



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตและปัญญาประดิษฐ์สำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ใน
ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent
for Fault Diagnosis in Distribution Systems

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เสาพิทักษ์กุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาแสน

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

TK

1001

@ 357 ก

เลขหมู่.....

131071

เลขทะเบียน.....

2.2. ๒๒๑. 2557

b. 12603934

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในสงวนลิขสิทธิ์สงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตและปัญญาประดิษฐ์สำหรับวิเคราะห์ฟอลต์
ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 475,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นสำหรับระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนในสายส่งใต้ดิน การจำลองรูปแบบฟอลต์ผ่านโปรแกรม ATP/EMTP โดยใช้แบบจำลองสายส่งที่ขึ้นอยู่กับความถี่ เวฟเล็ตแม่ชนิด daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงจากสัญญาณกระแสฟอลต์ ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดการแปลงเวฟเล็ตของลูกคลื่นกระแสหลังเกิดฟอลต์เฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ถูกใช้เป็นอินพุตสำหรับรูปแบบฝึกสอน กรณีศึกษาที่หลากหลายจากระบบจำหน่ายใต้ดินประเทศไทยได้รับการตรวจสอบดั่งนั้นแนวความคิดสามารถนำมาใช้งาน ผลสรุปแสดงให้เห็นว่าแนวความคิดที่นำเสนอสามารถระบุประเภทฟอลต์เป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ : การแปลงเวฟเล็ต ปัญญาประดิษฐ์ วิเคราะห์ฟอลต์ ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent for Fault Diagnosis in Distribution Systems

Researcher: Asst. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul and
Asst. Prof. Dr. Chaiyan Jettanasen

Faculty: Engineering Department: Electrical Engineering

ABSTRACT

This research proposes an algorithm based on a combination of discrete wavelet transform (DWT) and probabilistic neural network (PNN) for classifying fault types on underground cable. Fault simulations are carried out using ATP/EMTP program, with a frequency-dependent transmission line model. The mother wavelet daubechies4 (db4) is employed to decompose high frequency component from these signals. The maximum coefficients of DWT of phase A, B, C and zero sequence for post-fault current waveforms are used as an input for the training pattern. Various cases studies based on Thailand electricity distribution underground systems have been investigated so that the algorithm can be implemented. The results show that the proposed algorithm is capable of performing the fault classification with satisfactory accuracy.

Keywords : Discrete Wavelet Transform, Artificial Intelligent, Fault Diagnosis, Distribution Systems

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจากบุคคลและเจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณสิโรจน์ ใจขาน จากกรฟไฟฟ้านครหลวงประเทศไทย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการศึกษาและวิจัยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บุคคลที่มีความสำคัญยิ่งได้แก่ คุณพ่อ และคุณแม่ ผู้ซึ่งเป็นบิดาและมารดาที่ได้มอบการอบรมสั่งสอนและสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนตั้งแต่อดีตจวบจนถึงปัจจุบัน รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ชีวิตและอบรมความรู้จนทำให้คณะวิจัยมีโอกาสได้เขียนโครงการวิจัยฉบับนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยยันต์ เจตนาแสน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง	5
2.1.1 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)	5
2.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต	7
2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT)	7
2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory)	7
2.2.1.2 การสเกล (Scaling)	8
2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting)	9
2.2.1.4 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ต	9
2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT)	10
2.3 โครงข่ายประสาทเทียม	11
2.3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	12
2.3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights)	12
2.3.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)	13
2.3.4 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม	14
2.3.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น	14
บทที่ 3 การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์	17
3.1 การจำลองฟอลต์	17
3.1.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์	17
3.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต	19
3.2.1 การตรวจจับ	19
3.3 การจำแนกประเภทฟอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	25
4.1 รูปแบบการนำเสนอ	25
4.1.1 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง	25
4.2 ผลการทดลอง	26
4.2.1 กรณีเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)	26
4.2.2 กรณีเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 2 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)	27
4.2.3 กรณีเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 2.9 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)	28
4.2.4 กรณีเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 3.5 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)	30
4.2.5 กรณีเกิดพอลต์ที่ระยะทาง 4.8 กิโลเมตรของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)	31
บทที่ 5 บทสรุป	33
เอกสารอ้างอิง	36
ภาคผนวก	38
ภาคผนวก ก	38
ภาคผนวก ข	40
ประวัติผู้จัดทำโครงการวิจัย	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบ	20
3.2 แสดงค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น.....	23
3.3 แสดงผลสรุปที่จากการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน.....	23
5.1 สรุปความถูกต้องในการระบุชนิดพอลต์.....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการติดตั้งและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay)	5
2.2 แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง	6
2.3 แสดงการวิเคราะห์แรงดันและกระแสด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสภาวะที่เกิดฟอลต์	6
2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet	8
2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์	8
2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด	9
2.7 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ด	9
2.8 แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด	10
2.9 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด	10
2.10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม	11
2.11 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น	15
3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง.....	17
3.2 ขนาดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง.....	17
3.3 แสดงภาพคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่ฝั่ง Sending.....	18
3.4 แสดงภาพคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่ฝั่ง Receiving.....	18
3.5 ภาพคลื่นเวฟเล็ดยกกำลังสองด้านส่ง (Sending end).....	20
3.6 ภาพคลื่นเวฟเล็ดยกกำลังสองด้านรับ (Receiving end).....	21
3.7 แบบจำลองอินพุทของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น	22
3.8 แสดงแผนภาพการระบุประเภทฟอลต์ด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	24
4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยเมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร	26
4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยเมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 2 กิโลเมตร	27
4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 2.9 กิโลเมตร	28
4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3.5 กิโลเมตร	30
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 4.8 กิโลเมตร	31
5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละมุมเริ่มเกิดฟอลต์.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบัน ความต้องการทางด้านกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสูงในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศเข้าด้วยกันในลักษณะเป็นโครงข่าย (Network) ทำให้มีการขยายตัวของระบบสายส่งมากขึ้นตาม เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีมากขึ้นตามลำดับ โดยที่สายส่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจาก โรงไฟฟ้า (Power plant) ไปยังผู้ใช้โดยผ่านส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สถานีไฟฟ้า (Substation) เขตชุมชน เป็นต้น

จากเหตุผลข้างต้นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก ในปัจจุบัน ประเทศไทยแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ ระบบสายส่งอากาศ (Overhead line), ระบบสายส่งใต้ดิน (Underground cable) และ ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง (HVDC) ซึ่งสายส่งในแต่ละแบบนี้จะมีการใช้งานในพื้นที่ที่แตกต่างกันออกไป สายส่งอากาศ (Overhead line) นั้นมักจะพบเห็นอยู่ทั่วไปซึ่งเป็นระบบสายส่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพราะสายส่งอากาศนั้นมีการติดตั้งที่ง่าย และเสียค่าใช้จ่ายน้อยในการติดตั้ง จึงเป็นที่นิยม แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่บ้างคือ เป็นสายส่งที่มีความน่าเชื่อถือต่ำ อีกทั้งยังเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าแบบอื่น สายส่งอีกแบบที่มีการใช้ในประเทศไทยคือ สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง (HVDC) ด้วยเหตุที่เป็นสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงจึงทำให้มีการสูญเสียพลังงาน (Power loss) น้อย อีกทั้งยังสามารถใช้เชื่อมต่อระหว่าง 2 พื้นที่ที่มีความถี่ของระบบไฟฟ้าแตกต่างกันได้ ดังนั้น สายส่งชนิดนี้จึงใช้เชื่อมระหว่างประเทศไทยและประเทศมาเลเซีย และสายส่งชนิดสุดท้ายคือ สายส่งเคเบิลใต้ดิน สายส่งชนิดนี้ใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั่วไป มีการติดตั้งที่ค่อนข้างลำบากกว่าสายส่งชนิดอื่นเนื่องจากต้องมีการวางสายไว้ใต้ดิน จึงมีการใช้งานสายส่งชนิดนี้ในบางพื้นที่เท่านั้น ปัจจุบันสายส่งใต้ดินได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะภายในกรุงเทพมหานครฯ มีการติดตั้งใช้งานสายส่งใต้ดินเพิ่มมากขึ้น เพราะสายส่งใต้ดินนั้นจะสิ้นเปลืองพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งสายน้อยกว่า และยังมีความน่าเชื่อถือในระบบที่สูงกว่าสายส่งอากาศอย่างมาก แต่เนื่องจากสายส่งชนิดนี้มีการฝังสายเคเบิลไว้ใต้ดิน จึงมีข้อเสียที่สำคัญคือ การบำรุงรักษาสายส่ง อีกทั้งมีการใช้งานในชุมชนจึงยากต่อการบำรุงรักษา จากเหตุผลดังกล่าวการบำรุงรักษาสายส่งเคเบิลใต้ดินจึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่ต้องมีความรวดเร็ว และความแม่นยำให้ได้มากที่สุด

ในอดีตที่ผ่านมา ระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ใช้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) เป็นตัวเฝ้ามองและมีการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ด้วยการแปลงฟูเรียร์ เพื่อนำมาใช้หาอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อเกิดฟอลต์จะทำให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นในขณะที่แรงดันไฟฟ้าลดต่ำลง ผลที่ตามมาคือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลงจากสภาวะปกติ จากหลักการนี้จะนำมาใช้ในการตรวจจับการเกิดฟอลต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำการลดลงของอิมพีแดนซ์มาเทียบเพื่อหาตำแหน่งฟอลต์ ส่วนการระบุประเภทของฟอลต์นั้นจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส หลักการทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วนั้นตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ความต้านทานของฟอลต์เป็นศูนย์ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก ทำให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยเฉพาะการระบุระยะทางที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงค่อนข้างมาก การระบุระยะทางที่คลาดเคลื่อนนี้ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการตรวจแต่ละครั้งเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลทางสถิติเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า รีเลย์แบบนี้จะมีข้อผิดพลาดที่สูงโดยเฉพาะการบอกระยะทางที่คลาดเคลื่อนจากระยะทางจริงมาก นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอื่นๆ อีกด้วย โดยในสมัยเริ่มแรกการตรวจหาเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์นั้นยังไม่ค่อยมีการพัฒนาเท่าที่ควร โดยมักเป็นการใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการตรวจจับฟอลต์มากกว่า ซึ่งมีหลักการในการวิเคราะห์ฟอลต์หลักๆ อยู่ 2 แบบด้วยกันคือ Terminal methods และ Tracing method โดยในแต่ละหลักการนั้นแยกออกเป็นหลายวิธี แต่ละวิธีแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ หลักการแรก (Terminal methods) เป็นการใชหลักการของวงจรบรีดจ์ (Bridge circuit) [1-2] เข้ามาช่วย โดยมีทั้งแบบใช้ความต้านทาน (Resistor) แบ่งเป็นแบบ one terminal และ two terminal [1] ซึ่งใช้โอห์มมิเตอร์ (Ohm meter) ในการตรวจวัด อีกหลักการหนึ่งใช้เป็นหลักการโดยใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitance ratio method) โดยใช้ตัวเก็บประจุในการต่อวงจรบรีดจ์เพื่อหาระยะทางที่วงจรเกิดฟอลต์โดยใช้บริดจ์ตัวเก็บประจุ (Capacitor bridge) เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัด

จากหลักการที่กล่าวมาเป็นรูปแบบของการตรวจหาฟอลต์แบบใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัด ซึ่งโดยปกติใช้ในการตรวจสอบสายส่งที่ยังไม่ได้มีการใช้งาน แต่ในความเป็นจริงเมื่อนำสายส่งต่อเข้าใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแล้ววิธีการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์เครื่องมือเช่นนี้เป็นไปได้ค่อนข้างยาก จึงได้มีการพัฒนาวิธีตรวจสอบเพื่อระบุตำแหน่งของฟอลต์โดยใช้หลักการเดิม [1] เข้ามาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น ในปี 1983 ได้มีการพยายามแก้ปัญหาดังที่ได้กล่าว โดยใช้ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (travelling wave theory)[3] ซึ่งเป็นหลักการที่ประยุกต์มาจากหลักการ Pulse reflection time method [1-2] โดยใช้วิธีการยิงคลื่นพลัสเข้าไปในระบบเพื่อดูลักษณะรูปแบบการสะท้อน หลักการนี้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสมการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของฟอลต์เพื่อเห็นถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้เพื่อบอกระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ทำให้มีการใช้ทฤษฎีของคลื่นเดินทางในการระบุตำแหน่งฟอลต์ทั้งแบบสองบัสและสามบัส [4-6] แต่วิธีคลื่นเดินทางต้องการอัตราส่วนสูงและมีปัญหาในข้อแตกต่างระหว่างคลื่นสะท้อนส่งกลับจากฟอลต์และจากปลายสายส่งที่ห่างไกล [7] จึงทำให้วิธีแก้ปัญหาลักษณะนี้กลายเป็นสิ่งที่ซับซ้อนเพราะว่าการจ่ายพลังงานจากที่ตั้งต่างๆ ของระบบไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในปี 1993 ได้มีการนำเสนอทฤษฎีคลื่นเดินทางเพื่อบอกระยะทางโดยใช้เวลาในการคำนวณแทน [8] ด้วยเหตุนี้เอง จึงได้มีการนำวิจัยที่กล่าวถึง หลักการตรวจจับและระบุชนิดของฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละงานวิจัยนั้นมีหลากหลายวิธีการ จากความสำคัญดังกล่าวทางคณะผู้จัดทำ จึงได้มีแนวคิดที่จะนำการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้เกิดการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้ากำลังแนวใหม่ขึ้นและนำมาวางแผนป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยต่อไปในอนาคต

กล่าวโดยสรุปโครงการวิจัยนี้เป็นการนำการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อศึกษาวิจัยในระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย โดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์คือ เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของฟอลต์โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงจะมีค่าสูงขึ้นและยังสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับปัญญาประดิษฐ์เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในหลายสเกลหรือหลายช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมาทำการประมวลผลโดยใช้หลักการ ปัญญาประดิษฐ์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อขยายขอบเขตงานวิจัยและเทคโนโลยีทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาแผนการป้องกันแบบใหม่สำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า
2. เพื่อทำการวิเคราะห์และตรวจจับสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยจะมีประโยชน์อย่างมากทางการออกแบบระบบป้องกัน
3. เพื่อระบุตำแหน่ง และรูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยจะทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้น
4. เพื่อระบุชนิดและตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะมีประโยชน์ในส่วนของ การซ่อมบำรุง ทำให้การซ่อมแซมแก้ไขเพื่อให้สามารถนำสายส่งกลับเข้าใช้งานอย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ขอบเขตของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา ขอบเขตของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขอบเขตของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา

ในโครงการวิจัยนี้ ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาคือ ระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินเท่านั้น ซึ่งเป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา

2. ขอบเขตของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

เพื่อให้ได้อัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง โดยประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้าน การแปลงเวฟเล็ตและปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งระบบจำหน่ายไฟฟ้างกล่าวเป็นระบบของประเทศไทยเอง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด พร้อมทั้งศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในทุก ๆ ด้าน
2. ทำการศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP
3. ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ที่แตกต่างกัน ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP แล้วนำสัญญาณฟอลต์มาพิจารณาหาข้อมูลในการวิเคราะห์ที่จำเป็นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป
4. ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เพื่อทำการพิจารณาข้อมูลที่ได้รวมถึงช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำวิธีที่ได้นำเสนอมาเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม โดยอาศัยผลงานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมทั้งวิเคราะห์และสรุปการเปรียบเทียบ
6. ทำรายงานสรุปผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือด้านข้อมูลต่างๆ จากพนักงานของการไฟฟ้า เพื่อนำมาเป็นส่วนประกอบในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ประโยชน์จากองค์ความรู้ใหม่ และประโยชน์ในด้านการพัฒนาระดับงานวิจัยของประเทศ ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากองค์ความรู้ใหม่

- 1) วิธีวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแนวใหม่ โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบความถี่สูงที่ได้จากสัญญาณฟอลต์แบบทรานเซียนต์ ซึ่งช่วยลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง ส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาลดลงตามไปด้วย สามารถทำให้การบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีความรวดเร็วมากขึ้น
- 2) สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตและปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ รวมไปถึงวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนผู้สนใจอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป

ประโยชน์ในด้านการพัฒนาระดับงานวิจัยของประเทศ

- 1) โครงการวิจัยนี้เป็นการรวมกันของวิทยาการด้านต่างๆ คือ กระบวนการประมวลสัญญาณ ทฤษฎีระบบป้องกัน และ วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง เข้าด้วยกัน ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกันของนักวิจัยในสาขาดังกล่าว ทั้งในด้านการแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็น นับเป็นการพัฒนาระดับงานวิจัยของประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

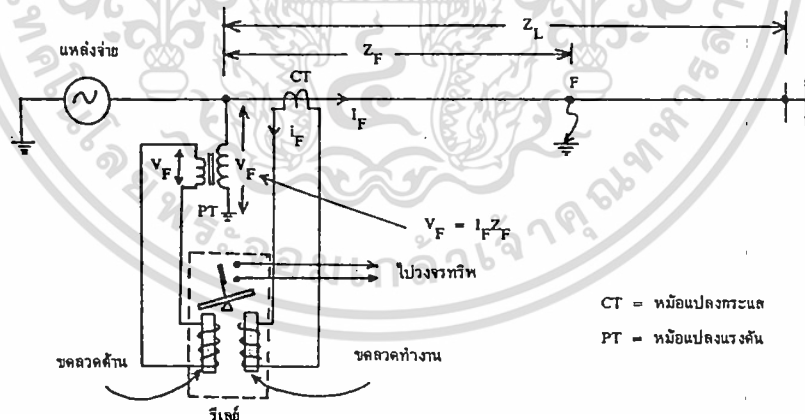
การมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยระบบการป้องกัน และอุปกรณ์ที่มาสนับสนุนเป็นจำนวนมาก ระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน หลากหลายประเภทซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนามาอย่างเหมาะสมสำหรับการป้องกันสายส่งที่มีความซับซ้อน โดยที่ภาพแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แต่ละลักษณะนั้น มีหลักการและวิธีการที่ แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง

สายส่งเป็นอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ได้มากที่สุดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งมี ระยะทางที่ยาวผ่านพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดฟอลต์ได้ เช่น ภูเขา, ป่าเขา รวมไปถึงชุมชนและแหล่ง อุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ในการป้องกันที่ดี และระบบ สายส่งส่วนใหญ่เป็นสายส่งที่มีลักษณะเป็นลูป (Loop Line) คือสายส่งที่สามารถรับไฟได้ทั้งสองด้าน ทำให้ฟอลต์มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)

การทำงานของรีเลย์ชนิดนี้อาศัยการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดย พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50 หรือ 60 Hz) จากกระแสและ แรงดันด้วยการแปลงฟูเรียร์ตามหลักการของคลื่นเดินทาง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ซึ่งปกติจะอยู่ ที่ปลายของสายส่งดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงการติดตั้งและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay)

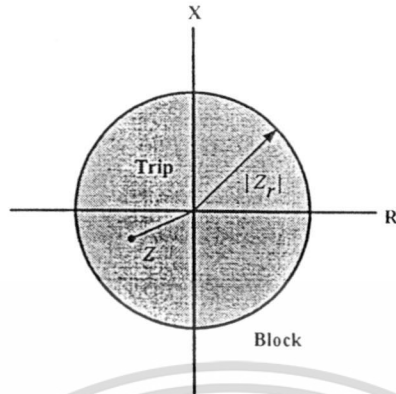
ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั้นได้มาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันและกระแสดังสมการที่ 2.1

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

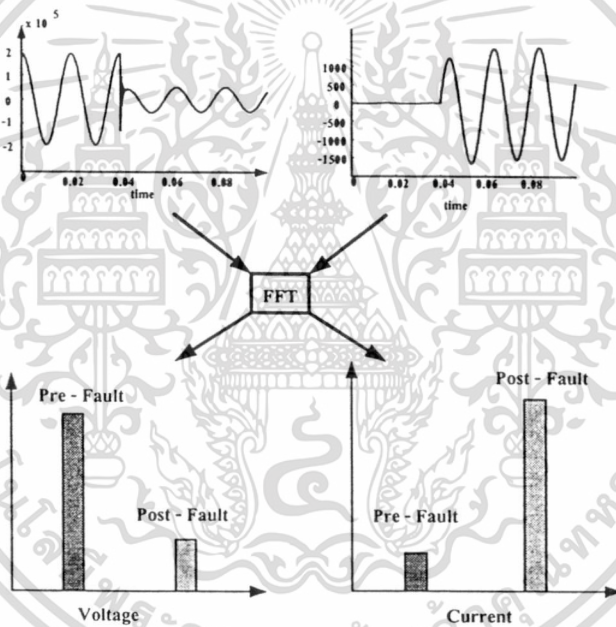
ขั้นตอนในการตัดสินใจของรีเลย์จะใช้การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตอบสนองเทียบกับ ค่าที่กำหนดไว้ (Z) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} |Z_r| > |Z| & \text{ trip} \\ |Z_r| < |Z| & \text{ block} \end{aligned} \tag{2.2}$$



ภาพที่ 2.2 แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง



ภาพที่ 2.3 แสดงการวิเคราะห์แรงดันและกระแสด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสภาวะที่เกิดฟอลต์

จากการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์นี้เองทำให้บางครั้งจะเรียกรีเลย์ภาพแบบนี้ว่า อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) และถ้าพิจารณาในระนาบเชิงซ้อนทางเดินของโลกัส (locus) จะมีลักษณะเป็นวงกลมมีรัศมี $|Z_r|$ ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของแรงดันและกระแสที่พิจารณาจากรีเลย์ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งในภาพที่ 2.1 ในสภาวะปกติรีเลย์จะมองค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งอยู่นอกวงกลมรัศมี $|Z_r|$ ดังนั้นจะไม่มีการสั่งให้เบรกเกอร์ปลดวงจร แต่ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้นค่าของแรงดันจะลดลงในขณะที่ค่าของกระแสเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.1 พบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ตามภาพที่ 2.2 และถ้าค่าอิมพีแดนซ์ลดต่ำลงมากกว่ารัศมี $|Z_r|$ รีเลย์ก็จะเริ่มทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ (โหนดของรีเลย์ คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการลดลงของอิมพีแดนซ์นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ในสภาวะปกติ และค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวก็สามารถที่จะคำนวณหาระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ ดังสมการที่ 2.3

$$Location = \frac{Z}{m} = \frac{V}{mI} \quad (2.3)$$

เมื่อ m คือค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว (ohm/km)

เนื่องจากการใช้รีเลย์ระยะทางนั้นพบปัญหาด้านการตอบสนองที่ล่าช้า โดยเฉพาะในกรณีที่สายส่งมีความยาวมากหรือจุดที่เกิดฟอลต์อยู่ไกลปลายสายส่งมากๆ ซึ่งจะส่งผลให้รีเลย์ตัวที่อยู่ไกลจุดที่เกิดฟอลต์มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้ากว่าเมื่อเทียบกับรีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ ในทางปฏิบัติเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งวงจรใดๆ ก็ตามรีเลย์ที่ปลายทั้ง 2 ด้านควรที่จะทำการตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดฟอลต์ที่เกิดขึ้นออกจากระบบ

2.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ในทุกหนทุกแห่งรอบๆ ตัวเราประกอบไปด้วยสัญญาณต่างๆ มากมายที่มนุษย์นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การสั่นของแผ่นดินไหว เสียงพูดของมนุษย์ การสั่นของเครื่องยนต์ และการขจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ เหล่านี้จะใช้ทฤษฎีเวฟเล็ตเป็นเครื่องมือสำหรับอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณ ซึ่งมีความสำคัญต่อสาขาการประมวลผลสัญญาณมาก ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของเวฟเล็ต และนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยได้

2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT) [9, 10]

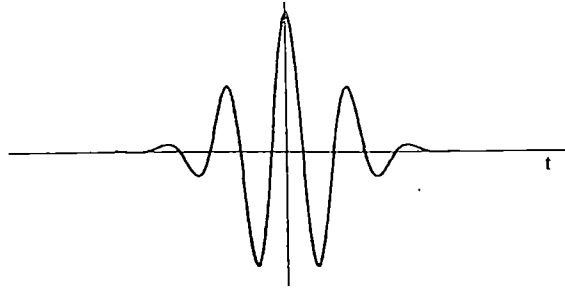
การแปลงเวฟเล็ตเป็นภาพแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น) แต่ได้พัฒนาภาพแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ สามารถปรับเปลี่ยนขนาดหน้าต่าง (windows) ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์น้อยลง ในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory)

ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นภาพแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ตามแนวแกนนอนและขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์ทั้งทางด้านบวกและด้านลบอย่างรวดเร็วดังภาพที่ 2.4 ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตคือการนำกลุ่มของเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการสเกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ดแม่ตัวเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet

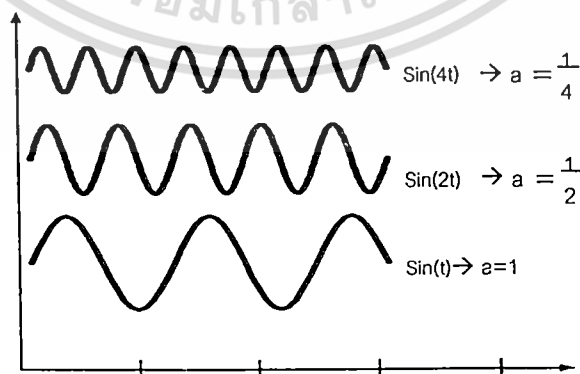
ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ดังนี้

$$\psi_{a,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) \quad (2.4)$$

$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ k ตามลำดับ โดยที่เวฟเล็ดแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า a และ k แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเล็ดแม่เดิมอยู่ และเพื่อให้เวฟเล็ดที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ดแม่จึงต้องทำการนอร์มไลซ์ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ เพื่อให้เห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะขออธิบายถึงเวฟเล็ดที่มีการสเกลและเลื่อนตำแหน่งดังนี้

2.2.1.2 การสเกล (Scaling : a)

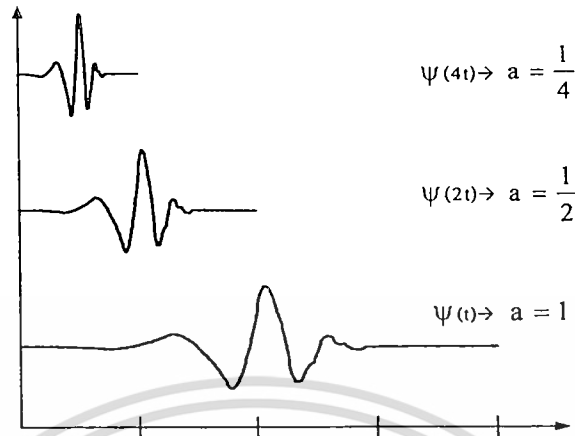
การวิเคราะห์เวฟเล็ดจะแสดงให้เห็นถึงเวลาและขนาดของสัญญาณ การสเกล (Scaling) จะหมายถึงการหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) ซึ่งเราจะให้ "a" แทนด้วยพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ดแม่ตัวเอง หรืออาจเรียก "a" ว่าเป็นตัวประกอบขนาด (scale factor) และถ้าพิจารณาสัญญาณไซน์ที่มีตัวประกอบขนาดแตกต่างกันจะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบขนาด (a) จะมีผลในทางเดียวกันกับเวฟเล็ต ยิ่งถ้าตัวประกอบขนาดน้อยลงเท่าใด เวฟเล็ตจะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาเวฟเล็ตที่มีตัวประกอบแตกต่างกันจะปรากฏลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ต

2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k)

การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ตจะมีความหมายง่าย ๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน $\psi(t)$ ด้วย k จะแสดงได้โดย $\psi(t-k)$ การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดย พารามิเตอร์ “k” ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ตบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ตที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังภาพที่ 2.7

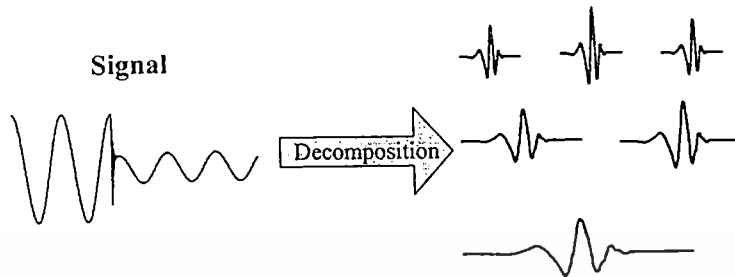


ภาพที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

2.2.1.4 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ต (Decomposition and reconstruction of Wavelet)

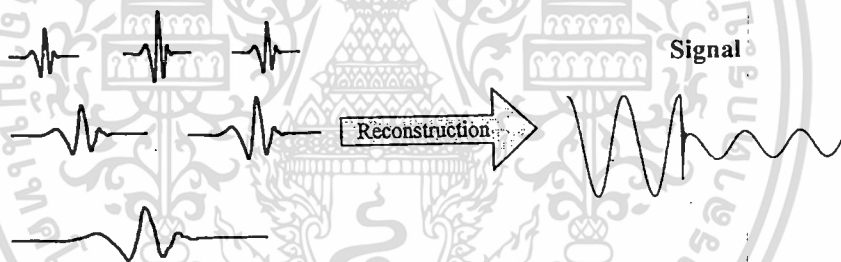
เมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาอยู่ในภาพของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่าน้ำหนัก (Weight) คูณอยู่ ซึ่งภาพแบบในการแตกกระจายสัญญาณนี้เรียกว่าการกระจายเวฟเล็ต (Wavelet decomposition) ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ในทางกลับกันการรวมกลุ่มของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิมเรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet reconstruction) ซึ่งก็คือการแปลงกลับของเวฟเล็ต (Inverse wavelet transform) โดยจะเป็นการนำเอาส่วนประกอบย่อยๆ เหล่านี้มาเรียงต่อกันเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) [10]

จากข้อกำหนดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนาภาพแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ในโครงงานฉบับนี้ได้้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมาใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิล ซึ่งทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาหลายช่วงความถี่ (สเกล) แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสำหรับการเลือกเวฟเล็ตนั้นได้เลือกใช้เป็นแบบ daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น พอลต์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ที่น้อยเพียง 4 ตัว โดยแบ่งการนำการแปลงเวฟเล็ตมาใช้วิเคราะห์สัญญาณพอลต์ออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

- 1) การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet decomposition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณกระแสและแรงดันออกมาในสเกลที่ 1- 5 ซึ่งในที่นี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง (detail) เท่านั้น

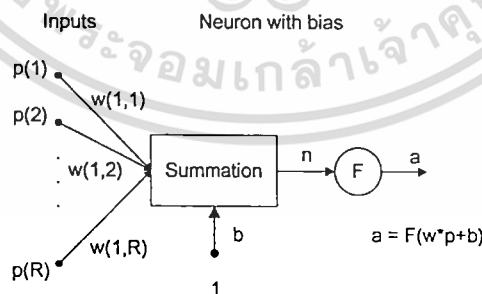
2) การรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction)

เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลให้มีขนาดเดียวกันหรืออยู่บนฐานเวลาเดียวกันจึงต้องทำการรวมกลับสัญญาณในแต่ละสเกลให้มีจำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับสัญญาณต้นแบบที่ทำการวิเคราะห์ และนอกจากนี้เพื่อให้การพิจารณาเห็นความแตกต่างมากขึ้นจึงยกกำลังสองสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกล ซึ่งสัมประสิทธิ์ทั้งหมดก็จะอยู่ในด้านบวก โดยที่รายละเอียดทั้งหมดจะได้กล่าวอยู่ในบทที่ 3

2.3 โครงข่ายประสาทเทียม [11]

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ เช่น ระบบนักบินอัตโนมัติ (Auto pilot aircraft), เครื่องมือหาปลา (Sonar) ที่มีความฉลาดมากขึ้นเช่น สามารถบอกได้ว่าฝูงปลาที่กำลังตรวจจับอยู่นั้นเป็นปลาชนิดใด จำนวนเท่าไร เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ช่วยวิเคราะห์นั้นจะมีความฉลาดมากขึ้น และมีระบบความคิดที่มีการทำงานในลักษณะคล้ายกับมนุษย์ นักวิจัยด้านไฟฟ้ากำลังจึงมีแนวคิดที่ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาแก้ปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลังหลายปัญหาด้วยกัน เช่น ปัญหาไหลลัดไหล (Load flow), การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load forecasting) และปัญหาการจ่ายโหลดอย่างมีประสิทธิภาพ (Economics load dispatch) เป็นต้น ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม, ชนิดของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม รวมไปถึงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ในสายส่ง

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการใช้ประโยชน์จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยี เป็นระบบการประมวลผลข้อมูลที่มีพฤติกรรมบางอย่างเหมือนกับโครงข่ายประสาทชีวภาพ จึงกล่าวได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียม เป็นอัลกอริทึมที่เลียนแบบการเรียนรู้ของสมองมนุษย์ โดยมีองค์ประกอบของโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญดังนี้คือ หน่วย (Unit), ตัวแปรอินพุท (Input layer), ตัวแปรเอาต์พุท (Output layer) และค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted value) แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างโครงข่ายประสาทชีวภาพกับโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังนี้

โครงข่ายประสาทชีวภาพ

โครงข่ายประสาทเทียม

ตัวเซลล์ (Cell Body)

หน่วย (Unit)

เดนไดรต์ (Dendrites)

ตัวแปรอินพุท (Input layer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอกซอน (Axon)
ไซแนปส์ (Synapse)

ตัวแปรเอาต์พุต (Output layer)
ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight value)

โครงข่ายประสาทเทียมอาจพิจารณาให้เป็นขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ (Mathematical algorithm) ของโครงข่ายประสาทชีวภาพ โดยตั้งบนพื้นฐานดังนี้

1. หน่วยประมวลผลเรียกว่า นิวรอน การส่งผ่านข้อมูลระหว่างนิวรอนทำได้โดยการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอน
2. การเชื่อมโยงแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับค่าการเชื่อมโยงหรือค่าถ่วงน้ำหนัก
3. ข้อมูลเอาต์พุตถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ซึ่งปกติความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของข้อมูลอินพุตที่คูณด้วยค่าการเชื่อมโยงกับข้อมูลเอาต์พุตเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear)

คุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมจึงถูกกำหนดด้วยองค์ประกอบทั้งสามส่วน นั่นคือ ส่วนแรกในข้อ 1. เป็นภาพแบบการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอนเรียกส่วนนี้ว่า โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนต่อไปในข้อ 2 เป็นการกำหนดค่าของการเชื่อมโยงเรียกส่วนนี้ว่า ขั้นตอนวิธีการฝึกสอนหรือการเรียนรู้ ส่วนสุดท้ายคือข้อ 3 เกี่ยวกับการกำหนดข้อมูลเอาต์พุตโดยฟังก์ชันกระตุ้น

2.3.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (Architectures of Neural Networks) [11]

ในการสร้างเซลล์ประสาทเพียงหนึ่งเซลล์ โดยใช้แนวความคิดจากเซลล์ประสาทชีวภาพ การจะนำเซลล์ประสาทเทียมมาใช้งานได้นั้น ต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมที่มีคุณลักษณะต่างๆ กัน (ค่าถ่วงน้ำหนักจะทำให้คุณสมบัติของเซลล์ประสาทเทียมแต่ละเซลล์มีคุณลักษณะแตกต่างกันไป) มาเชื่อมต่อเซลล์ประสาทหลายๆ ตัวเข้าด้วยกันให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่า เลเยอร์ (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมต่อถึงกัน ประเภทของโครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียม พอจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network), โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Network) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบแลตทิซ (Lattice Neural Network) ซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไป

2.3.2 การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Setting the Weights)

ค่าถ่วงน้ำหนัก มีความสัมพันธ์กับอะไร และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร? นั่นก็เช่นเดียวกันกับเด็กที่คลอตออกมาก็มีสมองแล้วแต่สมองยังไม่เจริญเติบโตเพียงพอและยังไม่ได้รับการฝึกสอนและเรียนรู้ เด็กจึงไม่สามารถทำกิจกรรมใดๆ ได้ด้วยตัวเอง เว้นแต่กิจกรรมที่ธรรมชาติสร้างมาพร้อมกับการกำเนิดที่เรียกว่า “สัญชาตญาณ” ซึ่งธรรมชาติใส่คุณลักษณะบางอย่างให้เซลล์สมองบางส่วน ตั้งแต่ทารกเจริญเติบโตอยู่ครรภ์มารดา เช่น ระบบควบคุมการหายใจ, การเรียกร้องเมื่อหิว, ความรู้สึก เป็นต้น เด็กจะพัฒนาการเรียนรู้ไปตามขั้นตอน หลังจากนั้น สมองของเขาจะได้รับการฝึกสอน และเจริญเติบโตไปพร้อมกัน เซลล์สมองจะได้รับการปรับคุณลักษณะสอดคล้องกับการฝึกสอน และจะเจริญเติบโตเป็นโครงข่ายสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมามีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ เมื่อสร้างเสร็จแต่ละเซลล์ประสาทที่สร้างขึ้นมานั้น จะไม่มีคุณลักษณะใดเลย เนื่องจากยังไม่มีกำหนดค่าซินแนปติกส์เวกซ์ที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการให้กับมัน จึงต้องมีการฝึกสอนเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมจะกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าซินแนปติกส์เวกซ์เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมจดจำภาพแบบความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาต์พุทได้ โดยในขั้นตอนแรกอาจกำหนดเป็นค่าสุ่มใดๆ (Random weight) ก่อนแล้วถึงปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักไปตามอัลกอริทึมสมมติฐาน หลายๆ รอบจนกว่าจะได้เอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมเหมือนกับเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องการ ในเงื่อนไขความผิดพลาดที่ยอมรับได้

เนื่องจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เป็นค่าสุ่มใดๆ โครงข่ายประสาทเทียมจึงยังไม่สามารถแสดงคุณลักษณะใดออกมา การฝึกสอนให้โครงข่ายก็คือ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักทุกๆ จุดให้สอดคล้องกับอินพุทหลายๆ แบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุทตามความต้องการนั่นเอง การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องบรรลุถึงกระบวนการเข้าใจพื้นฐานเสียก่อน คือ การเรียนรู้ในโครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็มิใช่จำกัด ปัญหาต่างๆ ผู้ใช้คงต้องแก้ไขก่อน แล้วนำผลนั้นไปอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก หลังจากปรับจนได้ค่าผิดพลาดที่เอาต์พุทเทียบกับเอาต์พุทเป้าหมายน้อยลงเป็นที่พอใจแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมนั้นก็พร้อมที่จะวิเคราะห์อินพุทและให้เอาต์พุทตามลักษณะตัวอย่างที่เคยเรียนรู้มา การเรียนรู้จะมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักหลายๆ รอบ จนค่าถ่วงน้ำหนักสอดคล้องกับตัวอย่างหลายๆ ตัวอย่างแล้วจะสามารถให้เอาต์พุทได้ตามต้องการ พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ตัวอย่างสำหรับการปรับสอนมากๆ โครงข่ายก็จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการปรับสอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการเรียนรู้คือ การเรียนรู้แบบควบคุม (Supervised Learning) และการเรียนรู้แบบอิสระ (Unsupervised Learning)

2.3.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

ฟังก์ชันกระตุ้นบางที่เรียกว่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุท ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีอยู่หลายชนิด อาจแบ่งฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ฟังก์ชันเทรสโฮลด์ (Threshold function หรือ Hard limit function หรือ Step function)
2. ฟังก์ชันเชิงเส้นอิ่มตัว (Saturating Linear Function หรือ Piecewise-Linear Function)
3. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function)

จากฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานทั้ง 3 ชนิด ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันที่ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นฟังก์ชันกระตุ้นของโครงข่ายประสาทเทียมกันมาก เนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Smoothness) นอกเหนือจากฟังก์ชันกระตุ้นพื้นฐานทั้งสาม แล้วยังสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลในภาพแบบอื่นๆ มาเป็นฟังก์ชันกระตุ้นได้ ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันกระตุ้นแบบคอมแพทิทิฟ (Competitive function)

โดยทั่วไปฟังก์ชันกระตุ้นจะจำกัดช่วงเอาต์พุทอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ในการประยุกต์ใช้งานบางกรณี อาจมีความจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันที่ได้ค่าออกมานอกเหนือช่วงดังกล่าว เช่นต้องการเอาต์พุทอยู่ในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ -1 ถึง +1 สำหรับการพิจารณาเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบใดนั้นนับถึงปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่นอน แต่อาจจะพิจารณาจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความเป็นเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้น
2. ลักษณะของข้อมูลอินพุต
3. ขอบเขตที่ต้องการและลักษณะของข้อมูลเอาต์พุต
4. ปัจจัยอื่นที่มีนัยสำคัญต่อผลตอบแทนของนิเวศหรือโครงข่ายประสาทเทียมโดยรวม

2.3.4 พื้นฐานแนวคิดของโครงข่ายประสาทเทียม (Basis Algorithm of NNs)

ในโครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลหรือตัวอย่าง (sample) ถูกแยกย่อยเสมอเข้าไปในชุดฝึกสอน (Training set), ชุดตรวจสอบ (Validation set) และชุดทดสอบ (Test set) ความแตกต่างระหว่างชุดย่อยเหล่านี้มีความสำคัญมาก ชุดตรวจสอบ และชุดทดสอบถูกทำให้สับสนบ่อยๆ จึงจำเป็นต้องกำหนดนิยามความหมายขึ้นเพื่อความเข้าใจ

ชุดฝึกสอน (Training set) :

ชุดของตัวอย่างใช้เพื่อเรียนรู้ว่ามีพารามิเตอร์ของการแบ่งประเภทเหมาะสม

ชุดตรวจสอบ (Validation set) :

ชุดของตัวอย่างใช้ปรับพารามิเตอร์ของการประเภ สำหรับตัวอย่างที่เลือกจำนวนของชั้นซ่อนในโครงข่ายประสาทเทียม

ชุดทดสอบ (Test set) :

ชุดของตัวอย่างใช้ประเมินพารามิเตอร์ของการแยกประเภทที่ระบุไว้เต็มที่

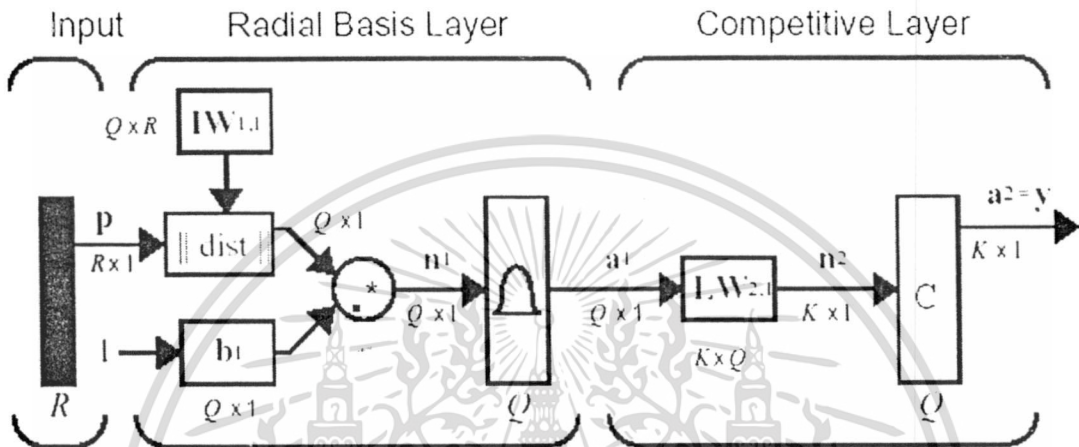
เมื่อทำความเข้าใจกับพารามิเตอร์เหล่านี้ จึงต้องกล่าวถึงพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB/ Neural Network Toolbox

2.3.4.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น

หลายๆ ประโยชน์ (ข้อดี) เสนอโดยโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ได้มีการกระตุ้นความพยายามเพื่อแยกประเภทด้วยวิธีเบย์เซียน (Bayesian) เข้าไปสู่แบบจำลองทั่วไป โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network) มีโครงสร้างโดยใช้ความคิดจากทฤษฎีความน่าจะเป็นการแบ่งประเภท (Classical probability theory) เช่น การแบ่งประเภทของเบย์เซียน (Bayesian) และ ตัววิเคราะห์แบ่งประเภทสำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density functions : PDFs) เพื่อทำเป็นภาพแบบให้กับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับภาพแบบการแบ่งประเภท โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นถูกใช้อย่างประสบความสำเร็จเกี่ยวกับการแก้ปัญหาลากหลายกลุ่มของปัญหาการแบ่งประเภท ถึงแม้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นยังไม่เคยประเมินอย่างเต็มที่ที่จะเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ถ้าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนี้ปฏิบัติตามคุณสมบัติ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นวิธีของการเลือกสำหรับปัญหาการแบ่งประเภทที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (Probabilistic neural network : PNN) ประกอบด้วย ชั้นอินพุท (Input layer), ชั้นซ่อนหรือบางครั้งเรียกว่า ชั้นฐานรัศมี (Radial basis layer) และ ชั้นเอาต์พุทหรือบางครั้งเรียกว่าชั้นคอมแพติทีฟ (Competitive layer) ลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้เป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า โดยมีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อถึงกันหมด นั่นคือ ทุกๆ นิวรอนในชั้นอินพุทจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมี และทุกๆ นิวรอนในชั้นฐานรัศมีจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ นิวรอนในชั้นเอาต์พุท จากภาพที่ 2.11 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น



ภาพที่ 2.11 แสดงแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น [11]

ภาพที่ 2.11 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น มีอินพุท R ชุด, นิวรอนในชั้นฐานรัศมี เท่ากับ Q และมีเอาต์พุท K ชุด สมาชิกของอินพุทเวกเตอร์ P แต่ละตัวจะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นฐานรัศมีด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^1 (เรียกว่า Input weight, $IW^{1,1}$) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด $Q \times R$ และเวกเตอร์ a^1 เป็นผลลัพธ์ของชั้นฐานรัศมี โดยมีขนาด Q จะเป็นอินพุทของชั้นคอมแพติทีฟหรือชั้นเอาต์พุท สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ a^1 จะถูกเชื่อมเข้ากับนิวรอนแต่ละนิวรอนในชั้นคอมแพติทีฟ ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W^2 (เรียกว่า Layer weight, $LW^{2,1}$) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด $K \times Q$ เช่นเดียวกันกับชั้นฐานรัศมี โดยที่ เวกเตอร์ a^2 ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด K จะเป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

จากภาพที่ 2.11 เมื่อข้อมูลอินพุทปรากฏบนชั้นอินพุท ($P_R, R = 1, \dots, R$) สัญญาณจากชั้นอินพุททั้งหมดจะถูกส่งมาตามสายเชื่อมโยงไปยังนิวรอนเซลล์ในชั้นถัดไป ในช่วงรอบแรกๆ แต่ละนิวรอนในชั้นฐานรัศมี ถูกเชื่อมโยงด้วยค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในชั้นฐานรัศมี ($iw_{Q,R}^{1,1} = Q = N$) ขณะนั้น จะทำการคำนวณผลสัญญาณเอาต์พุทของนิวรอนเซลล์ในชั้นฐานรัศมี (a^1) ได้จากสมการ

$$a_Q^1 = \exp \left(- \frac{\|P_R - iw_{Q,R}^{1,1}\|^2}{2\sigma_Q^2} \right) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.5 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$a^1 = \exp\left(-\sqrt{\sum_{R=1}^R (lw_{Q,R}^{1,1} - P_R)^2} * b_Q^1\right)^2 \quad (2.6)$$

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

spread คือ ค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี

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

$$net_K = \sum_{K=1}^K lw_{K,Q}^{2,1} a_Q^1 \quad (2.7)$$

ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณสัญญาณเอาต์พุต (a^2) ในชั้นเอาต์พุต

$$a^2 = f(net_K) \quad (2.8)$$

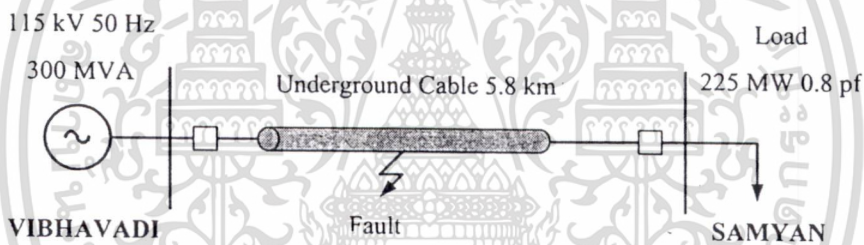
การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับโดยเพิ่มจำนวนรอบค่ากระจายของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดฐานรัศมี (*spread*) ทีละรอบ และดำเนินการปรับค่าไบอัสและค่าถ่วงน้ำหนักเช่นนี้ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหมดจำนวนรอบที่ฝึกสอนจึงจะหยุดการฝึกสอน

3.1 การจำลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการจำลองฟอลต์บนสายส่งด้วยโปรแกรม ATP/EMTP เนื่องจากฟอลต์เป็นสิ่งที่ผิดปกติในระบบไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทดลองในระบบจริงได้ และเพื่อใช้สำหรับการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของการตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป โปรแกรม ATP/EMTP มีความสามารถในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง และเหมาะสมสำหรับจำลองผลตอบสนองเชิงโดเมนเวลาแบบทันทีทันใดอย่างแม่นยำ (Time Domain Instantaneous Responses) พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB / Wavelet ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยมีเนื้อหาและรายละเอียดของการจำลองฟอลต์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ดังต่อไปนี้

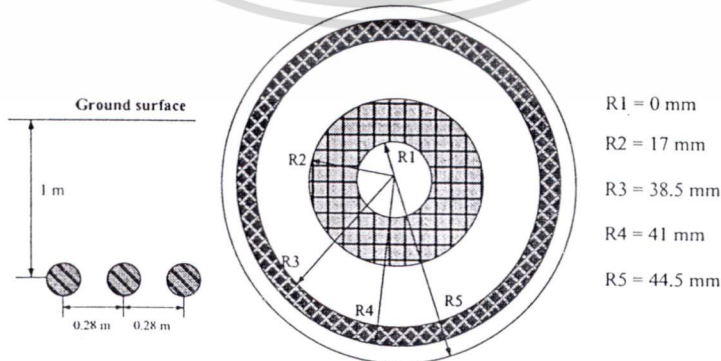
3.1.1 การจำลองระบบสายส่ง

การจำลองสายส่งเคเบิลใต้ดินจะใช้สายส่งในกรณีศึกษาเป็นเคเบิลใต้ดินที่มีความยาว 5.8 กิโลเมตร ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV ทำการจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP



รูปที่ 3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง

ทำการจำลองระบบเมื่อเกิดฟอลต์ลัดวงจรแบบเฟส A ลงดิน (A-G) ในระยะทางที่แตกต่างกันโดยเริ่มต้นที่ 1 กิโลเมตร มุมเฟสเริ่มต้นที่ 150° ทางด้านส่ง โดยให้เฟส A เป็นมุมอ้างอิง ชนิดของสายเคเบิลยาว 5.8 กิโลเมตร



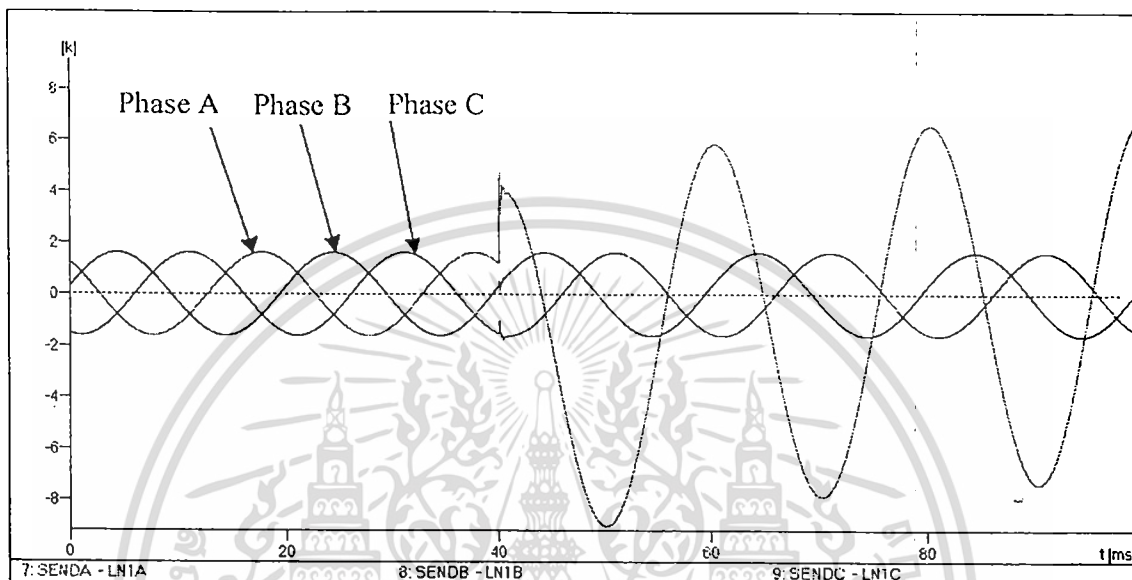
รูปที่ 3.2 ขนาดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

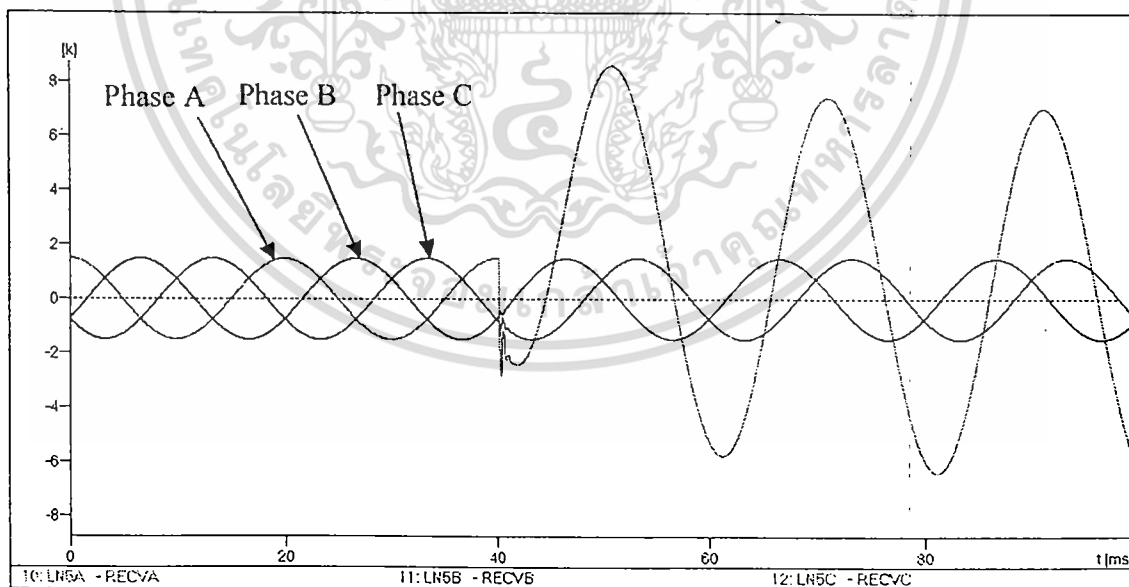
ค่า ความยอมได้สัมพัทธ์ (permittivity) (ϵ_r) ของสาย มีค่า 2.7

ค่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) (μ_r) ของสายมีค่า 1

นำรูปคลื่นของกระแสที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม ATP/EMTP มาแยกองค์ประกอบให้อยู่ในรูป กระแสลำดับบวก , กระแสลำดับลบ และ กระแสลำดับศูนย์ จากนั้นนำรูปคลื่นที่ได้แปลงเวฟเล็ทโดยโปรแกรม MATLAB นำรูปคลื่นที่ได้ยกกำลังสองจะได้รูปคลื่นเวฟเล็ทของทั้งสองปลายทางด้าน A และ B



รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่ฝั่งส่ง (Sending end)



รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่ฝั่งรับ (Receiving end)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตในบทที่ 2 งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิลใต้ดิน โดยสมมุติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสไฟฟ้าจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีพอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของพอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มุมที่เริ่มเกิดพอลต์, ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดพอลต์ เป็นต้น ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน โดยนำข้อมูลสัญญาณกระแสพอลต์ที่ได้จากแบบจำลองพอลต์ที่อัตราสุ่ม (Sampling Rate) 200 kHz มาทำการแปลงให้อยู่ในองค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) จากนั้นนำสัญญาณองค์ประกอบกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current) มาดำเนินการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา โดยการใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละสเกล เพื่อตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสเกล หลังจากนั้นนำข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับพอลต์ได้มาวิเคราะห์ประเภทของพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิล และตำแหน่งที่เกิดพอลต์บนสายเคเบิลใต้ดินต่อไป โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ต่างๆ จะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การตรวจจับ

รูปแบบของการตรวจจับพอลต์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำสัญญาณกระแสพอลต์มาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพื่อลดจำนวนในการวิเคราะห์และความซับซ้อนในการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเล็ตจะนำสัญญาณกระแสพอลต์ที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้านมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) โดยใช้เมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation Matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ (3.1) [12, 13]

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อ I_0 หมายถึงองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)

I_1 หมายถึงองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence)

I_2 หมายถึงองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence)

T หมายถึงเมตริกซ์การแปลงของกระแส (Phase Current Transformation Matrix)

งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้เมตริกซ์การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transformation Matrix) เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายเคเบิลทั้งแบบมีการไขว้สลับสายแบบสมบรูณ์และไม่มีการไขว้สลับสาย โดยเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบ [10]

Scale	Frequency Range (kHz)	Traveling Wave Speed(km/s)	Sequence Transformation Matrix
1	50-100	294,747	$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
2	25-50	296,988	
3	12.5-25	296,748	
4	6.25-12.5	296,464	
5	3.125-6.25	296,411	

การตรวจจับพอลต์สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณกระแสพอลต์ในแต่ละเฟส และสัญญาณกระแสพอลต์ขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ของปลายสายส่งแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ซันิต daubechies4 (db4) [14] เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกันจากนั้นนำมาแยกกำลังสอง แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับซึ่งในแต่ละสเกลสามารถแสดงค่าของช่วงความถี่ต่างๆ ดังนี้

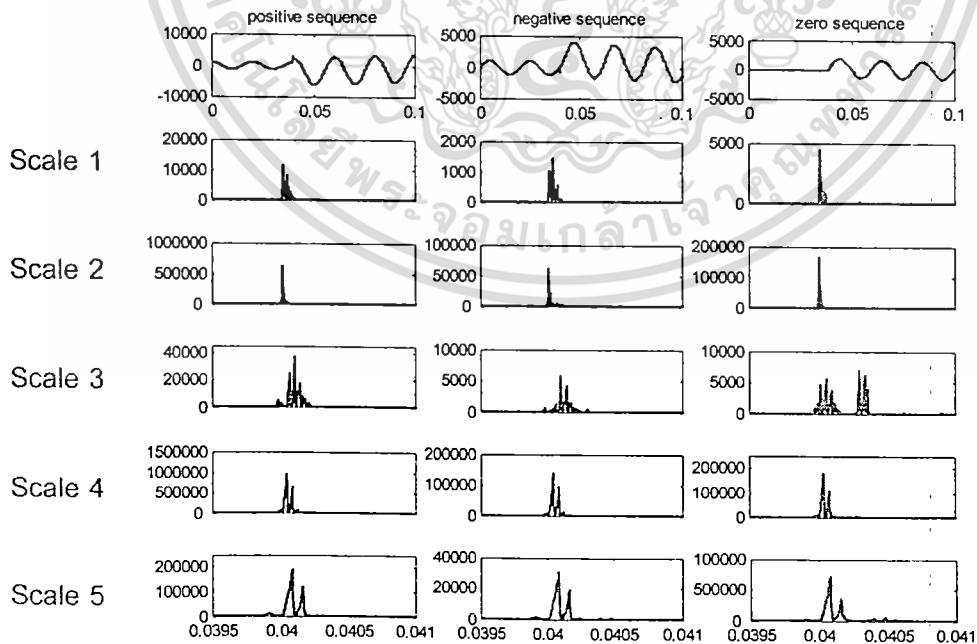
สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

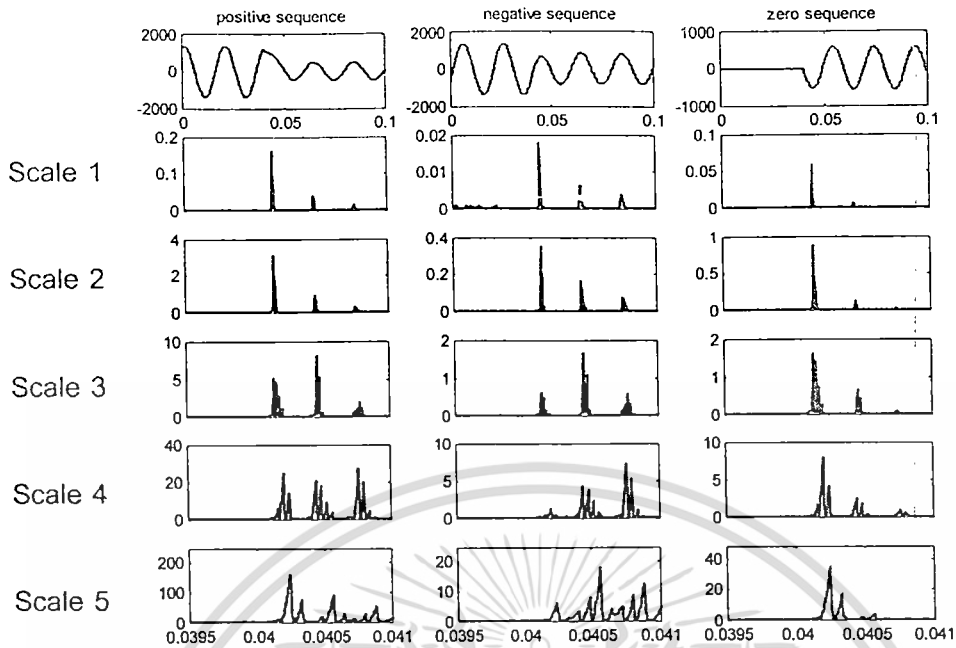
สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นเวฟเล็ตยกกำลังสองด้านส่ง (Sending end)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นเวฟเล็ดยกกำลังสองด้านรับ (Receiving end)

งานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง $1/4$ ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์เป็นจำนวนเท่า ในแต่ละสเกล ของกระแสที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน และเพื่อให้การพิจารณาข้างขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสอง เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 จากผลการแปลงเวฟเล็ดยกกำลังสองสามารถสังเกตได้ว่าในสภาวะที่เริ่มมีฟอลต์ ($t \geq 0.04$ sec) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกลจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 0.04$ sec) ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า “ถ้าสัมประสิทธิ์ในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ของสเกลใดสเกลหนึ่งของกระแสลำดับบวกเมื่อวัดที่ปลายสายส่งแต่ละด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากช่วงสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ แสดงว่ามีความผิดปกติ เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน” เมื่อสามารถตรวจจับฟอลต์ได้แล้ว จากนั้นนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ในวงจรที่เกิดฟอลต์มาวิเคราะห์ประเภทที่เกิดฟอลต์บนสายเคเบิลใต้ดินต่อไป

3.3 การจำแนกประเภทฟอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

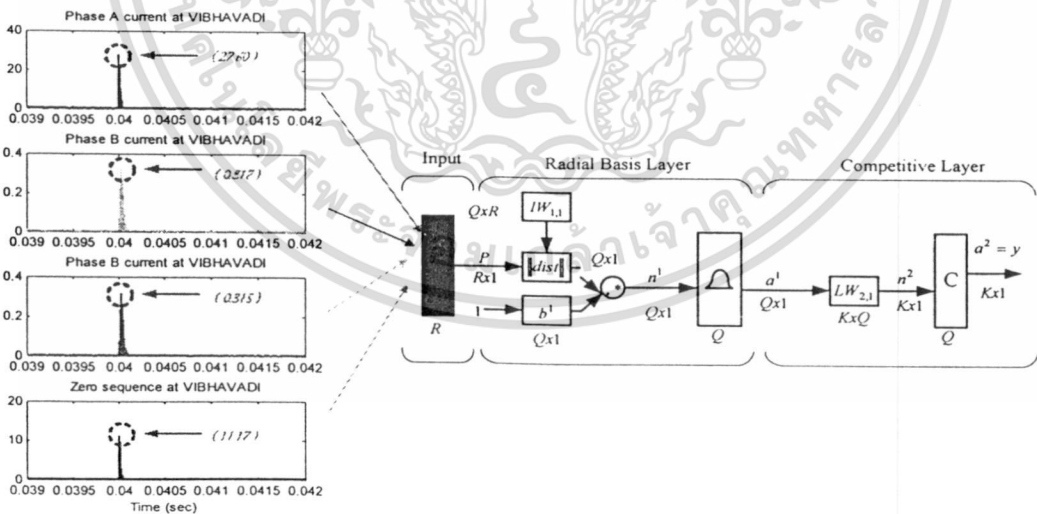
จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมว่า โครงข่ายประสาทเทียมมีแนวคิดเลียนแบบการทำงานของสมองชีวภาพ โดยเรียนรู้และศึกษาการทำงานของสมองชีวภาพเพื่อกำหนดแนวทางสำหรับการสร้างแบบจำลองขึ้นมา แล้วพยายามสมมติฐานลักษณะการทำงานโดยจำลองเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเดียวกันแล้วดำเนินการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ ถ้าหากโครงข่ายสามารถคำนวณฟังก์ชันในบางลักษณะที่กำเนิดความสัมพันธ์ระหว่าง

อินพุทและเอาต์พุทในโครงข่าย สิ่งสำคัญที่ทำให้คำนวณถูกต้องนั้นจำเป็นต้องมีการฝึกสอนโครงข่าย เพราะฉะนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมจำเป็นต้องมีการฝึกสอนเสียก่อน

เนื่องจากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยจะใช้ Neural Network Toolbox [11] ของโปรแกรม MATLAB ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ดังนั้นองค์ประกอบบางชนิดที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โปรแกรม MATLAB ได้ทำการกำหนดไว้แล้ว ยกเว้นองค์ประกอบบางชนิดเช่น กลุ่มของรูปแบบอินพุทและเอาต์พุท, จำนวนของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ เป็นต้น ตัวผู้ฝึกสอนจะเป็นผู้กำหนดเอง จุดมุ่งหมายการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยคือ ฝึกสอนเพื่อให้ได้เอาต์พุทที่ต้องการคือ ประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการฝึกสอนและการวิเคราะห์ดังนี้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกตัวแปรอินพุทในส่วนของกระบวนการระบุประเภทฟอลต์ โดยใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกที่เราตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสของเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.7 ในส่วนตัวแปรเอาต์พุทจะมีค่าสัมพันธ์กับเฟส (A, B, C) และกราวด์ (G) หรือชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง โดยมีรูปแบบการฝึกสอนเพื่อระบุประเภทของฟอลต์ดังต่อไปนี้

ก่อนฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น (PNN), โครงสร้างก่อนฝึกสอนประกอบไปด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ในชั้นอินพุทมี 4 นิวรอนดังแสดงในรูปที่ 3.7, ในชั้นซ่อนมี 540 นิวรอน (จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะมีค่าเท่ากับจำนวนชุดฝึกสอนเสมอ) และในชั้นเอาต์พุทมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ซึ่งจะมีค่าสัมพันธ์กับประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่ง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันกระตุ้นที่อยู่ในชั้นซ่อนจะใช้ชนิดฐานรัศมี (radial basis) ส่วนชั้นเอาต์พุทจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดคอมแพทิทีฟ (competitive)



รูปที่ 3.7 แบบจำลองอินพุทของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น

Output of PNN	Classification of fault type	Types of fault
1	Phase A to ground fault	AG
2	Phase B to ground fault	BG
3	Phase C to ground fault	CG
4	Phase A,B to ground fault	ABG
5	Phase B,C to ground fault	CAG
6	Phase C,A to ground fault	BCG
7	Three phase fault	ABC
8	Phase A to phase B fault	AB
9	Phase C to phase A fault	CA
10	Phase B to phase C fault	BC

ระหว่างการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็น, เริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (Random initial weight) และเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ (Increase spread) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าไบอัส ($b = \frac{0.8326}{Spread}$) ในขั้นสอน ให้กับโครงสร้างเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น หนึ่งรอบการฝึกสอนมีการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและปรับเปลี่ยนค่ากระจายค่าคงที่โดยเริ่มต้นที่ 0.0001 เพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) ของชุด ข้อมูลทดสอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายค่าคงที่ในขั้นสอนเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.0001 จนถึง 0.1 (เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด) หรือจนกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAPE) เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ขั้นตอนการฝึกสอนแสดงในรูปที่ 3.8

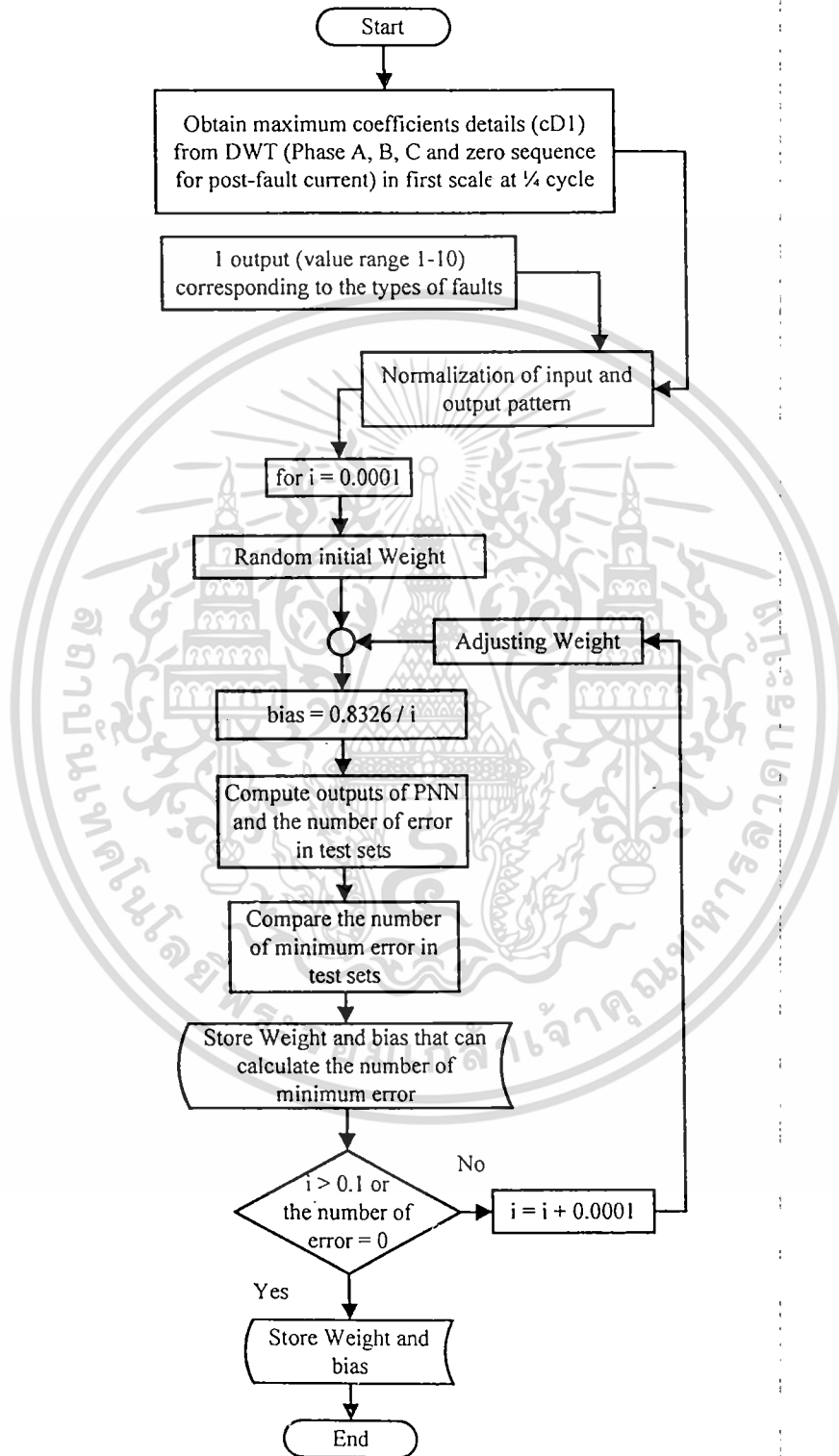
หลังจากฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น ผลสรุปของการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 3.3 โดยใช้เวลาในการฝึกสอนที่ดีที่สุดประมาณ 62 วินาที และค่ากระจายค่าคงที่เป็น 0.001 จากนั้นจึงนำค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นสอนและชั้นเอาต์พุตซึ่งเป็นเมกติกซ์ขนาด (540,4) และ (9,540) ตามลำดับ และค่าไบอัสที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงสุด มาทดสอบกับข้อมูลทดสอบคนละชุด (ผลสรุปการทดสอบได้แสดงในบทถัดไป)

ตารางที่ 3.3 แสดงผลสรุปที่ได้จากการฝึกสอน และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

ข้อมูล	PNN
ค่ากระจายค่าคงที่ (Spread)	0.001
จำนวนรอบที่ฝึกสอน (Iterations)	300
เวลาที่ใช้ในการฝึกสอน (นาที)	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยการพิจารณาผลจากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น และเพื่อทดสอบถึงสมมติฐานของวิธีการดังกล่าวจึงทำการทดสอบสัญญาณพอลต์ที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในบทถัดไป



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพการระบุประเภทพอลต์ด้วยวิธีที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการตรวจจับฟอลต์ มีรูปแบบในการนำเสนอ ดังนี้

4.1 รูปแบบการนำเสนอ

4.1.1 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง

การแสดงผลการทดลองจะแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเรียงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ โดยปรับตำแหน่งการเกิดฟอลต์ โดยระยะทางที่เกิดฟอลต์จะคิดจากสถานีไฟฟ้าด้านส่ง (Sending end) เป็นจุดอ้างอิงซึ่งรายละเอียดจะประกอบไปด้วย

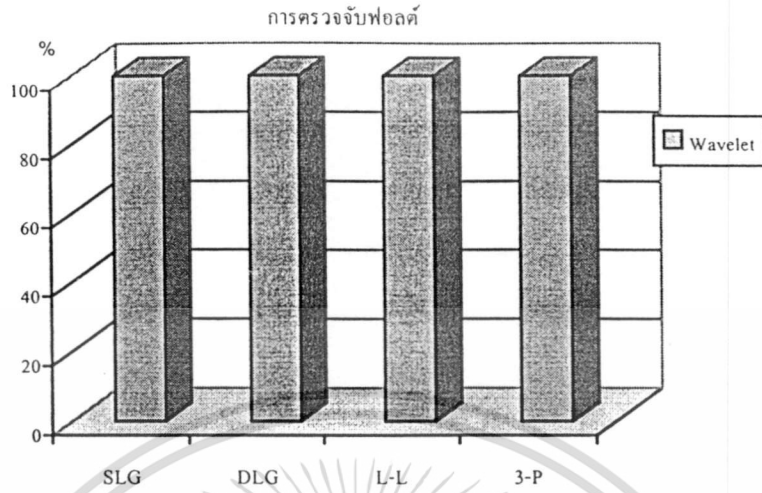
1. การตรวจจับฟอลต์ ซึ่งผลที่ได้มาจากการคำนวณผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วย
2. การเรียงลำดับจะเรียงตามประเภทของฟอลต์ คือ AG, BG, CG, ABG, ACG, BCG, AB, AC, BC, และ ABC ตามลำดับ และมีการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

ผลการจำลอง

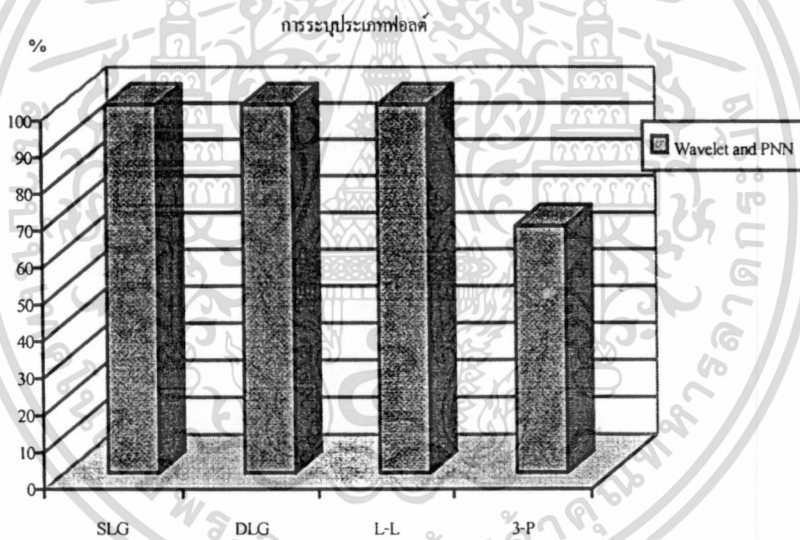
จากการจำลองระบบส่งจ่ายในกรณีศึกษาได้นำแบบของสายส่งมาจากการไฟฟ้านครหลวงจากการจำลองหาค่าฟอลต์ที่เกิดในระบบส่งจ่ายในแต่ละช่วงสายส่งพบว่าในแต่ละช่วงการจำลองมีค่าความผิดพลาดที่เกิดแตกต่างกันดังแสดงต่อไปนี้

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)



(a) การตรวจจับฟอลต์



(b) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับฟอลต์

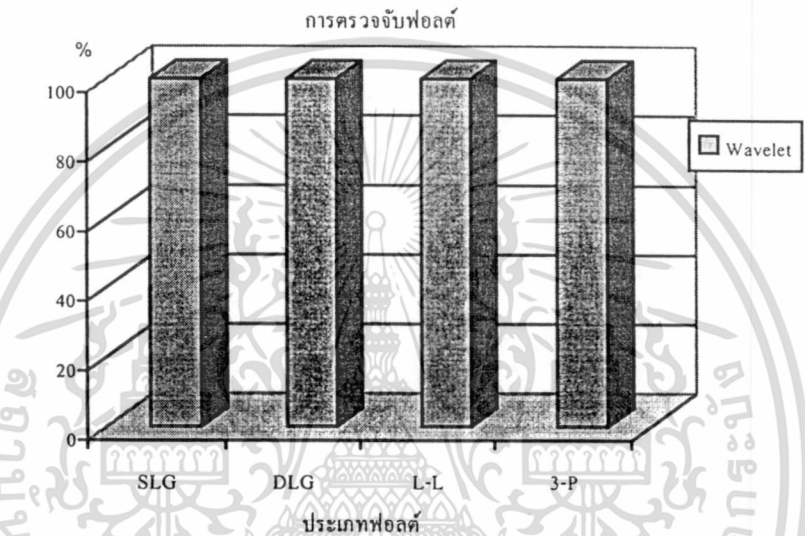
สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.1 (a) มีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

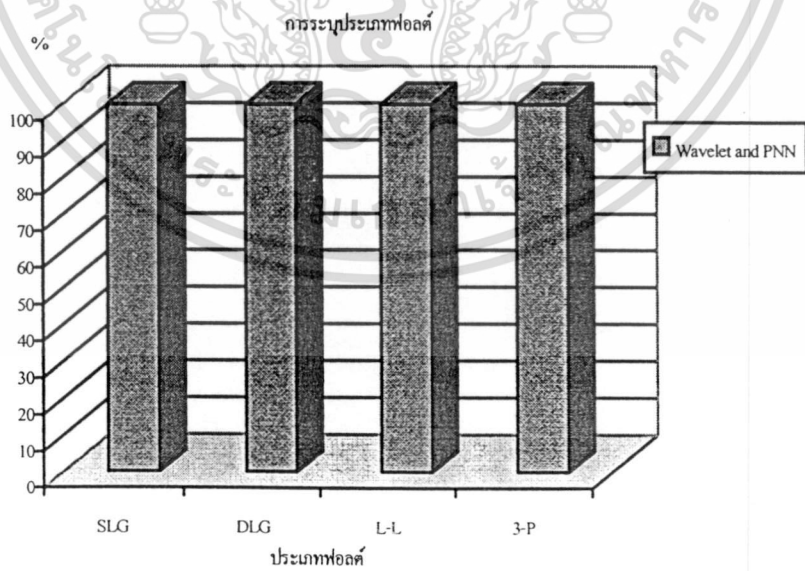
การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเลตมาเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นเพื่อระบุประเภทฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.1 (b) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100% ที่ฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG , BG , CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB , AC, BC) และฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) ในขณะที่ฟอลต์ 3 เฟส (ABC) มีความถูกต้องอยู่ที่ 66.67%

4.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 2 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)



(a) การตรวจจับฟอลต์



(b) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 2 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

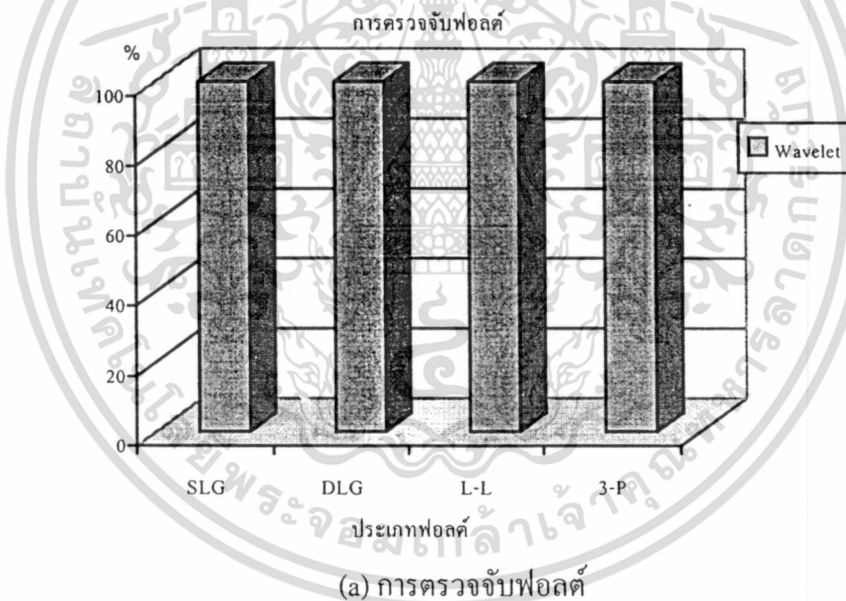
จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้
การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.2 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

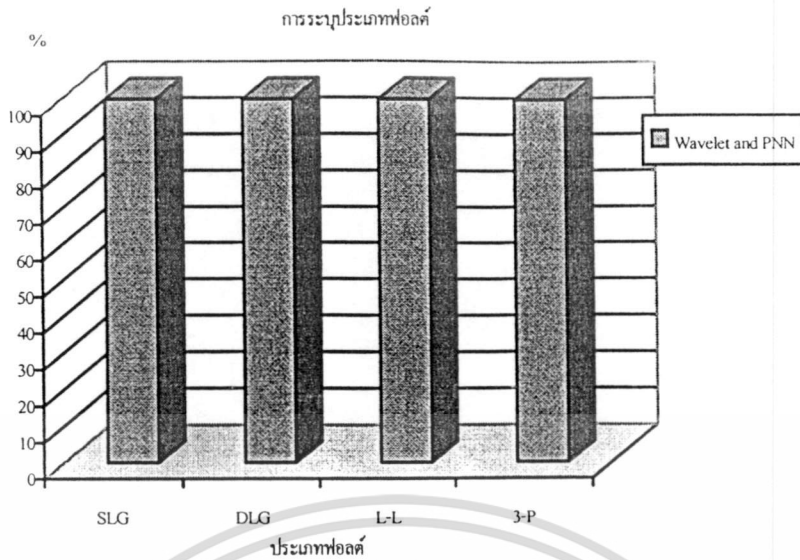
การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นเพื่อระบุประเภทฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.2 (b) จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG , BG , CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB , AC, BC) ฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100%

4.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 2.9 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 2.9 กิโลเมตร

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับฟอลต์

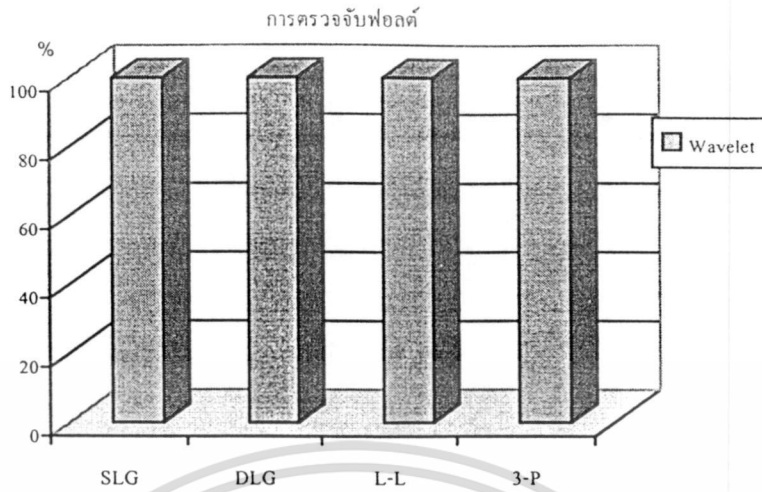
สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.3 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

การระบุประเภทของฟอลต์

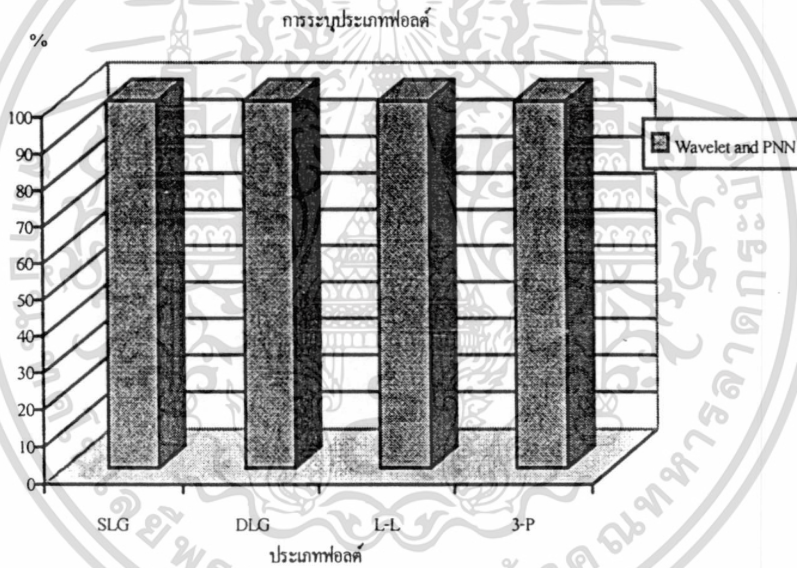
การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นข้อมูลอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความน่าจะเป็นเพื่อระบุประเภทฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.3 (b) จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG , BG , CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB , AC, BC) ฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3.5 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)



(a) การตรวจจับฟอลต์



(b) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3.5 กิโลเมตร

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.4 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับฟอลต์

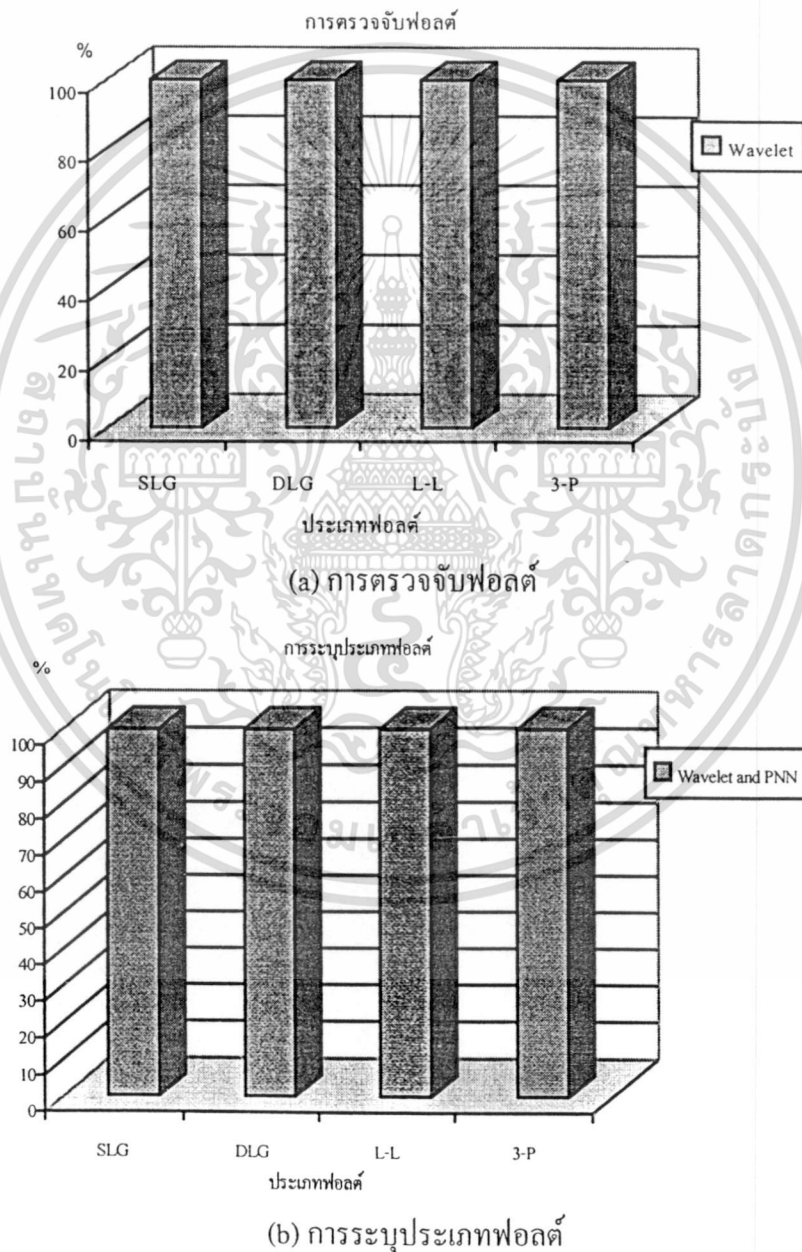
สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.4 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียม ชนิดความน่าจะเป็นเพื่อระบุประเภทฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลใน สเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.4 (b) จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG , BG , CG), ฟอลต์ ระหว่างเฟส-เฟส (AB , AC, BC) ฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100%

4.2.5 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 4.8 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (5.8 กิโลเมตร)



รูปที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 4.8 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.5 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบ กระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.5 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นข้อมูลอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียม ชนิดความน่าจะเป็นเพื่อระบุประเภทฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลใน สเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.5 (b) จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG , BG , CG), ฟอลต์ ระหว่างเฟส-เฟส (AB , AC, BC) ฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) และฟอลต์ 3 เฟส (ABC) สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

จากรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม และนำผลที่ได้มาประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการวิเคราะห์อาศัยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ โดยสัญญาณฟอลต์ที่ใช้สำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งใช้แบบจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินที่ระดับแรงดัน 115 kV ในระบบของการจำลองกรณีศึกษา ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าด้าน Sending end ไปยังโหนดด้าน Receiving end โดยสายส่งมีความยาว 5.8 กิโลเมตร เป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจำลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณฟอลต์ในหลากหลายรูปแบบที่อัตราการสุ่ม 200 kHz

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เนื่องจากเวฟเล็ตแม่ชนิดนี้มีขั้นตอนการทำงานที่รวดเร็ว (Fast algorithm) และลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ในลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetry) ซึ่งจะสอดคล้องกันกับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน จึงส่งผลให้รูปแบบการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยจะทำการแปลงเวฟเล็ตทำการวิเคราะห์และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ จากนั้นทำการแยกองค์ประกอบความถี่ออกมาในสเกลที่ 1-5 หรือช่วงความถี่ต่อไปนี้

สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz

ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นถูกนำมาประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

3. รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้นทำได้โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ณ ปลายสายส่งในแต่ละด้านระหว่างก่อนและหลังเกิดฟอลต์ (ในช่วง ¼ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์) โดยเป็นการเปรียบเทียบในสเกลที่ 1-5 จากนั้นเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก โดยจะนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเพียงสองค่า ซึ่งเป็นข้อมูลขององค์ประกอบความถี่สูงในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ นำไปใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อนำไปวิเคราะห์ในการระบุประเภทฟอลต์ต่อไป

4. รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมอาศัยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับฟอลต์ได้ของแรงดันและกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง ¼ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ ตามลำดับที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ของปลายด้านส่ง ซึ่งจะถูกนำมาเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อระบุประเภท

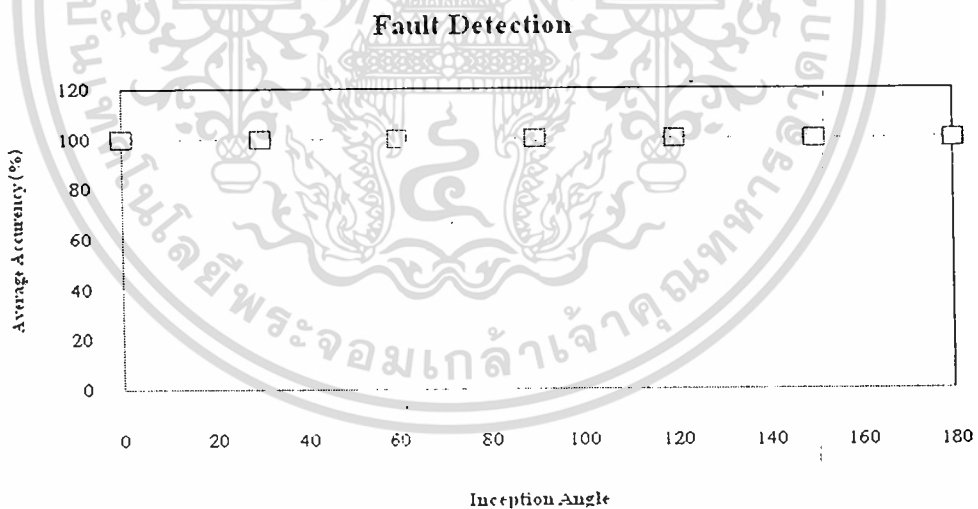
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอลต์ที่เกิดขึ้น ในขณะที่ ตัวแปรเอาต์พุตจะมีค่าสัมพันธ์กับเฟส (A, B, C) และกราวด์ (G) หรือประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้น เพื่อใช้สำหรับตัดสินใจในการระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ตามลำดับ

5. การทดสอบวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองด้วยการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ได้จากระบบจำลองสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน ทางด้าน Sending end ไปยังด้าน Receiving end โดยสายส่งมีความยาว 5.8 กิโลเมตรโดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการตรวจจับฟอลต์ และการระบุตำแหน่งและประเภทของฟอลต์

5.1 การตรวจจับฟอลต์

ผลการตรวจจับฟอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถตรวจจับฟอลต์ได้ทุกประเภท และทุกตำแหน่งต่างๆ บนสายส่งโดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% ตามรูปที่ 5.1 ซึ่งระยะทางที่เกิดฟอลต์, ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้น และมุมเริ่มเกิดฟอลต์ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับฟอลต์ เพราะเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้น เมื่อประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยวิเคราะห์จะสังเกตได้ว่าก่อนสภาวะมีฟอลต์นั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมีค่าต่ำมาก แต่ในสภาวะหลังเกิดฟอลต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทั้งสองสภาวะนี้สามารถนำมาสู่ขั้นตอนของการวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ โดยใช้เพียงผลของการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกเท่านั้น นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดฟอลต์บนสายส่งยังมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณฟอลต์ด้วย แต่ในรูปแบบการวิเคราะห์เวฟเล็ตที่มีหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้



รูปที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ในแต่ละมุมเริ่มเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การระบุชนิดฟอลต์

จากการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย สามารถสรุปผลการระบุชนิดของฟอลต์ที่เกิดได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปความถูกต้องในการระบุชนิดฟอลต์

Fault Location (Distance measured from the sending end)	Number of case studies	Fault type			
		SLG	DLG	LL	3-P
1 km	30	100%	100%	100%	66.67%
2 km	30	100%	100%	100%	100%
2.9 km	30	100%	100%	100%	100%
3.5 km	30	100%	100%	100%	100%
4.8 km	30	100%	100%	100%	100%
Average		100%	100%	100%	93.33%

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุชนิดฟอลต์แต่ละประเภท จะเห็นว่า การระบุชนิดฟอลต์ในแต่ละระยะทางนั้นมีความแม่นยำที่แตกต่างกัน ส่วนมากจะมีความแม่นยำที่สูง ในช่วงกลางสายส่ง และมีความแม่นยำน้อยลงที่ปลายสายส่งทั้งสองฝั่งเนื่องจากระยะสายส่งที่สั้น ทำให้การตรวจจับค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเกิดความคลาดเคลื่อน

เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินนั้น ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่า องค์กรประกอบความถี่สูงนั้นสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับสัญญาณฟอลต์ได้อย่างถูกต้องและลดจำนวนข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง ซึ่งผลสรุปที่ได้จากการระบุชนิดฟอลต์เป็นที่น่าพอใจ พบว่า ค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงกว่า 90% ซึ่งถือว่ามี ความแม่นยำค่อนข้างสูง และสามารถยอมรับได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Charles A. Maloney, "Locating Cable Faults" in IEEE transaction on Industry Applications, July/August 1973, Vol.IA-9, No.4
- [2] T. Tanaka and A. Greenwood, *Advanced Power Cable Technology*. Boca Raton, CRC, vol. 1.
- [3] P. A. Crossley, P. G. McLaren. "Distance Protection Based on Travelling Waves", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 9, pp. 2581-2589, 1983.
- [4] P. G. McLaren, S. Rajendra. "Travelling Wave Techniques Applied to the Protection of Teed Circuits: Principle of Travelling Wave Techniques", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, No. 12, pp. 3544-3550, 1985.
- [5] P. G. McLaren, S. Rajendra. "Travelling Wave Techniques Applied to the Protection of Teed Circuits: Multi-Phase/Multi-circuit System", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, No. 12, pp. 3551-3557, 1985.
- [6] A. O. Ibe, B. J. Cory. "A Travelling Wave Based Fault Locator for Two- and Three-Terminal Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, No. 2, pp. 283-288, 1986.
- [7] E. H. Shehab-Eldin, P. G. McLaren. "Travelling Wave Distance Protection-problem Areas and Solutions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, No. 3, pp. 894-902, 1988.
- [8] P. F. Gale, P. A. Crossley, Xu Bingyin, Ge Yaozhong, B. J. Cory, J.R. G. Barker. "Fault location based on traveling waves", *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 54-59, 1993.
- [9] Albert Cohen and Jellena Kovacevic. "Wavelet: The Mathematical Background." Proc. IEEE. vol. 84, no. 4, April 1996. pp. 514-522.
- [10] Pongsak Markming, "Fault analysis in transmission line use wavelet transform" Thesis of master engineering electrical engineering. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2002, Thailand
- [11] H. Demuth and M. Beale. **Neural Network Toolbox User's Guide**. The Math Works, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12]] Manitoba HVDC Research Centre. **EMTDC : Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation**. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada 2003.
- [13][19] 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.
- [14] 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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้รับจากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สจล.

1. ผลงานวิจัย/ผลผลิตที่ได้จากการทำวิจัย และมี Impact ต่อสังคม, ประเทศชาติ
 1. โครงการวิจัยนี้เป็นการรวมกันของวิทยาการด้านต่างๆ คือ กระบวนการประมวลสัญญาณ ทฤษฎีระบบป้องกัน และ วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง เข้าด้วยกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกันของนักวิจัยในสาขาดังกล่าว ทั้งในด้านการแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็น นับเป็นการพัฒนาระดับงานวิจัยของประเทศ
 2. การศึกษาวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ นับได้ว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนผู้สนใจอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป
 3. ได้องค์ความรู้ของเทคโนโลยีที่เป็นของประเทศเราเอง โดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศ
2. การนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้
 1. วิธีวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแนวใหม่โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบความถี่สูงที่ได้จากสัญญาณฟอลต์แบบทรานเซียนต์ ซึ่งช่วยลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง จะส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาลดลงตามไปด้วย
 2. สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตและการใช้ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ตไปประยุกต์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้โดยการนำปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ร่วมด้วย เพื่อนำมาวางแผนป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังและซ่อมแซมบำรุงรักษาสายส่งต่อไป
3. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร หรือผลงานตามที่คาดไว้ในโครงการวิจัย
 - 3.1 การนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ นำเสนอบทความในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งสิ้น 1 บทความ (ภาคผนวก ข)
 1. A. Ngaopitakkul, and N. Suttisinthong, "Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Network Algorithm for Classification of Fault Type in Underground Cable" In *Proceedings of 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2012(ICMLC2012)*, Xian China, July 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างบทความประชุมวิชาการระดับนานาชาติที่ได้นำเสนอใน
ที่ประชุมระดับนานาชาติ

1. A. Ngaopitakkul, and N. Suttisinthong, "Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Network Algorithm for Classification of Fault Type in Underground Cable" *In Proceedings of 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2012(ICMLC2012)*, Xian China, July 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISCRETE WAVELET TRANSFORM AND PROBABILISTIC NEURAL NETWORK ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF FAULT TYPE IN UNDERGROUND CABLE

A. NGAOPITAKKUL¹, N. SUTTISINTHONG²

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Bangkok, 10520 THAILAND

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University, Bangkok, THAILAND
E-MAIL: knatthap@kmitl.ac.th

Abstract:

This paper proposes an algorithm based on a combination of the discrete wavelet transform (DWT) and probabilistic neural network (PNN) for classifying fault types on underground cable. The simulations and the training process for the PNN are performed using ATP/EMTP and MATLAB. The mother wavelet function $db4$ is employed to decompose high frequency components from these signals. The maximum coefficients of phase A, B, C and zero sequence for post-fault current waveforms are used as an input for the training pattern. Various studies based on Thailand electricity distribution underground systems have been investigated so that the algorithm can be implemented. The coefficients of DWT are also compared with those of PNN in this paper. The results show that the proposed algorithm is capable of performing the fault classification with satisfactory accuracy.

Keywords:

Fault Classification; Probabilistic Neural Network; Underground Cable; Wavelet Transform

1. Introduction

In the previous decade, several techniques [1-6] have been employed in the literature for fault classification on underground cable. Based on the transient-based techniques, the application of wavelet transform is used [7-9]. In [7], based on the methodology of wavelet transform and analysis of decomposed components, two detection and classification methods are proposed and tested for the detection of incipient faults in underground cables. In previous research works [9], considering the pattern of the spectra, the comparison of coefficients from first scale that can detect fault is considered. The division algorithm between the maximum coefficients of DWT at $\frac{1}{4}$ cycle of phase A, B, C is performed. In identifying the phase with fault appearance, the comparisons of the maximum ratio obtained from division

algorithm have been performed so that the types of fault can be analysed. Although the wavelet transform is very effective in detecting transient signals generated by the faults, but it may not be adequate to complete characterization.

In recent years, the artificial intelligence has been often employed for fault classification [10-14] due that the algorithm can give precise results. There are many types of artificial neural networks, only a few of these neuron-based structures, are being used commercially. Back-propagation neural network (BPNN) is the most well-known and widely applied today because it can solve almost all types of problems. In practice, BPNN is partly limited by the slow training performance. In order to overcome this problem, other neural network algorithm has been developed. The PNN is selected in the algorithm because it uses less training data and time compared with BPNN, which is normally employed in previous research work [15].

Hence, the objective of this paper is to consider study the decision algorithm of PNN used to classify fault type in underground distribution cable. The simulations, analysis, and diagnosis are performed using ATP/EMTP and MATLAB on a PC Pentium IV 2.2 GHz 3GB. It is noted that the DWT is employed in extracting the high frequency component contained in the fault currents, and the coefficients of the first scale from the DWT that can detect fault are investigated. The construction of the decision algorithm is detailed and implemented with various case studies based on Thailand electricity underground distribution systems.

2. Simulation

The ATP/EMTP [16] is employed to simulate fault signals, at a sampling rate of 200 kHz. The system employed in case studies is chosen based on the underground distribution system as illustrated in Figure 1. In addition, a cross-sectional view of a cable is shown in Figure 2. To avoid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

exity, the fault resistance is assumed to be 10Ω . Fault is in the simulations are performed with various es of system parameters as follows:

Fault types are single line to ground, double lines to l, line to line, and three-phase fault.

Fault locations are from 1 km to 5 km (each step = 1 of the underground cable length measured from the g end

Fault inception angles on the phase A voltage orm are varied from 0° to 150° with a step of 30°

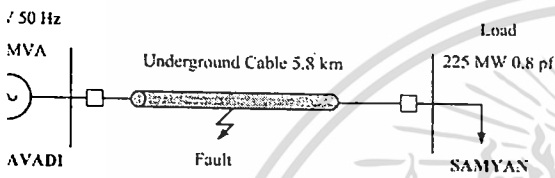


Figure 1. The system used in simulation studies [17].

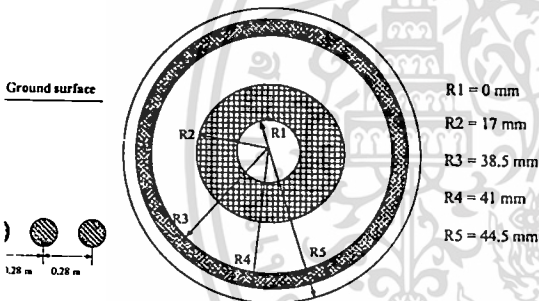
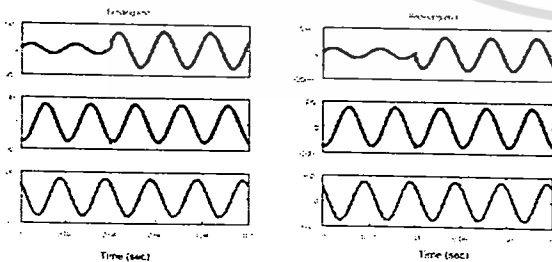


Figure 2 The configuration of cable in simulation studies

Example of ATP/EMTP simulated fault signals is ated in Figure 3. This is a fault occurring in phase A to l at 1 km measured from the sending bus as depicted in 1. The fault signals generated using ATP/EMTP are ced to MATLAB for the fault detection algorithm.



3 Example of ATP/EMTP simulated fault signals for AG fault at sending end.

3. Fault Detection Decision Algorithm

Fault detection decision algorithm is processed using positive sequence current signal. Fault signals generated using ATP/EMTP are imported to the MATLAB/Simulink in order to analyse the high frequency transient components, which are superimposed in the fault current signals, by discrete wavelet transform (DWT) using the wavelet toolbox. The Clark's transformation matrix is employed for calculating the positive sequence and zero sequence of currents. With several trial and error processes, the fault detection decision algorithm on the basis of computer programming technique is constructed as shown in Figure 4. The mother wavelet daubechies4 (db4) is employed to decompose high frequency components from the positive sequence current signals.

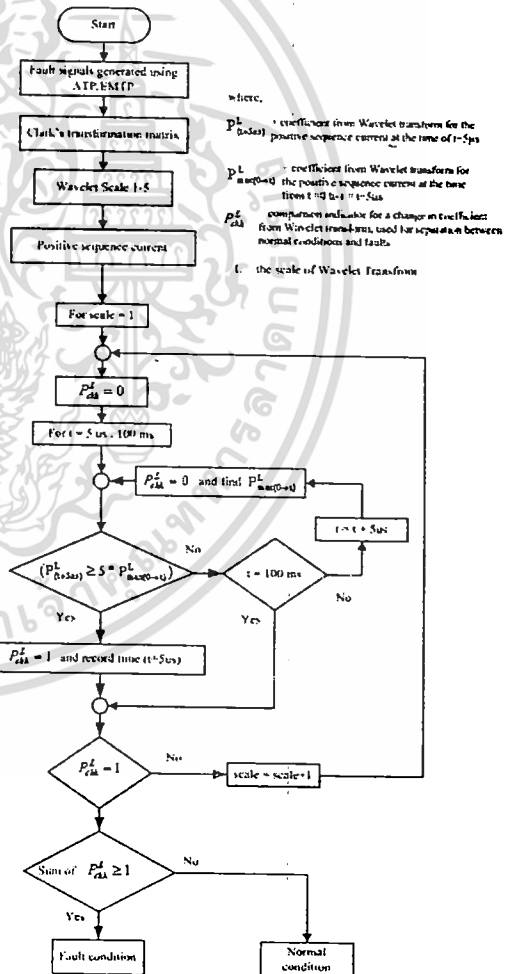
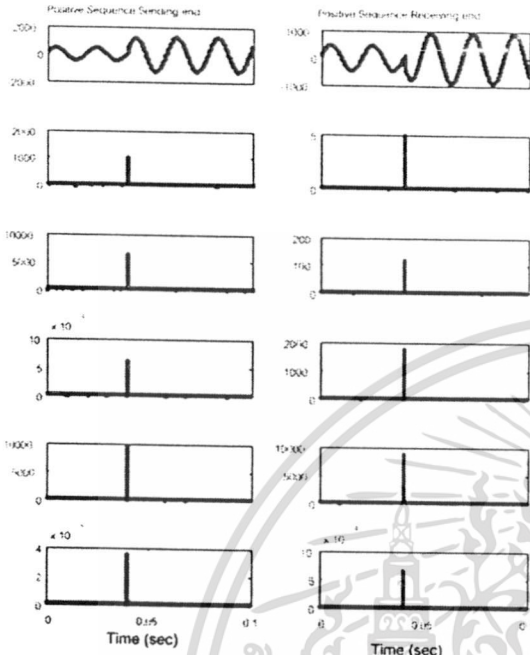


Figure 4 Flowchart for fault detection.



5. DWT from scale 1 to 5 for the positive sequence of current shown in Figure 3.

applying the DWT to the positive sequence currents, the variation of the coefficients from each scale is under investigation. Coefficients obtained using DWT of signals are used so that the abrupt change in the spectra can be clearly observed, and it is clearly seen that the coefficients of high frequency components, when fault occurs, have a sudden change compared with those before an occurrence of the

faults. This sudden change is used as an index for the occurrence of faults as shown in Figure 5. The fault detection decision algorithm has been proposed that if coefficients of any scales are change around five times before an occurrence of the faults, there are faults occurring in underground cable. The coefficients of the first scale from the DWT that can detect fault are investigated for training and test processes of the PNN.

4. Decision Algorithm and Results

From the simulated signals, DWT is applied to the quarter cycle of current waveforms after the fault inception. The mother wavelet daubechies4 (db4) [2, 4, 10, 15] is employed to decompose high frequency components from the current signals. Coefficients obtained using DWT of signals are squared as shown in Figure 5. The coefficients of scale 1 obtained using the DWT are used for training and test processes of the PNN.

A training process is performed using neural network toolboxes in MATLAB [18]. Before the training process, input data sets are normalized and divided into 300 sets for training and 150 sets for tests. A structure of the PNN consists of 4 neurons for the inputs and 1 neuron for the output while the number of neurons in radial basis layer is 300 neurons (due that the number of neurons is always equal to the number of training sets). The inputs patterns are maximum values of DWT at 1/4 cycle of phase A, B, C and zero sequence for post-fault current waveforms as shown in Figure 6. The output variables of the PNN are designated as value range from 1 to 10, corresponding to various types of fault as shown in Table 1.

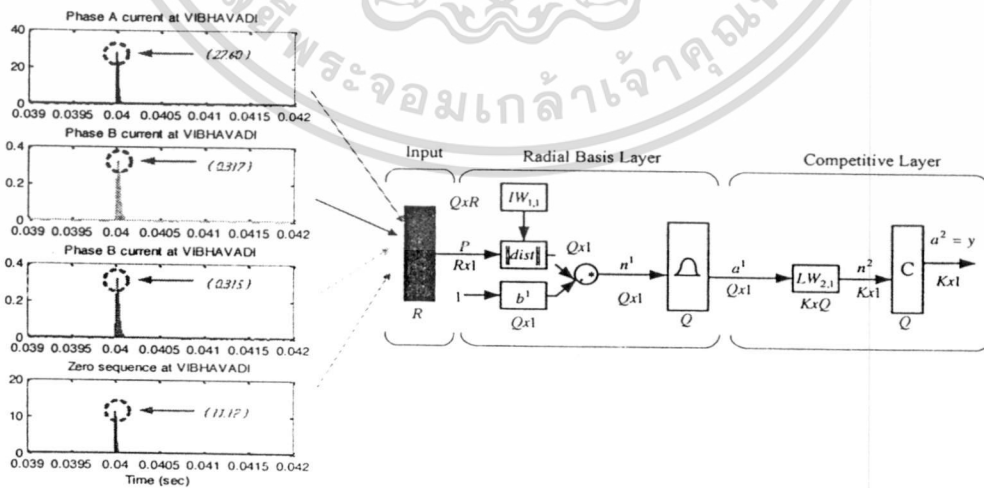


Figure 6 Probabilistic neural networks with input patterns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1. THE OUTPUT OF PNN FOR CLASSIFYING THE FAULT TYPES

Output of PNN	Classification of fault type	Types of fault
1	Phase A to ground fault	AG
2	Phase B to ground fault	BG
3	Phase C to ground fault	CG
4	Phase A,B to ground fault	ABG
5	Phase B,C to ground fault	CAG
6	Phase C,A to ground fault	BCG
7	Three phase fault	ABC
8	Phase A to phase B fault	AB
9	Phase C to phase A fault	CA
10	Phase B to phase C fault	BC

Training process of PNN involves two stages as follows :

Input values are propagated to each neuron in the first layer. Radial basis layer computes distance from the input vector to the center vector, and produces output in radial basis layer as shown in Equation 1.

$$\phi(p) = \exp\left(-\frac{\|p - IW_{1,i}\|^2}{\sigma_j^2}\right) \quad (1)$$

p is the input pattern vector
 $IW_{1,i}$ is the center vector of radial basis layer
 σ_j^2 is the spread constant for radial basis layer, which corresponds to bias value ($b = \frac{0.8326}{Spread}$)
 $\phi(p)$ is the output of radial basis layer

Each neuron in the competitive layer receives all radial basis layer outputs associated with a given class, and produces, as its output, a vector of probabilities. Finally, a competitive activation function on the output of the competitive layer picks maximum of these probabilities, and produces a 1 for that class and a 0 for the other classes as shown in Equation 2 [18].

$$O/P_{ANN} = f^4(LW_{2,i} * \phi(p)) \quad (2)$$

$LW_{2,i}$ = weight vector between radial basis layer and competitive layer
 f^4 = competitive activation function

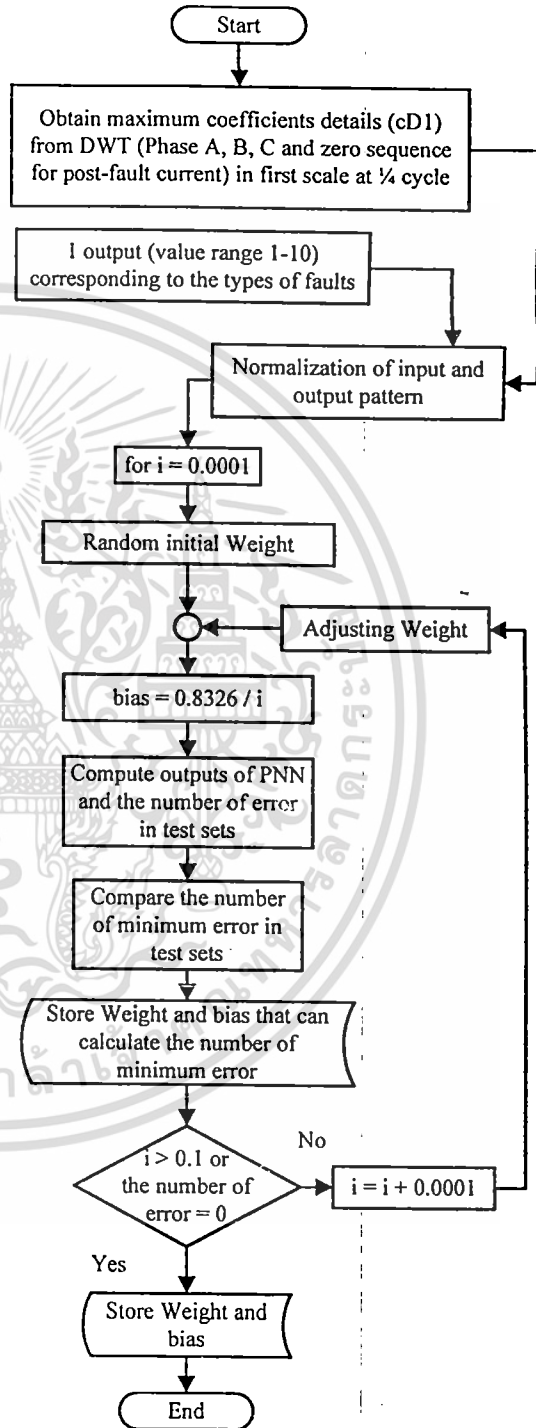


Figure 7 Flowchart for the training process

- underground cable", 2011 IEEE Region 10 Conference (TENCON2011), pp. 1379-1382, November 2011.
- Uppendar, C.P. Gupta and G.K. Singh, "Fault Classification Scheme Based on the Adaptive Resonance Theory Neural Network for Protection of Transmission Lines", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 424-444, 2010.
- Hai Nguyen and Yuan Liao, "Transmission Line Fault Type Classification Based on Novel Features and Neuro-fuzzy System", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 38, No. 6, pp. 695-709, 2010.
- Arlochan S. Sidhu and Zhihan Xu, "Detection of Incipient Faults in Distribution Underground Cables", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, pp. 1363-1371, 2010.
- Sayed Tag El Din, Mahmoud Gilany, Mohamed Amdouh Abdel Aziz, Doaa Khalil Ibrahim "A wavelet based fault location technique for aged power cables", *IEEE Power Engineering Society*, Vol.3, pp.2485-2491, 2005.
- Apisit and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Underground Cable using Discrete Wavelet Transform", *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010*, pp.1262-1266.
- Chiradeja and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet Transforms and Artificial Neural Networks", *The International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists 2009 (IMECS2009)*, Vol.2, pp. 1520 - 1525, March 2009.
- [11] O. A. S. Youssef, "Combined Fuzzy-logic Wavelet-based Fault Classification Technique for Power System Relaying", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, pp. 582-589, 2004.
- [12] A.K. Pradhan, A. Routray, S. Pati and D.K. Pradhan, "Wavelet Fuzzy Combined Approach for Fault Classification of a Series-compensated Transmission Line", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 4, pp. 1612-1618, 2004.
- [13] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 21, No. 4, pp. 2058-2063, 2006.
- [14] V. Malathi and N.S. Marimuthu, "Multi-class Support Vector Machine approach for fault classification in power transmission line", *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET2008)*, Singapore, pp. 67-71, November 2008.
- [15] A. Ngaopitakkul and C. Jettanasen, "Combination of Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Network Algorithm for Detecting Fault Location on Transmission System", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 7, No. 4, pp. 1861-1874, April 2011.
- [16] D. Van Dommelen, *Alternative Transient Program Rule Book*, Leuven EMTP Center, Belgium, 1991.
- [17] EGAT, *Switching and Transmission Line Diagram*, EGAT Press, 1999.
- [18] H. Demuth and M. Beale, *Neural Network Toolbox User's Guide*, The Math Work, Inc., March 2001.

Power System Control, Operation and Management (APSCOM2009) , Paper No. APSCOM2009-47, Hong Kong, November 2009.

C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation Neural Networks Algorithm for Fault Classification on Transmission Line" *In Proceedings of IEEE International Conference on Transmission and Distribution (T&D Asia 2009)*, Korea, October 2009.

P. Chiradeja, and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet transform and Artificial Neural Networks" *In Proceedings of 2009 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2009 (IMECS2009)*, Hong Kong, March 2009.

A. Ngaopitakkul and C. Pothisarn, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation neural networks algorithm for fault location on Single-circuit transmission line" *In Proceedings of 2004 International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008)*, Thailand, February 2009.

A. Ngaopitakkul, W. Pongchaisrikul, and A.Kunakorn, "Analysis of Characteristics of Simultaneous Faults in Electrical Power Systems using Wavelet Transform," *In Proceedings of the 1st International Conference Sustainable Energy Technologies (ICSET2008)*, Singapore, November 2008.

T. Patcharoen, A. Ngaopitakkul and A.Kunakorn, "Identification of fault types for a three-bus transmission network using Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks," *In Proceedings of the 8th International Power Engineering Conference (IPEC2007)*, Paper No. conf122a641, Singapore, December 2007.

c) National Conference Papers

1. A. Ngaopitakkul, S. Jonpermpoonpol and C. Pothisarn, "Studies of Turn to turn Fault in Power Transformer Using Discrete Wavelet Transform," *In Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, pp.391-394, 28-30 October 2009.
2. S. Jonpermpoonpol, A. Ngaopitakkul. "Studies of Winding to ground Fault in Power Transformer Using Discrete Wavelet Transform," *In Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, pp.383-386, 28-30 October 2009.
3. S. Surisunthon, A. Ngaopitakkul, "Miscalculation Fault location due to behavior of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Discrete Wavelet Transform," *In Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, pp.239-242, 28-30 October 2009.
4. W. Pongchaisrikul, A. Ngaopitakkul, and A.Kunakorn, "Studies of Characteristics of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Discrete Wavelet Transform," *In Proceedings of the 31st Electrical Engineering Conference (EECON31)*, Vol. 1, 25-26 October 2008.
5. A. Ngaopitakkul, T. Patcharoen, A.Kunakorn, and S. Bunjongjit, "Application of Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks for Detecting Fault Location in Electrical Transmission Systems," *In Proceedings of the 30th Electrical Engineering Conference (EECON30)*, Vol. 1, Paper PW074, 25-26 October 2007.

d) Book

1. Atthapol Ngaopitakkul, "Electrical Transmission Systems," Ladkrabang Book, 2009, ISBN 978-974-8308-98-2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติการทำงานที่สำคัญ และ Professional Activities

Reviewer : The 11th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2010), Nagaoka, Japan.

Reviewer : ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, Communication.

Reviewer : IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008), Bangkok, Thailand, 2008.

Committee : IEEJ-EIT Joint Symposium : Advanced Technology in Power Systems (2008-2009)

Committee : Illuminating Engineering Association of Thailand (TIEA) (Jan 2008 – Present)

Committee : Thai Mechanical and Electrical Design and Consulting Engineer Association (MECT) (Oct 2008 – Present)

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

- Dec 2009 – Nov 2011 Head of Research Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent Algorithm for Simultaneous Fault Diagnosis in Electrical Power Transmission Systems” {Supported by the King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Fund, Thailand}
- Oct 2009 – Sep 2010 Head of Research Project “Fault Diagnosis in Underground Cable Systems using Discrete Wavelet Transform” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand}
- Oct 2008 – Sep 2009 Researcher of Project “Fault Analysis on Single Circuit Transmission line Using Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}
- Oct 2007 – Sep 2008 Researcher of Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Neural Network for Fault Diagnosis in Transmission Systems” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}

2. ชื่อ

(ภาษาไทย) ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน

(ภาษาอังกฤษ) Chaiyan Jettanasen, Ph.D.

รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ (ถ้ามี)

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 Email kjchaiya@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาเอก Ph.D. of Electrical Engineering (Docteur en Génie Electrique), Ecole Centrale de Lyon, France ปีที่จบ พ.ศ.2551
- ปริญญาตรี-โท Master of Electrical Engineering (Master de Recherche en Génie Electrique) / Diploma of Electrical Engineering (Diplôme d’ingénieur), Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France ปีที่จบ พ.ศ. 2548

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

EMI/EMC in power electronic systems, ESD in electric/electronic system, Conversion of electrical energy, Power electronics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้