

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพระองค์นิคมพีแดนซ์สูง

นางสาวบุศรินทร์ พันธุ์กระจับ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARATIVE STUDY ON HIGH IMPEDANCE FAULT DETECTION METHODS

Miss Bussarin Puntgrajub



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพระองค์ชนิด อิมพีแดนซ์สูง
โดย	นางสาวบุศรินทร์ พันธุ์กระจับ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุ่นเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. วุฒิกร ตริวิทยานนท์)

บุศรินทร์ พันธุ์กระจับ : การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง (A COMPARATIVE STUDY ON HIGH IMPEDANCE FAULT DETECTION METHODS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล, 95 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมกับวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก สัญญาณกระแสผิดปกติของแต่ละเฟสจะผ่านกระบวนการการแปลงเวฟเล็ตก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและผ่านการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วก่อนนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิก โดยได้ศึกษาพิจารณาหากระบวนการและเกณฑ์ที่เหมาะสมของแต่ละวิธีในการตัดสินใจว่าเป็นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง การทดสอบสมรรถภาพในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะใช้ข้อมูลเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงและข้อมูลเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP จากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดปกติแบบดิจิทัลที่ติดตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้าและจากการทดลองจริงในภาคสนาม

ผลจากการทดสอบด้วยข้อมูลจำนวนทั้งสิ้น 111 เหตุการณ์ พบว่าวิธีโครงข่ายประสาทเทียมให้ความถูกต้องในการระบุความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงร้อยละ 98.2 น้อยกว่าวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่ให้ความถูกต้องร้อยละ 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670265421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HIGH IMPEDANCE FAULT / WAVELET TRANSFORM / HARMONIC ANALYSIS /
FOURIER TRANSFORM / PATTERN RECOGNITION

BUSSARIN PUNTGRAJUB: A COMPARATIVE STUDY ON HIGH IMPEDANCE FAULT
DETECTION METHODS. ADVISOR: CHANNARONG BANMONKOL, D.Eng., 95 pp.

This thesis presents a comparative study on high-impedance fault detection methods using Artificial Neural Network (ANN) and Harmonic Analysis (HA). The signal of fault current in each phase is processed by wavelet transform and then analyzed with ANN. On the other hand, it is processed by fast fourier transform and then analyzed with HA. The process and criteria of each method for high-impedance fault detection are proposed. The effectiveness of both methods was tested using data of high-impedance faults and non-high-impedance faults. These data were obtained from simulation with EMTP, digital fault recorders located in substations and field tests.

From the total test data of 111 cases, the ANN method could detect high-impedance fault with 98.2% accuracy. The HA method performed better with 100% accuracy.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และการปรับปรุงแก้ไข วิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย ผศ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ และ ดร. วุฒิกร ตริวิทยานนท์ ที่เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคุณชาญชัย พงศ์สุวรรณ สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณข้อมูลทดสอบจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ รอบตัวผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอก ห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา และกำลังใจในการวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง.....	4
2.1.1 คุณลักษณะของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง	4
2.1.2 สาเหตุการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง.....	6
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง	9
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง	10
2.2 ตัวอย่างงานวิจัยในอดีต.....	12
2.2.1 การตรวจจับเชิงกล (Mechanical Detection).....	12
2.2.2 การตรวจจับเชิงไฟฟ้า (Electrical Detection).....	12
2.3 การรู้จำรูปแบบ.....	16

2.3.1	ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการรู้จำรูปแบบ	16
2.3.2	ประเภทของการรู้จำรูปแบบ	17
2.3.3	โครงข่ายประสาทเทียม.....	17
2.3.3.1	ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Functions).....	18
2.3.3.2	ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม.....	19
2.3.3.3	การเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	20
2.4	การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform).....	24
2.4.1	พื้นฐานการแปลงเวฟเล็ต.....	25
2.4.2	การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform).....	27
2.4.3	การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform).....	27
2.4.3.1	การวิเคราะห์สัญญาณแบบความละเอียดหลายชั้น(Multiresolution Analysis).....	28
2.4.3.2	การวิเคราะห์สัญญาณแบบใช้ชุดตัวกรอง (Filter bank Analysis).....	30
2.4.4	ตัวอย่างตระกูลเวฟเล็ตแม่ (Mother wavelets).....	34
2.5	การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analysis).....	36
2.5.1	อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series).....	37
2.5.2	การแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform).....	38
2.5.3	การแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform).....	40
บทที่ 3	เทคนิคการประยุกต์ใช้วิธีตรวจจับความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง	44
3.1	แบบจำลองความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง.....	44
3.2	ระบบทดสอบ.....	45
3.2.1	การจำลองเหตุการณ์	46
3.2.2	ข้อมูลจากการทดลองภาคสนาม	53

3.2.3 ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดปกติพร้อม	53
3.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม	54
3.3.1 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	59
3.4 การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก	62
3.4.1 การวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม	62
3.4.2 การทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก	63
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	66
4.1 ผลการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	66
4.1.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียม	66
4.1.2 ผลการทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	75
4.2 ผลการประยุกต์เมื่อใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	79
4.2.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม.....	79
4.2.2 ผลการทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	82
4.4 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก	86
4.4.1 ความแม่นยำถูกต้องในการตรวจจับ	86
4.4.2 ความซับซ้อนในการคำนวณของการวิเคราะห์ข้อมูล	86
4.4.3 ข้อดีและข้อจำกัด.....	87
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	89
5.1 บทสรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
รายการอ้างอิง	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ขนาดกระแสอาร์ก ๓ พื้นผิวสัมผัสต่างๆ.....	7
ตารางที่ 3-1 ข้อมูลของสายชนิด APC Type 2.....	46
ตารางที่ 3-2 ลักษณะพื้นผิวทดลองของข้อมูลทดสอบ.....	53
ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ด.....	55
ตารางที่ 3-4 ผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	58
ตารางที่ 3-5 จำนวนข้อมูลสำหรับการสร้างและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม.....	60
ตารางที่ 4-1 confusion table ของเวฟเล็ดแม่ Db6.....	74
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบการตรวจจับเมื่อใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	75
ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบการตรวจจับ HIF เมื่อใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	82
ตารางที่ 4-4 ข้อดีและข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	87

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสัญญาณเมื่อเกิดความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูง	6
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสอาร์กที่สภาพพื้นผิวต่างๆ.....	8
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำงานพื้นฐานของการรู้จำรูปแบบ.....	16
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	18
รูปที่ 2.5 Hard – Limit transfer function.....	18
รูปที่ 2.6 Linear transfer function	19
รูปที่ 2.7 Log – Sigmoid transfer function	19
รูปที่ 2.8 Tan – Sigmoid transfer function	19
รูปที่ 2.9 โครงข่ายแบบหลายชั้น	20
รูปที่ 2.10 ความละเอียดการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้วิธีต่างๆ	24
รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ถูกปรับขนาดและเลื่อนตำแหน่ง.....	26
รูปที่ 2.12 ลักษณะการแยกส่วนประกอบของสัญญาณที่ความละเอียดต่างๆ.....	30
รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ชุดตัวกรอง.....	31
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยระดับขั้นการแปลง 4 ระดับ	33
รูปที่ 2.15 ลักษณะเวฟเล็ตตระกูล Daubechies	34
รูปที่ 2.16 ลักษณะเวฟเล็ตตระกูล Symlets.....	35
รูปที่ 2.17 ลักษณะเวฟเล็ตตระกูล Coiflets.....	35
รูปที่ 2.18 ลักษณะเวฟเล็ตตระกูล Biorthogonal	36
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการคำนวณการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว เมื่อ $N = 8$	42
รูปที่ 3.1 ลักษณะของตำแหน่งสายไฟฟ้าชนิด APC-Type 2	46
รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้ากรณีเกิดการลัดวงจรผ่านแบบจำลอง HIF.....	47

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 1 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.002$ $\tau = 0.3$ 48

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 2 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.002$ $\tau = 0.3$ 48

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแสจุดตรวจวัดที่ 1 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.0002$ $\tau = 0.5$ 49

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแสจุดตรวจวัดที่ 2 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.0002$ $\tau = 0.5$ 50

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 1 กรณีเกิด LIF เมื่อ $R = 1$ Ω51

รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้ากรณีสับตัวเก็บประจุเข้าระบบไฟฟ้า52

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 1 กรณีสับตัวเก็บประจุที่เวลา 0.2 s.....52

รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการไหลของข้อมูล.....54

รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการสร้างเวกเตอร์คุณลักษณะ54

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างสัญญาณ HIF ที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนโครงข่าย56

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างสัญญาณ LIF ที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนโครงข่าย.....56

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างสัญญาณ NON FAULT ที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนโครงข่าย.....57

รูปที่ 3.15 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม58

รูปที่ 3.16 แผนผังการตรวจจับ HIF โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม61

รูปที่ 3.17 แผนผังการตรวจจับ HIF โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก64

รูปที่ 4.1 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 3066

รูปที่ 4.2 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 4067

รูปที่ 4.3 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 5068

รูปที่ 4.4 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 30 เมื่อเปลี่ยนประเภทลักษณะเด่น.....69

รูปที่ 4.5 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40 เมื่อเปลี่ยนประเภทลักษณะเด่น.....	69
รูปที่ 4.6 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 50 เมื่อเปลี่ยนประเภทลักษณะเด่น.....	70
รูปที่ 4.7 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเวฟเล็ตระกูล Daubechies เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน	70
รูปที่ 4.8 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเวฟเล็ตระกูล Symlets เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน	71
รูปที่ 4.9 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเวฟเล็ตระกูล Coiflets เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน	71
รูปที่ 4.10 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของตระกูล Biorthogaonal เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน	72
รูปที่ 4.11 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของตระกูล Reverse Bior. เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน	72
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณี HIF จากการจำลอง.....	76
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณี LIF จากการจำลอง	77
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณีสับตัวเก็บประจุจากการจำลอง	77
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายกรณี HIF จากข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 1....	78
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณี LIF จากข้อมูลของเครื่องบันทึก.....	78
รูปที่ 4.17 กระแสฮาร์มอนิกกรณีความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูง เมื่อความต้านทานพื้นผิว 500 Ω.....	79
รูปที่ 4.18 กระแสฮาร์มอนิกกรณีความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงเมื่อความต้านทานพื้นผิว 5000 Ω.....	80
รูปที่ 4.19 กระแสฮาร์มอนิกกรณีความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำความต้านทานลัดวงจร 1 Ω	80
รูปที่ 4.20 ส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกกรณีสับตัวเก็บประจุที่เวลา 0.2 วินาที	81
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 1	83
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 2	83
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 3	84
รูปที่ 4.24 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 4	84

รูปที่ 4.25 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์โมนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 5	85
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์โมนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 6	85



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าการตรวจจับและแก้ไขเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้น สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent relay), รีเลย์ระยะทาง (Distance relay), ฟิวส์ (Fuse) หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) เป็นต้น โดยอุปกรณ์ป้องกันข้างต้นจะทำงานก็ต่อเมื่อเกิดความผิดปกติที่ทำให้ระดับแรงดันและระดับกระแสเพิ่มขึ้นหรือลดลงต่างไปจากที่อุปกรณ์ป้องกันกำหนดไว้ โดยส่วนใหญ่ในระบบไฟฟ้ามักเกิดเหตุการณ์ความผิดปกติที่ก่อให้เกิดกระแสผิดปกติที่ค่อนข้างสูง หรือเรียกอีกอย่างว่า ความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำซึ่งกระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับได้ง่ายเพราะมีระดับกระแสเกินกว่าที่กำหนด แต่ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติที่มีค่ากระแสผิดปกติต่ำ หรือเรียกอีกอย่างว่า ความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูง อุปกรณ์ป้องกันจะตรวจจับได้ยาก เพราะมีค่ากระแสผิดปกติที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกระแสโหลดจึงทำให้ระดับกระแสที่ตรวจวัดได้ที่สถานีไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักทำให้รีเลย์ป้องกันตรวจจับไม่พบ

โดยทั่วไปความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Fault : HIF) พบบ่อยในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายตัวนำแบบหุ้มฉนวนเดินในอากาศซึ่งเกิดจากการที่สายตัวนำขาดตกลงสู่พื้น เช่น ดิน, ทราย, คอนกรีต, กรวด หรือพื้นผิวชนิดอื่นๆ เป็นต้น หรือเกิดจากการที่สายตัวนำแบบเปลือยไม่หุ้มฉนวนสัมผัสกับวัตถุ เช่น ต้นไม้ เป็นต้น แต่ในขณะที่เกิดความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูงแล้วอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินตรวจจับไม่ได้จึงทำให้อุปกรณ์ป้องกันไม่ได้ตัดวงจรไฟฟ้าที่ยังคงมีพลังงานอยู่ออกไปซึ่งอาจเป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดอัคคีภัยและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและทรัพย์สินที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงที่เกิดเหตุได้

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคหรือกระบวนการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการตรวจจับความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูงหลากหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูงระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ซึ่งทั้งสองวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในการตรวจจับความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาเทคนิคการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก
- 2) ทดสอบวิธีการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูงระหว่างการใช้โครงข่ายประสาท เทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก
- 3) เปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูงระหว่างการใช้โครงข่ายประสาท เทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมีอัตราความถี่สุ่มเท่ากัน
- 2) ข้อมูลทดสอบแบ่งเหตุการณ์ออกเป็นสองกลุ่ม ดังนี้กลุ่มที่หนึ่งเป็นเหตุการณ์ความผิดพร้อม ชนิดอิมพีแดนซ์สูง กลุ่มที่สองเป็นเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูง ใน งานวิจัยพิจารณาเฉพาะกรณีความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำเกิดการลัดวงจรแบบเฟสเดียว และการสับสวิตช์ของตัวเก็บประจุ
- 3) ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพร้อมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ข้อมูล ตั้งแต่ปี พ.ศ 2556 – 2558 โดยพิจารณาจากรายงานการวิเคราะห์ความผิดพร้อม
- 4) แก้ปัญหาการรู้จำรูปแบบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษารูปแบบและคุณลักษณะการเกิดความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- 2) ศึกษาการจำลองการเกิดความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- 3) ศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- 4) เลือกรูปแบบที่ใช้ตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- 5) ทดสอบการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- 6) เปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพร้อมชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

- 7) สรุปลและเรียบเรียงผลงานการวิจัย
- 8) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เทคนิควิธีที่เหมาะสมในการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- 2) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงในระบบไฟฟ้าได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้ หัวข้อ 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง และหัวข้อ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง นอกจากนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิควิธีการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงในหัวข้อ 2.3 การรู้จำรูปแบบ หัวข้อ 2.4 การแปลงเวฟเล็ต และหัวข้อ 2.5 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ตามลำดับ

2.1 ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงหากเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามักตรวจจับด้วยอุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีเลย์กระแสเกิน, รีเลย์ระยะทางหรือฟิวส์ ค่อนข้างยาก เนื่องจากขณะเกิดความผิดปกติจะก่อให้เกิดกระแสผิดปกติที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกระแสโหลดจึงทำให้ระดับกระแสที่วัดได้ไม่ต่างจากระดับกระแสในสภาวะปกติส่งผลให้รีเลย์กระแสเกินไม่สามารถตรวจจับได้ สายไฟฟ้าจึงยังคงมีพลังงานอยู่ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและทรัพย์สินที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์หัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง, สาเหตุการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง, ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง และปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ในหัวข้อย่อยถัดไปตามลำดับ

2.1.1 คุณลักษณะของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

โดยทั่วไปคุณลักษณะของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีลักษณะดังนี้ [1],[2],[3],[4],[5]

- 1) กระแสผิดปกติค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกระแสโหลดหรือไม่มีกระแสผิดปกติเกิดขึ้น
- 2) ลักษณะรูปแบบการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงไม่แน่นอน
- 3) สัญญาณมีส่วนประกอบของความถี่สูงและส่วนประกอบฮาร์มอนิก
- 4) ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าน้อย
- 5) รูปคลื่นมีความสมมาตร เนื่องจากค่ากระแสผิดปกติของครึ่งคาบบวกและครึ่งคาบลบมีค่าสัมบูรณ์แตกต่างกัน
- 6) มีความไม่เป็นเชิงเส้น เพราะลักษณะกราฟระหว่างแรงดันและกระแสไม่เป็นเชิงเส้นเป็นผลมาจากการเกิดอาร์กอิมพีแดนซ์

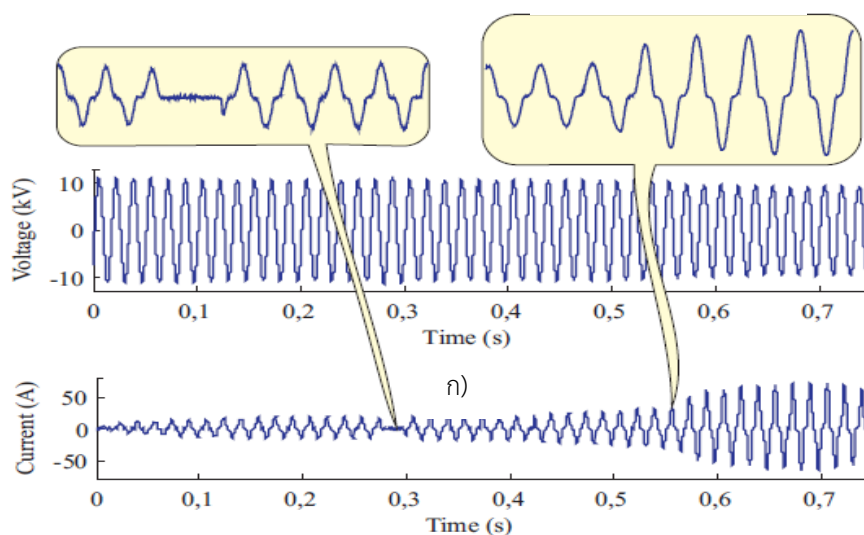
- 7) ขนาดของกระแสอาร์คค่อยๆเพิ่มขึ้นไปยังค่าสูงสุด
- 8) บางครั้งสายไฟฟ้าที่ยังคงมีพลังงานจะหยุดสัมผัสกับพื้นเป็นระยะๆทำให้กระแสอาร์คหายไปเป็นบางช่วง
- 9) ขนาดของกระแสผิดพลาดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของอิมพีแดนซ์และการเชื่อมต่อของกระแสไหลต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 สายไฟฟ้าที่มีพลังงานอยู่เกิดขาดและตกลงสัมผัสกับพื้นที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้ค่ากระแสไหลตที่สถานีไฟฟ้าตรวจวัดได้ลดลง เพราะกระแสไหลต ณ ตำแหน่งที่สายขาดมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าสมมติให้ค่ากระแสผิดพลาดน้อยกว่ากระแสไหลต

กรณีที่ 2 สายไฟฟ้าที่มีพลังงานอยู่ตกลงพื้นแต่ไม่ขาดและสัมผัสกับอิมพีแดนซ์ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้ค่ากระแสที่สถานีไฟฟ้าตรวจวัดได้มีค่าเท่ากับค่ากระแสไหลตบวกกับค่ากระแสผิดพลาด

- 10) ขนาดของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามขึ้นอยู่กับความไม่เป็นเชิงเส้นของอาร์กอิมพีแดนซ์ ถ้าความไม่เป็นเชิงเส้นยิ่งสูงขึ้นจะทำให้กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามมากขึ้นตามไปด้วย
- 11) ขนาดของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามจะมีค่ามากกว่าขนาดของกระแสฮาร์โมนิกอันดับอื่นๆ
- 12) ค่ามุมเฟสของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามอาจอยู่ระหว่าง 50 – 90 องศา และตามหลังมุมเฟสของแรงดันอยู่ที่ 180 – 220 องศา ทั้งนี้มุมเฟสของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามจะลดลง ถ้ามีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงขึ้น นอกจากนี้มุมเฟสของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามยังได้รับผลกระทบจากตัวเก็บประจุอีกด้วย ถ้าติดตั้งตัวเก็บประจุที่ยังมีขนาดเล็กจะทำให้มุมเฟสของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามยิ่งเพิ่มสูงขึ้น
- 13) ในสภาวะปกติจะมีกระแสลำดับลบปรากฏอยู่เสมอ เนื่องจากเกิดโหนดไม่สมดุลในระบบจำหน่ายและขณะที่เกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงก็เกิดกระแสลำดับลบด้วยเช่นกัน ดังนั้นกระแสลำดับลบจึงยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง

จากคุณลักษณะความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงข้างต้น สามารถแสดงตัวอย่างสัญญาณกระแสและแรงดันขณะเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ดังรูปที่ 2.1 [2]



ข)

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสัญญาณเมื่อเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

ก) สัญญาณแรงดัน ข) สัญญาณกระแส

2.1.2 สาเหตุการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีดังนี้ [1],[6]

1) สายไฟฟ้าขาดสัมผัสกับพื้น (Downed conductor)

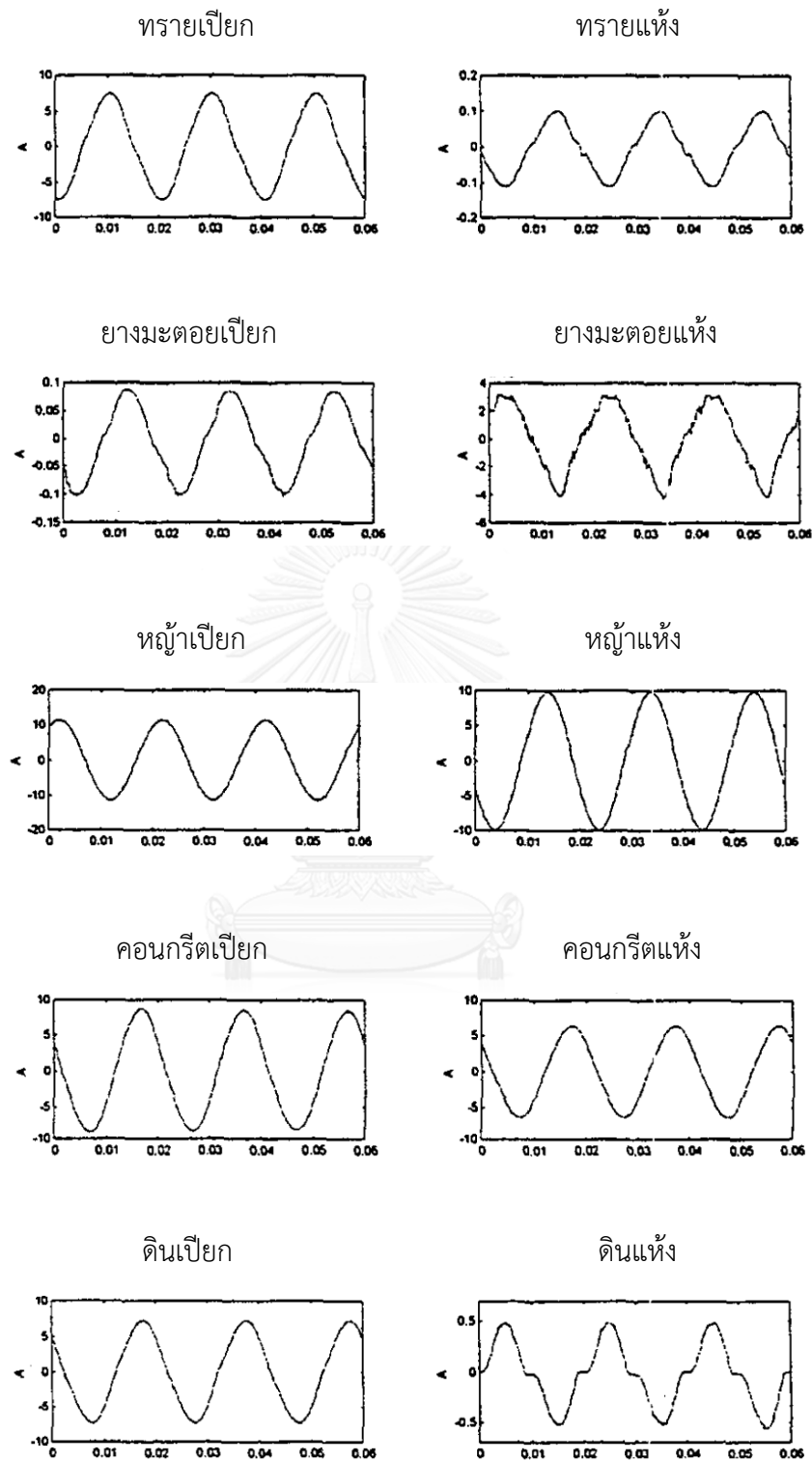
สายไฟฟ้าขาดสัมผัสพื้นมักเกิดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายไฟฟ้าแบบหุ้มฉนวนเดินในอากาศ เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้า ณ บริเวณนั้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้สายไฟฟ้านั้นเกิดความเสียหายและสามารถพัฒนาไปสู่การเกิดอาร์กขึ้นได้หากไม่ได้รับการแก้ไข

เมื่อสายไฟฟ้าที่ยังมีพลังงานอยู่เกิดการสัมผัสกับพื้นหรือวัตถุจะเกิดอาร์กขึ้นระหว่างสายไฟฟ้ากับจุดสัมผัสนั้นๆ โดยกระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นขณะเกิดอาร์กนั้นจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องกัน และเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่แน่นอนเป็นผลมาจากความร้อนของอาร์กที่ทำให้คุณสมบัติของวัตถุเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรณีสายไฟฟ้าสัมผัสกับพื้นดิน ความร้อนที่เกิดจากอาร์กทำให้ความชื้นในดินลดน้อยลงส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น กระแสที่ไหลผ่านจึงมีค่าลดลงไปด้วย เป็นต้น ดังนั้นกระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นอาจมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของพื้นผิวที่สายไฟฟ้าได้สัมผัส ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2-1 ขนาดกระแสอาร์ก ณ พื้นผิวสัมผัสต่างๆ

พื้นผิว	ขนาดกระแส (A)
ยางมะตอยแห้ง	0
คอนกรีต(แบบไม่เสริมกำลัง)	0
ทรายแห้ง	0
ทรายเปียก	15
ดินแห้ง	20
หญ้าแห้ง	25
ดินเปียก	40
หญ้าเปียก	50
คอนกรีต(แบบเสริมกำลัง)	75

ตารางที่ 2.1 [5] เป็นตัวอย่างขนาดกระแสอาร์กที่เกิดจากสายไฟฟ้าสัมผัสกับพื้นผิวที่แตกต่างกันที่ระดับแรงดัน 12.5 kV โดยขนาดกระแสอาร์กสามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ 0 – 75 A นอกจากนี้สภาพของพื้นผิวสัมผัสที่ต่างกันยังส่งผลต่อลักษณะรูปคลื่นของกระแสอาร์ก แสดงดังรูปที่ 2.2 [6]



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสะอาร์กที่สภาพพื้นผิวต่างๆ

2) สายไฟฟ้าสัมผัสกับวัตถุอื่น (Intact conductor)

สายไฟฟ้าสัมผัสกับวัตถุอื่นมักเกิดขึ้นกับสายไฟฟ้าแบบสายเปลือยไม่หุ้มฉนวนโดยมีสาเหตุหลักๆเกิดจาก ต้นไม้, กิ่งไม้หักหรือวัตถุอื่นๆตกหล่นหรือลัดพันไปโดนสายไฟฟ้า เป็นต้น

เมื่อกิ่งไม้หักลงบนสายไฟฟ้า หากเป็นกิ่งไม้ที่มีความชื้นจะทำให้เกิดรอยไหม้ขึ้นตรงจุดสัมผัสระหว่างสายไฟฟ้าและกิ่งไม้ การเกิดรอยไหม้ขึ้นทำให้มีอิมพีแดนซ์ต่ำเป็นผลให้กระแสผิพรองที่ไหลผ่านสายไฟฟ้าได้สูงขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปความร้อนที่เกิดจากรอยไหม้ส่งผลให้ความชื้นในกิ่งไม้นั้นถูกกำจัดออกไป ในช่วงเวลานี้ทำให้มีอิมพีแดนซ์สูงขึ้นจึงทำให้กระแสผิพรองไหลผ่านสายไฟฟ้าได้น้อยลง

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูง

ข้อมูลความผิพรองส่วนใหญ่ที่สถานีไฟฟ้าบันทึกได้เกิดจากการที่อุปกรณ์ป้องกันทำงาน แต่เมื่อเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงอุปกรณ์ป้องกันตรวจจับไม่ได้จึงทำให้มีข้อมูลบันทึกไว้น้อยกว่าความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ทั้งนี้โอกาสการเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงในระบบไฟฟ้ามีค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงสามารถพิจารณาได้จากปัจจัยดังต่อไปนี้ [5]

1) ระดับแรงดัน

ส่วนใหญ่ความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงมักเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 15 kV ถ้ายิ่งระดับแรงดันต่ำความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะเกิดรุนแรงมากขึ้น แต่ถ้าระดับแรงดันมากกว่า 25 kV เป็นต้นไป ความรุนแรงของความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงก็จะลดลง

2) ประเภทของสิ่งปลูกสร้าง

หากวงจรสายไฟฟ้าอยู่ใต้ดินแทบไม่มีโอกาสเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูง เนื่องจากสายไฟฟ้าไม่ได้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ในขณะที่เดียวกันหากสายไฟฟ้าและสายนิวทรัลมีขนาดใหญ่โอกาสที่จะเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงก็ต่ำลงเพราะสายขนาดใหญ่ขาดยาก

3) อายุของวงจรไฟฟ้า

ถ้าหากวงจรสายไฟฟ้าอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ดี เช่น เจอพายุ, สภาวะโหดเกิน, สัมผัสกับต้นไม้ หรือ สายไฟฟ้าเคยขาดบ่อยๆ มีโอกาสที่จะเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงค่อนข้างมาก ดังนั้นสายไฟฟ้าเก่ามีโอกาสเกิดความผิพรองชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้มากกว่าสายไฟฟ้าใหม่

4) ประเภทของสายตัวนำ

สายตัวนำแบบหุ้มฉนวนและสายตัวนำที่มีขนาดเล็กมีโอกาสขาดมากกว่าแบบอื่นๆ ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจึงเพิ่มขึ้น

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

หากพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงในระบบไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ [5],[7],[8]

1) ระบบการต่อลงดิน

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าเป็นการเชื่อมต่อระหว่างจุดใดจุดหนึ่งของระบบไฟฟ้าที่มีกระแสไหลผ่านไปยังพื้นดินหรือเป็นการต่อจุดนิวทรัลลงดิน โดยทั่วไประบบการต่อลงดินที่พบส่วนใหญ่มีดังนี้

- การต่อลงดินโดยตรง (ต่อลงดินจุดเดียว หรือ ต่อลงดินหลายจุด)
- การต่อลงดินผ่านตัวต้านทาน
- การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์
- การต่อลงดินผ่านขดลวด Petersen (ระบบการชดเชย)
- ไม่มีการต่อลงดิน หรือ ถูกแยกออกมา

โดยทั่วไปความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงเป็นการเกิดความผิดปกติลงดิน แต่ระบบการต่อลงดินนั้นมีพฤติกรรมที่ต่างออกไป คือมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันอุปกรณ์และใช้งานให้มีความปลอดภัย หากระบบการต่อลงดินต่อผ่านตัวต้านทานหรือผ่านรีแอกแตนซ์ที่มีค่าสูงจะทำให้มีพฤติกรรมคล้ายกับการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ หากเกิดความผิดปกติขึ้นจุดที่ต่อนิวทรัลของระบบไฟฟ้าแรงดันลำดับศูนย์จะถูกสร้างขึ้นและจำกัดกระแสนิวทรัลที่ปรากฏ ในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้ามีค่ากระแสพิเศษเหลือน้อยมาก ดังนั้นการวัดกระแสที่มีความไวสูงสามารถตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ แต่หากการวัดกระแสมีความไวต่ำการป้องกันความผิดปกติลงดินจะขึ้นอยู่กับการประพจน์ตัวของลำดับศูนย์ ในกรณีที่ระบบการต่อลงดินต่อด้วยความต้านทานหรือรีแอกแตนซ์ที่มีค่าต่ำ การตรวจจับความผิดปกติลงดินจะขึ้นอยู่กับกระแสที่วัดได้

2) การเชื่อมต่อของโหลด

โดยทั่วไปการเชื่อมต่อโหลดไปยังผู้ใช้บริการจะใช้หม้อแปลงหนึ่งเฟส ถ้าโหลดสมดุลจะไม่มีกระแสไหลผ่านสายนิวทรัล อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจเกิดการสลับโหลดเพียงชั่วครู่จึงทำให้เกิดโหลดไม่สมดุลในสภาวะปกติ ผลจากโหลดไม่สมดุลนี้ทำให้เกิดกระแสพิเศษเพิ่มขึ้น ดังนั้นการตั้งค่า pickup

ของการป้องกันความผิดปกติของดินจะถูกตั้งไว้เหนือระดับทั่วไปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดไม่สมดุล แต่กระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะมีค่าต่ำกว่าการตั้งค่าความไวของอุปกรณ์ป้องกัน ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้

3) Current Transformer Ratio (CT ratio)

กรณีสายขาดสัมผัสพื้นจะเกิดกระแสลงดินเพียงไม่กี่แอมแปร์เทียบกับกระแสโหลดขนาดหลายร้อยแอมแปร์ การเลือก CT ratio ที่มีขนาดเล็กเท่าที่จะเป็นไปได้จะช่วยเพิ่มส่วนประกอบของอาร์กในรูปแบบคลื่นและเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

4) ระดับความสำคัญของผู้ใช้บริการ

ระดับของผู้ใช้บริการย่อมมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เพราะหากสงสัยว่ามีสายไฟฟ้าขาดอาจไม่จำเป็นที่จะต้องหยุดจ่ายไฟให้ผู้บริการในทันที แต่ในทางตรงกันข้ามบางครั้งอาจต้องมีการตัดสินใจหยุดจ่ายไฟชั่วคราวเพื่อขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นและรีบจ่ายไฟกลับไปให้ส่วนที่เหลือของสายป้อนเพื่อลดผลกระทบของเวลาที่หยุดจ่ายพลังงานไป

การตัดสินใจเพื่อตัดวงจรออกหรือแจ้งเตือนอาจส่งผลกระทบต่อโหลดที่สำคัญ เช่น การบริการเพื่อไฟจราจร, โรงพยาบาล, อุปกรณ์ในการชุดอิมโอมค์ หรือโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการตัดสินใจไปในทิศทางของการรับบริการบำรุงรักษาแทนการหยุดจ่ายไฟ ในทำนองเดียวกันเวลาในแต่ละวัน แต่ละปี สภาพอากาศ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับโรงเรียนหรือชั่วโมงเร่งด่วนอาจส่งผลกระทบต่อตัดสินใจหยุดจ่ายพลังงาน

5) ข้อมูลเพิ่มเติมจากประชาชน

ข้อมูลที่ได้รับจากประชาชนรวมถึงรายงานสายขาด, การสูญเสียการได้รับบริการ หรือเสาหัก เป็นต้น การพิจารณาปัจจัยข้างต้นเหล่านี้มีส่วนช่วยในการออกแบบการตอบสนองของเครื่องมือในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

6) การติดต่อสื่อสาร

การตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการติดต่อสื่อสารที่จำเป็นต้องพิจารณาคือความพร้อมและความสามารถในการติดต่อสื่อสารโดยตรงกับเครื่องมือตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง หากเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงและเครื่องมือตรวจจับได้ การส่งข้อมูลเพื่อสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานหรือแจ้งสัญญาณเตือนนั้นต้องสามารถส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

2.2 ตัวอย่างงานวิจัยในอดีต

การพัฒนาการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้รับการพัฒนามากมายหลากหลายวิธี เนื่องจากเมื่อเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินมักตรวจจับได้ยากจึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ทั้งนี้การตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ [9]

2.2.1 การตรวจจับเชิงกล (Mechanical Detection)

การตรวจจับเชิงกลเกี่ยวข้องกับแรงที่เกิดจากสายไฟฟ้าตกสัมผัสพื้นแล้วส่งผลให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงาน ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ [8]

- 1) อุปกรณ์ติดตั้งบนไม้กางเขน (Cross arm) หรือเสาไฟฟ้า (Pole) : อุปกรณ์จะติดตั้งอยู่ข้างใต้สายไฟฟ้าแต่ละเฟสเพื่อที่จะคอยเช็คสายไฟฟ้าหากสายไฟฟ้าเกิดตกลงไปสัมผัสกับพื้น ทั้งนี้แรงตกของสายไฟฟ้าจะปล่อยสปริงที่อยู่ภายในให้ดึงออกจากบัสบาร์แล้วไปสัมผัสกับสายที่ตกลงมาและก่อให้เกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ ดังนั้นความผิดปกติที่เกิดขึ้นจึงเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินนั้นทำงาน แต่ในกรณีของสายไฟฟ้าหย่อนลงมาจะไม่เกิดการสัมผัสกับพื้นดินทำให้ไม่สามารถใช้การตรวจจับด้วยวิธีนี้ได้ การติดตั้งและการบำรุงรักษาโดยใช้วิธีนี้มีราคาค่อนข้างสูงเกินกว่าจะติดตั้งได้ทุกเสาไฟฟ้า ดังนั้นจึงนิยมใช้วิธีนี้ในพื้นที่ เช่น โรงเรียน หรือโรงพยาบาล เป็นต้น
- 2) ใช้ลูกตุ้มติดตั้งบนแท่งอะลูมิเนียมแบบมีปลายตะขอซึ่งจะห้อยอยู่ข้างใต้สายนิวทรัล เมื่อสายไฟฟ้าตกลงจะสร้างความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำขึ้นซึ่งทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงาน ในกรณีของสายไฟฟ้าหย่อนสามารถใช้การตรวจจับด้วยวิธีนี้ได้ แต่ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เช่น น้ำแข็ง, ลม และการเติบโตของต้นไม้ส่งผลให้การตรวจจับด้วยวิธีนี้เกิดผิดพลาดได้

2.2.2 การตรวจจับเชิงไฟฟ้า (Electrical Detection)

การตรวจจับเชิงไฟฟ้า ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- 1) โดเมนทางเวลา (Time Domain) : ตัวอย่างที่มีการศึกษา มีดังนี้

❖ การใช้ขั้นตอนวิธี Ratio ground relay [10]

การทำงานของแรงบิด (Torque) ของรีเลย์จะเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดโดยหาอัตราส่วนระหว่างแรงบิดที่ยังทำงานอยู่ (Operating torque) กับแรงบิดที่ถูกหน่วงไว้ (Restraint torque) ซึ่งอัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงผลกระทบของการแปรผันของโหลดที่มีต่อความไวของรีเลย์กระแสเกินทำให้สามารถนำมาใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ (แรงบิดที่ยังทำงานอยู่เกิดจากกระแสโหลดไม่สมดุล ส่วนแรงบิดที่ถูกหน่วงไว้เกิดจากกระแสของทั้งสามเฟส)

❖ การใช้ขั้นตอนวิธี Proportional relay [10]

การต่อลงดินหลายจุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีขนาดและมุมเฟสของกระแสไม่สมดุลไม่เท่ากับค่าคงที่และกระแสผิดปกติก็เช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ความไวของรีเลย์กระแสเกินได้รับผลกระทบไปด้วย ถ้ารีเลย์สามารถรู้สึกได้แต่กระแสผิดปกติ ดังนั้นกระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นคำนวณหาได้จากกระแสที่ไม่สมดุลรวมกับกระแสนิวทรัล

❖ การใช้เครื่องมือที่มีพื้นฐานของ Mathematical Morphology (MM) [11]

MM เป็นเครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนรูปร่างลักษณะของสัญญาณ โดย MM ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงพื้นฐานสองแบบ คือการขยายตัวและการยุบตัว ซึ่งในที่นี้แทนการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเปิดและการปิดของวงจรสำหรับสัญญาณหนึ่งมิติ ในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง จะใช้การดำเนินการหาความแตกต่างกันของการเปิดและการปิดวงจร โดยค่าความต่างนี้จะต้องมีค่าเกินกว่าค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้และเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ซึ่งค่าความต่างนี้จะไม่เหมือนกันกับค่าความต่างของสภาวะปกติที่เกิดขึ้นไม่นานและขนาดความต่างไม่มาก

2) โดเมนทางความถี่ (Frequency Domain) : ตัวอย่างที่มีการศึกษา มีดังนี้

❖ การใช้การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform)

- ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) [12] ซึ่งเป็น wavelet toolbox ในโปรแกรม MATLAB การแยกลักษณะของสัญญาณกระแสแต่ละเฟส โดยใช้เวฟเล็ตแม่ (mother wavelet) ชนิด Daubechies 3 (db3) โดยจำลองรูปแบบที่ความถี่สุ่ม 1 MHz และใช้สัมประสิทธิ์ส่วนรายละเอียด (Detail 5 : D5) สำหรับการหาคุณลักษณะที่พบในสัญญาณกระแสและใช้การเคลื่อนที่ของหน้าต่างหาผลรวมค่าสัมบูรณ์ของ D5 แต่ละเฟส โดยกำหนดค่า S_{th} เท่ากับ 0.1 และ y_{th} เท่ากับสองเท่าของจำนวนตัวอย่างต่อหนึ่งคาบ ซึ่งหากผลรวมค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณ D5 มากกว่าค่าที่

กำหนด S_{th} และมีจำนวนตัวอย่างมากกว่า y_{th} จะถือว่าเป็นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงและส่งสัญญาณ trip ไปยังอุปกรณ์ป้องกัน

- ใช้การแปลงมอร์เล็ต (Morlet Transform) [13] การตรวจจับโดยใช้การหาความชันของ i -th คำนวณความชันจาก i -th และ $i-1$ และ S คือค่ากำหนดความชันอยู่ที่ 0.005 p.u./ms เมื่อ I_i คือค่าขนาดของกระแส และ I_{th} คือค่ากำหนดของขนาดกระแสมีค่าเท่ากับ $(I_{max} + I_{min})/2$ และ C_{th} คือระยะเวลาที่กำหนดมีค่าเท่ากับ 1000 จุด ถ้าสัญญาณมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้จะถือว่าเป็นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

❖ การใช้ทฤษฎี Chaotic และฟังก์ชัน Duffing Oscillator [14]

แนวคิดพื้นฐานในการตรวจจับสัญญาณที่มีขนาดเล็กสามารถตรวจจับได้โดยใช้ฟังก์ชัน Duffing Oscillator ร่วมกับทฤษฎี Chaotic คือสัญญาณเกิดการเคลื่อนที่จากสถานะที่ไม่เป็นระเบียบกลายเป็นสถานะที่เกิดเป็นระยะๆขนาดใหญ่ จากแนวคิดข้างต้นถ้านำสัญญาณกระแสมาหาค่า Lyapunov Energy : LE แล้วมีค่าเป็นบวก การเคลื่อนที่ของระบบจะอยู่ในสถานะเกิดเป็นระยะๆ แต่ถ้า LE เป็นลบการเคลื่อนที่ของระบบจะอยู่ในสถานะที่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น LE จึงเป็นเกณฑ์ที่ใช้กำหนดสำหรับการตรวจจับสถานะของระบบ ถ้า LE เป็นบวกจะถือว่าเป็นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

❖ การใช้ Power Line Communication (PLC) [15]

การใช้ศักยภาพของ PLC สำหรับการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง การศึกษาที่ใช้ค่าความต่างระหว่างอิมพีแดนซ์รับเข้ากับอิมพีแดนซ์ขณะเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่างๆโดยอิมพีแดนซ์มีการคำนวณสองรูปแบบคือแบบเฟสไปยังกราวด์และแบบเฟสไปยังอีกเฟส การเปรียบเทียบจะเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ที่ผิดปกติและตำแหน่งที่เกิดผิดปกติเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้เมื่อใช้แถบความถี่ CENELEC A (9 – 95 kHz) และแถบความถี่สำหรับ PLC (1 -30 MHz) โดยดูผลกระทบของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงที่เกิดขึ้นว่าส่งผลอย่างไร หากพิจารณาที่แถบความถี่ CENELEC A สามารถตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าอีกแถบความถี่

❖ การใช้ Fuzzy [16]

การวิเคราะห์เปรียบเทียบการตอบสนองของสายเมื่อป้อนพัลส์ที่แตกต่างกัน จะเรียกการตอบสนองแบบปกติว่า Standard response โดยส่วนประกอบของ Artificial neuron ประกอบด้วย neo fuzzy neurons ที่ถูกฝึกฝนเพื่อจดจำการตอบสนองแบบปกตินี้ ในการฝึกฝนนี้ใช้ค่าสัญญาณที่

แปลงด้วยฟูรีเยอร์อย่างรวดเร็วประกอบด้วยค่าส่วนจริงและค่าจินตภาพจำนวน 80 ตัว หลังจากฝึกฝนเสร็จแล้วกลุ่ม neurons จะกลายเป็นแกนหลักในการตัดสินใจของระบบเกี่ยวกับการควบคุม โดยระบบควบคุมนี้ใช้ในการตรวจสอบสายแบบตามเวลาจริงที่เกิดขึ้นของระบบเพื่อดูความสามารถในการจดจำความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

❖ การใช้ Artificial Neural Network (ANN) [17]

ในการศึกษานี้จำลองข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงจำนวน 100 เหตุการณ์ที่ความถี่สุ่ม 1 KHz และคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันเศษเหลือ หลังจากนั้นนำสัญญาณกระแสและแรงดันเศษเหลือผ่านการกรองด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) คำนวณหาค่าฮาร์มอนิกของกระแส, แรงดันและอิมพีแดนซ์ปรากฏ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลป้อนเข้าฝึกฝนให้กับเครือข่ายของ ANN โดยใช้ฮาร์มอนิกอันดับที่สองและอันดับที่สามของกระแส, แรงดันและอิมพีแดนซ์ปรากฏเป็นข้อมูลป้อนเข้าของ neuron รวมทั้งสิ้น 6 ตัวและจะได้ข้อมูลขาออก 1 ตัวโดยจำนวนของ neuron สำหรับ hidden layers ที่ใช้อยู่ที่ 4 และ 8 neurons

❖ การใช้ Decision Trees [18]

การตัดสินใจแบบต้นไม้ (Decision Trees) จะซ้อนกันอยู่ภายในของแบบจำลอง Random Forest (RF) ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง ขั้นตอนแรกจะประเมินขนาดและมุมของส่วนประกอบฮาร์มอนิก (ความถี่มูลฐาน, อันดับที่ 3, อันดับที่ 5 จนถึงอันดับที่ 13) ในสัญญาณกระแสของความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้ตัวกรอง Extended Kalman (EKF) ขั้นตอนต่อไป RF จะถูกฝึกฝนด้วยข้อมูลที่ได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง

❖ การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก [1],[19]

เงื่อนไขที่ใช้ตรวจจับความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีหลายรูปแบบ ดังนี้

- กรณีสถานีไฟฟ้าต่อลงดินแบบวาย : หากมุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สามเปลี่ยนแปลงทันทีเมื่อเทียบกับอีกสองเฟสที่เหลือแสดงว่าเกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงที่เฟสนั้น ทั้งนี้จะพิจารณากระแสที่ความถี่มูลฐานเพิ่มเติมด้วยหากมุมเฟสเปลี่ยนแปลงมากกว่า 15 องศา พร้อมกับกับกระแสไหลดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 15 A และเกิดขึ้นนานต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 5 วินาที จะถือว่าเกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง
- กรณีสถานีไฟฟ้าต่อลงดินแบบเคลด้า : ขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สามจะมีค่าน้อยมากทำให้วัดมุมเฟสลำบาก แต่หากกระแสฮาร์มอนิกมีขนาดเพิ่มขึ้นอาจสามารถเป็นตัวแทนที่

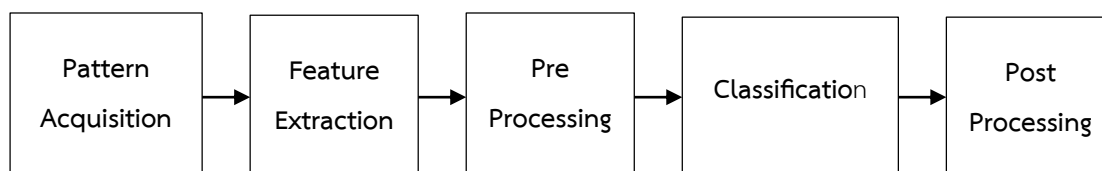
บอกถึงการเกิดสภาวะผิดปกติได้ โดยหากกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้และเกิดขึ้นพร้อมกันกับกระแสที่ความถี่มูลฐานเปลี่ยนแปลงมากกว่า 15 A และเกิดนานอย่างน้อย 3 วินาที จะถือว่าเกิดความผิดปกติพร้อมพีคแดนซ์สูงขึ้น

- ใช้การวัดมุมเฟสของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่สามเปรียบเทียบกับแรงดันเฟส
- หาผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกอันดับคี่และอันดับคู่ และค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแต่ละเฟส หากผลรวมกระแสฮาร์โมนิกอันดับคี่มีค่ามากกว่าอันดับคู่และค่า THD ของเฟสนั้นมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย THD ของทั้งสามเฟสและเกิดนานมากกว่า 0.2 วินาที จะถือว่าเกิดความผิดปกติพร้อมพีคแดนซ์สูง

2.3 การรู้จำรูปแบบ

การรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognition) [20] เป็นสาขาหนึ่งทางวิทยาศาสตร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจำแนก (Classification) วัตถุไปยังประเภทหรือคลาสตามที่กำหนดไว้ โดยอาศัยคุณลักษณะเด่นเฉพาะตัวของวัตถุนั้นเป็นหลักในการจำแนกกลุ่ม ทั้งนี้การรู้จำรูปแบบเป็นศาสตร์ที่นำมาใช้ในคอมพิวเตอร์เพื่อให้คอมพิวเตอร์ช่วยในการแยกแยะวัตถุออกเป็นกลุ่มต่างๆซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายสาขา เช่น งานทางด้าน การจองตั๋วเครื่องบิน ใบหน้า รอยนิ้วมือ น้ำเสียงของมนุษย์ งานทางทหารนำไปใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศ การตรวจจับและการจำแนกของสัญญาณเรดาร์และโซนาร์ งานทางการแพทย์นำไปใช้ในการวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าหัวใจและการจำแนกโรคต่างๆ งานทางด้านวิศวกรรมนำไปใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติในสินค้าที่ผลิต ระบบนำทางอัตโนมัติ และการวิเคราะห์ห้มลพิษ เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การรู้จำรูปแบบมาประยุกต์ในการตรวจจับความผิดปกติพร้อมพีคแดนซ์สูงในระบบไฟฟ้า

2.3.1 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการรู้จำรูปแบบ



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการทำงานพื้นฐานของการรู้จำรูปแบบ

จากรูปที่ 2.3 [21] แสดงรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของกรรู้จำรูปแบบ ได้ดังต่อไปนี้

1. Pattern acquisition คือการจัดการข้อมูลสัญญาณหรือรูปภาพหรือการเก็บรวบรวมข้อมูล
2. Feature extraction คือการสกัดลักษณะเด่นในรูปแบบของการวัดหรือการสกัดค่าพื้นฐานต่างๆ
3. Pre – processing คือการประมวลผลเบื้องต้น ในบางครั้งก่อนที่จะจำแนกกลุ่มต้องจัดการคุณลักษณะให้อยู่ในบรรทัดฐานเดียวกันก่อน
4. Classification คือการจำแนกประเภทข้อมูลออกเป็นรูปแบบต่างๆ
5. Post - processing คือการประมวลผลหลังจากการจำแนก บางครั้งผลลัพธ์ที่ได้จากการจำแนกไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงต้องทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการนำไปใช้

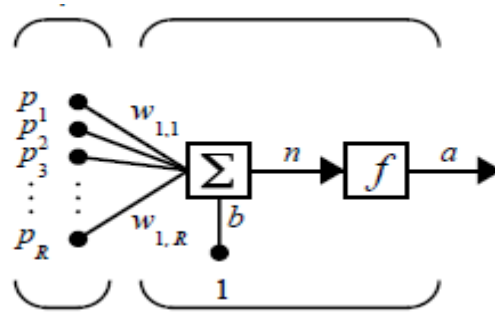
2.3.2 ประเภทของการรู้จำรูปแบบ

การรู้จำรูปแบบลักษณะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การรู้จำรูปแบบประเภทมีผู้สอน (Supervised pattern recognition) ข้อมูลสำหรับฝึกสอนเพื่อใช้ในการจำแนกประเภทเป็นข้อมูลที่รู้ประเภทล่วงหน้าก่อนอยู่แล้ว โดยข้อมูลฝึกสอนประกอบไปด้วยเวกเตอร์ข้อมูลป้อนเข้าและเป้าหมายผลลัพธ์ที่สัมพันธ์กับข้อมูลป้อนเข้า ตัวอย่างการรู้จำรูปแบบประเภทมีผู้สอน ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) , support vector machine (SVM) , การตัดสินใจแบบต้นไม้ (Decision tree) หรือ fuzzy logic เป็นต้น
2. การรู้จำรูปแบบประเภทไม่มีผู้สอน (Unsupervised pattern recognition) เป็นการรู้จำที่จำแนกข้อมูลโดยอาศัยลักษณะของข้อมูลที่มีร่วมกันแล้วทำการจัดกลุ่ม (cluster) ซึ่งสามารถเรียกการรู้จำประเภทนี้ได้อีกอย่างว่าการจัดกลุ่ม (Clustering)

2.3.3 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีการทำงานคล้ายกับเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมในทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 [22]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

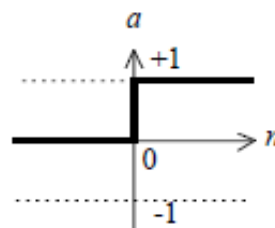
จากรูปที่ 2.4 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถอธิบายได้ดังนี้ โครงข่ายประสาทเทียมจะมีข้อมูลป้อนเข้าโครงข่ายหลายตัว แทนด้วยเวกเตอร์ \mathbf{p} เมื่อ R คือจำนวนส่วนประกอบของเวกเตอร์ข้อมูลป้อนเข้าแล้วข้อมูลแต่ละตัวนั้นจะถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์ \mathbf{w} หลังจากนั้นข้อมูลที่ถูกล่วงน้ำหนักแล้วจะนำไปหาผลรวมและถูกล่วงน้ำหนักด้วยค่าโน้มนำ b จะได้เวกเตอร์ \mathbf{n} ออกมา หลังจากนั้นเวกเตอร์ \mathbf{n} จะถูกส่งผ่านเข้าไปยังฟังก์ชันถ่ายโอน f เพื่อหาผลลัพธ์ \mathbf{a} ออกมาซึ่งสามารถเขียนสมการโดยทั่วไปได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\mathbf{a} = f(\mathbf{w}\mathbf{p} + b) \quad (2.1)$$

2.3.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Functions)

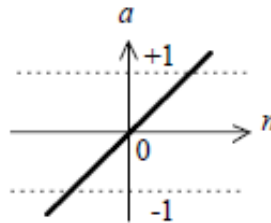
ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมีหลากหลายรูปแบบ [22] แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีดังนี้

- Hard – Limit transfer function



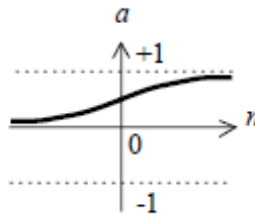
รูปที่ 2.5 Hard – Limit transfer function

- Linear transfer function



รูปที่ 2.6 Linear transfer function

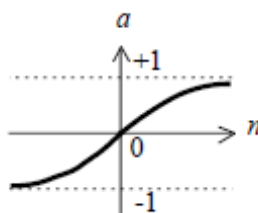
- Log – Sigmoid transfer function



รูปที่ 2.7 Log – Sigmoid transfer function

Log – Sigmoid transfer function เป็นที่นิยมใช้ในการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation)

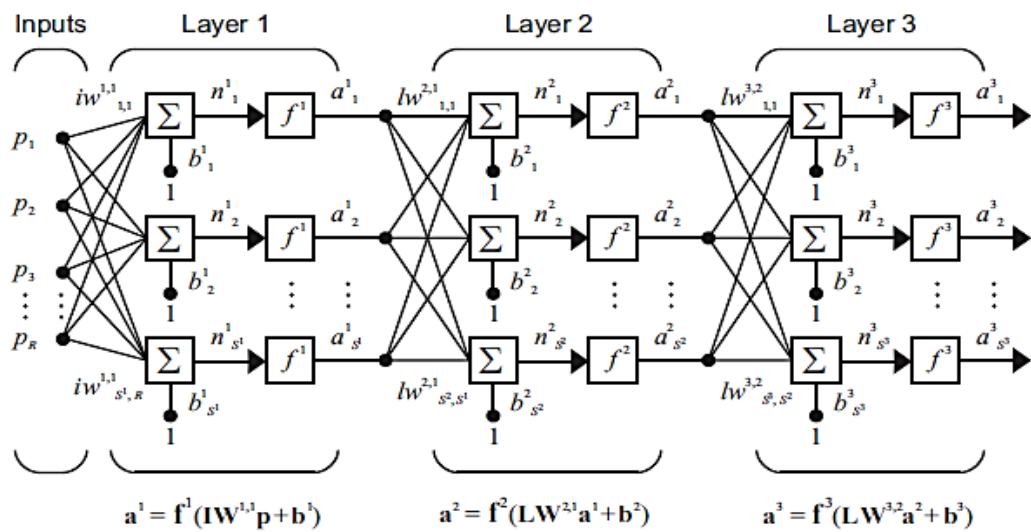
- Tan – Sigmoid transfer function



รูปที่ 2.8 Tan – Sigmoid transfer function

2.3.3.2 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายจากรูปที่ 2.4 เป็นโครงข่ายที่ง่ายที่สุดคือเป็นโครงข่ายชั้นเดียวซึ่งมีค่าน้ำหนักและค่าโน้มน้ำแข็งฝึกฝนให้สร้างเวกเตอร์ค่าเป้าหมายถูกต้องแล้วสอดคล้องกับเวกเตอร์ข้อมูลป้อนเข้า เทคนิคการฝึกฝนนี้เรียกได้อีกอย่างว่า กฎการเรียนรู้เพอร์เซพตรอน (Perceptron learning rule) แต่มีข้อจำกัดคือโครงข่ายชั้นเดียวเหมาะสมกับการแก้ปัญหาการจำแนกแบบเชิงเส้นที่ง่ายไม่ซับซ้อน ดังนั้นหากต้องการแก้ปัญหาการจำแนกแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความซับซ้อนจึงนิยมใช้โครงข่ายแบบหลายชั้น (Multi-Layer Perceptron : MLP) แสดงตัวอย่างดังได้รูปที่ 2.9 [22]



รูปที่ 2.9 โครงข่ายแบบหลายชั้น

จากรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างโครงข่ายแบบสามชั้น โดยผลลัพธ์ของแต่ละชั้นจะเป็นข้อมูลป้อนเข้าให้กับชั้นถัดไป ซึ่งแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันได้ คือ $R - S^1 - S^2 - S^3$ ตามลำดับ โดยชั้นข้อมูลป้อนเข้า (Input layer) จะรับข้อมูลจากนอกโครงข่าย ส่วนชั้นสุดท้าย (layer 3) จะเป็นชั้นผลลัพธ์สำหรับส่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ออกไปนอกโครงข่าย ส่วนชั้นระหว่างข้อมูลป้อนเข้าและชั้นผลลัพธ์ (layer 1 และ 2) จะเรียกว่าเป็นชั้นซ่อน (Hidden layer) ดังนั้นการใช้โครงข่ายแบบหลายชั้นย่อมมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาได้ดีกว่าการใช้โครงข่ายเพียงชั้นเดียว ซึ่งโครงข่ายแบบสองชั้นมักนิยมใช้กับการเรียนรู้แบบแพร่กลับ

2.3.3.3 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ

จากสมการที่ (2.1) หากพิจารณาโครงข่าย N ชั้น ผลลัพธ์ของแต่ละชั้นจะเป็นข้อมูลป้อนเข้าให้กับโครงข่ายชั้นถัดไป ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [23]

$$a^{l+1} = f^{l+1}(w^{l+1}a^l + b^{l+1}) \quad (2.2)$$

เมื่อ l เท่ากับ $0, 1, \dots, N-1$

สำหรับชั้นข้อมูลป้อนเข้าจะได้ว่า $a^0 = p$ ส่วนผลลัพธ์สำหรับชั้นสุดท้ายคือ a^N

การเรียนรู้แบบแพร่กลับใช้หลักการเดียวกันกับ Least - Mean - Square (LMS) คือเป็นการประมาณค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) โดยกำหนดคู่ข้อมูลป้อนเข้า (p) กับเป้าหมาย (t) สำหรับป้อนให้โครงข่ายเรียนรู้ดังนี้

$$p_1 t_1, p_2 t_2, p_3 t_3, \dots, p_R t_R \quad (2.3)$$

เมื่อป้อนข้อมูลให้กับโครงข่าย ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายจะนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมาย หลังจากนั้นปรับค่าน้ำหนักและค่าโน้มเอียงเพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์และเป้าหมาย น้อยที่สุด ซึ่งจะได้ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพ (Performance index) ของโครงข่ายดังนี้

$$F(x) = E[e^2] = E[(t - a)^2] \quad (2.4)$$

เมื่อ x เป็นเมทริกซ์ของค่าน้ำหนักและค่าโน้มเอียง นอกจากนี้ถ้าโครงข่ายมีผลลัพธ์มากกว่าหนึ่งตัว สามารถเขียนสมการในรูปแบบทั่วไปได้ว่า

$$F(x) = E[e^T e] = E[(t - a)^T (t - a)] \quad (2.5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.5) สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\hat{F}(x) = (t(k) - a(k))^T (t(k) - a(k)) = e^T(k)e(k) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) กระบวนการหาค่าต่ำสุดสามารถคำนวณหาได้จากการใช้ Gradient descent คือการหาอนุพันธ์ของค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับ \hat{F} ดังนั้นการประยุกต์ใช้ค่า Gradient descent เพื่อลดค่าความผิดพลาดให้มากที่สุด จะเป็นกรปรับเมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าโน้มเอียงแบบวนซ้ำรอบที่ $k + 1$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

$$w_{ij}^m(k + 1) = w_{ij}^m(k) - \alpha \frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m} \quad (2.7)$$

$$b_i^m(k + 1) = b_i^m(k) - \alpha \frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} \quad (2.8)$$

เมื่อ α เป็นค่าคงที่ที่มีขนาดเล็กและมีค่าเป็นบวกซึ่งเป็นตัวที่คอยควบคุมการเรียนรู้ให้มุ่งเข้าสู่จุดที่พอใจ โดยค่านี้เรียกว่า อัตราการเรียนรู้

สำหรับกรณีโครงข่ายแบบหลายชั้นที่มีชั้นซ่อนจะไม่สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดในรูปของข้อมูลป้อนเข้า p และเป้าหมาย t ได้โดยตรงจึงต้องมีการใช้กฎลูกโซ่เข้ามาช่วยในการหาความสัมพันธ์ของอนุพันธ์แต่ละชั้น จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) สามารถเขียนตามกฎลูกโซ่ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \frac{\partial n_i^m}{\partial w_{ij}^m} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} \quad (2.10)$$

เมื่อ n_i^m เป็นผลลัพธ์ของโครงข่ายชั้นที่ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าน้ำหนักและค่าโหนดเอียงในชั้นนั้นๆ สามารถเขียนได้ว่า

$$n_i^m = \sum_{j=1}^{S^{m-1}} w_{ij}^m a_j^{m-1} + b_i^m \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$\frac{\partial n_i^m}{\partial w_{ij}^m} = a_j^{m-1} \quad (2.12)$$

และ
$$\frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} = 1 \quad (2.13)$$

พิจารณาสมการที่ (2.9) และ (2.10) และกำหนดให้ความไวของความผิดพลาดเท่ากับ

$$\delta_i^m = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.9) (2.10) (2.12) และ (2.13) จะได้ว่า

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{ij}^m} = \delta_i^m a_j^{m-1} \quad (2.15)$$

และ
$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^m} = \delta_i^m \quad (2.16)$$

หลังจากนั้นนำกฎลูกโซ่มาใช้คำนวณหาค่าความไวของความผิดพลาดอีกครั้ง จะได้ว่า

$$\delta_i^m = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^m} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^m} \frac{\partial a_i^m}{\partial n_i^m} \quad (2.17)$$

เนื่องจากผลลัพธ์ของโครงข่าย a_i^m เป็นฟังก์ชันที่สัมพันธ์โดยตรงกับโครงข่าย n_i^m นั่นคือ

$$a_i^m = f(n_i^m) \quad (2.18)$$

เมื่อ $f(\cdot)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับชั้นนั้นๆ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{\partial a_i^m}{\partial n_i^m} = f'(n_i^m) \quad (2.19)$$

ทั้งนี้หากพิจารณาในเทอมของ $\frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^m}$ สามารถพิจารณาแยกออกเป็น 2 กรณีดังนี้

1. เมื่อ m เท่ากับ N (ชั้นผลลัพธ์) สามารถหา $\frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^N}$ ได้โดยตรงเนื่องจากว่า

$$\hat{F} = (t - a)^T (t - a) = \sum_{j=1}^{S^N} (t_j - a_j^N)^2 \quad (2.20)$$

จะได้ว่า
$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^N} &= \frac{\partial \sum_{j=1}^{S^N} (t_j - a_j^N)^2}{\partial a_i^N} \\ &= 2(t_i - a_i^N) \frac{\partial (t_i - a_i^N)}{\partial a_i^N} \\ &= -2(t_i - a_i^N) \end{aligned} \quad (2.21)$$

ดังนั้นความไวของความผิดพลาด กรณีที่เป็นชั้นผลลัพธ์ จะได้ว่า

$$\delta_i^N = -2(t_i - a_i^N) f'(n_i^N) \quad (2.22)$$

2. เมื่อ m เป็นชั้นซ่อน ไม่สามารถหา $\frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^m}$ ได้โดยตรงต้องใช้กฎลูกโซ่

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^m} = \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_l^{m+1}} \frac{\partial n_l^{m+1}}{\partial a_i^m} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) เป็นผลรวมของจำนวนนิวรอน S^{m+1} ของชั้น $m+1$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_l^{m+1}}{\partial a_i^m} &= \frac{\partial}{\partial a_i^m} (\sum_{r=1}^{S^m} w_{rl}^{m+1} a_r^m + b_r^{m+1}) \\ &= \frac{\partial (w_{il}^{m+1} a_i^m)}{\partial a_i^m} \\ &= w_{il}^{m+1} \end{aligned} \quad (2.24)$$

แทนค่าจากสมการ (2.24) ลงในสมการ (2.23) จะได้ว่า

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^m} = \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_l^{m+1}} w_{il}^{m+1} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.17) แทนลงในสมการที่ (2.25) จะได้ว่า

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial a_i^m} = \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \delta_l^{m+1} w_{il}^{m+1} \quad (2.26)$$

ดังนั้นความไวของความผิดพลาด กรณีชั้นซ่อนเท่ากับ m จะได้ว่า

$$\delta_i^m = f'(n_i^m) \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \delta_l^{m+1} w_{il}^{m+1} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.7) (2.8) (2.15) และ (2.16) สามารถสรุปกระบวนการปรับค่าน้ำหนักและค่าโน้มเอียงของการเรียนรู้แบบแพร่กลับ ตามลำดับได้ว่า

$$w_{ij}^m(k+1) = w_{ij}^m(k) - \alpha \delta_i^m(k) a_j^{m-1}(k) \quad (2.28)$$

และ
$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \delta_i^m(k) \quad (2.29)$$

หรือสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์จะได้ว่า

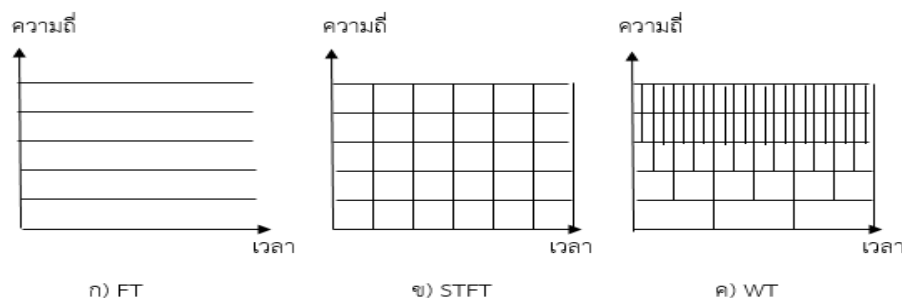
$$W_{new}^m = W_{old}^m - \alpha \delta^m a^{m-1} \quad (2.30)$$

และ
$$b_{new}^m = b_{old}^m - \alpha \delta^m \quad (2.31)$$

จากสมการข้างต้นที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้แบบแพร่กลับจะคำนวณความไวของ ความผิดพลาดในชั้นที่สนใจจากองค์ประกอบของชั้นถัดไป คือเริ่มต้นจากมีการคำนวณของชั้นผลลัพธ์ ไว้ก่อนหน้าแล้ว หากเริ่มต้นที่ชั้น m เท่ากับ $N-1$ จะนำความไวของความผิดพลาดจากชั้นผลลัพธ์ N มาใช้ เมื่อโครงข่ายได้ทำการปรับค่าน้ำหนักและค่าโน้มเอียงของชั้น $N-1$ แล้วความไวของความ ผิดพลาดของชั้นนี้ก็จะถูกนำไปใช้ปรับค่าน้ำหนักและค่าโน้มเอียงของชั้น $N-2$ ทำย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงชั้นข้อมูลป้อนเข้า ดังนั้นความไวของความผิดพลาดจึงเป็นส่วนที่ทำให้การปรับค่าน้ำหนัก และค่าโน้มเอียงของโครงข่ายเป็นแบบลงชั้นชั้นสุดซึ่งทำให้โครงข่ายมีค่าความผิดพลาดแบบกำลังสอง เฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด

2.4 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform)

การแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตามถ้าใช้การแปลงฟูริเยร์ไปตลอดทั้งแกนเวลาจะไม่ สามารถบอกได้อย่างทันทีว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่เวลาใดๆอย่างไรเพราะ ข้อมูลที่ได้มี เพียงความถี่เท่านั้นจึงหันไปใช้การแปลงฟูริเยร์แบบระยะเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform :STFT) โดยจะใช้การเคลื่อนที่ของหน้าต่างในการหาสเปกตรัมซึ่งจะให้ข้อมูลทั้งของเวลาและความถี่ แต่ก็มีข้อเสียที่เป็นปัญหาอยู่คือ ความกว้างของหน้าต่างจำกัดเท่ากันทุกความถี่ทำให้แต่ละความถี่มี ความละเอียดเท่ากันทั้งหมดจึงไม่เหมาะกับการวิเคราะห์สัญญาณที่ความถี่สูงเพราะที่ความถี่สูงเกิด การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่อนข้างเร็ว ดังนั้นการแปลงเวฟเล็ตจึงเป็นวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ได้ โดยการแปลงเวฟเล็ตขึ้นอยู่กับสัญญาณขนาดเล็กที่ปรับมาตราส่วนได้ทำให้สามารถวิเคราะห์ สัญญาณที่ความถี่สูงได้อย่างละเอียดมากขึ้นจึงเหมาะกับการใช้วิเคราะห์สัญญาณทุกแถบความถี่ซึ่ง สามารถแสดงความละเอียดในการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.10 [24]



รูปที่ 2.10 ความละเอียดการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้วิธีต่างๆ

ก) การแปลงฟูริเยร์ ข) การแปลงฟูริเยร์แบบระยะเวลาสั้น ค) การแปลงเวฟเล็ต

2.4.1 พื้นฐานการแปลงเวฟเล็ต

การแปลงเวฟเล็ตได้รับการพัฒนามาจากการแปลงฟูรีเยร์และเป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณชนิดหนึ่งที่แยกองค์ประกอบของสัญญาณได้ตามเวลาและความถี่ที่สนใจ คำว่า เวฟเล็ต (wavelet) หมายถึงสัญญาณที่มีขนาดเล็กๆ โดยแต่ละเวฟเล็ตถูกสร้างขึ้นมาจากฟังก์ชันชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet) โดยใช้การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) และการปรับขนาด (Dilation) ทั้งนี้เวฟเล็ตมักใช้ประยุกต์ในการบีบอัดข้อมูล, การจัดสัญญาณรบกวน หรือการจดจำรูปแบบ เป็นต้น

การแปลงเวฟเล็ตเป็นการแปลงโดยที่ใช้ฟังก์ชันที่เกิดการปรับขนาดด้วยพารามิเตอร์ a และการเลื่อนตำแหน่งด้วยพารามิเตอร์ b ของเวฟเล็ตแม่ เวฟเล็ตแม่หรือเวฟเล็ตหลัก (Basis Wavelet) แทนได้ด้วย ψ ดังนั้นสามารถเขียนสมการทั่วไปของเวฟเล็ตได้ดังนี้ [25],[26]

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R} \text{ และ } a \neq 0 \quad (2.32)$$

เมื่อ $\psi(t)$ คือฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่ถูกปรับขนาดและถูกเลื่อนตำแหน่ง

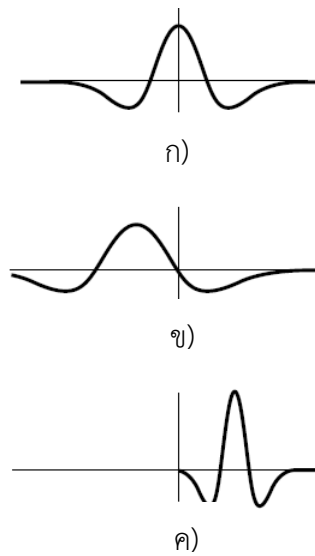
a คือค่าการปรับขนาด

b คือค่าการเลื่อนตำแหน่ง

สิ่งหนึ่งที่เป็นไปได้ในการระบุสำหรับ ψ คือฟังก์ชัน Mexican hat

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-\frac{1}{4}} (1 - x^2) e^{-1/2x^2} \quad (2.33)$$

โดยฟังก์ชันนี้คืออนุพันธ์อันดับสองของเกาส์เซียน $e^{-1/2x^2}$ โดยที่ฟังก์ชัน $\psi \in L^2(\mathbb{R})$, $L^2(\mathbb{R}) = \{f(x) \mid \int |f(x)|^2 dx < \infty\}$ จากสมการที่ (2.32) ถ้าค่า a มีขนาดใหญ่จะทำให้ $\psi_{a,b}$ ยืดออก และถ้าค่า a มีขนาดเล็กจะทำให้ $\psi_{a,b}$ หดเข้า แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันเวฟเล็ทที่ถูกปรับขนาดและเลื่อนตำแหน่ง

จากรูปที่ 2.11 เมื่อ ก) เป็นการแปลงเวฟเล็ทโดยใช้เวฟเล็ทแม่ชนิดหนึ่ง ข) ฟังก์ชันเวฟเล็ทมีค่าการปรับขนาด a ใหญ่เวฟเล็ทจึงขยายออกและมีการเลื่อนไปทางซ้าย ค) ฟังก์ชันเวฟเล็ทมีค่าการปรับขนาด a เล็กเวฟเล็ทจึงหดตัวและมีการเลื่อนไปทางขวา

นอกจากนี้ถ้าฟังก์ชันหลัก (basis function) ต้องตรงตามเงื่อนไขอย่างครบถ้วนแล้วเวฟเล็ทจำเป็นที่จะต้องมียเงื่อนไขที่ยอมรับได้ (admissibility) เช่นกันคือ

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\xi)|^2}{\xi} d\xi < \infty \quad (2.34)$$

เมื่อ $\hat{\psi}$ คือการแปลงฟูริเยร์ของ ψ ,

$$\hat{\psi}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) e^{-ix\xi} dx \quad (2.35)$$

นั่นหมายความว่า สำหรับกรณีให้ $\xi \rightarrow 0$ จะได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = \hat{\psi}(0) = 0 \quad (2.36)$$

ดังนั้นฟังก์ชันเวฟเล็ทไม่สามารถเป็นฟังก์ชัน bump ได้เหมือนเกาส์เซียน แต่สามารถแกว่งไปมารอบๆแกน x ได้เหมือนรูปคลื่น นอกจากนี้หาก $\hat{\psi}(0) = 0$ ที่จุดกำเนิดและเกิดการลดลงของสเปกตรัม $\hat{\psi}$ ที่ความถี่สูง นั้นหมายถึงว่า เวฟเล็ทมีพฤติกรรมแบบ bandpass

2.4.2 การแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่องของฟังก์ชัน $f(x)$ กำหนดโดย [26]

$$\tilde{f}(a, b) = \langle \psi_{a,b}, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}(x) f(x) dx \quad (2.37)$$

สำหรับค่าจำนวนจริงของฟังก์ชันหลัก การหาฟังก์ชัน $f(x)$ หาได้จากสมการ

$$f(x) = \frac{1}{C_{\psi}} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{da db}{a^2} \tilde{f}(a, b) \psi_{a,b}(x) \quad (2.38)$$

ดังนั้นสมการทั่วไปของการแปลงเวฟเล็ทแบบต่อเนื่องเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} CWT f(a, b) &= \langle f(x), \psi_{a,b} \rangle \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(x) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \end{aligned} \quad (2.39)$$

เมื่อ $f(x)$ คือ สัญญาณที่ต่อเนื่องกัน

Ψ คือ เวฟเล็ทแม่

a คือ ค่าการปรับขนาด

b คือ ค่าการเลื่อนตำแหน่ง

2.4.3 การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform)

การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย [24],[26],[27],[28] เป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะว่าสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์เกิดขึ้นในชีวิตจริง ซึ่งสามารถประมาณสัญญาณแบบเต็มหน่วย ใน $l^2(Z)$, $l^2(Z) = \{f[n] | \sum_{n=-\infty}^{\infty} |f[n]|^2 < \infty\}$ ได้ว่า

$$f[n] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_k W_{\phi}[j_0, k] \phi_{j_0, k}[n] + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k W_{\psi}[j, k] \psi_{j, k}[n] \quad (2.40)$$

นอกจากนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ทได้จากการ inner product ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การประมาณ (Approximation coefficient) มีค่าเท่ากับ

$$W_{\phi}[j_0, k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n f[n] \phi_{j_0, k}[n] \quad (2.41)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ส่วนรายละเอียด (Detailed coefficient) มีค่าเท่ากับ

$$W_{\psi}[j, k] = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n f[n] \psi_{j,k}[n] \quad , j \geq j_0 \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.38) ถ้าให้ $\psi_{a,b} = \psi_{m,n}$ เมื่อ $m, n \in \mathbb{Z}$ แล้วจะได้ว่า

$$a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m \quad , a_0 > 1, b_0 > 0$$

ดังนั้นสมการการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$DWT_{\psi} = F[m, n] = \frac{1}{\sqrt{a}} * \sum_x^k f[x] \psi \left[\frac{k-b}{a} \right] \quad (2.43)$$

เมื่อ ψ คือเวฟเล็ตแม่

$f[x]$ คือสัญญาณขาเข้าแบบไม่ต่อเนื่อง

a คือค่าการปรับขนาด

b คือค่าการเลื่อนตำแหน่ง

การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณ ดังนี้

2.4.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณแบบความละเอียดหลายชั้น (Multiresolution Analysis)

การวิเคราะห์สัญญาณแบบความละเอียดหลายชั้นเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกช่วงความละเอียดได้เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการแปลงฟูริเยร์ นั่นหมายความว่าถ้าค่าการปรับขนาดมีหลายแบบก็จะทำให้เห็นความละเอียดของเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์นี้มีการสร้างพื้นฐานมาจากฟังก์ชันการปรับขนาด (scaling function) และฟังก์ชันเวฟเล็ต (wavelet function) ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะมีค่าพารามิเตอร์อยู่สองตัวคือ การปรับขนาด (scaling) และการเลื่อนตำแหน่ง (translating) ซึ่งสามารถเขียนแต่ละฟังก์ชันได้ดังนี้

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k) \quad (2.44)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (2.45)$$

เมื่อ j คือพารามิเตอร์สำหรับปรับขนาด

k คือพารามิเตอร์สำหรับตำแหน่ง

$\phi_{j,k}(t)$ คือฟังก์ชันการปรับขนาด

$\psi_{j,k}(t)$ คือฟังก์ชันเวฟเล็ต

ในทางปฏิบัติต้องการที่จะเห็นข้อมูลทั้งหมดสามารถออกแบบความละเอียดได้ เช่น ความละเอียดที่ j ซึ่งกำหนดปริภูมิย่อยได้ว่า

$$V_j = \text{Span}\{\phi_{j,k}(t)\} \quad (2.46)$$

$$W_j = \text{Span}\{\psi_{j,k}(t)\} \quad (2.47)$$

ดังนั้นจากนิยามข้างต้น ทำให้การวิเคราะห์แบบความละเอียดหลายชั้นต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ฟังก์ชันการปรับขนาดมีลักษณะตั้งฉาก (orthogonal) กับการเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นการเลื่อนจำนวนเต็มของฟังก์ชันการปรับขนาดจะไม่ทับซ้อนกับฟังก์ชันการปรับขนาดดั้งเดิม
2. $V_j \subset V_{j+1}$
3. $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$
4. $V_j = V_{j+1} + W_{j+1}$
5. $f(t) \in V_j \leftrightarrow f(2t) \in V_{j-1}$
6. $\lim_{j \rightarrow \infty} f_j(t) = f(t), \quad f(t) \in L^2(\mathbb{R}), \quad f_j(t) \in V_j$

จากคุณสมบัติข้อ 6 , $f_j(t) \in V_j$, $g_j(t) \in W_j$ เขียนสมการของสัญญาณที่วิเคราะห์ได้ตามลำดับว่า

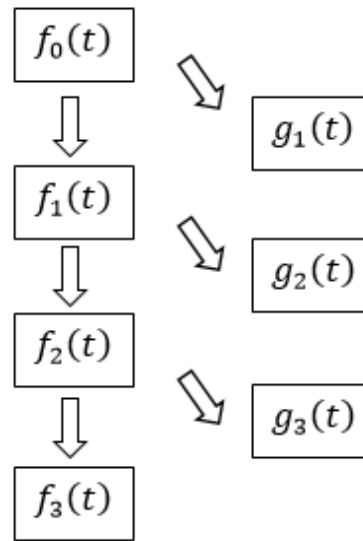
$$f_j(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_j(n) \phi_{jk}(t) \quad (2.48)$$

และ
$$g_j(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_j(n) \psi_{jk}(t) \quad (2.49)$$

จากคุณสมบัติข้อ 4 สามารถเขียนสมการของการแยกตัวของสัญญาณ(Signal Decomposition) ได้ว่า

$$f_j(t) = f_{j+1}(t) + g_{j+1}(t) \quad (2.50)$$

ถ้าสมมติกำหนดให้สัญญาณชนิดหนึ่ง $f_j(t)$ มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $f_0(t)$ จะสามารถแยกสัญญาณความละเอียดได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการแยกส่วนประกอบของสัญญาณที่ความละเอียดต่างๆ

จากรูปที่ 2.12 การแยกส่วนประกอบของสัญญาณ สามารถเขียนได้ในรูปของผลรวมสัญญาณได้ดังนี้

$$f_0(t) = f_1 + g_1 + g_2 + g_3 \quad (2.51)$$

ดังนั้นสัญญาณใดๆสามารถเขียนสมการในรูปของผลรวมของสัญญาณความละเอียดได้ดังนี้

$$f(t) = f_j + g_j + g_{j+1} + g_{j+2} + \dots + g_\infty \quad (2.52)$$

หรือ
$$f(t) = \sum_k C_j(n) \phi_{jk}(t) + \sum_j^\infty \sum_k D_j(n) \psi_{jk}(t) \quad (2.53)$$

เมื่อ C_j คือสัมประสิทธิ์ส่วนการประมาณ หาได้จาก $C_j(n) = \langle f, \phi_{jk} \rangle$

D_j คือสัมประสิทธิ์ส่วนรายละเอียด หาได้จาก $D_j(n) = \langle f, \psi_{jk} \rangle$

2.4.3.2 การวิเคราะห์สัญญาณแบบใช้ชุดตัวกรอง (Filter bank Analysis)

จากคุณสมบัติของ $V_0 = V_1 + W_1$ ทำให้ฟังก์ชัน $\phi_{0n}(t) = \phi(t - n) \in V_0$, $n \in \mathbb{Z}$ สามารถเขียนผลรวมเชิงเส้นของฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับปริภูมิ V_1 และ W_1 ด้วยสัมประสิทธิ์ $h_0(2l - n)$ และ $h_1(2l - n)$ เมื่อ $l, n \in \mathbb{Z}$ ได้ดังนี้ [27]

$$\phi_{0n}(t) = \sum_l h_0(2l - n) \phi_{1l}(t) + h_1(2l - n) \psi_{1l}(t) \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54) เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการแยกส่วนประกอบของสัญญาณที่มีหลายความละเอียด ซึ่งถูกนำมาใช้ในอีกรูปแบบหนึ่งของสมการคือ

$$\sqrt{2}\phi(2t - n) = \sum_l h_0(2l - n)\phi(t - l) + h_1(2l - n)\psi(t - l) \quad (2.55)$$

ถ้าหากทราบลำดับ $\{C_0(n)\}$ และแทนสมการที่ (2.54) ลงในสมการที่ (2.48) เมื่อ $j = 0$ จะได้ว่า

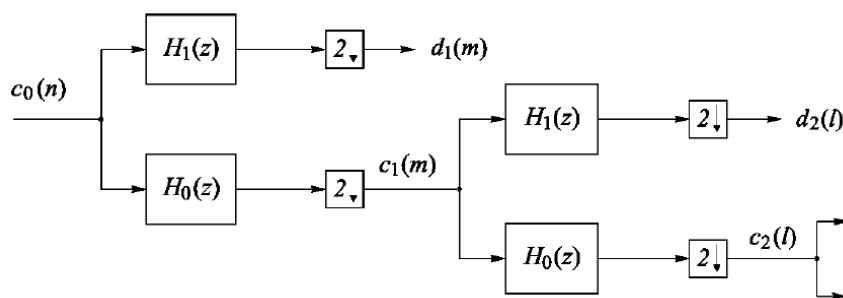
$$\begin{aligned} f_0(t) &= \sum_n C_0(n)\phi_{0n}(t) \\ &= \sum_n C_0(n) \sum_l h_0(2l - n)\phi_{1l}(t) + h_1(2l - n)\psi_{1l}(t) \\ &= \\ &= \underbrace{\sum_l \sum_n C_0(n)h_0(2l - n)\phi_{1l}(t)}_{C_1(l)} + \underbrace{\sum_l \sum_n C_0(n)h_1(2l - n)\psi_{1l}(t)}_{D_1(l)} \\ &= f_1(t) + g_1(t) \end{aligned} \quad (2.56)$$

เมื่อ $f_0 \in V_0$, $f_1 \in V_1$ และ $g_1 \in W_1$ และจำนวน $\{C_{m+1}(l)\}$ และ $\{D_{m+1}(l)\}$ จาก $\{C_m(n)\}$ เมื่อ $m, n \in \mathbb{Z}$ จะได้ว่า

$$C_{m+1}(l) = \sum_n C_m(n)h_0(2l - n) \quad (2.57)$$

$$D_{m+1}(l) = \sum_n C_m(n)h_1(2l - n) \quad (2.58)$$


จากสมการที่ (2.57) และ (2.58) จะเห็นได้ว่าลำดับ $\{C_{m+1}(l)\}$ และ $\{D_{m+1}(l)\}$ เกิดขึ้นด้วยอัตราสุ่มครึ่งหนึ่งของ $\{C_m(n)\}$ ดังนั้นการแยกส่วนประกอบความละเอียดของสมการที่ (2.57) และ (2.58) จะมีค่าเท่ากับการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ชุดตัวกรองสองช่องสัญญาณคือตัวกรอง $h_0(n)$ และ $h_1(n)$ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ชุดตัวกรองได้ดังรูปที่ 2.13

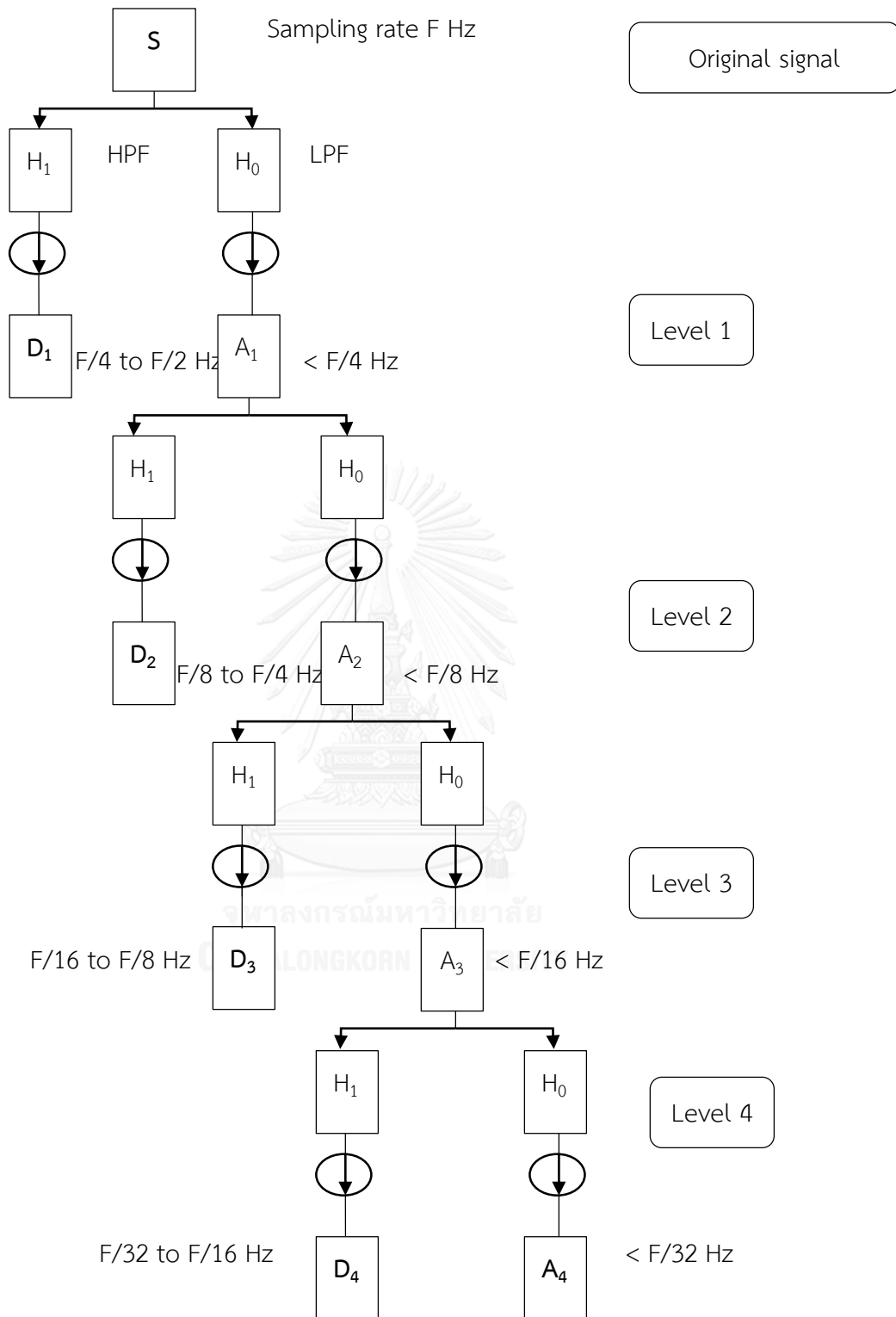


รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ชุดตัวกรอง

ทั้งนี้การวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้ชุดตัวกรองสามารถอธิบายในอีกนัยหนึ่งได้ว่าการวิเคราะห์สัญญาณถูกแยกออกเป็นสองส่วนคือสัญญาณส่วนที่มีความถี่สูงและสัญญาณส่วนที่มีความถี่ต่ำซึ่งสัญญาณที่ได้จะผ่านตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) และตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) ตามลำดับ ทั้งนี้สัญญาณที่มีส่วนประกอบความถี่สูงจะเรียกส่วนนี้ว่า “ส่วนรายละเอียด (Detail)” และสัญญาณที่มีส่วนประกอบความถี่ต่ำจะเรียกส่วนนี้ว่า “ส่วนการประมาณ (Approximation)” โดยสัญญาณที่ผ่านตัวกรองแล้วจะมีอัตราสุ่มลดลง (Down Sampling) ครึ่งหนึ่งซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์สัญญาณลดลงครึ่งหนึ่ง

ดังนั้นตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถสรุปกระบวนการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 2.14

เมื่อกำหนดให้ HPF คือตัวกรองความถี่สูง (High Pass Filter), LPF คือตัวกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter), F คืออัตราความถี่สุ่มมีหน่วยเป็น Hz , A คือส่วนการประมาณ (Approximation) และ D คือส่วนรายละเอียด (Detail) และ  คืออัตราความถี่ลดลงครึ่งหนึ่ง



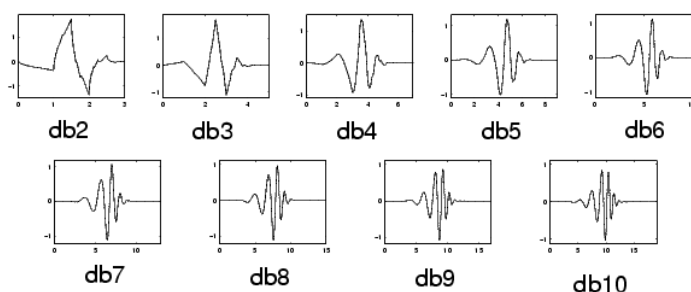
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยระดับชั้นการแปลง 4 ระดับ

2.4.4 ตัวอย่างตระกูลเวฟเล็ตแม่ (Mother wavelets)

เวฟเล็ตแม่ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณมีหลายตระกูลดังต่อไปนี้ [29],[30]

1) Daubechies

เวฟเล็ตตระกูล Daubechies เป็นผลงานของ Ingrid Daubechies ที่ถูกคิดค้นเพื่อสนับสนุนเวฟเล็ตแบบตั้งฉาก (Orthogonal wavelet) ซึ่งใช้ในการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) ชื่อของเวฟเล็ตตระกูล Daubechies สามารถเขียนได้ว่า “dbN” เมื่อ N คืออันดับ ซึ่งลักษณะเวฟเล็ตที่ค่า N ต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 [29]

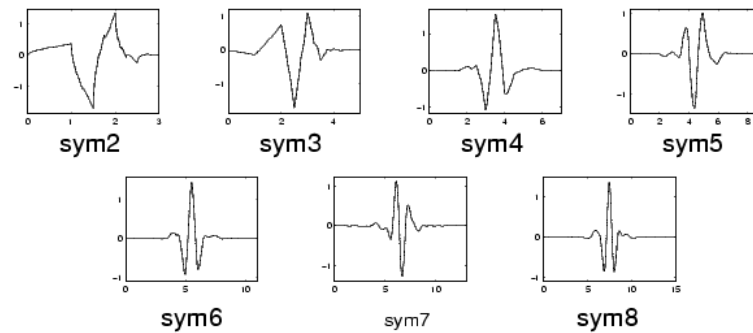


รูปที่ 2.15 ลักษณะเวฟเล็ตตระกูล Daubechies

เวฟเล็ตตระกูล Daubechies ที่ค่า N ต่างๆมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันไป [30] สำหรับการตรวจจับการรบกวนคุณภาพทางไฟฟ้า โดยทั่วไปสามารถจำแนกการรบกวนได้เป็นสองประเภทคือ ภาวะชั่วครู่อย่างรวดเร็ว (fast transient) และภาวะชั่วครู่อย่างช้า (slow transient) สำหรับกรณีภาวะชั่วครู่อย่างรวดเร็ว รูปคลื่นจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วฉับพลันและเกิดในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งเหมาะกับการใช้ db4 และ db6 เพราะความกะทัดรัดของเวฟเล็ตเหมาะแก่การตรวจจับและการระบุตำแหน่งของสิ่งรบกวน แต่สำหรับกรณีภาวะชั่วครู่อย่างช้า รูปคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าและเกิดระยะเวลานาน ซึ่งเหมาะแก่การใช้ db8 และ db10 ซึ่งเวฟเล็ตสามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดอย่างช้าๆได้ดีกว่า

2) Symlets

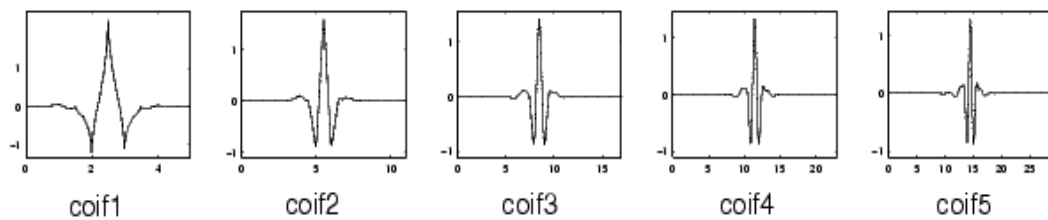
เวฟเล็ตตระกูล Symlets เป็นเวฟเล็ตที่เกือบจะสมมาตรที่ถูกเสนอโดย Daubechies ซึ่งพัฒนามาจากตระกูล db ทำให้ทั้งสองตระกูลมีลักษณะที่คล้ายกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 [29]



รูปที่ 2.16 ลักษณะเวฟเล็ตรระกูล Symlets

3) Coiflets

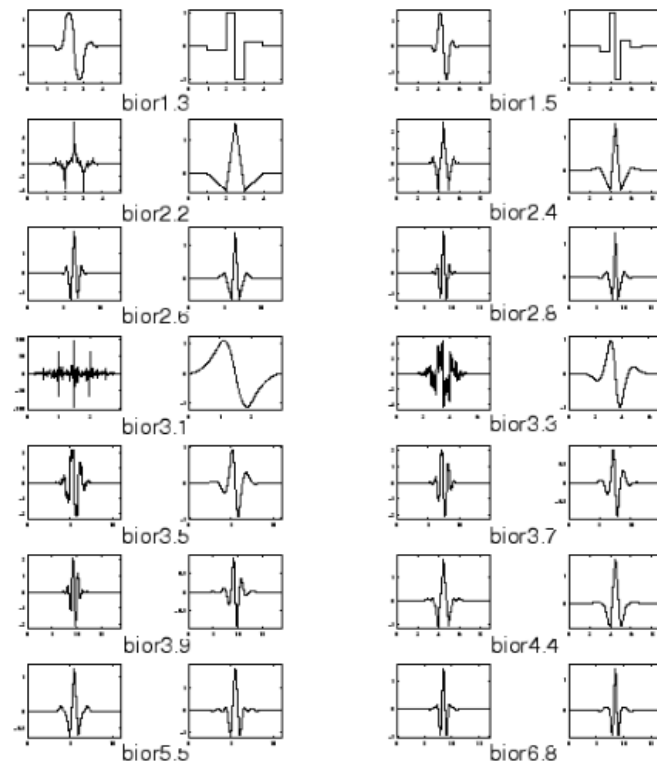
เวฟเล็ตรระกูล Coiflets เป็นเวฟเล็ตรแบบเต็มหน่วยที่ถูกออกแบบโดย Daubechies ตามคำขอร้องของ Ronald Coifman โดยฟังก์ชันเวฟเล็ตรมีโมเมนต์ $2N$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และฟังก์ชันปรับขนาดมีโมเมนต์ $2N-1$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งทั้งสองฟังก์ชันได้รับการสนับสนุนของความกว้าง $6N-1$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.17 [29]



รูปที่ 2.17 ลักษณะเวฟเล็ตรระกูล Coiflets

4) Biorthogonal

เวฟเล็ตรระกูลนี้แสดงคุณสมบัติของขั้นตอนเชิงเส้นซึ่งจำเป็นต่อการฟื้นฟูสัญญาณและรูปภาพ โดยใช้สองเวฟเล็ตร เวฟเล็ตรแรกทางฝั่งซ้ายสำหรับการสลายตัวของสัญญาณ และเวฟเล็ตรทางฝั่งขวาสำหรับการฟื้นฟูสัญญาณ แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 [29]



รูปที่ 2.18 ลักษณะเวฟเลตตระกูล Biorthogonal

2.5 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analysis)

ในระบบไฟฟ้ารูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแส ณ จุดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถได้รับมาจากตัวแปรสัญญาณ (Transducer) ที่เหมาะสมหรือไม่ก็มาจากการคำนวณสำหรับเงื่อนไขในการดำเนินการจากลักษณะของอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีการตั้งสมมติฐานว่า ฟังก์ชันแบบต่อเนื่องใดๆที่เกิดขึ้นซ้ำๆในช่วงเวลา T สามารถแสดงให้เห็นถึงผลรวมของส่วนประกอบกระแสตรง (DC), ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ที่ความถี่มูลฐาน (ความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้าในประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 50 Hz) และอนุกรมของส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์อันดับสูงที่มีความถี่ซึ่งเป็นจำนวนเต็มคูณกับความถี่มูลฐาน เรียกส่วนนี้ว่า “ฮาร์มอนิก”

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเป็นกระบวนการของการคำนวณขนาดและมุมเฟสของรูปคลื่นแบบคาบที่ความถี่มูลฐานและที่ความถี่ฮาร์มอนิก โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นอนุกรมที่รู้จักในชื่อว่า “อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series)” โดยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันในโดเมนเวลาและฟังก์ชันในโดเมนความถี่ ส่วนการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) จะใช้กับสัญญาณแบบไม่เป็นคาบ แต่สามารถประยุกต์ใช้กับสัญญาณแบบคาบได้ โดยใช้ฟังก์ชันเดลต้า (delta function)

ในทางปฏิบัติข้อมูลมักจะถูกอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเวลาที่เป็นตัวอย่างซึ่งแสดงให้เห็นถึงอนุกรมทางเวลาของแอมพลิจูดและถูกแยกออกจากกันโดยช่วงเวลาที่กำหนดของระยะเวลาที่ถูกจำกัดจะใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform : DFT) นอกจากนี้มีการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกให้ทันสมัยยิ่งขึ้นซึ่งมีพื้นฐานมาจากการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วยจะเรียกวิธีนี้ว่า “การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT)

2.5.1 อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series)

อนุกรมฟูริเยร์ของฟังก์ชันแบบคาบ $x(t)$ เขียนสมการได้เป็น [31]

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (2.59)$$

เมื่อ a_0 คือค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน $x(t)$ หรือส่วนประกอบ DC

a_n และ b_n คือสัมประสิทธิ์ของอนุกรม ซึ่งเป็นส่วนประกอบของอันดับ n^{th} ฮาร์มอนิก

เวกเตอร์ n^{th} ฮาร์มอนิก สามารถเขียนได้ว่า

$$A_n \angle \phi_n = a_n + jb_n \quad (2.60)$$

ซึ่งมีขนาด $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ และมุมเฟส $\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$

นอกจากนี้สามารถหาสัมประสิทธิ์ค่าคงที่และ a_0 ได้โดยหาปริพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.59) จาก $-T/2$ ถึง $T/2$ (เมื่อ T คือคาบ) ซึ่งเขียนผลลัพธ์ได้ดังสมการ

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (2.61)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \quad n = 1 \rightarrow \infty \quad (2.62)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \quad n = 1 \rightarrow \infty \quad (2.63)$$

จากสมการที่ (2.61), (2.62) และ (2.63) สามารถเขียนในรูปของความถี่เชิงมุมได้ดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t) \quad (2.64)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.65)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.66)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.67)$$

2.5.2 การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform)

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสัญญาณเป็นคาบและไม่เป็นคาบแต่สัญญาณที่วิเคราะห์เป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่องกันและผลลัพธ์ทางโดเมนความถี่ที่ได้จะเป็นสัญญาณแบบคาบแต่เวลาไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งเขียนสมการการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วยได้ดังนี้ [31]

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.68)$$

เมื่อ N คือจำนวนจุดตัวอย่างต่อหนึ่งคาบ

k คืออันดับฮาร์มอนิก

จากสมการที่ (2.68) นำมาเขียนรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) W^{kn} \quad (2.69)$$

เมื่อ $W = e^{-j2\pi/N}$

ส่วนประกอบของทุกความถี่ ในสมการที่ (2.69) สามารถเขียนเป็นสมการเมทริกซ์ได้ว่า

$$\begin{array}{|l} X(f_0) \\ X(f_1) \\ \vdots \\ X(f_k) \\ \vdots \\ X(f_{N-1}) \end{array} = \frac{1}{N} \begin{array}{|cccccc} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & \dots & W^k & \dots & W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W^k & \dots & W^{k^2} & \dots & W^{k(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & \dots & W^{(N-1)k} & \dots & W^{(N-1)^2} \end{array} \cdot \begin{array}{|l} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_k) \\ \vdots \\ x(t_{N-1}) \end{array} \quad (2.70)$$

จากสมการที่ (2.70) จะย่อรูปได้ว่า

$$[X(f_k)] = 1/N[W^{kn}][x(t_n)] \quad (2.71)$$

การคำนวณของส่วนประกอบ N ความถี่จากตัวอย่าง N ครั้ง ดังนั้นจึงต้องการการคูณเชิงซ้อนทั้งหมดเท่ากับ N^2 ครั้ง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าให้ $N = 8$ แล้วจะได้ว่า

$$\begin{aligned} W &= e^{-j2\pi/8} \\ &= \cos \frac{\pi}{4} - j \sin \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

จะได้ลำดับว่า

$$\begin{aligned} W^0 &= -W^4 = 1 \\ W^1 &= -W^5 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{j1}{\sqrt{2}}\right) \\ W^2 &= -W^6 = -j \\ W^3 &= -W^7 = -\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{j1}{\sqrt{2}}\right) \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าในเมทริกซ์ $[W^{kn}]$ จะมีเพียงแค่สี่ค่าเท่านั้น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

1	1	1	1	1	1	1	1
1	W	$-j$	W^3	-1	$-W$	j	$-W^3$
1	$-j$	-1	j	1	$-j$	-1	j
1	W^3	j	W	-1	$-W^3$	$-j$	$-W$
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	$-W$	$-j$	$-W^3$	-1	W	j	W^3
1	j	-1	$-j$	1	j	-1	$-j$
1	$-W^3$	j	$-W$	-1	W^3	$-j$	W

ถ้าหาก $N = 8$ จะมีการคูณเชิงซ้อนทั้งหมด 64 ครั้ง ดังนั้นหาก N มีค่ามากๆ จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนานจึงต้องมีพัฒนาโดยการลดจำนวนการคูณเชิงซ้อนเพื่อให้สามารถคำนวณได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

2.5.3 การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

การแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วย สำหรับ N ที่มีค่ามากๆ จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก เพราะจำนวนครั้งในการคูณเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับ N^2 ครั้ง จึงไม่ได้รับความนิยม ดังนั้นจึงหันมาใช้การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วแทน [32] ซึ่งมีข้อดีคือมีลักษณะเหมือนกันกับเมทริกซ์ $[W^{kn}]$ ทำให้ที่ส่วนประกอบความถี่เดียวกันจะใช้จำนวนการคูณเชิงซ้อนเพียง $\frac{N}{2} \log_2 N$ ครั้ง และเพื่อให้การลดจำนวนการคูณมีประสิทธิภาพมากที่สุด ค่า N ที่เหมาะสมจะต้องเป็น $N = 2^k$ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มบวก

การลดจำนวนในการคูณเหลือเพียง $\frac{N}{2} \log_2 N$ จะได้ว่า

$$W^{N/2} = -W^0$$

$$W^{(N+2)/2} = -W^1 \text{ เป็นต้น}$$

สิ่งแรกที่ต้องทำคือเรียงลำดับอันดับของแถวใหม่ ถ้าแถวนั้นแสดงด้วยเลขฐานสองแล้วการเรียงลำดับจะแทนด้วยการกลับบิต ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ $N = 8$ แถวที่ 5 จะแทนด้วย 100 ในเลขฐานสอง (แถวที่ 1 คือ 000) เมื่อกลับบิตจะกลายเป็นแถวที่ 2 หรือ 001 ในเลขฐานสอง ดังนั้นแถวที่ 2 และ 5 จะสลับกัน ในทำนองเดียวกันกับแถวที่ 4 และ 7 จะมีค่าเป็น 011 และ 110 ตามลำดับ และสลับกันอีกด้วย สำหรับแถวที่ 1, 3, 6 และ 8 มีเลขฐานสองที่เป็นสมมาตรเมื่อกลับบิต แสดงเมทริกซ์ที่สลับกันแล้ว ได้ดังนี้

1	1	1	1	1	1	1	1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	-j	-1	j	1	-j	-1	j
1	j	-1	-j	1	j	-1	-j
1	W	-j	W ³	-1	-W	j	-W ³
1	-W	-j	-W ³	-1	W	j	W ³
1	W ³	j	W	-1	-W ³	-j	-W
1	-W ³	j	-W	-1	W ³	-j	W

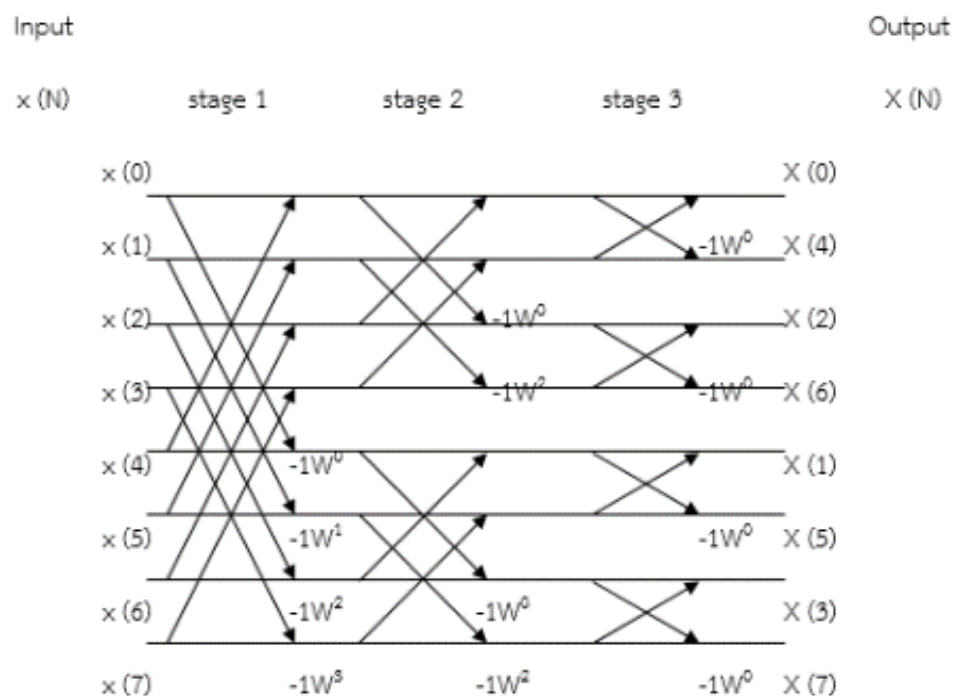
ดังนั้นเมทริกซ์ใหม่สามารถแยกออกเป็น $\log_2 8 = 3$ เมทริกซ์ย่อย จะได้ว่า

1	1						
1	-1						
		1	$-j$				
		1	j				
				1	W		
				1	$-W$		
						1	W^3
						1	$-W^3$

1		1					
	1		1				
1		-1					
	1		-1				
				1		$-j$	
					1		$-j$
				1		j	
					1		j

1				1			
	1				1		
		1				1	
			1				1
1				-1			
	1				-1		
		1				-1	
			1				-1

จากเมทริกซ์ข้างต้นสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็วได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการคำนวณการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว เมื่อ $N = 8$

จากรูปที่ 2.19 ถ้า $N = 8$ จะเห็นได้ว่าจำนวนการคูณเชิงซ้อนจะลดลงเหลือ $\frac{8}{2} \log_2 8$ เท่ากับ 12 ครั้ง ซึ่งจำนวนครั้งในการคำนวณลดลงและเร็วกว่าการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วยอย่างมาก

นอกจากนี้เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วกับสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ จะได้ว่า

$$\text{ส่วนประกอบของ DC : } A_0 = \frac{C_0}{N} \quad (2.72)$$

$$\text{ส่วนประกอบฮาร์มอนิก (ค่ายอด) : } A_h = \frac{2}{N} \operatorname{Re}\{C_h\}, B_h = -\frac{2}{N} \operatorname{Im}\{C_h\} \quad (2.73)$$

$$\text{ส่วนประกอบฮาร์มอนิก (ค่า RMS) : } A_h = \frac{2}{N\sqrt{2}} \operatorname{Re}\{C_h\}, B_h = -\frac{2}{N\sqrt{2}} \operatorname{Im}\{C_h\} \quad (2.74)$$



บทที่ 3

เทคนิคการประยุกต์ใช้วิธีตรวจสอบความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

ในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคการประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอ โดยหัวข้อ 3.1 กล่าวถึงแบบจำลองความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง หัวข้อ 3.2 กล่าวถึงระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้แนะนำเสนอเทคนิคการประยุกต์ใช้วิธีตรวจสอบความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

3.1 แบบจำลองความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง

การสร้างแบบจำลองของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงสร้างจากคุณลักษณะสำคัญของการเป็นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง คือการเกิดอาร์กอิมพีแดนซ์ (Arc impedance) แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองที่นำเสนอโดย Cassie และ Mayr [19] ซึ่งเขียนสมการของการเกิดอาร์กในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง ได้ดังสมการ

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau(u,i)} \left(\frac{ui}{P(u,i)} - 1 \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ u และ i คือแรงดันอาร์กและกระแสอาร์ก ตามลำดับ

$g = \frac{i}{u}$ คือความนำไฟฟ้าของอาร์ก

τ คือค่าคงที่เวลา

P คือกำลังที่ทำให้เย็นตัว

ถ้าให้ τ เท่ากับค่าคงที่ และ $P = P_0 + u_0|i|$ จะจัดรูปสมการที่ (3.1) ได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\frac{dg}{dt} = \frac{G(i)-g}{\tau} \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } G(i) = \frac{i^2}{P_0+u_0|i|} \quad (3.3)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.3) เป็นสัญญาณไซน์ (Sinusoidal) ที่ความถี่ $\omega = \frac{2\pi}{T}$ จะได้ว่าความนำไฟฟ้า (G) มีฟังก์ชันคาบที่ความถี่ 2ω และสามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ฮาร์มอนิกอันดับคู่ได้ดังสมการ (3.4)

$$G(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} G_n e^{j2n\omega t} \quad (3.4)$$

ถ้ากำหนดให้คาบของสมการที่ (3.4) $(\frac{T}{2} \ll \tau)$ จะได้ว่า

$$G(t) = G_0 + \delta G(t) \quad (3.5)$$

เมื่อ G_0 คือความนำไฟฟ้าคงที่ และ $\delta G(t)$ คือความนำไฟฟ้าที่แกว่งไปตามเวลา ในส่วนของความนำไฟฟ้าที่แกว่งไปตามเวลาสามารถกรองได้โดย

$$\tilde{G}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt = G_0 \quad (3.6)$$

นำสมการที่ (3.5) แทนในสมการที่ (3.2) จะได้ว่า

$$g(t) = \hat{g}(t) + \delta g(t) \quad (3.7)$$

นำการดำเนินการในสมการที่ (3.6) ไปดำเนินการทั้งสองข้างของสมการที่ (3.2) จะได้ว่า

$$\frac{d\hat{g}}{dt} = \frac{G_0 - \hat{g}}{\tau} \quad (3.8)$$

ดังนั้นสมการทางโดเมนทางเวลาของสมการที่ (3.8) คือ

$$\hat{g}(t) = G_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.9)$$

เมื่อ \hat{g} คือความนำไฟฟ้าของอาร์ก ณ เวลาใด (Instantaneous arc conductance)

G_0 คือความนำไฟฟ้าคงที่ของอาร์ก (Stationary arc conductance)

นอกจากนี้ในการจำลอง HIF จะจำลองโดยอาศัยสมการที่ (3.9) เมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ G_0 และ τ

3.2 ระบบทดสอบ

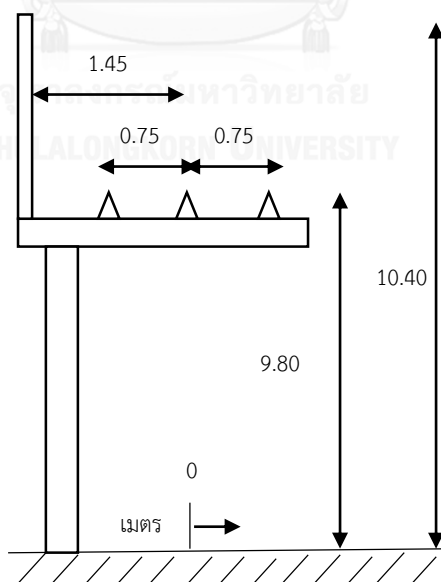
ในการทดสอบแบ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1. ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP) 2. ข้อมูลการเกิดความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการทดลองภาคสนาม และ 3. ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดพร้อมโดยรายละเอียดของแต่ละข้อมูลแสดงในหัวข้อย่อย 3.2.1, 3.2.2 และ 3.2.3 ตามลำดับ โดยทุกข้อมูลกำหนดให้มีความถี่สุ่มเท่ากับ 6400 Hz เท่ากัน

3.2.1 การจำลองเหตุการณ์

ในหัวข้อนี้พิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยใช้โปรแกรม EMTP ที่ระดับแรงดัน 22 kv ชนิดสาย APC-Type 2 ความยาวสาย 10 กิโลเมตร มีกำลังลัดวงจร 114.5 MVA จ่ายโหลดที่ตำแหน่งปลายสาย 4 MVA Power Factor 0.9 lagging ซึ่งข้อมูลของชนิดสายไฟฟ้าที่ใช้เป็นไปตามตารางที่ 3.1 และมีลักษณะของตำแหน่งสายไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลของสายชนิด APC Type 2

รัศมีของสายไฟฟ้า	0.007674 m
ความต้านทาน DC ของสายไฟฟ้า	0.201 Ω /km
SAG ของแต่ละสายไฟฟ้า	0.38 m
ตำแหน่งของสาย A (x,y)	(-0.75,9.80)
ตำแหน่งของสาย B (x,y)	(0,9.80)
ตำแหน่งของสาย C (x,y)	(0.75,9.80)



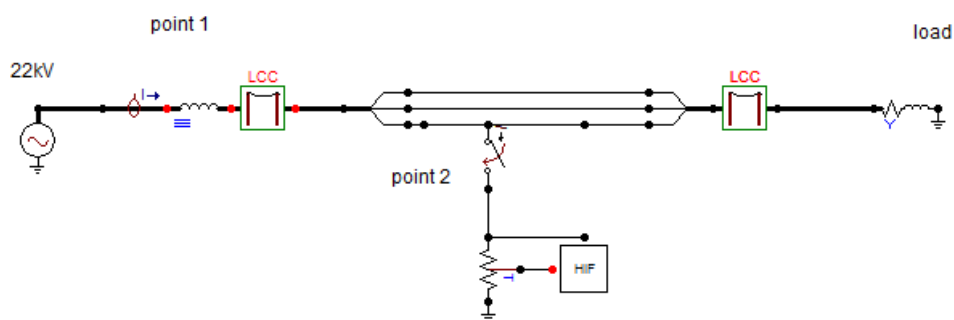
รูปที่ 3.1 ลักษณะของตำแหน่งสายไฟฟ้าชนิด APC-Type 2

นอกจากนี้เพื่อที่จะทดสอบความถูกต้องของวิธีที่ใช้ตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมจะจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าทั้งหมด 3 กลุ่มด้วยกันคือ 1. การเกิดเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง (HIF) 2. การเกิดเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ (LIF) และ 3. การเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติ (Non Fault) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการจำลองเหตุการณ์ของแต่ละกลุ่มได้ดังต่อไปนี้

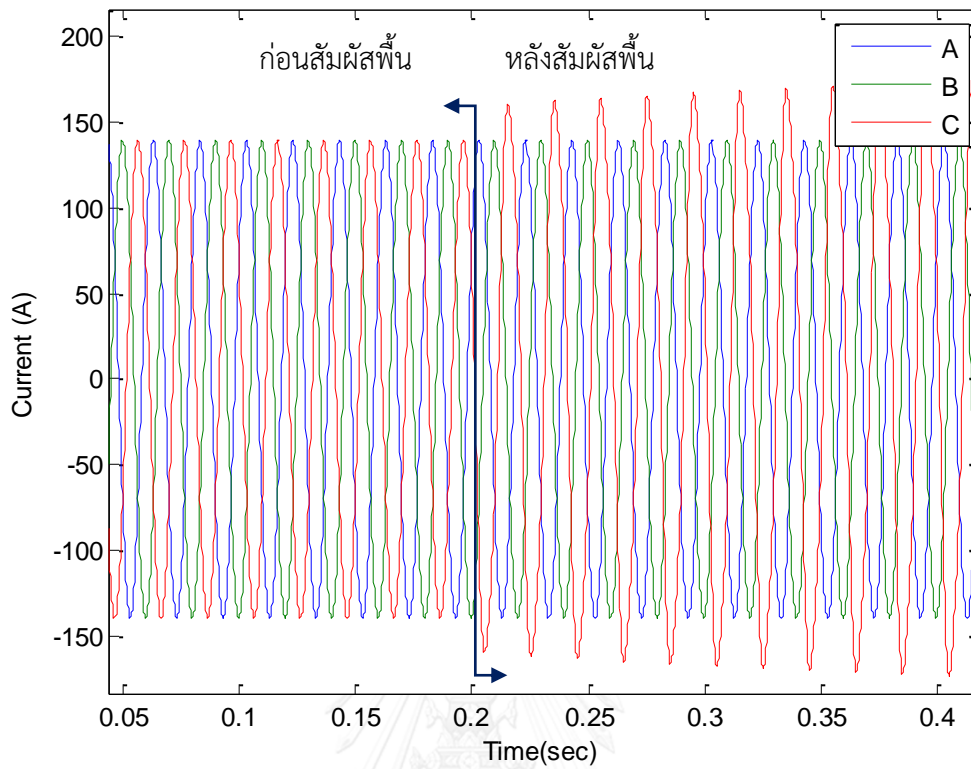
กลุ่มที่ 1 เหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง (HIF)

ในวิทยานิพนธ์เลือกใช้แบบจำลองการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงตามหัวข้อที่ 3.1 โดยจะเปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้าคงที่ของอาร์ก (G_0) และค่าคงที่ทางเวลา (τ) เพื่อที่จะพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยในการจำลองกำหนดขอบเขตค่าสุมของค่าความนำไฟฟ้าคงที่ (G_0) ตั้งแต่ 0.002 ถึง 0.0002 S หรือความต้านทานพื้นผิว 500 ถึง 5000 โอห์ม และสุมค่าคงที่ทางเวลา (τ) ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 โดยจำลองเหตุการณ์ทดสอบทั้งหมด 50 เหตุการณ์

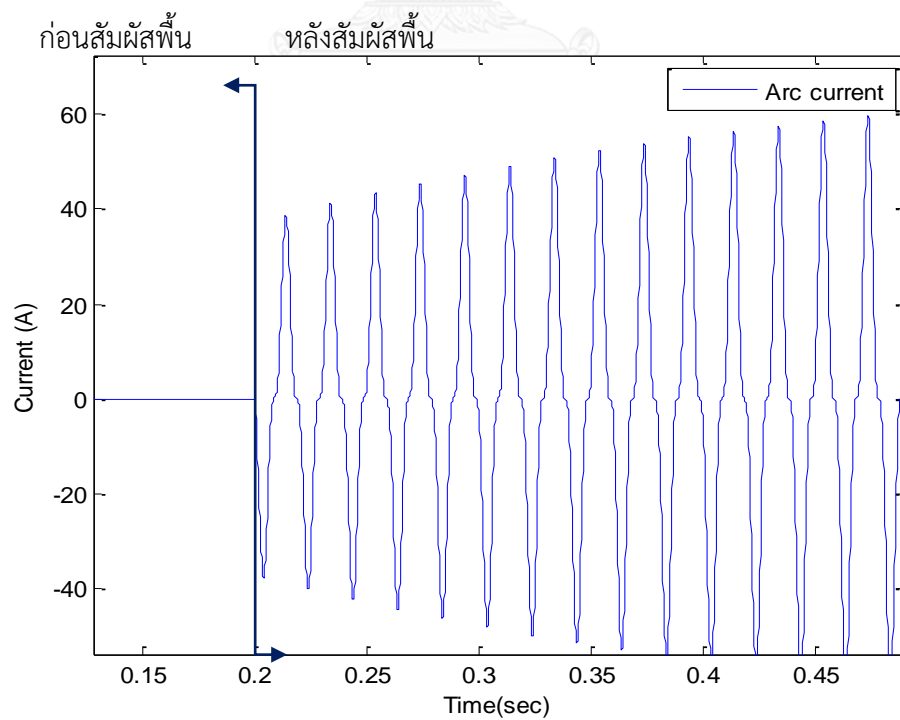
ในการจำลองกำหนดให้เหตุการณ์เกิดขึ้นจากสายตัวนำไฟฟ้าตกรัศมีพื้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสาย (5 km) ที่เฟส C โดยตกรัศมีพื้นที่เวลา 0.2 ถึง 2 วินาที โดยจะวัดกระแสไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 แทนว่าเป็นกระแสที่สถานีไฟฟ้าวัดได้ และตำแหน่งที่ 2 แทนว่าเป็นกระแสที่วัดได้ ณ จุดที่สายตัวนำไฟฟ้าสัมผัส พื้น ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้ากรณีเกิดการลัดวงจรผ่านแบบจำลอง HIF

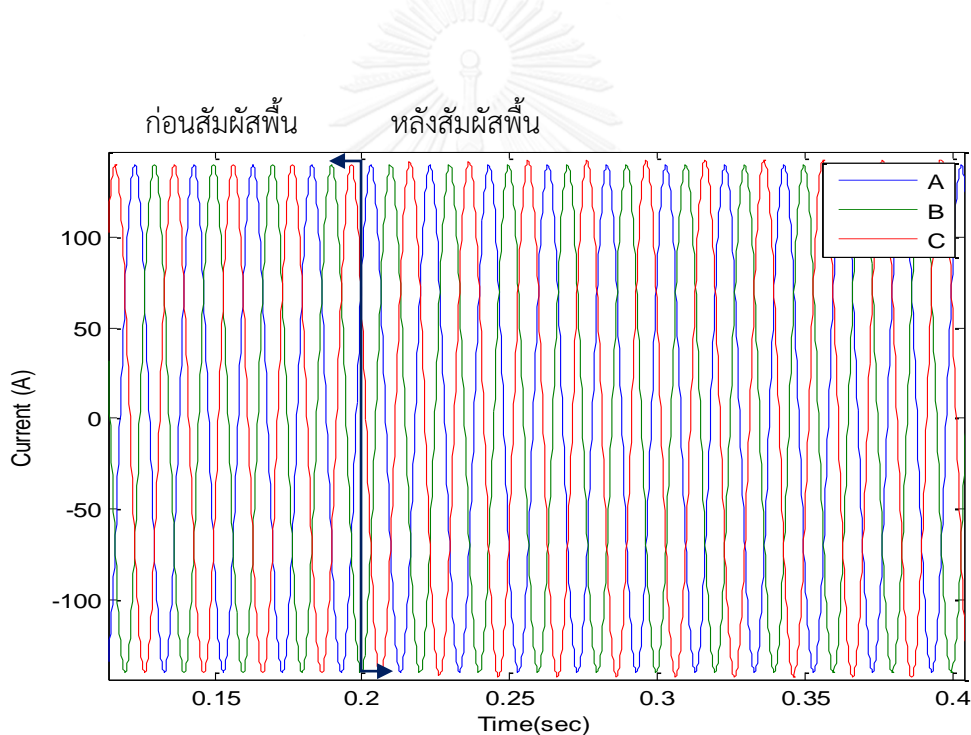


รูปที่ 3.3 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 1 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.002$ $\tau = 0.3$

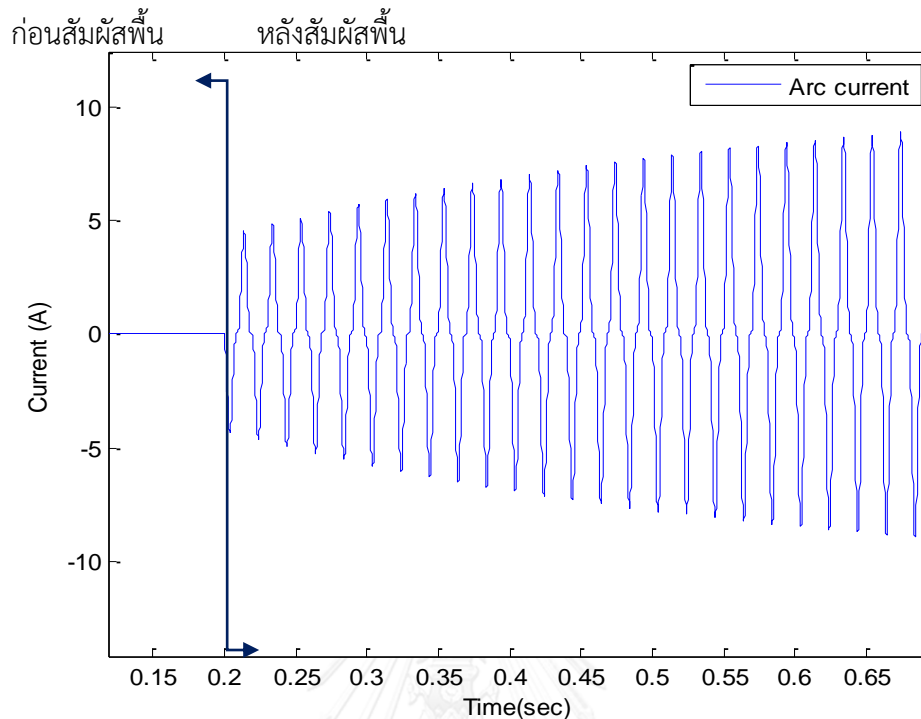


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 2 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.002$ $\tau = 0.3$

ตัวอย่างการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงเมื่อ $G_0 = 0.002$ $\tau = 0.3$ สามารถแสดงรูปคลื่นกระแสที่ตรวจวัดได้ทั้ง 2 ตำแหน่งที่ตั้งรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าเมื่อสายตลัดสัมผัสพื้นจะก่อให้เกิดกระแสอาร์กขึ้น โดยปริมาณกระแสอาร์กที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานของพื้นผิวที่สายสัมผัส ส่วนระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของกระแสอาร์กจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลา นั่นก็หมายความว่าเมื่อเกิด HIF ขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าปริมาณกระแสอาร์กจะเพิ่มขึ้นจากจุดหนึ่งไปยังจุดสูงสุดแต่จะเพิ่มขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลาดังนั้นจากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสอาร์กที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่ประมาณ 40 ถึง 60 A หากเทียบกับปริมาณกระแสโหลด 141 A จากรูปที่ 3.3 เมื่อสายตลัดสัมผัสพื้นจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับกระแสไฟฟ้าได้ค่อนข้างชัดเจนเมื่อมองด้วยตาเปล่า โดยปริมาณกระแสที่วัดได้จากสถานีไฟฟ้าจะเป็นค่ากระแสโหลดรวมกับกระแสอาร์ก



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแสจุดตรวจวัดที่ 1 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.0002$ $\tau = 0.5$

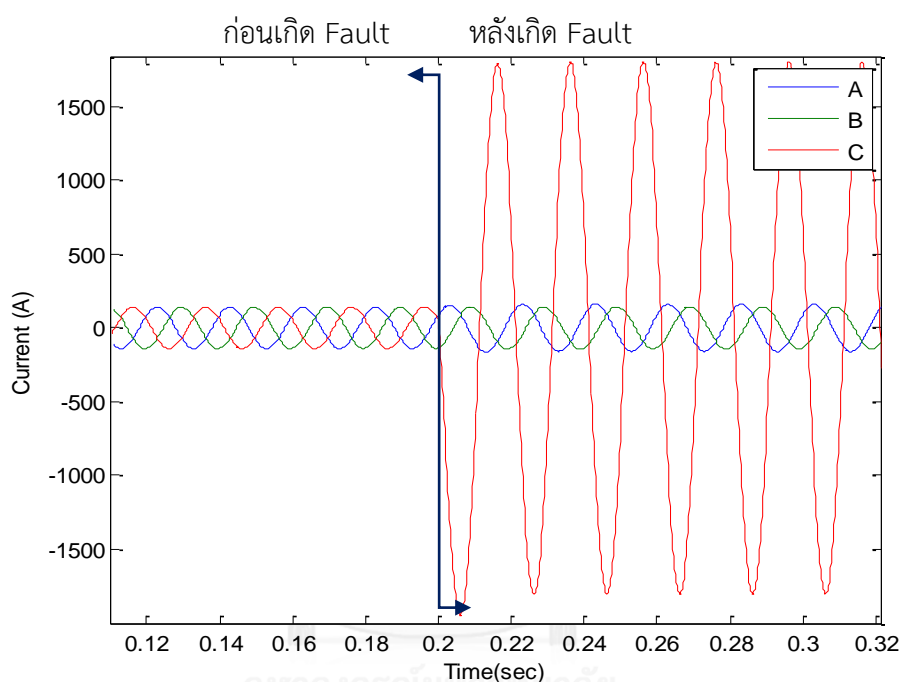


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแสจุดตรวจวัดที่ 2 กรณีเกิด HIF เมื่อ $G_0 = 0.0002$ $\tau = 0.5$

ตัวอย่างการเกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงกรณี $G_0 = 0.0002$ $\tau = 0.5$ สามารถแสดงรูปคลื่นกระแสที่ตรวจวัดได้ทั้ง 2 ตำแหน่งได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ จากรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อสายตักสัมผัสพื้นจะก่อให้เกิดกระแสอาร์กขึ้น โดยปริมาณกระแสอาร์กที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานของพื้นผิวที่สายสัมผัส ส่วนระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของกระแสอาร์กจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลา นั่นก็คือเมื่อเกิด HIF ขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าปริมาณกระแสอาร์กจะเพิ่มขึ้นจากจุดหนึ่งไปยังจุดสูงสุดแต่จะเพิ่มขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับค่าคงที่ทางเวลา ดังนั้นจากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสอาร์กที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 9 A หากเทียบกับปริมาณกระแสไหล 141 A จากรูปที่ 3.5 เมื่อสายตักสัมผัสพื้นจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยจึงทำให้ผลกระทบเมื่อเกิด HIF ไม่ปรากฏให้เห็นในรูปคลื่นกระแสเฟสที่เกิดความผิดพลาดเมื่อมองด้วยตาเปล่า

กลุ่มที่ 2 เหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ (LIF)

ในวิทยานิพนธ์จำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าเช่นเดียวกับรูปที่ 3.2 แต่ความผิดปกติกลุ่มนี้กำหนดให้เกิดการลัดวงจรลงดินแบบเฟสเดียวผ่านตัวต้านทานธรรมดาที่เฟส C โดยกำหนดขอบเขตค่าสุมของความต้านทานลัดวงจรที่ใช้ตั้งแต่ 1 ถึง 50 โอห์ม และเกิดการลัดวงจรตั้งแต่วันที่ 0.2 วินาทีเป็นต้นไป ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสผิดปกติที่เกิดขึ้นสูงมากพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้ ดังรูปที่ 3.7 โดยจำลองเหตุการณ์ทดสอบทั้งหมด 20 เหตุการณ์

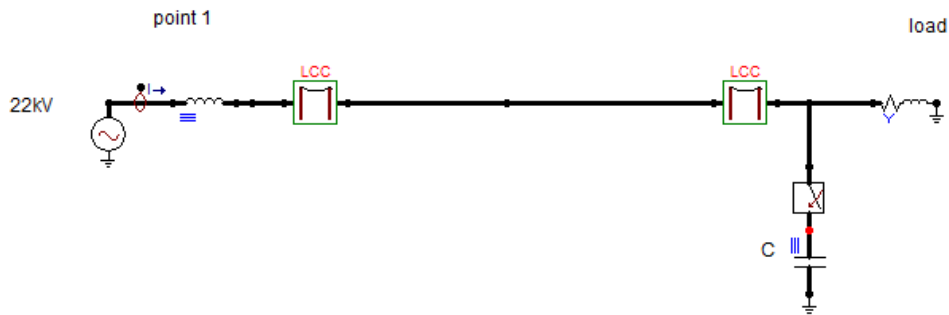


รูปที่ 3.7 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 1 กรณีเกิด LIF เมื่อ $R = 1 \Omega$

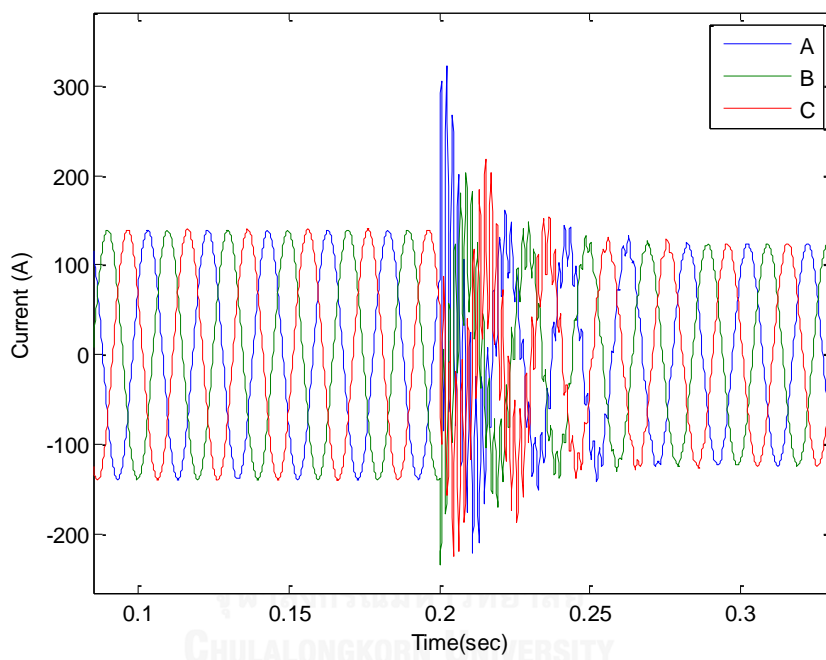
จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นปริมาณกระแสที่วัดได้ที่สถานีไฟฟ้าจะมีค่าพุ่งสูงมากจึงทำให้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น รีเลย์กระแสเกินสามารถตรวจจับได้ง่ายกว่ากรณีเกิดความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูงซึ่งมีกระแสผิดปกติต่ำเมื่อเทียบกับกระแสโหลด

กลุ่มที่ 3 เหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติ (Non Fault)

โดยปกติแล้วคุณลักษณะของสัญญาณกระแสเนื่องจากเกิด HIF จะมีลักษณะคล้ายกับกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและการสับวิตช์ของอุปกรณ์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงกำหนดให้เหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกตินั้นเกิดจากการสับวิตช์ของตัวเก็บประจุ โดยจะต่อตัวเก็บประจุขนาด 638 kVar เข้าไปทั้งสามเฟสของระบบจำหน่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้ากรณีสับตัวเก็บประจุเข้าระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างรูปขยายรูปคลื่นกระแส ณ จุดตรวจวัดที่ 1 กรณีสับตัวเก็บประจุที่เวลา 0.2 s

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อสับตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบที่เวลา 0.2 วินาที จะเกิดปรากฏการณ์ภาวะชั่วครู่ (Transient phenomena) ของกระแสทั้งสามเฟสในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (1 ถึง 3 คาบ) โดยในภาวะชั่วครู่จะมีค่ายอดกระแสพุ่งสูงก่อนที่จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งหากนำสัญญาณภาวะชั่วครู่ไปพิจารณาในโดเมนความถี่จะมีความถี่สูงเกิดขึ้นปะปนมาในสัญญาณด้วยทำให้ปรากฏการณ์ภาวะชั่วครู่นี้หากพิจารณาในโดเมนความถี่จะมีความคล้ายคลึงกับกรณีเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคการตรวจจับภายใต้กลุ่มของเหตุการณ์นี้ด้วย โดยจำลองเหตุการณ์ทดสอบทั้งหมด 10 เหตุการณ์ เมื่อเปลี่ยนจังหวะการสับสวิตช์ของตัวเก็บประจุที่เวลาต่างๆ

3.2.2 ข้อมูลจากการทดลองภาคสนาม

ข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบเป็นข้อมูลทดลองการเกิดความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง [1] ซึ่งทดลองโดยให้สายตัวนำขาดสัมผัสกับพื้นผิวต่างๆ แต่จากการทดลองทั้งหมดมีเพียง 6 เหตุการณ์ที่ลักษณะของสัญญาณกระแสเป็นไปตามคุณลักษณะความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงให้เห็นอย่างชัดเจน โดยแต่ละกรณีจะมีลักษณะพื้นผิวทดลองเป็นไปตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3-2 ลักษณะพื้นผิวทดลองของข้อมูลทดสอบ

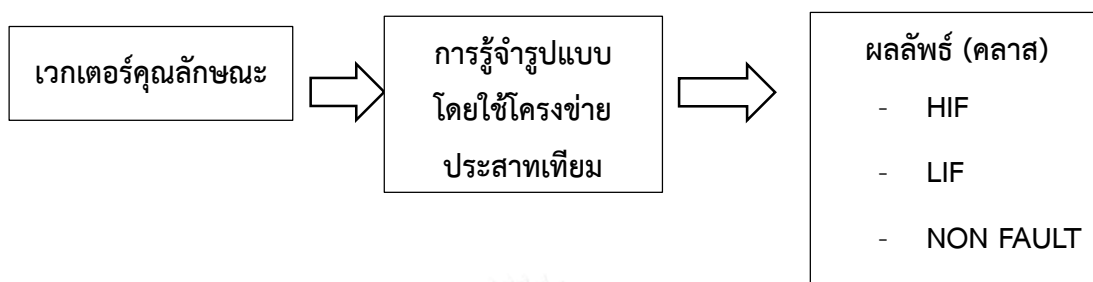
กรณี	ชนิดสาย	พื้นผิวทดลอง
1	สายเปลือย	คอนกรีต
2	สายเปลือย	คอนกรีต 2 ชั้น (สายตัวนำ 2 แฉก)
3	สายเปลือย	คอนกรีต 2 ชั้น (สายตัวนำปลายแหลม)
4	สายเปลือย	คอนกรีตและทราย (Sandwich) (สายตัวนำปลายแหลม)
5	สายเปลือย	คอนกรีตและทราย (Sandwich) (สายตัวนำปลายแหลม)
6	สายเปลือย	คอนกรีตและทราย (Sandwich) (สายตัวนำ 3 แฉก)

3.2.3 ข้อมูลจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาด

ข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบเป็นข้อมูลจริงที่ได้จากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความผิดพลาดที่ถูกรีเลย์กระแสเกินตรวจจับได้ โดยพิจารณาเหตุการณ์ความผิดพลาดที่มีการระบุสาเหตุการเกิดชัดเจน ในที่นี้พิจารณาความผิดพลาดที่มีสาเหตุจากฟ้าผ่าและลูกถ้วยวาวไฟที่เกิดการลัดวงจรลงดินแบบเฟสเดียวจำนวนทั้งสิ้น 25 เหตุการณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิควิธีที่ได้นำเสนอ

3.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ในวิทยานิพนธ์ได้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการจดจำรูปแบบเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้งานตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการไหลของข้อมูลได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการไหลของข้อมูล

จากรูปที่ 3.10 การรู้จำรูปแบบคลาสโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมจำเป็นที่จะต้องให้โครงข่ายได้เรียนรู้สิ่งที่ต้องการจำแนกก่อนเพื่อที่จะสามารถดำเนินงานตามที่ต้องการได้ ซึ่งขั้นตอนการสร้างเวกเตอร์คุณลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการสร้างเวกเตอร์คุณลักษณะ

โดยในวิทยานิพนธ์สร้างเวกเตอร์คุณลักษณะจากสัญญาณกระแสเศษเหลือ (Residual current : I_R) ที่เกิดจากการรวมกันทางเวกเตอร์ของกระแสทั้งสามเฟส ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (3.10)

$$I_R = I_A + I_B + I_C \quad (3.10)$$

เนื่องจากว่าโดยธรรมชาติแล้วการเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะทำให้เกิดส่วนประกอบไม่สมมาตร ดังนั้นการพิจารณากระแสเศษเหลือจึงทำให้กรองสัญญาณกระแสส่วนประกอบที่สมมาตรออกไปได้

หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณกระแสเศษเหลือไปวิเคราะห์ทางโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟ-เล็ทแบบเต็มหน่วย เมื่อได้สัญญาณทางโดเมนความถี่แล้วจึงนำสัญญาณนั้นไปสกัดลักษณะเด่นเพื่อสร้างเวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature vector) สำหรับใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าโครงข่าย

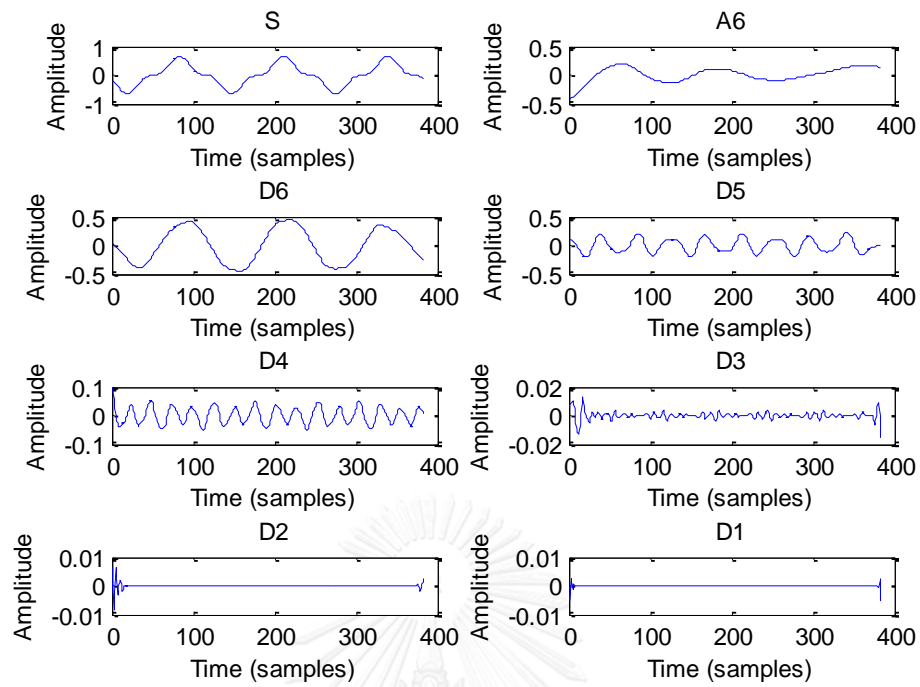
จากรูปที่ 3.11 สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เลือกใช้ระดับการแปลงเวฟเล็ตแบบ 6 ชั้น ซึ่งจากขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตรูปที่ 2.14 จะได้ว่า สัญญาณดั้งเดิม (Original signal : S) เมื่อผ่านการแปลงเวฟเล็ตแล้วประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์ส่วนประมาณ (Approximation : A) และสัมประสิทธิ์ส่วนรายละเอียด (Detail : D) ซึ่งเขียนสมการของ สัญญาณดั้งเดิมได้ดังสมการที่ (3.11) และแสดงช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์ส่วนประมาณและส่วน รายละเอียด ได้ดังตารางที่ 3.3

$$S = A_6 + D_6 + D_5 + D_4 + D_3 + D_2 + D_1 \quad (3.11)$$

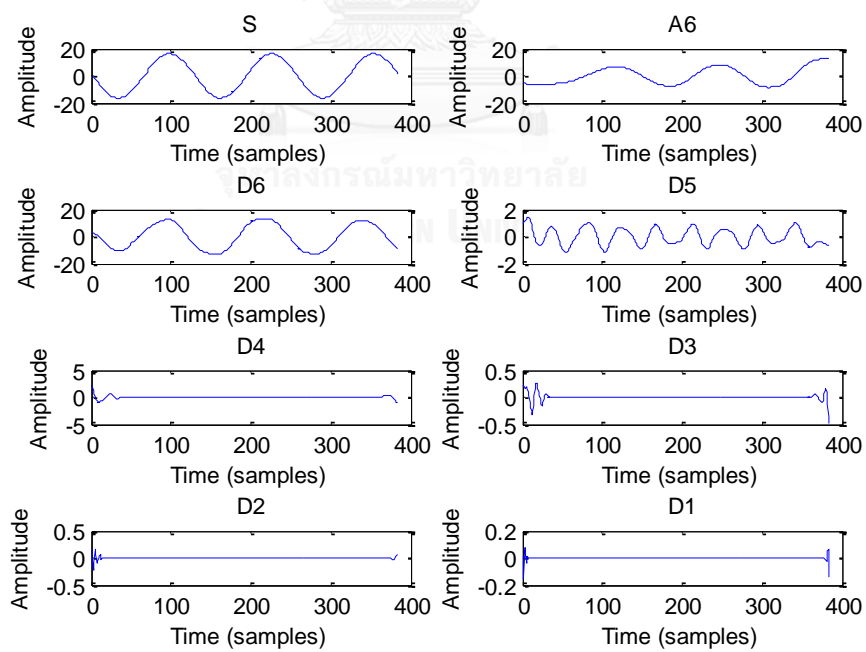
ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงช่วงความถี่ของสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต

สัมประสิทธิ์	ช่วงความถี่ (Hz)
D1	1600 – 3200
D2	800 – 1600
D3	400 – 800
D4	200 - 400
D5	100 – 200
D6	50 - 100
A6	0 – 50

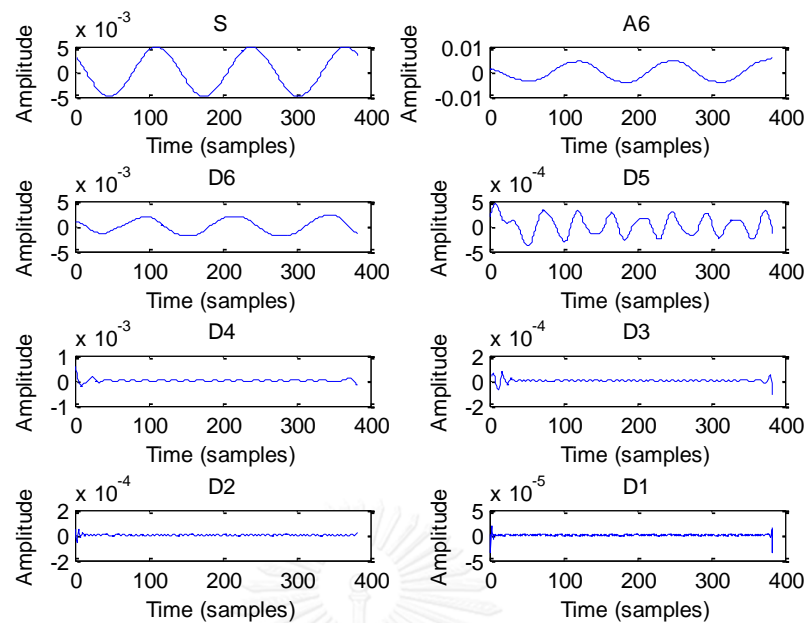
จากสมการที่ (3.11) จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณกระแสดผ่านการแปลงเวฟเล็ตแล้วจะได้ สัญญาณแต่ละช่วงความถี่ออกมาทั้งหมด 7 สัญญาณ หลังจากนั้นนำสัญญาณทั้ง 7 สัญญาณนี้ไปสกัด ลักษณะเด่นจะได้เวกเตอร์คุณลักษณะออกมาเพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลป้อนเข้าให้กับโครงข่ายประสาท เทียม โดยตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตแล้วของแต่ละคลาสแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ถึง 3.14



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างสัญญาณ HIF ที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ทเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนโครงข่าย



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างสัญญาณ LIF ที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ทเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนโครงข่าย



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างสัญญาณ NON FAULT ที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนโครงข่าย

จากรูปที่ 3.12 ถึง 3.14 เป็นตัวอย่างสัญญาณที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ตด้วยเวฟเล็ตแม่ Db6 โดยจะนำสัญญาณแต่ละช่วงความถี่ที่ได้ไปสกัดลักษณะเด่นต่อไป และใช้เป็นข้อมูลฝึกฝนให้กับโครงข่าย โดยข้อมูลที่ใช้ฝึกฝนนั้นได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรมทั้งหมด

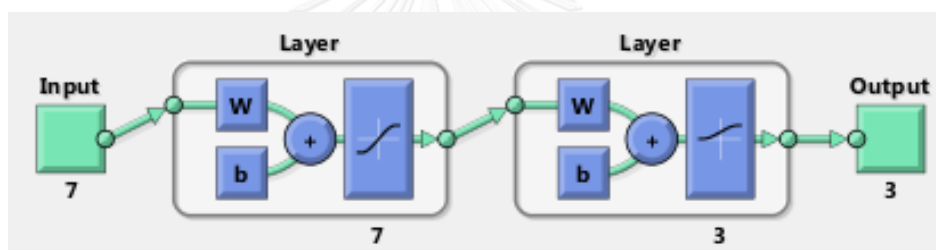
นอกจากนี้การรู้จำรูปแบบโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดโครงสร้างและรายละเอียดของโครงข่ายประสาทเทียมดังต่อไปนี้

- ชนิดของโครงข่าย : เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับหรือแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้น (Multilayer Perceptron : MLP) ซึ่งในที่นี้ใช้โครงข่ายสองชั้น ประกอบด้วยชั้นซ่อน (Hidden layer) และชั้นผลลัพธ์ (Output layer)
- วิธีการเรียนรู้เป็นแบบ Backpropagation
- ฟังก์ชันสำหรับฝึกสอนเป็นแบบ Levenberg – Marquardt Backpropagation (trainlm)
- ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) : สำหรับชั้นซ่อนใช้ Tan-Sigmoid transfer function และ สำหรับชั้นผลลัพธ์ใช้ Log-Sigmoid transfer function เนื่องจากการใช้ Logsig สำหรับชั้นผลลัพธ์จะทำให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่ในที่นี้ต้องการให้ผล

ตอบมีค่าเป็น 0 หรือไม่ก็ 1 ดังนั้นจึงต้องใช้ในการประมาณเข้ามาช่วย (round function) เพื่อที่จะประมาณค่าของผลลัพธ์ให้เป็นค่าจำนวนจริงที่ใกล้ที่สุด

- จำนวนรอบการฝึกฝนเท่ากับ 50 รอบ จึงจะให้โครงข่ายจบการเรียนรู้
- จำนวนโนดของชั้นผลลัพธ์เท่ากับ 3 นิวรอน (เท่ากับจำนวนของคลาสผลลัพธ์)
- จำนวนโนดของชั้นซ่อนเท่ากับ 7 นิวรอน (เท่ากับจำนวนของข้อมูลป้อนเข้า)

ดังนั้นจากรายละเอียดของโครงข่ายประสาทเทียมข้างต้นทำให้สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมคือ 7-7-3 (ข้อมูลป้อนเข้า 7 นิวรอน โหนดซ่อน 7 นิวรอน และผลลัพธ์ 3 นิวรอน) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมแสดงได้ตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.15 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-4 ผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียม

คลาส	ผลลัพธ์ตัวที่ 1 (H)	ผลลัพธ์ตัวที่ 2 (L)	ผลลัพธ์ตัวที่ 3 (N)
HIF	1	0	0
LIF	0	1	0
NON FAULT	0	0	1

3.3.1 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

ในวิทยานิพนธ์จะทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบดังต่อไปนี้

3.3.1.1) การทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียมในการรู้จำรูปแบบคลาส

การทดสอบจะใช้ข้อมูลฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมจากการจำลองเหตุการณ์ทั้งหมด 1300 กรณีซึ่งครอบคลุมทั้ง 3 เหตุการณ์คือ เหตุการณ์ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูง 1000 กรณี (สุ่มเปลี่ยนค่าความต้านทานและค่าคงที่ทางเวลา) เหตุการณ์ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ 200 กรณี (สุ่มเปลี่ยนค่าความต้านทาน) และเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดพลาด 100 กรณี (สุ่มเปลี่ยนจังหวะการสับสวิตช์) โดยจะศึกษาผลของความแม่นยำในการจำแนกของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. การศึกษาผลของชนิดเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการแปลงเวฟเล็ต

ในการทดสอบเลือกใช้เวฟเล็ตแม่ตระกูลดังต่อไปนี้ Daubechies , Symlets , Coiflets , Biorthogonal และ Reverse Biorthogonal

2. การศึกษาผลของประเภทการสกัดลักษณะเด่น

ในการทดสอบเลือกใช้ประเภทการสกัดลักษณะเด่นดังต่อไปนี้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation :STD) , ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square :RMS) และค่าขนาดสูงสุด (Maximum)

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$STD = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right)^2\right)} \quad (3.12)$$

- ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}{n}} \quad (3.13)$$

- ค่าขนาดสูงสุด (Maximum)

$$MAX = \max(x) \text{ เมื่อ } x \text{ มีทั้งหมด } n \text{ ตัว} \quad (3.14)$$

เมื่อ x คือเวกเตอร์ข้อมูล และ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดในเวกเตอร์ข้อมูล

3. การศึกษาผลของจำนวนข้อมูลฝึกฝนและข้อมูลทดสอบ

ในการทดสอบพิจารณาจำนวนข้อมูลฝึกฝนตั้งแต่ร้อยละ 30 ถึงร้อยละ 50 ของจำนวนกรณีทั้งหมดซึ่งแสดงจำนวนข้อมูลฝึกฝนและทดสอบได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3-5 จำนวนข้อมูลสำหรับการสร้างและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

จำนวนร้อยละ	จำนวนข้อมูลฝึกฝน	จำนวนข้อมูลทดสอบ
30	390	910
40	520	780
50	650	650

เมื่อโครงข่ายเรียนรู้เสร็จสิ้นจะประเมินความถูกต้องของโครงข่ายประสาทเทียมว่ามีความแม่นยำในการรู้จำรูปแบบมากน้อยเพียงใดซึ่งค่าความแม่นยำคำนวณได้จาก

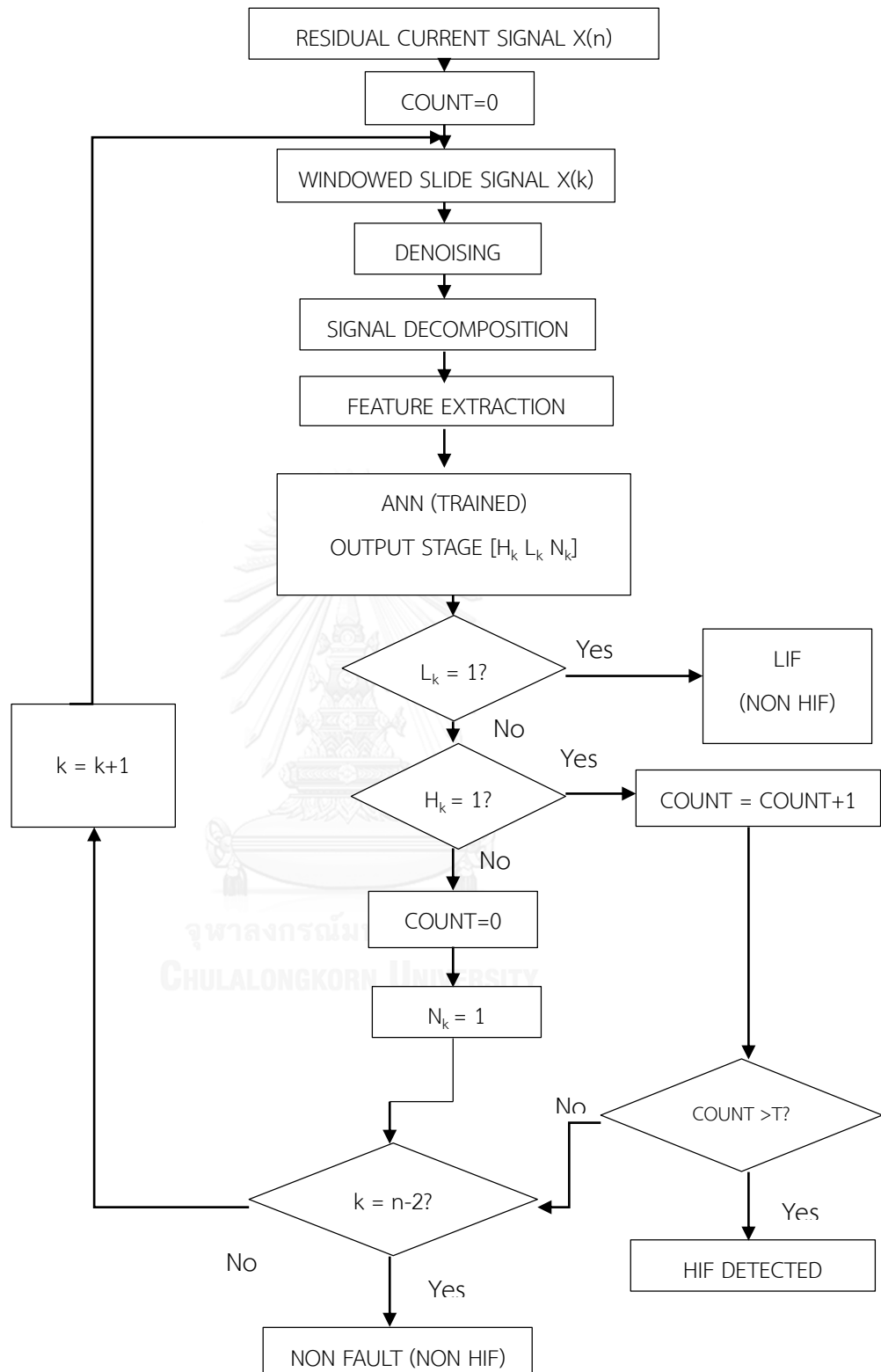
$$\% \text{ Accuracy} = \frac{\text{จำนวนข้อมูลที่จำแนกถูก}}{\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด}} \times 100 \quad (3.15)$$

ทั้งนี้การทดสอบจะสุ่มข้อมูลฝึกฝนและข้อมูลทดสอบจำนวน 50 ครั้ง ของแต่ละเงื่อนไขและนำค่าความแม่นยำในแต่ละครั้งของเงื่อนไขเดียวกันนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อสังเกตผลของค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกันไป เมื่อการทดสอบการเสร็จสิ้นจึงนำผลมาวิเคราะห์เพื่อเลือกเงื่อนไขที่ทำให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ยในการรู้จำรูปแบบสูงสุด หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบการตรวจจับความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทดสอบที่ 3.3.1.2

3.3.1.2) การทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากผลการวิเคราะห์การทดสอบที่ 3.3.1.1 จะได้เงื่อนไขที่ทำให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ยในการรู้จำสูงสุดและนำเงื่อนไขดังกล่าวฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อที่จะทดสอบการตรวจจับความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.16

การทดสอบจะสุ่มข้อมูลฝึกฝนจำนวน 20 ครั้ง และนำผลลัพธ์การตรวจจับที่ได้ในแต่ละครั้งนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณหาร้อยละความถูกต้องในการตรวจจับความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูง



รูปที่ 3.16 แผนผังการตรวจจับ HIF โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อกำหนดให้ n คือจำนวนคาบทั้งหมดของสัญญาณ

k คือลำดับของ moving window โดยเริ่มตั้งแต่ $k = 1$ จนถึง $k = n - 2$

COUNT คือตัวนับจำนวนครั้ง

T คือจำนวนครั้งที่กำหนด

จากรูปที่ 3.16 สามารถอธิบายขั้นตอนการตรวจจับได้ดังนี้คือเริ่มต้นจากนำสัญญาณกระแสพิเศษเหลือที่มีระยะเวลาทั้งหมด n คาบ แบ่งเป็น moving window ที่มีความกว้างเท่ากับ 3 คาบ หลังจากนั้นใช้ฟังก์ชันหนึ่งของเวฟเล็ตกำจัดสัญญาณรบกวนออกและนำสัญญาณนั้นมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตและสกัดลักษณะเด่นตามเงื่อนไขที่ได้เลือกจากการทดสอบที่ 3.3.1.1 ป้อนข้อมูลให้กับโครงข่ายที่ได้รับการฝึกฝนแล้ว ซึ่งผลลัพธ์ของโครงข่ายเป็นไปตามตารางที่ 3.4 โดยหากแสดงสถานะ L_k เท่ากับ 1 ถือว่าเป็น LIF ซึ่งเป็น NON HIF หากสถานะ H_k เท่ากับ 1 จะนับเก็บค่าไว้ซึ่งหากแสดงสถานะ H_k ต่อเนื่องกันมากกว่า T ครั้ง จะถือว่าตรวจจับ HIF ได้ และสุดท้ายหากแสดงสถานะ N_k เท่ากับ 1 ตลอดทั้งสัญญาณหรือแสดงสถานะ H_k เท่ากับ 1 แต่เกิดขึ้นไม่นานพอเท่าที่กำหนดจะถือว่าไม่ใช่เหตุการณ์ความผิดปกติซึ่งเป็น NON HIF

ในวิทยานิพนธ์กำหนดให้ T เท่ากับ 10 ครั้งหรือเทียบเป็นระยะเวลาเท่ากับ 240 ms เนื่องจากว่าโดยทั่วไปหากเกิดความผิดปกติขึ้นแล้วรีเลย์กระแสเกินตรวจจับได้จะมีระยะเวลาในการขจัดความผิดปกติไม่เกิน 240 ms ดังนั้นหากเป็นเหตุการณ์ความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะต้องเกิดต่อเนื่องติดต่อกันนานตามที่กำหนดจึงจะถือว่าตรวจจับความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้

3.4 การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

ในวิทยานิพนธ์ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับการตรวจจับความผิดปกติชนิดอิมพีแดนซ์สูง โดยแบ่งหัวข้อดังต่อไปนี้

3.4.1 การวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม

หากพิจารณากระแสที่วัดได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อสายตัวนำไฟฟ้าสัมผัสพื้นจะทำให้เกิดกระแสอาร์กขึ้นซึ่งพฤติกรรมของกระแสอาร์กมีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นสัญญาณกระแสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) ซึ่งพฤติกรรมนี้ทำให้สัญญาณกระแสมีส่วนประกอบความถี่สูงและส่วนประกอบฮาร์มอนิก

ในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสพิเศษ เนื่องจากในสภาวะปกติระบบจะอยู่ในภาวะสมดุลของทั้งสามเฟสทำให้มีกระแสพิเศษค่อนข้างต่ำและคงที่ หากเกิดภาวะไม่สมดุลจะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโดยใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบฮาร์มอนิกจาก IEC61000-2-24 [33] ได้แบ่งกลุ่มส่วนประกอบฮาร์มอนิกออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

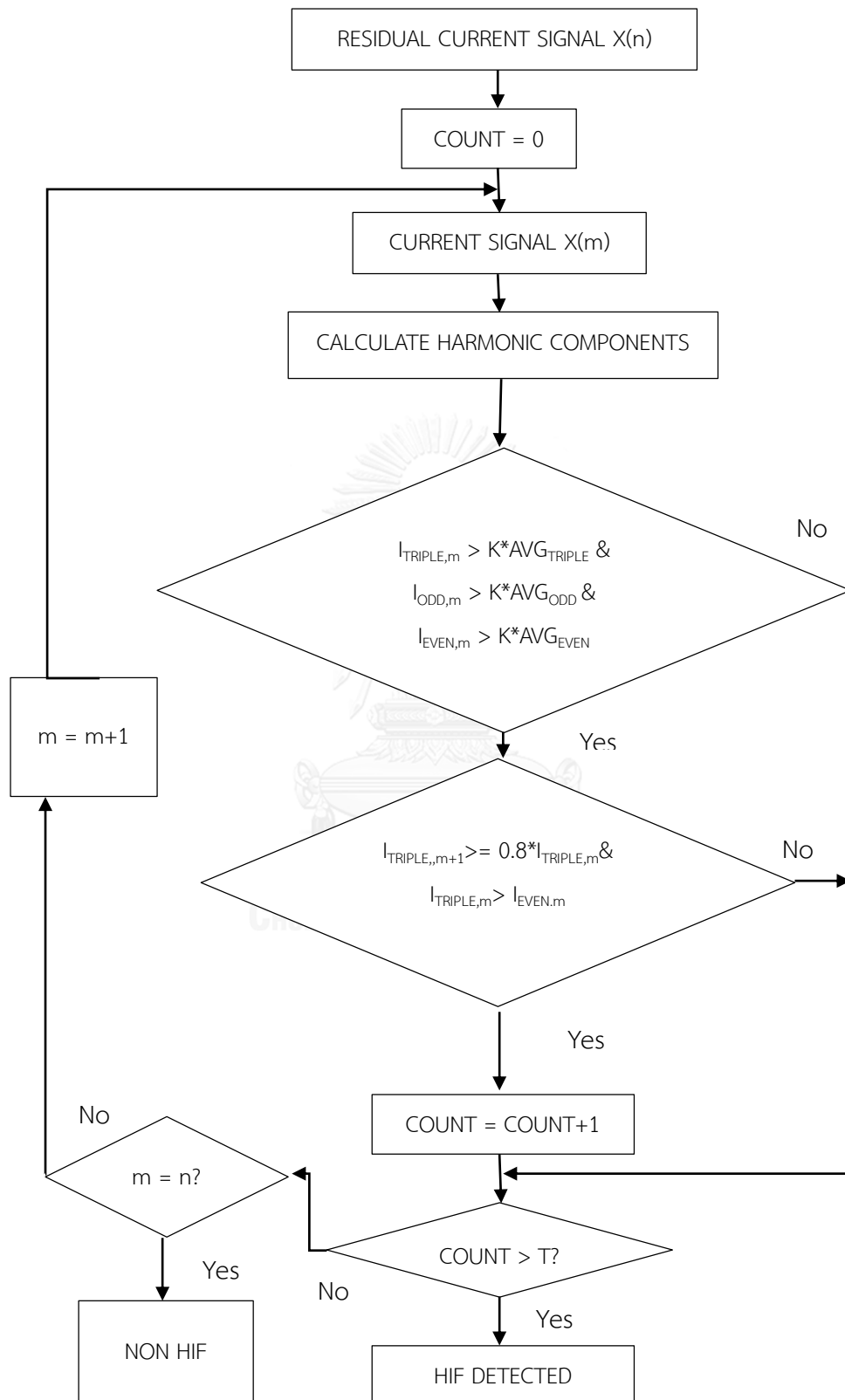
- กลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคู่ (Even Harmonic) ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้เกิดจากรูปคลื่นสัญญาณมีลักษณะไม่สมมาตร (รูปคลื่นซีกบวกและซีกลบไม่เท่ากัน) ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 2,4,6,8 ... เป็นต้น
- กลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคี่ (Odd Harmonic) ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้เกิดจากรูปคลื่นสัญญาณผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 5,7,11,13 ,... เป็นต้น
- กลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามหารลงตัว (Triple Harmonic) โดยทั่วไปการเกิดความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงเป็นการลัดวงจรลงดินแบบเฟสเดียวจึงทำให้มีกระแสลำดับศูนย์ไหลในระบบไฟฟ้า ซึ่งกระแสลำดับศูนย์นี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 3,9,15 ,... เป็นต้น

ผลการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงและการวิเคราะห์ของสัญญาณกระแสของเหตุการณ์จำลอง จะแสดงผลในบทถัดไป โดยพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ถึง 9 เท่านั้น

3.4.2 การทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

หากพิจารณาจากคุณลักษณะทั่วไปของความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงพบว่ารูปคลื่นสัญญาณกระแสมีลักษณะไม่สมมาตรและผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐานซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอาร์ค

ดังนั้นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเพื่อตรวจจับความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่ม ซึ่งแสดงขั้นตอนการตรวจจับความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนผังการตรวจจับ HIF โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

เมื่อกำหนดให้ n คือจำนวนคาบทั้งหมดของสัญญาณ

m คือลำดับของคาบเริ่มตั้งแต่ $m = 1$ จนถึง $m = n$

COUNT คือตัวนับจำนวนครั้ง

K คือค่าคงที่

T คือจำนวนครั้งที่กำหนด

AVG คือค่าเฉลี่ยของกระแสฮาร์มอนิกในสภาวะปกติ

จากรูปที่ 3.17 สามารถอธิบายขั้นตอนการตรวจจับได้ดังนี้ นำสัญญาณกระแสพิเศษเหลือระยะเวลาทั้งหมด n คาบแบ่งพิจารณาทีละคาบและนำสัญญาณมาผ่านการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วจะได้ส่วนประกอบของกระแสฮาร์มอนิก โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงคือเมื่อเกิดความผิดพร่องจะทำให้ส่วนประกอบฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะปกติ ซึ่งในที่นี้กำหนดว่าต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงเกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้เมื่อกำหนดให้ K เท่ากับ 5 (ผู้วิจัยพิจารณาเกณฑ์จากสัญญาณที่ได้จากการจำลองเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง) เงื่อนไขต่อมาคือในบางครั้งความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงทำให้การเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามารถลดตัวไม่ได้เพิ่มขึ้นแบบตรงๆแต่มีการแกว่งขึ้นลงซึ่งหากมองการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามารถลดตัวโดยรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงกำหนดว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามารถลดตัวตำแหน่งถัดไปต้องมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งก่อนหน้านี้และต้องมีขนาดมากกว่าฮาร์มอนิกอันดับคู่ และการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขนี้จะต้องเกิดติดต่อกันนานมากกว่า T ครั้ง จึงจะถือว่าตรวจจับ HIF ได้

ในวิทยานิพนธ์กำหนดให้ T เท่ากับ 10 ครั้งหรือเทียบเป็นระยะเวลาเท่ากับ 200 ms เนื่องจากว่าโดยทั่วไปหากเกิดความผิดพร่องขึ้นแล้วรีเลย์กระแสเกินตรวจจับได้จะมีระยะเวลาในการขจัดความผิดพร่องไม่เกิน 200 ms ดังนั้นหากเป็นเหตุการณ์ความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงจะต้องเกิดต่อเนื่องติดต่อกันนานตามที่กำหนดจึงจะถือว่าตรวจจับความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้

บทที่ 4 ผลการวิจัย

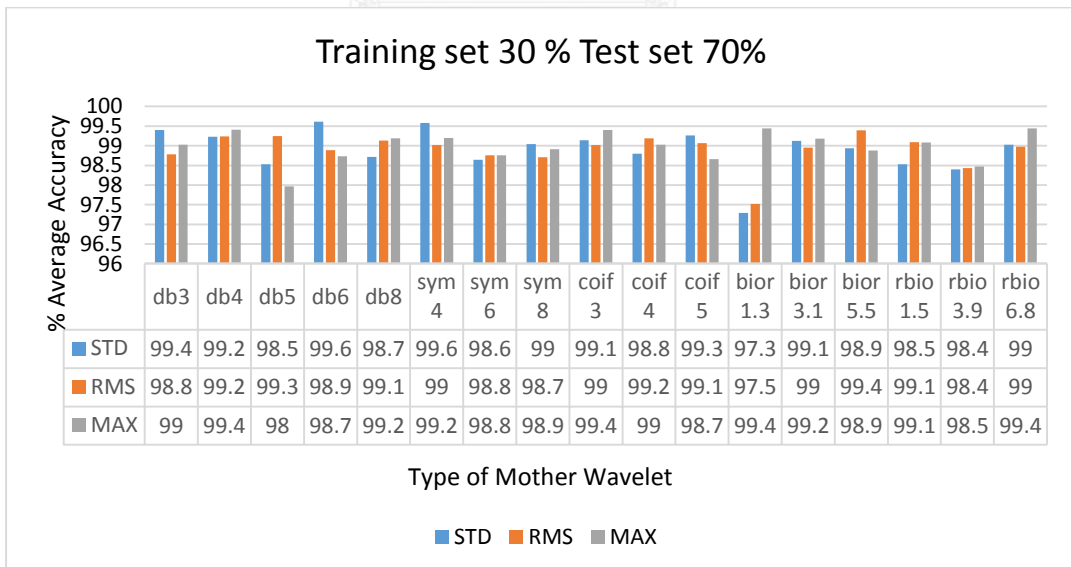
ในบทนี้ขอนำเสนอผลการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก สำหรับการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง ดังรายละเอียดหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ และการเปรียบเทียบระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในหัวข้อที่ 4.3

4.1 ผลการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ในวิทยานิพนธ์ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ ซึ่งรายละเอียดการทดสอบได้นำเสนอในหัวข้อ 3.3.1 ดังนั้นผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของโครงข่ายประสาทเทียม

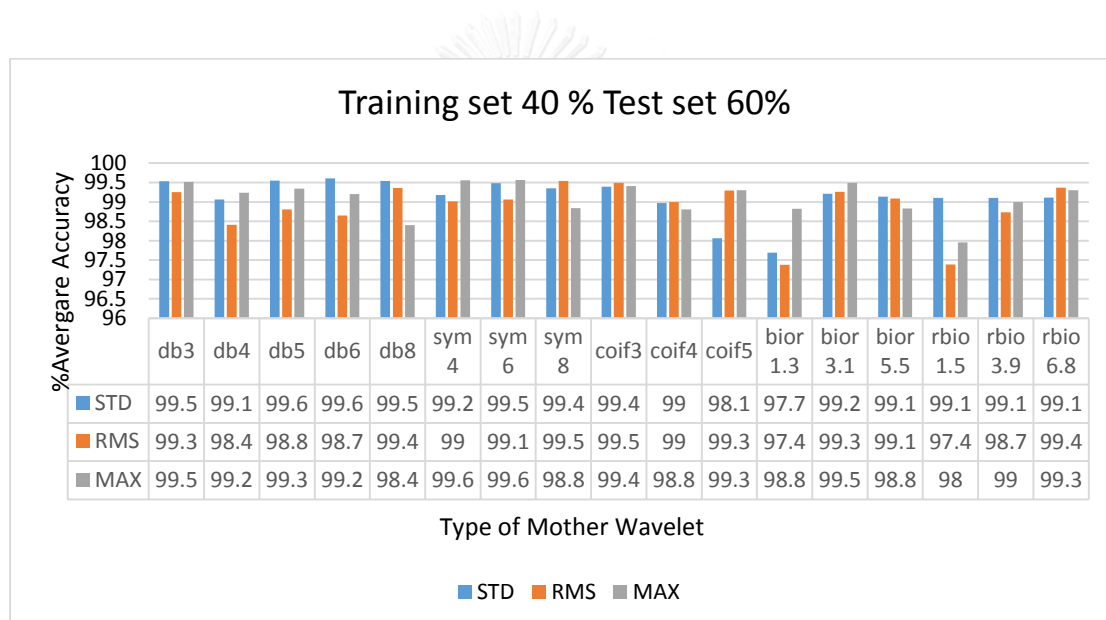
การทดสอบนี้ทำเพื่อเปรียบเทียบผลของเงื่อนไขที่มีต่อค่าความแม่นยำเฉลี่ยในการรู้จำรูปแบบโดยเงื่อนไขที่พิจารณามีดังนี้ ผลของชนิดเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการแปลงเวฟเล็ต, ผลของประเภทลักษณะเด่น และผลของจำนวนข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนให้กับโครงข่าย ซึ่งสามารถแสดงผลของชนิดเวฟเล็ตแม่และประเภทลักษณะเด่นเมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝนได้ดังรูปที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 30

จากรูปที่ 4.1 เมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมร้อยละ 30 หากพิจารณาที่ลักษณะเด่นประเภทเดียวกันโดยเปลี่ยนเวฟเล็ตแม่ชนิดต่างๆ พบว่า

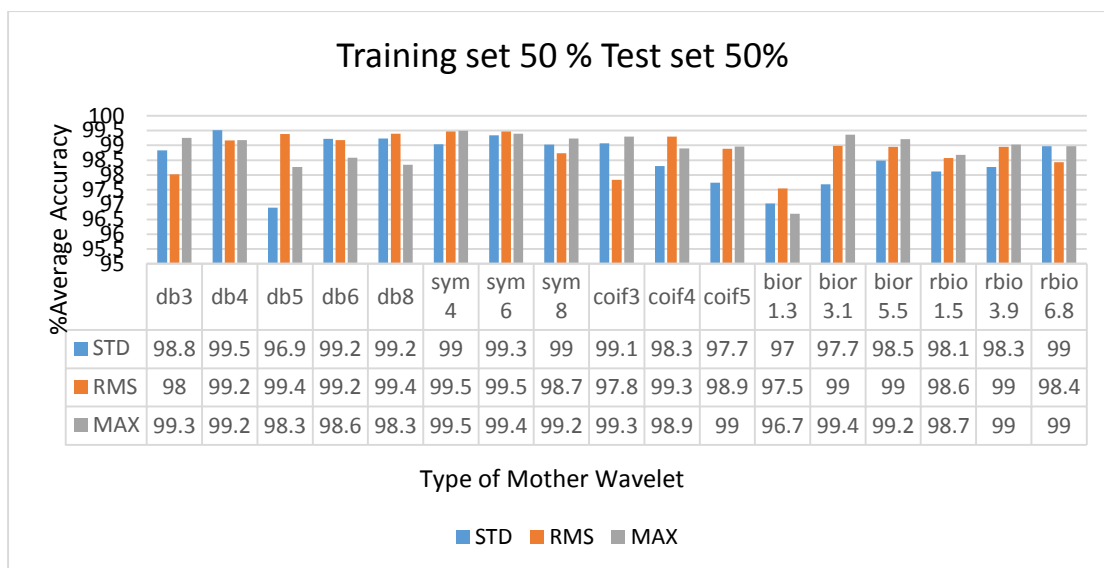
- ลักษณะเด่นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.61 ที่เวฟเล็ตแม่ db6
- ลักษณะเด่นค่าเฉลี่ยกำลังสองมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.39 ที่เวฟเล็ตแม่ bior 5.5
- ลักษณะเด่นค่าขนาดสูงสุดมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.44 ที่เวฟเล็ตแม่ bior 1.3 และ rbio 6.8



รูปที่ 4.2 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40

จากรูปที่ 4.2 เมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมร้อยละ 40 หากพิจารณาที่ลักษณะเด่นประเภทเดียวกันโดยเปลี่ยนเวฟเล็ตแม่ชนิดต่างๆ พบว่า

- ลักษณะเด่นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.61 ที่เวฟเล็ตแม่ db6
- ลักษณะเด่นค่าเฉลี่ยกำลังสองมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.54 ที่เวฟเล็ตแม่ sym8
- ลักษณะเด่นค่าขนาดสูงสุดมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.57 ที่เวฟเล็ตแม่ sym6

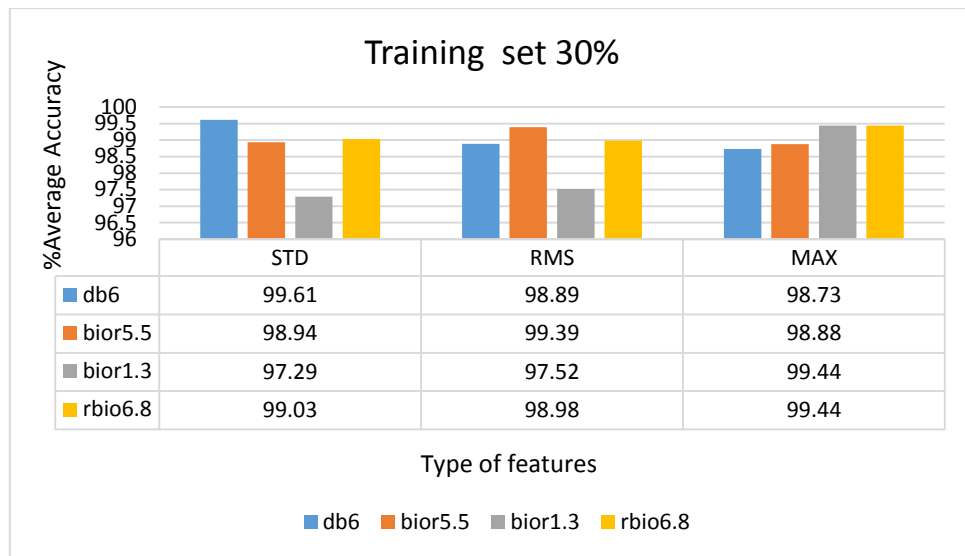


รูปที่ 4.3 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยเมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 50

จากรูปที่ 4.3 เมื่อใช้ข้อมูลฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมร้อยละ 50 หากพิจารณาที่ลักษณะเด่นประเภทเดียวกันโดยเปลี่ยนเวฟเล็ตแม่ชนิดต่างๆ พบว่า

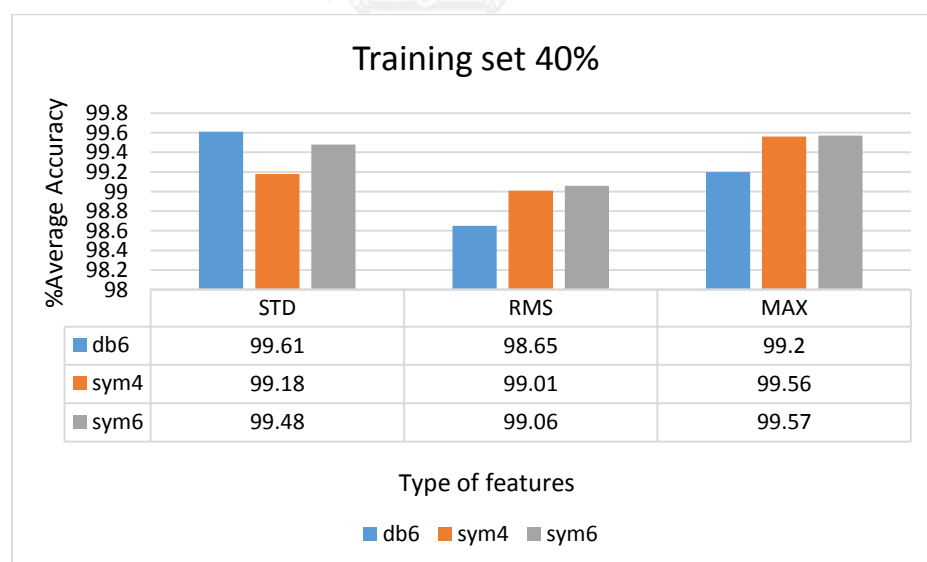
- ลักษณะเด่นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.51 ที่เวฟเล็ตแม่ db4
- ลักษณะเด่นค่าเฉลี่ยกำลังสองมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.47 ที่เวฟเล็ตแม่ sym4 และ sym6
- ลักษณะเด่นค่าขนาดสูงสุดมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 99.49 ที่เวฟเล็ตแม่ sym4

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 หากพิจารณาเฉพาะเวฟเล็ตแม่เพียงอย่างเดียวที่ทำให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดพบว่าที่จำนวนข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 30 ได้แก่เวฟเล็ตแม่ db6, bior5.5, bior1.3 และ rbio6.8 ที่จำนวนข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40 ได้แก่เวฟเล็ตแม่ db6, sym8 และ sym6 ที่จำนวนข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 50 ได้แก่เวฟเล็ตแม่ db4, sym 4 และ sym6 โดยนำเวฟเล็ตแม่แต่ละชนิดเปรียบเทียบผลเมื่อเปลี่ยนประเภทของลักษณะเด่นและจำนวนข้อมูลฝึกฝน แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 ตามลำดับ



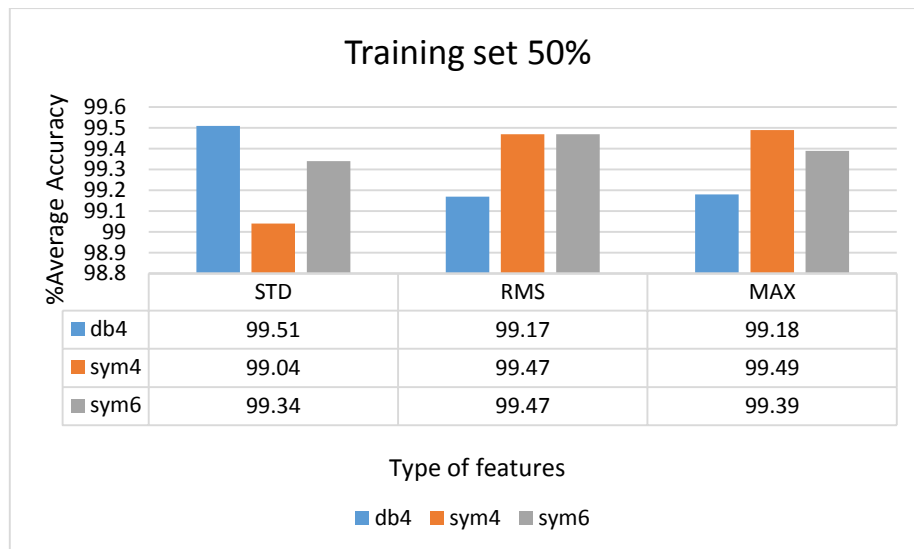
รูปที่ 4.4 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 30 เมื่อเปลี่ยนประเภทลักษณะเด่น

จากรูปที่ 4.4 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้มีค่าความแม่นยำสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 99.61 รองลงมาคือค่าขนาดสูงสุดที่ร้อยละ 99.44 และค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ร้อยละ 99.39



รูปที่ 4.5 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40 เมื่อเปลี่ยนประเภทลักษณะเด่น

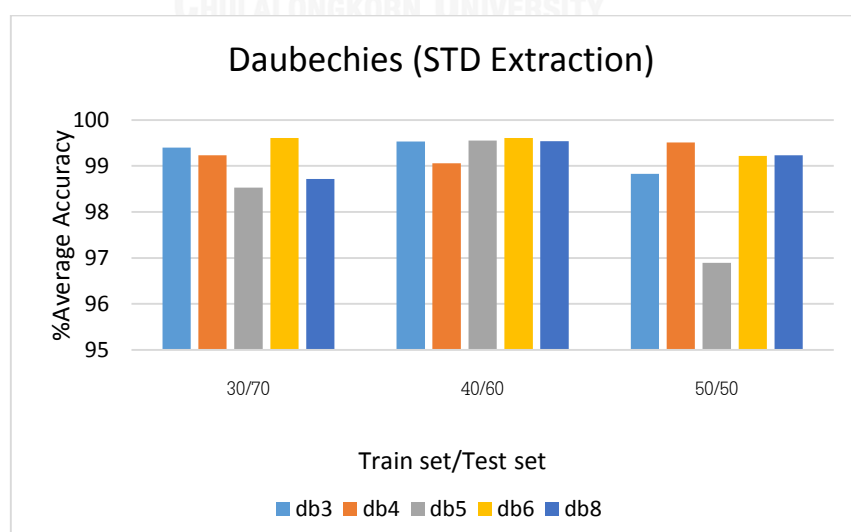
จากรูปที่ 4.5 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้มีค่าความแม่นยำสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 99.61 รองลงมาคือค่าขนาดสูงสุดที่ร้อยละ 99.57 และค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ร้อยละ 99.06



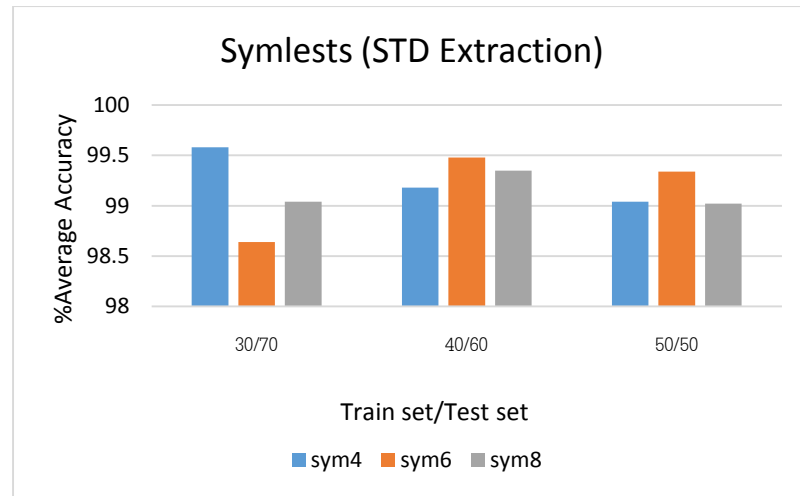
รูปที่ 4.6 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 50 เมื่อเปลี่ยนประเภทลักษณะเด่น

จากรูปที่ 4.6 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้มีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 99.51 รองลงมาคือค่าขนาดสูงสุดที่ร้อยละ 99.49 และค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ร้อยละ 99.47

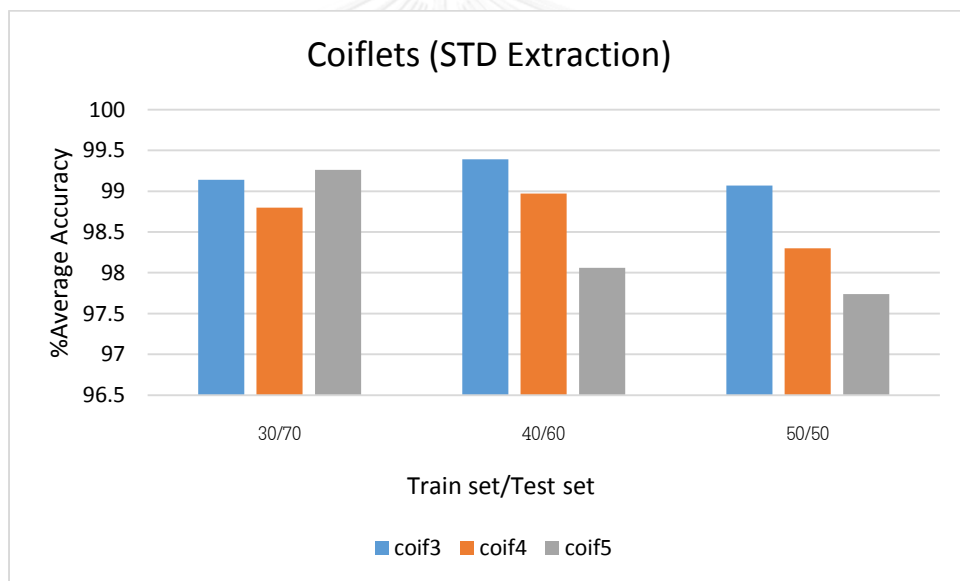
ดังนั้นจากรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 หากพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนประเภทของลักษณะเด่นพบว่า ประเภทลักษณะเด่นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้มีค่าความแม่นยำสูงสุดมากกว่าประเภทของลักษณะเด่นชนิดอื่นๆ นอกจากนี้หากนำเวฟเล็ตแม่ตระกูลทั้ง 5 ตระกูลนำมาสกัดลักษณะเด่นด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและพิจารณาถึงผลของจำนวนข้อมูลที่ใช้ฝึกฝนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.11 ตามลำดับ



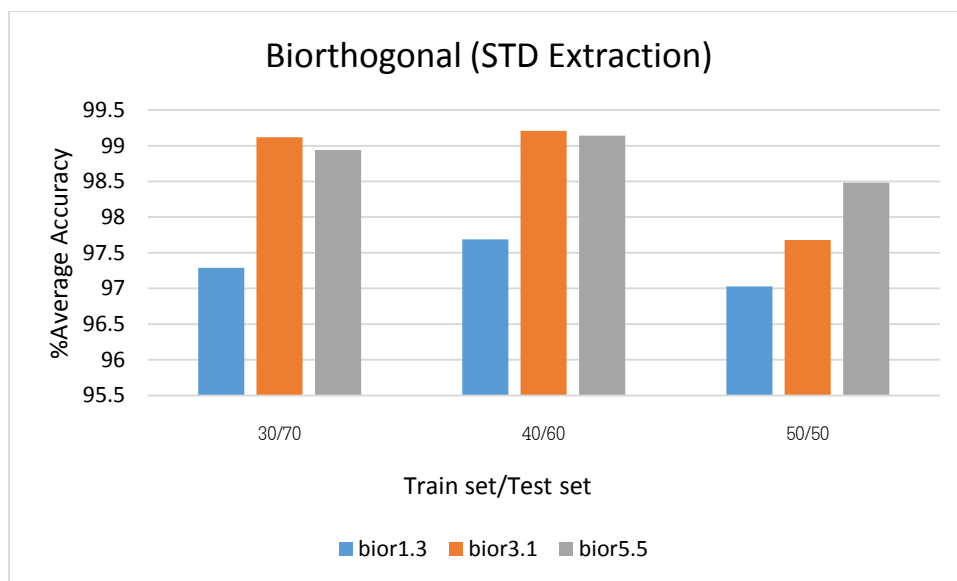
รูปที่ 4.7 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเวฟเล็ตตระกูล Daubechies เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน



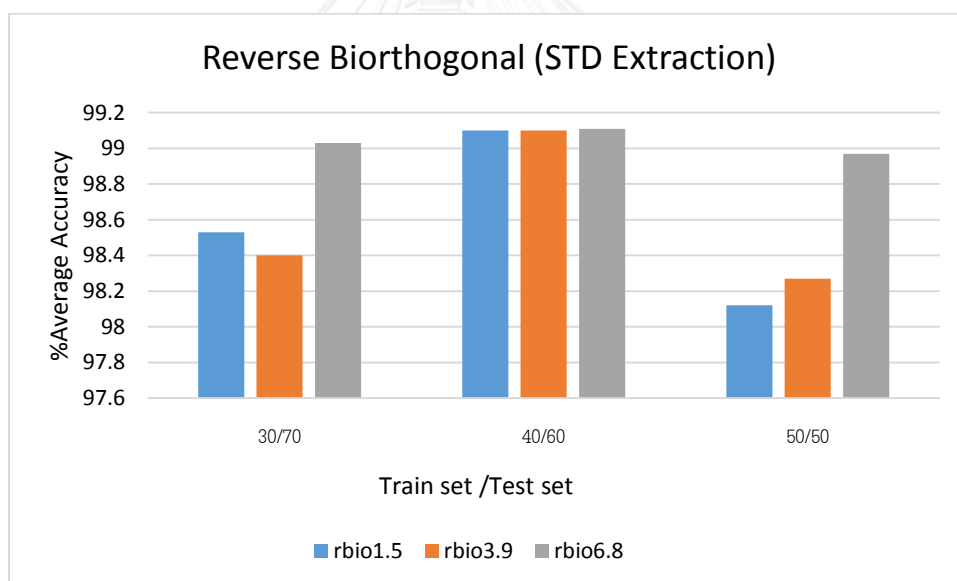
รูปที่ 4.8 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเวฟเล็ตตระกูล Symlets เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน



รูปที่ 4.9 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของเวฟเล็ตตระกูล Coiflets เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน



รูปที่ 4.10 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของตระกูล Biorthogaonal เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน



รูปที่ 4.11 ผลค่าความแม่นยำเฉลี่ยของตระกูล Reverse Bior. เมื่อเปลี่ยนจำนวนข้อมูลฝึกฝน

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาผลของชนิดเวฟเล็ตแม่ตระกูลต่างๆ ผลของประเภทการสกัดลักษณะเด่น และผลของจำนวนข้อมูลฝึกฝนที่มีต่อค่าความแม่นยำเฉลี่ยในการจำแนกคลาส แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.11 หากพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดถี่ถ้วนตามลำดับ คือ

1. ผลของชนิดเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการแปลงเวฟเล็ต

การเลือกชนิดของเวฟเล็ตแม่เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับการตรวจจับสัญญาณต่างๆ โดยต้องคำนึงถึงการนำเวฟเล็ตแม่ไปใช้งานให้เหมาะสมกับสัญญาณที่มีอยู่ โดยการตรวจจับสัญญาณที่มีขนาดเล็กเกิดช่วงระยะเวลาสั้นๆและสลายไปอย่างรวดเร็ว นิยมใช้เวฟเล็ตแม่ตระกูล Daubechies และ Reverse Biorthogonal เป็นต้น ทั้งนี้ความกว้างและความเรียบของเวฟเล็ตแม่ขึ้นอยู่กับเลขลำดับที่ใช้ เช่น db3 ,db4 ,rbio3.1 เป็นต้น

จากผลการทดสอบรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าเวฟเล็ตแม่ db6 มีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุด ในขณะที่รูปที่ 4.3 เวฟเล็ตแม่ Db4 ทำให้มีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุด ดังนั้นจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเวฟเล็ตแม่ตระกูล Daubechies เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์ตรวจจับสัญญาณมากกว่าเวฟเล็ตตระกูลอื่น ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงนิยมใช้เวฟเล็ตแม่ db4 หรือ db6 เป็นต้น

2. ผลของประเภทการสกัดลักษณะเด่น

การสกัดลักษณะเด่นเป็นการลดจำนวนของข้อมูลก่อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียม โดยที่ข้อมูลนั้นต้องยังคงแสดงถึงคุณลักษณะเฉพาะของสัญญาณได้

จากผลการทดสอบรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 พบว่าแต่ละประเภทให้ผลค่าความแม่นยำที่ใกล้เคียงกัน แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานให้ค่าความแม่นยำสูงสุดเมื่อใช้กับเวฟเล็ตแม่ตระกูล Db ทั้งนี้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณหาได้ง่ายและรวดเร็ว

3. ผลของจำนวนข้อมูลฝึกสอน

จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.11 หากพิจารณาที่เวฟเล็ตตระกูลเดียวกันและสกัดด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มจำนวนข้อมูลฝึกสอนของโครงข่ายจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 40 จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ถ้าหากเพิ่มเป็นร้อยละ 50 จะมีความแม่นยำลดลง ปัญหานี้อธิบายได้ว่าโครงข่ายมีการเรียนรู้มากเกินไป (Overfitting) คือโครงข่ายพยายามจดจำรูปแบบของข้อมูลฝึกฝน โดยสร้างรูปแบบที่ทำให้ค่าความผิดพลาดของขั้นตอนการฝึกสอนน้อยที่สุดจนทำให้ไม่สามารถจำแนกข้อมูลที่ยังไม่เคยเจอ (Unseen data) ได้

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าเงื่อนไขที่มีผลต่อความแม่นยำในการจำแนกคลาสมากที่สุดคือชนิดของเวฟเล็ตแม่ต้องเลือกให้เหมาะสม รองลงมาคือประเภทการสกัดลักษณะเด่น

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้การแปลงเวฟเล็ตด้วยเวฟเล็ตแม่ Db6 สกัดลักษณะเด่นด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและจำนวนข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40 สำหรับฝึกฝนโครงข่ายเพื่อใช้ในการตรวจจับ ซึ่งมีค่าความแม่นยำร้อยละ 99.61 และแสดง confusion table ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4-1 confusion table ของเวฟเล็ทแม่ Db6 สกัดด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40

ผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียม	ค่าเป้าหมาย			
	HIF	LIF	NON FAULT	ร้อยละ
HIF	604	1	1	99.67
LIF	0	118	1	99.16
NON FAULT	0	0	55	100
ร้อยละ	100	99.16	96.49	99.61

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงค่าความแม่นยำของการจำแนกคลาสเมื่อใช้เวฟเล็ทแม่ Db6 สกัดลักษณะเด่นด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและข้อมูลฝึกฝนร้อยละ 40 ของทั้งหมด สามารถอธิบายได้ว่า

ในการทดสอบมีจำนวนเหตุการณ์ของความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงเท่ากับ 604 เหตุการณ์ โครงข่ายจำแนกได้ถูกต้อง 604 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100

ในการทดสอบมีจำนวนเหตุการณ์ของความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำเท่ากับ 119 เหตุการณ์ โครงข่ายจำแนกได้ถูกต้อง 118 เหตุการณ์ จำแนกผิดเป็นความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูง 1 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 99.16

ในการทดสอบมีจำนวนเหตุการณ์ของเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดพลาดเท่ากับ 57 เหตุการณ์ โครงข่ายจำแนกได้ถูกต้อง 55 เหตุการณ์ จำแนกผิดเป็นความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูง 1 เหตุการณ์ และจำแนกผิดเป็นความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ 1 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 96.49

ดังนั้นสรุปได้ว่าเหตุการณ์ทดสอบทั้งหมด 780 เหตุการณ์ จำแนกคลาสได้ถูกต้อง 777 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 99.61

4.1.2 ผลการทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ข้อมูลฝึกสอนโครงข่ายสร้างมาจากการแปลงเวฟเล็ตด้วยเวฟเล็ตแม่ Db6 และสกัดลักษณะเด่นด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อฝึกฝนด้วยจำนวนข้อมูล 520 เหตุการณ์ และดำเนินการทดสอบการตรวจจับตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.16

โดยกำหนดให้ T เท่ากับ 10 และจำนวนข้อมูลทดสอบแบ่งได้ดังนี้ เหตุการณ์ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการจำลองจำนวน 50 เหตุการณ์ เหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการจำลองจำนวน 30 เหตุการณ์ (ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำจำนวน 20 เหตุการณ์และเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดพลาด 10 เหตุการณ์) เหตุการณ์ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการทดลองภาคสนามจำนวน 6 เหตุการณ์ เหตุการณ์ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดพลาดจำนวน 25 เหตุการณ์

ดังนั้นสรุปได้ว่าเหตุการณ์ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีทั้งหมด 56 เหตุการณ์และเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีทั้งหมด 55 เหตุการณ์ รวมทั้งสิ้น 111 เหตุการณ์

ทั้งนี้การทดสอบจะสุ่มข้อมูลฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมจำนวน 20 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยเพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมที่ออกแบบไว้ว่ามีความแม่นยำในการตรวจจับมากน้อยเพียงใด ซึ่งแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบการตรวจจับเมื่อใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เหตุการณ์ ผลการทดสอบ	HIF (56 เหตุการณ์)	NON HIF (55 เหตุการณ์)	ร้อยละ
HIF DETECTED	55	1	98.21
NON HIF	1	54	98.18
ร้อยละ	98.21	98.18	98.2

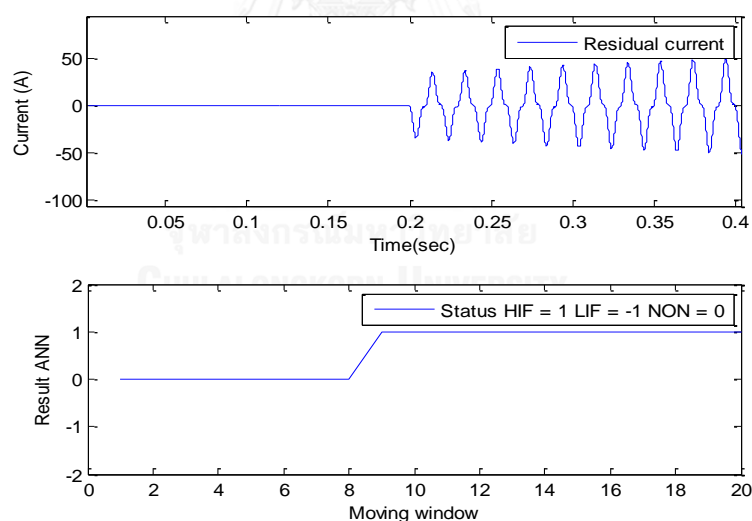
จากผลการทดสอบตารางที่ 4.2 อธิบายได้ว่า

อัลกอริทึมตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ถูกต้องจำนวน 55 เหตุการณ์จากทั้งหมด 56 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 98.21

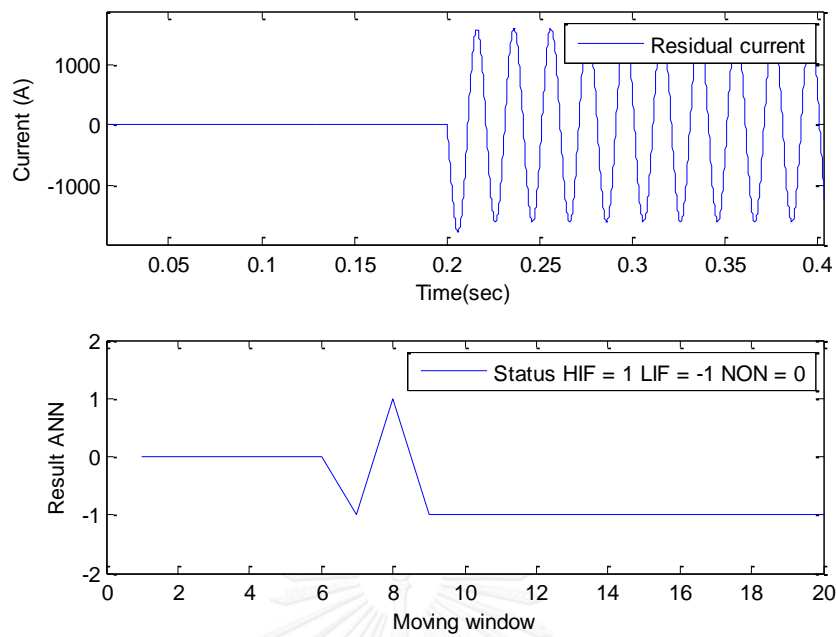
อัลกอริทึมตรวจจับเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงเป็นเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ 1 เหตุการณ์จากทั้งหมด 55 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 98.18

ดังนั้นสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตสามารถตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงคิดเป็นความถูกต้องเฉลี่ยทั้งหมดร้อยละ 98.2 ของเหตุการณ์ทั้งหมด 111 เหตุการณ์

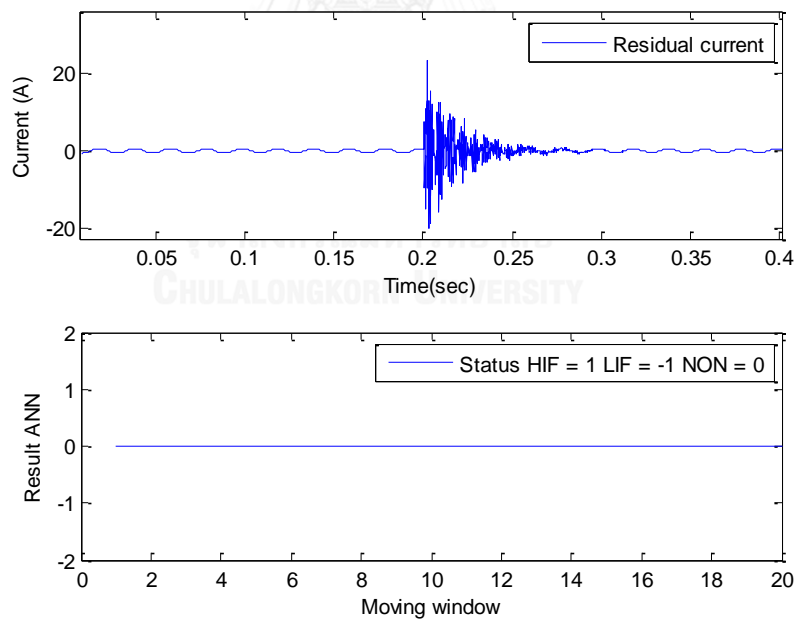
นอกจากนี้ขอเสนอตัวอย่างของเหตุการณ์ที่ใช้ทดสอบและผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 เมื่อกำหนดให้ผลลัพธ์ของโครงข่ายประสาทเทียมมีสถานะแสดงว่าถ้าผลลัพธ์คือ HIF [100] แสดงสถานะเป็น 1 ถ้าผลลัพธ์คือ LIF [010] แสดงสถานะเป็น -1 และถ้าผลลัพธ์เป็น NON FAULT [001] แสดงสถานะเป็น 0



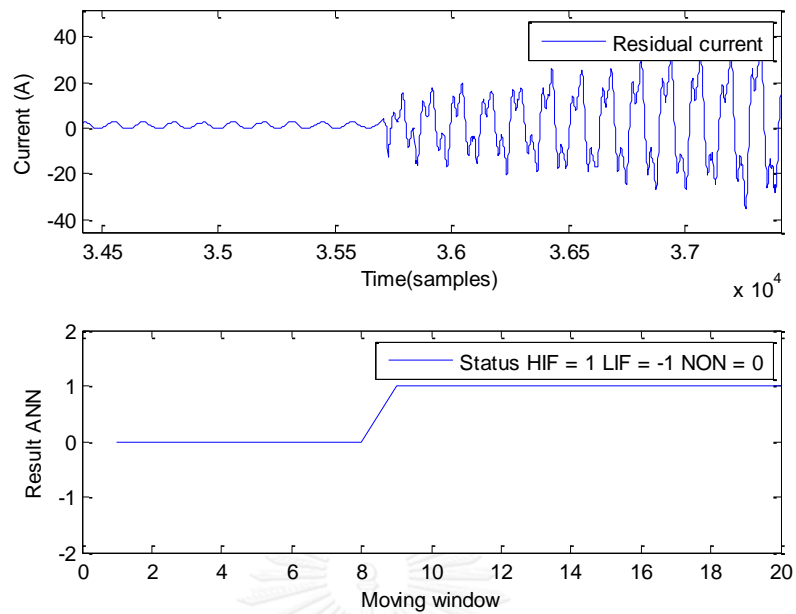
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณี HIF จากการจำลอง



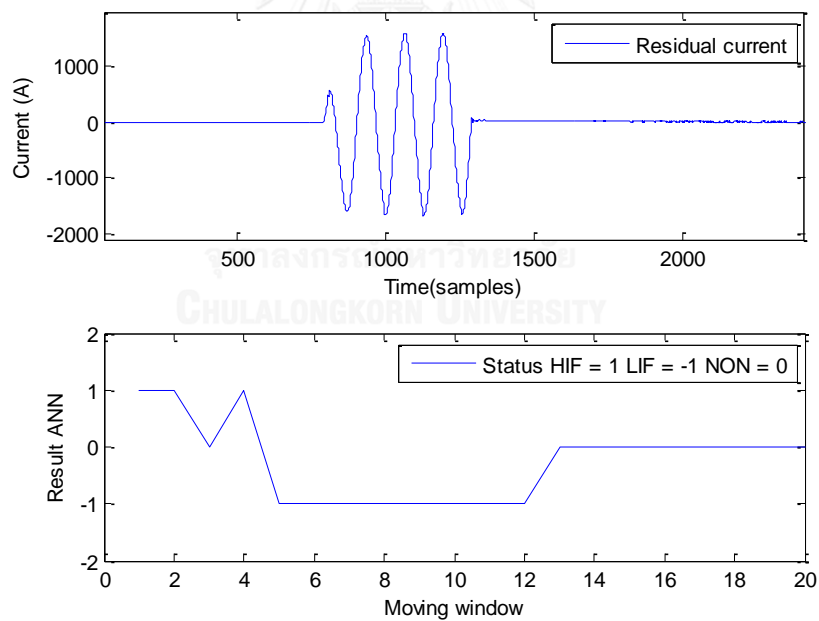
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณี LIF จากการจำลอง



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณีสับตัวเก็บประจุจากการจำลอง



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายกรณี HIF จากข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 1

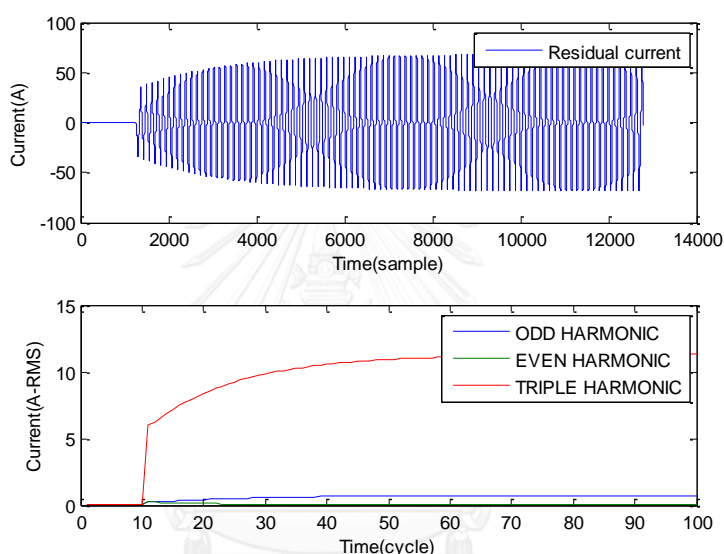


รูปที่ 4.16 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกรณี LIF จากข้อมูลของเครื่องบันทึก

4.2 ผลการประยุกต์เมื่อใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

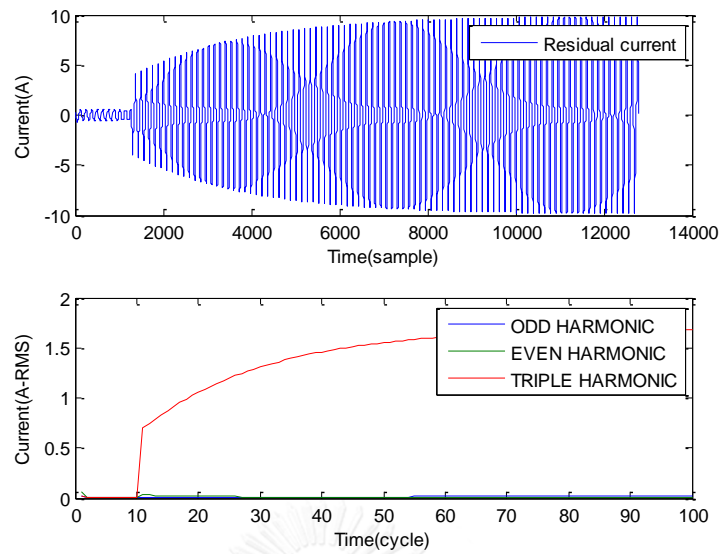
4.2.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม

ในวิทยานิพนธ์ขอเสนอเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง เหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำและเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกตินำมาพิจารณาส่วนประกอบของกระแสฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่ม คือ กลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคี่ (I_5+I_7), กลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคู่ ($I_2+I_4+I_6+I_8$) และกลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามหารลงตัว (I_3+I_9) โดยพิจารณาเฉพาะขนาดกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงได้รูปที่ 4.17 ถึง 4.20



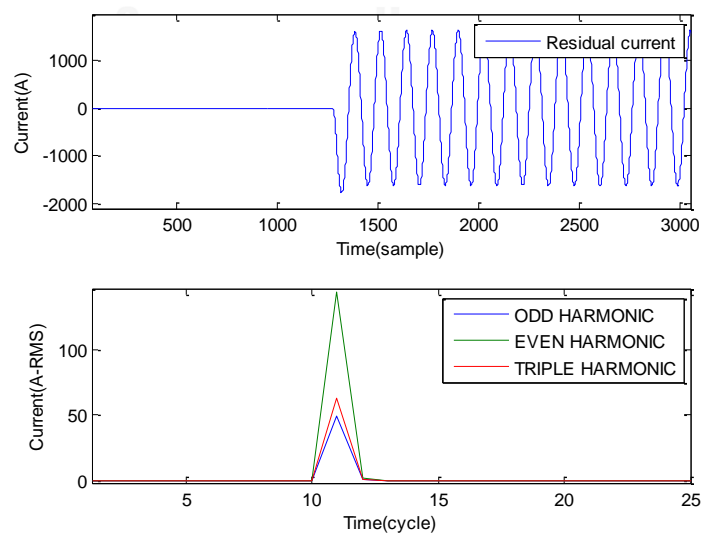
รูปที่ 4.17 กระแสฮาร์มอนิกกรณีความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูง เมื่อความต้านทานพื้นผิว 500 Ω

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงความต้านทานพื้นผิวประมาณ 500 โอห์มและมีกระแสเหลือประมาณ 40 ถึง 60 A จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามหารลงตัวได้อย่างชัดเจน โดยที่กระแสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเริ่มจากประมาณ 5 A_{RMS} จนถึงประมาณ 10 A_{RMS} ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่มีค่าค่อนข้างน้อยประมาณ 1 A_{RMS} ซึ่งปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งสองกลุ่มนี้จะแตกต่างจากในสภาวะปกติค่อนข้างเห็นได้ชัดเพราะกระแสฮาร์มอนิกช่วงสภาวะปกติมีค่าค่อนข้างต่ำและคงที่เนื่องจากอยู่ในภาวะสมดุลของทั้งสามเฟส



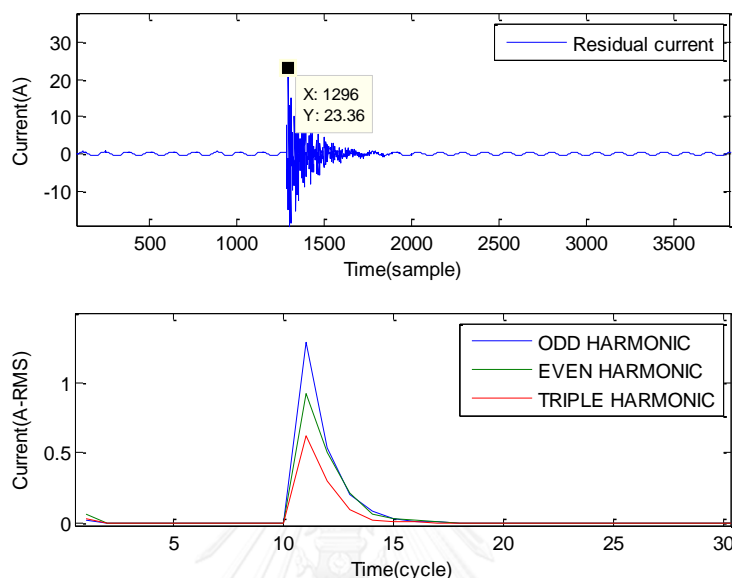
รูปที่ 4.18 กระแสฮาร์มอนิกกรณีความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงเมื่อความต้านทานพื้นผิว 5000 Ω

จากรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อเกิดความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงความต้านทานพื้นผิวประมาณ 5000 โอห์มและมีกระแสไหลประมาณ 5 ถึง 10 A จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามหารลงตัวได้อย่างชัดเจน โดยที่กระแสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเริ่มจากประมาณ 0.5 A_{RMS} จนถึงประมาณ 1.5 A_{RMS} ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่มองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อความต้านทานพื้นผิวสูงมาก ๆ กระแสพิเศษเหลือที่เกิดขึ้นก็น้อยมากเช่นกัน เมื่อนำสัญญาณมาวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทำให้สัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกมีขนาดเล็กด้วย



รูปที่ 4.19 กระแสฮาร์มอนิกกรณีความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำความต้านทานลัดวงจร 1 Ω

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ กระแสฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่มจะพุ่งขึ้นสูงแต่กลุ่มฮาร์มอนิกอันดับคู่จะมีค่ามากกว่าฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ หลังจากนั้นระดับกระแสฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่มจะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.20 ส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกกรณีสับตัวเก็บประจุที่เวลา 0.2 วินาที

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อสับตัวเก็บประจุเข้าระบบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่มเพียงชั่วครู่ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงนี้เป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆไม่เกิน 5 cycle

จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสรุปได้ว่า หากเกิดความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงในระบบไฟฟ้าจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกอันดับคู่ที่สามหารลงตัวมีระดับกระแสที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆเปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากการไหลของกระแสลำดับศูนย์ในระบบไฟฟ้า ในขณะที่หากเป็นเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกจะเกิดเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ

ดังนั้นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจึงมีคุณลักษณะการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกอันดับคู่ที่สามหารลงตัวมากกว่ากระแสฮาร์มอนิกกลุ่มอื่นๆ จึงใช้คุณลักษณะนี้ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงดังรูปที่ 3.17

4.2.2 ผลการทดสอบการตรวจจับ HIF โดยใช้การวิเคราะห์ฮาร์โมนิก

จากขั้นตอนการตรวจจับรูปที่ 3.17 เมื่อนำมาทดสอบกับข้อมูลทดสอบเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการจำลองจำนวน 50 เหตุการณ์ เหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการจำลองจำนวน 30 เหตุการณ์ (ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำจำนวน 20 เหตุการณ์และเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของ 10 เหตุการณ์) เหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการทดลองภาคสนามจำนวน 6 เหตุการณ์ เหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำจากเครื่องบันทึกเหตุการณ์ผิดปกติจำนวน 25 เหตุการณ์

ดังนั้นสรุปได้ว่าเหตุการณ์ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีทั้งหมด 56 เหตุการณ์และเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีทั้งหมด 55 เหตุการณ์ รวมทั้งสิ้น 111 เหตุการณ์ โดยแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบการตรวจจับ HIF เมื่อใช้การวิเคราะห์ฮาร์โมนิก

เหตุการณ์ ผลการทดสอบ	HIF (56 เหตุการณ์)	NON HIF (55 เหตุการณ์)	ร้อยละ
HIF DETECTED	56	0	100
NON HIF	0	55	100
ร้อยละ	100	100	100

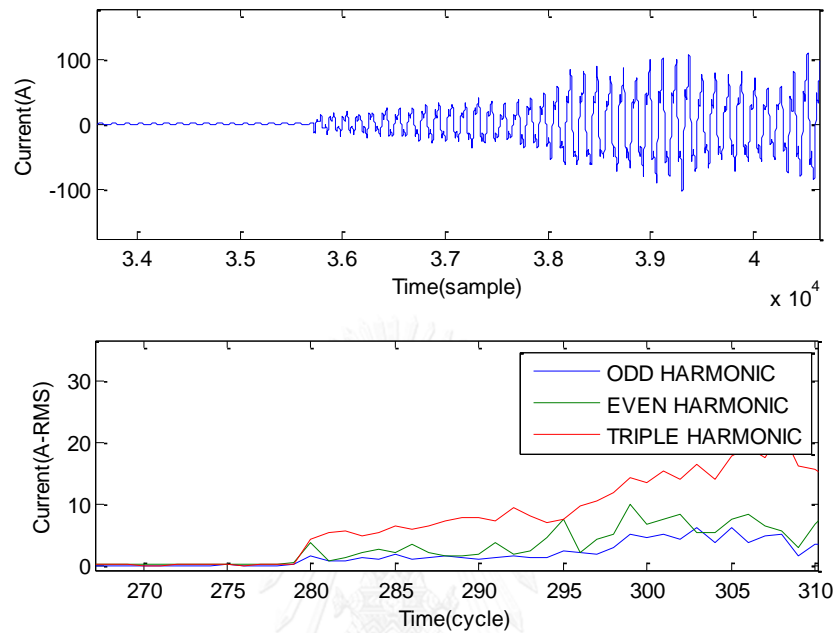
จากผลการทดสอบตารางที่ 4.3 อธิบายได้ว่า

อัลกอริทึมตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ถูกต้อง 56 เหตุการณ์จากทั้งหมด 56 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องร้อยละ 100

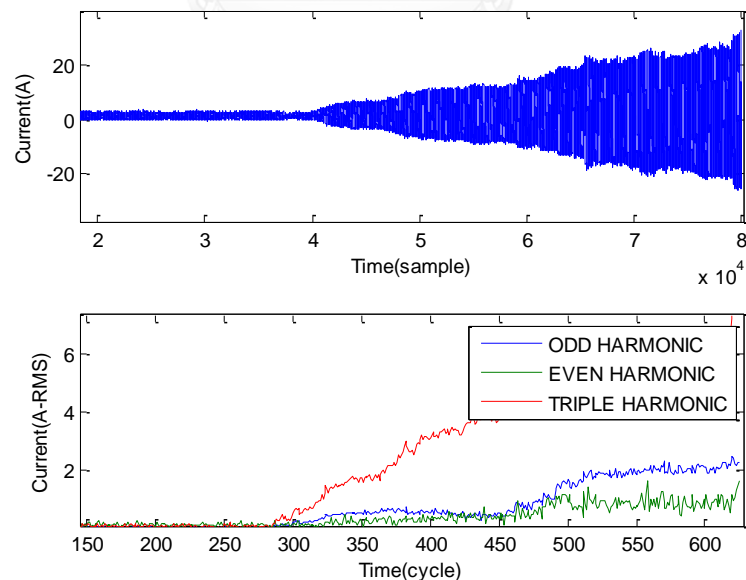
อัลกอริทึมตรวจจับเหตุการณ์ที่ไม่ใช่ความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงเป็นความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ 0 เหตุการณ์จากทั้งหมด 55 เหตุการณ์ คิดเป็นความถูกต้องร้อยละ 100

ดังนั้นสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงคิดเป็นความถูกต้องเฉลี่ยทั้งหมดร้อยละ 100 ของเหตุการณ์ทั้งหมด 111 เหตุการณ์

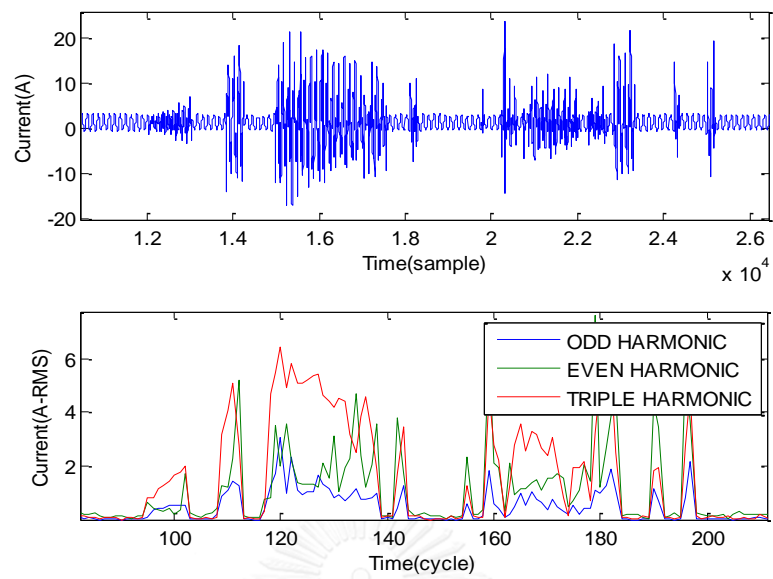
นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าการเกิดความผิดพร่องชนิดอิมพีแดนซ์สูงที่เกิดจากการทดลองภาคสนามส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบฮาร์มอนิกอย่างไร สามารถแสดงส่วนประกอบของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละเหตุการณ์ได้ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.26



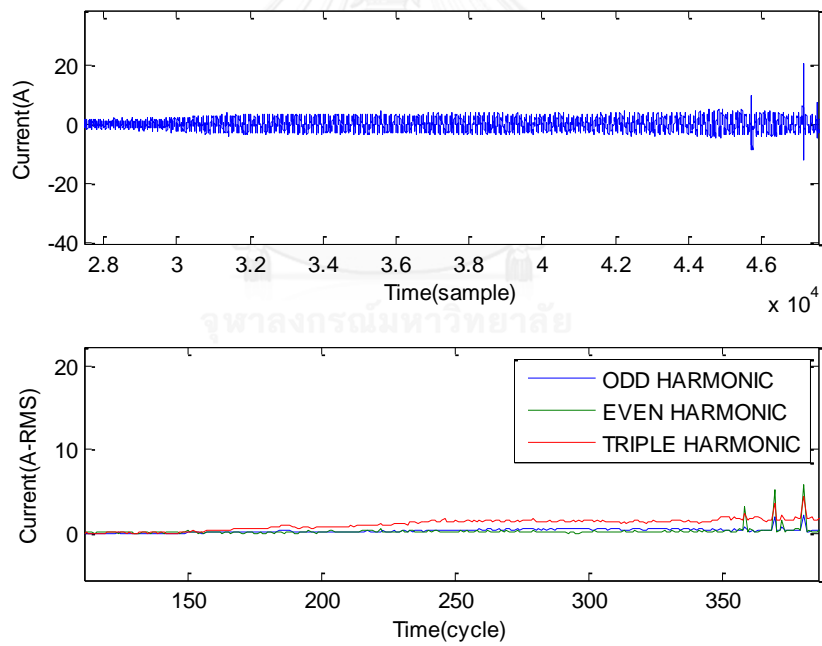
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 1



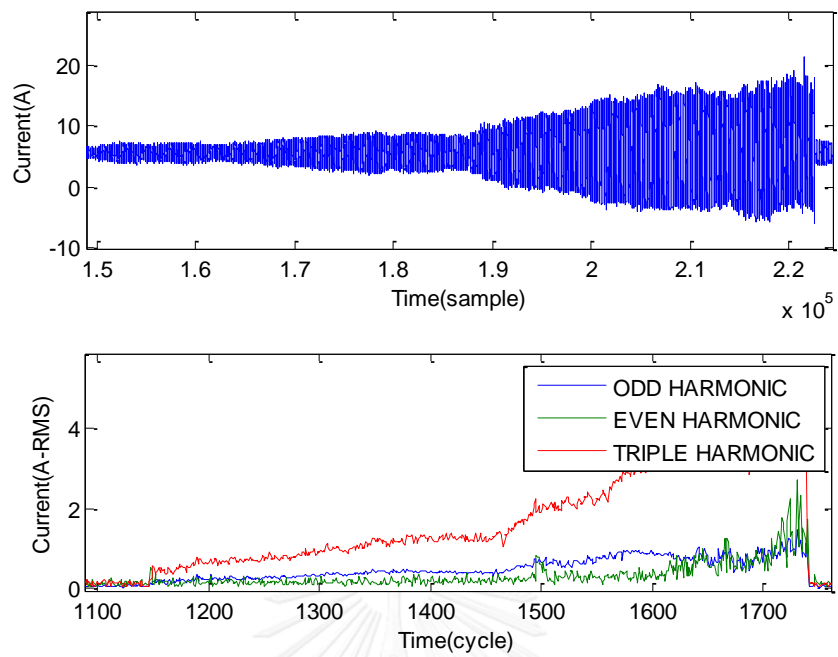
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 2



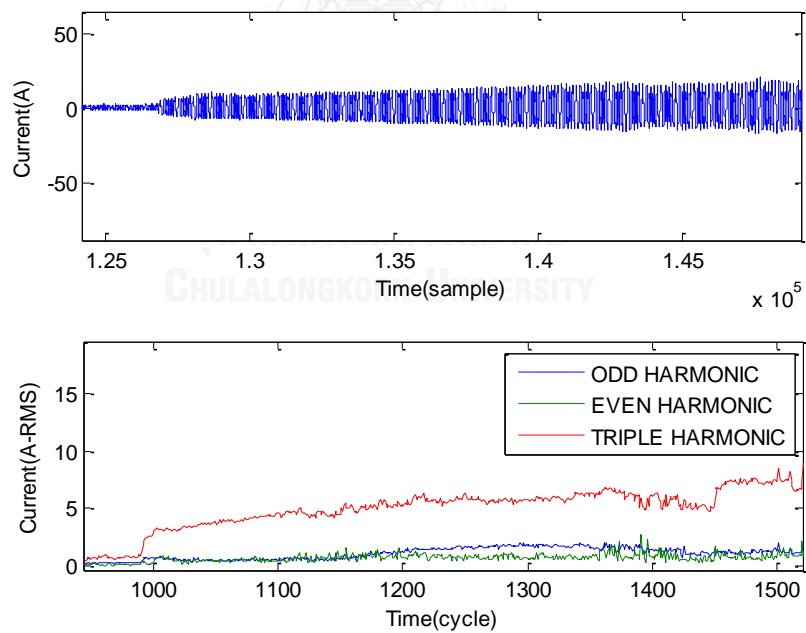
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 3



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 4



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 5



รูปที่ 4.26 ตัวอย่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกของข้อมูลทดลองภาคสนามกรณีที่ 6

จากรูปที่ 4.21 ถึง 4.26 เป็นตัวอย่างของการเกิดความผิดพลาดชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากการทดลองภาคสนามพบว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สามหารลงตัวอย่างเห็นได้ชัดมากกว่าฮาร์มอนิกกลุ่มอื่นๆ เนื่องจากเป็นกระแสที่เกิดจากการลัดวงจรลงดินหนึ่งเฟสทำให้มีกระแสลำดับศูนย์ไหลอยู่ในระบบไฟฟ้า โดยปริมาณกระแสขึ้นอยู่กับความต้านทานพื้นผิวที่สายไฟฟ้าสัมผัสหากพื้นผิวมีความต้านทานสูงมากอาจทำให้มีขนาดส่วนประกอบของกระแสฮาร์มอนิกขนาดเล็กจึงอาจทำให้ยากต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้

4.4 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การเปรียบเทียบระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยเปรียบเทียบในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.4.1 ความแม่นยำถูกต้องในการตรวจจับ

จากผลการทดสอบตารางที่ 4.2 และ 4.3 จะได้ว่า

- การใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตมีความแม่นยำถูกต้องทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 98.2 เมื่อทดสอบเหตุการณ์จำนวน 111 เหตุการณ์
- การใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกมีความแม่นยำถูกต้องทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 100 เมื่อทดสอบเหตุการณ์จำนวน 111 เหตุการณ์

4.4.2 ความซับซ้อนในการคำนวณของการวิเคราะห์ข้อมูล

- การใช้โครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตเป็นข้อมูลป้อนเข้ามีจำนวนการคำนวณเป็น N ครั้งต่อ 1 ชั้นการแปลง เมื่อใช้การแปลง 6 ชั้น ดังนั้นจำนวนการคำนวณเท่ากับ $6N$ ครั้ง เมื่อ N เป็นจำนวนของข้อมูล
- การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็วมีจำนวนการคำนวณเป็น $\frac{N}{2} \log_2 N$ ครั้ง เมื่อ N เป็นจำนวนของข้อมูล

4.4.3 ข้อดีและข้อจำกัด

ตารางที่ 4-4 ข้อดีและข้อจำกัดของโครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก

วิธี	ข้อดี	ข้อจำกัด
โครงข่ายประสาทเทียม	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกรูปแบบเมื่อนำมาใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงทำให้มีอัตราความสำเร็จสูง - การเรียนรู้ของโครงข่ายใช้ได้ทั้งข้อมูลจำลองและข้อมูลตรวจวัดจากภาคสนาม - โครงข่ายมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถปรับตัวได้ - มีความสามารถในการเรียนรู้นำไปใช้ได้หลากหลาย - สามารถใช้ข้อมูลที่มีความซับซ้อนและความสัมพันธ์ไม่เป็นสมการเส้นตรง 	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลาการฝึกสอนของโครงข่ายขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่ใช้ - ข้อมูลฝึกสอนต้องการเซตข้อมูลขนาดใหญ่ - ไม่มีหลักเกณฑ์กำหนดโครงสร้างของโครงข่ายชัดเจน เช่น จำนวนโนดซ่อน จำนวนชั้นซ่อน หรือฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสม - อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลเป็นสมการได้ยาก เป็นเพียงการส่งข้อมูลเข้าและคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละโนด และเรียนรู้เพื่อจัดจำรูปแบบที่ต้องการ
การวิเคราะห์ฮาร์โมนิก	<ul style="list-style-type: none"> - การคำนวณไม่ซับซ้อนและใช้เวลาคำนวณเร็ว - บ่งบอกคุณลักษณะทางกายภาพของความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ความคล้ำยคลึงของข้อมูลทางโดเมนความถี่ที่สร้างโดยความผิดปกติของชนิดอิมพีแดนซ์สูงกับเหตุการณ์อื่นๆ - จำนวนข้อมูลต้องเป็น 2^k จุด/คาบ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มบวก

นอกจากนี้ผู้เชี่ยวชาญนิพนธ์มีความเห็นเพิ่มเติมว่าหากจะนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานจริงควรใช้ทั้งโครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกควบคู่กันเพราะการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพียงอย่างเดียวมีโอกาสที่จะตรวจจับผิดพลาดได้ เนื่องจากในช่วงการฝึกฝนของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเพียงการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละโนดเรียนรู้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ไม่ได้สื่อถึงคุณลักษณะทางกายภาพที่สำคัญเหมือนกับการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก เนื่องจากความผิดพลาดของชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบฮาร์โมนิกอันดับสี่ที่สามารถลงตัวอย่างชัดเจน แต่การใช้วิธีการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกเพียงอย่างเดียวหากเกิดความผิดพลาดชนิดที่อิมพีแดนซ์สูงมากๆก็อาจไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์โมนิกได้ เนื่องจากมีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกขนาดเล็ก



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยอาศัยข้อมูลการทดสอบจากการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP , ข้อมูลทดลองการเกิดความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงจากภาคสนามและข้อมูลเหตุการณ์ผิดพ่วงจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตซึ่งข้อมูลทั้งหมดมีอัตราความถี่สุ่ม 6400 Hz เท่ากัน

ทั้งนี้ในการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอาร์คซึ่งส่งผลให้สัญญาณกระแสไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น มีความอสมมาตร มีความถี่สูงและฮาร์มอนิกปะปนอยู่ในสัญญาณ ดังนั้นในการวิเคราะห์สัญญาณจะวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ความถี่อื่นนอกเหนือจากความถี่มูลฐานได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้การแปลงเวฟเล็ตและการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนความถี่ ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณสำหรับการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูง โดยในงานวิจัยเป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงระหว่างการใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้มาจากการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว จากผลการวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ผลจากการจำลองการเกิดความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงด้วยโปรแกรม EMTP เมื่อเปลี่ยนความต้านทานของพื้นผิวที่สายตัวนำไฟฟ้าสัมผัสพบว่า ระดับกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสที่วัดได้ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้ามีระดับไม่แตกต่างจากระดับของกระแสไหล แต่หากพิจารณากระแสอาร์คที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและรูปร่างของสัญญาณผิดเพี้ยนไปจากที่ความถี่มูลฐาน

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตสำหรับการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงต้องเลือกชนิดของเวฟเล็ตแม่และประเภทการสกัดลักษณะเด่นให้เหมาะสมเพื่อให้มีความแม่นยำในการจำแนกคลาสสูงสุด โดยในวิทยานิพนธ์วิเคราะห์สัญญาณข้อมูลด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบหกชั้นโดยใช้เวฟเล็ตแม่ Daubechies 6 และสกัดลักษณะเด่นด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อเป็นข้อมูลป้อนเข้าให้กับโครงข่ายประสาทเทียม

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับการตรวจจับความผิดพ่วงชนิดอิมพีแดนซ์สูงพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกทั้งสามกลุ่ม โดยพบว่าความผิด

พรวงชนิดอิมพีแดนซ์สูงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามหารลงตัวมากกว่าส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ

การเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับความผิดพรวงชนิดอิมพีแดนซ์สูงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถตรวจจับคิดเป็นความถูกต้องร้อยละ 98.2 ส่วนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสามารถตรวจจับคิดเป็นความถูกต้องร้อยละ 100 เมื่อทดสอบกับข้อมูลจำนวนทั้งหมด 111 เหตุการณ์

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีข้อดีคือโครงข่ายมีความยืดหยุ่นสูงสามารถปรับตัวได้มีความสามารถในการเรียนรู้จึงนำมาใช้กับข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูงได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือไม่มีหลักเกณฑ์การกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายชัดเจน อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลเป็นสมการได้ยากเพราะเป็นเพียงการส่งข้อมูลป้อนเข้าและคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละโนดและโครงข่ายเรียนรู้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการและต้องการเซตข้อมูลฝึกฝนขนาดใหญ่

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกมีข้อดีคือการคำนวณไม่ซับซ้อนและคำนวณได้รวดเร็วและบ่งบอกคุณลักษณะของความผิดพรวงชนิดอิมพีแดนซ์สูงได้คือมีการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่สามหารลงตัว แต่มีข้อจำกัดคือจำนวนข้อมูลที่วิเคราะห์ต้องเป็น 2^k จุด/คาบ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มบวก และอาจมีความคล้ายคลึงของข้อมูลทางโดเมนความถี่ที่สร้างโดยความผิดพรวงชนิดอิมพีแดนซ์สูงกับเหตุการณ์อื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- การตรวจจับความผิดพรวงชนิดอิมพีแดนซ์สูงในแต่ละสถานที่ย่อมมีปัจจัยแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมควรใช้ข้อมูลเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงเป็นข้อมูลฝึกสอนให้กับโครงข่ายร่วมด้วย และการกำหนดค่าเกณฑ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในแต่ละสถานที่อาจแตกต่างกันไป
- งานวิจัยทดสอบที่ความถี่สุ่ม 6400 Hz เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นหากทดสอบที่ความถี่สุ่มอื่นอาจได้ผลลัพธ์ที่ต่างกันออกไป

รายการอ้างอิง

1. ชาญชัย พงศ์สุวรรณ, การประเมินสมรรถนะของขั้นตอนวิธีตรวจจับการเกิดลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูง, in สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. Santos, W.C., et al. *High Impedance Fault Detection and Location Based on Electromagnetic Transient Analysis*. in *International Conference on Power Systems Transients*. 2013. Canada.
3. Benner, C.L. and B.D. Russell. *Practical High-Impedance Fault Detection on Distribution Feeders*. in *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1997.
4. Yu, D.C. and S.H. Khan. *An Adaptive High and Low Impedance Fault Detection Method*. in *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994.
5. Adamiak, M., et al., *High Impedance Fault Detection Technology*. 1996: Report of PSRC Working Group D15.
6. Lazkano, A., et al. *A New Approach to High Impedance Fault Detection Using Wavelet Packet Analysis*. in *IEEE*. 2000.
7. Masa, A.V., J.C. Maun, and S. Werben. *Characterization of High Impedance Faults in Solidly Grounded Distribution Networks*. in *Power Systems Computation Conference*. 2011. Stockholm Swedwn.
8. Jakov, V., et al. *High Impedance Fault Detection on Rural Electric Distribution Systems*. in *IEEE*. 2010.
9. Sedighi, A.R., M.R. Haghifam, and O.P. Malik, *Soft Computing Applications in High Impedance Fault Detection in Distribution Systems*, in *Electric Power Systems Research* 76. 2005. p. 136-144.
10. Ching, L.H., Y.C. Hui, and T.C. Ming. *Algorithm Comparison for High Impedance Fault Detection Based on Staged Fault Test*. in *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1988.
11. Suresh, G. and M.B. Sukumar. *Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology*. in *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013.

12. Ahmed, H.E., A. Emtethal, and M. Nancy. *Detection of High Impedance Faults in Medium Voltage Distribution Networks Using Discrete Wavelet Transform*. in *22 nd International Conference on Electricity Distribution*. 2013. Stockholm.
13. Shyh, J.H. and T.H. Cheng. *High Impedance Fault Detection Utilizing A Morlet Wavelet Transform Approach*. in *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1991.
14. Siadatan, A., H.K. Karegar, and V. Najmi. *New High Impedance Fault Detection*. in *IEEE International Conference on Power and Energy* 2010. Kuala Lumpur, Malaysia.
15. Milioudis, A.N., G.T. Andreou, and D.P. Labridis. *High Impedance Fault Detection Using Power Line Communication Techniques*. in *UPEC*. 2010.
16. Patricia, R.S. and G. Fabio. *Fuzzy Detection of High Impedance Faults in Radial Distribution Feeders*. in *Electric Power Systems Research* 49. 1999.
17. Zadeh, H.K., *An ANN-Based High Impedance Fault Detection Scheme: Design and Implementaion*. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2005. 4(2).
18. Samantaray, S.R. *Ensemble Decision Trees for High Impedance Fault Detection in Power Distribution Network*. in *Electrical Power and Energy Systems* 43. 2012.
19. Torres, V., et al. *Modeling and Detection of High Impedance Faults*. in *Electrical Power and Energy Systems* 61. 2014.
20. THEODORIDIS, S. and K. KOUTROUMBAS, *PATTERN RECOGNITION*, ed. SECOND.
21. Sa, J.P.M.d., *Pattern Recognition*. Concepts, Methods and Applications. 2001.
22. Demuth, H., M. Beale, and M. Hagan, *Neural Network Toolbox 6 User's Guide*.
23. D.E.Rumelhart, G.E.Hinton, and R.J.Williams, *Learning Internal Representations by Error Propagation*. 1986.
24. Chun-Lin and Liu, *A Tutorial of the Wavelet Transform*. 2010.
25. Pathak, R.S., *The Wavelet Transform*. Atlantis Studies in Mathematics for Engineering and Science, ed. C.K. Chui. Vol. 4. 2009.
26. Stanley, R.D., et al., *Wavelet Transform*, J. Webster, Editor. 1999, John Wiley & Sons ,Inc.

27. Mertins, A., *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*. 1999: John Wiley & Sons Ltd.
28. Chau, F.-T., et al., *Chemometrics: From Basics To Wavelet Transform*. Vol. 164. 2004: John Wiley & Sons, Inc.
29. *Introduction to Wavelet Families*. Available from: www.mathworks.com.
30. Santoso, S., E. J., and W.M. Grady. *Electric Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform Analysis*. in *IEEE*. 1994.
31. Arrillaga, J. and N.R. Watson, *Power System Harmonics*. Second ed. 2003: John Wiley & Sons, Ltd.
32. Vaseghi, S.V., *Multimedia Signal Processing: Theory and Application in Speech, Music and Communications*. 2007: John Wiley & Sons, Ltd.
33. *Electromagnetic compatibility (EMC) Part2-12, in Environment compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signaling in public medium voltage power supply system*. 2003.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวบุศรินทร์ พันธุ์กระจับ เกิดวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ.2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

B. Puntgrajub and C. Banmongkol, "A Comparative Study on High Impedance Fault Detection Using Wavelet Transform and Harmonic Analysis," in the 7th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Conference on Applications Research and Development (ECTI-CARD 2015), Trang, Thailand, July8-10, 2015.