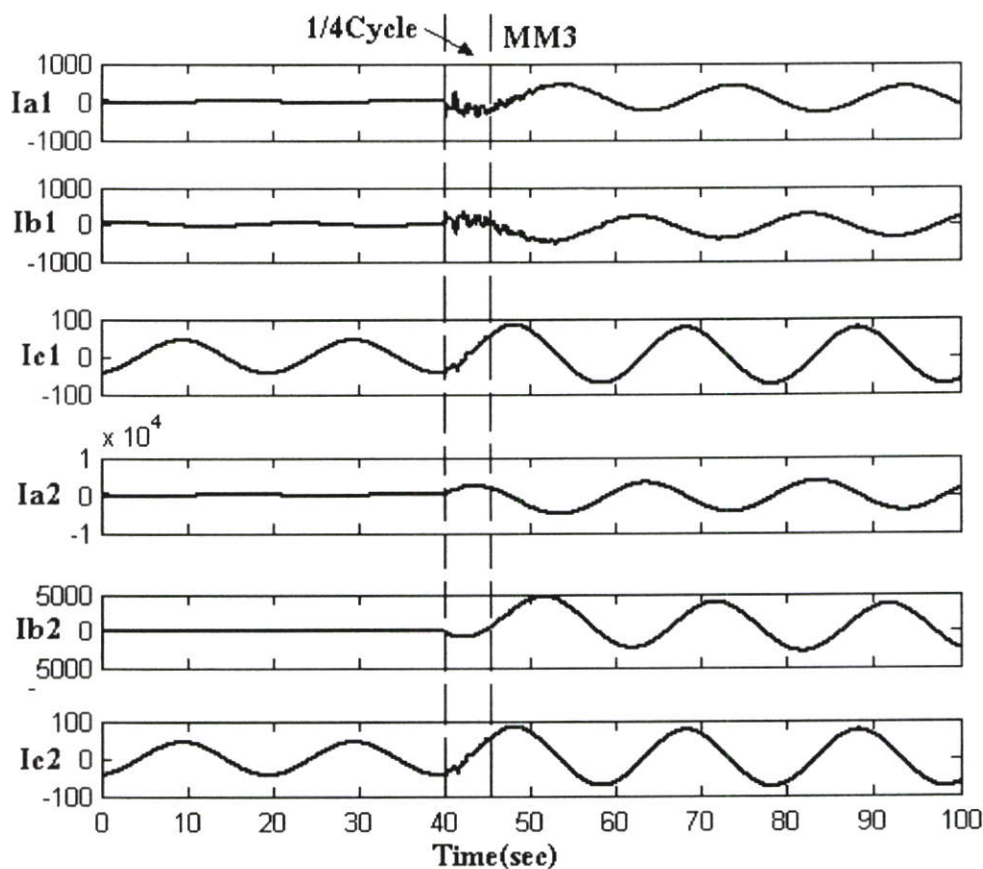
## 5.2 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ด

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ดที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่ง โดยทำการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ปลายด้านส่งของสายส่ง โดยสมมติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสและแรงดันจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรที่จะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาแบบของฟอลต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณฟอลต์ในแต่ละแบบจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ได้นำตัวอย่างของสัญญาณกระแสฟอลต์ทั้งสองวงจรจากปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียวที่ได้จากการจำลองด้วยความถี่การสุ่ม (Sampling frequency rate) 200 kHz มาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพื่อทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่จากสัมประสิทธิ์ที่ได้ในแต่ละสเกล ผลที่ได้จะนำมาใช้ใน 3 ลักษณะคือ การตรวจจับฟอลต์และระบุวงจรที่เกิดฟอลต์, การหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และการระบุประเภทของฟอลต์ โดยเลือกใช้ข้อมูลในช่วง  $1/4$  ไซเคิลหลังจากที่เริ่มเกิดฟอลต์ ซึ่งใช้ช่วงของข้อมูลที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับหลักการเดิมที่ใช้การแปลงฟูเรียร์ที่เลือกใช้ช่วงของข้อมูลในการ

วิเคราะห์อย่างน้อย 1 ไซเคิล ในการอธิบายการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ทนี้จึงได้ยกตัวอย่างของ สัญญาณฟอลต์ตามระบบในรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นฟอลต์ที่เฟส A และ B ลงดิน (ABG) ที่วงจรที่ 2 ที่ ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร วัดจากปลายด้านส่งของสายส่ง (30 % ของระยะทางเต็ม 188.6 กิโลเมตร) เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟ เล็ทดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณแรงดันฟอลต์ที่พิจารณาด้านปลายส่งทั้ง 2 วงจร (MM3)



รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณกระแสฟอลต์ที่พิจารณาด้านปลายส่งทั้ง 2 วงจร (MM3)

### 5.2.1 การตรวจจับและระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ (Detection and specify fault circuit)

รูปแบบของการตรวจจับฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้้นำสัญญาณกระแสมาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพื่อต้องการลดจำนวนในการวิเคราะห์และความซับซ้อนในการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ จากนั้นนำสัญญาณกระแสมาทำการแปลงใหม่ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่าง ๆ โดยอาศัยการแปลงด้วยเมตริกการแปลง (Transformation matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ 5.1[20]

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

เมื่อ  $I_0$  = Ground mode หรือ Zero sequence

$I_1$  = Aerial mode หรือ Positive sequence

$I_2$  = Aerial mode หรือ Negative sequence

T = เมตริกซ์การแปลงของคาร์ค (Clarke's Transformation matrix)

ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เมตริกซ์การแปลงของคาร์ค (Clarke's Transformation matrix) กับระบบจำลอง เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายส่งทั้งแบบมีการไขว้สลับสายแบบสมบูรณ์ และแบบไม่มีการไขว้สลับสาย ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าลักษณะการจัดวางของสายส่งต้องอยู่ในแนวตั้งได้ทุก ๆ ช่วงความถี่ เมตริกซ์การแปลงของระบบจำลองได้แสดงดังตารางที่ 5.1

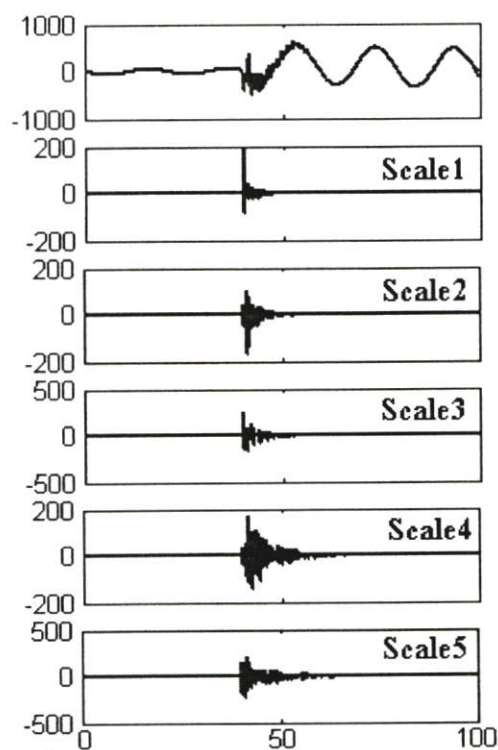
ตารางที่ 5.1 แสดงความเร็วคลื่นเดินทางและเมตริกซ์การแปลงของระบบจำลอง [21]

Scale	Frequency range (kHz)	Traveling wave speed(km/s)	Transformation matrix
1	50 - 100	297213	$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
2	25 - 50	296988	
3	12.5 - 25	296748	
4	6.25 - 12.5	296464	
5	3.125 - 6.25	296411	

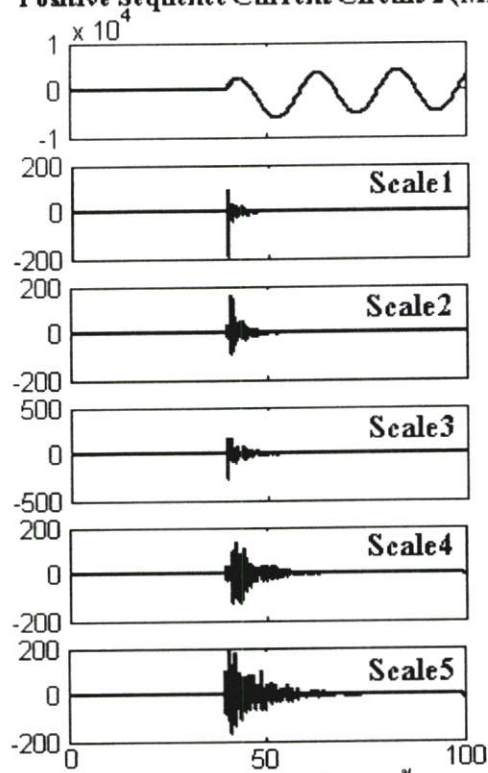
หลังจากที่ทำการแปลงองค์ประกอบในแต่ละเฟสให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่าง ๆ แล้วการตรวจจับพอลต์ทำโดยการนำองค์ประกอบลำดับบวก มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) ในการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเตลด้วยกัน ดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ซึ่งแต่ละสเตลจะแสดงค่าของช่วงความถี่ดังนี้

สเตลที่ 1 มีช่วงความถี่	50 – 100	kHz
สเตลที่ 2 มีช่วงความถี่	25 – 50	kHz
สเตลที่ 3 มีช่วงความถี่	12.5 – 25	kHz
สเตลที่ 4 มีช่วงความถี่	6.25 – 12.5	kHz
สเตลที่ 5 มีช่วงความถี่	3.125 – 6.25	kHz

Positive Sequence Current Circuit 1 (MM3)

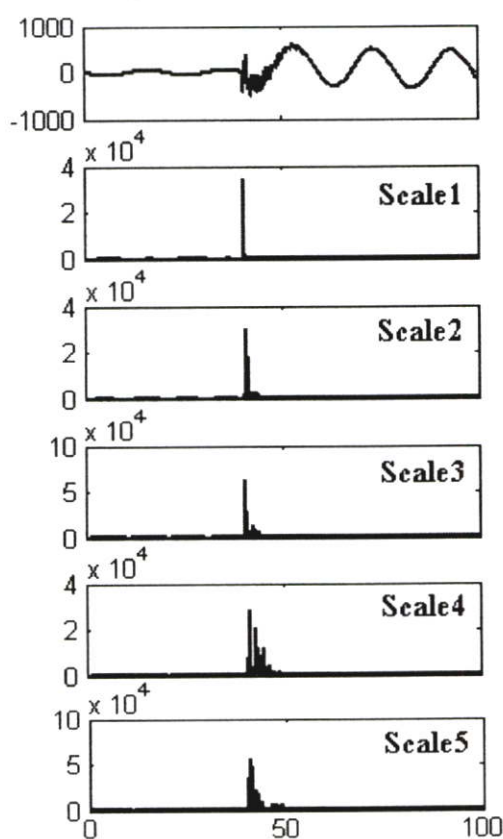


Positive Sequence Current Circuit 2 (MM3)

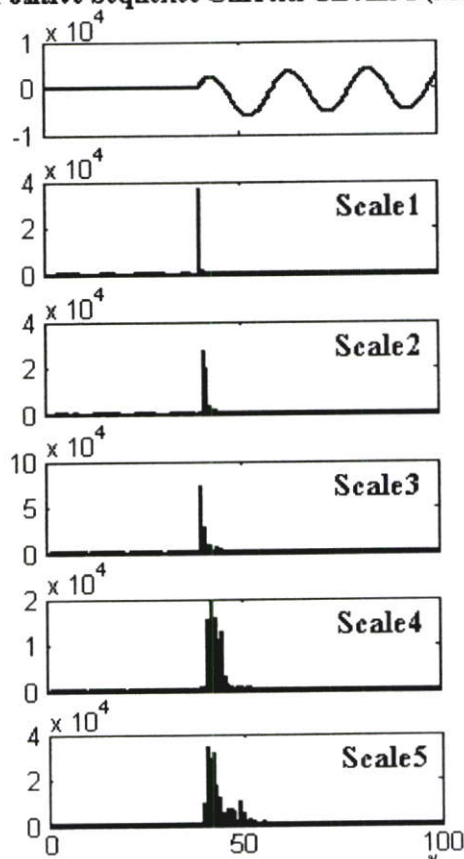


รูปที่ 5.10 แสดงผลการแปลงเวฟเส้นของกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งด้านส่งทั้ง 2 วงจร

Positive Sequence Current Circuit 1 (MM3)



Positive Sequence Current Circuit 2 (MM3)



รูปที่ 5.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังสองของกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งด้านส่งทั้ง 2 วงจร

จากผลการแปลงเวฟเล็ตสามารถสังเกตได้ว่าก่อนมีฟอลต์เกิดขึ้น ( $t < 0.04$  s) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตจะมีค่าต่ำมาก แต่ในสถานะที่เริ่มมีฟอลต์ ( $t \geq 0.04$  s) จะพบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 – 5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพื่อให้พิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มาคูณกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนและง่ายต่อการวิเคราะห์มากขึ้นดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ซึ่งวิทยานิพนธ์ได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสถานะก่อนเกิดฟอลต์ ซึ่งพิจารณาในทุก ๆ สเกลโดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า "ถ้าสัมประสิทธิ์ในสเกลใดมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่าสภาวะปกติ 5 เท่า แสดงว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่ง" นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดฟอลต์บนสายส่งยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานขององค์ประกอบความถี่ แต่การวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยที่มีการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้ ในบางครั้งอาจจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงในการตรวจจับฟอลต์ในสเกลที่ 1 แต่ก็สามารถพบการเปลี่ยนแปลงในสเกลถัดไปได้

ขั้นตอนในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เป็นการตัดสินใจว่าเกิดฟอลต์วงจรไหน โดยพิจารณาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกทั้งสองวงจรของปลายสายส่งด้านส่ง โดยใช้ข้อมูลจากสเกลที่ 1 เพียงอย่างเดียวเนื่องจากมีความถูกต้องมากกว่าสเกลอื่น ๆ และยังให้ความแม่นยำทางด้านเวลาที่ดี โดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า "ถ้าค่าสัมประสิทธิ์วงจรใดวงจรหนึ่งมีค่ามากกว่าอีกวงจรหนึ่งแสดงว่าวงจรนั้นเกิดฟอลต์" เมื่อสามารถทราบวงจรที่เกิดฟอลต์แล้วจากนั้นนำข้อมูลทางด้านเวลาของวงจรที่เกิดฟอลต์มาทำการหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนต่อไป

### 5.2.2 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault location)

เมื่อทราบวงจรที่เกิดฟอลต์แล้วจากนั้นนำข้อมูลทางด้านเวลาของวงจรที่สามารถตรวจจับได้ในสเกลที่ 1 มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงนั้นเริ่มเกิดที่เวลาใดบ้าง ซึ่งเวลานี้คือเวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์นั่นเอง จากทฤษฎีคลื่นเดินทางเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ณ. จุดใด ๆ บนสายส่งจะเกิดสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่ง ซึ่งถ้าสามารถตรวจจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมาที่ปลายทั้ง 2 ด้านได้ ก็สามารถนำเวลาที่ได้มาแทนในสมการที่ 5.2 เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น [22]

$$d = \frac{(L - v \times (t_B - t_A))}{2} \quad (5.2)$$

เมื่อ

$d$  = ระยะทางจากจุดที่เกิดฟอลต์วัดจากปลายสายส่งด้าน MM3

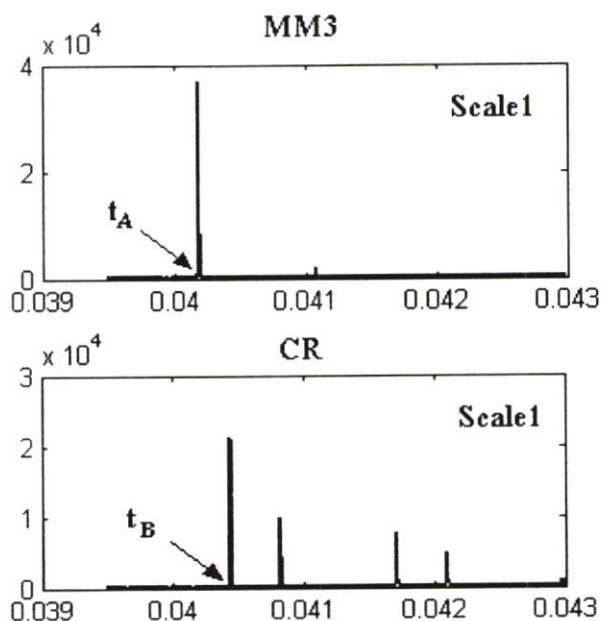
$L$  = ความยาวของสายส่ง (188.6 km)

$t_A$  = เวลาที่สัญญาณพอลต์มาถึงปลายด้าน MM3

$t_B$  = เวลาที่สัญญาณพอลต์มาถึงปลายด้าน CR

$v$  = ความเร็วการเดินทางของคลื่น (297213 km/s)

โดยสามารถแสดงการคำนวณตำแหน่งพอลต์โดยใช้เวลาที่สามารถตรวจจับได้ในสเกลที่ 1 จากการแปลงเวฟเล็ทของกระแสลำดับบวก ซึ่งเป็นพอลต์ที่เฟส A และ B ลงคืนที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร จากความยาวสายส่งทั้งหมด 188.6 กิโลเมตร ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 5.13 แสดงพิกแรกที่วัดได้ของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งแต่ละด้านในสเกลที่ 1

เมื่อ  $L = 188.6$  กิโลเมตร

$t_A = 0.040195$  วินาที

$t_B = 0.040445$  วินาที

$v = 297213$  กิโลเมตร/วินาที (km/s)

$$d = \frac{(188.6 - 297213 \times (0.040445 - 0.040195))}{2}$$

$$d = 57.148 \text{ กิโลเมตร}$$

คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (56.58 กิโลเมตร) ที่เกิดพอลต์เท่ากับ 0.568 กิโลเมตร

### 5.2.3 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault classification)

ลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสและองค์ประกอบลำดับต่าง ๆ ทั้ง 2 วงจร ทำการเปรียบเทียบกับค่าเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์เพื่อทำให้ค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสมีฐานอ้างอิงเดียวกันและได้ทำการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Matlab [5] ซึ่งจะช่วยให้สามารถให้ความเข้าใจได้มากยิ่งขึ้น เพื่อความสะดวกในการอธิบายขั้นตอนทั้งหมดจึงทำการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$X_{com}^c = \frac{X_{max}^c}{Z_{max}^c}$$

$X_{max}^c$  = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส X ในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์ (X=เฟส A, B และ C ตามลำดับ)

$Z_{max}^c$  = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์

$Ph_{max}^c$  = ค่าสูงสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส ( $A_{com}^c$ ,  $B_{com}^c$  และ  $C_{com}^c$ )

$Ph_{min}^c$  = ค่าต่ำสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส ( $A_{com}^c$ ,  $B_{com}^c$  และ  $C_{com}^c$ )

$P_{max}^c$  = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์  
c = วงจรที่ 1, 2

#### 5.2.3.1 การวิเคราะห์เพื่อระบุเฟสที่เกิดฟอลต์

พิจารณาค่าเปรียบเทียบ ( $A_{com}^c$ ,  $B_{com}^c$  และ  $C_{com}^c$ ) โดยเฟสที่จะสามารถระบุว่าจะเกิดฟอลต์ได้นั้นต้องมีรูปแบบข้อใดข้อหนึ่งใน 3 ข้อต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าเปรียบเทียบมากกว่า 1 และมีค่ามากกว่า 10% ของค่า  $Ph_{max}^c$
2. หรือค่าเปรียบเทียบมีมากกว่า 5 เท่าของค่า  $Ph_{min}^c$
3. หรือ 10 เท่าของ  $X_{max}^c$  มากกว่า  $P_{max}^c$

#### พิจารณาฟอลต์ที่เฟส A

if [ $(A_{com}^c > 1)$  and  $(A_{com}^c > 0.1 * Ph_{max}^c)$ ] or [ $A_{com}^c > 5 * Ph_{min}^c$ ] or [ $A_{max}^c * 10 > P_{max}^c$ ]

then

phase A fault

else

phase A unfault

end

#### พิจารณาฟอลต์ที่เฟส B

```

if [( $B_{com}^c > 1$ )and( $B_{com}^c > 0.1 * Ph_{max}^c$  )]or[( $B_{com}^c > 5 * Ph_{min}^c$  )]or[( $B_{max}^c * 10 > P_{max}^c$  )]
then
    phase B fault
else
    phase B unfault
end

```

### พิจารณาฟอลต์ที่เฟส C

```

if [( $C_{com}^c > 1$ )and( $C_{com}^c > 0.1 * Ph_{max}^c$  )]or[( $C_{com}^c > 5 * Ph_{min}^c$  )]or[( $C_{max}^c * 10 > P_{max}^c$  )]
then
    phase C fault
else
    phase C unfault
end

```

#### 5.2.3.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุฟอลต์ลงดิน

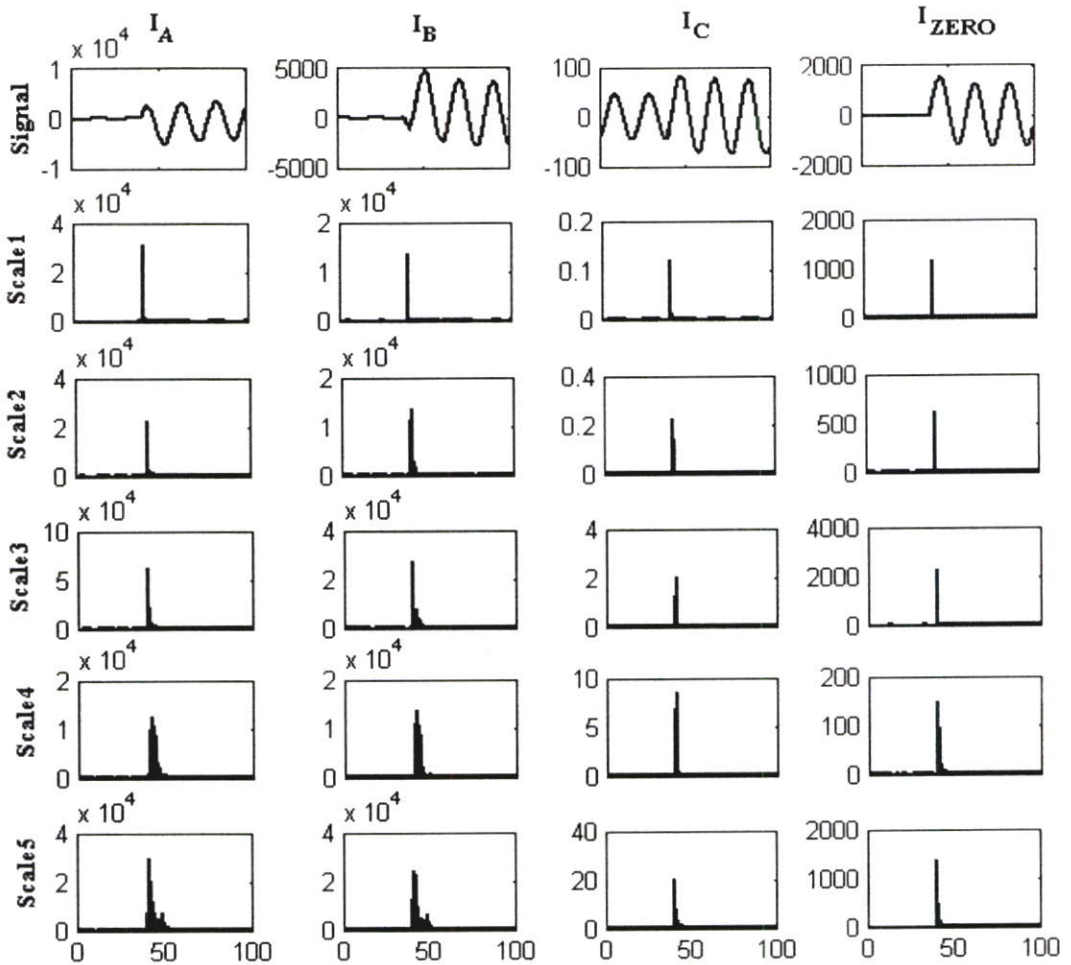
เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง  $1/4$  ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์เปรียบเทียบกับค่าคงที่ (ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบหลายตัวอย่างและเห็นว่า มีค่าคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่งที่สามารถนำมาอ้างเพื่อระบุฟอลต์ลงดินได้)

```

if [( $Z_{max}^c > 0.004$ )]
then
    Ground fault
else
    Ground unfault
End

```

เพื่อแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์อย่างชัดเจน จึงยกตัวอย่างของสัญญาณของฟอลต์ที่เฟส A และ B ลงดิน (ABG) ที่เกิดขึ้นบนสายส่งวงจรที่ 2 โดยนำข้อมูลของวงจรที่ 2 มาใช้เป็นข้อมูล เนื่องจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ได้ทำการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์แล้ว



รูปที่ 5.14 แสดงการแปลงเวฟเล็ทของกระแสฟอลต์ที่วัดได้จากปลายสายส่งด้าน MM3

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสในแต่ละเฟสในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์ที่ปลายด้าน MM3 กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

เวฟเล็ท สเกลที่ (L)	$A_{max}^2$	$B_{max}^2$	$C_{max}^2$	$Z_{max}^2$
1	3.108E+04	1.357E+04	0.123	1.178E+03
2	2.248E+04	1.374E+04	0.226	6.321E+02
3	6.218E+04	2.743E+04	2.068	2.293E+03
4	1.249E+04	1.356E+04	8.636	1.463E+02
5	2.999E+04	2.416E+04	20.346	1.349E+03

ตารางที่ 5.3 ผลการระบุประเภทฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายด้าน MM3

เวฟเล็ด สเกลที่ (L)	เฟส A	เฟส B	เฟส C	ฟอลต์ ลงดิน
1	F	F	-	F
2	F	F	-	F
3	F	F	-	F
4	F	F	-	F
5	F	F	-	F
สรุป	F	F	-	F

เมื่อ

พิจารณาตามเฟส

" F " = เกิดฟอลต์

" - " = ไม่เกิดฟอลต์

พิจารณาฟอลต์ลงดิน

" F " = เกิดฟอลต์

" - " = ไม่เกิดฟอลต์

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่งด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ดแล้วจะพบว่ายังมีข้อเสียอยู่ก็คือ การแปลงเวฟเล็ดไม่สามารถบ่งบอกถึงวงจรที่เกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และประเภทของฟอลต์ได้ด้วยตัวเอง จึงต้องทำการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์พัฒนาขั้นตอนการออกแบบอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการออกแบบขั้นตอนที่กล่าวมาอาจยังไม่สามารถพิจารณาฟอลต์ได้ในทุกลักษณะ ดังนั้นจึงมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจ เพื่อลดความยุ่งยากในส่วนของการออกแบบการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดออกไป ซึ่งหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียม

### 5.3 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์จะใช้ Neural Network Toolbox [16] ของโปรแกรม MATLAB ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งองค์ประกอบหลักในการเรียนรู้และการประมวลผล โปรแกรม MATLAB ได้ทำการกำหนดไว้แล้ว แต่ผู้ฝึกสอนจะเป็นผู้นำมาใช้งานเอง เช่น การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและไบอัส (Weights, Bias), ฟังก์ชันถ่ายโอน

(Transfer function), เทคนิคการฝึกสอนของโครงข่ายเป็นต้น ยกเว้นแต่กลุ่มของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต และจำนวนของชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ผู้ฝึกสอนจะเป็นผู้กำหนดขึ้นเอง

การเลือกข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตจะต้องมีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ฝึกสอนแล้วยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายด้วย แนวความคิดในการเลือกข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถตรวจจับได้ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากข้อมูลในสเกลที่ 1 สามารถให้ความถูกต้องมากกว่าสเกลอื่น ๆ โดยเฉพาะค่าเวลาที่ตรวจจับได้

ลักษณะของพอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยทำการแบ่งชุดข้อมูลอินพุตได้ดังนี้

- ประเภทของพอลต์ 10 ประเภท ได้แก่ AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดพอลต์ 10%-90% ของระยะทางทั้งหมด (ช่วงละ 10%)
- มุมที่เริ่มเกิดพอลต์  $0^\circ - 330^\circ$  เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ  $30^\circ$ )
- เกิดพอลต์ขึ้นทั้ง 2 วงจร

รวมเป็นจำนวนทั้งหมด 2160 ชุด ซึ่งแบ่งเป็นชุดข้อมูลฝึกสอน (Training pattern) 1080 ชุด, ชุดข้อมูลทดสอบ (Test pattern) 540 ชุด และชุดที่ใช้ในการทดสอบ (Unseen pattern) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับชุดฝึกสอนและทดสอบจำนวน 540 ชุด

### 5.3.1 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP)

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะประกอบไปด้วย ชั้นอินพุต (Input Layer), ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และ ชั้นเอาต์พุต (Output Layer) ซึ่งชั้นซ่อนจะเป็นชั้นที่เพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายและจำนวนของชั้นซ่อนสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้นขึ้นไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดชั้นซ่อนจำนวน 2 ชั้นให้กับโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วยังสามารถแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนได้ดีกว่าจำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น ดังรูปที่ 5.15

$$O/P_{ANN} = f^3(LW^{3,2} * f^2(LW^{2,1} * f^1(IW^{1,1} * p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (5.3)$$

โดยที่  $IW^{1,1}$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นของอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1

$LW^{2,1}$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 1 กับชั้นซ่อนที่ 2

$LW^{3,2}$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 2 กับชั้นเอาต์พุต

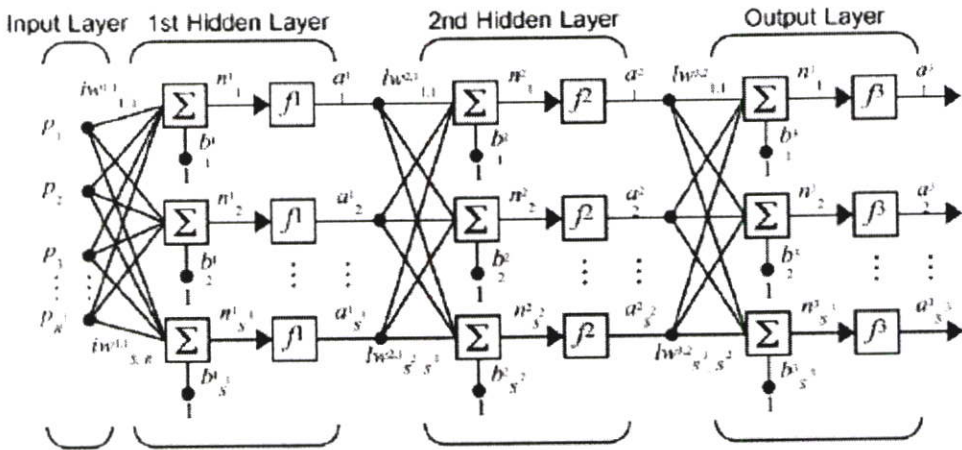
$b^1, b^2$  คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2

$b^3$  คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

$f^1, f^2$  คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดแทนเจนต์ซิกมอยด์ (tan – sigmoid)

$f^3$  คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

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



รูปที่ 5.15 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน [16]

โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) ของชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) ได้แสดงในสมการที่ 5.4

$$MAPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{O/P_{ANNi} - O/P_{TARGETi}}{O/P_{TARGETi}} \right| * 100\% \quad (5.4)$$

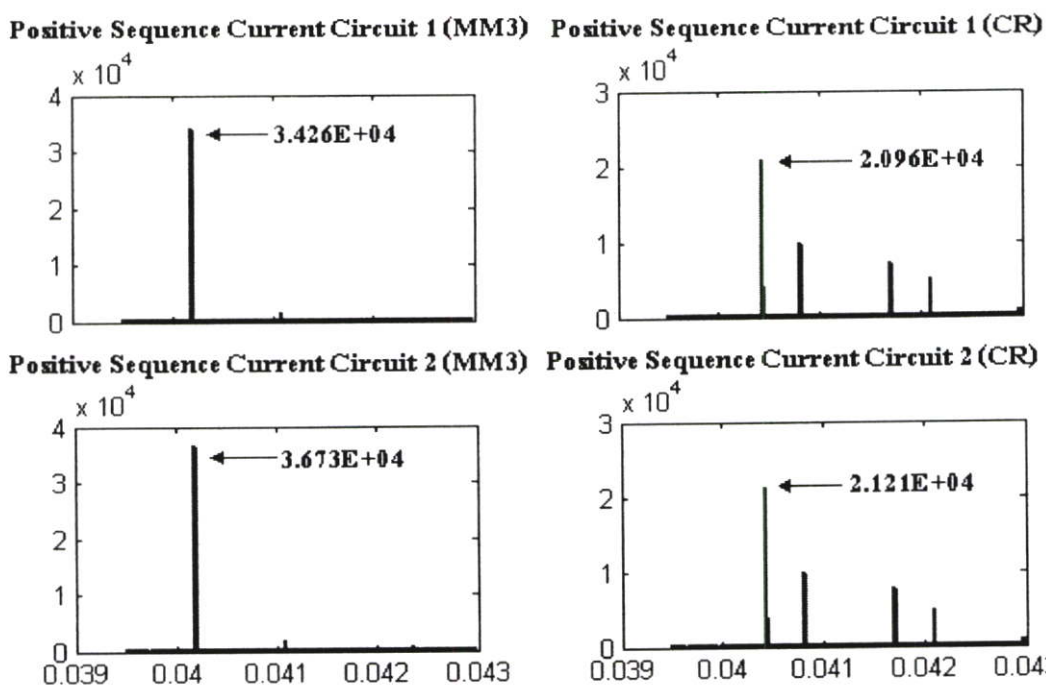
โดยที่  $O/P_{ANN}$  คือ เอาต์พุตที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

$O/P_{TARGET}$  คือ เอาต์พุตที่เป็นคำตอบที่ต้องการ

$n$  คือ จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ (1080 และ 540 ชุด)

### 5.3.1.1 การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเฟสสี่ของกระแสค้ประกอบลำดับบวกที่วัดได้จากปลายสายส่งด้านส่ง (MM3) ทั้ง 2 วงจร

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 มี 2 และ 1 นิวรอน ตามลำดับ และชั้นเอาต์พุตมี 2 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรคู่โดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าเอาต์พุตในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ของโครงข่ายประสาทเทียม

วงจรที่เกิดฟอลต์	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2
เกิดฟอลต์วงจรที่ 1	1	0
เกิดฟอลต์วงจรที่ 2	0	1

จากนั้นทำการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เป็นชนิด Tan-Sigmoid และเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นเอาต์พุตเป็นชนิด Linear หลังจากนั้นทำการจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ก่อนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยเริ่มจากการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส (Random initial weight and biases) โดยทำการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm [15] แล้วทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) กระบวนการทั้งหมดจะกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนแรกเป็นจำนวน 20,000 ครั้ง (iteration) เพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดข้อมูลทดสอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เพิ่มขึ้นทีละ 1 นิวรอน เป็นจำนวน 15 นิวรอน เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วหยุดการฝึกสอน

หลังจากทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงสุด มาทดสอบกับข้อมูลทดสอบที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen) (เป็นชุดทดสอบที่ไม่เกี่ยวข้องกับชุดฝึกสอนและทดสอบก่อนหน้านี้) โดยจะป้อนให้เพียงค่าอินพุตเพียงอย่างเดียวและพิจารณาคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมว่าใกล้เคียงกับเอาต์พุตเป้าหมายหรือไม่ (ผลการทดสอบได้แสดงในบทถัดไป) โดยกระบวนการฝึกสอนและทดสอบดังกล่าวจะใช้กับการระบุตำแหน่งพอลต์และการระบุประเภทพอลต์ในหัวข้อถัดไป ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดทดสอบและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

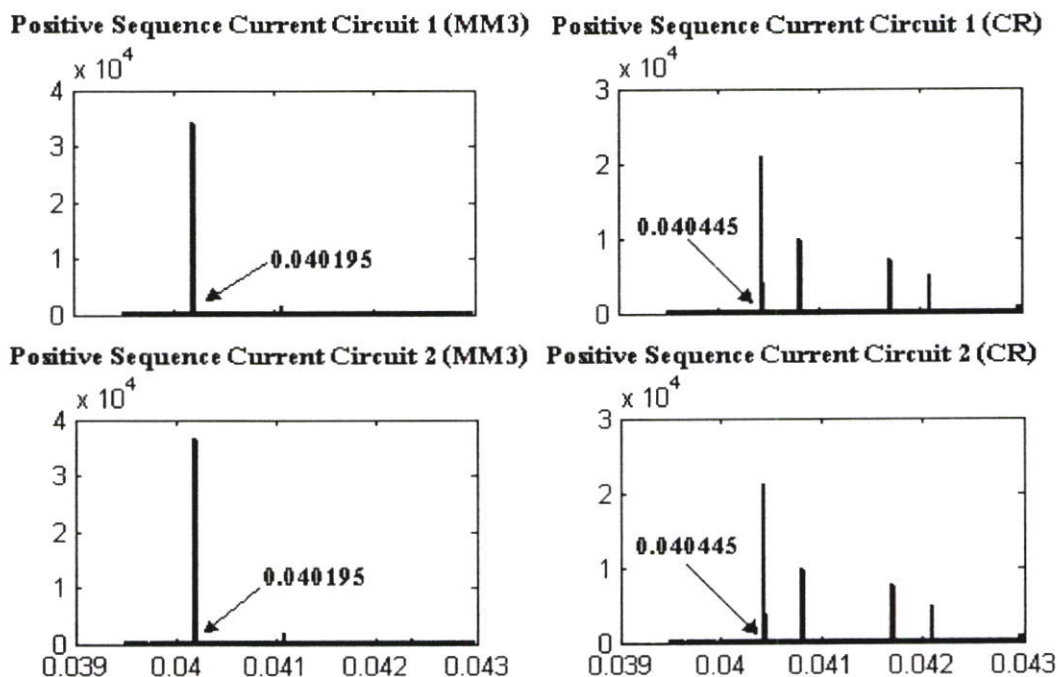
Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2							
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8
Detection	MAPE of Test	0.567	6.256	0.555	6.259	6.281	6.258	6.274	6.315
	Training time (minute)	3.58	6.32	8.41	10.54	13.59	18.01	22.11	26.17

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2						
		10-9	11-10	12-11	13-12	14-13	15-14	16-15
Detection	MAPE of Test	6.497	6.374	6.387	6.399	6.553	6.455	6.362
	Training time (minute)	31.42	37.57	45.03	65.22	62.46	81.13	87.25

### 5.3.1.2 การหาตำแหน่งฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้เวลาที่สามารถตรวจจับได้ของฟิสิกแรกที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านเพียงสายส่งเดียว เนื่องจากเวลาที่ตรวจจับได้ของสายส่งทั้ง 2 วงจรมีค่าเท่ากัน ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงเวลาที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็ดของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกที่วัดได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน ทั้ง 2 วงจร

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 มี 2 และ 1 นิวรอน ตามลำดับ และชั้นเอาต์พุตมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 โดยมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจร ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดทดสอบและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

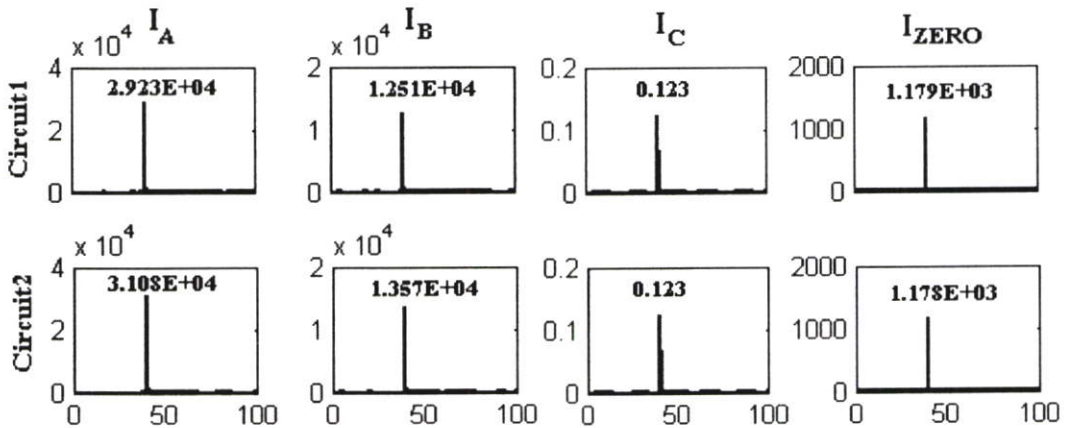
Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2							
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8
Location	MAPE of Test	0.0851	0.0045	0.0038	0.0065	0.0039	0.0134	0.0068	0.0047
	Training time (minute)	3.42	4.26	3.04	4.06	2.59	3.15	3.20	2.42

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2							
		10-9	11-10	12-11	13-12	14-13	15-14	16-15	
Location	MAPE of Test	0.0199	0.0101	0.0105	0.0075	0.0191	0.0623	0.0486	
	Training time (minute)	3.06	3.09	1.53	1.44	3.03	0.57	1.56	

### 5.3.1.3 การระบุประเภทฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุประเภทฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกที่ตรวจจ้งฟอลต์ได้ของกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ของทั้ง 2 วงจรทางด้านปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดของกระแสในเฟส A, B, C

และองค์ประกอบลำดับ ศูนย์ที่วัดได้จากปลายสายส่งด้านส่ง (MM3) ทั้ง 2 วงจร

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 8

นิเวรอน, ชั้นช้อนที่ 1 และ 2 มี 2 และ 1 นิเวรอน ตามลำดับ และชั้นเอาต์พุตมี 4 นิเวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับเฟสที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรโดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.7 ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าเอาต์พุตในการระบุประเภทฟอลต์ของโครงข่ายประสาทเทียม

ประเภทของฟอลต์	A	B	C	G
ฟอลต์เฟส A ลงดิน	1	0	0	1
ฟอลต์เฟส A,B ลงดิน	1	1	0	1
ฟอลต์ระหว่างเฟส A,B	1	1	0	0
ฟอลต์ 3 เฟส	1	1	1	0

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดทดสอบและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

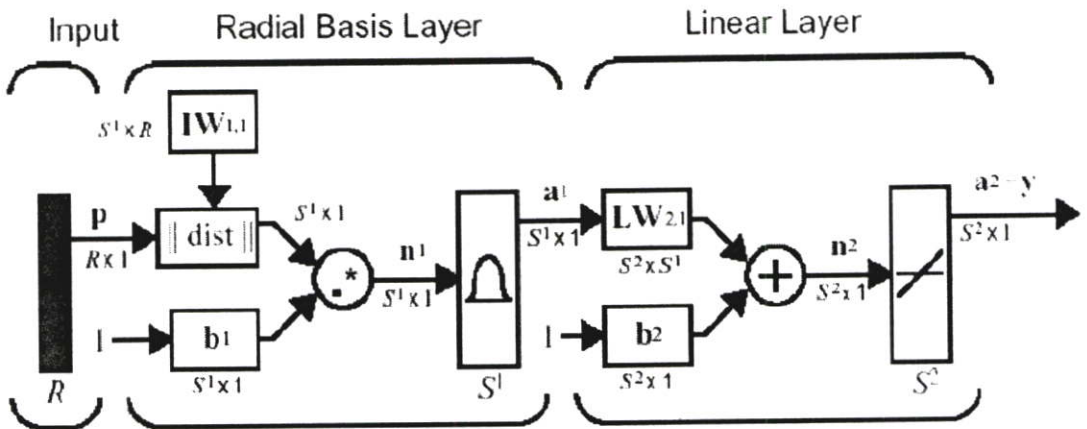
Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิเวรอนในชั้นช้อนที่ 1-2						
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7
Classification	MAPE of Test	14.295	6.258	7.488	1.049	5.409	5.525	8.851
	Training time (minute)	10.46	18.04	28.30	32.44	41.52	52.13	76.17

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิเวรอนในชั้นช้อนที่ 1-2					
		9-8	10-9	11-10	12-11	13-12	14-13
Classification	MAPE of Test	5.985	8.573	13.206	9.020	7.555	9.058
	Training time (minute)	82.11	104.34	120.19	159.12	200.58	234.13

### 5.3.2 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF)

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (Radial basis function : RBF) ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.17 เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้จากสมการที่ 5.5



รูปที่ 5.17 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี [15]

เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ดังนี้

$$O/P_{ANN} = f^3 \left( LW_{2,1} * \exp \left( \frac{\|P - W_j\|^2}{\sigma_j^2} \right) + b^2 \right) \quad (5.5)$$

โดยที่

$W_j$  คือ เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน

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

$f^3$  คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

$LW_{2,1}$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต

$b^2$  คือ ค่าไบอัสในชั้นเอาต์พุต

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

#### 5.3.2.1 การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของกระแส

องค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ซึ่งเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการเรียนรู้ OLS (orthogonal least squares : OLS) [23] และชั้นเอาต์พุตมี 2 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรคู่โดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.5

จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี โดยโครงข่ายชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนชนิดฐานรัศมี (radial basis) จากนั้นคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธี ยูคลิดเดียนคิสแดนซ์ (Euclidean distance weight function : dist) และทำการคำนวณอินพุตของโครงข่ายด้วยวิธี ผลคูณ (Product net input function : netprod) ส่วนชั้นเอาต์พุตจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดเชิงเส้น (Linear) จากนั้นคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธี คอท โปรดัค (Dot product weight function : dotprod) และทำการคำนวณอินพุตของโครงข่ายด้วยวิธี ผลบวก (Sum net input function : netsum) ซึ่งทั้งสองชั้นจะมีค่าไบแอส  $\left(b = \frac{0.8326}{Spread}\right)$  ซึ่งค่าไบแอสนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระจาย (Spread) จากนั้นทำการกำหนดค่ากระจายคงที่เริ่มต้นเท่ากับ 1.40 และจำนวนนิวรอนสูงสุดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 นิวรอน เมื่อคำนวณครบหนึ่งรอบการฝึกสอนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนครั้งที่คำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ ขบวนการทั้งหมดนี้จะทำซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 2.40 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดหรือจนกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

Protection	ค่า Spread ที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า Spread ที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบ	ค่า Spread ที่ดีที่สุด	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในรอบที่ดีที่สุด (วินาที)	ค่า MAPE ของชุดทดสอบที่ดีที่สุด
Detection	1.40 ถึง 2.40	0.01	1.59	46	23.1581

### 5.3.2.2 การหาตำแหน่งฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้เวลาที่สามารถตรวจจับได้ของฟิสิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านเพียงสายส่งเดียว เนื่องจากเวลาที่ตรวจจับได้ของสายส่งทั้ง 2 วงจรมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการเรียนรู้ OLS (orthogonal least squares : OLS) และชั้นเอาต์พุตมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 โดยมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจร จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีโดยทำการกำหนดค่ากระจายคงที่เริ่มต้นเท่ากับ 0.01 และจำนวนนิวรอนสูงสุดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 นิวรอน เมื่อคำนวณครบหนึ่งรอบการฝึกสอนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนครั้งที่คำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ ขบวนการทั้งหมดนี้จะทำซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 0.10 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือจกกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 0.10 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือจกกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

Protection	ค่า Spread ที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า Spread ที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบ	ค่า Spread ที่ดีที่สุด	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในรอบที่ดีที่สุด (วินาที)	ค่า MAPE ของชุดทดสอบที่ดีที่สุด
Location	0.01 ถึง 0.10	0.01	0.07	13	5.4293E-14

### 5.3.2.3 การระบุประเภทฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุประเภทฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดในสเกลแรกทีตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ของทั้ง 2 วงจรทางด้านปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ซึ่งเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบกับ

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 8 นิวรอน, ชั้นซ่อนจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการเรียนรู้ OLS (orthogonal least squares : OLS) และชั้นเอาต์พุตมี 4 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับเฟสที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรคู่โดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.7 จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีโดยทำการกำหนดค่ากระจายคงที่เริ่มต้นเท่ากับ 0.01 และจำนวนนิวรอนสูงสุดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 นิวรอน เมื่อคำนวณครบหนึ่งรอบการฝึกสอนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนครั้งที่คำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ ขบวนการทั้งหมดนี้จะทำซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 0.50 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือจนกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

Protection	ค่า Spread ที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า Spread ที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบ	ค่า Spread ที่ดีที่สุด	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในรอบที่ดีที่สุด (วินาที)	ค่า MAPE ของชุดทดสอบที่ดีที่สุด
Type	0.01 ถึง 0.50	0.01	0.32	50	26.7092

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ตามรูปแบบและวิธีการนำเสนอในบทที่ 5 โดยผลการทดสอบที่นำเสนอมีทั้งหมด 540 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้จะไม่ใช่ตัวอย่างเดียวกับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบให้กับโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 เพื่อสามารถที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผลการทดสอบสามารถแบ่งรูปแบบการนำเสนอดังต่อไปนี้

#### 6.1 รูปแบบการนำเสนอ

##### 6.1.1 วิธีการที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

1. วิธีการแปลงเวฟเล็ด
2. วิธีการแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ
3. วิธีการแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี

##### 6.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละตาราง

การแสดงผลของตารางจะเรียงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์คือ 10% - 90% ของความยาวสายส่ง (วัดจากปลายด้านส่ง (MM3)) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละตารางจะประกอบไปด้วย

1. วงจรที่เกิดฟอลต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) ตามลำดับ
2. ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP) และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งของฟอลต์และความคลาดเคลื่อนในแต่ละการทดสอบ
3. ประเภทฟอลต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่า

ย้อนกลับ (BP) และการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF) ตามลำดับ

4. การเรียงลำดับจะเรียงตามประเภทของพอลต์ คือ AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG และ ABC ตามลำดับ และวงจรถัดเกิดพอลต์ คือ วงจรถัดที่ 1 และวงจรถัดที่ 2 ตามลำดับ

### 6.13 รูปแสดงการสรุปผลการทดลองที่ได้จากตาราง

เป็นการแสดงค่าความถูกต้องสูงสุด, ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของผลการทดลองที่ได้ในแต่ละตาราง ตามระยะทางและประเภทของพอลต์และ มีการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

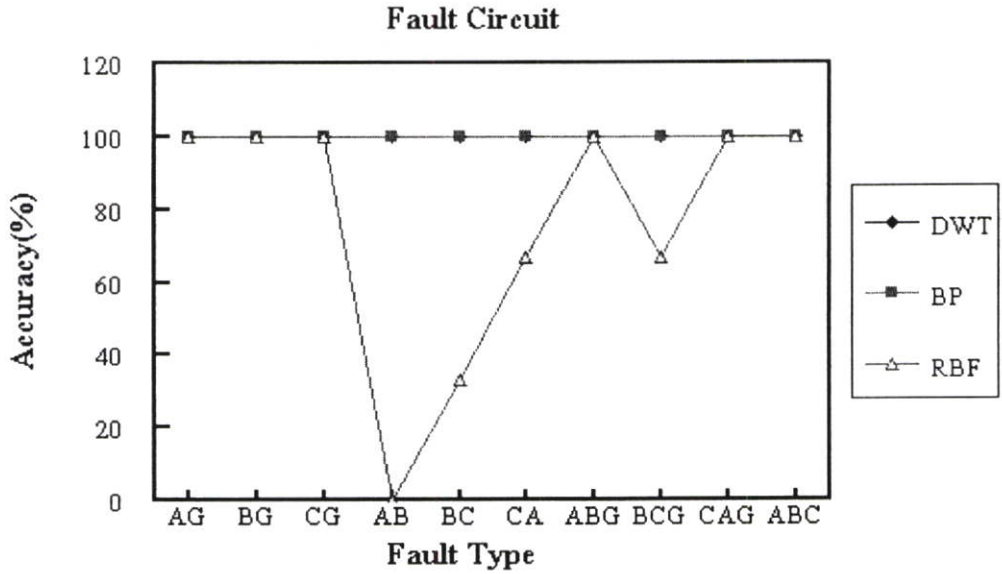
## 6.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรถัดที่ 1

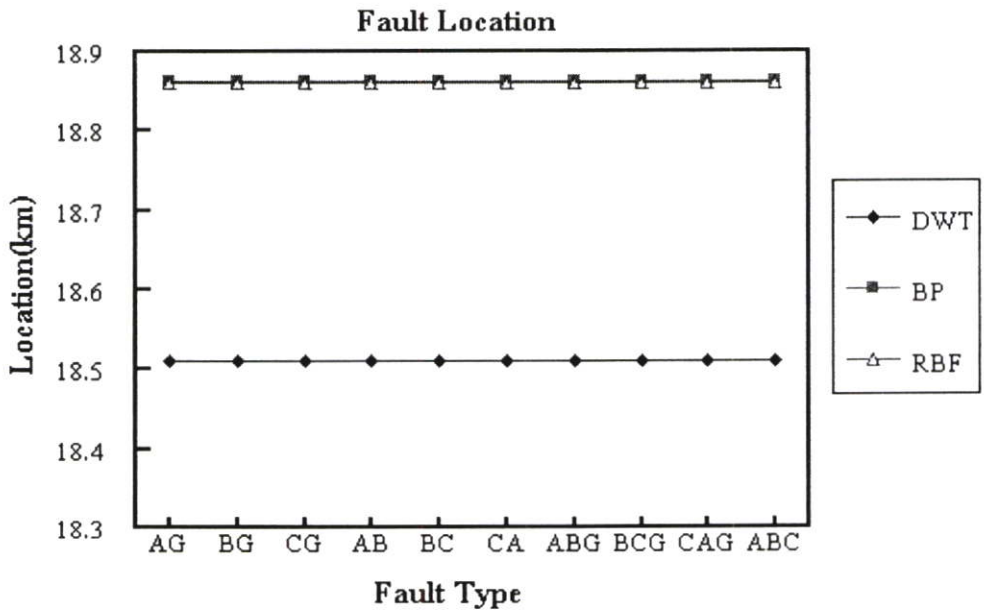
ประ เภท พอลต์	มุม (องศา)	วงจรถัดเกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					ค่านวม	Error	ค่านวม	Error	ค่านวม	Error			
AG	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AG	AG	
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AG	AG	AG
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BG	BG	BG
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BG	BG	
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CG	CG	CG
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CG	CG	CG
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CG	CG	CG
AB	120	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AB	AB	AB
	210	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AB	AB	
	330	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AB		AB

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

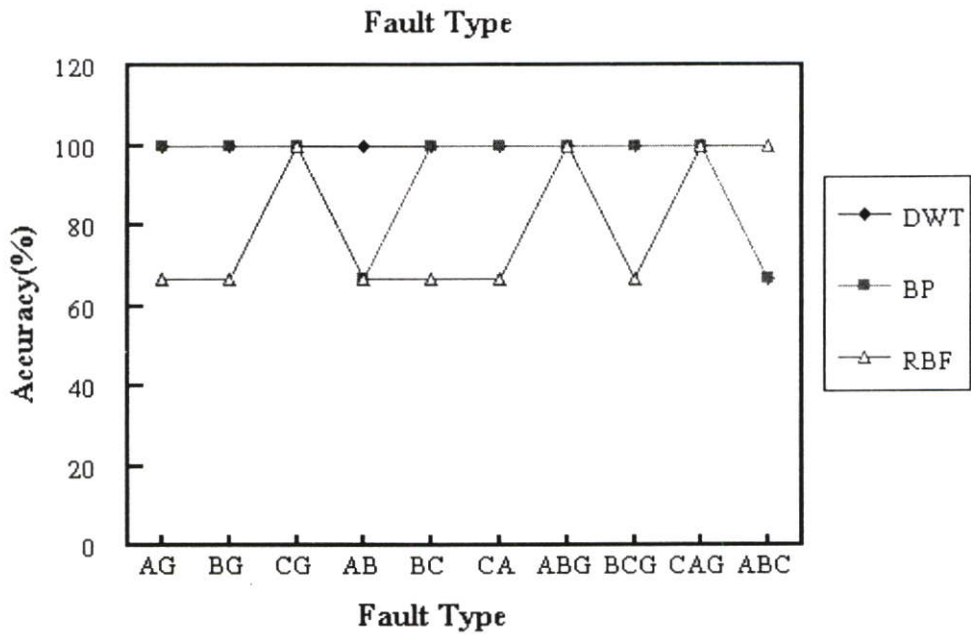
ประเภท พอลต์	ประ เภท พอลต์ (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
BC	120	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BC	BC	BC
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BC	BC	
	330	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CA	CA	CA
	210	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CA	CA	CA
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	1	1		18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BCG	BCG	
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BCG	BCG	BCG
CAG	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000			ABC
	210	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABC	ABC	ABC



**รูปที่ 6.1** แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



**รูปที่ 6.2** แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



**รูปที่ 6.3** แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.1 และรูปที่ 6.1-6.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

#### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 23 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 76.67%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยและการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุดคือ 100%

### การหาตำแหน่งพอลต์ (ระยะทางจริง 18.86 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งพอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.2 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.511 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.349 กิโลเมตร)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งพอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.2 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.8619 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0019 กิโลเมตร)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งพอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.2 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.86 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งพอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

### การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67 %

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67 %

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

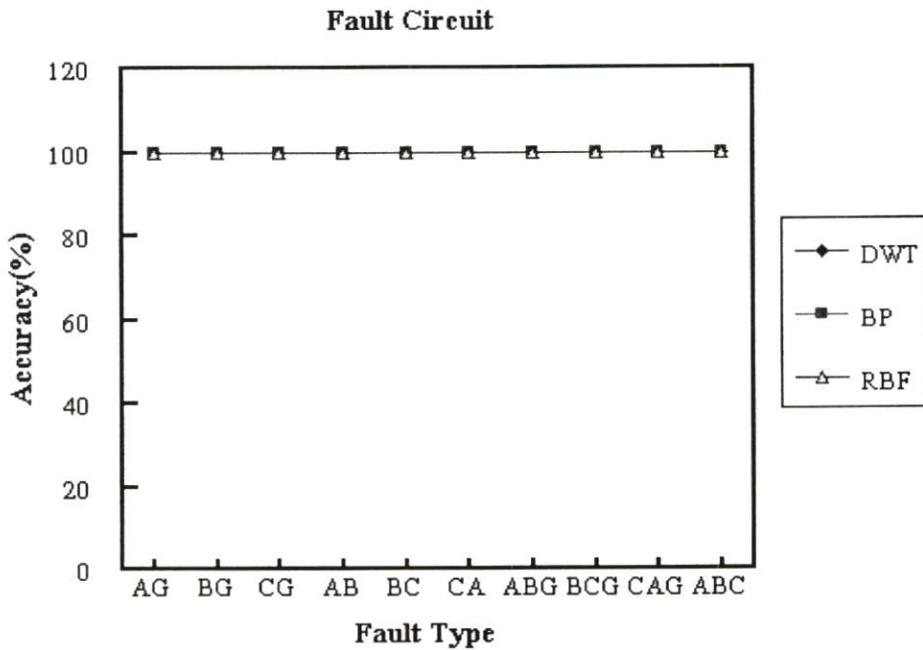
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงสุด

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 18.86 กิโลเมตร  
(10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 2

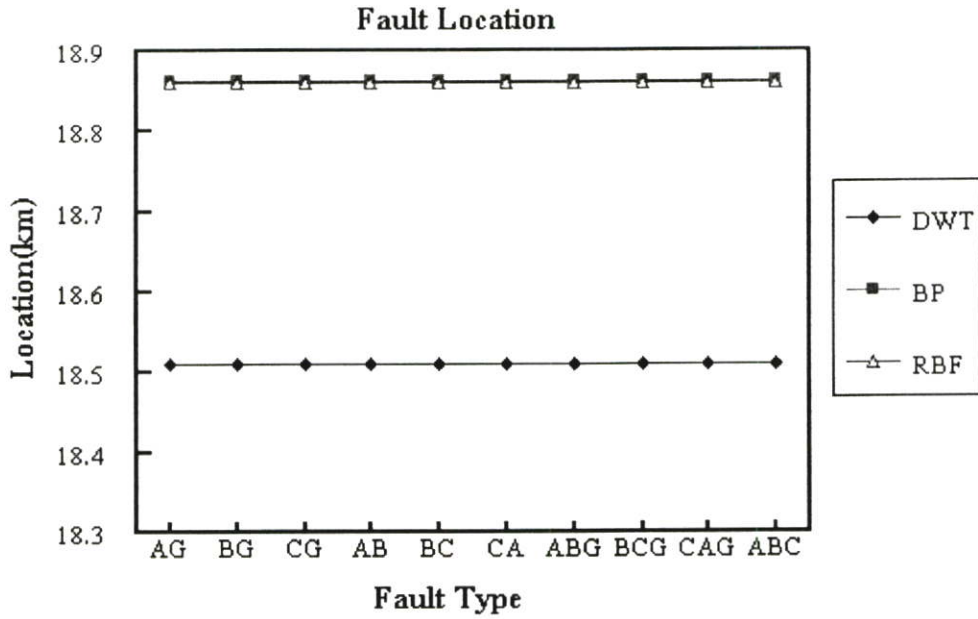
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AG	AG	
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AG	AG	AG
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BG	BG	BG
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BG	BG	
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CG	CG	CG
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CG	CG	CG
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AB	AB	AB
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AB	AB	
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	AB		AB
BC	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BC	BC	BC
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BC	BC	
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CA	CA	CA
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CA	CA	CA
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BCG	BCG	
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

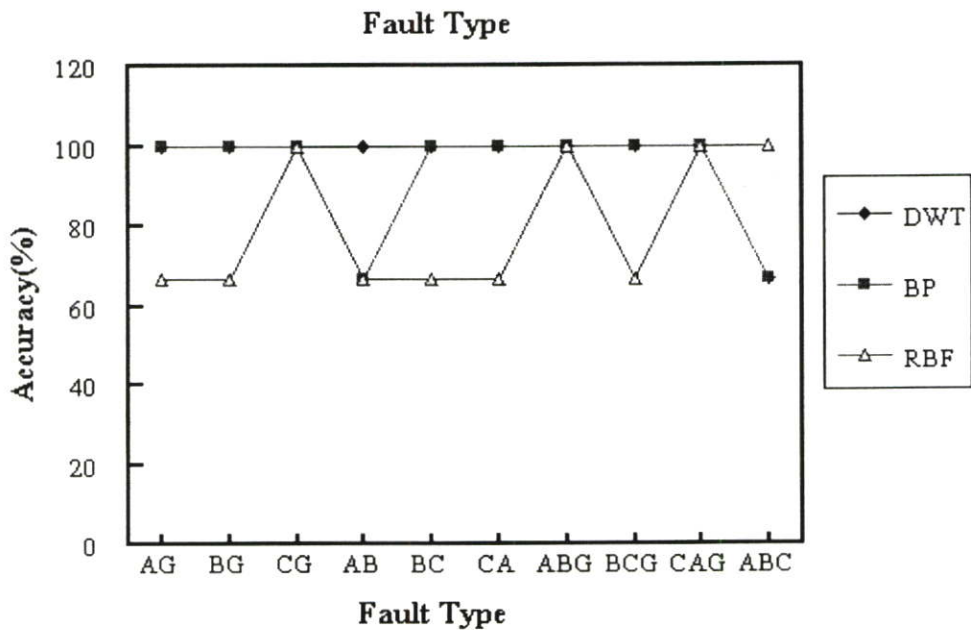
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000			ABC
	210	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	18.511	-0.349	18.8619	0.0019	18.86	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.4 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.5 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.6 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 18.86 กิโลเมตร (10% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.4-6.6 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 18.86 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.5 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.511 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน - 0.349 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.5 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 18.8619 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0019 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.5 ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 18.86 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

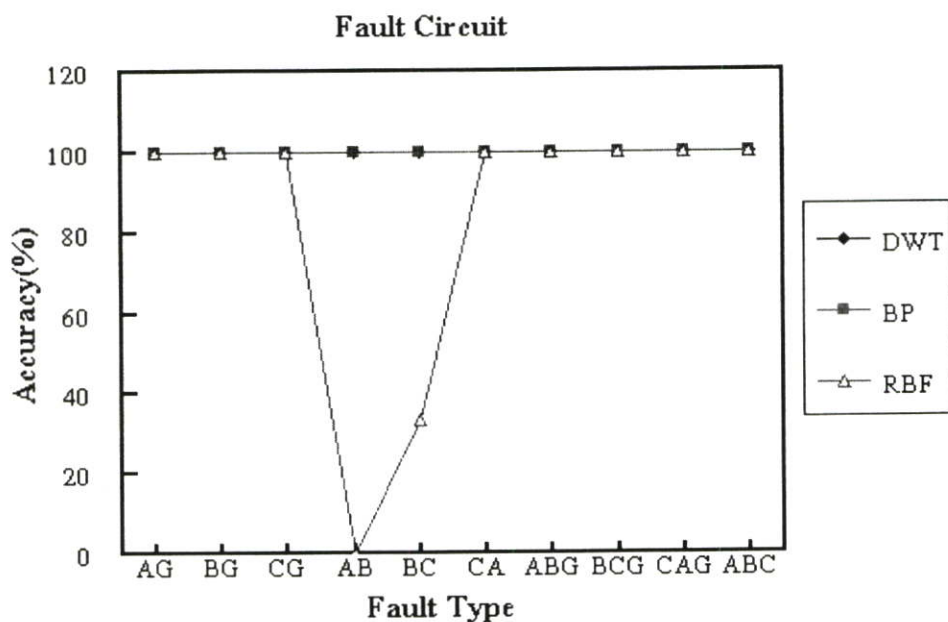
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 37.72 กิโลเมตร  
(20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

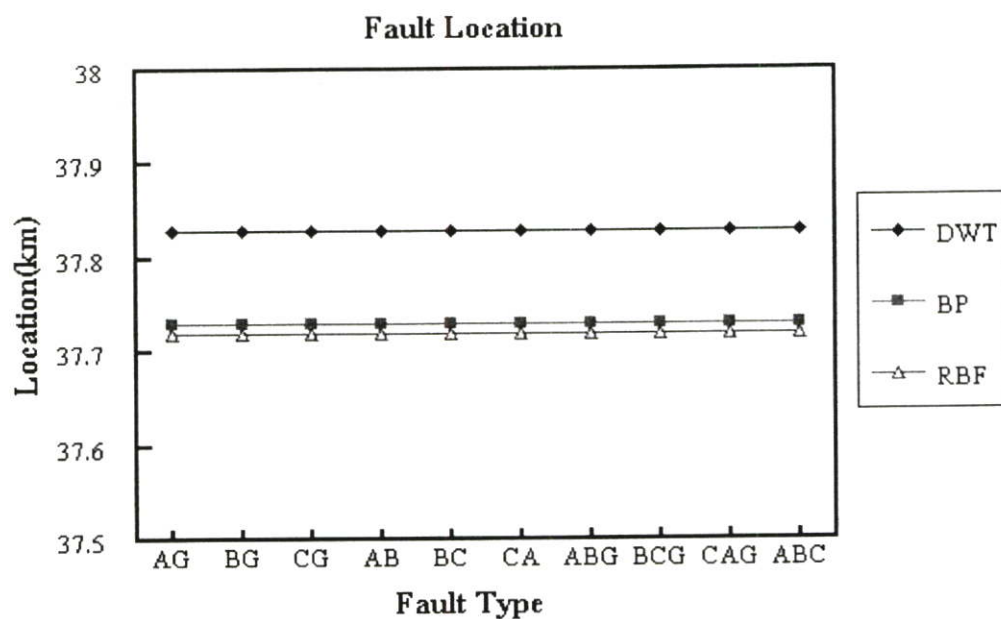
ประเภทฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AG	AG	
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AG	AG	AG
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BG	BG	BG
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BG	BG	
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CG	CG	CG
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CG	CG	CG
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CG	CG	CG
AB	120	1	1		37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AB	AB	AB
	210	1	1		37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AB	AB	
	330	1	1		37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AB		AB
BC	120	1	1		37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BC	BC	BC
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BC	BC	
	330	1	1		37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CA	CA	CA
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CA	CA	CA
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BCG	BCG	
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

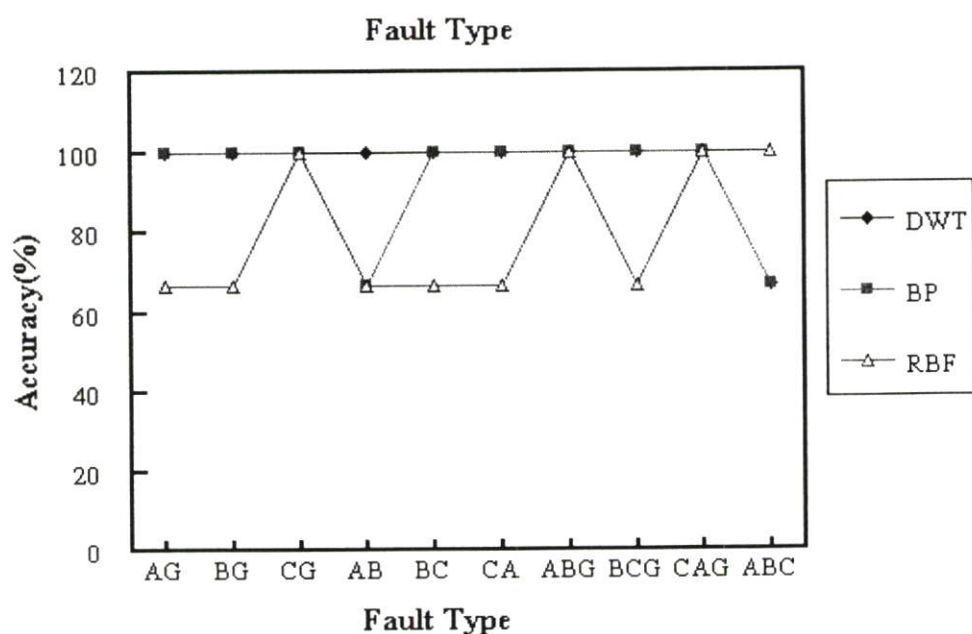
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000			ABC
	210	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.7 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



**รูปที่ 6.8** แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



**รูปที่ 6.9** แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.7-6.9 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.33%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยและ การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 37.72 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.8 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.829 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.109 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.8 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.7299 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0099 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.8 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.72 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

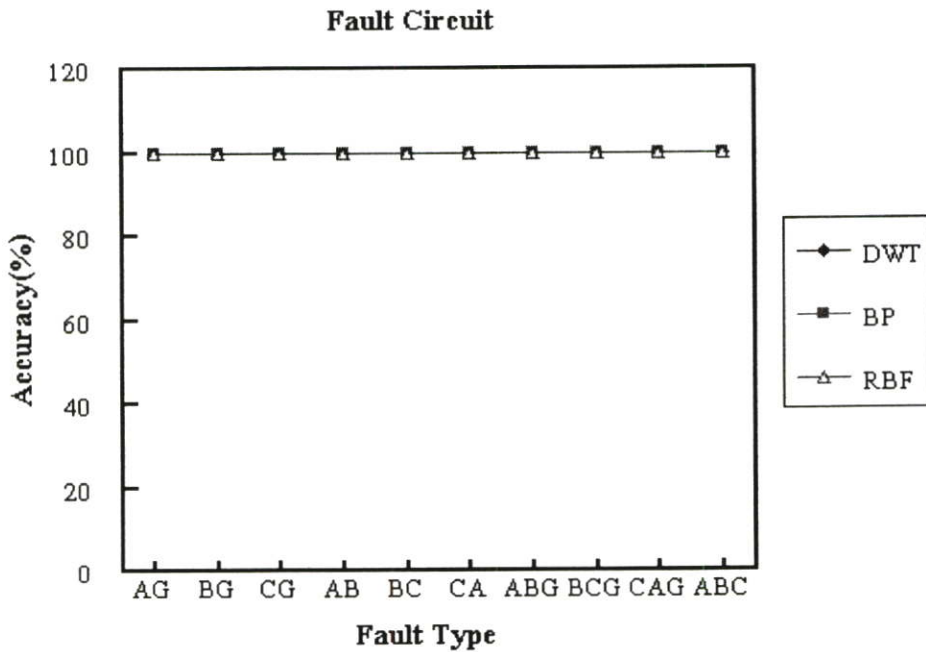
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 37.72 กิโลเมตร  
(20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 2

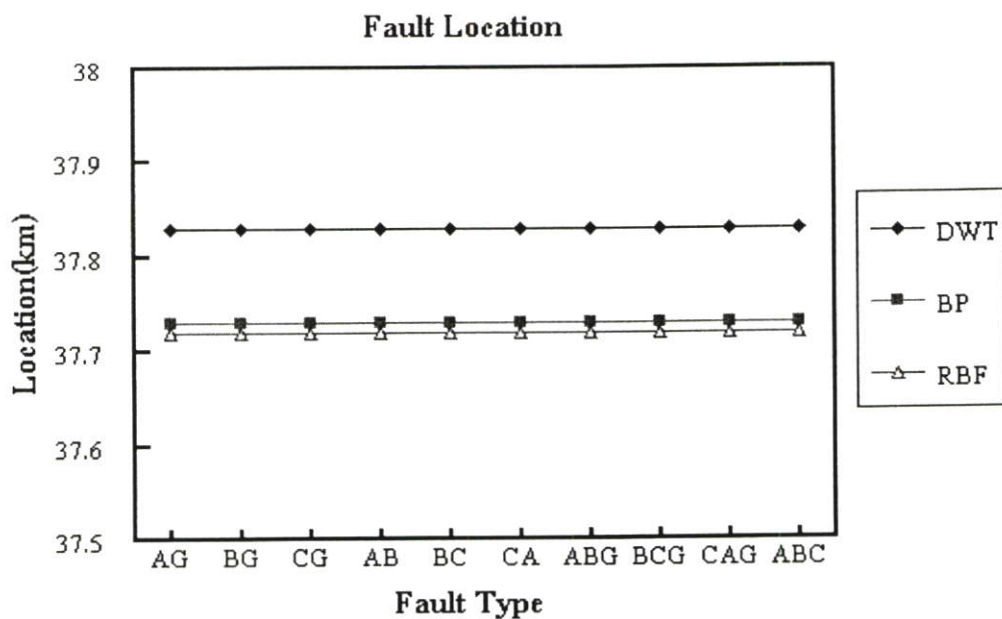
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AG	AG	
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AG	AG	AG
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BG	BG	BG
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BG	BG	
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CG	CG	CG
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CG	CG	CG
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AB	AB	AB
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AB	AB	
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	AB		AB
BC	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BC	BC	BC
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BC	BC	
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CA	CA	CA
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CA	CA	CA
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BCG	BCG	
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

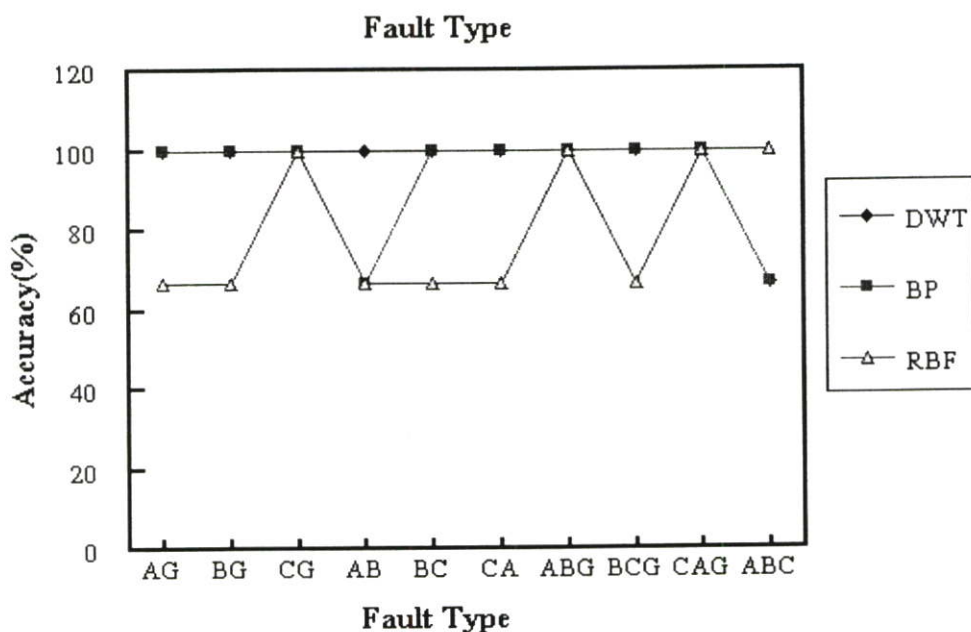
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000			ABC
	210	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	37.829	0.109	37.7299	0.0099	37.72	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.10 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.11 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.12 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 37.72 กิโลเมตร (20% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.10-6.12 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 37.72 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.11 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.829 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.109 กิโลเมตร)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.11 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.7299 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0099 กิโลเมตร)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.11 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 37.72 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

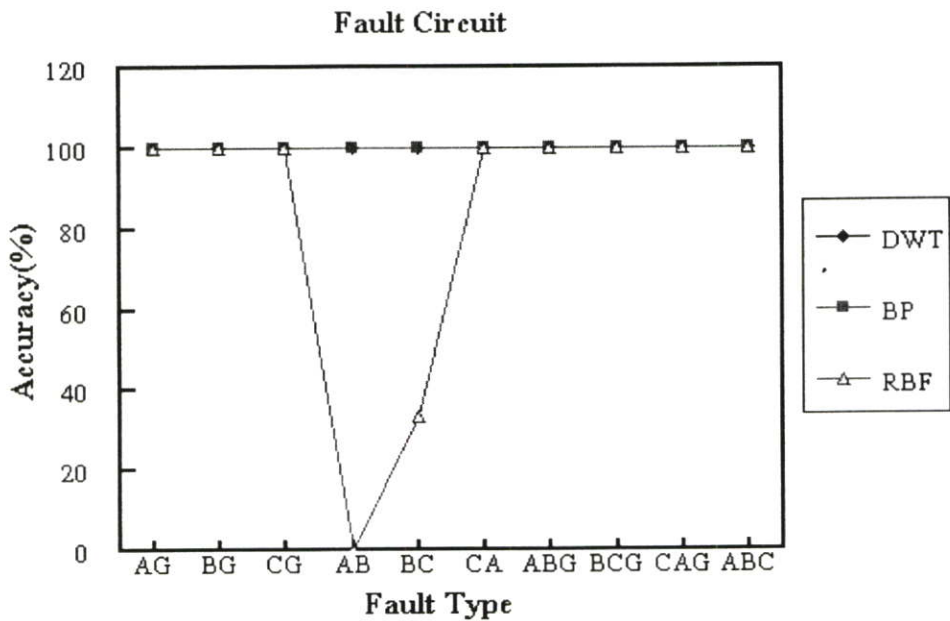
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 56.58 กิโลเมตร  
(30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

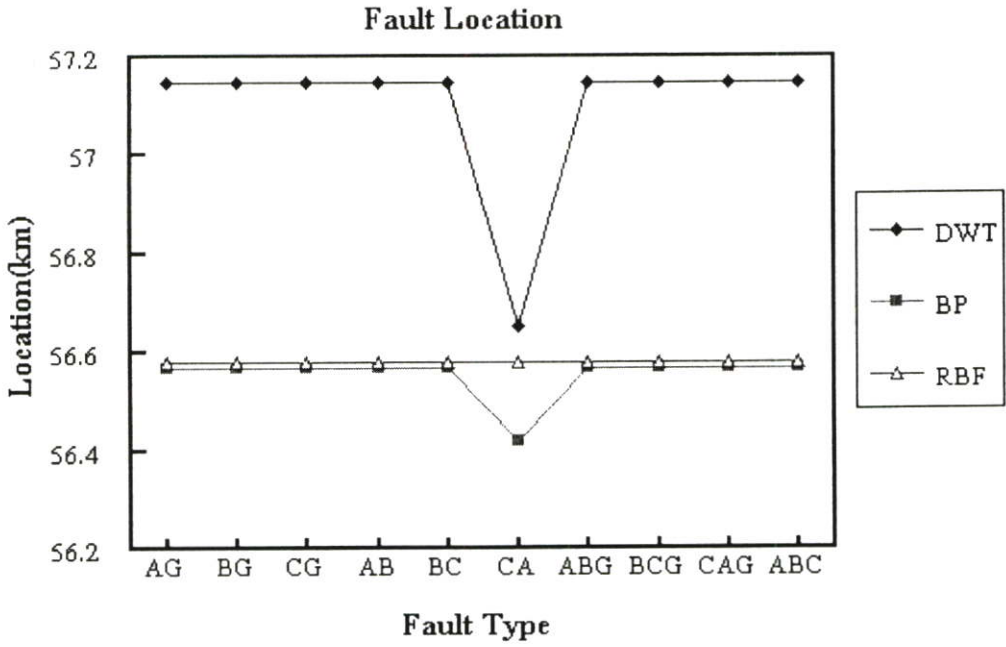
ประเภทฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AG	AG	
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AG	AG	AG
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BG	BG	BG
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BG	BG	
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CG	CG	CG
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CG	CG	CG
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CG	CG	CG
AB	120	1	1		57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AB	AB	AB
	210	1	1		57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AB	AB	
	330	1	1		57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AB		AB
BC	120	1	1		57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BC	BC	BC
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BC	BC	
	330	1	1		57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CA	CA	CA
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CA	CA	CA
	330	1	1	1	55.662	-0.918	56.1154	-0.4646	56.5806	0.0006	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BCG	BCG	
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.5 (ต่อ)

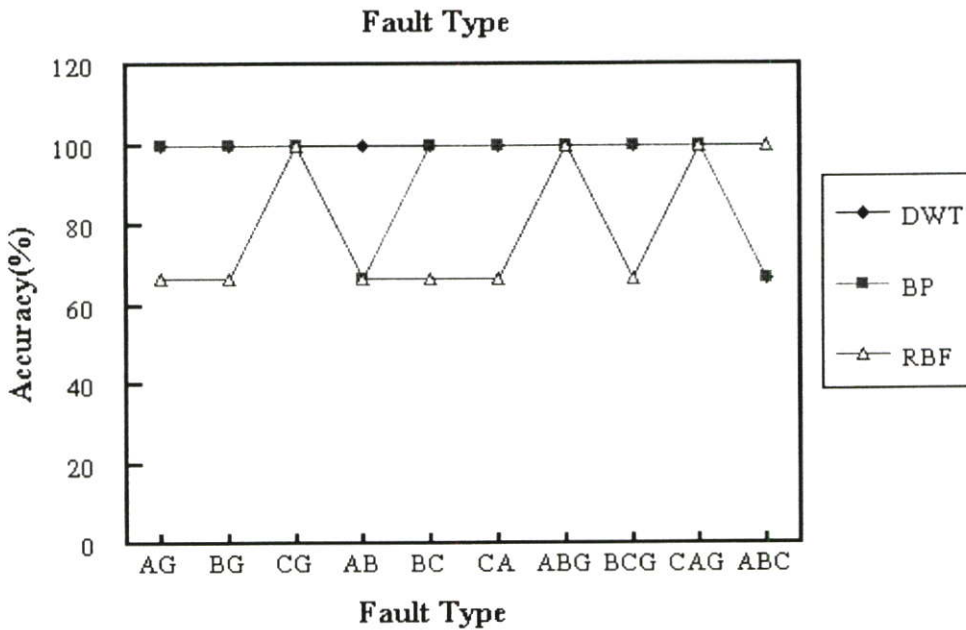
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006			ABC
	210	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.13 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.14 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.15 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.13-6.15 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.33%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยและ การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 56.58 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 57.148 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.568 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.14 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 57.098 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.518 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 56.5697 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0103 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.14 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 56.5546 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0254 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.14 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 56.5794 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0006 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

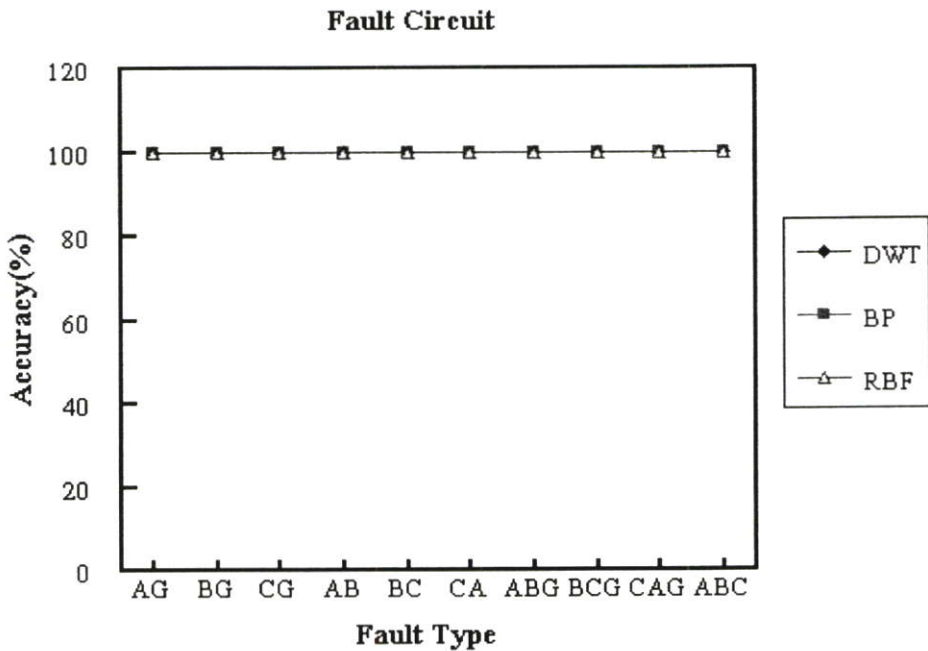
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 56.58 กิโลเมตร  
(30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 2

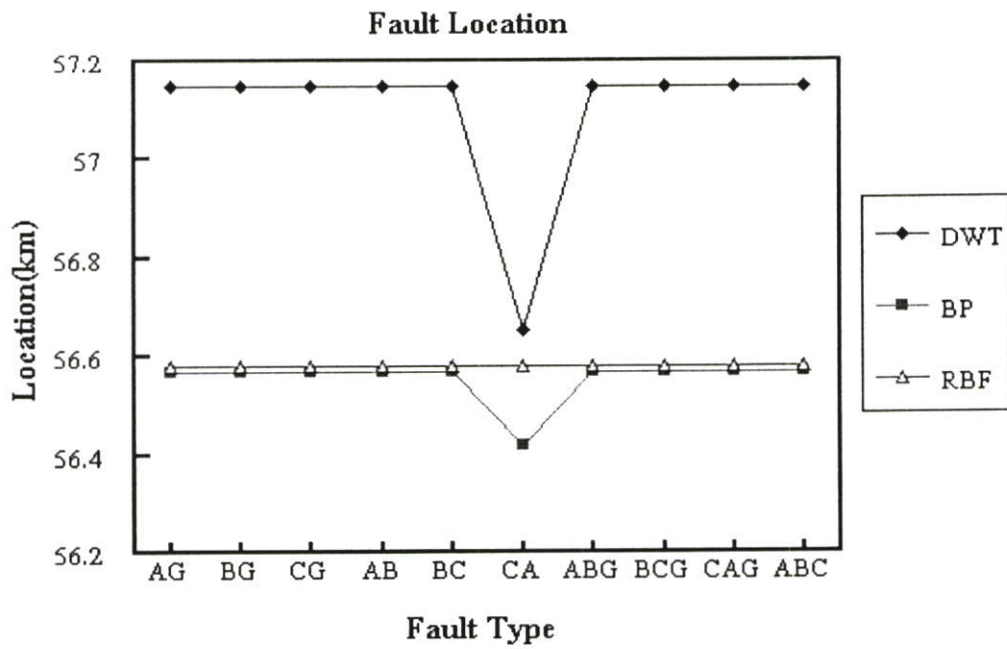
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AG	AG	AG
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AG	AG	AG
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BG	BG	BG
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BG	BG	BG
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CG	CG	CG
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CG	CG	CG
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AB	AB	AB
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AB	AB	AB
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	AB	AB	AB
BC	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BC	BC	BC
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BC	BC	BC
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CA	CA	CA
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CA	CA	CA
	330	2	2	2	55.662	-0.918	56.1154	-0.4646	56.5794	-0.0006	CA	CA	CA
ABG	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5806	0.0006	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BCG	BCG	BCG
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

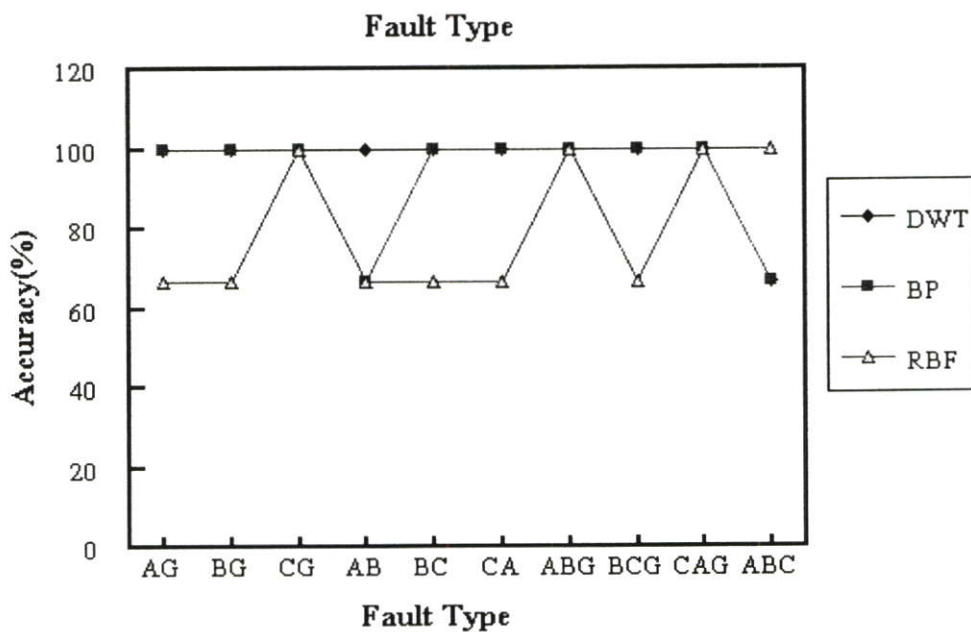
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006			ABC
	210	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	57.148	0.568	56.5697	-0.0103	56.5794	-0.0006	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.16 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.17 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.18 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร (30% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.16-6.18 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 56.58 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 57.148 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.568 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.17 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 57.098 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.518 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 56.5697 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0103 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.17 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 56.5546 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0254 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.17 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 56.5794 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0006 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดพื้นฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

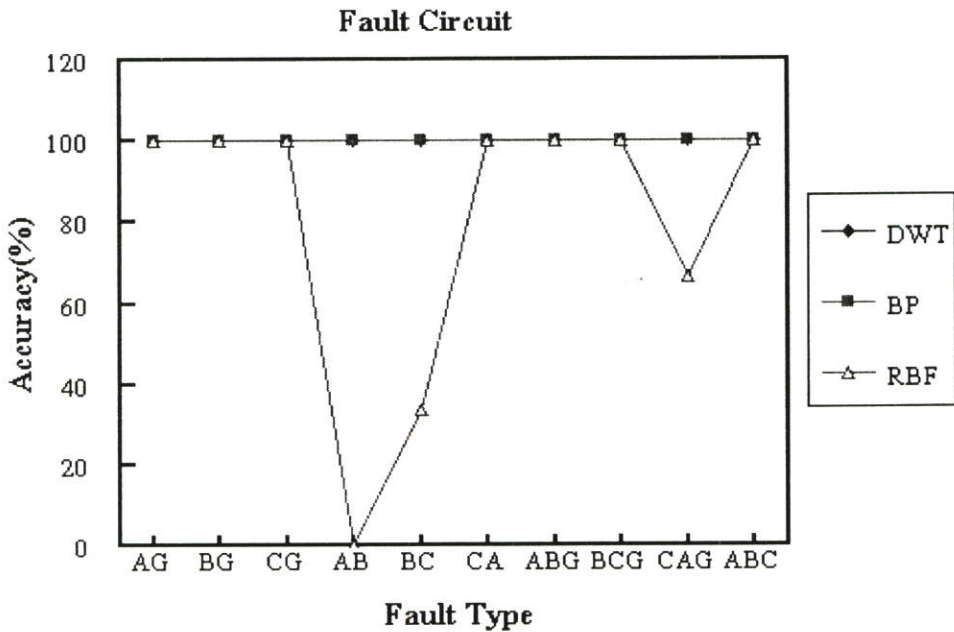
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 75.44 กิโลเมตร  
(40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

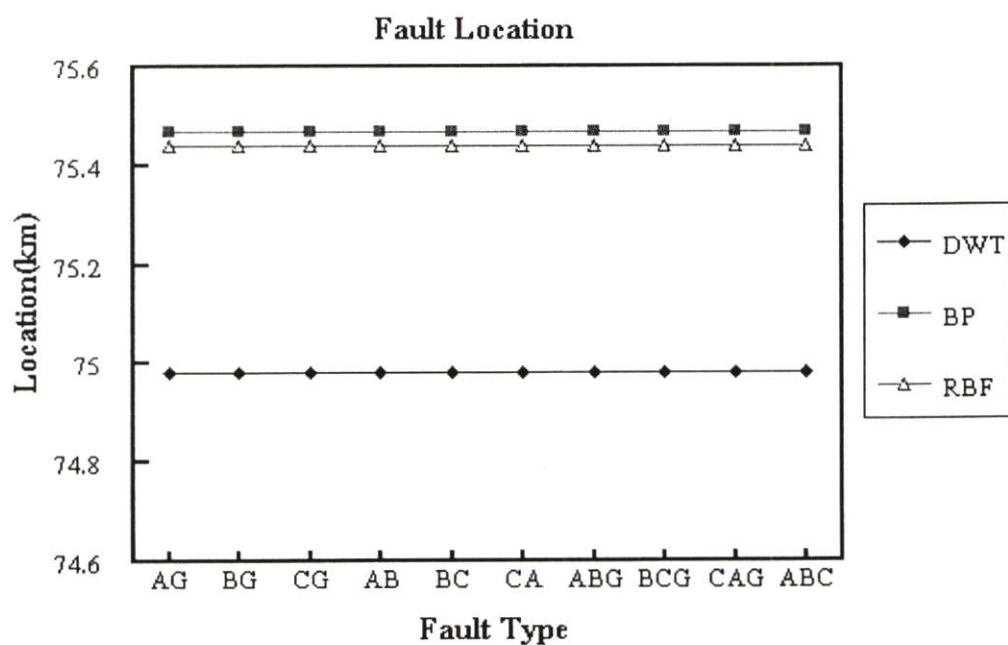
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AG	AG	
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AG	AG	AG
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BG	BG	BG
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BG	BG	
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CG	CG	CG
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CG	CG	CG
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CG	CG	CG
AB	120	1	1		74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AB	AB	AB
	210	1	1		74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AB	AB	
	330	1	1		74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AB		AB
BC	120	1	1		74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BC	BC	BC
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BC	BC	
	330	1	1		74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CA	CA	CA
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CA	CA	CA
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BCG	BCG	
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.7 (ต่อ)

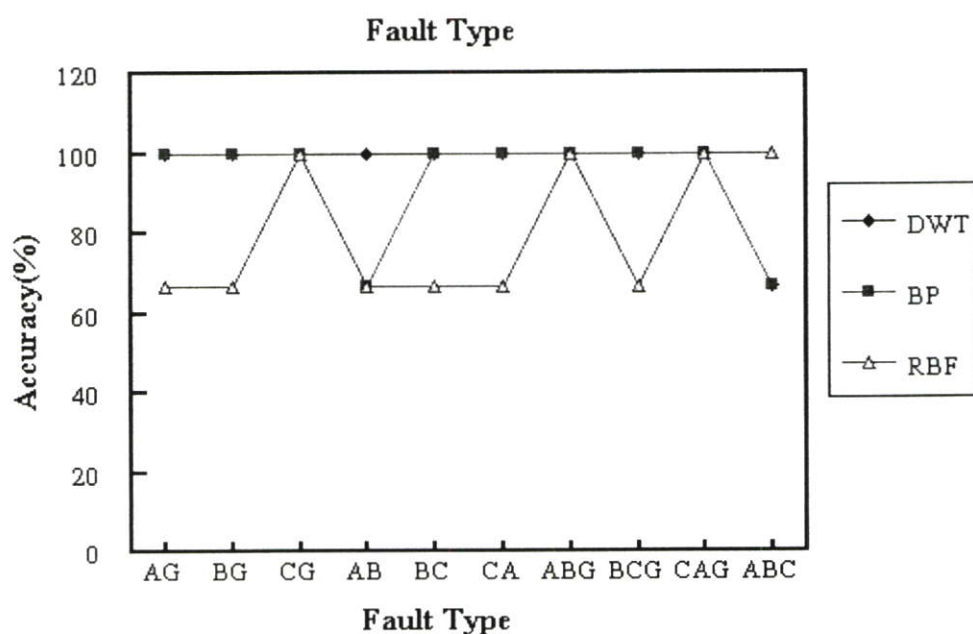
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	1	1		74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000			ABC
	210	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.19 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 75.44 กิโลเมตร (40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.20 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 75.44 กิโลเมตร (40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.21 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 75.44 กิโลเมตร (40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.7 และรูปที่ 6.19-6.21 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.33%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยและ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 75.44 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.20 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 74.981 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.459 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.20 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 75.4664 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0264 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.20 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 75.44 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมนชนิดแพร์ค้าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมนชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

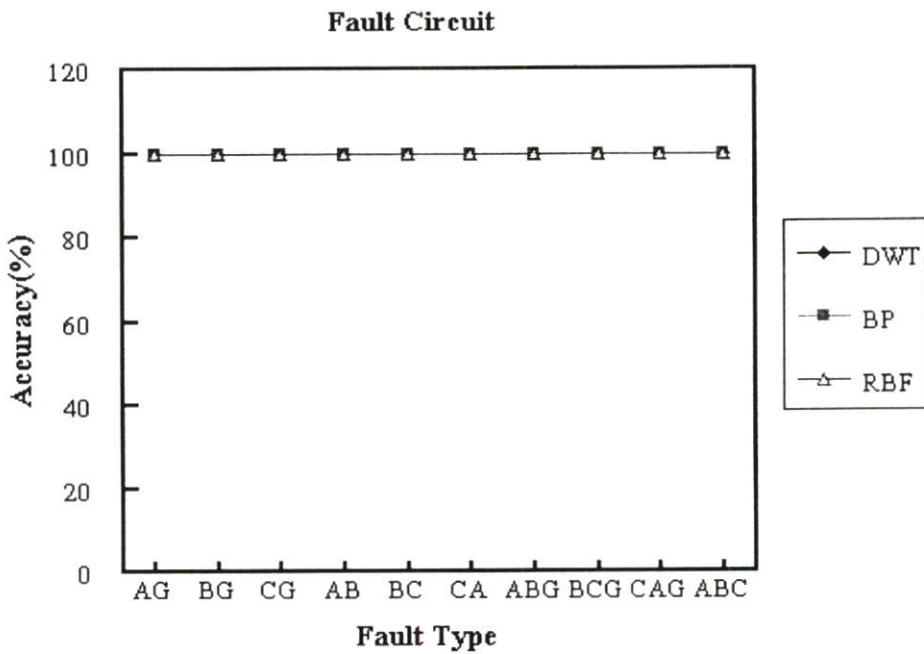
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.8 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 75.44 กิโลเมตร  
(40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

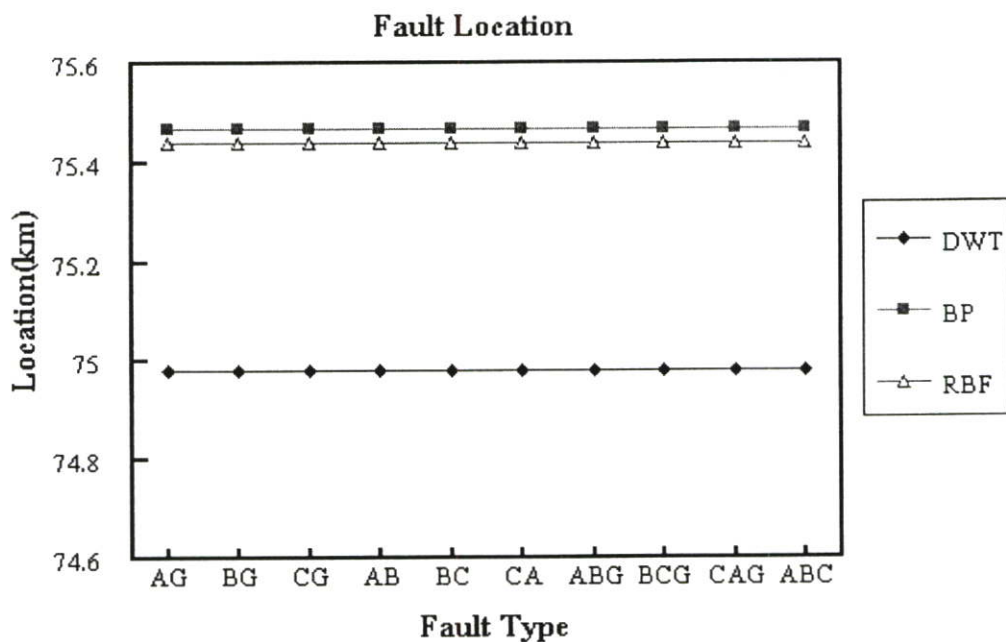
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AG	AG	
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AG	AG	AG
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BG	BG	BG
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BG	BG	
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CG	CG	CG
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CG	CG	CG
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AB	AB	AB
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AB	AB	
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	AB		AB
BC	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BC	BC	BC
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BC	BC	
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CA	CA	CA
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CA	CA	CA
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BCG	BCG	
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.8 (ต่อ)

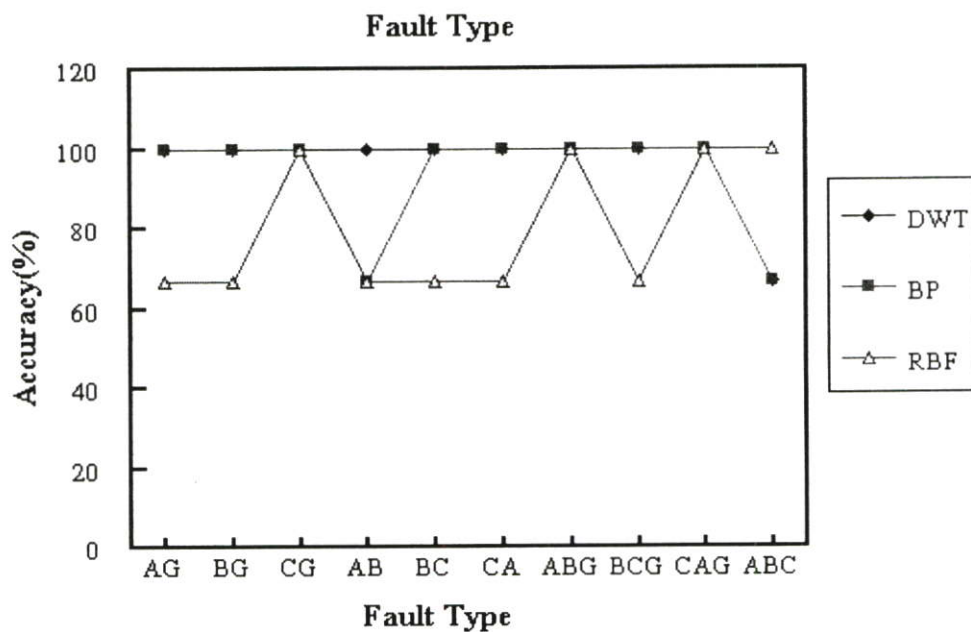
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000			ABC
	210	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	74.981	-0.459	75.4664	0.0264	75.44	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.22 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 75.44 กิโลเมตร (40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.23 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 75.44 กิโลเมตร (40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.24 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 75.44 กิโลเมตร (40% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.8 และรูปที่ 6.22-6.24 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 75.44 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.23 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 74.981 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.459 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.23 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 75.4664 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0264 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.23 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 75.44 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

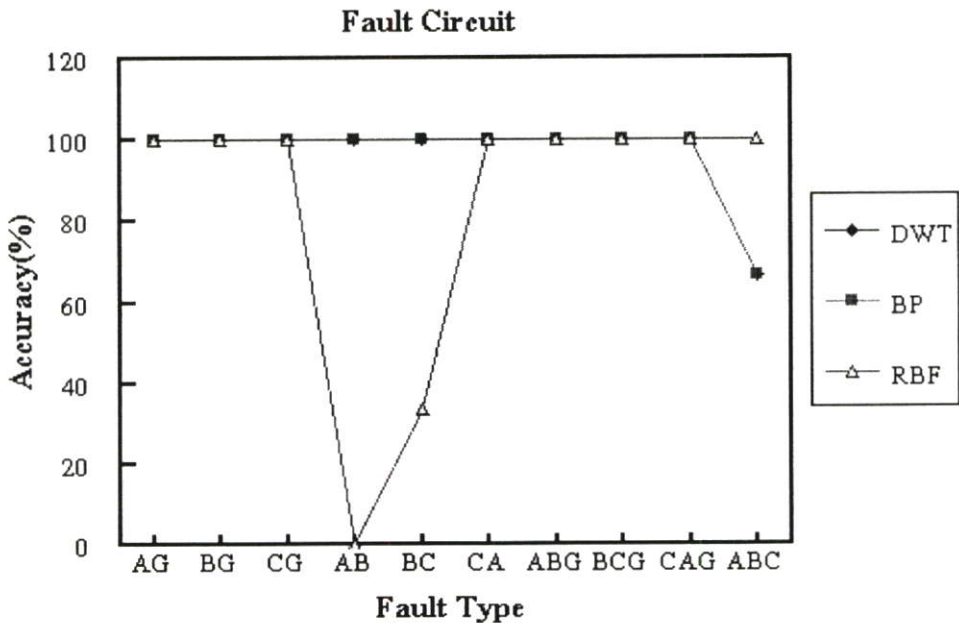
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงสุด

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 94.3 กิโลเมตร  
(50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 1

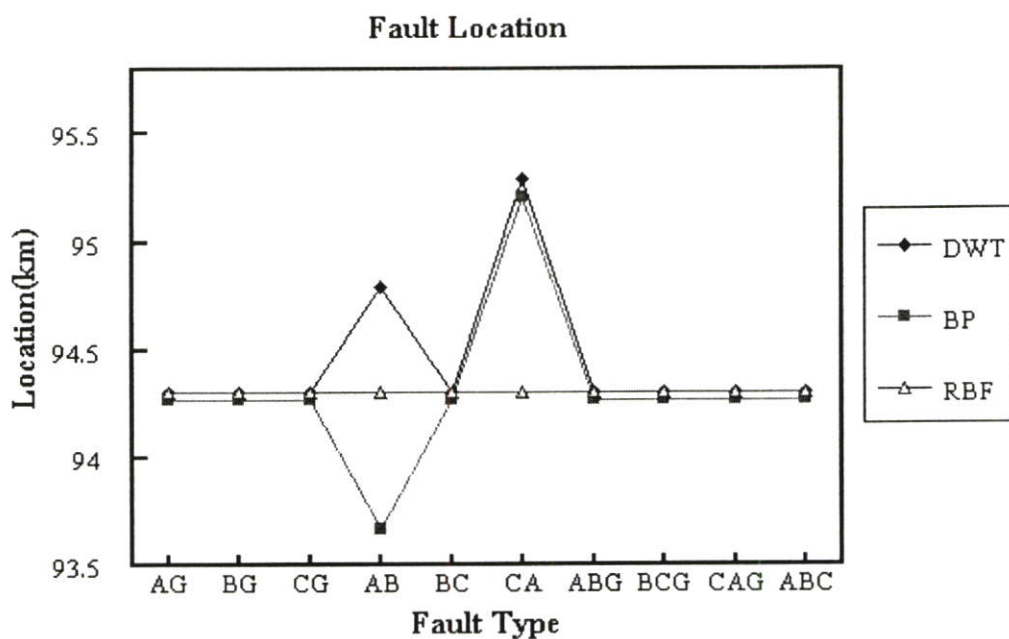
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AG	AG	
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AG	AG	AG
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BG	BG	BG
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BG	BG	
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CG	CG	CG
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CG	CG	CG
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CG	CG	CG
AB	120	1	1		94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AB	AB	AB
	210	1	1		95.786	1.486	92.4702	-1.8298	94.300	0.000	AB	AB	
	330	1	1		94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AB		AB
BC	120	1	1		94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BC	BC	BC
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BC	BC	
	330	1	1		94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CA	CA	CA
	210	1	1	1	97.272	2.972	97.0997	2.7997	94.300	0.000	CA	CA	CA
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BCG	BCG	
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.9 (ต่อ)

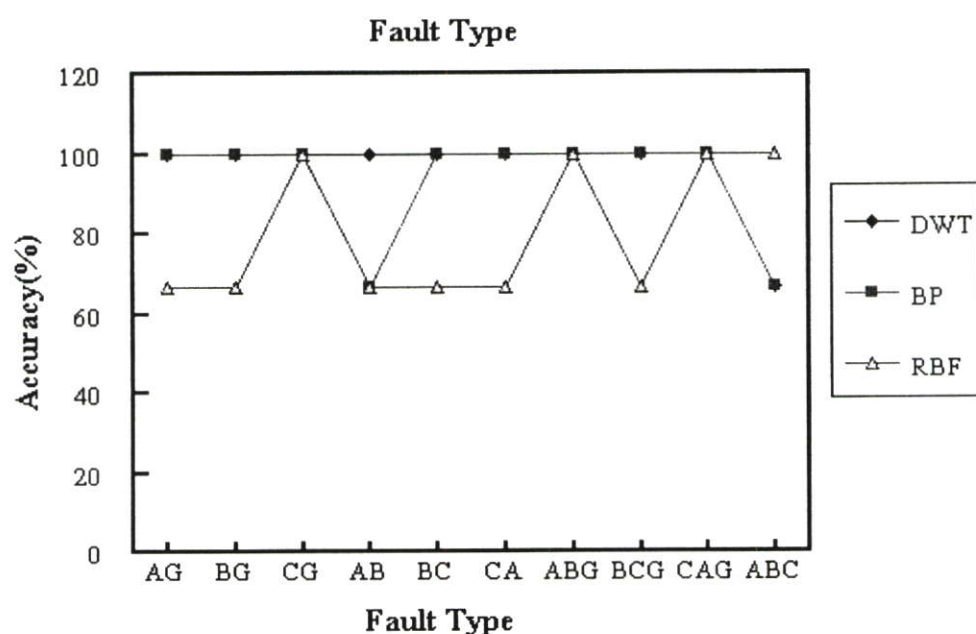
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120			1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000			ABC
	210	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.25 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 94.3 กิโลเมตร (50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.26 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 94.3 กิโลเมตร (50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.27 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 94.3 กิโลเมตร (50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.9 และรูปที่ 6.25-6.27 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 29 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 96.67%)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 29 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 96.67%)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.3%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มและการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องเท่ากันคือ 96.67%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 94.3 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 94.3 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.26 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 94.449 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.149 กิโลเมตร)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 94.2689 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0311 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.26 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 94.3033 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0033 กิโลเมตร)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.26 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 94.3 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

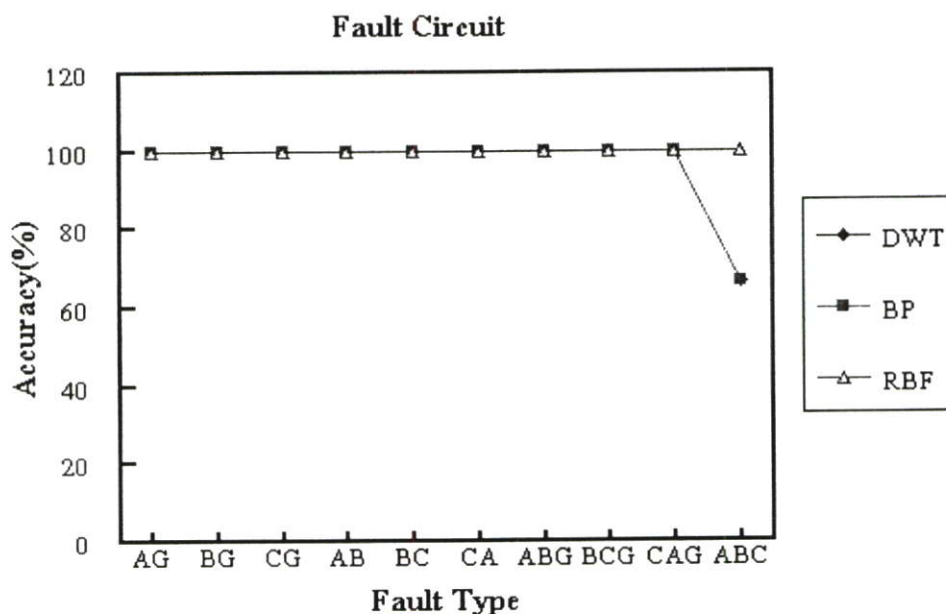
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.10 แสดงผลการวิเคราะห์ห้สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 94.3 กิโลเมตร  
(50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

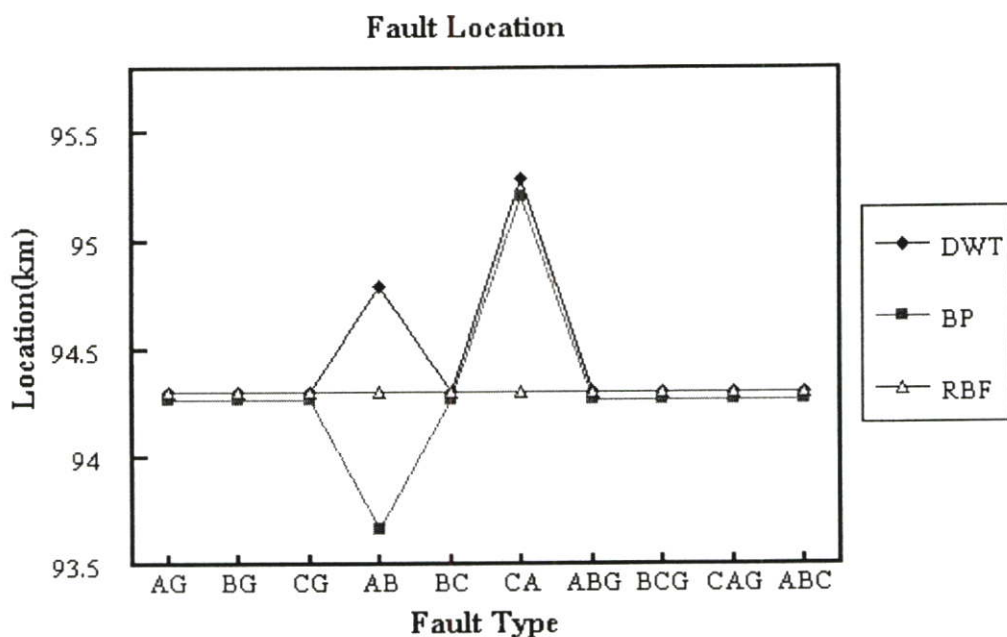
ประเภทฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AG	AG	
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AG	AG	AG
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BG	BG	BG
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BG	BG	
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CG	CG	CG
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CG	CG	CG
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AB	AB	AB
	210	2	2	2	95.786	1.486	92.4702	-1.8298	94.300	0.000	AB	AB	
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	AB		AB
BC	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BC	BC	BC
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BC	BC	
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CA	CA	CA
	210	2	2	2	97.272	2.972	97.0997	2.7997	94.300	0.000	CA	CA	CA
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BCG	BCG	
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.10 (ต่อ)

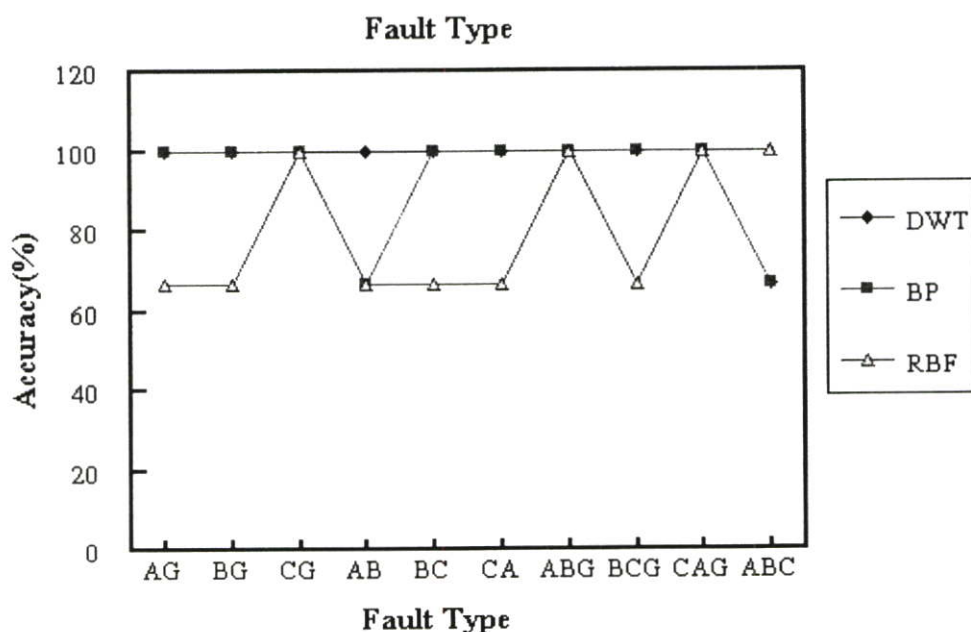
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT&ANN			DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
		DWT	BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120			2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000			ABC
	210	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	94.300	0.000	94.2689	-0.0311	94.300	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.28 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 94.3 กิโลเมตร (50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.29 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 94.3 กิโลเมตร (50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.30 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 94.3 กิโลเมตร (50% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.10 และรูปที่ 6.28-6.30 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 29 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 96.67%)

2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 29 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 96.67%)

3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องสูงสุดคือ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 94.3 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 94.3 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.29 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 94.449 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.149 กิโลเมตร)

2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 94.2689 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0311 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.29 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 94.3033 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0033 กิโลเมตร)

3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.29 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 94.3 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

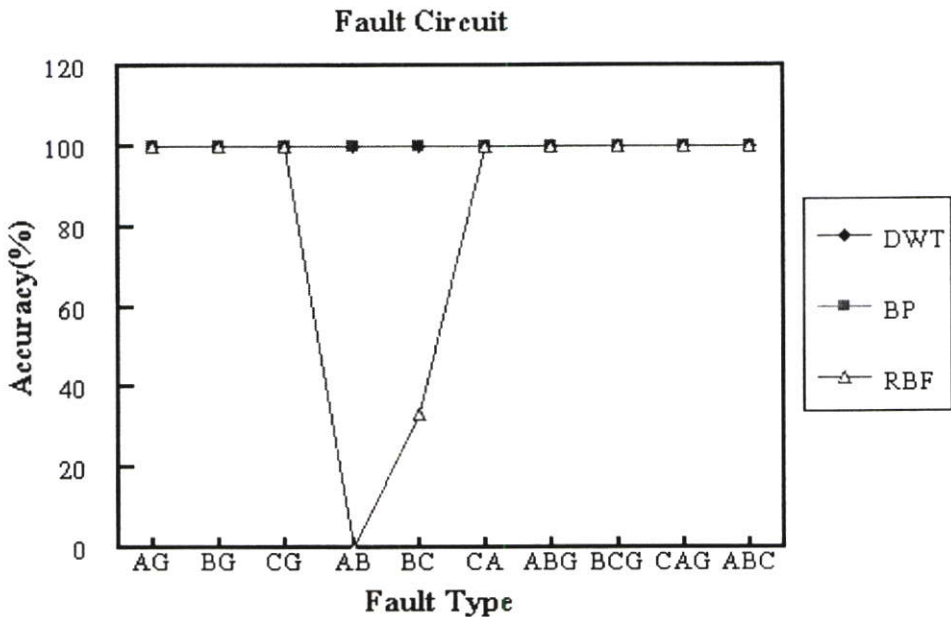
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.11 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 113.16 กิโลเมตร  
(60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 1

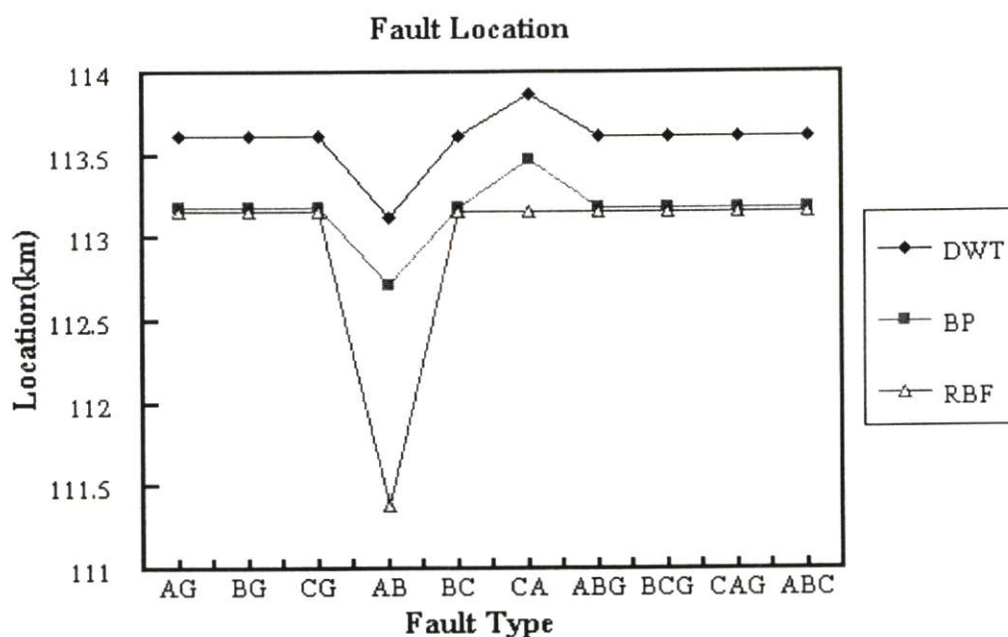
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AG	AG	AG
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AG	AG	AG
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BG	BG	BG
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BG	BG	BG
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CG	CG	CG
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CG	CG	CG
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CG	CG	CG
AB	120	1	1		113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AB	AB	AB
	210	1	1		113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AB	AB	
	330	1	1		112.133	-1.027	111.7743	-1.3857	107.8278	-5.3322	AB		AB
BC	120	1	1		113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BC	BC	BC
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BC	BC	
	330	1	1		113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	114.362	1.202	114.0521	0.8921	113.1599	-0.0001	CA	CA	CA
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CA	CA	CA
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BCG	BCG	
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.11 (ต่อ)

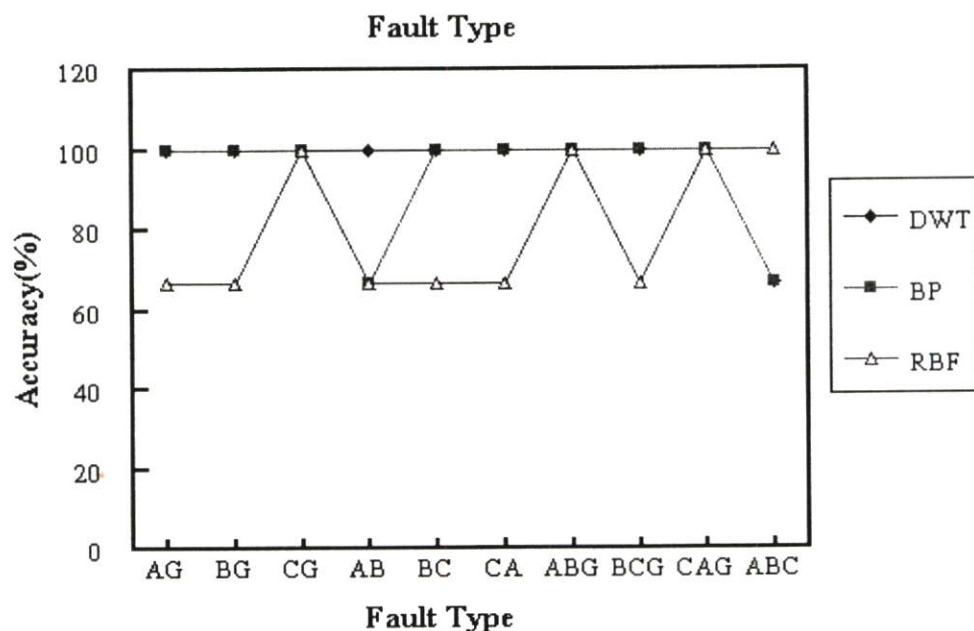
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001			ABC
	210	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.31 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 113.16 กิโลเมตร (60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.32 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 113.16 กิโลเมตร (60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.33 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 113.16 กิโลเมตร (60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.11 และรูปที่ 6.31-6.33 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.33%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยและการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 113.16 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 113.619 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.459 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.32 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 113.594 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.434 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 113.1785 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0185 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.32 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 113.1608 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0008 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 113.1601 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0001 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.23 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 112.9824 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.1776 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

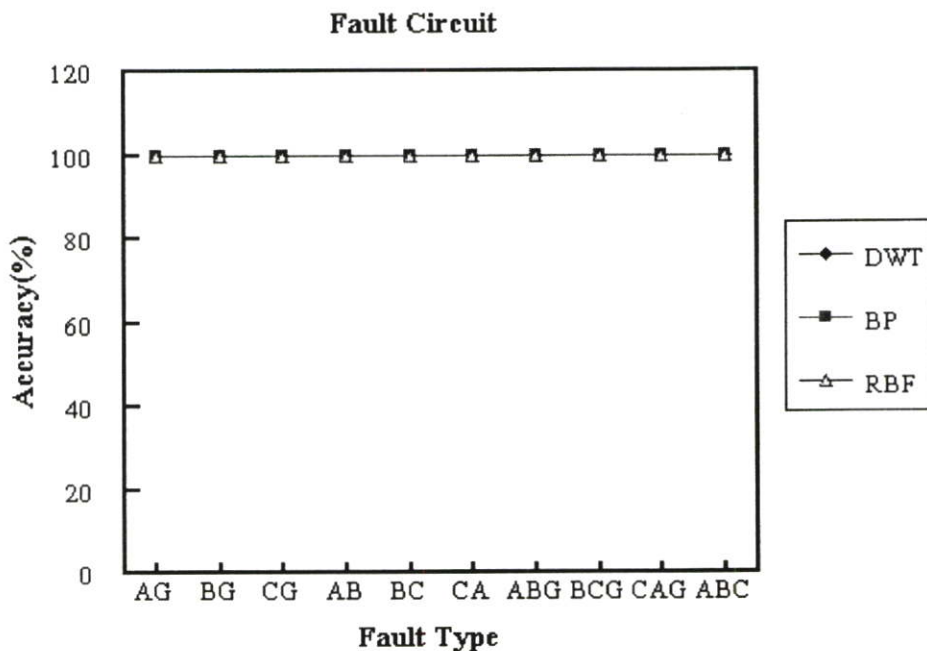
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.12 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลด์ เมื่อเกิดพอลด์ที่ตำแหน่ง 113.16 กิโลเมตร  
(60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลด์วงจรที่ 2

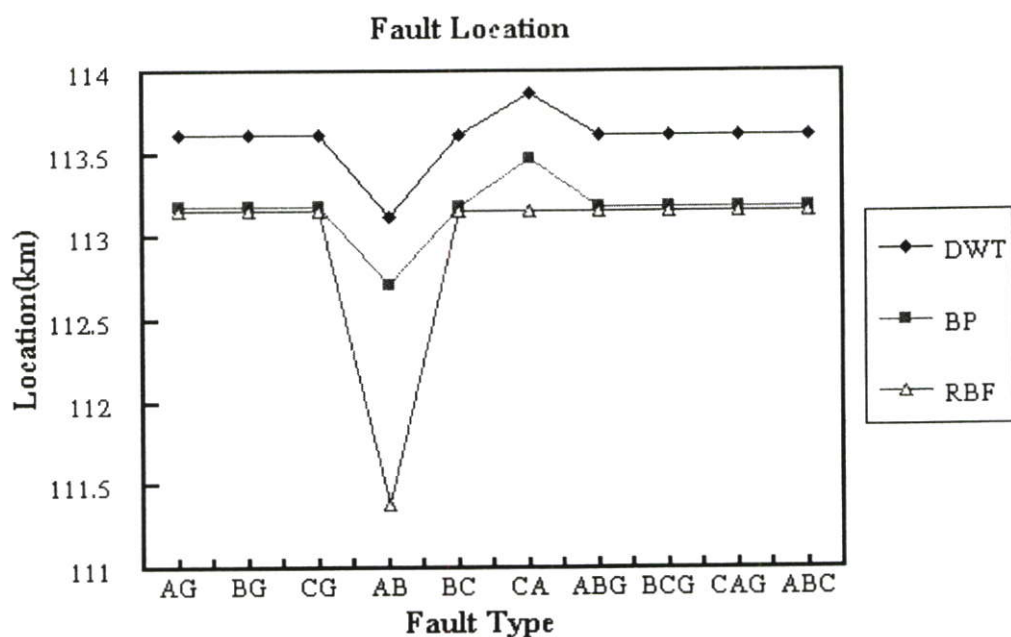
ประเภทพอลด์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลด์			ตำแหน่งที่เกิดพอลด์						ประเภทพอลด์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AG	AG	
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AG	AG	AG
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BG	BG	BG
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BG	BG	
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CG	CG	CG
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CG	CG	CG
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AB	AB	AB
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	AB	AB	
	330	2	2	2	112.133	-1.027	111.7743	-1.3857	107.8278	-5.3322	AB		AB
BC	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BC	BC	BC
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BC	BC	
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	114.362	1.202	114.0521	0.8921	113.1599	-0.0001	CA	CA	CA
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CA	CA	CA
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BCG	BCG	
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.12 (ต่อ)

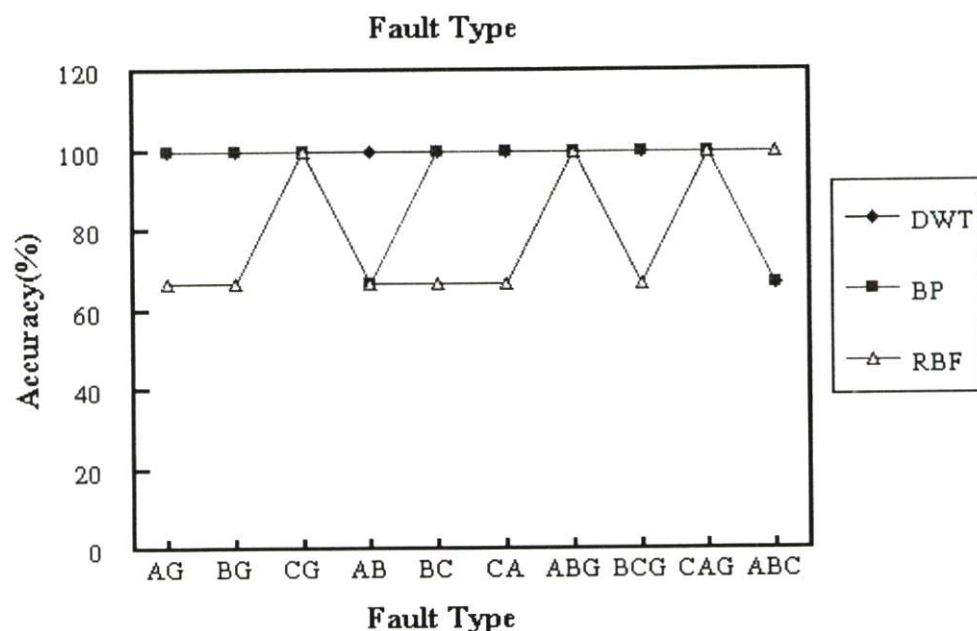
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001			ABC
	210	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	113.619	0.459	113.1785	0.0185	113.1601	0.0001	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.34 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 113.16 กิโลเมตร (60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.35 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 113.16 กิโลเมตร (60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.36 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 113.16 กิโลเมตร (60% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.12 และรูปที่ 6.34-6.36 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 113.16 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 113.619 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.459 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.35 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 113.594 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.434 กิโลเมตร)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 113.1785 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0185 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.35 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 113.1608 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0008 กิโลเมตร)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 113.1601 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0001 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.35 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 112.9824 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.1776 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

### การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงคิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงคิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงคิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงคิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงคิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงคิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

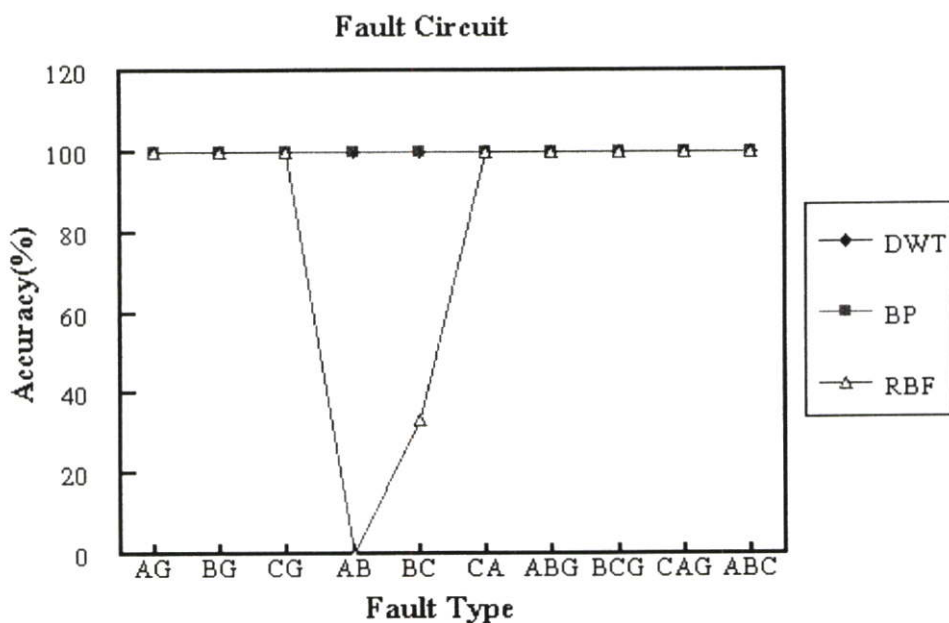
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.13 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 132.02 กิโลเมตร  
(70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

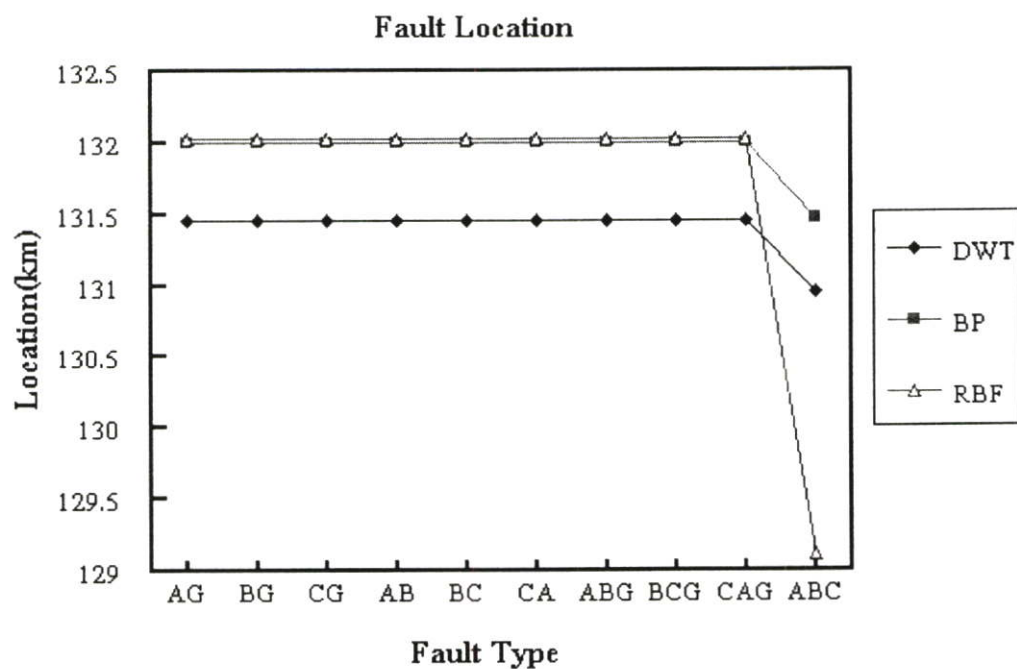
ประเภทฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AG	AG	
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AG	AG	AG
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BG	BG	BG
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BG	BG	
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CG	CG	CG
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CG	CG	CG
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CG	CG	CG
AB	120	1	1		131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AB	AB	AB
	210	1	1		131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AB	AB	
	330	1	1		131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AB		AB
BC	120	1	1		131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BC	BC	BC
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BC	BC	
	330	1	1		131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CA	CA	CA
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CA	CA	CA
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BCG	BCG	
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.13 (ต่อ)

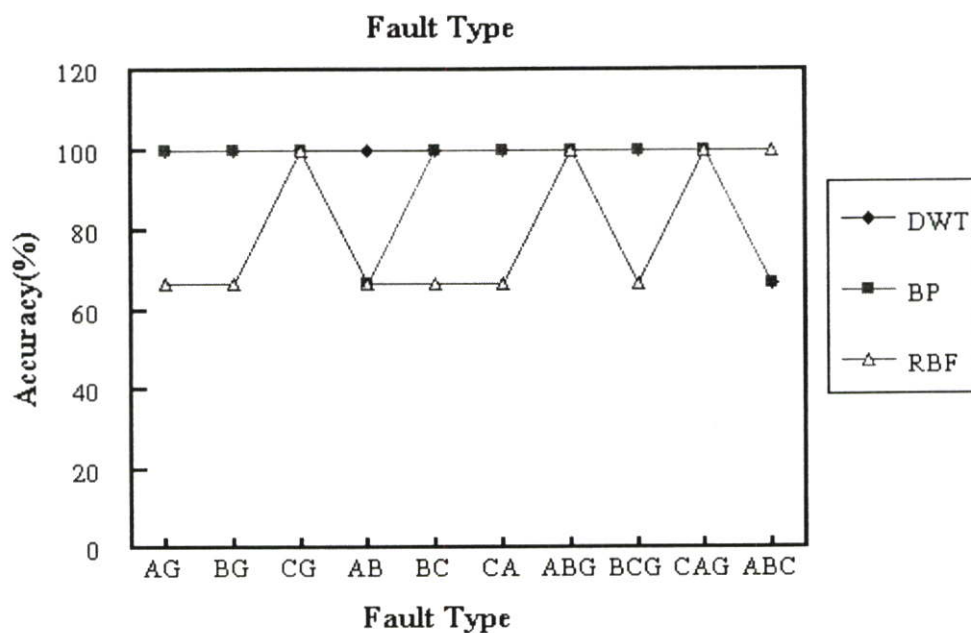
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	129.966	-2.054	130.4362	-1.5838	123.3144	-8.7056			ABC
	210	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.37 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 132.02 กิโลเมตร (70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.38 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 132.02 กิโลเมตร (70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.39 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 132.02 กิโลเมตร (70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.13 และรูปที่ 6.37-6.39 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.3%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยและ การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 132.02 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 131.452 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.568 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.38 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 131.402 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.618 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 131.9937 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0263 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.38 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 131.9418 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0782 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัสมิสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 132.0205 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0005 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.38 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 131.7303 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.2897 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

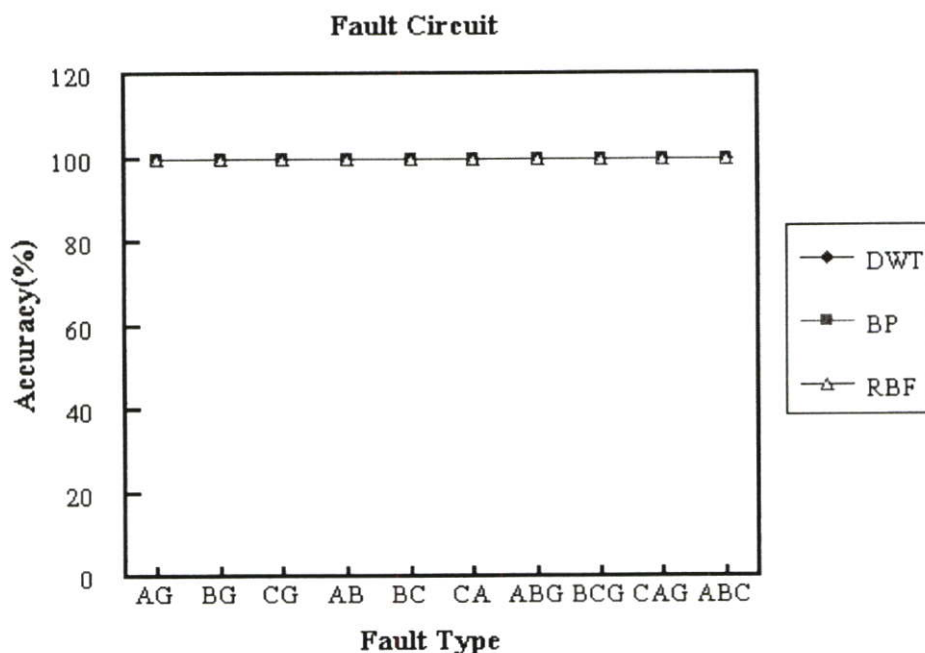
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.14 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 132.02 กิโลเมตร  
(70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

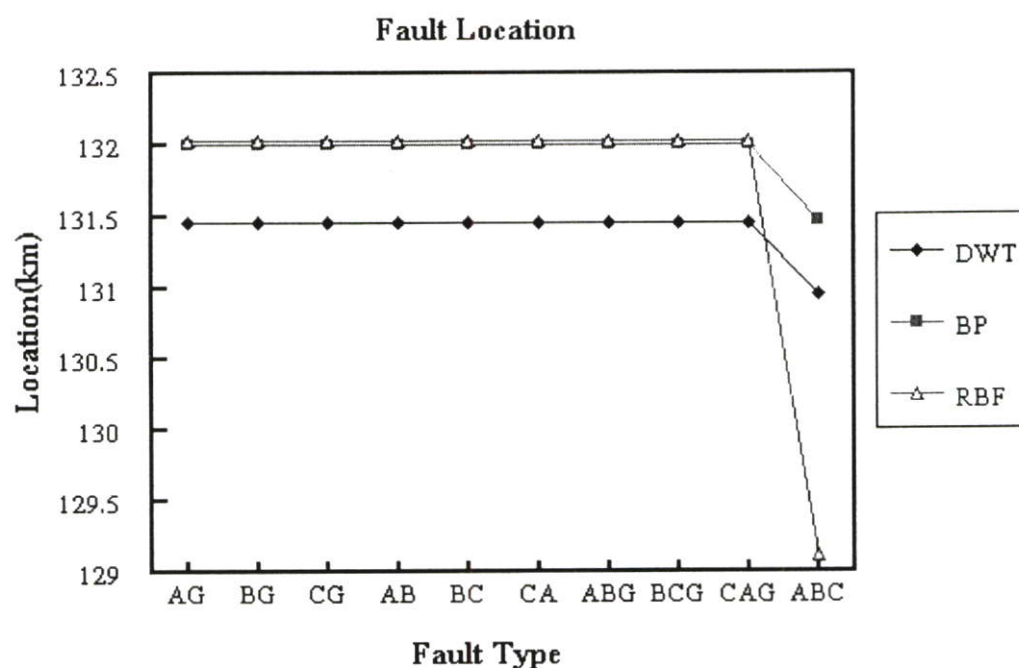
ประเภทฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AG	AG	
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AG	AG	AG
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BG	BG	
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BG	BG	
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CG	CG	CG
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CG	CG	CG
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AB	AB	AB
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AB	AB	
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	AB		AB
BC	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BC	BC	BC
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BC	BC	
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CA	CA	CA
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CA	CA	CA
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BCG	BCG	
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.14 (ต่อ)

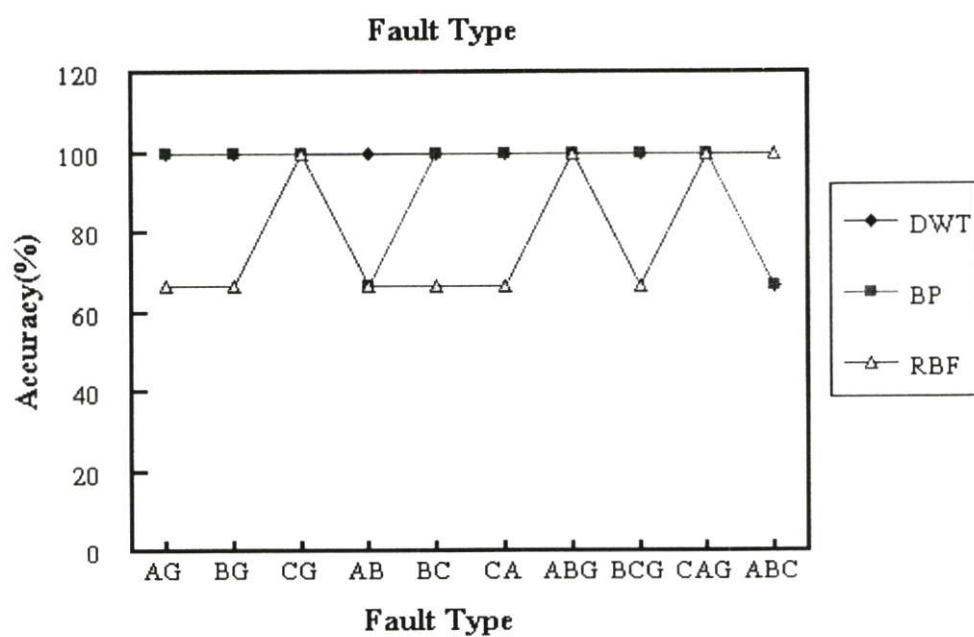
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	129.966	-2.054	130.4362	-1.5838	123.3144	-8.7056			ABC
	210	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	131.452	-0.568	131.9937	-0.0263	132.0205	0.0005	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.40 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 132.02 กิโลเมตร (70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



**รูปที่ 6.41** แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 132.02 กิโลเมตร (70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



**รูปที่ 6.42** แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 132.02 กิโลเมตร (70% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.14 และรูปที่ 6.40-6.42 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 132.02 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 131.452 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.568 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.41 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 131.402 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.618 กิโลเมตร)

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 131.9937 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0263 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.41 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 131.9418 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0782 กิโลเมตร)

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) ระยะทางที่คำนวณได้ส่วนใหญ่คือ 132.0205 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0005 กิโลเมตร) จากรูปที่ 6.41 ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 131.7303 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.2897 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของพอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของพอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนพอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน พอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และพอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

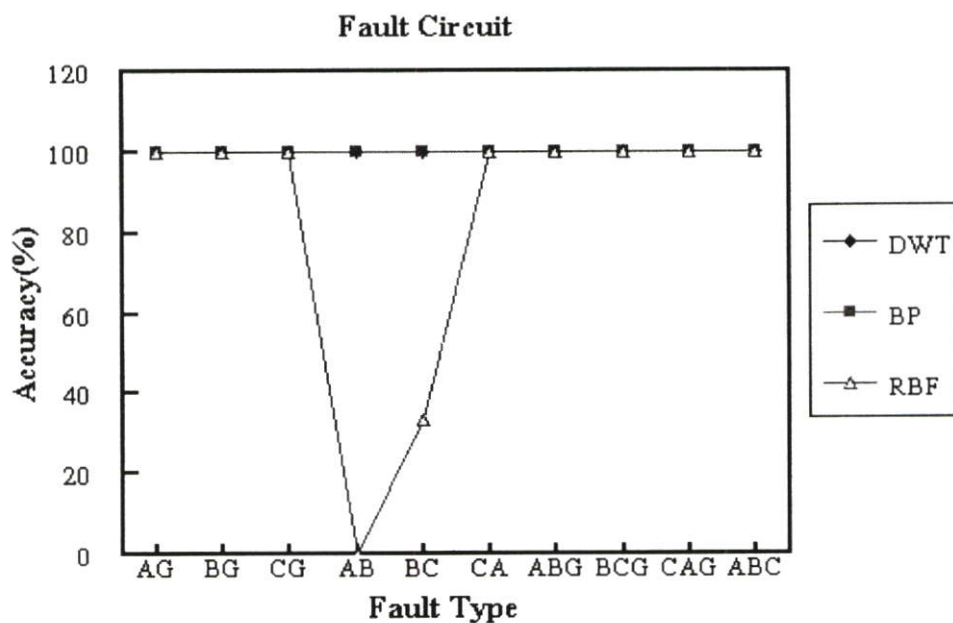
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของพอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.15 แสดงผลการวิเคราะห์ห้สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 150.88 กิโลเมตร  
(80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

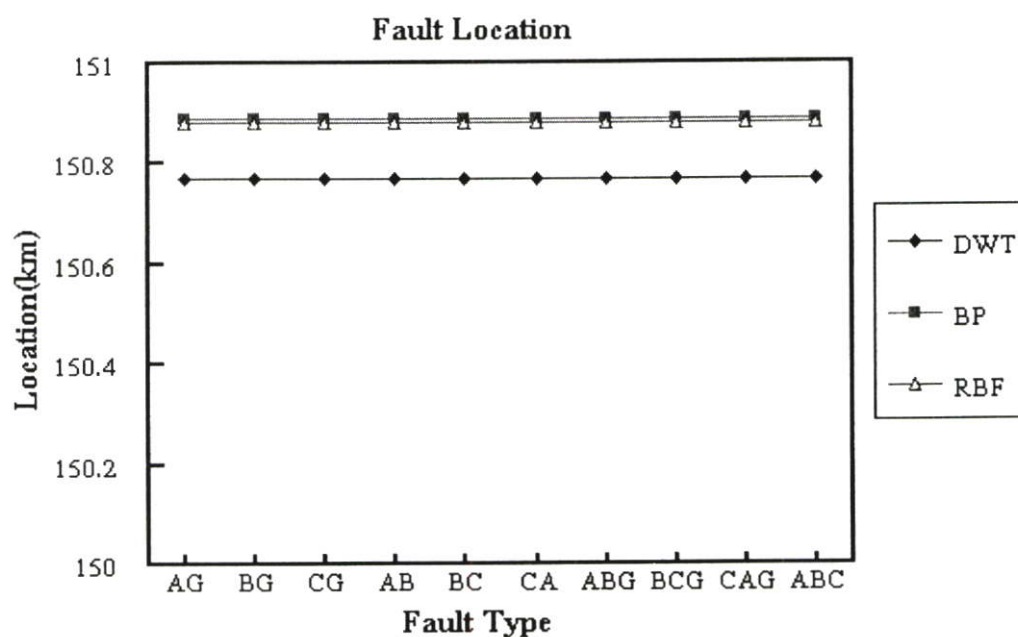
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AG	AG	
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AG	AG	AG
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BG	BG	BG
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BG	BG	
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CG	CG	CG
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CG	CG	CG
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CG	CG	CG
AB	120	1	1		150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AB	AB	AB
	210	1	1		150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AB	AB	
	330	1	1		150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AB		AB
BC	120	1	1		150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BC	BC	BC
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BC	BC	
	330	1	1		150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CA	CA	CA
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CA	CA	CA
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CA	CA	
ABG	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BCG	BCG	
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.15 (ต่อ)

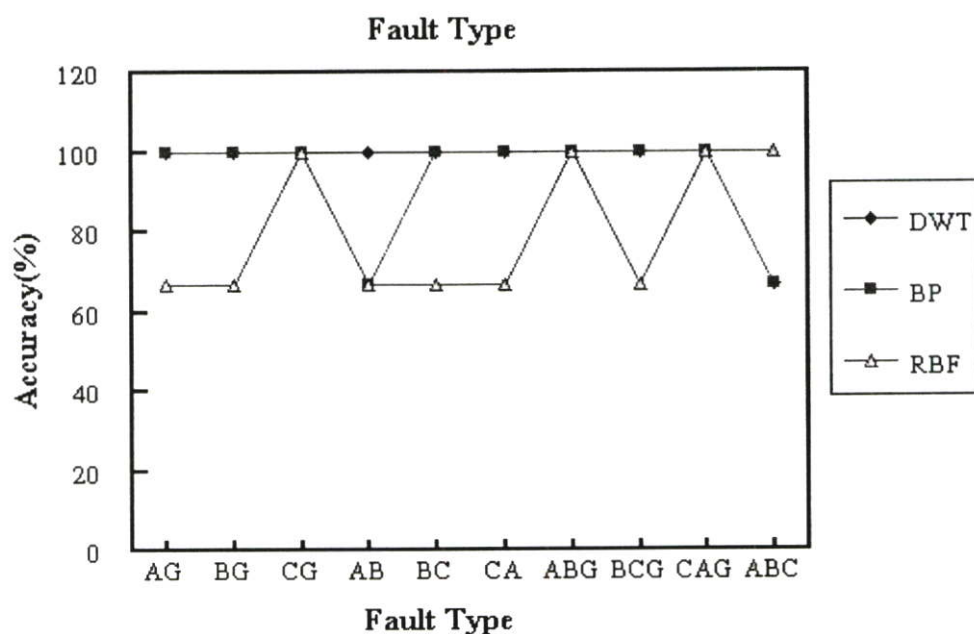
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000			ABC
	210	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.43 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 150.88 กิโลเมตร (80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.44 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 150.88 กิโลเมตร (80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.45 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 150.88 กิโลเมตร (80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.15 และรูปที่ 6.43-6.45 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 25 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 83.33%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยและ การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 150.88 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.44 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 150.771 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.109 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.44 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 150.8878 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0078 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.44 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 150.88 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

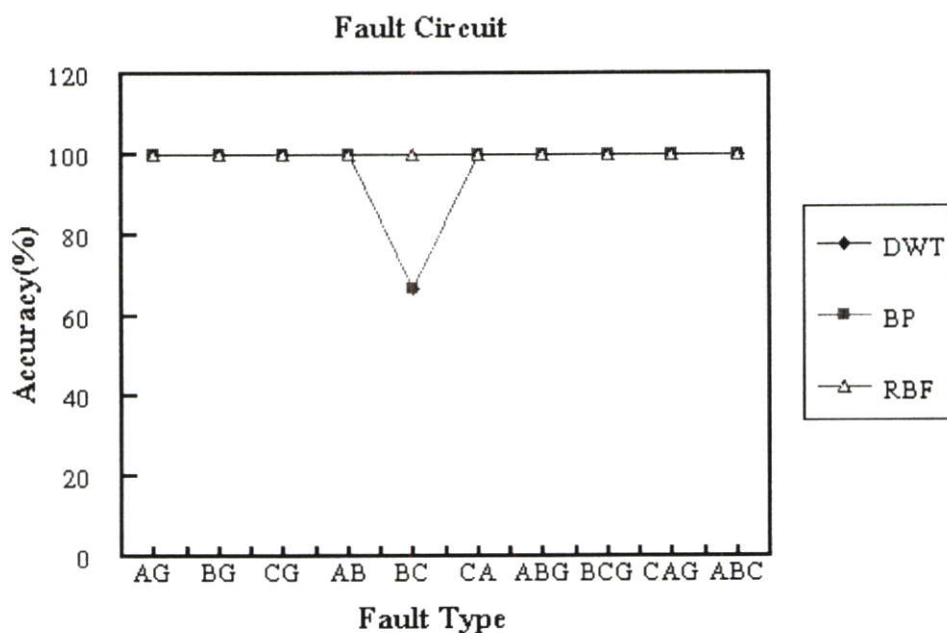
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.16 แสดงผลการวิเคราะห์หัตถ์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 150.88 กิโลเมตร  
(80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 2

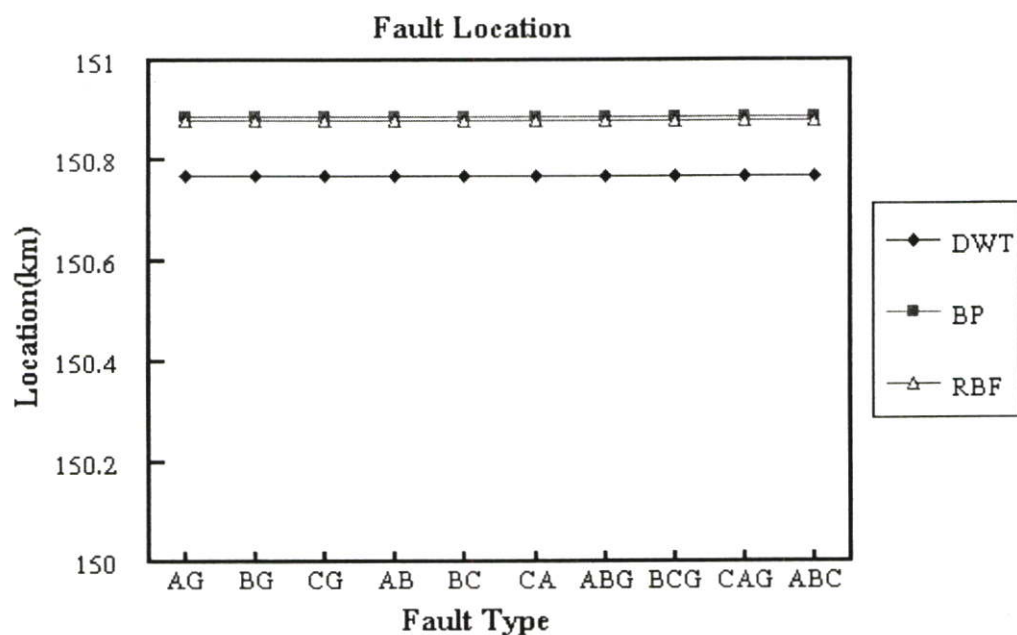
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AG	AG	
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AG	AG	AG
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BG	BG	BG
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BG	BG	
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CG	CG	CG
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CG	CG	CG
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AB	AB	AB
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AB	AB	
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	AB		AB
BC	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BC	BC	BC
	210			2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BC	BC	
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CA	CA	CA
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CA	CA	CA
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BCG	BCG	
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.16 (ต่อ)

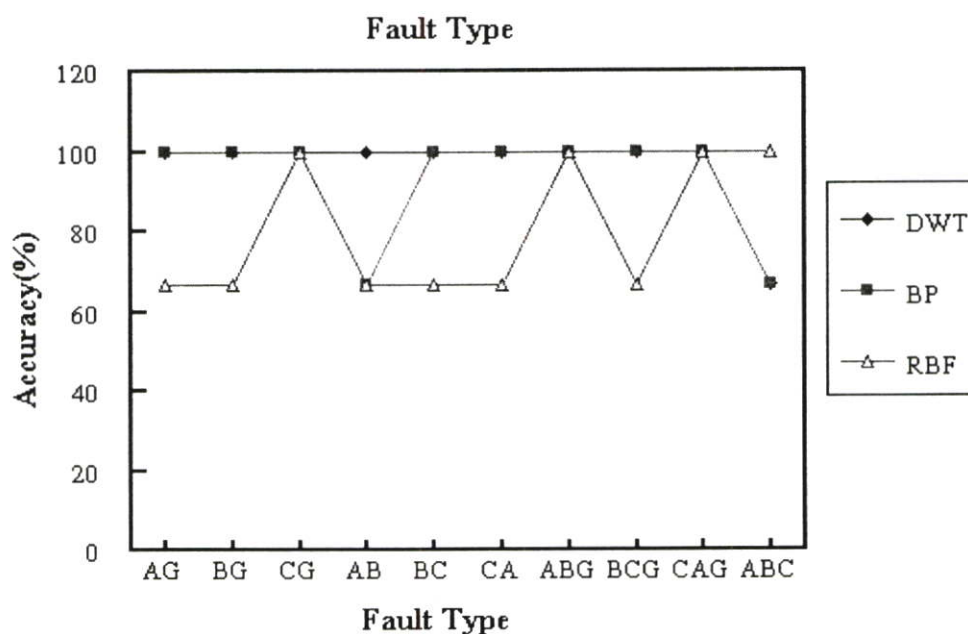
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000			ABC
	210	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	2	2	2	150.771	-0.109	150.8878	0.0078	150.88	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.46 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 150.88 กิโลเมตร (80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.47 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 150.88 กิโลเมตร (80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.48 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 150.88 กิโลเมตร (80% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.16 และรูปที่ 6.46-6.48 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 29 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 96.67%)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 29 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 96.67%)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้สูงสุดคือ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 150.88 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.47 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 150.771 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.109 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.47 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 150.8878 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.0078 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.47 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 150.88 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

### การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟสี่เหลี่ยมแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟสี่เหลี่ยมแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟสี่เหลี่ยมแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วน ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

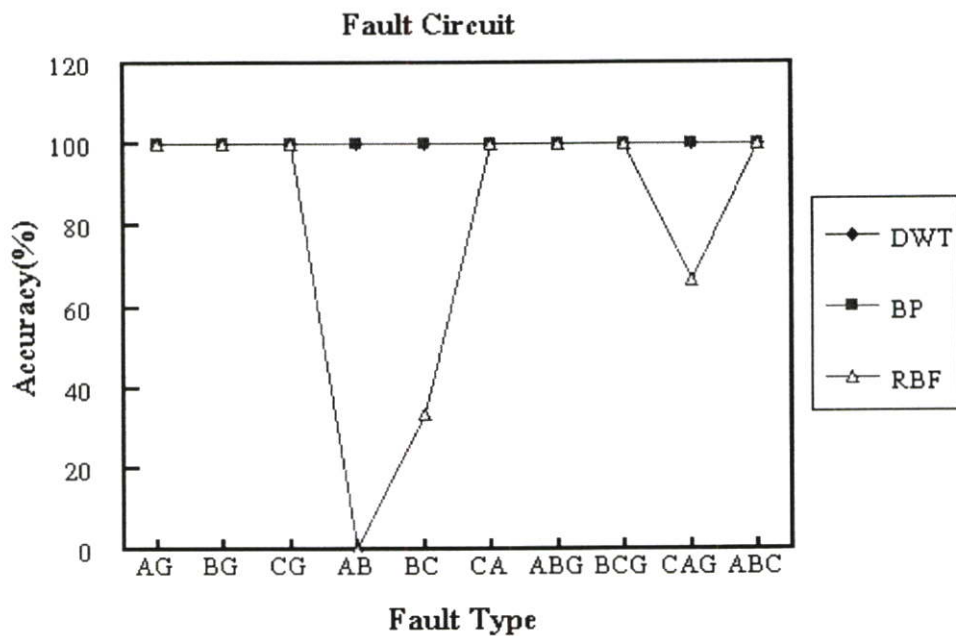
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟสี่เหลี่ยมแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.17 แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ เมื่อเกิดพอลต์ที่ตำแหน่ง 169.74 กิโลเมตร  
(90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดพอลต์วงจรที่ 1

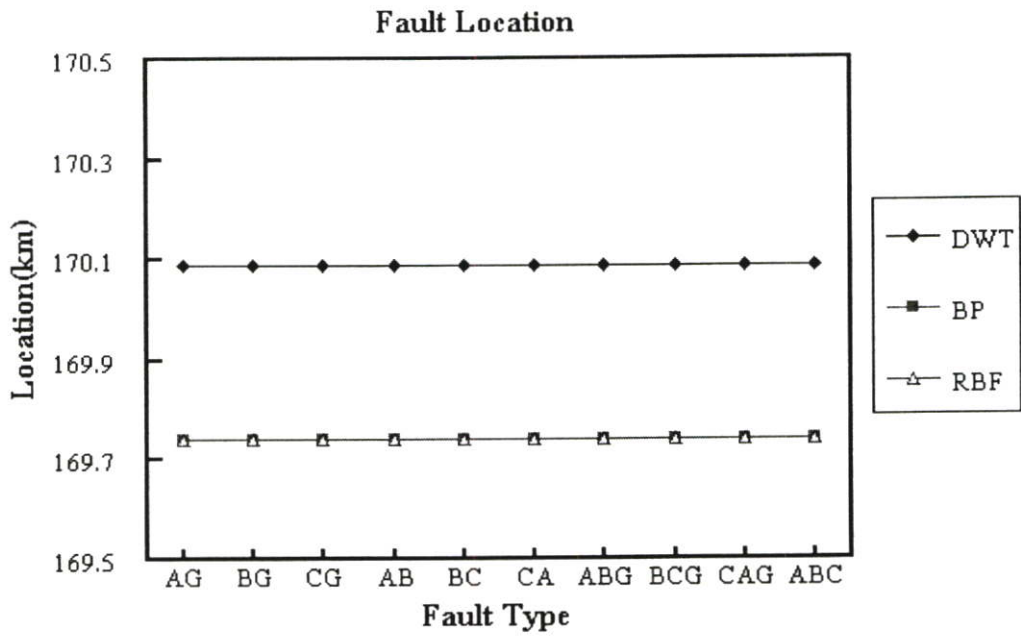
ประเภทพอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดพอลต์			ตำแหน่งที่เกิดพอลต์						ประเภทพอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AG	AG	BCG
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AG	AG	AG
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AG	AG	AG
BG	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BG	BG	BG
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BG	BG	BCG
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BG	BG	BG
CG	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CG	CG	CG
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CG	CG	CG
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CG	CG	CG
AB	120	1	1		170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AB	AB	AB
	210	1	1		170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AB	AB	BCG
	330	1	1		170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AB	BCG	AB
BC	120	1	1		170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BC	BC	BC
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BC	BC	BCG
	330	1	1		170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BC	BC	BC
CA	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CA	CA	CA
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CA	CA	CA
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CA	CA	BCG
ABG	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BCG	BCG	BCG
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.17 (ต่อ)

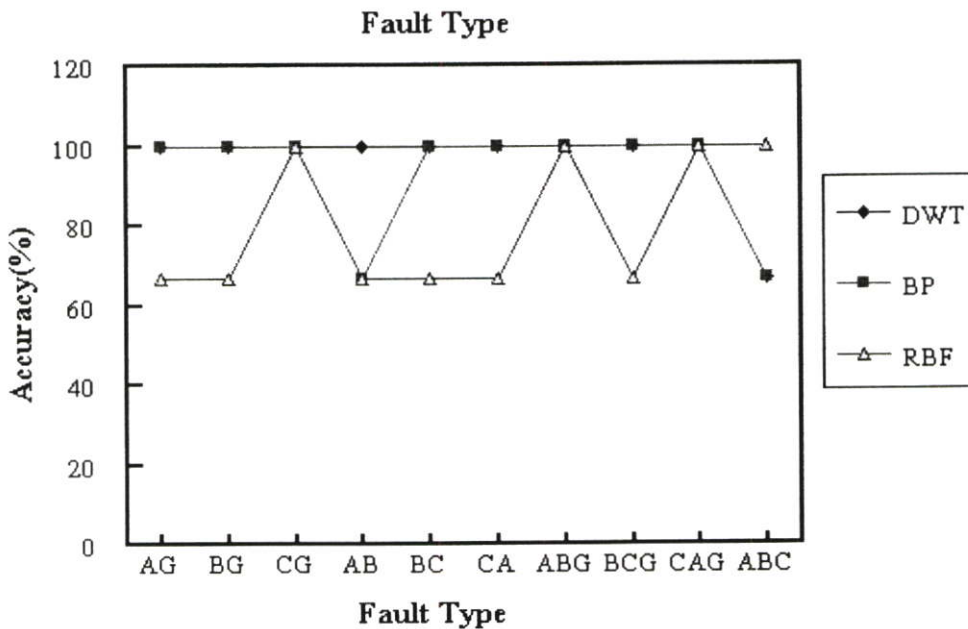
ประเภท ฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CAG	CAG	CAG
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CAG	CAG	CAG
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CAG	CAG	CAG
ABC	120	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABC	ABC	ABC
	210	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABC	ABC	ABC
	330	1	1	1	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABC	ABC	ABC



รูปที่ 6.49 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 169.74 กิโลเมตร (90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.50 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 169.74 กิโลเมตร (90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



รูปที่ 6.51 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 169.74 กิโลเมตร (90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.17 และรูปที่ 6.49-6.51 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 24 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 80%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยและการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ 100%

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 169.74 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.50 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 170.089 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.349 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.50 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 169.7392 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0008 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.50 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 169.74 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

## การระบุประเภทของฟอลต์

1. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

2. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

3. การแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

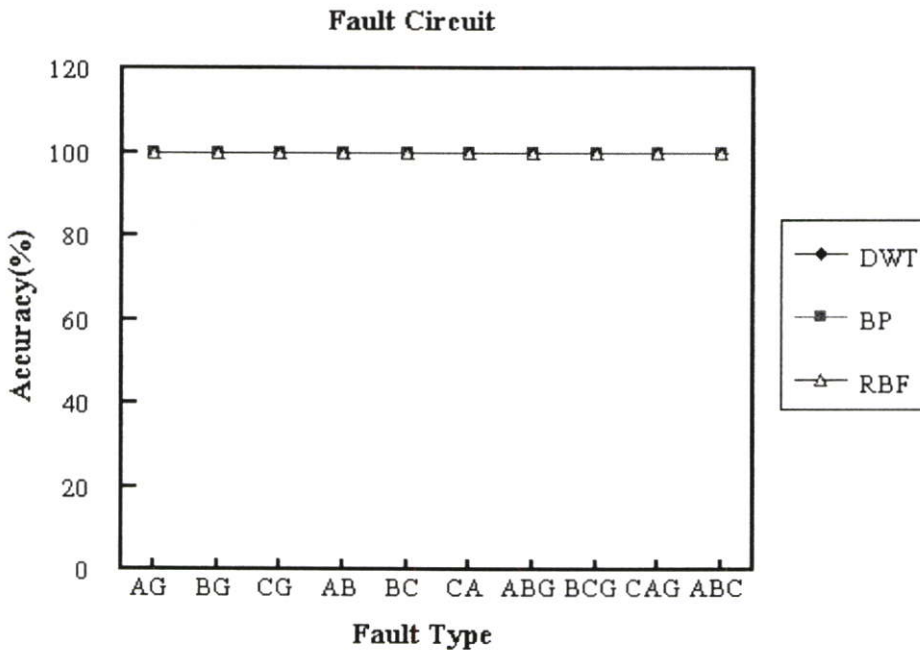
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

ตารางที่ 6.18 แสดงผลการวิเคราะห์หัตถ์สัญญาณฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ตำแหน่ง 169.74 กิโลเมตร  
(90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

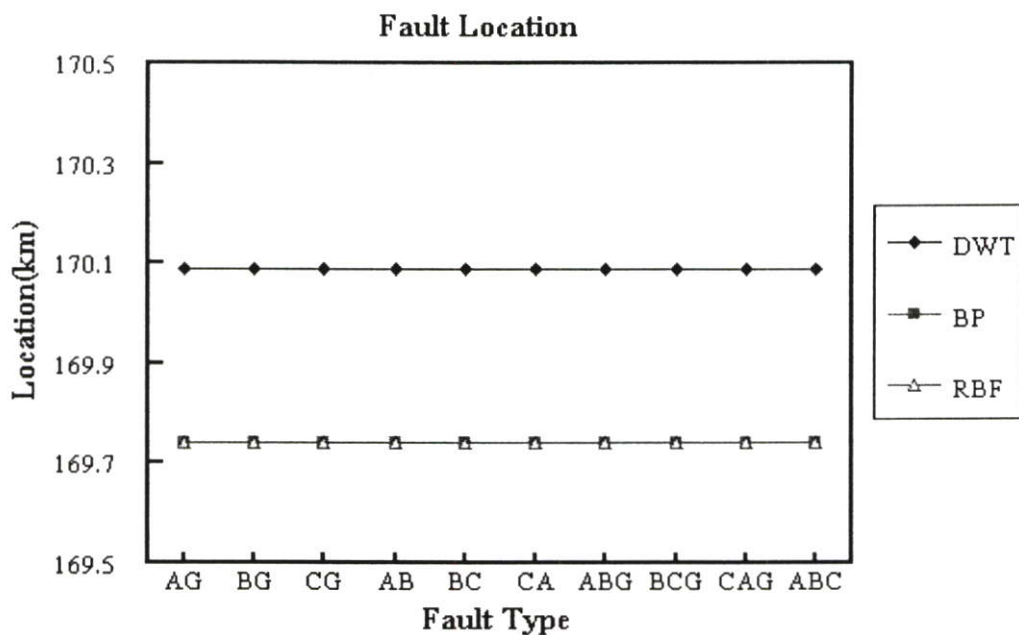
ประเภทฟอลต์	มุม (องศา)	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์		
		DWT	DWT&ANN		DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
					จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
AG	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AG	AG	
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AG	AG	AG
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AG	AG	AG
BG	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BG	BG	BG
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BG	BG	
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BG	BG	BG
CG	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CG	CG	CG
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CG	CG	CG
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CG	CG	CG
AB	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AB	AB	AB
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AB	AB	
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	AB		AB
BC	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BC	BC	BC
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BC	BC	
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BC	BC	BC
CA	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CA	CA	CA
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CA	CA	CA
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CA	CA	
ABG	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABG	ABG	ABG
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABG	ABG	ABG
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABG	ABG	ABG
BCG	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BCG	BCG	BCG
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BCG	BCG	
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	BCG	BCG	BCG

ตารางที่ 6.18 (ต่อ)

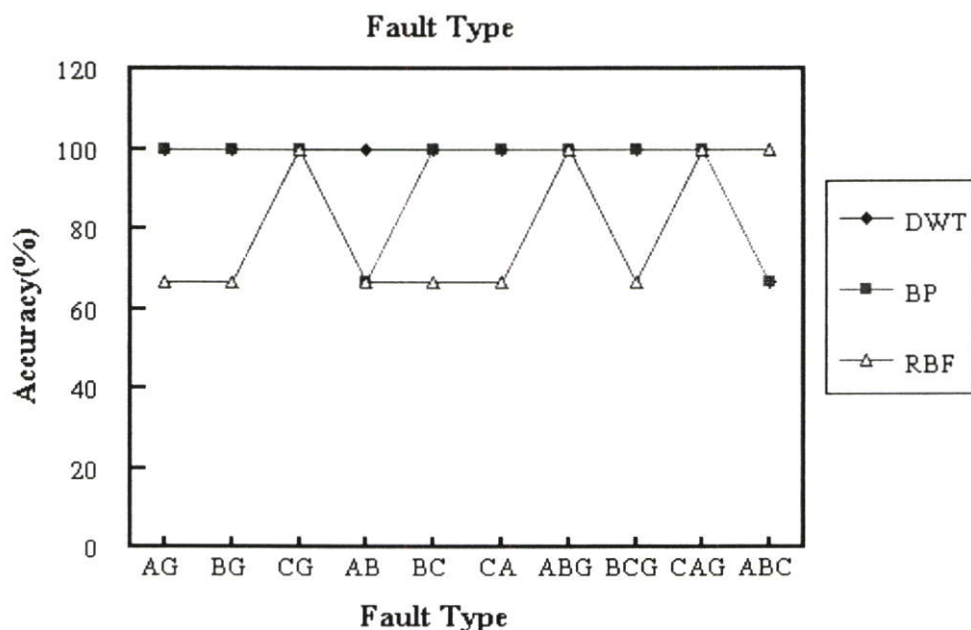
ประเภท ฟอลต์	ประ เภท ฟอลต์	วงจรที่เกิดฟอลต์			ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์						ประเภทฟอลต์			
		มุม (องศา)	DWT&ANN			DWT		DWT&ANN				DWT	DWT&ANN	
			DWT	BP	RBF	กระแส		BP		RBF			BP	RBF
						จำนวน	Error	จำนวน	Error	จำนวน	Error			
CAG	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CAG	CAG	CAG	
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CAG	CAG	CAG	
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	CAG	CAG	CAG	
ABC	120	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000			ABC	
	210	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABC	ABC	ABC	
	330	2	2	2	170.089	0.349	169.7392	-0.0008	169.74	0.000	ABC	ABC	ABC	



รูปที่ 6.52 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 169.74 กิโลเมตร (90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.53 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากการคำนวณ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 169.74 กิโลเมตร (90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2



รูปที่ 6.54 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 169.74 กิโลเมตร (90% ของความยาวสายส่ง 188.6 กิโลเมตร) กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.18 และรูปที่ 6.52-6.54 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้อง 30 ตัวอย่าง (หรือถูกต้อง 100%)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ค่าความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เท่ากัน

### การหาตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 169.74 กิโลเมตรวัดจากบัส MM3)

1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.53 ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 170.089 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0.349 กิโลเมตร)
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.53 ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 169.7392 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน -0.0008 กิโลเมตร)
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีสามารถหาตำแหน่งฟอลต์โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 (ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงสุด) จากรูปที่ 6.53 ระยะทางเฉลี่ยต่ำสุดที่คำนวณได้คือ 169.74 กิโลเมตร (คลาดเคลื่อน 0 กิโลเมตร)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์โดยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวให้ค่าผิดพลาดสูงสุด

### การระบุประเภทของฟอลต์

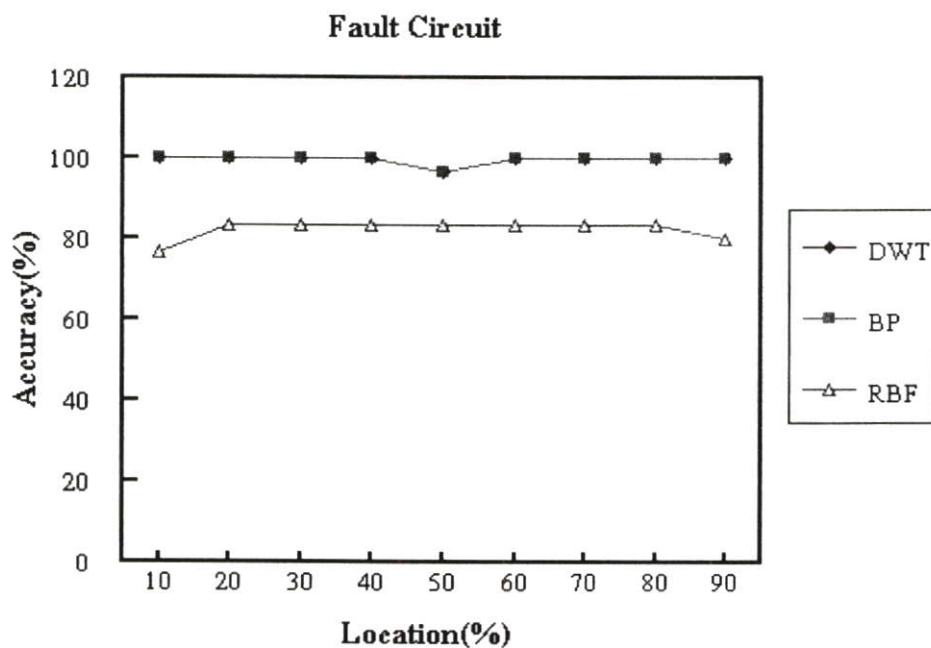
1. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วนฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%
2. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%, ส่วน

ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%

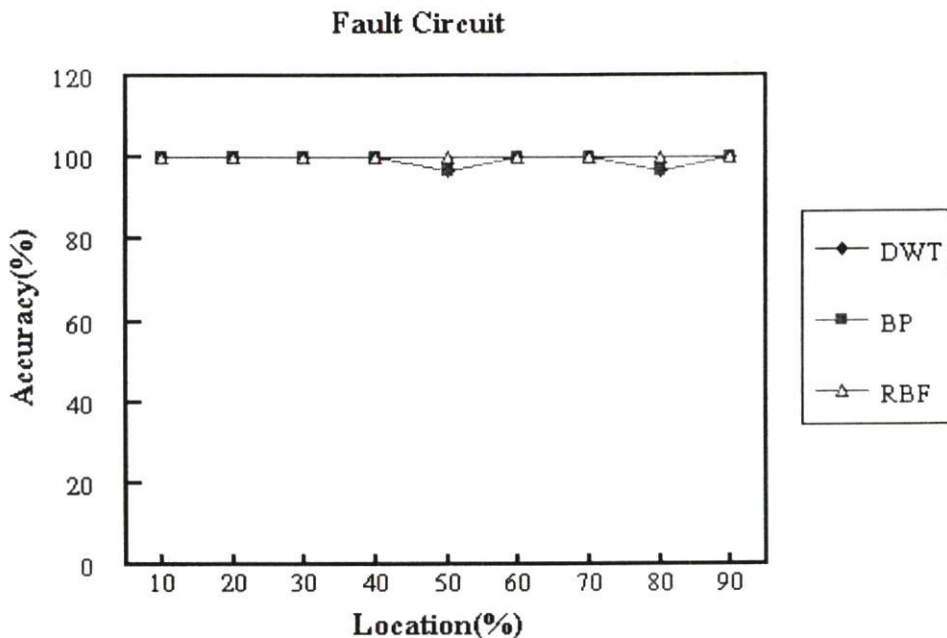
3. การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรามีสามารถระบุประเภทของฟอลต์เฟสเดียวลงดิน (AG, BG, CG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 77.78%, ส่วน ฟอลต์ระหว่างเฟส (AB, BC, CA) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 66.67%, ส่วน ฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (ABG, BCG, CAG) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 88.89% และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100%

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยสามารถระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ได้ถูกต้องสูงที่สุด

### 6.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

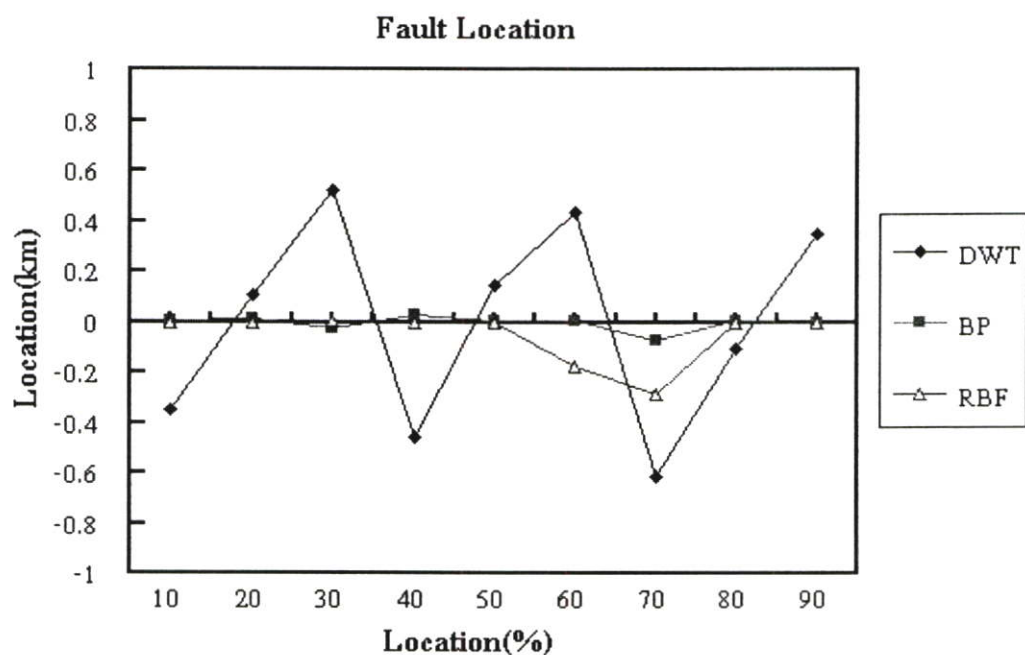


รูปที่ 6.55 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ในแต่ละระยะทาง  
ในกรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

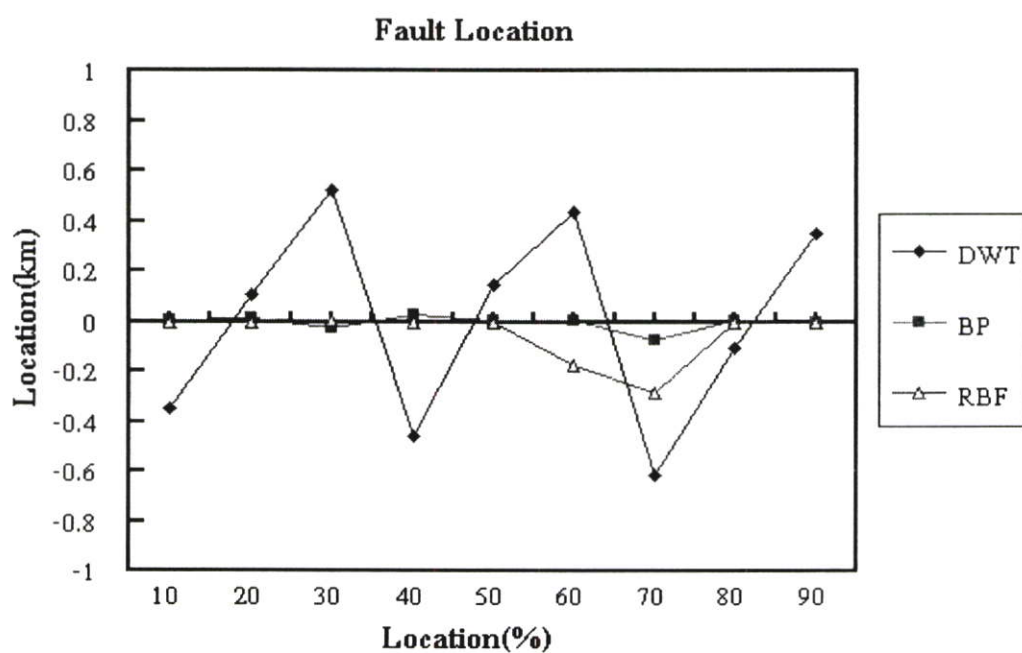


รูปที่ 6.56 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ในแต่ละระยะทาง  
ในกรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนของตัวอย่างความถูกต้องหรือเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยและการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับมีค่าเท่ากันเนื่องจากได้ใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์เป็นชุดเดียวกันแล้วยังรวมกับคุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับที่มีคุณสมบัติในการแบ่งประเภทได้ดี ในส่วนของการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยวิเคราะห์นั้นไม่สามารถให้ความถูกต้องได้มากกว่าการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ดเพียงอย่างเดียวก็เพราะว่าเอาต์พุตของโครงข่ายให้คำตอบเป็น 1 กับ 0 ("ใช่" หรือ "ไม่ใช่") ดังนั้นเมื่ออิทธิพลไม่ถูกต้องคำตอบจึงออกมาผิด

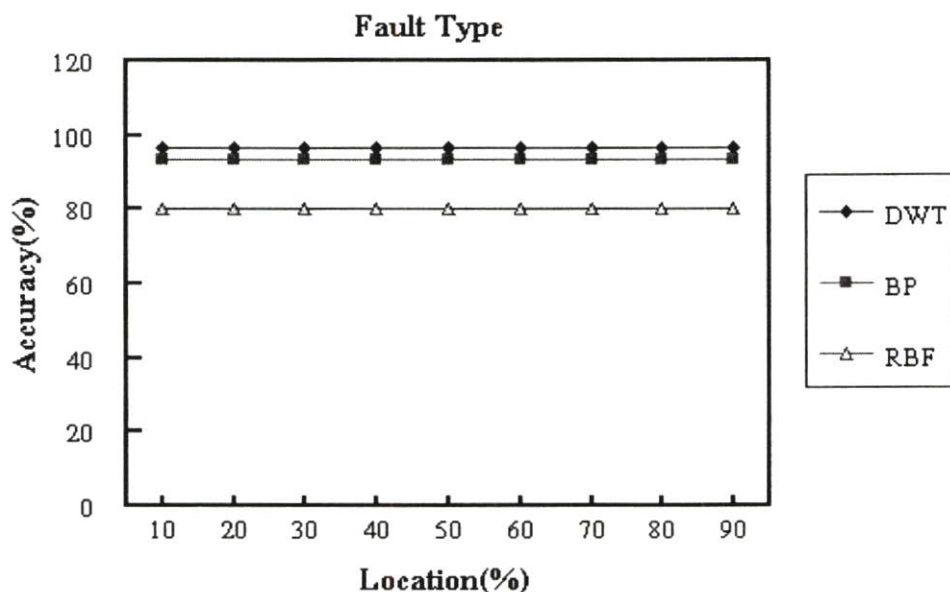


รูปที่ 6.57 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในแต่ละระยะทาง  
ในกรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1

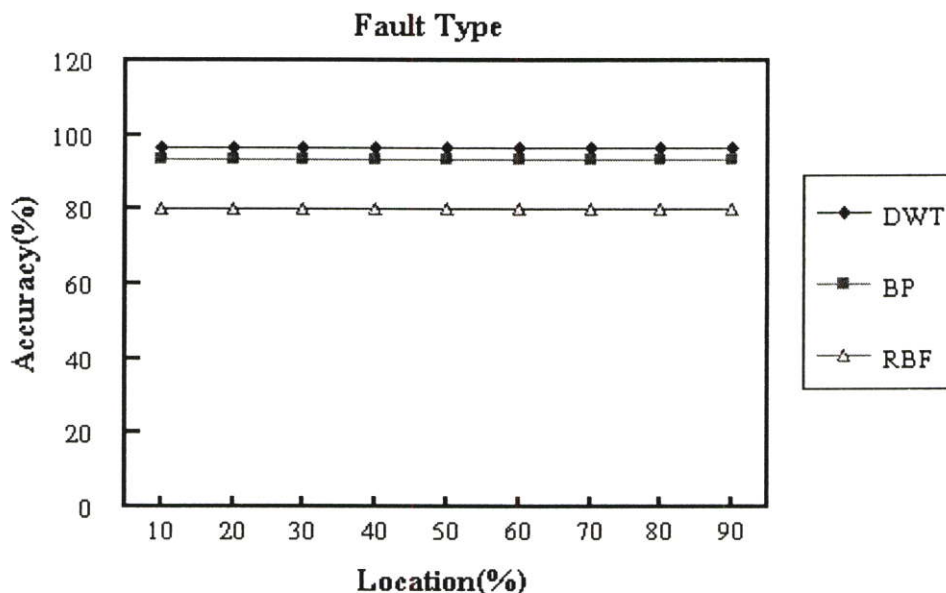


รูปที่ 6.58 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งฟอลต์ในแต่ละระยะทาง  
ในกรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าผิดพลาดสูงสุดและการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะให้ค่าผิดพลาดต่ำสุด จะสังเกตได้ว่าการกำหนดตำแหน่งฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าผิดพลาดสูงกว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมไม่นำความเร็วคลื่นเดินทางมาเป็นตัวแปรอินพุตในการฝึกสอน หรืออาจจะสรุปได้ว่าการนำเวลาที่ตรวจจับได้ในสเกลที่ 1 มาเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพียงอย่างเดียวจึงทำให้กระบวนการในการวิเคราะห์ไม่คำนึงถึงผลกระทบอื่น ๆ จึงทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้มีค่าต่ำ



รูปที่ 6.59 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละระยะทาง  
ในกรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 1



**รูปที่ 6.60** แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุประเภทของฟอลต์ในแต่ละระยะทาง  
ในกรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการระบุประเภทของฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยให้ค่าความถูกต้องสูงสุดรองลงมาก็คือการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีให้ค่าความถูกต้องต่ำที่สุด เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยนั้นได้มีการนำเอาค่าความถี่สูงที่เกิดขึ้นก่อนการเกิดฟอลต์มาเปรียบเทียบกับวิธีจึงทำให้ผลที่ได้ดีกว่าอีก 2 วิธี

## บทที่ 7

# บทสรุป

จากการศึกษารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์บนสายส่งวงจรรูปแบบ 2 บัส โดยการใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับและโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี สามารถสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอมาดังต่อไปนี้

1. ทำการศึกษาสัญญาณพอลต์โดยได้ทำการจำลองมาจากโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งอาศัยสายส่งวงจรระหว่างโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (MM-3) ถึงสถานีไฟฟ้าเชียงราย (CR) เป็นแบบสายส่งที่ใช้ในการศึกษา และทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาลักษณะของพอลต์ในหลายรูปแบบเป็นจำนวน 2160 ตัวอย่าง ที่อัตราการสุ่ม 200 kHz

2. รูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นจะอาศัยหลักการในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นในขณะเกิดพอลต์ ซึ่งจะทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยใช้เวฟเล็ดแม่ชนิด Daubechies4 (db4) โดยทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเตล หรือช่วงความถี่ดังต่อไปนี้

- สเตลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz
- สเตลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz
- สเตลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz
- สเตลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz
- สเตลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-3.125 kHz

3. ทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวในการตัดสินใจในการระบุวงจรที่เกิดพอลต์, การหาตำแหน่งพอลต์ และการระบุประเภทของพอลต์นั้น โดยได้นำเอาค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงของกระแสพอลต์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดพอลต์ในสเตลที่ 1-5 มาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการวิเคราะห์

4. ทำการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ และการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีในการตัดสินใจในการระบุวงจรที่เกิดพอลต์, การหาตำแหน่งพอลต์ และการระบุประเภทของพอลต์ โดยได้นำเอาค่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงของกระแสพอลต์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดพอลต์ ในสเตลที่ 1 เพียงอย่างเดียวมาใช้เป็นข้อมูลฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีข้อมูลทั้งหมด 2160 ตัวอย่าง แบ่งเป็น ชุดข้อมูลฝึกสอน(Training pattern)

1080 ชุด, ชุดข้อมูลทดสอบ (Test pattern) 540 ชุด และชุดที่ใช้ในการทดสอบ (Unseen pattern) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับชุดฝึกสอนและทดสอบจำนวน 540 ชุด

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้ทั้ง 3 วิธีมีค่าแตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะการนำโครงข่ายประสาทเทียมมารวมวิเคราะห์ในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์และการระบุประเภทของฟอลต์จะให้ค่าผิดพลาดที่สูงกว่าการใช้เวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวเนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มีการนำเอาข้อมูลก่อนการเกิดฟอลต์นำมาเปรียบเทียบกับ แต่ในส่วนของการทำงานด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพียงอย่างเดียวนั้นจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนานประมาณ 1.36 วินาที ในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกัน โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 0.1 วินาที และในส่วนของการทำงานด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกัน โครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 0.1 วินาที ซึ่งทั้ง 2 วิธีมีแนวโน้มที่จะใช้ในทางปฏิบัติได้

## 5. สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

5.1 พิจารณาการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์โดยพิจารณาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณฟอลต์ เช่น สัญญาณการสวิตชิงแบบต่าง ๆ , สัญญาณหลอกที่เกิดจากฟ้าผ่าและผลกระทบจากสภาวะการแกว่งของพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ (Power oscillation) เป็นต้น

5.2 พัฒนาการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดโดยการลดกระบวนการของขั้นตอนการวิเคราะห์ให้สั้นลงเพื่อทำให้เวลาในการวิเคราะห์เร็วขึ้นแต่ความถูกต้องต้องไม่น้อยกว่าเดิม

5.3 ปรับปรุงโครงข่ายประสาทเทียมโดยการปรับเปลี่ยนจำนวนข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตให้มีความสัมพันธ์กันเพื่อลดเวลาในการฝึกสอนและลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] William. D. Stevenson Jr., Elements of Power Analysis, Fourth Edition. McGraw – Hill , Inc. Singapore, 1982
- [3] Driesen, J., Van Craenenbroeck T., Reekmans R. and Van Dommelen D., "Analysing time – varying power system harmonics using wavelet transform." , Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Quality Measurement : The Indispensable Bridge between Theory and Reality., vol. 1, June 4 – 6 , 1966 ., pp. 474 – 479.
- [4] Lazzaroni N., Ragaini E., "Gabor – like transforms for transient analysis in electrical systems." Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference , Quality Measurements : The Indispensable Bridge between Theory and Reality., vol. 2, June 4 – 6 , 1966 ., pp. 885 – 890.
- [5] 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.
- [6] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, รศ.ดร.มนัส สัจวรศิลป์, **คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์**, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ Info press, เมษายน 2543.
- [7] Pham V.L. and Wong K.P., "Wavelet – transform – based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms." , Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, Issue: 3 , May 1999 , pp. 249 – 254.
- [8] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean – Michel Poggi, **Wavelet Toolbox User's Guide Version 1.** , First Printing, Math Works, Inc. March 1996.
- [9] 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.
- [10] Santoso S., Power 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.

- [11] C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo, **Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms.** , Prentice- Hall, Inc, New Jersey, 1998.
- [12] 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
- [13] Santoso S., Powers E.J., Grady W.M. and Hofmann P., "Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis ," IEEE Trans. on Power Delivery , Vol.11, No.2, April 1996. pp. 924 – 930.
- [14] Fausett Laurene. **Fundamentals of Neural Networks.** Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall International, Inc. 1994.
- [15] อรรถพล ง่าพิทักษ์กุล. "การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่ง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [16] H. Demuth and M. Beale. **Neural Network Toolbox User's Guide.** The Math Workh, Inc. March 200.
- [17] Laszlo Prikler and Hans Kr. Hodalen. **ATPDraw for Windows 3.1/95/NT version 1.0 User's Manual.** Release 1.0.1 Nov 1998.
- [18] Hermann W.Dommel. **Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book.** University of British Columbia, Vancouver Canada. August 1986.
- [19] ระบบสายส่ง 500 kV. ปี 2000. ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [20] 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.
- [21] พงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง. "การวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่งด้วยการแปลงเวฟเล็ต." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [22] Bo Z.Q., Weller G., Jiang F. and Yang Q.X., "Application of GPS based fault location scheme for distribution system.", Proc. IEEE International Conference on Power System Technology, vol. 1, 1998, pp. 53-57.
- [23] C.M. Bishop. **Neural Networks for Pattern Recognition.** Oxford :Oxford University Press. 1995.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฐิติพงษ์ นิยมศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	18 กุมภาพันธ์ 2523
ที่อยู่	43/25 ซ.เจริญทรัพย์ ถ.พัฒนาท้องถิ่น ต.วิจิตร อ.เมือง จ.ภูเก็ต 83000 โทร.0-1831-7741
ประวัติการศึกษา	2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมในระบบไฟฟ้ากำลัง
ผลงานทางวิชาการ	1.) ฐิติพงษ์ นิยมศักดิ์, ศุภี บรรจงจิตร, "การระบุตำแหน่งฟอลต์ในสายส่งแรงจูงโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียม" "การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 (EECON28)"