

การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า  
โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต

A STUDY AND ANALYSIS OF TRANSFORMER INRUSH CURRENT  
USING WAVELET TRANSFORM

เกรียงไกร กิตติวารวุฒิ  
KRIEN GKRAI KITTIVARAWUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-271-6

A STUDY AND ANALYSIS OF TRANSFORMER INRUSH CURRENT  
USING WAVELET TRANSFORM



KRIENGGKRAI KITTIWARAWUT

เลขหม.....  
เลขทะเบียน 47665  
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2546

.b.....  
.i.....

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

2003

ISBN 974-324-271-6

**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต
นักศึกษา	นายเกรียง ไกร กิตติวรารุณี
รหัสประจำตัว	43061008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุภี บรรจงจิตร ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

## บทคัดย่อ

เทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไป จากรูปแบบเดิมที่อาศัยการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานมาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในลักษณะการป้องกันแบบทรานเซียนต์ (Transient based protection) โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันให้มีการทำงานที่ถูกต้องและรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงจำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสมเพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องที่จะนำไปใช้งาน วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับระบบป้องกันหม้อแปลง โดยวิธีการตรวจจับกระแสอินรัชทำโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูงในสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ในการจำลองได้เลือกโปรแกรม ATP/EMTP และใช้แบบจำลองหม้อแปลง BCTRAN ซึ่งเป็นที่ยอมรับในการวิเคราะห์สถานะทรานเซียนต์ของหม้อแปลง สัญญาณกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกวิเคราะห์โดยการแบ่งแยกองค์ประกอบด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ต จากนั้นองค์ประกอบที่ได้จะถูกนำวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณกระแสทรานเซียนต์เพื่อที่จะสรุปหาความแตกต่างระหว่างกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงกับกระแสอินรัช จากผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสฟอลต์และกระแสอินรัชได้ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังสามารถแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถตอบสนองเพื่อประโยชน์ของระบบป้องกันได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำในการแบ่งแยกระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในหม้อแปลงได้

**Thesis Title**      A Study and Analysis of Transformer Inrush Current Using Wavelet Transform  
**Student**            Mr. Kriengkrai Kittiwaraawut  
**Student ID.**        43061008  
**Degree**             Master of Engineering  
**Programme**        Electrical Engineering  
**Year**                2003  
**Thesis Advisor**    Assoc.Prof. Sulee Bunjongjit  
                            Assist.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn

## **ABSTRACT**

The development in power system protection technology has progressed, especially in recent years. The trend of power system signal analysis has been changed from the traditional scheme, the fundamental component analysis, to the new technology, the high frequency transient component analysis or a transient based protection. The main objective of such a new is to increase in the performance of protection devices subjected to fast and precise operation. This thesis presents an application of the discrete wavelet transform (DWT) in signal analysis for inrush detection of transformer protection. The technique detects an inrush current using the high frequency components contained in the current transient signal of a transformer. The ATP/EMTP program is used in simulation studies. The BCTRAN routine is used for transformer modelling. The current, which flows in the transformer, is calculated. The spectral of such a current signal are extracted using wavelet transform techniques. An analysis of the spectral energies is performed in order to classify whether the transient signal is a fault or a magnetizing inrush current. Simulation studies subjected to different faults and inrush current conditions are conducted. The results show that the proposed technique is able to offer fast responses in a protection scheme and to separate precisely between the inrush magnetizing current and internal faults.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากที่มีคุณค่า จาก รศ. ศุภี บรรจงจิตร และ ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบริษัทไทยออยล์ จำกัด สำหรับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณพงษ์ศักดิ์ มากมิ่ง รุ่นน้องและเพื่อนนักศึกษาร่วมรุ่นปริญญาโทสำหรับความช่วยเหลือทั้งในด้านติดต่อประสานงานอย่างดีและคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์การทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับความช่วยเหลือการติดต่อประสานงานในหลายๆ ด้าน

ขอขอบคุณ คุณธิตี เอี่ยมมงคล, นายสิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล และเพื่อนนักศึกษาทูท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการติดต่อประสานงานอย่างดี และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุพการี 2 ท่านที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อข้าพเจ้าคือ บิดา และมารดาของข้าพเจ้าเอง ซึ่งเป็นผู้ที่ได้มอบ อดีต ปัจจุบัน และอนาคตให้กับผู้วิจัย รวมถึงทุกคนในครอบครัวสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้กับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เกรียงไกร กิตติวาราวุฒิ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 พัฒนาการของเทคโนโลยีการวิเคราะห์สัญญาณในระบบป้องกัน.....	3
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	6
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	6
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	7
1.7 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา.....	8
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 การวิเคราะห์เพื่อตรวจจับกระแสอินรัชทรานเซียนต์ในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	9
2.1 กระแสอินรัช (Magnetizing Inrush Current).....	9
2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช.....	12
2.1.2 กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush).....	13
2.1.3 กระแสอินรัชชดเชย (Recovery inrush).....	17
2.1.4 กระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic inrush).....	17
2.1.5 องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัช (Harmonic content of inrush waveform).....	18
2.2 เสถียรภาพของระบบรีเลย์ป้องกันชนิดผลต่างกระแสระหว่างการเกิด กระแสอินรัช.....	20
2.2.1 การหน่วงเวลา.....	20
2.2.2 การตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic Restraint).....	21

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2.1	องค์ประกอบกระแสตรง (D.c or offset component) .....	21
2.2.2.2	องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง (Second harmonic) .....	22
2.2.2.3	องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สาม (Third harmonic) .....	23
2.2.2.4	องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงกว่า (Higher harmonic) .....	23
2.3	การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับกระแสอินรัชในรีเลย์ป้องกันชนิด กระแสผลต่างสำหรับการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า .....	24
2.3.1	การตรวจจับกระแสอินรัช .....	24
2.3.2	การตรวจจับการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง .....	25
บทที่ 3	การแปลงเวฟเลต .....	26
3.1	ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเลต .....	28
3.1.1	การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform : FT) .....	28
3.1.2	การแปลงกาบอร์ (Gabor Transform : GT) .....	30
3.1.3	การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short-Time Fourier Transform : STFT) .....	30
3.2	การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform : WT) .....	32
3.3	การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform : CWT) .....	35
3.4	การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) .....	38
3.4.1	การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA) .....	38
3.4.1.1	ทฤษฎีของสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Theory) .....	38
3.4.2	การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis) .....	42
3.5	เวฟเลตแม่ (Mother Wavelet) .....	45
บทที่ 4	การจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์ .....	49
4.1	เงื่อนไขการจำลอง .....	49
4.1.1	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า .....	49
4.1.2	ชนิดของหม้อแปลงทดสอบ .....	49

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Switching Angle).....	50
4.1.4 เวลาในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่พร้อมกันทั้ง 3 เฟส.....	50
4.1.5 ชนิดของฟอลต์.....	51
4.1.6 โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	51
4.2 การจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในโซนป้องกันหม้อแปลง.....	51
4.2.1 การจำลองกระแสอินรัช.....	51
4.2.2 การจำลองฟอลต์ภายในโซนป้องกันหม้อแปลง.....	52
4.2.3 การจำลองเมื่อหม้อแปลงเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ.....	52
4.3 โปรแกรม ATPDraw.....	53
4.4 แบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ.....	55
4.4.1 การจำลองกระแสอินรัช.....	55
4.4.2 การจำลองฟอลต์ภายในโซนป้องกันหม้อแปลง.....	56
4.4.3 การจำลองเมื่อหม้อแปลงเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ.....	56
4.5 ผลการจำลอง.....	58
4.5.1 กรณีเกิดกระแสอินรัช.....	58
4.5.2 กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลง.....	59
4.5.3 กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ.....	60
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ด.....	71
5.1 พิจารณารูปแบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์ในปัจจุบัน.....	72
5.2 พิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการแปลงเวฟเล็ดในการวิเคราะห์.....	75
5.3 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยที่นำเสนอ.....	77
5.3.1 การกำหนดค่าขอบเขตการเปรียบเทียบ.....	77
5.3.2 การกำหนดลักษณะเด่นของการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณกระแส อินรัชและฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงแต่ละแบบ.....	78
5.3.3 การเลือกประเภทของเวฟเล็ดและตระกูลที่เหมาะสม.....	78
5.3.4 การกำหนดจำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่เหมาะสม.....	78
5.3.5 การกำหนดช่วงข้อมูลหรือสัญญาณที่ทำการพิจารณา.....	78

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4	การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น.....	78
5.5	การแบ่งแยกระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง.....	81
5.5.1	พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลา.....	86
บทที่ 6	ผลการวิเคราะห์.....	93
6.1	รูปแบบการนำเสนอ.....	93
6.1.1	ระบบการทดลอง.....	93
6.1.1.1	กลุ่มของสมมติฐานการจำลอง.....	93
6.1.1.2	กลุ่มของแบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ .....	94
6.1.1.3	กลุ่มของการปรับเปลี่ยนการแปลงเวฟเล็ท .....	94
6.1.2	รูปแบบการนำเสนอของแต่ละตาราง.....	95
6.1.2.1	ผลการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น.....	95
6.1.2.2	ตำแหน่งที่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ .....	95
6.1.2.3	การระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจาก การวิเคราะห์ผลด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย.....	95
6.1.2.4	การเรียงลำดับตามสมมติฐานการจำลอง.....	95
6.1.3	รูปแสดงสรุปผลการทดลองที่ได้จากตาราง.....	95
6.2	ผลการทดลองในกรณีเกิดกระแสอินรัช.....	96
6.3	ผลการทดลองในกรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	103
6.4	ผลการทดลองในกรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า.....	114
6.5	การปรับปรุงพารามิเตอร์ของการแปลงเวฟเล็ท.....	123
6.5.1	การปรับปรุงเวฟเล็ทแม่.....	125
6.5.2	การปรับปรุงตระกูลของเวฟเล็ท .....	125
6.5.3	การปรับปรุงสเกลสำหรับการวิเคราะห์ .....	125
6.6	ผลการปรับปรุงพารามิเตอร์ของการแปลงเวฟเล็ท.....	134
6.6.1	ผลการปรับปรุงเวฟเล็ทแม่.....	134
6.6.2	ผลการปรับปรุงตระกูลของเวฟเล็ท .....	134
6.6.3	ผลการปรับปรุงสเกลการวิเคราะห์ .....	135

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	136
7.1 การจำลองสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ .....	136
7.2 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย .....	136
7.3 การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงและระบุชนิดสัญญาณที่เปลี่ยนแปลง .....	137
7.4 ผลการทดลอง .....	138
7.4.1 การตรวจจับการเปลี่ยนแปลง .....	138
7.4.2 ความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง .....	139
7.4.3 การระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ .....	141
7.5 สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป .....	144
เอกสารอ้างอิง.....	145
ภาคผนวก : บทวิเคราะห์ .....	148
ประวัติผู้เขียน .....	153

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การคำนวณขนาดสูงสุดของกระแสในรัฐทั่วไป.....	16
3.1 แสดงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณของเวฟเล็ตระกูล Daubechies ที่ N มีค่าเป็น 4, 6, 8, 10, 12,14, 16 และ 20 .....	47
3.2 แสดงเวฟเล็ตแม่ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย .....	48
5.1 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาของการ แปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วย ตระกูล Daubechies2 สเกลที่ 4.....	87
5.2 ผลการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง .....	87
5.3 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลา ของการ แปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วย ตระกูล Daubechies2 สเกลที่ 6.....	89
5.4 ผลการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง .....	89
6.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Dyn11 พิกัด 17MVA กรณีเกิดกระแสในรัฐ โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4.....	96-97
6.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Ydyn0 พิกัด 200MVA กรณีเกิดกระแสในรัฐ โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4.....	98-99
6.3 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Dyn11 พิกัด 17MVA กรณีเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกัน โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการแปลง ชนิด Daubechies2 สเกล 4 .....	103-106
6.4 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Ydyn0 พิกัด 200MVA กรณีเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกัน โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4.....	107-110
6.5 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Dyn11 พิกัด 17MVA กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลง โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการ แปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4.....	114-116
6.6 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Ydyn0 พิกัด 200MVA กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลง โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการ แปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4.....	116-118

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.1 แสดงเวฟเล็ดแม่ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบ เต็มหน่วย.....	137
7.2 แสดงสเกลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงตามช่วงความถี่ของสัญญาณ.....	137

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 10 MVA ที่เกิดการลัดวงจรภายใน เมื่อรีเลย์ ป้องกันทำงานถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้.....	2
1.2 แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	3
1.3 แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาของเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์.....	4
1.4 แสดงแผนภาพขอบเขตและขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์.....	7
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นใน แกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ.....	9
2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสภาวะคงตัว (Steady state) และค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด.....	10
2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น.....	11
2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (Offset) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว.....	12
2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้า ที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก.....	13
2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้า ที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ค่าสูงสุด.....	14
2.7 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป.....	15
2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบ เดลต้า หรือด้านทุติยภูมิของการต่อแบบเดลต้าในหม้อแปลงกระแส.....	16
2.9 แสดงกระแสอินรัชชดเชย (Recovery Inrush) หลังจากที่พอลต์ภายนอกโซน ป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกำจัด.....	17
2.10 กระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic Inrush) เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อ ขนานอยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวที่กำลังจ่ายไฟ.....	18
2.11 แสดงการชดเชยของรีเลย์ผลต่างสำหรับขดลวดทั้งสองในหม้อแปลงชนิด เดลต้า/สตาร์.....	21
2.12 แผนภาพแสดงหลักการตรวจจับช่องว่างในรูปคลื่น.....	24
2.13 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะเกิดการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก.....	25
3.1 แสดงการแยกขนาดเม็ดทรายโดยใช้การรวมทรายทุกขนาดเข้าด้วยกัน.....	26
3.2 แสดงการแยกทรายโดยแบ่งออกเป็นช่วงๆ ตามความยาว.....	27
3.3 แสดงการแยกทรายโดยแบ่งช่วงที่แตกต่างกันตามขนาดของเม็ดทราย.....	27

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แสดงการแปลงฟูเรียร์ (FFT).....	29
3.5 แสดงการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานสั้น (STFT).....	31
3.6 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet .....	32
3.7 แสดงคุณสมบัติการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ด.....	32
3.8 แสดงการกระจายสัญญาณสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด .....	33
3.9 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด .....	34
3.10 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ด.....	34
3.11 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ด.....	35
3.12 แสดงขั้นตอนที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ด.....	36
3.13 แสดงการแปลงเวฟเล็ดแบบต่อเนื่อง (CWT).....	36
3.14 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย (Decomposition) ของ	
(ก) สเปซของเวกเตอร์.....	37
(ข) สัญญาณที่ความละเอียดต่างๆ .....	40
3.15 แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ .....	42
3.16 แสดงการแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ .....	43
3.17 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ด โดยใช้หลักการของวิเคราะห์แบบออกเทพ	
ฟิลเตอร์เบงค์ .....	43
3.18 แสดงการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ในสเกลที่ 1-4 .....	44
3.19 แสดงเวฟเล็ดแม่แบบไม่มีชนิดย่อย.....	45
3.20 แสดงเวฟเล็ดแม่แบบมีชนิดย่อย .....	46
4.1 โปรแกรม ATPDraw for Windows version 1.4.....	54
4.2 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในวงจรทดสอบ .....	55
4.3 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ในวงจรทดสอบ .....	55
4.4 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ขนาด 16 MVA	
พิกัดแรงดัน 33/11.7 kV ในโปรแกรม ATPDraw.....	56
4.5 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ขนาด 200 MVA	
พิกัดแรงดัน 230/121/22 kV ในโปรแกรม ATPDraw .....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตซ์ซึ่ง $45^{\circ}$ ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า).....	58
4.7 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ใน โชน ป้องกันหม้อแปลง (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ 45 องศาไฟฟ้า) .....	59
4.8 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะ จ่ายไฟ (มุมสวิตซ์ซึ่ง $45^{\circ}$ ของแรงดันไฟฟ้า) .....	60
4.9 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตซ์ ซึ่ง 45 องศาของแรงดันไฟฟ้า) .....	61
4.10 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันหม้อ แปลง (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ $45^{\circ}$ ).....	61
4.11 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุม สวิตซ์ซึ่ง $45^{\circ}$ ของแรงดันไฟฟ้า) .....	62
4.12 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตซ์ซึ่ง $135^{\circ}$ ของแรงดันไฟฟ้า).....	63
4.13 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง $1/4$ ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Ydyn0 กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตซ์ซึ่ง 135 องศาไฟฟ้า) .....	63
4.14 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ใน โชน ป้องกัน (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ $135^{\circ}$ ).....	64
4.15 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง $1/4$ ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Ydyn0 กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกัน (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ $135^{\circ}$ ).....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่าย ไฟ (มุมสวิตช์ซึ่ง $135^\circ$ ของแรงดันไฟฟ้า).....	65
4.17 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Ydyn0 กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุมสวิตช์ซึ่ง $135^\circ$ ของแรงดันไฟฟ้า).....	65
4.18 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตช์ซึ่ง $135^\circ$ ของแรงดันไฟฟ้า).....	67
4.19 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตช์ซึ่ง $135^\circ$ ของแรงดันไฟฟ้า).....	67
4.20 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันหม้อ แปลง (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ $135^\circ$ ).....	68
4.21 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกัน (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ $135^\circ$ ).....	68
4.22 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุม สวิตช์ซึ่ง $135^\circ$ ของแรงดันไฟฟ้า) .....	69
4.23 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกัน (มุมสวิตช์ซึ่ง $135^\circ$ ของแรงดันไฟฟ้า).....	69
5.1 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดกระแสอินรัช (เส้นขึ้นแสดงช่วงข้อมูลกระแส 1 ไซเคิลหลังการเกิดกระแสอินรัช).....	71
5.2 รูปคลื่นกระแส เฟส A ที่ไหลเข้าหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดฟอลต์ ในโชนป้องกัน ชนิดเฟส A ลงดิน (เส้นขึ้นแสดงช่วงข้อมูลกระแสที่ 1 ไซเคิลหลังการเกิดฟอลต์).....	72
5.3 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีกระแสอินรัชของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง 1 ไซเคิล (20 ms) หลังการเกิดกระแสอินรัช .....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีสอดคล้องในโซนป้องกันของหม้อแปลงชนิดกลุ่ม เวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง 1 ไซเคิล (20 ms) หลังการเกิดฟอลต์ในโซน ป้องกันของหม้อแปลง.....	73
5.5 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีสอดคล้องของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง 1/2 ไซเคิลก่อนการเกิดกระแสอินรัช และ 1/2 ไซเคิล หลังการเกิดกระแสอินรัช .....	74
5.6 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีสอดคล้องในโซนป้องกันของหม้อแปลงชนิดกลุ่ม เวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง 1/2 ไซเคิลก่อนการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน และ 1/2 ไซเคิลหลังการเกิดฟอลต์.....	75
5.7 ผลการแปลงเวฟเล็ด เมื่อเวฟเล็ดแม่ Daubechies ตระกูล 2 สเกล 1-4 ของกรณีสอดคล้อง โดยแสดงสัญญาณ Detail สเกล 1-4 และ สัญญาณ Approximation สเกล 4 .....	76
5.8 ผลการแปลงเวฟเล็ด เมื่อเวฟเล็ดแม่ Daubechies ตระกูล 2 สเกล 1- 4 ของกรณีสอดคล้องในโซนป้องกันหม้อแปลง โดยแสดงสัญญาณ Detail สเกล 1-4 และสัญญาณ Approximation สเกล 4 .....	76
5.9 แสดงสัญญาณ Detail สเกล 4 จากการแปลงเวฟเล็ด ด้วยเวฟเล็ดแม่ Daubechies 2 กรณีสอดคล้องเพื่อตรวจสอบตำแหน่งการ เปลี่ยนแปลง.....	80
5.10 แสดงสัญญาณ Detail สเกล 4 จากการแปลงเวฟเล็ด ด้วยเวฟเล็ดแม่ Daubechies 2 กรณีสอดคล้องชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน เพื่อตรวจสอบ ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง.....	80
5.11 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 4 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ 1/4 ไซเคิล ณ จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย กรณีสอดคล้อง.....	83
5.12 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 4 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ 1/4 ไซเคิล ณ จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย กรณีสอดคล้องชนิดเฟส A ลัดวงจร ลงดิน (A-N) .....	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 6 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ $1/4$ ไซเคิล จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 6 ของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย กรณีเกิดกระแสวินช์ .....	88
5.14 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 6 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ $1/4$ ไซเคิล จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 6 ของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย กรณีเกิดฟลัดซ์ชนิดเฟส A ลัดวง จรลงคิน (A-N) .....	89
5.15 แผนภาพแสดงการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า .....	90
5.16 แผนภาพแสดงการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	91
6.1 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดกระแสวินช์ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตาม ลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	100
6.2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดกระแสวินช์ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	100
6.3 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ ตรวจจับได้ กรณีเกิดกระแสวินช์ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าสูงสุดของการแปลงฯ (วิธีการที่ 1).....	101
6.4 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ ตรวจจับได้ กรณีเกิดกระแสวินช์ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าผลรวมของการแปลงฯ (วิธีการที่ 2).....	101
6.5 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟลัดซ์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ .....	111
6.6 แสดงค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟลัดซ์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ .....	111

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดพอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าสูงสุดของการแปลงฯ (วิธีการที่ 1).....	112
6.8 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดพอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าผลรวมของการแปลงฯ (วิธีการที่ 2).....	112
6.9 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดพอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	119
6.10 แสดงค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดพอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์.....	119
6.11 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดพอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าสูงสุดของการแปลงฯ (วิธีการที่ 1).....	120
6.12 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดพอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าผลรวมของการแปลงฯ (วิธีการที่ 2).....	120
6.13 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกกรณีทดสอบ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 โดยใช้เวฟเล็ต Daubechies 2 สเกลที่ 4.....	122
6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกกรณีทดสอบ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 โดยใช้เวฟเล็ต Daubechies 2 สเกลที่ 8.....	123
6.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกกรณีทดสอบ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 โดยใช้เวฟเล็ต Coiflets 8 สเกลที่ 4.....	124

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสอินรัช ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	126
6.17 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสอินรัช ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	126
6.18 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ทและ สเกลการวิเคราะห์.....	128
6.19 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	128
6.20 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อ แปลงจ่ายไฟ ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	130
6.21 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อ แปลงจ่ายไฟ ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	130
6.22 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจ จับได้ ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	132
6.23 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจ จับได้ ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ทและสเกลการวิเคราะห์ .....	132
6.24 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจ จับได้ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ทแม่และสเกลการวิเคราะห์.....	133
6.25 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจ จับได้ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ทแม่และสเกลการวิเคราะห์.....	133
6.26 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจ จับได้ โดยแบ่งตามชนิดของเวฟเล็ทและวิธีการวิเคราะห์ .....	134
7.1 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทดสอบ แบ่งตามสเกลการวิเคราะห์.....	139
7.2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อ แปลงทดสอบ แบ่งตามสเกลการวิเคราะห์.....	139

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.3 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบ โดยใช้เวฟเล็ค Daubechies 2 สเกลที่ 4.....	140
7.4 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง ด้วยวิธีการที่ 1 แบ่งแยกตามสเกลการวิเคราะห์.....	141
7.5 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง ด้วยวิธีการที่ 2 แบ่งแยกตามสเกลการวิเคราะห์.....	141
7.6 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง เปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ 1 และ 2.....	142
7.7 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง เปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ 1 และ 2 แบ่งตามชนิดเวฟเล็ค .....	142
7.8 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง โดยใช้เวฟเล็ค Daubechies 2 สเกลที่ 4 แบ่งแยกตามวิธีการวิเคราะห์ .....	143
7.9 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง โดยใช้เวฟเล็ค Daubechies 2 สเกลที่ 4 แบ่งแยกตามชนิดการเปลี่ยนแปลง .....	143

# บทที่ 1

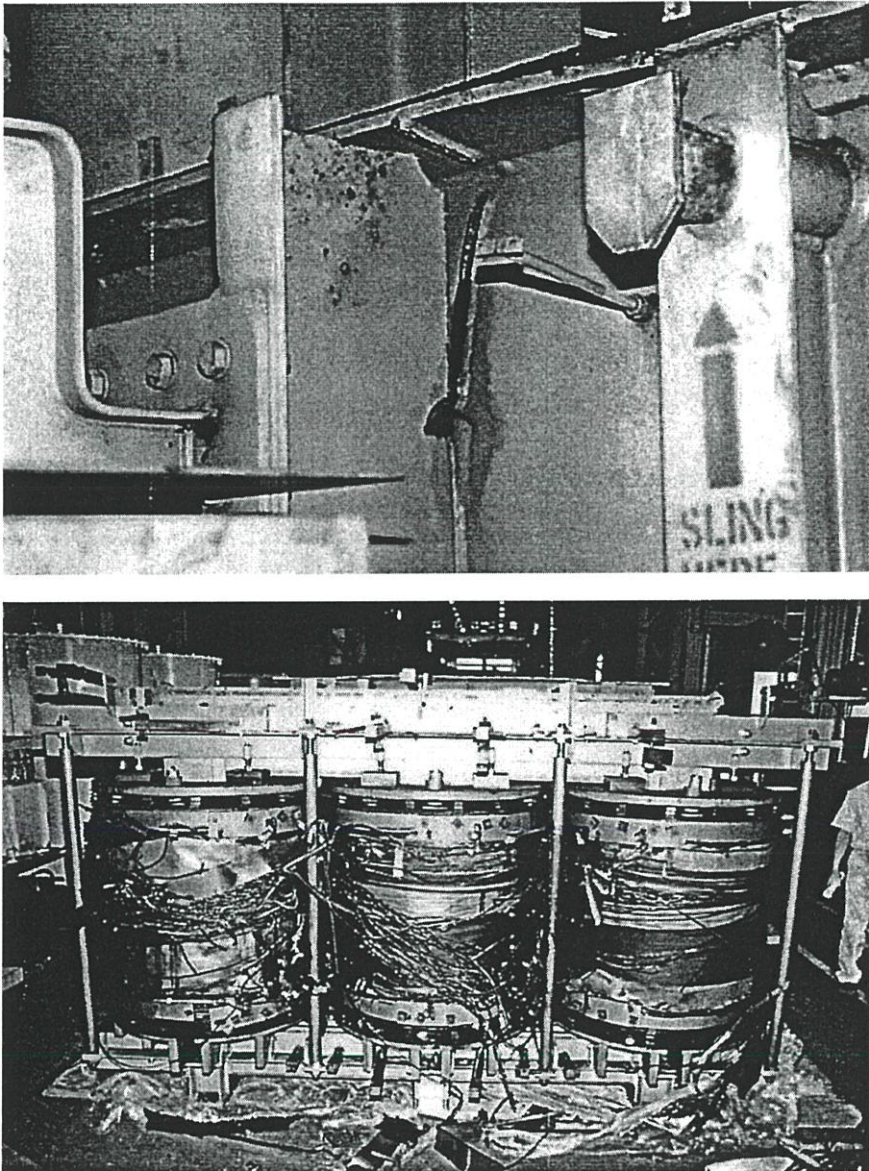
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

คงปฏิเสธไม่ได้ว่าปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก และแน่นอนว่าความต่อเนื่องของพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ทุกคนปรารถนา ไม่เฉพาะเพียงแต่ผู้ใช้งาน แต่ยังรวมไปถึงผู้ปฏิบัติงานทางด้านไฟฟ้าและผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าด้วย แต่อย่างไรก็ตามความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (Fault) เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น ฉนวนไฟฟ้าที่เสื่อมสภาพจากอายุการใช้งานที่ยาวนาน, การลัดวงจรอันเกิดจากสัตว์เลื้อยคลาน ฯลฯ ซึ่งผลของความผิดปกติที่เกิดขึ้นย่อมส่งผลให้กระแสไฟฟ้าขัดข้องไม่สามารถส่งจ่ายได้อย่างต่อเนื่อง จนบางครั้งเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายจนอาจประมาธค่ามิได้ เช่น ไฟดับในตลาดหลักทรัพย์, ไฟฟ้าขัดข้องระหว่างกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น เพื่อให้ระบบไฟฟ้าสามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้ใช้พลังงานปลายทางได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากจะต้องออกแบบระบบไฟฟ้าให้เพียงพอกับกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านแล้ว ระบบป้องกัน (Power Protection System) ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่ช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพสูงขึ้น โดยทำหน้าที่เฝ้าระวังและตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า พร้อมส่งสัญญาณเพื่อตัดแยกระบบไฟฟ้าส่วนที่ผิดปกติออกจากระบบไฟฟ้าหลัก เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น กล่าวได้ว่าระบบป้องกันที่ดีจำเป็นจะต้องตัดแยกระบบไฟฟ้าส่วนที่ผิดปกติให้รวดเร็วที่สุดและจำกัดการลัดวงจรส่วนที่ผิดปกติให้แคบที่สุด โดยนอกจากนี้หากระบบไฟฟ้าไม่มีความผิดปกติจะต้องไม่ส่งปลดวงจรให้กระทบกระเทือนต่อโหลดที่ต่อพ่วงอยู่

หม้อแปลงไฟฟ้า (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและมีราคาสูงที่สุดในสถานีไฟฟ้า ทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากต่ำไปสูง เพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไปได้ระยะทางไกลๆ และแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากสูงมาต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าปลายทาง ดังนั้นระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในการตัดแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้าโดยรวม นอกจากนี้จะสามารถช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าหากระบบป้องกันมีการทำงานที่รวดเร็ว ซึ่งตัวอย่างความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจรภายใน คือ ขดลวดภายในเสียหายและอาจทำให้โครงสร้างภายนอกเสียหายจากแรงดันของน้ำมันหม้อแปลงที่ขยายตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรภายใน และเมื่อโครงสร้างภายนอกเสียหายจะทำให้น้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงรั่วออกสู่ภายนอกและอาจเกิดการลุกไหม้สร้างความเสียหายต่อไปได้อีก จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง

โครงสร้างภายนอกที่ฉีกขาดจากแรงดันน้ำมันภายในและขดลวดภายในถึงแม้ว่ารีเลย์ป้องกันหม้อแปลงจะทำงานได้ตามค่าที่ตั้งไว้



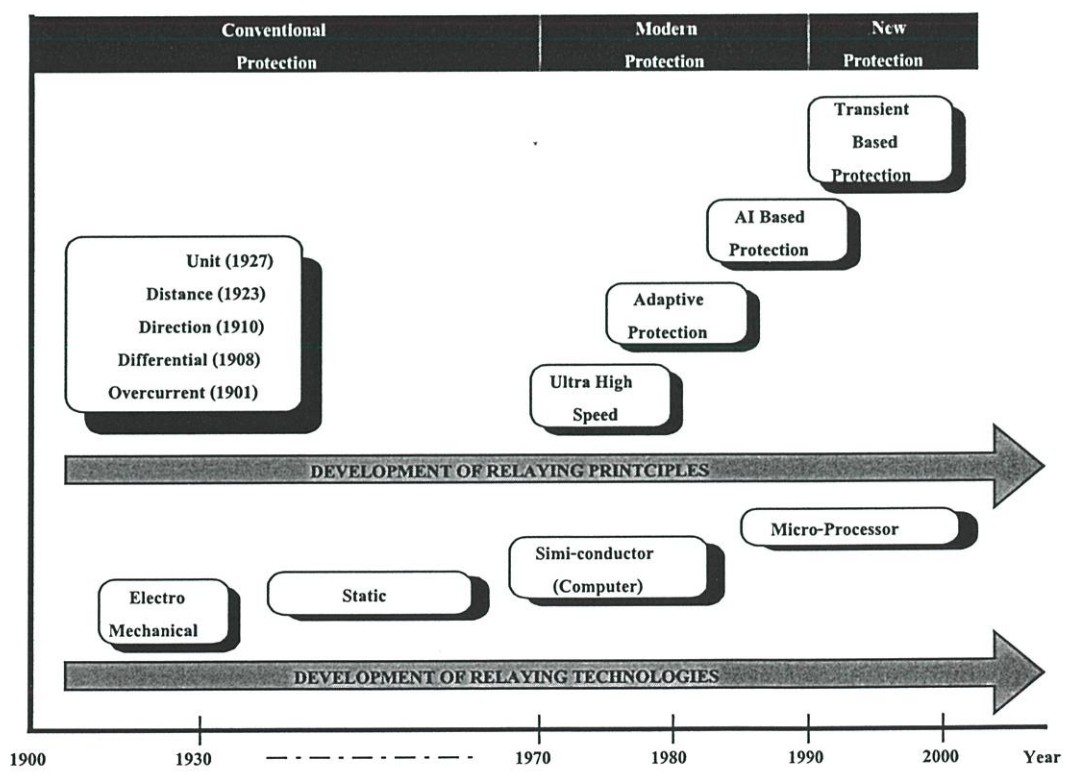
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัด 10 MVA ที่เกิดการลัดวงจรภายใน เมื่อรีเลย์ป้องกันทำงานถูกต้องตามค่าที่ตั้งไว้ [1]

ข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่มีผลกับความเร็วในการทำงานของรีเลย์ป้องกันในปัจจุบันคือ การตรวจจับกระแสในรัชณะจ่ายไฟซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการตรวจจับอย่างน้อย 1 ไซเคิล โดยการเกิดกระแสในรัชณะในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะเริ่มจ่ายไฟ (Energizing) ไม่ถือเป็นความผิดปกติในหม้อแปลง ซึ่งจะมีกระแสกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ขนาดสูงไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเพียงด้านเดียว จนอาจจะทำให้ระบบ

ป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดเนื่องจากมองเห็นผลต่างของกระแสระหว่างขดลวดทั้งสองชุดของหม้อแปลงมีลักษณะคล้ายกรณีเกิดฟอลต์ ในการวิเคราะห์กระแสอินรัชของรีเลย์ในปัจจุบันอาศัยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานที่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลกระแสอย่างน้อย 1 ไซเคิลเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และตัดสินใจ ดังนั้นวิทยานิพนธ์จึงมุ่งพิจารณาารูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการวิธีการตรวจจับกระแสอินรัชในระบบป้องกันหม้อแปลง โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

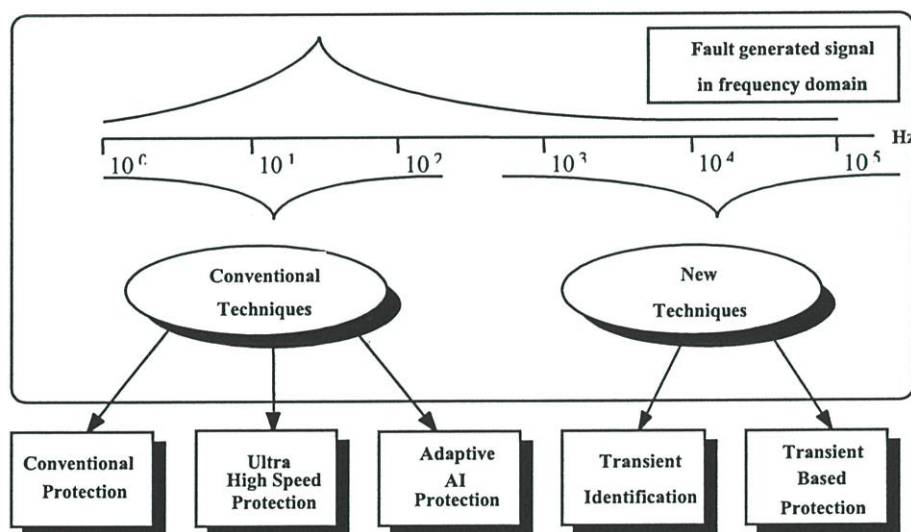
**1.2 พัฒนาการของเทคโนโลยีการวิเคราะห์สัญญาณในระบบป้องกัน [2]**

จากรูปที่ 1.2 ได้แสดงแผนภาพการพัฒนาหลักการของระบบรีเลย์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่ปี 1901 โดยเป็นระบบการป้องกันพื้นฐานที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กที่เรียกว่า “ แม่เหล็กทางกล ” (Electro-mechanical) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้กันมายาวนาน ต่อมาหลักการนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับรีเลย์ในหลายด้านด้วยกัน เช่น การป้องกันแบบระยะทาง(Distance protection) การป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection) การป้องกันแบบทิศทาง(Direction relay) เป็นต้น



รูปที่ 1.2 แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง [2]

ในช่วงปี 1960 การพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่และความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งทำให้มีการพัฒนาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด (Transducer) สัญญาณต่างๆ ให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้น และยังส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์หรือส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบของรีเลย์แบบสถิตย์ (Static relay) หลังจากนั้นในช่วงปี 1970 ความก้าวหน้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้นำมาสู่การพัฒนาวงจรรวม (Integrated circuit: IC) ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านคอมพิวเตอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) สามารถนำมาใช้ปรับปรุงการวิเคราะห์สัญญาณและการตัดสินใจของรีเลย์มีความรวดเร็วและถูกต้องทำให้รีเลย์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จึงนับเป็นการเริ่มเข้าสู่ยุคของรีเลย์แบบดิจิทัลหรือลักษณะของรีเลย์แบบนิวเมอรัล (Numerical relay) ที่มีการทำงานในลักษณะรีเลย์ป้องกันป้องกันความเร็วสูง (Ultra high speed) อย่างแท้จริง



รูปที่ 1.3 แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาของเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ [2]

นอกจากนี้ในช่วงต้นของทศวรรษที่ 90 ยังมีการนำเสนอแนวความคิดในการนำเทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent: AI) ในรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการวิเคราะห์และตัดสินใจของรีเลย์ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการสอนและความหลากหลายของข้อมูลซึ่งรูปแบบทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นเพียงการพัฒนาในรูปแบบของอุปกรณ์และเทคนิคในการตัดสินใจของรีเลย์เพียงเท่านั้น แต่ยังคงอาศัยหลักการสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานที่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตอยู่ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 1 ไซเคิลเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และตัดสินใจ เมื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นพบว่าจะมีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงรวมอยู่ด้วยซึ่งโดยทั่วไปจะถือว่าเป็นสัญญาณรบ

กวนและต้องกำจัดออก จึงทำให้ต้องพิจารณาถึงการกำจัดสัญญาณรบกวนเพื่อให้มีข้อมูลที่ถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วย และเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าในบางครั้งการใช้สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอกับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ รวมทั้งการกำจัดสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนั้นจะเป็นการทิ้งข้อมูลที่สำคัญของสัญญาณพอลต์ออกไปอีกด้วย

ในช่วงปลายของทศวรรษที่ 90 ได้มีแนวความคิดใหม่เกิดขึ้นมาโดยเปลี่ยนแนวโน้มของการวิเคราะห์สัญญาณมาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง เนื่องจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสัญญาณพอลต์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น และเมื่อพิจารณาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของอุปกรณ์การวัดและไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันพบว่าสามารถสนับสนุนแนวความคิดนี้ให้นำมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้มากขึ้น จึงทำให้แนวความคิดนี้ได้รับความสนใจและมีการนำมาทำการศึกษาและวิจัยเพื่อใช้ในการพัฒนาหลักการวิเคราะห์สัญญาณของระบบป้องกันรูปแบบใหม่ในลักษณะการป้องกันด้วยสัญญาณทรานเซียนต์ (Transient based protection) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง ซึ่งจะส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาที่ลดลงตามไปด้วย

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาถึงรูปแบบของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal-Processing) ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในสัญญาณกระแสที่ไหลในหม้อแปลงไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าการแปลงเวฟเล็ดมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติการปรับระดับความละเอียดและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์ซึ่งรายละเอียดทางทฤษฎีนั้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เท่าที่ผ่านมานั้นการแปลงเวฟเล็ดได้มีการนำมาใช้งานในหลายด้านด้วยกันเช่น การประมวลผลภาพ (Image processing) การตรวจวัดคลื่นหัวใจ เป็นต้น ต่อมาเมื่อมีการแปลงเวฟเล็ดมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในหลายๆ ส่วนของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น พอลต์ในสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า บัสบาร์ รวมถึงการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก (Harmonic) ซึ่งการนำการแปลงเวฟเล็ดมาใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังนี้นับได้ว่าเป็นการขยายขอบเขตงานวิจัยและเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังให้ดีขึ้นด้วย

### 1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษารูปแบบความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับกระแสพอลต์ที่เกิดขึ้นภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าและประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพื่อวิเคราะห์สัญญาณกระแสทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นนำผลที่ได้มาใช้ใน 2 ลักษณะด้วยกันคือ

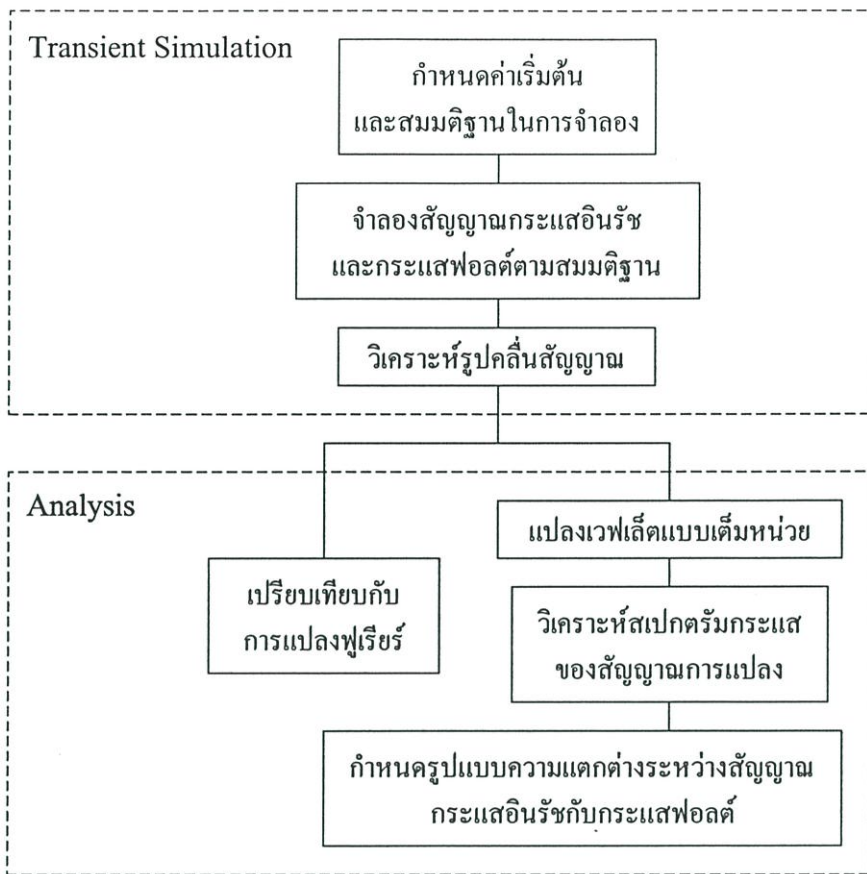
1. ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากกระแสอินรัชและพอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. แยกแยะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่าเป็นกระแสอินรัชหรือพอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

## 1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตั้งสมมุติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ดังกล่าวคือ เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในหม้อแปลงจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญสำหรับแสดงความแตกต่างระหว่างฟอลต์กับกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น และโดยเฉพาะในองค์ประกอบความถี่สูงจะสามารถแสดงตำแหน่งเวลาของการเกิดกระแสอินรัชและฟอลต์ด้วย โดยข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงประกอบการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่ำ และทำการประมวลผลโดยอ้างอิงหลักการที่นำเสนอกับการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่พื้นฐานที่มีอยู่เดิม ผลที่ได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจจับตำแหน่งการเกิดกระแสอินรัชและฟอลต์ พร้อมทั้งระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

## 1.5 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการตั้งสมมุติฐานการจำลองที่เหมาะสมสำหรับการจำลองสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง โดยอ้างอิงตามปัจจัยที่มีผลกับกระแสอินรัชและชนิดของฟอลต์ที่สามารถเกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ทำการจำลองสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ด้วยโปรแกรม ATPDraw ตามสมมุติฐานการจำลองเพื่อศึกษาลักษณะความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชกับฟอลต์ โดยอาศัยหม้อแปลงกำลังชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 และ Dyn11ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีใช้อย่างแพร่หลายในระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นแบบจำลองหลักในการศึกษา
3. เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ที่ได้จากการจำลอง ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ซึ่งจำเป็นต้องใช้ช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ห้อย่างน้อย 1 ไซเคิล
4. ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณกระแสอินรัชกับฟอลต์ที่ได้จากการจำลอง โดยประยุกต์ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่นำเสนอ โดยอาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความถูกต้องของขั้นตอนที่นำเสนอ
5. ทำการทดสอบสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์หลังจากผ่านการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยปรับปรุงสเกลของการแปลงและตระกูลของเวฟเล็ดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เพื่อความเหมาะสมที่สุดสำหรับสร้างขั้นตอนการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ โดยค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการวิเคราะห์จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 90%



รูปที่ 1.4 แสดงแผนภาพขอบเขตและขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การศึกษารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ดที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ในหม้อแปลงไฟฟ้า และเวฟเล็ดแม่ที่เหมาะสมโดยอาศัยผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งเวฟเล็ดแม่ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนต์ ประกอบด้วย เวฟเล็ดแม่ Daubechies, Symlets และ Coiflets
2. ทำการจำลองสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ที่แตกต่างกัน 448 กรณีตัวอย่าง ด้วยโปรแกรม ATPDraw แล้วนำมาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการพิจารณารูปแบบความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ในแต่ละเงื่อนไขการจำลอง โดยอ้างอิงกับหลักการที่มีอยู่เดิม รวมถึงช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ เพื่อนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์และตัดสินใจที่จะนำเสนอต่อไป
3. เมื่อได้ขั้นตอนที่เหมาะสมแล้วจึงนำสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ในทุกกรณีที่ได้จากการจำลองมาตรวจสอบกับระบบทดสอบที่สร้างไว้ในโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำผลที่ได้มาสรุปและตรวจสอบค่าเฉลี่ยความถูกต้องของขั้นตอนที่นำเสนอ

4. ทำการปรับปรุงเงื่อนไขการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย ทั้ง 3 เงื่อนไข คือ เวฟเล็ดแม่, ตระกูลของเวฟเล็ด และสเกลการวิเคราะห์ เพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์กระแสอินรัชในหม้อแปลง และมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องที่สูงที่สุด โดยจะต้องมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองพร้อมทั้งเสนอแนวทางการศึกษาพัฒนาต่อไป

### 1.7 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษารูปแบบของกระแสทรานเซียนต์ที่สมมุติว่าเกิดขึ้นจากหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างการจ่ายไฟและการเกิดฟอลต์ขึ้นภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงรูปแบบของสัญญาณรบกวนอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกันเช่น ฟิวส์, สัญญาณทรานเซียนต์ที่เกิดจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแส, สัญญาณเสิร์จที่เกิดขึ้นภายนอกหม้อแปลง และสัญญาณกระแสอินรัชหรือฟอลต์ที่เกิดจากหม้อแปลงลูกอื่น

### 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำการแปลงเวฟเล็ดไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณกระแสอินรัชและสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า
2. สามารถนำรูปแบบของการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ดและวิธีการประมวลผลที่นำเสนอไปแนวทางประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบรีเลย์ป้องกันแบบดิจิทัลของหม้อแปลงในปัจจุบัน

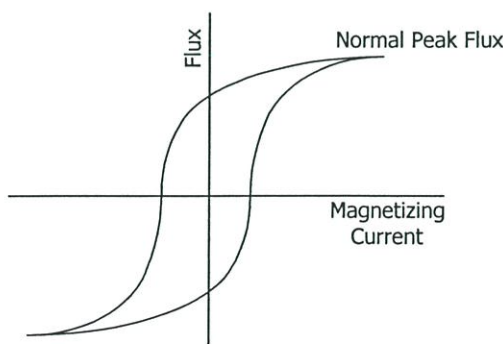
## บทที่ 2

# การวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาการศึกษาแนวทางเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะดังกล่าว จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายไฟ ที่เรียกกันทั่วไปว่า กระแสอินรัช ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงความสำคัญในการศึกษาลักษณะของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

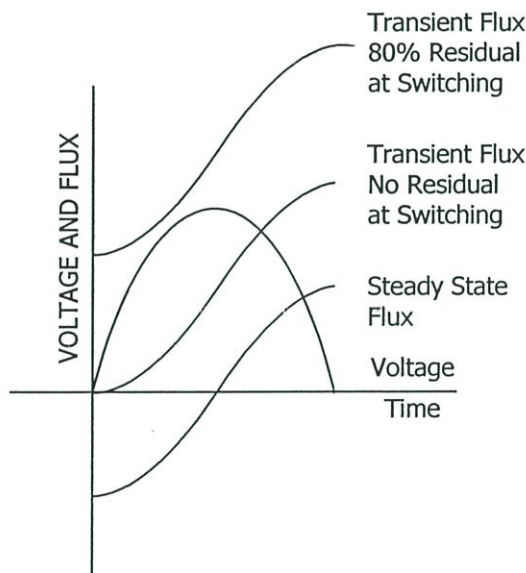
### 2.1 กระแสอินรัช (Magnetizing Inrush Current) [3]

ปรากฏการณ์ที่มีกระแสรานเขียนต์พุ่งเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิในช่วงแรก ขณะที่หม้อแปลงเริ่มมีการจ่ายไฟ (Energizing) และยังคงสภาพของขนาดกระแสที่พุ่งเข้าดังกล่าวในช่วงเวลาตั้งแต่ 100ms ไปจนถึงหลายๆ นาที นั้นเรียกว่า กระแสอินรัช ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ไม่ใช่ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง แต่เนื่องจากมีลักษณะการเกิดกระแสผลต่างระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงคล้ายการเกิดฟอลต์ จึงอาจทำให้ระบบป้องกันไฟฟ้าทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดดังกล่าว ในการออกแบบระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของกระแสอินรัช เพื่อนำไปพัฒนาระบบป้องกันให้ทำงานขณะเกิดฟอลต์ขึ้นภายในโซนป้องกัน แต่จะต้องไม่ทำงานตลอดช่วงเวลาที่เกิดสภาวะทรานเซียนต์ของกระแสอินรัช



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคงที่ สังเกตได้ว่าขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวข้องกับวงจรแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากค่ายอด (peak) สูงสุดทางด้านลบและเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่ายอดที่เท่ากันของด้านบวกภายในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยมีขนาดเป็นสองเท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในช่วงเวลาครึ่งไซเคิลของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะสถานะคงตัวในรูปที่ 2.2 สังเกตได้ว่าที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่ง ไซเคิลแรกจะมีค่าแกว่งไปมาทั้งในซีกลบและซีกบวก แต่ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ตรงตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสถานะคงตัว (Steady state)

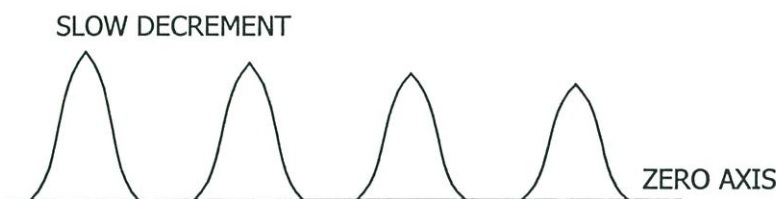


รูปที่ 2.2 ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในสถานะคงตัว (Steady state) และค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

จากคำอธิบายข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ในตัวเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเชิงเส้น ยกตัวอย่างเช่น ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ กระแสจะไหลเพิ่มสูงขึ้นจนมีขนาดประมาณสองเท่าของค่ากระแสในสถานะคงตัว อย่างไรก็ตามขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนเหล็ก ซึ่งโดยปกติจะมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดอยู่ใกล้กับจุดอิ่มตัว (Saturation) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองเท่าย่อมทำให้เกิดการอิ่มตัวอย่างมากในแกนเหล็ก และจะทำให้กระแสกระตุ้นแม่เหล็กมีขนาดสูงขึ้นอย่างมาก จนอาจมีค่ามากกว่ากระแสเต็มพิกัด โดยเรียกกระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระแสอินรัช

นอกจากนี้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างยังสามารถทำให้ขนาดของกระแสอินรัชมีค่าสูงมากขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2 แทนที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กขณะเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ให้สมมติว่ามีค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเริ่มต้นค่าหนึ่งและอยู่ในทิศเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก โดย

กำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กเท่าเดิม จะพบว่าในช่วงครึ่ง ไซเคิลแรกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ได้ใหม่จะมีค่าสูงถึง 2.8 เท่าของค่าฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในสภาวะคงตัว เมื่อค่ากำหนดให้ค่าฟลักซ์ตกค้างมีค่าประมาณ 80% ของค่าสูงสุดในสภาวะคงตัว

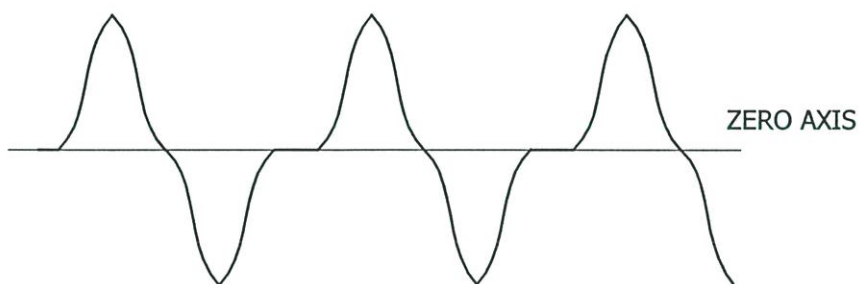


รูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น

ค่าความหนาแน่นสูงของฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ในแกนเหล็กดังแสดงข้างต้นนั้นมีค่าสูงเกินกว่าย่านทำงานปกติ ที่กำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความซึมซาบแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าคงที่ และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดมีค่าต่ำลงจนใกล้เคียงค่าของตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นพบว่ากระแสจะเริ่มต้นจากศูนย์และค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงแรก ค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเล็กน้อย และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็กมีค่าสูงขึ้นพอประมาณ ต่อมาเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากเกินไป การทำงานปกติและเข้าสู่ช่วงสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูงตามคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็ก (The Magnetizing Characteristic) ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จะลดลงและกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดในช่วงครึ่ง ไซเคิลแรกของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมีค่าสูงถึง 500 เท่ากระแสในสภาวะคงตัว ต่อมาเมื่อผ่านช่วงฟลักซ์สูงสุด ณ ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ในช่วงครึ่ง ไซเคิลหลังนี้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านลบจะทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็กลดลงไปยังตำแหน่งเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง โดยกระแสอินรัชจะลดลงจนเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะช้าๆ กัน โดยรูปคลื่นนี้จะค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยอาศัยค่าความสูญเสียในวงจรไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับค่าคงที่เวลา (Time Constant) ของกระแสทรานเซียนต์นี้ อาจเริ่มต้นจาก 0.1 วินาทีสำหรับหม้อแปลงขนาดประมาณ 100 kVA ไปจนกระทั่งถึง 1 วินาทีสำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามจากคุณลักษณะการกระตุ้นแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) และไม่เป็นฟังก์ชัน Exponential ที่ชัดเจน จึงทำให้สามารถเห็นผลของกระแสอินรัชนานถึง 30 นาทีหลังการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์

สำหรับการสวิตซ์ซึ่งที่ตำแหน่งอื่นๆ บนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ได้ค่ากระแสทรานเซียนต์ที่ต่ำลงไป และถ้าตำแหน่งการสวิตซ์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้านั้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในสภาวะคงตัวก่อนการสวิตซ์ซึ่ง ก็จะทำให้ไม่เกิดผลของกระแสอินรัชเกิดขึ้น โดยกระแสที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับกระแสขณะไม่มีโหลดทันที

ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ตำแหน่งการสวิตช์ซึ่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีความแตกต่างกัน ดังนั้นรูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะยังได้รับผลกระทบจากฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องระหว่างเฟสอื่นเนื่องมาจากการรวมกันของฟลักซ์แม่เหล็กทุกเฟสในแกนเหล็ก ซึ่งในกรณีนี้หากเฟสใดเฟสหนึ่งทำการสวิตช์ซึ่งตรงตำแหน่งที่ไม่ทำให้เกิดผลของกระแสอินรัชขณะจ่ายไฟนั้น ก็ยังจะได้รับผลของกระแสอินรัชจากเฟสอื่น ดังนั้นในกรณีนี้ถึงแม้ว่ารูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกยกจากแกนนอนแต่จะมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสอินรัชไม่ถูกยกขึ้น (Offset) เนื่องจากผลของแกนเหล็กอิ่มตัว

จากลักษณะการเกิดของกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเริ่มจ่ายไฟ ซึ่งเกิดขึ้นจากผลของฟลักซ์แม่เหล็กที่อิ่มตัวในแกนเหล็ก ส่งผลให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กสูงมากไหลเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งอาจมีค่าสูง 8 ถึง 30 เท่าของกระแสพิคคหม้อแปลง โดยลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับพอลต์ภายใน โชนป้องกันของหม้อแปลงที่มีผลต่างระหว่างกระแสไหลเข้ากับกระแสไหลออก ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและคาบ (Duration) ของกระแสอินรัช ได้ดังนี้

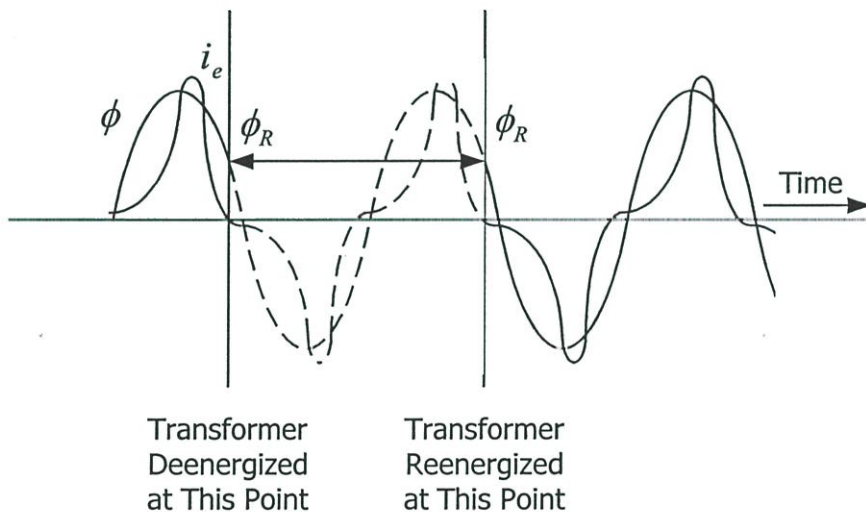
#### 2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระแสอินรัช [4]

1. ขนาดพิคคของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขนาดพิคคของระบบไฟฟ้า
3. ค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้าระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ชนิดของแกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นในการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation density)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงไฟฟ้า (Residual Flux)
6. วิธีการจ่ายไฟ

นอกเหนือจากกระแสในรัศที่เพิ่มขึ้นในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจ่ายไฟแล้ว กระแสในรัศยังสามารถเกิดขึ้นขณะจ่ายไฟของหม้อแปลงตัวอื่นๆ ที่อยู่ในระบบไฟฟ้า หรือการปลดโหลดออกจากหม้อแปลงอย่างทันทีทันใด ซึ่งสามารถแบ่งกระแสในรัศตามลักษณะการเกิดได้ดังนี้

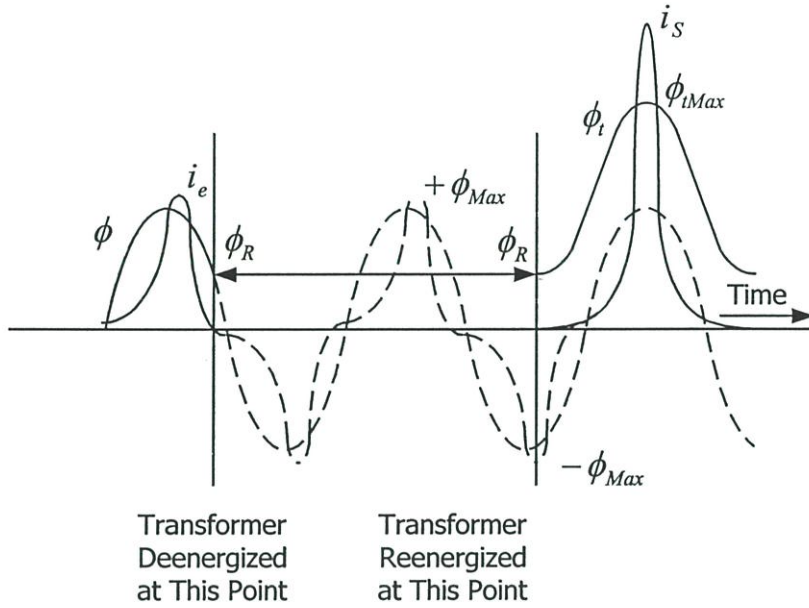
### 2.1.2 กระแสในรัศที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ (Initial Inrush)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้า กระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนฟลักซ์แม่เหล็กจะค่อยลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\phi_R$  (ดังแสดงในรูป 2.5) ต่อมาเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กมีความต่อเนื่องจากตำแหน่งที่ปลดหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบนั้น ก็จะไม่ปรากฏของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กทรานเซียนต์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ แทบเป็นไปไม่ได้ที่อุปกรณ์ตัดต่อจะควบคุมตำแหน่งการสวิตซ์ซึ่งได้ ดังนั้นกระแสทรานเซียนต์อินรัศที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้



รูปที่ 2.5 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟซ้ำ ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก [4]

ในรูปที่ 2.6 สมมุติให้หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอีกครั้ง ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่ำสุด ( $-\phi_{max}$ ) ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าว ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux) ก่อนการปลดวงจรมีค่าเป็นบวกประมาณ 50% แต่เนื่องจากคุณสมบัติของฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันทีทันใด ดังนั้นรูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นแทนที่จะเริ่มต้นจากจุด  $-\phi_{max}$  และค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นประ ก็จะเริ่มต้นจากค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างและค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปตามเส้นกราฟ  $\phi_i$  ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะหม้อแปลงจ่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งบนรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กอยู่ที่ค่าสูงสุด

เส้นกราฟ  $\phi_t$  ที่เกิดขึ้นมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นไซน์ปกติ เป็นผลเนื่องมาจากคุณลักษณะของสภาพการอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็ก (The magnetic circuit's saturation characteristic) โดยทางทฤษฎีกล่าวได้ว่า [4]

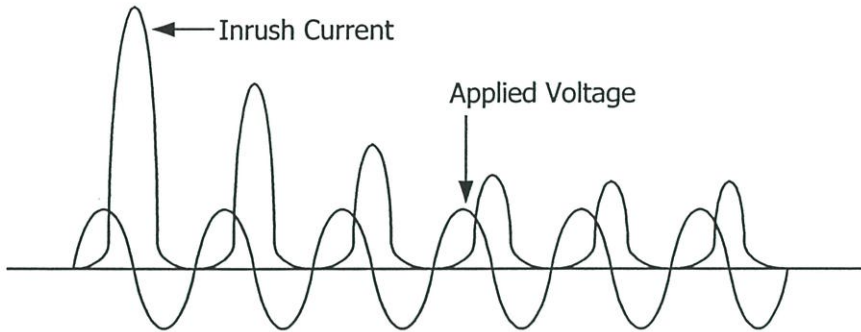
$$\phi_{\max} = \pm(|\phi_R| + 2|\phi_{\max}|) \quad (2.1)$$

ส่วนในการออกแบบหม้อแปลงตามหลักเศรษฐศาสตร์ ค่าความเข้มการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กที่ประหยัดที่สุด (Economical saturation density)  $\phi_s$  จะไม่ได้ออกแบบเพื่อไว้มากนัก ดังนั้นค่ายอดของฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi_t$  จะทำให้เกิดการอิ่มตัวด้วยความเข้มฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Supersaturation) ในวงจรแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้จะให้เกิดกระแสกระตุ้นแม่เหล็กที่สูงมาก ดังรูปที่ 2.6

ค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\phi_R$  คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ยังคงตกค้างอยู่ในแกนเหล็กหลังจากปลดไฟออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกระแสจะไหลต่อไปอีกชั่วขณะหลังจากแรงดันไฟฟ้าถูกปลดออก ค่าฟลักซ์จะค่อยๆ ลดลงตาม Hysteresis Loop จนเหลือค่าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง  $\phi_R$  เมื่อกระแสมีค่าเป็นศูนย์ และในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีมุมต่างกัน  $120^\circ$  จึงทำให้ถ้าเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับ  $+\phi_R$  อีก 2 เฟสที่เหลือจะมีค่าเท่ากับ  $-\phi_R$

โดยผลลัพธ์ของกระแสในรีซท์ที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากค่าของฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง ณ ตำแหน่งแรงดันที่ทำการสวิตซ์ซึ่งรวมกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้

รูปคลื่นของกระแสอินรัชทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.7 ในช่วง 2-3 ไซเคิลแรก ขนาดของกระแสอินรัชจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นกระแสจะลดลงช้าๆ อาจกินเวลาหลายวินาทีในกรณีที่ค่าความต้านทานระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำ



รูปที่ 2.7 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชกระตุ้นแม่เหล็กทั่วไป

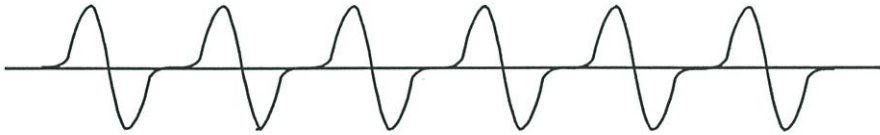
ค่าคงที่เวลา (Time constant) ซึ่งโดยปกติมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าเหนี่ยวนำกับค่าความต้านทาน ( $L/R$ ) แต่สำหรับในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) สามารถเปลี่ยนแปลงตามค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กในแกนเหล็กหม้อแปลง (Transformer saturation) โดยในระหว่าง 2-3 ไซเคิลแรก ค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กจะมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) มีค่าต่ำ ต่อมาเมื่อในวงจรมีความต้านทาน (Losses damp) เกิดขึ้น ทำให้ค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กลดลง เป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรายงาน AIEE (American Institute of Electrical Engineers) ปี ค.ศ. 1951 ระบุไว้ว่าค่าคงที่เวลาสำหรับกระแสอินรัชมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ไซเคิล สำหรับหม้อแปลงขนาดเล็ก ไปจนถึง 1 นาทีสำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่

ค่าความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวหม้อแปลงเป็นอีกปัจจัยหลักในการกำหนดอัตราการลดลง (Damping) ของรูปคลื่นกระแส โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีช่วงการเกิดกระแสอินรัชยาวนานกว่าเนื่องจากค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งคล้ายกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ก็จะมีช่วงของกระแสอินรัชที่ยาวนาน เนื่องจากมีค่าความเหนี่ยวนำที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้ามสถานีไฟฟ้าที่อยู่ไกลออกไป กระแสอินรัชจะเกิดขึ้นไม่นานเนื่องจากค่าความต้านทานของสายส่งจะช่วยให้กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นลดลงอย่างรวดเร็ว

นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวซึ่งมีผลกระทบต่อกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเฟสเดียวแล้ว รูปคลื่นกระแสอินรัชในขดลวดที่ต่อแบบ Delta ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ยังได้รับผลกระทบจากจำนวนของแกนเหล็กและผลรวมเวกเตอร์ของกระแสในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแกนเหล็กมากกว่าหนึ่ง กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะมีมุมแตกต่างกัน  $120^\circ$  จะทำให้รูปคลื่นของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น

บิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ และรูปคลื่นกระแสรวมมีลักษณะคล้ายการแกว่ง (Oscillatory) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ต่อมาถ้ารูปคลื่นของกระแสอินรัชแบบหลายเฟส หรือ เฟสเดียวในขดลวดแบบเคลด้า ซึ่งได้รับผลกระทบจากธรรมชาติของกระแสในสายส่ง ที่เกิดจากการรวมกันของเวกเตอร์กระแสระหว่างเฟส (L-L) หากสมมติว่ามีแกนเหล็กเพียงแกนเดียวที่อิ่มตัว ธรรมชาติของกระแสในสายส่งจะทำให้รูปคลื่นที่เกิดขึ้นแกว่งไปมาและบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นปกติ



รูปที่ 2.8 แสดงรูปคลื่นกระแสอินรัชทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในขดหนึ่งของการต่อแบบเคลด้า หรือ ด้านทุติยภูมิของการต่อแบบเคลด้าในหม้อแปลงกระแส

ขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดยอาศัยกราฟการกระตุ้นแม่เหล็ก (Excitation curve) ส่วนในตารางที่ 2.1 แสดงค่าการคำนวณทั่วไปของขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น โดยจากค่าการคำนวณนี้จะพบว่า

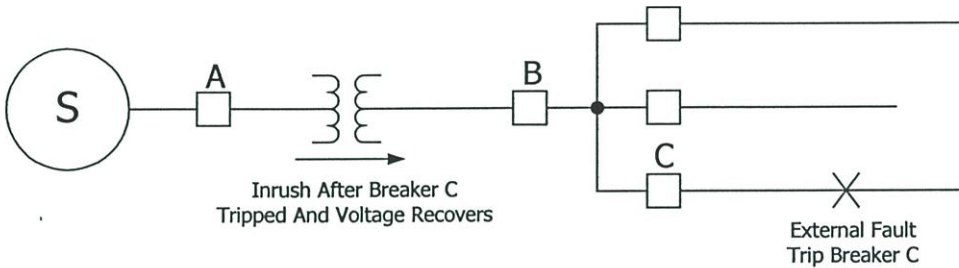
1. ถ้าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กขณะอิ่มตัว (the saturation density flux)  $\phi_s$  มีค่าต่ำลง จะทำให้ค่ายอด (peak) ของกระแสอินรัชมีค่าสูงขึ้น
2. ค่าสูงสุดของกระแสอินรัช เฟส-กระแส จะเกิดขึ้นใกล้กับมุมศูนย์ (เช่น แรงดันไฟฟ้าศูนย์)
3. ค่าสูงสุดของกระแสอินรัชในสายส่งจะเกิดขึ้นใกล้กับมุม  $\pm 30^\circ$  ของมุมสวิตซ์ซึ่ง

ตารางที่ 2.1 การคำนวณขนาดสูงสุดของกระแสอินรัชทั่วไป [4]

$\phi_s$	Closing Angle	Peak Value of Inrush Current Wave (p.u.)					
		$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_a-I_b$	$I_b-I_c$	$I_c-I_a$
1.40	$0^\circ$	5.60	-3.73	-3.73	8.33	-3.73	-8.33
1.40	$30^\circ$	5.10	-5.10	-5.10	5.96	5.10	-9.20
1.15	$0^\circ$	6.53	-4.67	-4.67	10.20	-4.67	-10.20
1.15	$30^\circ$	6.03	-6.03	-6.03	7.83	6.03	-11.06

2.1.3 กระแสอินรัชชดเชย (Recovery inrush)

คือกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่ฟอลต์ภายนอกโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกำจัดไปและแรงดันไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติ (ดังรูปที่ 2.9) ซึ่งคล้ายกับว่าหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟใหม่เพียงบางส่วน ดังนั้นค่ากระแสอินรัชชดเชยจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟเสมอ [4]



รูปที่ 2.9 แสดงกระแสอินรัชชดเชย (Recovery Inrush) หลังจากฟอลต์ภายนอกโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกำจัด

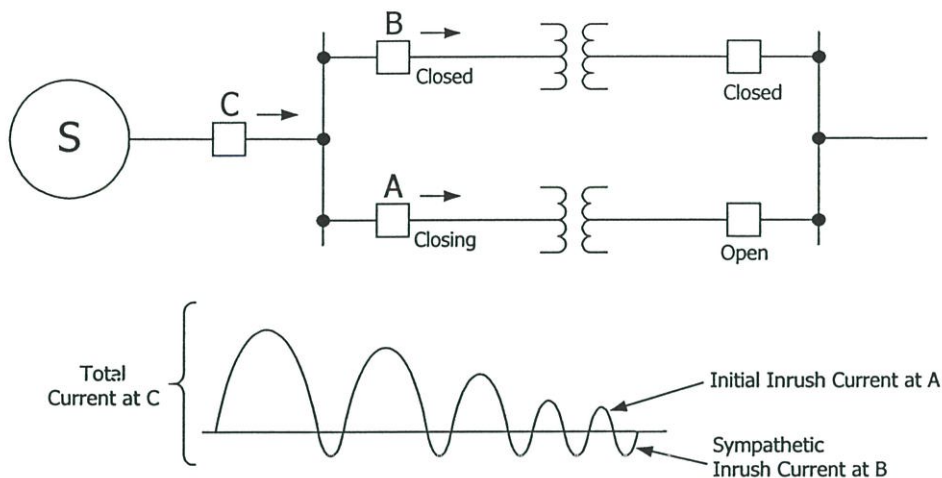
2.1.4 กระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic inrush)

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าต่อขนานกันในวงจรสองตัว หม้อแปลงไฟฟ้าตัวจ่ายไฟอยู่ก่อนจะแสดงผลของกระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic inrush) ซึ่งค่ากระแสอินรัชที่เพิ่มขึ้นจากหม้อแปลงที่กำลังถูกจ่ายไฟ จะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงอีกตัวที่ขนานอยู่ด้วยกัน โดยองค์ประกอบกระแสตรง (d-c component) ที่อิมตัวอยู่ในแกนเหล็กของหม้อแปลงจะทำหน้าที่สร้างกระแสอินรัช โดยขนาดของกระแสอินรัชนี้ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของวงจรที่ต่อขนานเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันกระแสอินรัชสะท้อนจะมีขนาดน้อยกว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟเสมอ [4]

ดังรูปที่ 2.10 ค่ากระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ C มีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้า A ถูกจ่ายไฟ กับค่ากระแสอินรัชสะท้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า B โดยรูปคลื่นผลรวมของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับกระแสฟอลต์ และอาจทำให้รีเลย์ป้องกันชนิดตรวจจับฮาร์โมนิก (Harmonic Restraint Differential Relay) ที่อาศัยการตรวจจับกระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงทำงานผิดพลาดได้

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ชนิดที่ต่อตรงกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่แสดงผลของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟ เนื่องจากว่าหม้อแปลงดังกล่าวจะค่อยๆ ถูกเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าปกติ ในทางเดียวกันพบว่ากระแสอินรัชชดเชยและกระแสอินรัชสะท้อนจะแสดงผลชัดเจนกว่า แต่ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าค่ากระแสอินรัชทั้งสองมีขนาดเล็กกว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟอยู่หลายเท่า จึงทำให้ผล

รวมของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงที่ต่อตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้



รูปที่ 2.10 กระแสอินรัชสะท้อน (Sympathetic Inrush) เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าค่อขนานอยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวที่กำลังจ่ายไฟ [4]

### 2.1.5 องค์ประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสอินรัช (Harmonic content of inrush waveform)

หลังจากที่ได้ทราบเกี่ยวกับลักษณะการเกิดกระแสอินรัชในหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ แล้ว นอกจากจะพบว่ากระแสอินรัชเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือตัวเหนี่ยวนำซึ่งแทบไม่มีโอกาสหลีกเลี่ยงได้ ในบทนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่ากระแสอินรัชอินรัชที่มีขนาดสูงที่สุดเกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าถูกจ่ายไฟครั้งแรก ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบรีเลย์ป้องกันของหม้อแปลงให้สามารถที่จะเรียนรู้และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของรูปคลื่นกระแสอินรัชที่แตกต่างจากกระแสฟอลต์ การวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างรูปคลื่นกระแสทั้งสองได้อย่างชัดเจน

รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วยสัดส่วนของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นตามปริมาณความหนาแน่นของค่าสูงสุดฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก จากการแปลงฟูเรียร์เพื่อหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกพบว่า เมื่อรูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกับแกนนอน องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีเพียงองค์ประกอบฮาร์มอนิกเฉพาะลำดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นคุณสมบัติทั่วไปที่เกิดขึ้นเมื่อรูปคลื่นกระแสสลับไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่มีคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า

(Directional Polarizing) โดยขณะที่หม้อแปลงอยู่ในสภาวะอิ่มตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลในหม้อแปลงจะประกอบจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่สูงขึ้นไปอีกเล็กน้อย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่มากขึ้นจะสัมพันธ์กับสภาพความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กโดยตรง เช่น ถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น จะทำให้จำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ เพิ่มมากขึ้น นอกเหนือจากจำนวนองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เพิ่มมากขึ้นแล้ว ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นไปจนมีค่ามากกว่าขนาดขององค์ประกอบลำดับที่ 3 ด้วย และถ้าระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นไปอีก ก็อาจจะทำให้ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 สูงกว่าขนาดขององค์ประกอบลำดับที่ 5 ได้ แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวระหว่างระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กยังไม่ได้ออกทดสอบกับหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในขณะที่หม้อแปลงถูกจ่ายไฟ รูปคลื่นของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กหรือกระแสอินรัชท์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอน แต่เมื่อตัดการพิจารณาเกี่ยวกับขนาดของกระแสที่ลดลง จะพบว่ารูปคลื่นที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมมาตรกันระหว่างช่วงขาขึ้นกับขาลง โดยรูปคลื่นดังกล่าวจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกทั้งที่เป็นลำดับคู่และคี่ ซึ่งเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์เพื่อแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสอินรัชท์พบว่า ในช่วงแรกจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 และ 3 เป็นหลัก ในส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่สูงขึ้นไปจะลดน้อยลง และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กที่ลดลง ดังนั้นสัญญาณทรานเซียนต์ในกระแสอินรัชท์จะลดลงด้วย ซึ่งถ้ากระแสอินรัชท์มีขนาดลดลงจนไม่แสดงผลของรูปคลื่นที่ถูกละ (Offset) ดังรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตามรูปคลื่นดังกล่าวยังมีลักษณะไม่สมมาตรกับแกนนอนเนื่องจากผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง แต่เมื่อพิจารณาเลือกตำแหน่ง (Ordinate) บนรูปคลื่นใดๆ ก็จะสามารถเห็นรูปคลื่นที่สมมาตรกับตัวเองได้ โดยรูปคลื่นที่เกิดขึ้นนี้จะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกทั้งลำดับเลขคู่และคี่รวมกัน

## 2.2 เสถียรภาพของระบบรีเลย์ป้องกันชนิดผลต่างกระแสระหว่างการเกิดกระแสอินรัช

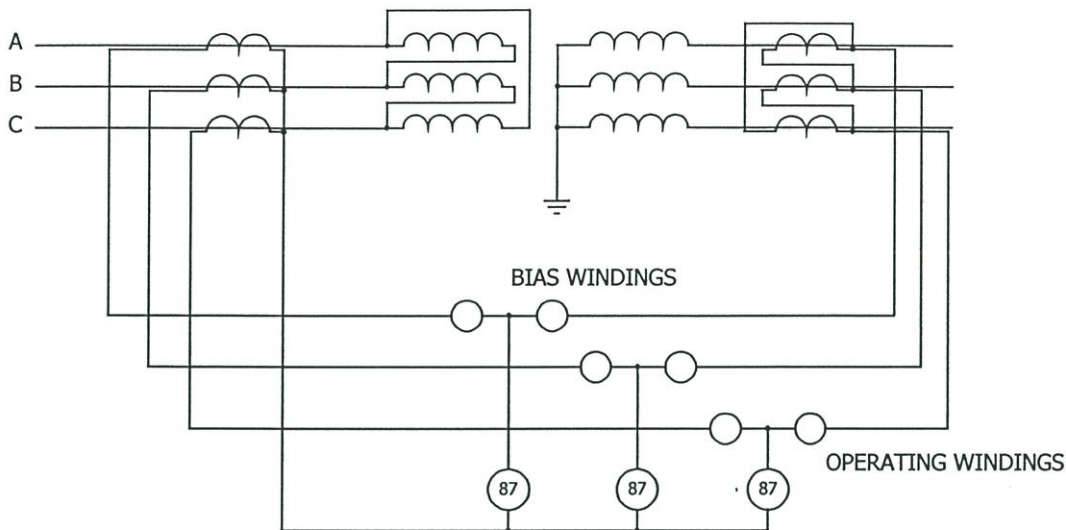
ปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชแม่เหล็กคั้งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเป็นผลให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดคั้งที่ถูกจ่ายไฟไม่เท่ากับกระแสในขดลวดอีกคั้งหนึ่งของหม้อแปลงไฟฟ้า คั้งนั้นผลต่างอันเกิดขึ้นจากกระแสอินรัชนั้น ส่งผลให้กระแสมีลักษณะไม่สมดุล (Unbalance) และทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ความแตกต่างกับกระแสที่เกิดจากการลัดวงจรภายในได้ ซึ่งการตั้งค่ากระแสชดเชยทั่วไปใช้ไม่ได้ผลและการเลื่อนค่าปรับตั้งของระบบป้องกันเพื่อหนีไม่ไห้ระบบป้องกันทำงานนั้นทำได้ยาก คั้งนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของรีเลย์ในการตรวจจับการเกิดกระแสอินรัชในลักษณะต่างๆ คั้งต่อไปนี้

### 2.2.1 การหน่วงเวลา [3,4]

เมื่อปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัชนั้นเป็นลักษณะสัญญาณทรานเซียนต์ซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะ การหน่วงเวลาจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้ผลและมีใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบป้องกัน

สำหรับการประยุกต์เทคนิคการหน่วงเวลาในรีเลย์กระแสเกินชนิดชนิดจับปล้น (Instantaneous Overcurrent Relay) ทำได้โดยการต่อรีเลย์คั้งกล่าวขนานกับฟิวส์ที่เรียกว่า kick-fuse ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสส่วนใหญ่ในวงจร โดยการเลือกขนาดฟิวส์จะต้องเลือกไห้สามารถทนต่อขนาดของกระแสอินรัชทรานเซียนต์ได้ และจะขาดออกก็ต่อเมื่อเกิดการลัดวงจรภายใน ซึ่งเมื่อขาดออกจะไห้รีเลย์ที่ต่อขานานอยู่รับกระแสทั้งหมดจึงส่งสัญญาณลัดวงจรต่อไป

ส่วนรีเลย์ DDT แบบใช้ตัวเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมทั้งคุณลักษณะทางด้านเวลาและการชดเชยกระแส โดยแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 ตัวที่ติดตั้งอยู่คั้งเดียวกันของแผ่นจานหมุนจะสร้างแรง (Torque) มาหักล้างกัน อุปกรณ์อื่นๆ ถูกต่ออยู่แบบ Merz-Price คั้งรูปที่ 2.11 โดยค่าปรับตั้งสามารถปรับได้คั้งตั้งแต่ 40-100% ค่าความชันสำหรับการชดเชยกระแสสามารถเลือกได้จากแท็บซึ่งมีค่า 20%, 30% หรือ 40% ซึ่งช่วงเวลาสั้นๆ ที่ใช้ในการหน่วงเวลาทำงานของรีเลย์จะกำหนดมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของแผ่นจานหมุนที่สามารถเอาชนะแรงดึงดูดของแม่เหล็กถาวรได้ ยกตัวอย่างการตั้งค่าเวลา เมื่อมีกระแสขนาด 5 เท่าของค่ากระแสที่คั้งไว้ จะสามารถปรับค่าการหน่วงเวลาได้คั้งตั้งแต่ 100 มิลลิวินาที จนถึง 250 มิลลิวินาที โดยค่าที่นิยมใช้งานคือ 120 มิลลิวินาทีซึ่งอยู่คั้งตำแหน่งกึ่งกลางพอดี



รูปที่ 2.11 แสดงการชดเชยของรีเลย์ผลต่างสำหรับขดลวดทั้งสองในหม้อแปลงชนิดเดลต้า/สตาร์

เป็นไปได้ที่ค่าเวลาการหน่วงซึ่งถูกกำหนดข้างต้นอาจจะไม่เพียงพอสำหรับการป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดของรีเลย์ในทุกกรณีสำหรับการเกิดกระแสอินรัช ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการปรับปรุงจากรีเลย์ชนิดตัวเหนี่ยวนำที่มีผลการตอบสนองต่ำไปเป็นรีเลย์แบบกระแสไหลทางเดียว

### 2.2.2 การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Restraint) [3,5]

สำหรับระบบป้องกันหม้อแปลงที่ดีที่สุดคือ หากมีฟอลต์เกิดขึ้นจะต้องทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นโดยไม่มีกำหนดเวลาเพื่อให้หม้อแปลงมีความเสียหายน้อยที่สุดและระบบไฟฟ้าได้รับผลกระทบน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวอาจส่งผลให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม กระแสอินรัชที่เกิดขึ้นแม้ว่าจะมีความคล้ายกับกระแสที่เกิดขึ้นขณะลัดวงจรภายในนั้น แต่เมื่อสังเกตโดยละเอียดจะพบความแตกต่างอย่างมากเมื่อนำรูปคลื่นกระแสทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะของความแตกต่างที่พบสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแบ่งแยกประเภทของกระแสทั้งสอง

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น กระแสอินรัชประกอบด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ แต่ขนาดขององค์ประกอบเหล่านี้ก็มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นในการศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับเรื่องนี้จึงมีความซับซ้อนสูง เนื่องจากรูปคลื่นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กและคุณภาพของเหล็กที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก ซึ่งหลักการต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 2.2.2.1 องค์ประกอบกระแสตรง (D.c or offset component)

องค์ประกอบกระแสทิศทางเดียวมักจะถูกพบว่าเป็นองค์ประกอบในกระแสอินรัชของหม้อแปลงชนิดเฟสเดียวอยู่เสมอตามหลักการการเกิดกระแสอินรัชของระบบ 3 เฟส อย่างไรก็ตาม

ตาม ถ้ามีการสวิตซ์ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างเฟสใดเฟสหนึ่งเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กก่อนการปลดวงจร ก็จะไม่มีการรบกวนจากกระแสทรานเซียนต์เกิดขึ้นในเฟสนั้น ส่วนอีก 2 เฟสที่เหลือจะเกิดกระแสอินรัชขนาดสูง เนื่องมาจากการที่ฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กของเฟสนั้นมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กสูงๆ ที่เกิดขึ้นไหลวนในแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟสจะส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นกระแสของเฟสแรกที่ไม่แสดงผลกระทบของการเกิดกระแสอินรัช โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะทำให้รูปคลื่นกระแสในเฟสแรกมีลักษณะบิดเบี้ยวดังรูปที่ 2.4 แต่จะไม่ถูกยกขึ้นเหนือแกนนอน โดยสรุปถ้าจะนำองค์ประกอบของกระแสทิศทางเดียวมาใช้เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในระบบป้องกันชนิดผลต่างกระแส อาจจำเป็นต้องชดเชยกระแสจากผลกระทบดังกล่าวด้วยการไขว้เฟส (Cross-phase biasing)

### 2.2.2.2 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง (Second harmonic)

องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองนี้จะปรากฏอยู่ในรูปคลื่นกระแสอินรัชทุกแบบ นอกจากนี้ยังมีรูปแบบของรูปคลื่นกระแสที่เป็นมาตรฐาน โดยที่ทุกๆ ครึ่งไซเคิลถัดไป จะไม่พบลักษณะกลับขั้วกันแบบกระแสสลับ แต่เมื่อเลือกตำแหน่งพิกัดที่เหมาะสม ก็จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินรัชนั้นมีลักษณะสมมาตรกันได้ สัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองจะเปลี่ยนไปตามระดับความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก แต่กระแสที่เกิดจะมีทิศทางเดียวกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นและคงอยู่ให้นานที่สุดเสมอ โดยขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากระแสขณะสภาวะคงตัวอยู่อย่างน้อย 20% รูปคลื่นที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.2.2.1 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบไปด้วยอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองถึงแม้รูปคลื่นจะไม่ถูกยกขึ้น แต่ก็มีจุดเริ่มต้นในทิศทางเดียวกับฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง [3, 5]

โดยปกติกระแสลัดวงจรจะไม่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองและฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ ซึ่งจะไม่ทำให้กระแสที่ไหลในแกนเหล็กที่อิ่มตัวในสภาวะคงตัวมีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นซายน์

กระแสขาออกของหม้อแปลงกระแสที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น ไม่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ อย่างไรก็ตามหม้อแปลงกระแสที่อิ่มตัวจากกระแสลัดวงจรจะมีรูปคลื่นของกระแสทางด้านขาออกของหม้อแปลงกระแสมีลักษณะไม่สมมาตรและมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ ซึ่งลักษณะเฉพาะดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้สำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างกระแสภายใต้สภาวะลัดวงจร แต่ก็มีข้อเสียเล็กน้อยเนื่องจากเวลาการทำงานในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการใช้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองนี้จึงเป็นหลักการที่น่าจะนำมาใช้สำหรับเพิ่มเสถียรภาพของระบบป้องกันกรณีเกิดกระแสอินรัช อย่างไรก็ตามจะต้องมั่น

ใจว่าหม้อแปลงกระแสที่นำมาใช้งานมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะไม่อิ่มตัวจนทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกขณะเกิดกระแสลัดวงจรไปรบกวนและหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ได้

กระแสผลต่างที่ไหลผ่านฟิลเตอร์เพื่อแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง องค์ประกอบที่ได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับสัดส่วนกับกระแสทั้งหมดที่ไหลในวงจร กรณีเกิดกระแสอินรัช เพื่อยับยั้งการทำงานของรีเลย์ ซึ่งหมายความว่าระบบจะมีทั้งความไวและความเร็วสูง ยกตัวอย่างเช่น ในรีเลย์ DTH (Static design) มีค่าเซตตั้งอยู่ที่ 15% และเวลาในการทำงานเท่ากับ 45 มิลลิวินาที สำหรับฟอลต์ทุกกรณีที่มีขนาดกระแสมากกว่าสองเท่าของกระแสฟิสิกส์ของหม้อแปลง โดยรีเลย์จะยับยั้งการทำงานก็ต่อเมื่อมีค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สองมากกว่า 20% ของกระแส

### 2.2.2.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สาม (Third harmonic) [5]

การใช้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามที่อยู่ในกระแสอินรัชจะคล้ายกับการเปรียบเทียบกับสัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สอง

กระแสอินรัชในแต่ละเฟสจะมีความสัมพันธ์ชนิดเฟสตรงกัน (In phase) กับแรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้า (Electromotive forces) ทางด้านปฐมภูมิและองค์ประกอบฮาร์มอนิกจะมีลักษณะคล้ายช่องว่างเวลาที่จะรวมฮาร์มอนิกลำดับที่สามในขดลวดทั้งสามไปสู่เฟสเดียว ถ้าขดลวดต่อในลักษณะ Delta ค่ากระแสในสาย (Line current) จะเท่ากับผลต่างกระแสระหว่างสองเฟส จากองค์ประกอบของกระแสอินรัชที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะทรานเซียนต์ จึงเป็นไปได้ที่กระแสผลต่างดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามของกระแสในสายก็จะหายไปด้วย ซึ่งอาจทำให้เสถียรภาพของระบบไม่น่าไว้วางใจ นอกจากนี้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามยังสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวจากกระแสฟอลต์ที่รุนแรงอีกด้วย

ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่ได้แสดงนี้ ทำให้การใช้องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สามสำหรับระบบป้องกัน จึงไม่ควรนำมาใช้เพื่อป้องกันผลกระทบของกระแสอินรัช

### 2.2.2.4 องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงกว่า (Higher harmonic)

องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ที่ปรากฏอยู่ในกระแสอินรัชตามทฤษฎี อย่างไรก็ตามด้วยขนาดของแต่ละองค์ประกอบที่มีขนาดเล็ก และเกิดขึ้นรวดเร็วมาก เช่น มีเพียง 5% ขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 4 อยู่ในกระแสอินรัช โดยองค์ประกอบลำดับที่ 4 นี้มีลักษณะการตอบสนองคล้ายกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 แต่ด้วยขนาดที่เล็กกว่าจึงทำให้ยากสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

ในส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ก็มีสัดส่วนที่น้อยมาก นอกจากนี้ยังสามารถเกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงกระแสอิ่มตัวด้วยกระแสฟอลต์เช่นเดียวกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ดังนั้นจึงไม่ควรนำมาประยุกต์ใช้งาน สำหรับองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่สูงขึ้น

ไปอีกก็จะมีขนาดที่เล็กมากจนไม่คุ้มที่จะนำมาวิเคราะห์ สัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เทียบกับกระแสในรีเลย์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาพแรงดันไฟฟ้าเกิน

บางผู้ผลิตพยายามประยุกต์การตรวจจับค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เพื่อให้รีเลย์ยับยั้งการทำงานขณะเกิดสภาวะดังกล่าว โดยทั่วไปในกรณีเกิดกระแสในรีเลย์จะมีสัดส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เทียบกับกระแสในรีเลย์ประมาณ 30%

## 2.3 การประยุกต์เทคนิคการตรวจจับกระแสในรีเลย์ป้องกันชนิดกระแสผลต่าง สำหรับการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.3.1 การตรวจจับกระแสในรีเลย์

อีกคุณสมบัติของลักษณะของกระแสในรีเลย์ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 เมื่อรูปคลื่นกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ปรากฏอยู่ช่วงหนึ่งของคาบ ซึ่งตามทฤษฎีช่วงกระแสศูนย์ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $1/4$  ไซเคิล จึงสามารถตรวจจับได้ด้วยวงจรนับเวลา  $T1$  ที่ตั้งค่าไว้ที่  $1/4f$  วินาที โดยรูปที่ 2.12 แสดง วงจรการตรวจจับในรูปแบบของแผนภาพวงจรนับเวลา  $T1$  จะสร้างสัญญาณขาออก (Output) ก็ต่อเมื่อช่วงกระแสศูนย์มีค่ามากกว่า  $1/4f$  วินาที และจะรีเซ็ตก็ต่อเมื่อค่ากระแสช่วงหนึ่งของกระแสผลต่างเกินค่าที่ตั้งไว้

จากการที่ช่วงกระแสศูนย์ของกรณีกระแสในรีเลย์จะเกิดขึ้นในช่วงท้ายๆ ของไซเคิล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาสำหรับการตรวจจับอีก  $1/f$  วินาที เพื่อให้รีเลย์ป้องกันมั่นใจว่าสามารถตรวจจับช่วงศูนย์ที่เกิดขึ้นได้แน่นอน ทำได้โดยใช้วงจรนับเวลา  $T2$  ซึ่งจะถูกรีเซ็ตจากสัญญาณขาออกของวงจรนับเวลา  $T1$



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงหลักการตรวจจับช่องว่างในรูปคลื่น [3]

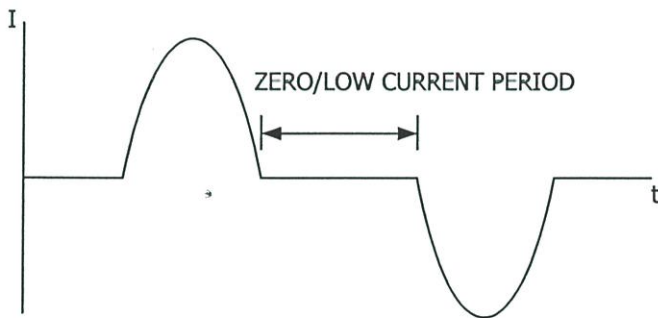
เมื่อไม่มีกระแสไหลในวงจรเกิน  $1/4f$  วินาที วงจรนับเวลา  $T2$  ก็จะถูกกรีเซ็ตและรีเลย์ชนิดผลต่างกระแสซึ่งถูกควบคุมด้วยวงจรมีเวลานี้ก็จะไม่สั่งตัดวงจร แต่เมื่อผลต่างกระแสเกินค่าเซตตั้งของรีเลย์ วงจรนับเวลา  $T1$  จะถูกรีเซ็ต ทำให้วงจรนับเวลา  $T2$  หหมดเวลาและสั่งสัญญาณสั่งตัดวงจรในเวลา  $1/f$  วินาที แต่ถ้ากระแสผลต่างเป็นลักษณะของกระแสในรีเลย์ วงจรเวลา  $T2$  ก็จะถูกกรีเซ็ตในทุกๆ ไซเคิล ดังนั้นสัญญาณสั่งตัดวงจรก็จะถูกยับยั้งไว้

### 2.3.2 การตรวจจับการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กในหม้อแปลง

เมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาพแรงดันไฟฟ้าเกิน จะมีพัลส์กระแสขนาดใหญ่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงทุกๆ ไซเคิล ซึ่งจะเกิดเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า Knee ของกราฟการกระตุ้นแม่เหล็ก (Magnetizing curve) ในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่ากระแสกระตุ้นแม่เหล็กจะเกิดขึ้น 2 ครั้งในทุกๆ ไซเคิลเมื่อกระแสมีค่าต่ำกว่าขอบเขตของผลต่างกระแสที่กำหนด (Differential setting threshold) ของรีเลย์ดังรูปที่ 2.13 โดยทั่วไปช่วงของกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่า  $1/4f$  วินาที ดังนั้นการทำงานของรีเลย์จะถูกยับยั้ง หากตรวจพบรูปแบบของกระแสกระตุ้นแม่เหล็กนี้

เมื่อระดับการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างศูนย์จะสั้นลง อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าเกินจะต้องมีค่ามากถึง 40% จึงจะทำให้ช่องว่างศูนย์ที่เกิดขึ้นมีค่าสั้นกว่าค่าปรับตั้ง นอกจากนี้การเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ห้าเปรียบเทียบการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กจะสามารถให้ผลใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจะไม่เกิดขึ้นบ่อยครั้งเป็นผลให้ระดับของการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็กไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับ

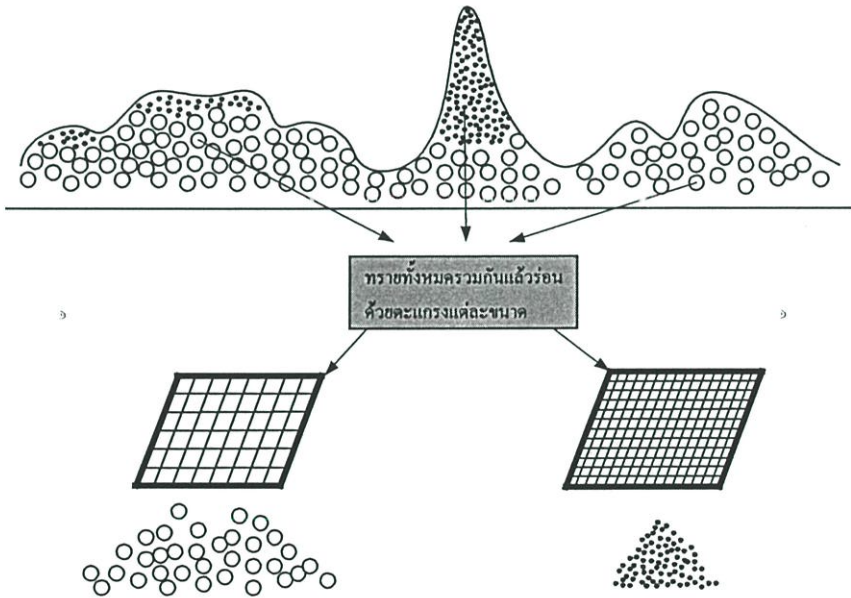


รูปที่ 2.13 กระแสกระตุ้นแม่เหล็กขณะเกิดการอิมตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก [3, 5]

### บทที่ 3

## การแปลงเวฟเล็ต

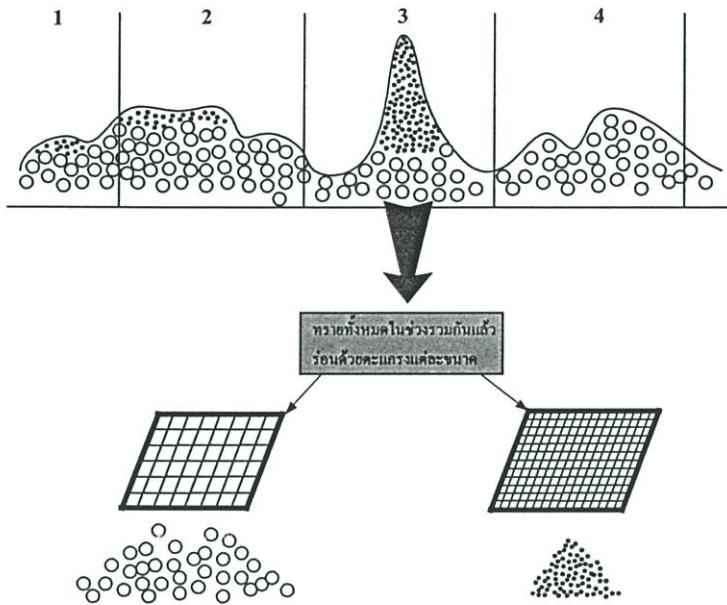
เพื่ออธิบายทฤษฎีของการแปลงเวฟเล็ตให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจึงทำการยกตัวอย่างของการแยกขนาดเม็ดทรายดังต่อไปนี้ เมื่อพิจารณากองทรายกองหนึ่งซึ่งสมมุติให้มีเม็ดทรายขนาดเล็กและใหญ่ปนกัน โดยกำหนดให้ทรายที่มีขนาดใหญ่อยู่ด้านล่าง ส่วนทรายที่มีขนาดเล็กอยู่ด้านบน และมีการกระจายตัวของทรายแต่ละขนาดตามความยาวของกองทรายตามรูปที่ 3.1 เมื่อต้องการแยกทรายแต่ละขนาดออกจากกันวิธีทั่วไปสามารถทำได้โดยนำทรายทั้งหมดมารวมกันและใช้ตะแกรงหลายๆ ขนาดร่อนแยกทรายแต่ละขนาดออกมาซึ่งปริมาณทรายแต่ละขนาดนั้นจะเป็นค่าที่บอกว่ากองทรายตลอดช่วงความยาวทั้งหมดมีทรายขนาดนั้นอยู่มากน้อยเพียงใด



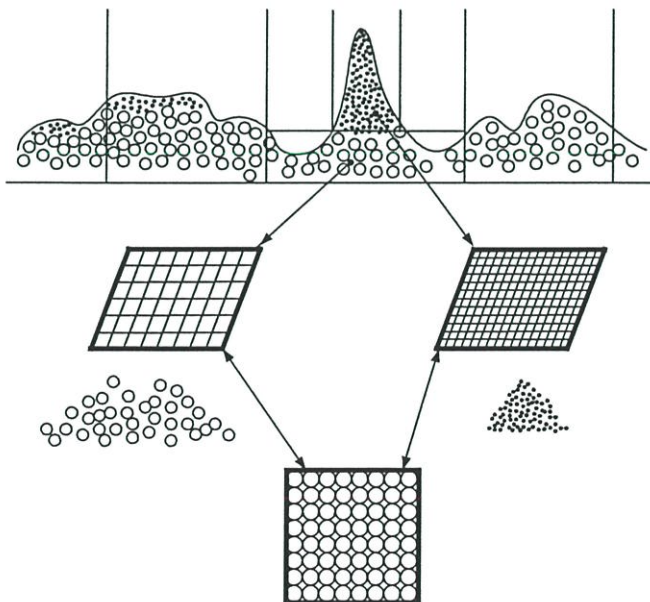
รูปที่ 3.1 แสดงการแยกขนาดเม็ดทรายโดยใช้การรวมทรายทุกขนาดเข้าด้วยกัน

สิ่งหนึ่งที่ขาดหายไปคือไม่สามารถทราบได้เลยว่าแต่ละช่วงของกองทรายนั้นมีทรายแต่ละขนาดอยู่มากน้อยเพียงใด ทางแก้ไขที่ช่วยลดข้อบกพร่องดังกล่าวคือการแบ่งกองทรายนี้ออกเป็นช่วงๆ ตามความยาวดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการร่อนทรายในแต่ละช่วงออกมา ซึ่งจะทำให้ทราบว่าแต่ละช่วงหรือตำแหน่งของกองทรายมีปริมาณทรายแต่ละขนาดอยู่เท่าใดบ้าง และเมื่อพิจารณาในช่วงที่ 3 ซึ่งมีทรายขนาดเล็กอยู่เพียงช่วงสั้นๆ แต่การแบ่งช่วงที่กว้างนั้นทำให้ผลการร่อนทรายที่ได้บอกว่ามีทรายขนาดเล็กอยู่ตลอดช่วงที่ 3 ซึ่งไม่ถูกต้องนัก ดังนั้นเพื่อให้สามารถทราบปริมาณทรายแต่ละขนาดในแต่ละ

ตำแหน่งที่ถูกต้องควรมีการแบ่งช่วงของกองทรายให้มีความกว้างที่แตกต่างกันคือช่วงที่แคบสำหรับการร่อนทรายขนาดเล็กและช่วงที่กว้างสำหรับการร่อนทรายขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 3.3 และการร่อนจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นถ้าสามารถเลือกรูปแบบของตะแกรงที่เหมาะสมกับเม็ดทรายที่จะนำมาร่อนเช่น ถ้าเม็ดทรายเป็นทรงกลมก็ควรใช้ตะแกรงที่มีตาเป็นวงกลม หรือถ้าเม็ดทรายเป็นทรงสี่เหลี่ยมก็ควรใช้ตะแกรงที่มีตาเป็นตารางสี่เหลี่ยม เป็นต้น



รูปที่ 3.2. แสดงการแยกทรายโดยแบ่งออกเป็นช่วงๆ ตามความยาว



รูปที่ 3.3 แสดงการแยกทรายโดยแบ่งช่วงที่แตกต่างกันตามขนาดของเม็ดทราย

จากตัวอย่างการแยกเม็ดยาที่กล่าวมาแล้วในขั้นต้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบลักษณะของกองทรายกับลักษณะของสัญญาณทรานเซียนต์เช่น สัญญาณพอลต์พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ กองทรายมีเม็ดยาที่มีหลายขนาดและกระจายออกไปตามแนวยาวในปริมาณที่แตกต่างกัน ในขณะที่สัญญาณทรานเซียนต์จะมียอดประกอบของความถี่ที่แตกต่างกันรวมอยู่ด้วยกันและกระจายกันอยู่ในขนาดที่ไม่เท่ากันตามแกนเวลา ดังนั้นถ้าสามารถนำรูปแบบของการแยกทรายตามรูปที่ 3.3 มาประยุกต์ใช้กับการแยกองค์ประกอบของสัญญาณในแต่ละความถี่ของสัญญาณทรานเซียนต์ออกจากกัน รวมทั้งการเลือกฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์ที่เหมาะสมก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์ของแต่ละความถี่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการประมวลผลสัญญาณที่มีลักษณะการวิเคราะห์ตามรูปแบบที่ได้กล่าวมาเพื่อที่จะนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณพอลต์และกระแสอินรัช ซึ่งพบว่าการแปลงเวฟเล็ตเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานโดยมีรายละเอียดทางทฤษฎีดังต่อไปนี้

### 3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต

การแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม แต่ได้พัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายความหมายและความแตกต่างของการแปลงเวฟเล็ตกับการแปลงสัญญาณในแบบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจและนำไปใช้งานต่อไป

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

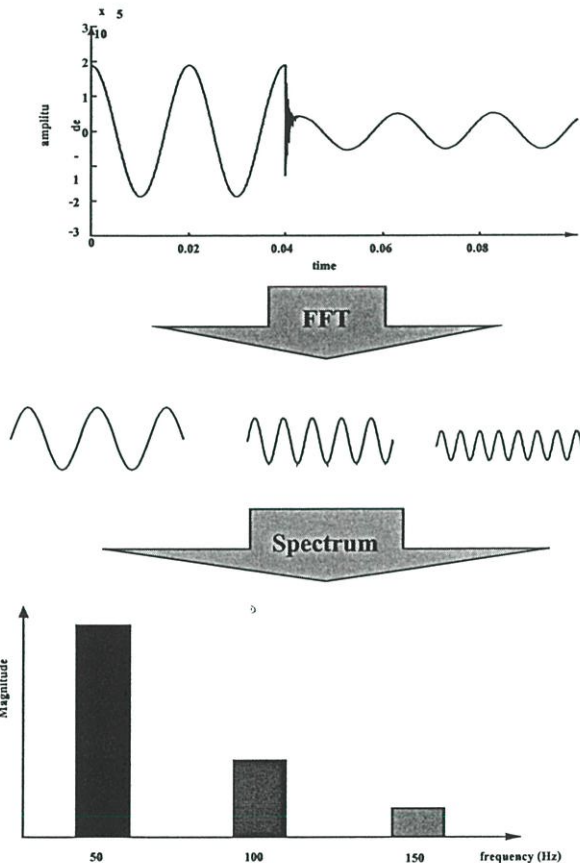
เป็นรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา(Time-domain) ไปเป็นโดเมนความถี่(Frequency-domain) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเป็นการหาสเปกตรัม(Spectrum) ของสัญญาณนั่นเอง บางครั้งสามารถกล่าวได้ว่าเป็นการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยฟังก์ชันพื้นฐาน (basic function) ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปของการแตกองค์ประกอบของสัญญาณใดๆ ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ที่มีขนาดและความถี่ที่แตกต่างกันตลอดย่านความถี่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ดังแสดงในสมการที่ 3.1 [6]

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

ซึ่งมีสมการในทอมของการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสุ่ม (Sampling data) ที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ดังสมการที่ 3.2 [6]

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

เมื่อ  $n=1,2,\dots,N$



รูปที่ 3.4 แสดงการแปลงฟูเรียร์ (FFT)

ผลการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 (เทียบได้กับการร่อนทรายรูปที่ 3.1) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีแม่นยำด้านความถี่ และเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่แน่นอน (Stationary signal) แต่ข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์คือ ในกรณีที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Non-stationary signal) เช่น สัญญาณทรานเซียนต์รูปแบบต่างๆ การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นรวมทั้งข้อมูลทางด้านเวลาที่ขาดหายไป ซึ่งข้อมูลทางด้านเวลาเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์

### 3.1.2 การแปลงกาบอร์ (Gabor Transform: GT)

เป็นการแปลงสัญญาณที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นแบบแรกเพื่อแก้ปัญหาของการแปลงฟูเรียร์ โดยทำการแปลงฟูเรียร์เฉพาะช่วงเวลาและช่วงความถี่ที่กำหนดผ่านฟังก์ชันหน้าต่างต่าง (Windows function) ซึ่งจะ เป็นลักษณะของฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian function) ซึ่งแสดงอยู่ในสมการที่ 3.3 [7]

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

ซึ่งมีสมการการแปลงกาบอร์ดังนี้ [7]

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

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

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

จากข้อจำกัดของการแปลงฟูเรียร์และการแปลงกาบอร์ จึงมีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณมาสู่การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ฟังก์ชันหน้าต่างเหมือนการแปลงกาบอร์ แต่สามารถเลือกฟังก์ชันหน้าต่างที่ใช้ได้จึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์สัญญาณมากยิ่งขึ้น สมการการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.5 [8]

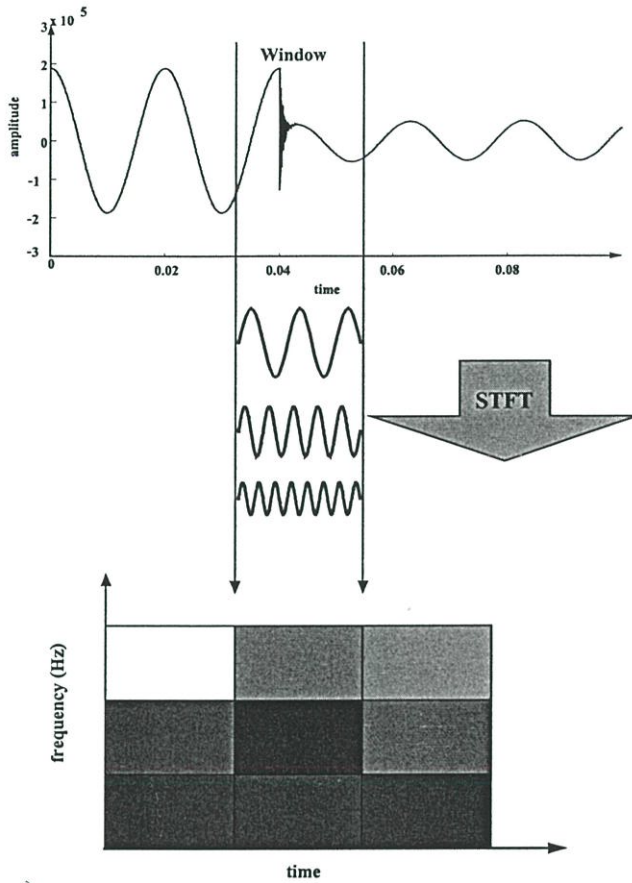
$$STFT(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t-\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

เมื่อ

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

โดยที่ตำแหน่งเวลาในการวิเคราะห์ถูกกำหนดโดยค่า  $\tau$  และช่วงความถี่ในการวิเคราะห์กำหนดด้วยความถี่หรือความกว้างของฟังก์ชันหน้าต่างนั้นๆ ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของการแตกองค์ประกอบ

สัญญาณในลักษณะการแปลงฟูเรียร์ในช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (เทียบได้กับการร่อนทรายในรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.5 แสดงการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (STFT)

สังเกตได้ว่าทั้งการแปลงกานอร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น มีลักษณะของช่วงเวลาการวิเคราะห์ที่คงที่ (Fixed resolution transform) ดังนั้นการใช้ช่วงการวิเคราะห์สัญญาณที่คงที่ในการวิเคราะห์สัญญาณทุกๆ ช่วงความถี่จึงอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่สูงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วกว่าจึงควรจะใช้ช่วงเวลาที่แคบในการวิเคราะห์ ในขณะที่สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าจึงควรจะใช้ช่วงเวลาที่กว้างกว่าในการวิเคราะห์ (เทียบได้กับการร่อนทรายรูปที่ 3.3 ) จากเหตุผลนี้จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์ซึ่งเรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ต” ซึ่งความหมายและรูปแบบทางทฤษฎีของเวฟเล็ตนั้น ได้แสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป

### 3.2 การแปลงเวฟเล็ท (Wavelet Transform : WT) [9,10]

ทฤษฎีเวฟเล็ท (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะหลายๆ สัญญาณมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ท” ลักษณะของเวฟเล็ทจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วดังรูปที่ 3.6

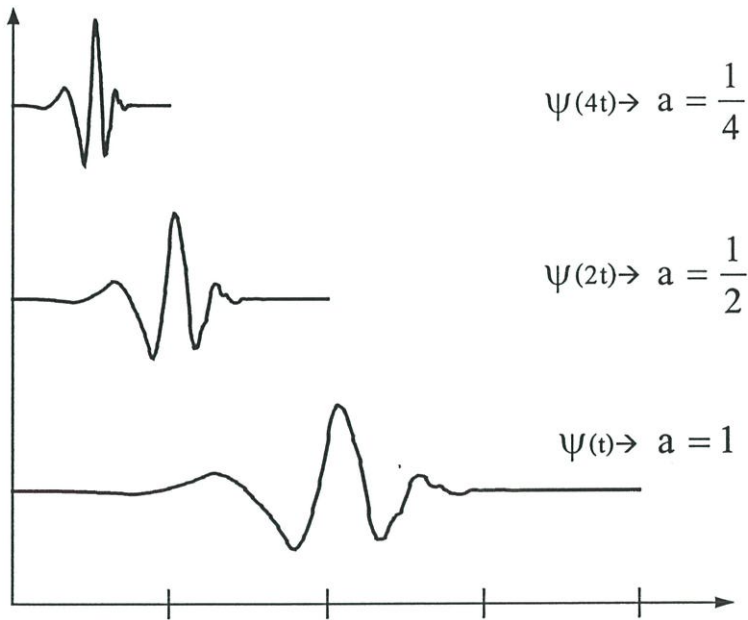


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ทแบบ Morlet

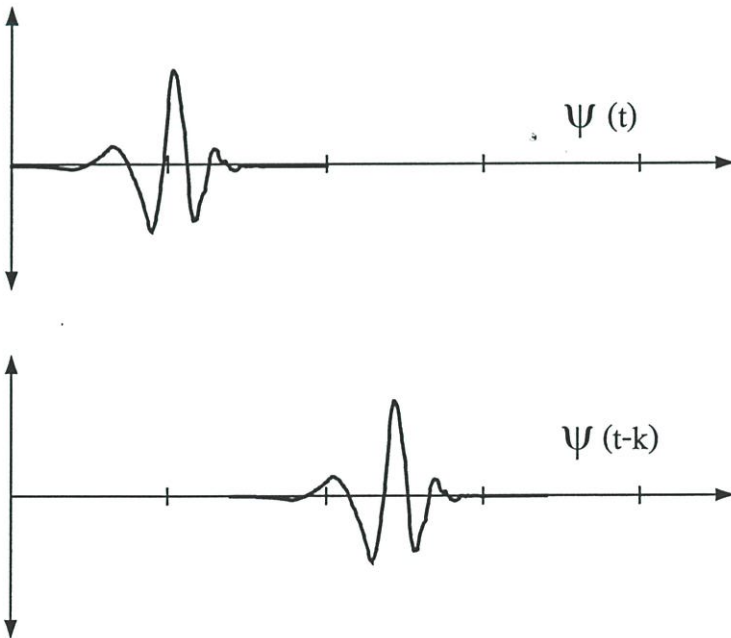
ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ทคือการนำกลุ่มของเวฟเล็ทที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ทต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ทแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ทแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการสเกล (Scaling:  $a$ ) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ทแม่ตัวเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting:  $b$ ) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลาดัง ดังนั้นถ้าให้  $\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ทแม่จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ได้ดังนี้

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

$\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ทแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ตามลำดับ โดยที่เวฟเล็ทแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า  $a$  และ  $b$  แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเล็ทแม่เดิมอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และเพื่อให้เวฟเล็ทที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ทแม่จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วย  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  เสมอ



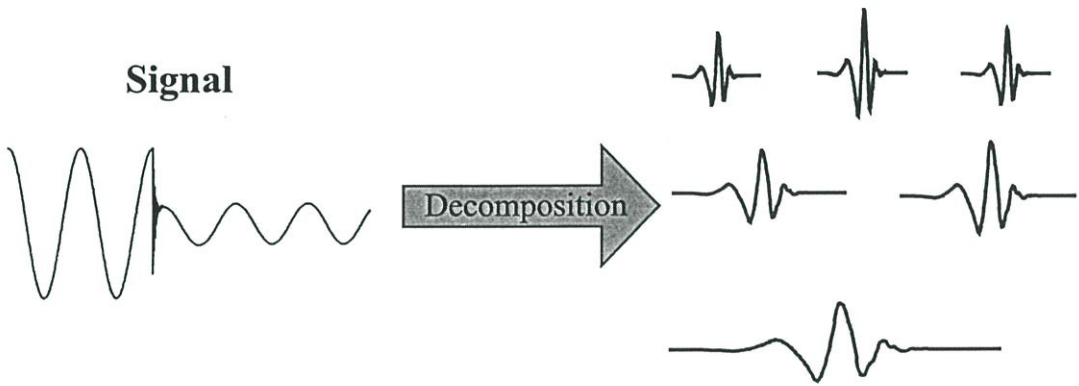
(ก) คุณสมบัติการเปลี่ยนสเกล (Scaling)



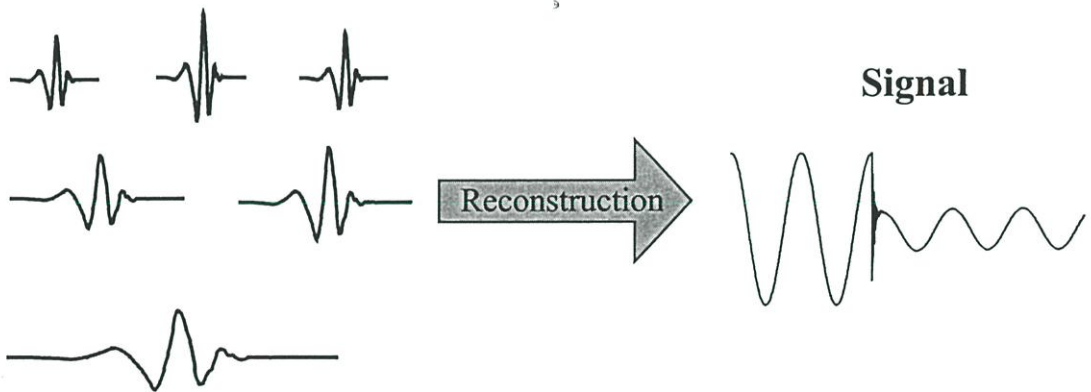
(ข) คุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

รูปที่ 3.7 แสดงคุณสมบัติการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

และเมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่าน้ำหนัก (Weight) อยู่นิ่ง ซึ่งรูปแบบในการแตกกระจายสัญญาณนี้เรียกว่า การกระจายเวฟเล็ต (Wavelet decomposition) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 ในทางกลับกันการรวมกลุ่มของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิมนั้นเรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet reconstruction) ซึ่งก็คือการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse wavelet transform) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงการกระจายสัญญาณสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต



รูปที่ 3.9 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

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

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนี้มีลักษณะการวิเคราะห์สัญญาณโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูง และช่วงในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งก็เป็นการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งสามารถแสดงสมการสำหรับการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ [11]

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

เมื่อ

$f(t)$  = สัญญาณที่ทำการแปลง

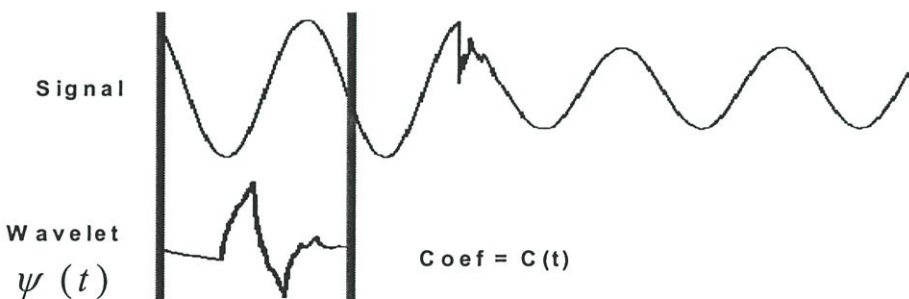
$\psi(t)$  = เวฟเล็ตแม่

$a$  = แพลกเตอร์สเกล (scale)

$b$  = แพลกเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (shifting)

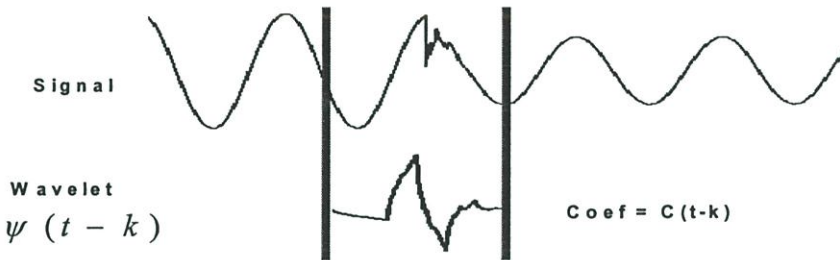
จากสมการที่ 3.7 เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  ซึ่งเป็นเทอมของเวฟเล็ตแม่ที่เทียบได้กับเทอมของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้นเอง แต่เมื่อพิจารณาเทอมของ  $\psi(t)$  จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ได้ดังนี้ [12]

1. นำเวฟเล็ตแม่มาเปรียบเทียบกับส่วนแรกซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณในสเกลแรก



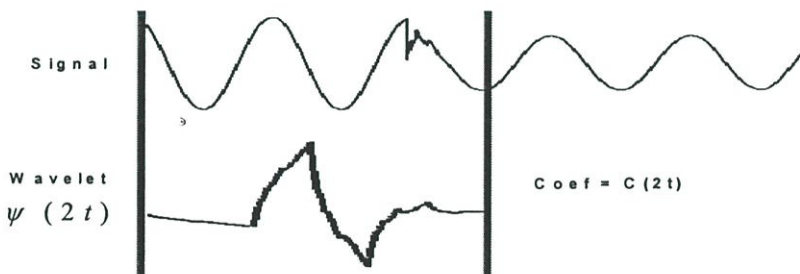
รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของการแปลงเวฟเล็ต

2. จำนวนสัมประสิทธิ์ (C) ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวฟเล็ตแม่ในสเกลแรกกับสัญญาณในส่วนแรก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นอยู่กับการใช้รูปร่างของเวฟเล็ตแม่ด้วย
3. เลื่อนตำแหน่งการวิเคราะห์ไปทางขวาและทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จนกระทั่งครอบคลุมช่วงสัญญาณทั้งหมด ซึ่งจากขั้นตอนที่ 1 - 3 นี้เป็นการแปลงเวฟเล็ตตลอดช่วงสัญญาณในสเกลแรก



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนที่ 3 ของการแปลงเวฟเล็ต

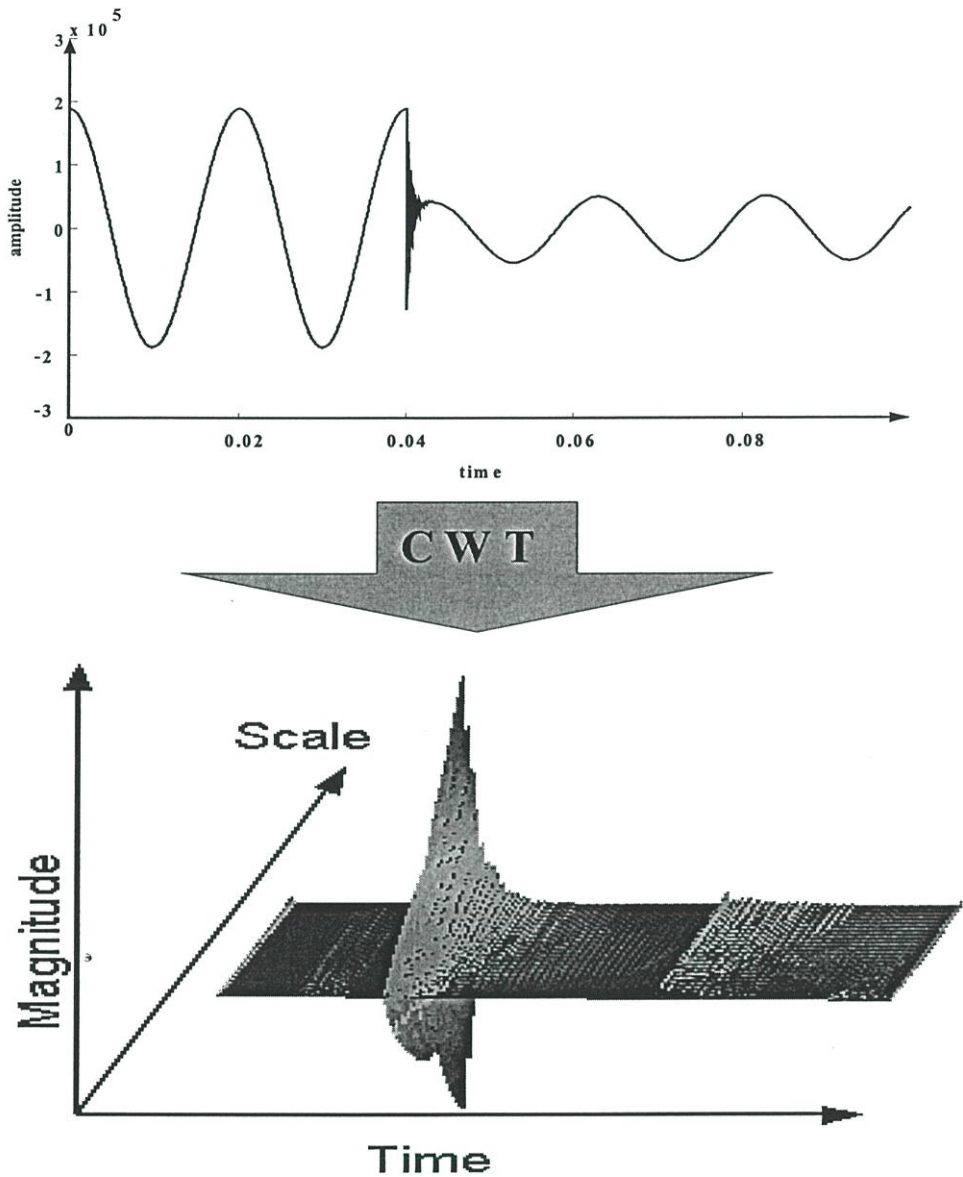
4. เปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์โดยการขยายสเกลและทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ใหม่



รูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ต

5. ทำตามขั้นตอนที่ 1-4 จนกระทั่งครบทุกสเกล

จากขั้นตอนทั้งหมดผลการวิเคราะห์จะออกมาในรูปแบบสัมประสิทธิ์ที่ได้การวิเคราะห์ของแต่ละสเกลในแต่ละส่วนของสัญญาณ และเนื่องจากการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลาและความถี่ (Time - Scale) ได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT)

จากรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะออกมาในรูปแบบของพื้นผิวที่ต่อเนื่องกันซึ่งการปรับเปลี่ยนสเกลในการวิเคราะห์ที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่ที่ดีแต่จะมีข้อเสียคือ ในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็วในการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตต่อเนื่องอาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมากและบางครั้งให้ข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

### 3.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform: DWT) [13]

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยจำเป็นต้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายก่อน

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

การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด คือการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $b$  หลายๆ ตำแหน่งมารวมกันให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุทจริง ซึ่งหลักการของการวิเคราะห์สัญญาณหลายระดับความละเอียดนั้นสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของสเปซเวกเตอร์

##### 3.4.1.1 ทฤษฎีของสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Theory)

ความหมายของสเปซของเวกเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณ คือ สเปซของสัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณพื้นฐานย่อยๆ ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic function)” โดยสมมติว่า  $V$  เป็นสเปซเวกเตอร์ที่มี  $j$  แสดงถึงระดับความละเอียดและจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบขึ้นเป็นฟังก์ชันนั้น ซึ่งถ้า  $j$  มีค่าสูงขึ้นก็แสดงว่าที่ระดับความละเอียดสูงขึ้นและมีจำนวนฟังก์ชันพื้นฐานมากขึ้น ทำให้สัญญาณที่ได้เกิดจากการประกอบกันจากฟังก์ชันมีความละเอียดมากขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า  $j$  เป็นค่าแสดงถึงระดับความละเอียดของสัญญาณนั่นเอง โดยสามารถสรุปคุณสมบัติของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

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

จากการที่ฟังก์ชันพื้นฐาน ประกอบกันเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียด  $j$  ภายในสเปซ  $V$  จะเรียกฟังก์ชันนี้ว่าเป็น “ฟังก์ชันสเกลลิง (Scaling function :  $\Phi(t)$ )” และฟังก์ชันสเกลลิงที่ระดับสูงจะ

มีความถี่สูงและระดับที่ต่ำลงมาจะมีความถี่ที่ต่ำกว่า ตามความสัมพันธ์ที่แสดงในคุณสมบัติข้อที่ 4 : ซึ่งทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันสเกลในสเปซใดๆ ได้ดังนี้

$$\Phi_{j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \Phi(2^j t - k) ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (3.8)$$

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

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \Phi_{j,k}(t) \quad (3.9)$$

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

จากคุณสมบัติข้อ 4 ของ MRA การวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่ำลงมาจะทำให้พลังงานหรือสัญญาณบางส่วนหายไปอยู่อีกสเปซหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ สเปซของเวกเตอร์เวฟเลต (Wavelet vector space :  $W^j$ ) ” ซึ่งจะประกอบด้วยฟังก์ชันพื้นฐานที่เรียกว่า “ ฟังก์ชันเวฟเลต (Wavelet function:  $\psi(t)$ ) ” โดยสามารถเขียนสมการฟังก์ชันเวฟเลตได้ดังต่อไปนี้

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (3.10)$$

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

$$g_j(t) = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t) \quad (3.11)$$

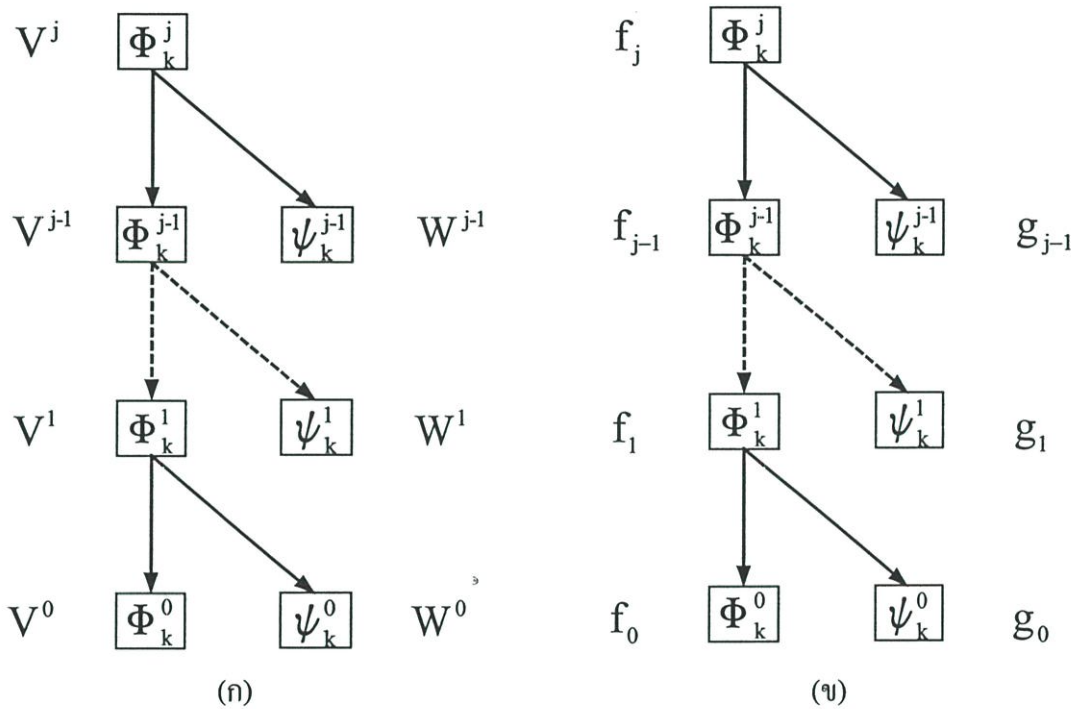
โดยที่  $d_k^j$  เป็นสัมประสิทธิ์หรือนำหนักที่คูณกับฟังก์ชันเวฟเลตที่ตำแหน่งนั้นๆ เพื่อเกิดเป็นสัญญาณ  $g(t)$  ดังนั้นจากความสัมพันธ์  $V^j + W^j = V^{j+1}$  จะได้ว่า

$$f_{j+1} = f_j + g_j \quad (3.12)$$

โดยสมมติให้  $f(t) \in V^{j+1}$  จะสามารถแตกกระจายให้  $f(t)$  ให้มีความละเอียดน้อยลงได้จาก ความสัมพันธ์ของ  $V^j + W^j = V^{j+1}$  ในขณะเดียวกัน  $V^j$  สามารถแตกต่อไปอีกได้เรื่อยๆจนกระทั่ง  $j = 0$  ดังนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ว่า

$$V^{j+1} = V^0 + W^0 + W^1 + \dots + W^j \quad (3.13)$$

ในทำนองเดียวกัน  $f_{j+1} = f_j + g_j$  สามารถแตกกระจายเป็น  $f_j$  และ  $g_j$  ได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจาย (Decomposition) [13] ของ

(ก) สเปซของเวกเตอร์

(ข) สัญญาณที่ความละเอียดต่างๆ

ดังนั้นสามารถแสดงลักษณะของสัญญาณ  $f(t)$  ในรูปของฟังก์ชันสเกลลิงและฟังก์ชันเวฟเล็ต ได้ดังนี้

$$f(t) = f_j + g_j + g_{j+1} + g_{j+2} + \dots + g_\infty \quad (3.14)$$

รูปแบบการแตกกระจายสัญญาณ  $f(t)$  ใดๆ ในสเปซ  $V^0$  ไปจนถึงระดับความละเอียดที่  $j$  ในรูปของสัมประสิทธิ์  $c_j(m)$  และ  $d_j(m)$  นี้เรียกว่า “ การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform :DWT) ” โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [14]

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (3.15)$$

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

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้นสมการที่ (14) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (15) [14]

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (3.16)$$

เมื่อ  $m, n, k$  เป็นเลขจำนวนเต็มโดยที่  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูล  
 $m$  คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล  
 $k$  คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ( $a_0 = 2; b_0 = 1$ ) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้ [15]

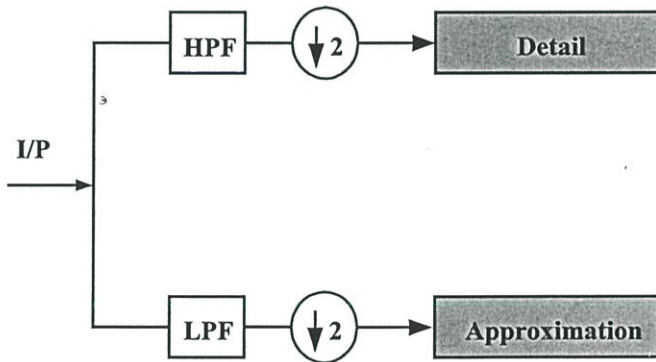
$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k 2^m}{2^m}\right] \quad (3.17)$$

ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์เบงค์ดังนี้

### 3.4.2 การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis)

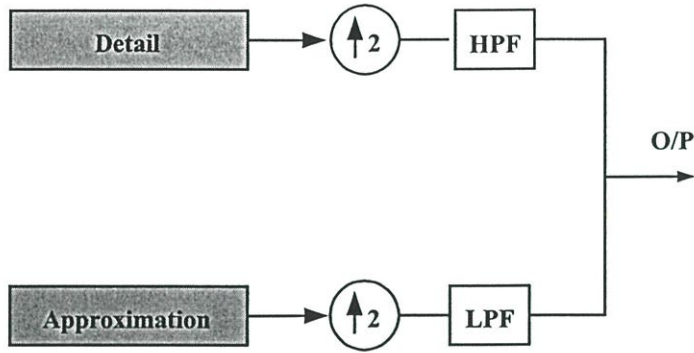
ก่อนที่จะอธิบายการสร้างการแปลงเวฟเล็ตในลักษณะฟิลเตอร์แบงก์นั้น ขออธิบายหลักการพื้นฐานของฟิลเตอร์แบงก์ก่อน ฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณ (Two channel filter banks) จะเป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของความถี่ต่ำและส่วนของความถี่สูงสัญญาณ โดยจะถูกวิเคราะห์ด้วยคู่ชุดกรองซึ่งมีการลดความถี่ออกมารั้งหนึ่งดังรูปที่ 3.15 ซึ่งเทอมของ  $\downarrow 2$  แสดงการลดอัตราสุ่มลง (down sampling) ด้วย 2 หรือลดผลการวิเคราะห์จากตัวกรองออกมารั้งหนึ่งในแต่ละขั้นตอนของการวิเคราะห์ เมื่อนำสัญญาณอินพุตมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสัญญาณจะถูกแยกองค์ประกอบ (Decomposition) โดยตัวกรองแบบ 2 ช่อง (Two channel filter banks) ซึ่งจะแยกความถี่ในแบนด์ที่ต้องการ ออกเป็น 2 ส่วน คือ

- องค์ประกอบความถี่สูง ซึ่งจะผ่านตัวกรองความถี่สูง (High-Pass Filter: HPF) ที่เรียกว่า “Detail (cD)”
- องค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งจะผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter: LPF) ที่เรียกว่า “Approximation (cA)”



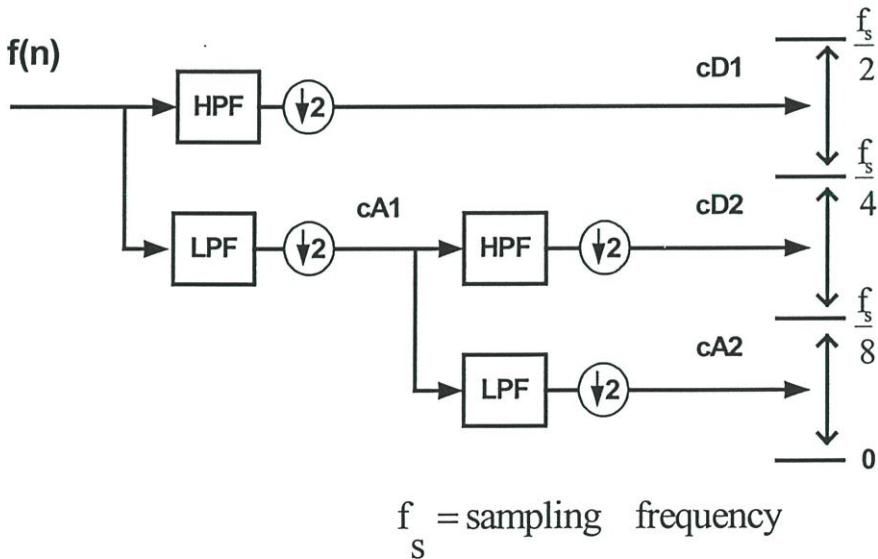
รูปที่ 3.15 แสดงการแปลงแยกสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ [15]

และในทางกลับกันก็สามารถสังเคราะห์เพื่อสร้างกลับฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณโดยการนำส่วนของความถี่ต่ำและความถี่สูงมารวมกันเป็นสัญญาณเดิมได้ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 จะสังเกตได้ว่าเทอม  $\uparrow 2$  แสดงการเพิ่มอัตราสุ่มขึ้น (Upsampling) เป็น 2 เท่า



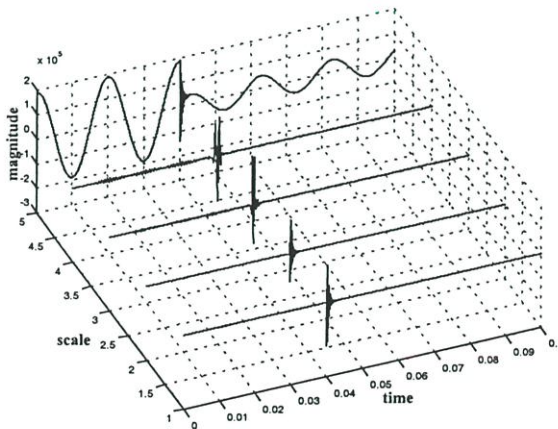
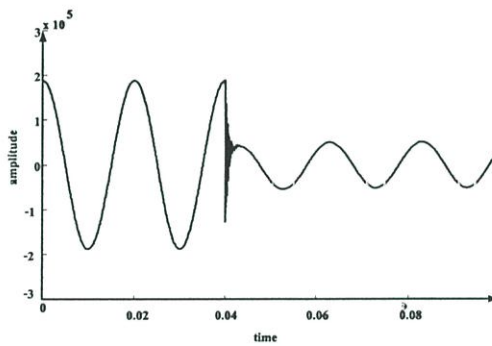
รูปที่ 3.16 แสดงการแปลงกลับสัญญาณด้วยฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ [15]

ลักษณะของตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณในลักษณะนี้เรียกว่า “Quadrature mirror filters (QMF)” ในลักษณะของ dyadic wavelet transform จะเป็นการนำฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณมาเรียงต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนความถี่ต่ำมาทำการแยกความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave analysis filter banks) โดยที่แต่ละขั้นตอนจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละ 2 เท่า ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเลตโดยใช้หลักการของวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ [15]

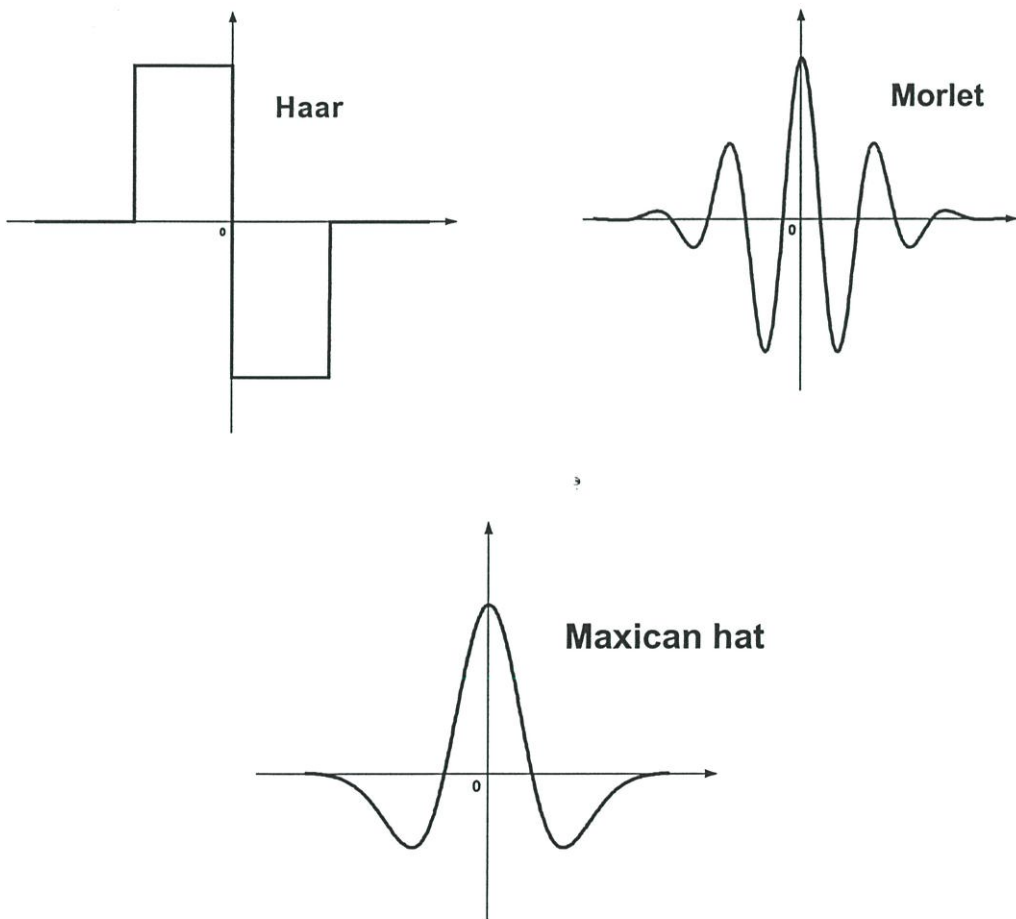
จากรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นลักษณะของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในลักษณะของ dyadic tree structure โดยมีสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วยความถี่การสุ่ม =  $f_s$  (sampling rate) จะถูกวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์ 2 ช่องสัญญาณในสเกลที่ 1 ( $2^1$ ) ซึ่งสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 2 ช่วงความถี่ คือส่วนความถี่สูงหรือ detail 1 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{4}$  Hz และส่วนความถี่ต่ำ หรือ Approximation 1 มีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - 0$  Hz และในการวิเคราะห์ในสเกลที่ 2 ( $2^2$ ) ก็ทำได้โดยการคูณกรองหาค่าเดิมมาวิเคราะห์ต่อจาก Approximation 1 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะออกมาเป็น ส่วนความถี่สูง สเกลที่ 2 หรือ detail 2 ซึ่งมีความถี่ในช่วง  $\frac{f_s}{4} - \frac{f_s}{8}$  Hz และส่วนความถี่ต่ำสเกลที่ 2 หรือ Approximation 2 มีความถี่อยู่ในช่วง  $\frac{f_s}{8} - 0$  Hz ถ้าทำการวิเคราะห์ต่อในสเกลที่ 3 ก็สามารถทำซ้ำใน ลักษณะเดิม ในทางกลับกันก็สามารถที่จะรวมสัญญาณที่ทำการกระจายในหลายๆ ช่วงความถี่ให้กลับมา เป็นสัญญาณเดิมได้ ซึ่งผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.18



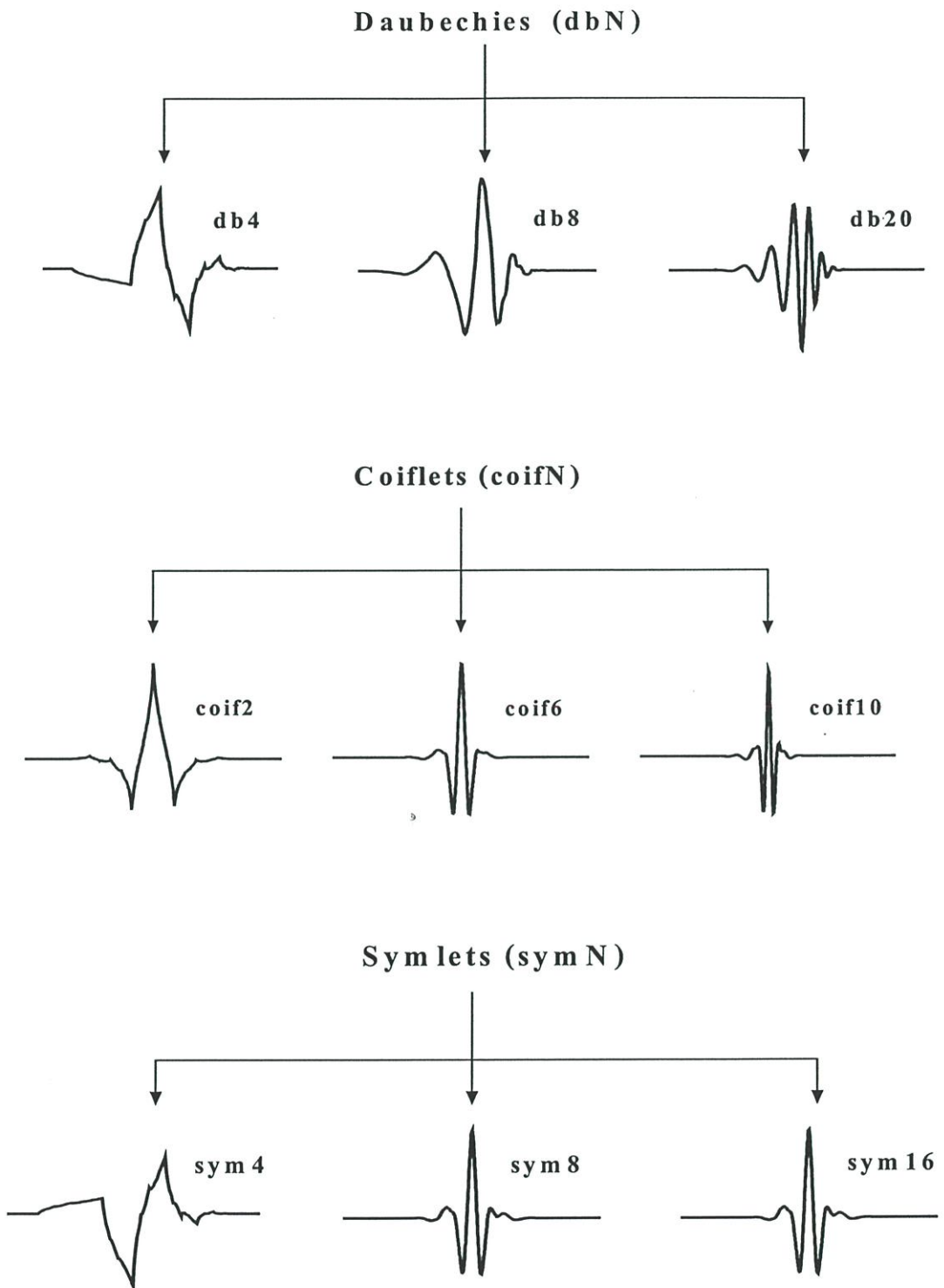
รูปที่ 3.18 แสดงการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ในสเกลที่ 1-4

### 3.5 เวฟเล็ตแม่ (Mother wavelet)

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆ ก็ตามนอกจากการเลือกรูปแบบในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้ว ยังมีความจำเป็นที่ต้องเลือกลักษณะของตัวกรองสัญญาณนั้นๆ ให้เหมาะสมด้วย สำหรับการแปลงเวฟเล็ตนั้นตัวกรองสัญญาณที่ใช้คือเวฟเล็ตแม่นั้นเอง ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและแต่ละแบบยังมีชนิดย่อยๆ ลงไปอีก และเนื่องจากรูปแบบของเวฟเล็ตแม่ที่หลากหลายนี้เองจึงทำให้การแปลงเวฟเล็ตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเลือกเวฟเล็ตแม่ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่การวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของเวฟเล็ตแม่ได้ดังรูปที่ 3.19 - 3.20



รูปที่ 3.19 แสดงเวฟเล็ตแม่แบบไม่มีชนิดย่อย



รูปที่ 3.20 แสดงเวฟเลตแม่แบบมีขนาดย่อย

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

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

จากรูปที่ 3.20 ค่า  $N$  เป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่แสดงถึงลำดับ (Order) ของเวฟเล็ตแม่ชนิดนั้นๆ ในบางครั้งได้มีความจำกัดความว่า  $N$  เป็นตัวเลขที่ใช้แสดงจำนวนของสัมประสิทธิ์ตัวกรอง (Filter) ของเวฟเล็ตแม่ตัวนั้นๆ และยังคงแสดงความราบเรียบ(Smooth) ของเวฟเล็ตแม่ตัวนั้นๆ อีกด้วย เช่น db4 หมายถึงเวฟเล็ตแม่แบบ daubechies ที่มีสัมประสิทธิ์การกรอง 4 ตัว, db20 หมายถึงเวฟเล็ตแม่แบบ Daubechies ที่มีสัมประสิทธิ์การกรอง 20 ตัว โดยที่ db20 จะมีรูปร่างที่ราบเรียบกว่า db4 ซึ่งค่าของสัมประสิทธิ์ได้แสดงในตารางที่ 3.1

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสในหม้อแปลงกำลังเพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดกระแสอินรัชและการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงนั้นๆ โดยทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่ต่ำจากสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์และแปลความหมายต่อไป และสำหรับการเลือกเวฟเล็ตนั้นได้เลือกพิจารณาเปรียบเทียบจากเวฟเล็ต 15 ชนิด ซึ่งมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น ฟอลต์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี [17] เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของเวฟเล็ตที่มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตดังกล่าว ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงเวฟเล็ตแม่ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย

ตระกูล \ ชนิด	Daubechies	Symlets	Coiflets
2	Daubechies 2	Symlets 2	Coiflets 2
4	Daubechies 4	Symlets 4	Coiflets 4
6	Daubechies 6	Symlets 6	Coiflets 6
8	Daubechies 8	Symlets 8	Coiflets 8
10	Daubechies 10	Symlets 10	Coiflets 10

ขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตเพื่อวิเคราะห์สัญญาณ [18] จะแบ่งการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet decomposition) ออกเป็น 2 ส่วน คือ องค์ประกอบความถี่สูง (Detail) และองค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation) โดยองค์ประกอบความถี่สูงจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และหาตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้กำหนดจุดเริ่มต้นการวิเคราะห์ต่อไป ในส่วนองค์ประกอบความถี่ต่ำจะถูกนำมาประมวลผลโดยอาศัยตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ เพื่อกำหนดช่วงข้อมูลการวิเคราะห์  $1/4$  ไซเคิล และระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ต่อไป โดยที่รายละเอียดทั้งหมดจะได้กล่าวอยู่ในบทที่ 4

## บทที่ 4

### การจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์

ในการศึกษาพฤติกรรมของกระแสอินรัชและฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ซึ่งทั้งสองปรากฏการณ์นี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงอย่างฉับพลัน ในขณะที่การเกิดกระแสอินรัชถือเป็นเรื่องปกติเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ฟอลต์เป็นสิ่งที่ผิดปกติในระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดขึ้นจะสร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าและจะขยายความเสียหายต่อไปจนกว่าระบบป้องกันไฟฟ้าจะสามารถตรวจจับและสั่งปลดวงจรที่เกิดฟอลต์ออกไปได้ ดังนั้นจึงเรื่องที่มีความสำคัญในการที่จะพัฒนาระบบป้องกันไฟฟ้าให้มีความสามารถในการตรวจจับและจำกัดฟอลต์ให้อยู่ในวงจรที่แคบที่สุด นอกจากนี้จะต้องไม่ทำงานสั่งปลดวงจรไฟฟ้าที่ไม่มีความผิดปกติ เช่น กรณีเกิดกระแสอินรัช เป็นต้น

#### 4.1 เงื่อนไขการจำลอง

การจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้ พยายามอ้างอิงตามลักษณะหม้อแปลงกำลังของอุตสาหกรรมในประเทศที่มีใช้กันมากที่สุดในระบบส่งและจำหน่าย พร้อมทั้งทำการสมมติเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นตามเงื่อนไขในระบบไฟฟ้า (Power network) และอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เช่น เวลาในการสับและปลดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่พร้อมกันทั้ง 3 เฟส เป็นต้น โดยสามารถสรุปเงื่อนไขการจำลองนี้ได้ดังนี้

##### 4.1.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า

ในความเป็นจริงแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้า แน่แน่นอนว่าขณะจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่ โดยที่แหล่งจ่ายไม่มีกำลังเพียงพอจะทำให้แรงดันในแหล่งกำเนิดไฟฟ้านั้นลดลง แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เน้นพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงกำลัง ดังนั้นหากนำตัวแปรของแหล่งกำเนิดมารวมเข้ากับระบบไฟฟ้า นอกจากจะทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อนแล้ว ยังอาจจะทำให้ผลการวิเคราะห์เบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็น จึงสมมติให้แหล่งกำเนิดที่จ่ายกำลังให้กับหม้อแปลงทดสอบเป็น แหล่งกำเนิด 3 เฟสแบบอนันต์ (Definite Bus) [19]

##### 4.1.2 ชนิดของหม้อแปลงทดสอบ

จากการศึกษาพบว่าหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายและระบบส่งจ่ายในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้หม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ (Vector group) Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับ โดยข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของหม้อแปลงทั้ง 2 ชนิด [20,21] เป็นดังนี้

### หม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11

พิกัดแรงดัน ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	33/11.7 kV
การต่อขดลวด	Dyn11
พิกัดกำลัง	16 MVA
ค่าสูญเสียการกระตุ้น	40.5 kW
กระแสกระตุ้น	0.95 %
ค่าสูญเสียการลัดวงจร ปฐมภูมิ-ทุติยภูมิ	86 kW
ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก ปฐมภูมิ-ทุติยภูมิ	9.6 %

### หม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0

พิกัดแรงดัน ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ/ตติยภูมิ	230/121/22 kV
การต่อขดลวด	Ydyn0
พิกัดกำลัง	200 MVA (50 MVA ตติยภูมิ)
ค่าสูญเสียการกระตุ้น	40.5 kW
กระแสกระตุ้น	0.067 %
ค่าสูญเสียการลัดวงจร ปฐมภูมิ-ทุติยภูมิ	682.7 kW
ปฐมภูมิ-ตติยภูมิ	168.1 kW
ทุติยภูมิ-ตติยภูมิ	170.1 kW
ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก ปฐมภูมิ-ทุติยภูมิ	15.29 %
ปฐมภูมิ-ตติยภูมิ	68.96 %
ทุติยภูมิ-ตติยภูมิ	49.07 %

#### 4.1.3 มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Switching Angle)

เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น เมื่อขนาดของแรงดันเป็นศูนย์ กระแส ณ ตำแหน่งนั้นจะไม่ใช่ศูนย์ ดังนั้นขณะมุมของแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่สวิทช์ซึ่งเปลี่ยนไป ขนาดของกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นก็มีค่าเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ในการจำลองนี้สมมติให้มุมของแรงดันไฟฟ้าขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ เปลี่ยนแปลงทุกๆ 45 องศาไฟฟ้า เริ่มตั้งแต่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  และ  $315^\circ$  ตามลำดับ

#### 4.1.4 เวลาในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่พร้อมกันทั้ง 3 เฟส

ในทางปฏิบัติจะพบว่าแทบไม่มีโอกาสเลยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง 3 เฟสจะสับในเวลาเดียวกัน [22,23] ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขณะเซอร์กิตเบรกเกอร์สับไม่พร้อมกัน คือกระแสในสายส่งขณะเริ่มสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สมดุล ซึ่งอาจจะทำให้รีเลย์ป้องกันที่อาศัยการตรวจจับการเปลี่ยน

แปลงกระแสทรานเซียนต์ในช่วงเวลาสั้นๆ ทำงานผิดพลาดได้ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเพื่อหาวิธีการแบ่งแยกกระแหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยพื้นฐานของสัญญาณทรานเซียนต์ (Transients based algorithm) จึงขอกำหนดให้เวลาในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ระหว่างการสับครั้งแรกกับครั้งที่ 2 และการสับครั้งที่ 2 กับครั้งที่ 3 คือ 1 และ 2 ms ตามลำดับ และได้ว่ากรณีการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เข้าไม่พร้อมกันมี 6 กรณี คือ

- 1) สับ Ph.A เว้นช่วง 1 ms สับ Ph.B เว้นช่วง 2 ms สับ Ph.C เรียกย่อว่า A (+1ms) B (+2ms) C
- 2) สับ Ph.A เว้นช่วง 1 ms สับ Ph.C เว้นช่วง 2 ms สับ Ph.B เรียกย่อว่า A (+1ms) C (+2ms) B
- 3) สับ Ph.B เว้นช่วง 1 ms สับ Ph.A เว้นช่วง 2 ms สับ Ph.C เรียกย่อว่า B (+1ms) A (+2ms) C
- 4) สับ Ph.B เว้นช่วง 1 ms สับ Ph.C เว้นช่วง 2 ms สับ Ph.A เรียกย่อว่า B (+1ms) C (+2ms) A
- 5) สับ Ph.C เว้นช่วง 1 ms สับ Ph.A เว้นช่วง 2 ms สับ Ph.B เรียกย่อว่า C (+1ms) A (+2ms) B
- 6) สับ Ph.C เว้นช่วง 1 ms สับ Ph.B เว้นช่วง 2 ms สับ Ph.A เรียกย่อว่า C (+1ms) B (+2ms) A

#### 4.1.5 ชนิดของฟอลต์

ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงระบบ 3 เฟส มีทั้งหมด 11 กรณี โดยแบ่งออกเป็น ฟอลต์ระหว่างเฟส-กราวด์ 7 กรณี คือ A-N, B-N, C-N, AB-N, BC-N, CA-N, ABC-N และ ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟสอีก 4 กรณี คือ A-B, B-C, C-A, A-B-C

#### 4.1.6 โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

สามารถกล่าวได้ว่าเกือบทั้งหมดของหม้อแปลงจะจ่ายโหลดที่เป็นชนิดตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นในการจำลองนี้จะกำหนดให้หม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ต่อโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 MVA P.f. = 0.7 และหม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ต่อโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 93.6 MVA P.f. = 0.7

## 4.2 การจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในโซนป้องกันหม้อแปลง

ในการจำลองนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ การจำลองกระแสอินรัช, การจำลองการเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง และการจำลองเมื่อหม้อแปลงเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ ซึ่งหมายความว่า จะเกิดทั้งสภาวะกระแสอินรัชและฟอลต์ขึ้นพร้อมกัน

### 4.2.1 การจำลองกระแสอินรัช

ในการจำลองหม้อแปลงทดสอบจะถูกจ่ายไฟทางด้านปฐมภูมิขณะไม่มีโหลดเหมือนสภาพการใช้งานจริง ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลพุ่งเข้าหม้อแปลง ที่เรียกว่ากระแสอินรัช ดังนั้นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสอินรัช เริ่มตั้งแต่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า, อุปกรณ์ตัดต่อ และหม้อแปลงกำลัง เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการจำลองสามารถสรุปกรณีศึกษาได้ดังนี้

▪ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ชนิด 3 เฟส แบบอนันต์	1 แหล่งกำเนิด
▪ มุมของแรงดันขณะสับเซอร์กิตเบรกเกอร์	8 มุม
▪ เวลาที่ไม่เท่ากันในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์	6 กรณี
▪ แบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ (Ydyn0, Dyn11)	2 ชนิด

ดังนั้นรวมกรณีศึกษาเกี่ยวกับการเกิดกระแสอินรัชทั้งสิ้น 96 กรณีศึกษา

#### 4.2.2 การจำลองฟอลต์ภายในโชนป้องกันหม้อแปลง

การจำลองหม้อแปลงทดสอบจะจ่ายโหลดอยู่ในสภาวะปกติ (Steady state) จากนั้นจึงสมมติให้เกิดฟอลต์ทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง เพื่อป้องกันหม้อแปลงเสียหายและระบบไฟฟ้าขัดข้อง อุปกรณ์ป้องกันจะต้องตรวจจับฟอลต์นี้ได้พร้อมทั้งส่งปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ระหว่างหม้อแปลงเพื่อจำกัดความเสียหาย ตามปรัชญาของระบบป้องกันไฟฟ้า ดังนั้นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟอลต์ในโชนป้องกันหม้อแปลง คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า, โหลดที่ต่ออยู่กับหม้อแปลง, ชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้น และหม้อแปลงกำลัง โดยสามารถสรุปกรณีศึกษาได้ดังนี้

▪ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ชนิด 3 เฟส แบบอนันต์	1 แหล่งกำเนิด
▪ โหลดที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงทดสอบชนิด RL	1 ประเภท
▪ มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์	8 มุม
▪ ชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง	11 กรณี
▪ แบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ (Ydyn0, Dyn11)	2 ชนิด

ดังนั้นรวมกรณีศึกษาเกี่ยวกับการเกิดฟอลต์ภายใน โชนป้องกันหม้อแปลงทั้งสิ้น 176 กรณีศึกษา

#### 4.2.3 การจำลองเมื่อหม้อแปลงเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ

การจำลองนี้จะสมมติให้เกิดฟอลต์ขึ้นพร้อมกับกระแสอินรัช โดยที่ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีการลัดวงจรเกิดขึ้นอยู่ก่อนที่จะมีจ่ายไฟ ดังนั้นเมื่อจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงทดสอบทางฝั่งปฐมภูมิจึงเกิดสภาวะดังกล่าวขึ้น โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องจะรวมทั้งกรณีเกิดกระแสอินรัชเพียงอย่างเดียวและฟอลต์ภายใน โชนเข้าด้วยกัน สามารถสรุปกรณีศึกษาได้ดังนี้

▪ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ชนิด 3 เฟส แบบอนันต์	1 แหล่งกำเนิด
▪ เวลาที่ไม่เท่ากันในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์	6 กรณี
▪ มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์	8 มุม
▪ ชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง	11 กรณี
▪ แบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ (Ydyn0, Dyn11)	2 ชนิด

ดังนั้นรวมกรณีศึกษาเกี่ยวกับการเกิดฟอลต์ขึ้นพร้อมกับกระแสอินรัชทั้งสิ้น 1,056 กรณีศึกษา

ถึงแม้ว่าการศึกษาหาวิธีการตรวจจับฟอลต์ขณะที่หม้อแปลงเกิดฟอลต์จะจ่ายไฟซึ่งมีผลของกระแสอินรัสมอนิกลำดับที่ 2 และ 5 ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของกระแสอินรัสนอนอาจจะทำให้เวลาที่ใช้สั่งปลดวงจรนานเกินไป แต่เมื่อเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดฟอลต์จ่ายไฟมีความเป็นไปได้ยากกว่าการเกิดฟอลต์ขณะที่หม้อแปลงมีการใช้งานอยู่ เนื่องจากก่อนการจ่ายไฟทุกครั้งจะมีการตรวจสอบสภาพความพร้อมทั้งของหม้อแปลงและระบบไฟฟ้าเป็นอย่างดี ดังนั้นเพื่อที่จะคงไว้ซึ่งประโยชน์ในการศึกษากรณีดังกล่าว รวมทั้งปรับสัดส่วนของกรณีศึกษาสำหรับกรณีเกิดฟอลต์พร้อมกับกระแสอินรัสมอนิกให้เหมาะสมกับกรณีศึกษาสำหรับกรณีเกิดฟอลต์เพียงอย่างเดียว จึงพิจารณาเลือกลดสมมุติฐานของเวลาที่ไม่เท่ากันในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้เหลือเพียงกรณีเดียว คือ A (+1ms) B (+2ms) C ดังนั้นสามารถสรุปกรณีศึกษาใหม่ได้ดังนี้

- |   |    |             |
|---|----|-------------|
| ▪ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ชนิด 3 เฟส แบบอนันต์                 | 1  | แหล่งกำเนิด |
| ▪ เวลาที่ไม่เท่ากันในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ [A>B>C] | 1  | กรณี        |
| ▪ มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์                              | 8  | มุม         |
| ▪ ชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง    | 11 | กรณี        |
| ▪ แบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ (Ydyn0, Dyn11)                  | 2  | ชนิด        |

ดังนั้นรวมกรณีศึกษาเกี่ยวกับการเกิดฟอลต์ขึ้นพร้อมกับกระแสอินรัสมอนิกทั้งสิ้น 176 กรณีศึกษา

สรุปกรณีศึกษาในทุกกรณีได้ดังนี้

- |   |     |           |
|---|-----|-----------|
| 1. การเกิดกระแสอินรัสมอนิก                  | 96  | กรณีศึกษา |
| 2. การเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกันหม้อแปลง      | 176 | กรณีศึกษา |
| 3. การเกิดฟอลต์ขึ้นพร้อมกับกระแสอินรัสมอนิก | 176 | กรณีศึกษา |

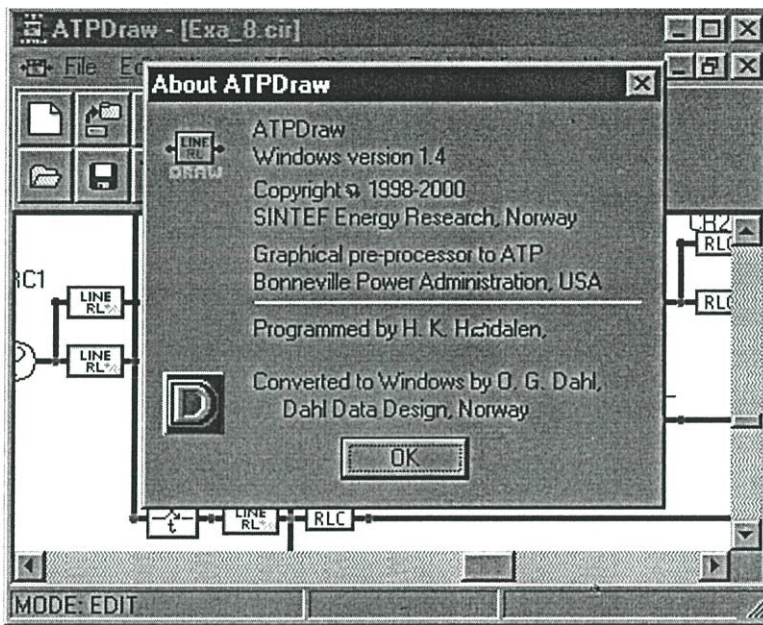
รวมกรณีศึกษาในทุกกรณีเท่ากับ 448 กรณีศึกษา

### 4.3 โปรแกรม ATPDraw [24,25]

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดกระแสอินรัสมอนิกและฟอลต์ภายในหม้อแปลงกำลัง โดยอาศัยโปรแกรม ATPDraw for Windows version 1.4 (ดังรูปที่ 3.1) ที่ได้รับการพัฒนามากจากโปรแกรม ATP/EMTP หรือ Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program ซึ่งช่วยในการสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป โปรแกรมนี้มีการใช้งานและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีความเหมาะสมในด้านการจำลองแบบดิจิทัลสำหรับปรากฏการณ์ทรานเซียนต์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และให้ผลการตอบสนองเหมือนกับปรากฏการณ์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของจริงในระบบไฟฟ้า [26,27]

ตัวอย่างแบบจำลองในระบบไฟฟ้าที่ออกแบบโดยโปรแกรม ATPDraw มีดังนี้

- กลุ่มอุปกรณ์มาตรฐาน เช่น Linear branches, Non-linear branches, แบบจำลองสายตัวนำ, สวิตช์, แหล่งกำเนิด, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น
- กลุ่มอุปกรณ์ออกแบบพิเศษ เช่น 6-phase thyristor bridge with control, 3-phase J-Marti model overhead line เป็นต้น
- กลุ่มของสายส่ง เช่น สายส่งเหนือหัว (Overhead line) และ สายเคเบิล

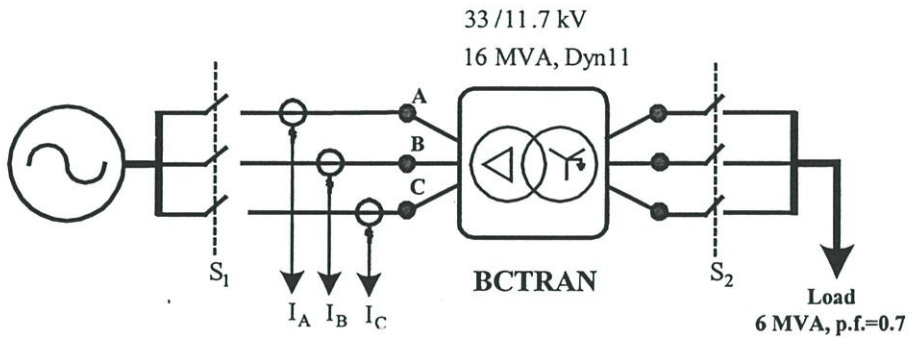


รูปที่ 4.1 โปรแกรม ATPDraw for Windows version 1.4

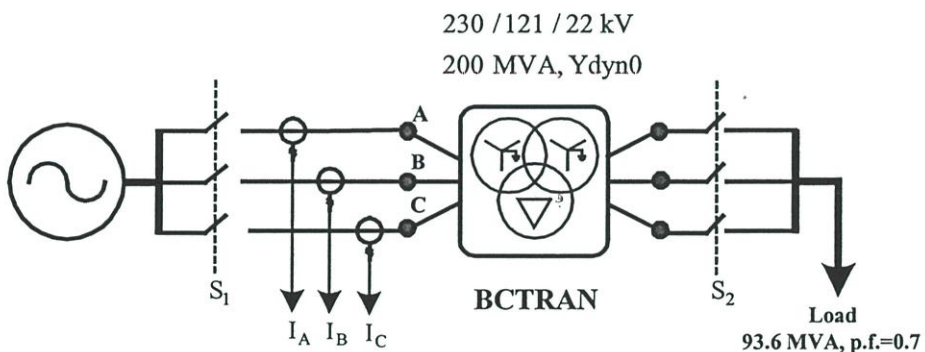
สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ แบบจำลองหม้อแปลง BCTRAN ซึ่งได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถใช้ในการจำลองเพื่อศึกษาผลตอบสนองทางพฤติกรรมของกระแสน้ำวนที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงกำลังได้ดี โดยคุณสมบัติของแบบจำลองนี้จะประกอบด้วย ขดลวด 3 ขด คือ ขดปฐมภูมิ, ขดทุติยภูมิ และขดตติยภูมิ [24-27]

#### 4.4 แบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ

จากเงื่อนไขการจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์ภายใน โชนป้องกันหม้อแปลง สามารถกำหนดรูปแบบวงจรในการทดลองได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในวงจรทดสอบ



รูปที่ 4.3 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ในวงจรทดสอบ

จากหม้อแปลงทดสอบทางฝั่งปฐมภูมิต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์  $S_1$  และทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบต่ออยู่กับโหลด RL ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์  $S_2$  โดยที่หม้อแปลงกระแสต่ออยู่ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลง

##### 4.4.1 การจำลองกระแสอินรัช

หม้อแปลงทดสอบอยู่ในสภาพไม่จ่ายไฟ ทั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์  $S_1$  และ  $S_2$  อยู่ในตำแหน่งเปิด ต่อมาในวินาทีที่ 0.0725 ms เซอร์กิตเบรกเกอร์ A ถูกปิดลง เพื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงทดสอบ สำหรับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะถูกตรวจจับผ่านหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงทดสอบ

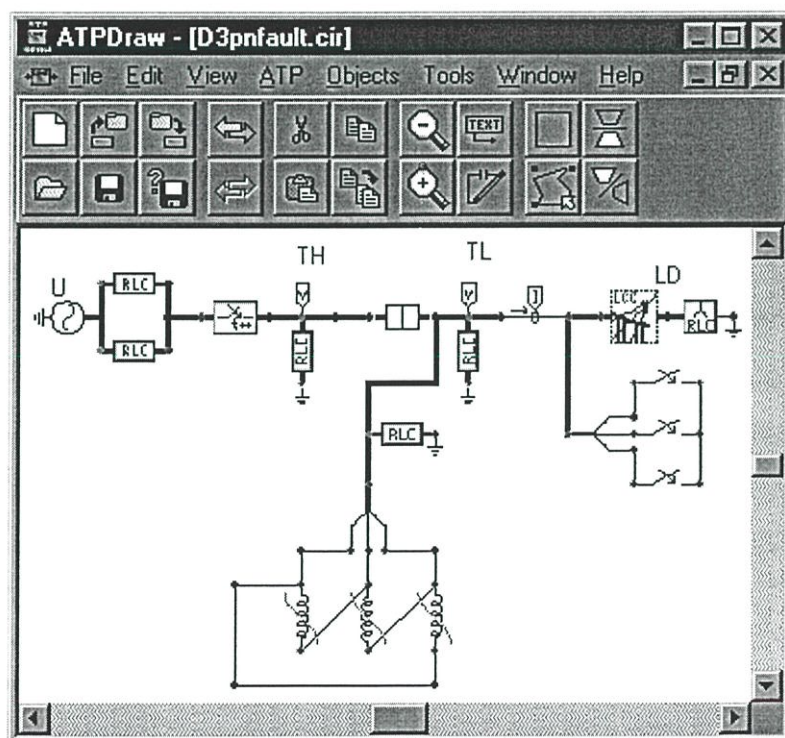
#### 4.4.2 การจำลองฟอลต์ภายในโซนป้องกันหม้อแปลง

หม้อแปลงทดสอบอยู่ในสภาพจ่ายไฟให้กับโหลด RL ในสถานะคงตัว (Steady State) โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง S1 และ S2 อยู่ในตำแหน่งปิด ต่อมาในวินาทีที่ 0.0725 ms เกิดการลัดวงจรทางฝั่งทุติยภูมิในแบบต่างๆ สำหรับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะถูกตรวจจับผ่านหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงทดสอบ

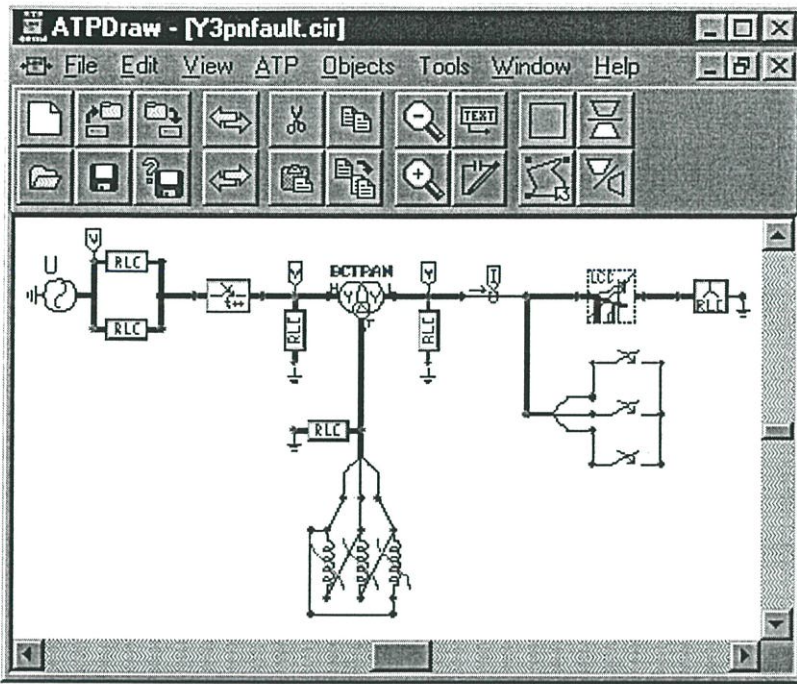
#### 4.4.3 การจำลองเมื่อหม้อแปลงเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ

หม้อแปลงทดสอบอยู่ในสภาพไม่จ่ายไฟ โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง S1 และ S2 อยู่ในตำแหน่งเปิด ในขณะเดียวกันทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบเกิดการลัดวงจร (แบบต่างๆ) จากนั้นเมื่อเวลา 0.0725 ms เซอร์กิตเบรกเกอร์ S1 ถูกปิดลง เพื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงทดสอบ สำหรับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะถูกตรวจจับผ่านหม้อแปลงกระแสที่ต่ออยู่ทั้งสองฝั่งของหม้อแปลงทดสอบ

จากวงจรการต่อหม้อแปลงทดสอบในรูปที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองการทดสอบในโปรแกรม ATPDraw ได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ขนาด 16 MVA พิกัดแรงดัน 33/11.7 kV ในโปรแกรม ATPDraw [24,25]



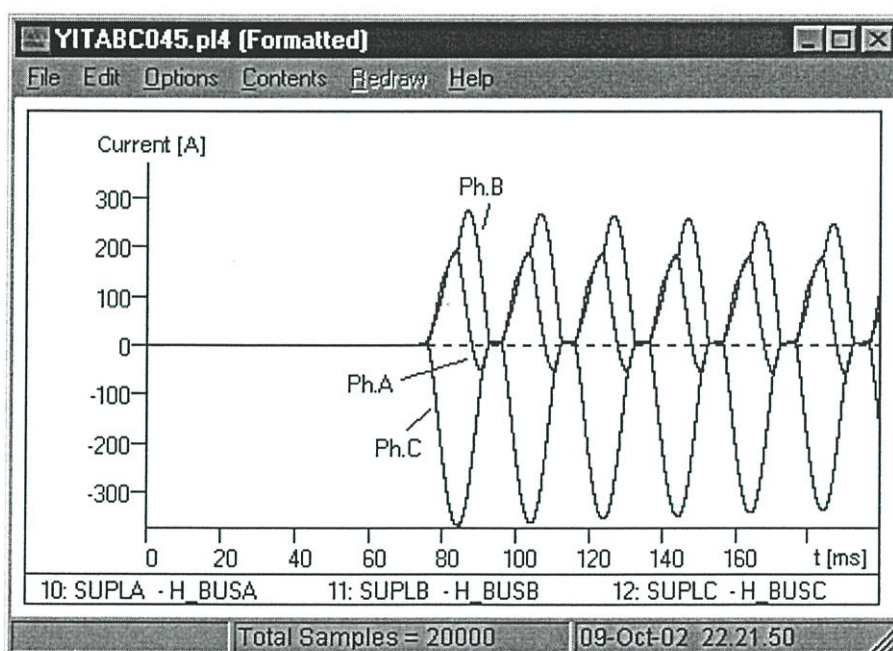
รูปที่ 4.5 แสดงการต่อแบบจำลองหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ขนาด 200 MVA พิกัดแรงดัน 230/121/22 kV ใน โปรแกรม ATPDraw

## 4.5 ผลการจำลอง

### 4.5.1 กรณีเกิดกระแสอินรัช

รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสอินรัช ที่ได้จากการจำลองผ่านหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV สังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่งเวลา 0.0725 ms มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสเป็นอย่างมาก และลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งที่สังเกตได้ชัดก็คือ ลักษณะของสัญญาณกระแสในเวลาต่อมา มีลักษณะเป็นสัญญาณคาบซึ่งมีความถี่ของช่วงคาบเป็น 2 เท่าของสัญญาณรูปคลื่นชานน์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์กระแส ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนคาบจะมีค่าเป็นศูนย์อยู่ชั่วขณะก่อนการเปลี่ยนแปลงครั้งใหม่

หมายเหตุ เงื่อนไขการจำลอง คือ มุมในการสวิตซ์ซึ่งเท่ากับ  $45^\circ$  ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่สับเข้าไม่พร้อมกันเรียงลำดับ เป็น A (1ms) B (2ms) C.

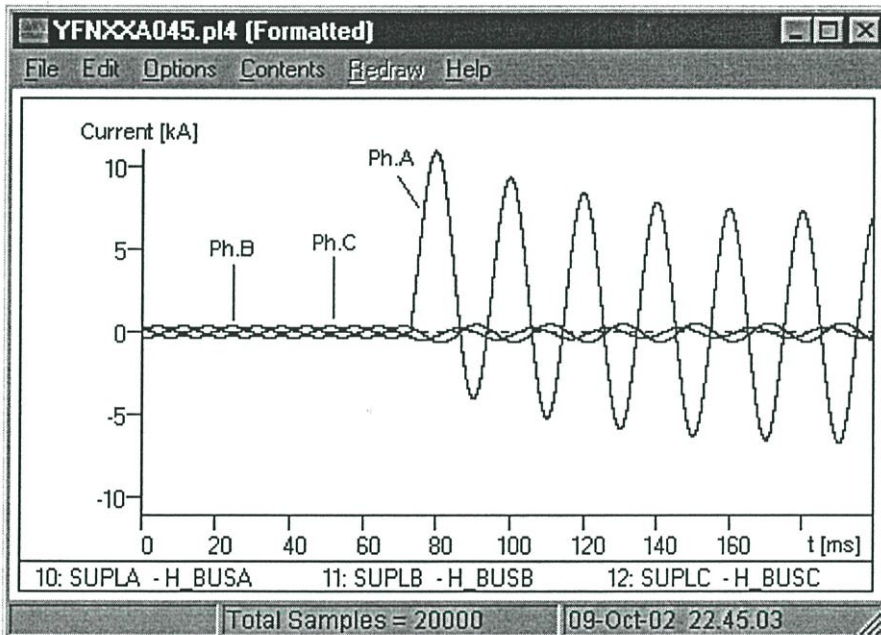


รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตซ์ซึ่ง  $45^\circ$  ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า)

#### 4.5.2 กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลง

รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสฟอลต์ ที่ได้จากการจำลองผ่านหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV สังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่งเวลา 0.0725 ms มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสเป็นอย่างมากเนื่องจากเกิดการลัดวงจร ในส่วนลักษณะรูปคลื่นมีลักษณะเป็นรูปคลื่นชานี่ปกติที่มีขนาดมากน้อยตามความรุนแรงของฟอลต์ จะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ ณ ตำแหน่งเวลาที่เกิดฟอลต์

หมายเหตุ เงื่อนไขการจำลอง คือ มุมในการสวิตช์ซึ่งเท่ากับ 45 องศาไฟฟ้า, เกิดฟอลต์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน (A-N) และหม้อแปลงต่อโหลด ขนาด 93.6 MVA เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.7 ล้าหลัง (lagging)

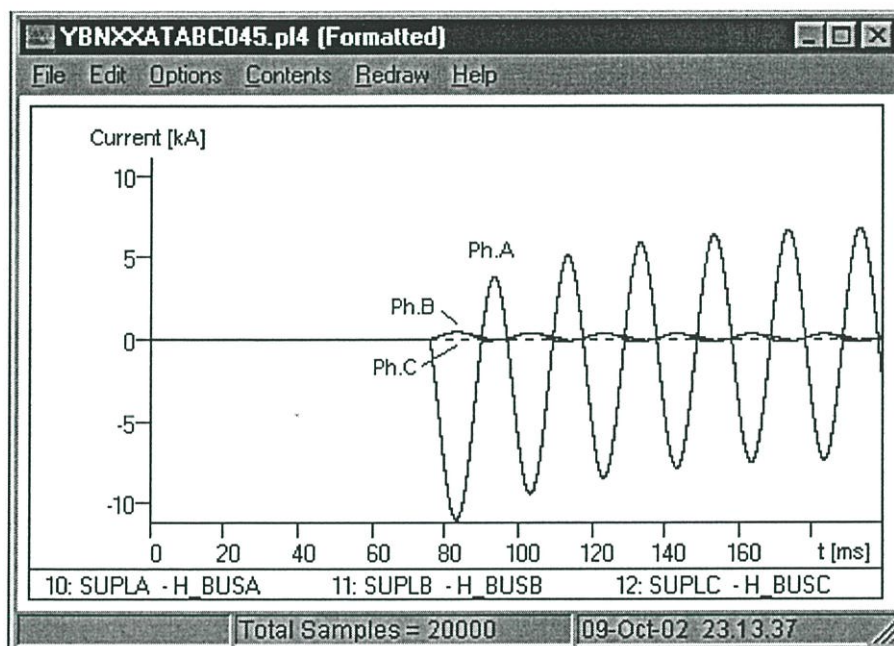


รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลง (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์ 45 องศาไฟฟ้า)

### 4.5.3 กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ

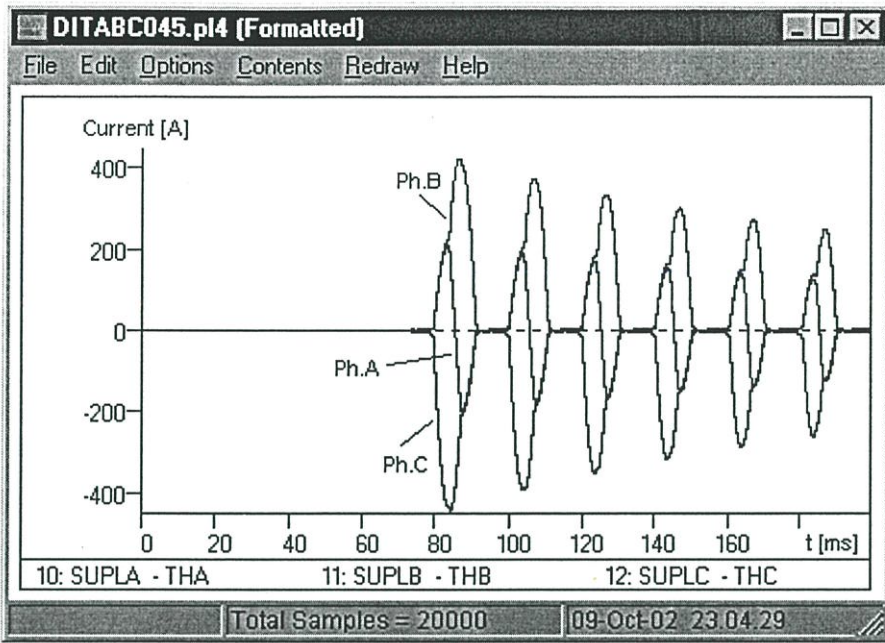
รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นกระแสฟอลต์และอินรัช ที่ได้จากการจำลองผ่านหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV สังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่งเวลา 0.0725 ms มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสเป็นอย่างมากเนื่องจากเกิดการลัดวงจรในขณะที่เดียวกันสัญญาณกระแสที่ได้จะมีความบิดเบี้ยวซึ่งเป็นผลกระทบจากกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะที่หม้อแปลงถูกจ่ายไฟ อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ ณ ตำแหน่งเวลาที่เกิดฟอลต์

หมายเหตุ เงื่อนไขการจำลอง คือ มุมสวิตช์ซึ่งเท่ากับ  $45^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า, เกิดฟอลต์ชนิด เฟส A ลัดวงจรลงดิน, เซอร์กิตเบรกเกอร์ S1 ที่เข้าไม่พร้อมกันเรียงลำดับ เป็น A (1ms) B (2ms) C

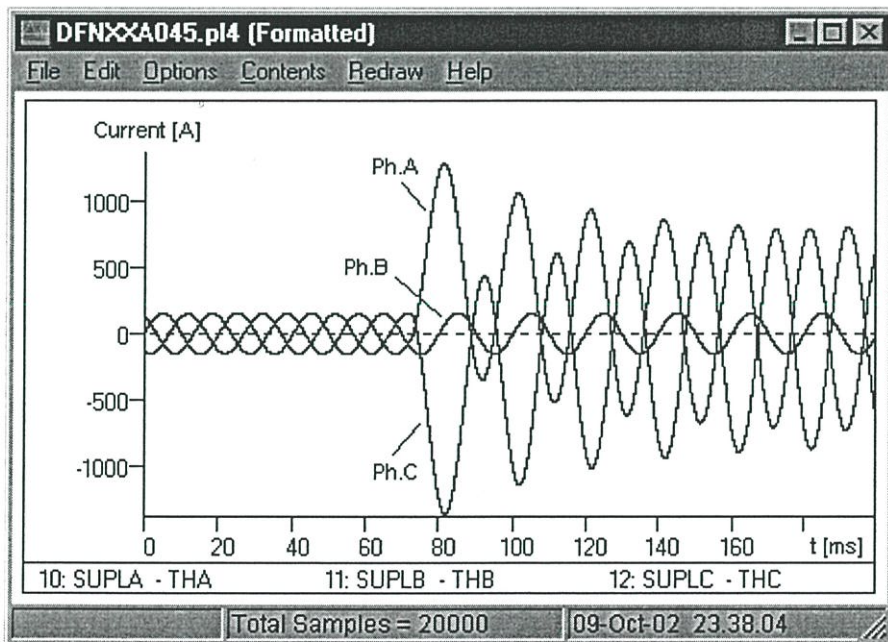


รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุมสวิตช์ซึ่ง  $45^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)

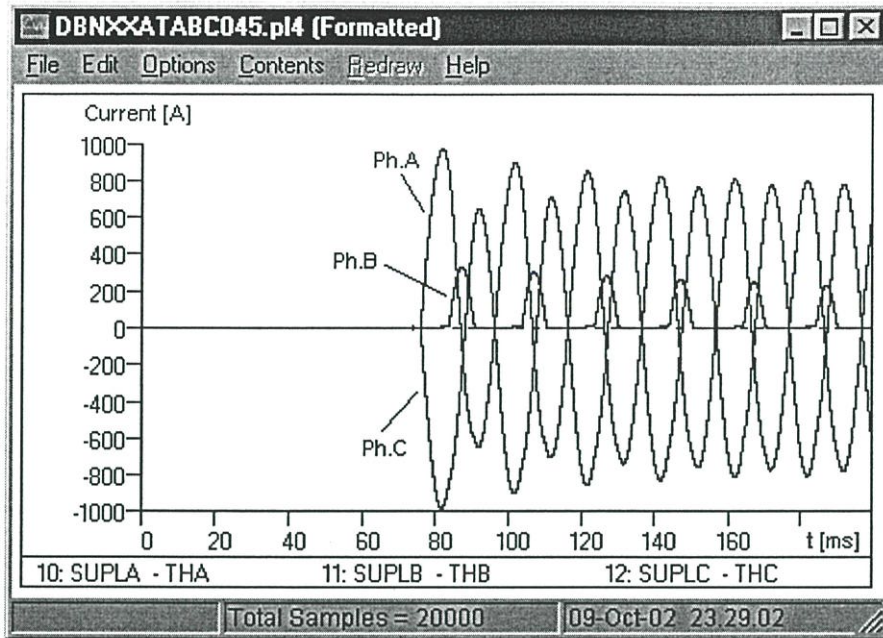
เมื่อเปลี่ยนชนิดของหม้อแปลงไปเป็นชนิด กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 โดยยังคงเงื่อนไขการจำลองที่มุมในการสวิตช์ซึ่งที่  $45^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า และมุมของแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดฟอลต์คือ  $45^\circ$  องศาไฟฟ้า ในขณะที่ลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ A (1ms) B (2ms) C และกรณีเกิดฟอลต์ลงดินชนิด A-N จะได้รูปที่ 4.9 ถึง 4.11 แสดงรูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงกระแสสำหรับกรณีเกิดกระแสอินรัช, ฟอลต์ภายใน โชนป้องกันหม้อแปลง และฟอลต์ที่เกิดขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตซ์ซึ่ง 45 องศาของแรงดันไฟฟ้า)

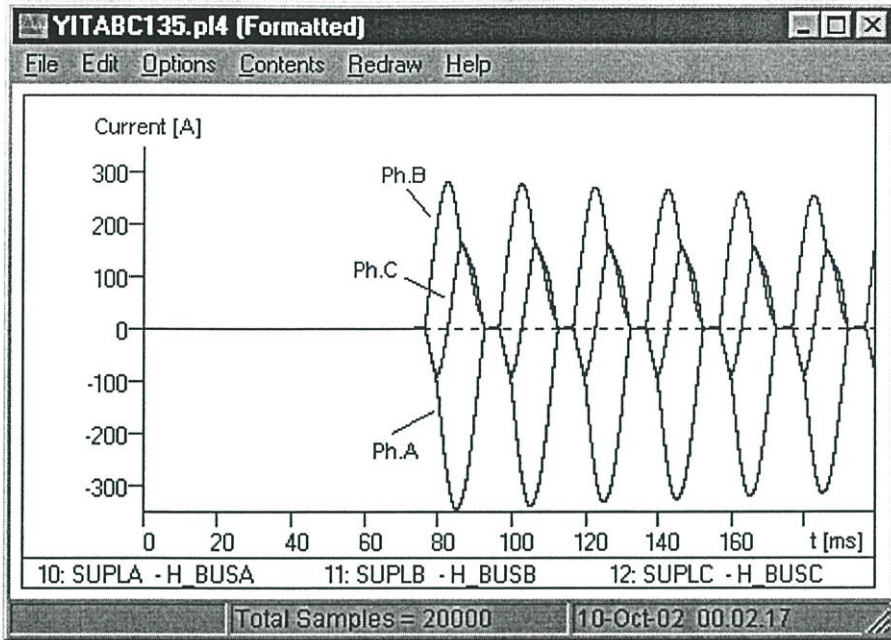


รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลง (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์  $45^\circ$ )

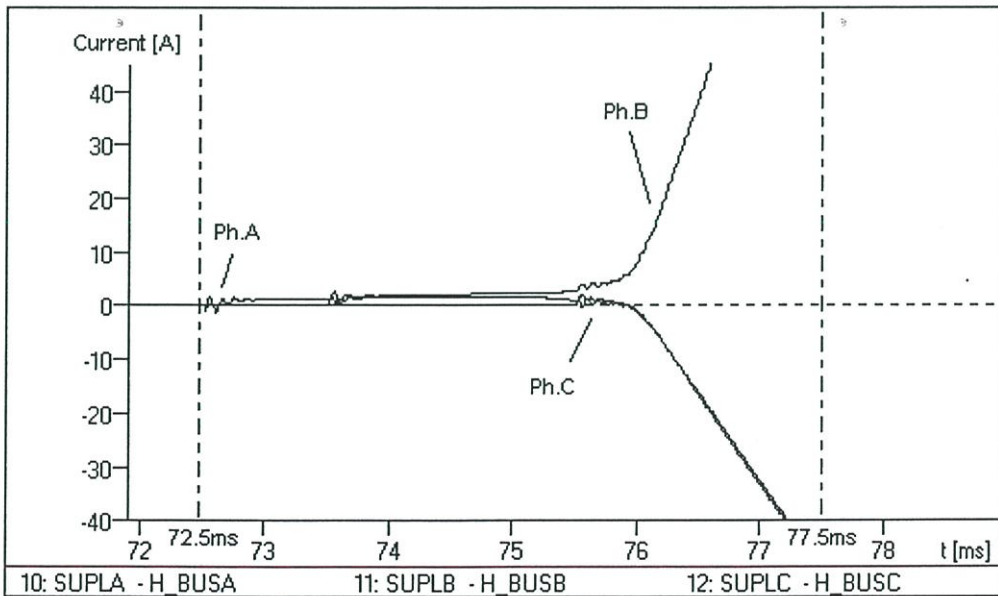


รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุมสวิทช์ซึ่ง  $45^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)

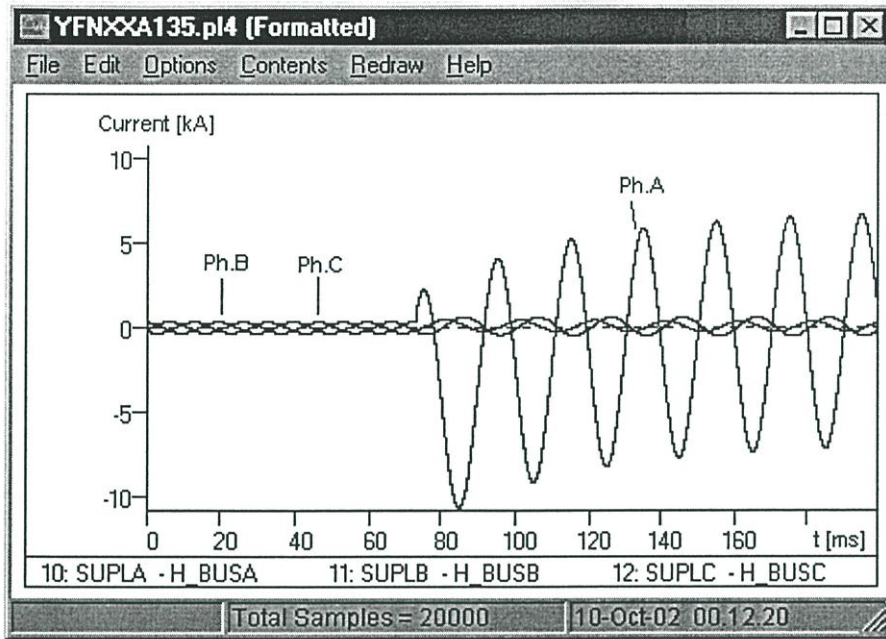
จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.11 ซึ่งเป็นรูปคลื่นที่แสดงผลการจำลองของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทั้งสองชนิดทั้ง 3 กรณี คือ การเกิดกระแสอินรัช, การเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน และการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ โดยที่มุมในการสวิทช์ซึ่งและมุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์เป็นมุม  $45^\circ$  ดังนั้นจากเงื่อนไขการจำลองที่กำหนดขึ้นข้างต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมในการสวิทช์ซึ่งหรือมุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์เปลี่ยนแปลงไป จะมีผลต่อขนาดและมุมของรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลง จึงทำการปรับมุมสวิทช์ซึ่งและมุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์จาก  $45^\circ$  ไปเป็น  $135^\circ$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลงจะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่งที่มีการเกิดกระแสอินรัช หรือการเกิดฟอลต์ ลักษณะของสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งดังกล่าวจะมีลักษณะของสัญญาณทรานเซียนต์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ได้พัฒนารูปแบบวิธีการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยลักษณะการเกิดสัญญาณทรานเซียนต์ดังกล่าว เพื่อค้นหาจุดเริ่มต้นของการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในบทที่ 5 ต่อไป โดยรูปที่ 4.12 ถึง 4.17 แสดงรูปคลื่นกระแสของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ในกรณีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ และภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิล และรูปที่ 4.18 ถึง 4.23 แสดงรูปคลื่นกระแสของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในกรณีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ และภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิล



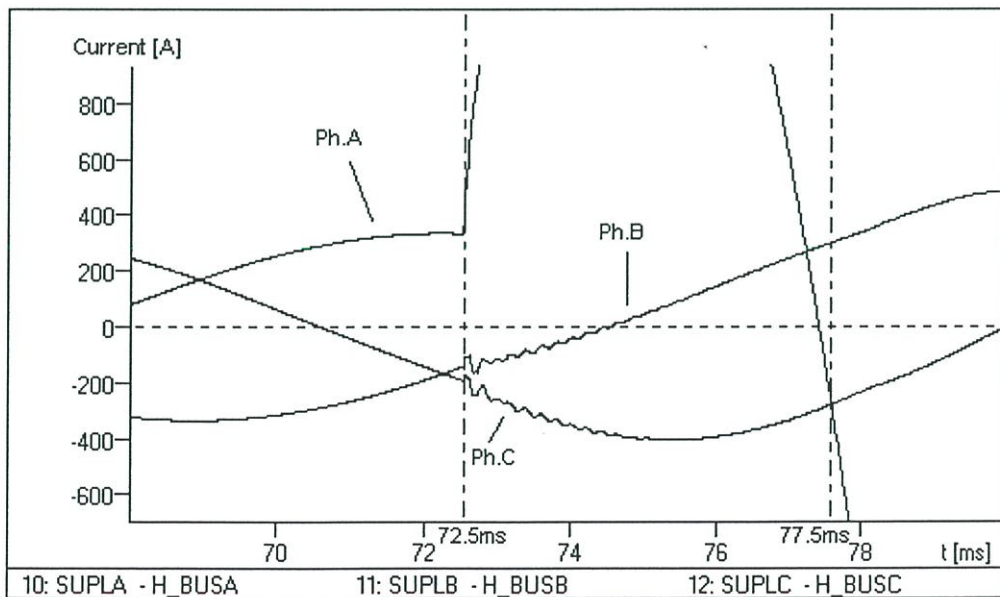
รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตช์ซึ่ง  $135^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)



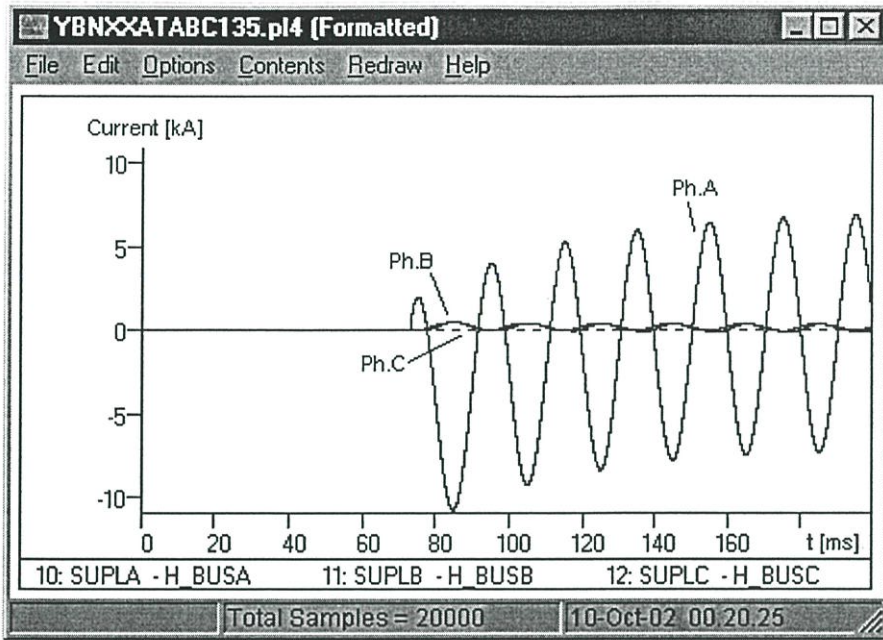
รูปที่ 4.13 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Ydyn0 กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตช์ซึ่ง  $135^\circ$  องศาไฟฟ้า)



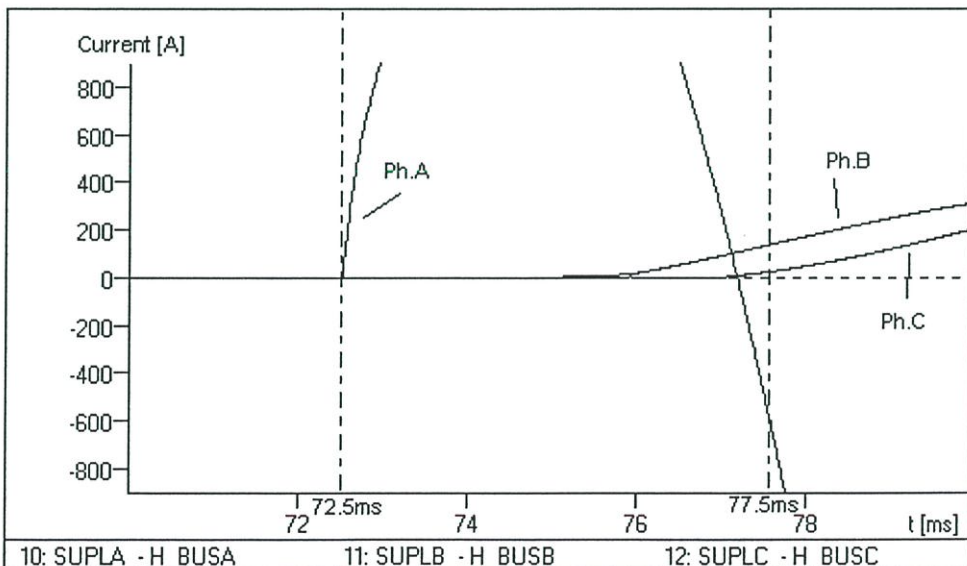
รูปที่ 4.14 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์  $135^\circ$ )



รูปที่ 4.15 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Ydyn0 กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์  $135^\circ$ )



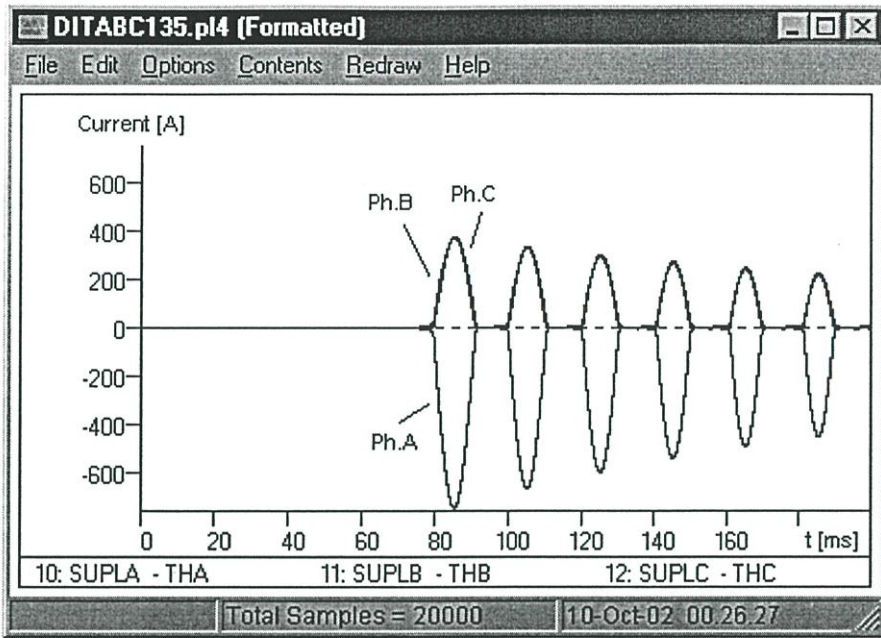
รูปที่ 4.16 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัด 200/200/50 MVA แรงดัน 230/121/22 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุมสวิตซ์ซึ่ง  $135^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)



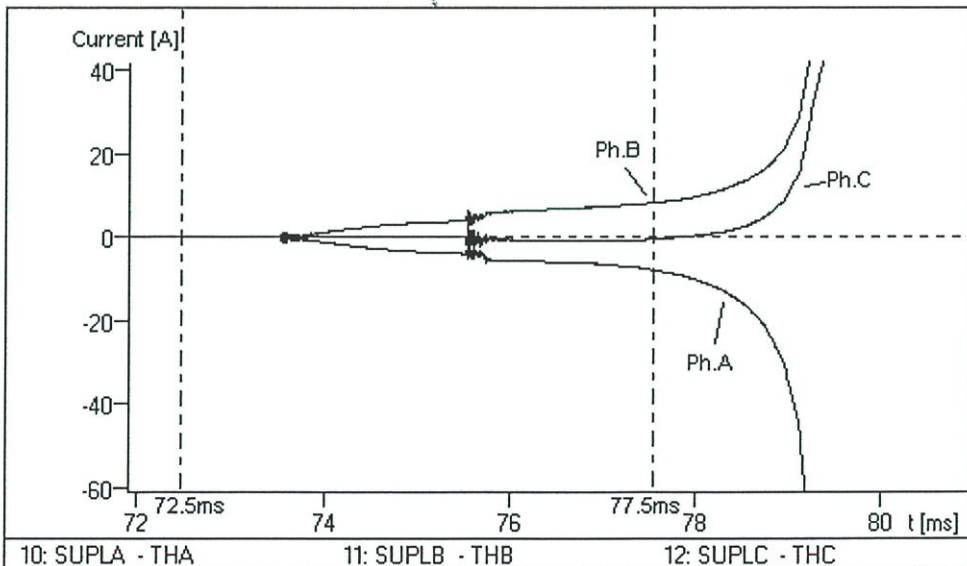
รูปที่ 4.17 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Ydyn0 กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุมสวิตซ์ซึ่ง  $135^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)

จะสังเกตได้จากรูปที่ 4.12 ถึง 4.17 แสดงให้เห็นผลการจำลองของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ทั้ง 3 กรณี คือ การเกิดกระแสอินรัช, การเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน และการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ โดยที่มุมสวิทช์ซึ่งและมุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์เท่ากับ  $135^\circ$  นอกจากรูปคลื่นที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านขนาดของกระแสและมุมของรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงอันเนื่องมาจากการปรับปรุงดังกล่าวแล้ว ในภาพขยายรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 กรณี จะสามารถสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการสวิทช์ซึ่งหรือการเกิดฟอลต์ ซึ่งข้อสังเกตเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เพื่อประยุกต์การตรวจจับตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

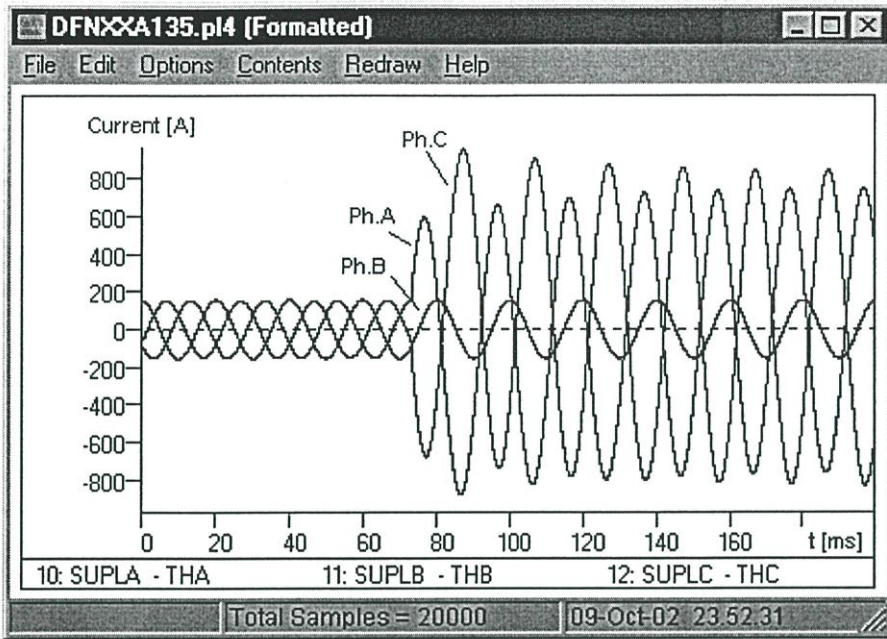
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาช่วงกระแส  $1/4$  ไซเคิลของภาพขยายกระแสทั้ง 3 กรณี พบว่าสำหรับกรณีการเกิดกระแสอินรัช การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาดังกล่าวมีลักษณะแตกต่างไปจากกรณีการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันและการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ สำหรับกรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟรูปคลื่นที่ได้มีความพิเศษ คือ เฟสที่เกิดฟอลต์จะแสดงผลของฟอลต์อย่างชัดเจน ส่วนในเฟสอื่นที่ไม่ได้รับผลกระทบจะแสดงผลของกระแสอินรัช ซึ่งด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ในปัจจุบันที่อาศัยการเปรียบเทียบอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 กับองค์ประกอบความถี่มูลฐาน เพื่อใช้ในการห้วงเวลาการทำงานของรีเลย์ป้องกันนั้น อาจจะสามารถตรวจจับอัตราส่วนดังกล่าวและนำมาซึ่งการห้วงเวลาของรีเลย์ป้องกันได้ ดังนั้นจากข้อสังเกตที่พบซึ่งพิจารณาการเกิดกระแสอินรัชเพียงกรณีเดียวแยกออกจากการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันและการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ จึงสามารถนำมาประยุกต์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงดังกล่าวได้



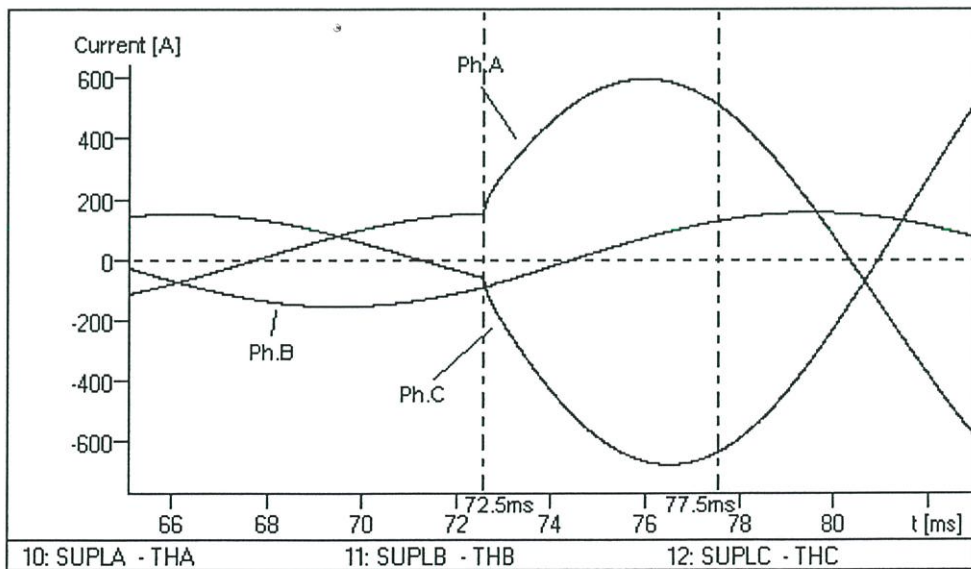
รูปที่ 4.18 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตช์ซิ่ง  $135^{\circ}$  ของแรงดันไฟฟ้า)



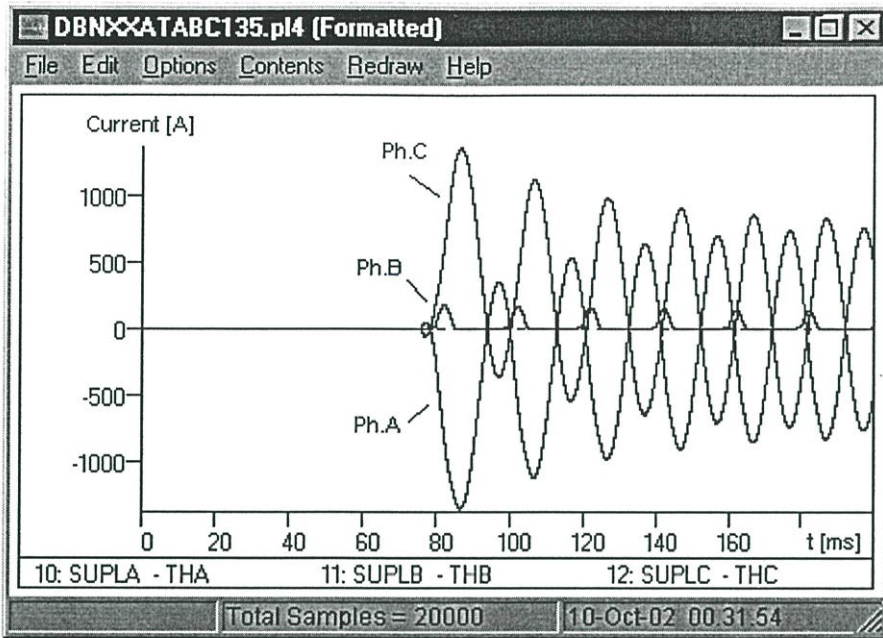
รูปที่ 4.19 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดกระแสอินรัช (มุมสวิตช์ซิ่ง  $135^{\circ}$  ของแรงดันไฟฟ้า)



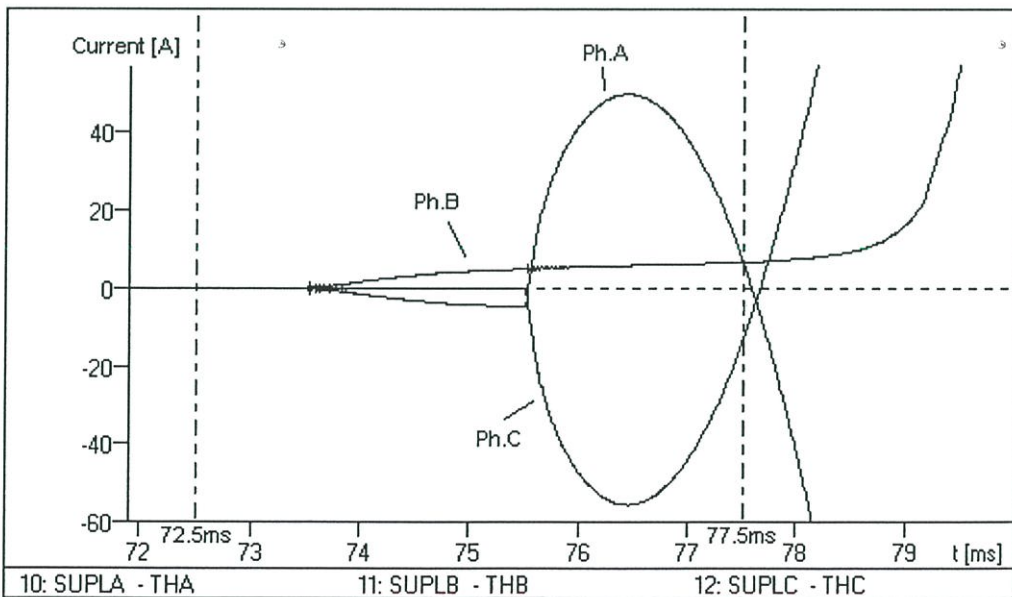
รูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลง (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์  $135^{\circ}$ )



รูปที่ 4.21 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน (มุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์  $135^{\circ}$ )



รูปที่ 4.22 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ กลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัด 16 MVA แรงดัน 33/11.7 kV กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ (มุมสวิตช์ซึ่ง  $135^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)



รูปที่ 4.23 แสดงภาพขยายรูปคลื่นกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิลของหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน (มุมสวิตช์ซึ่ง  $135^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า)

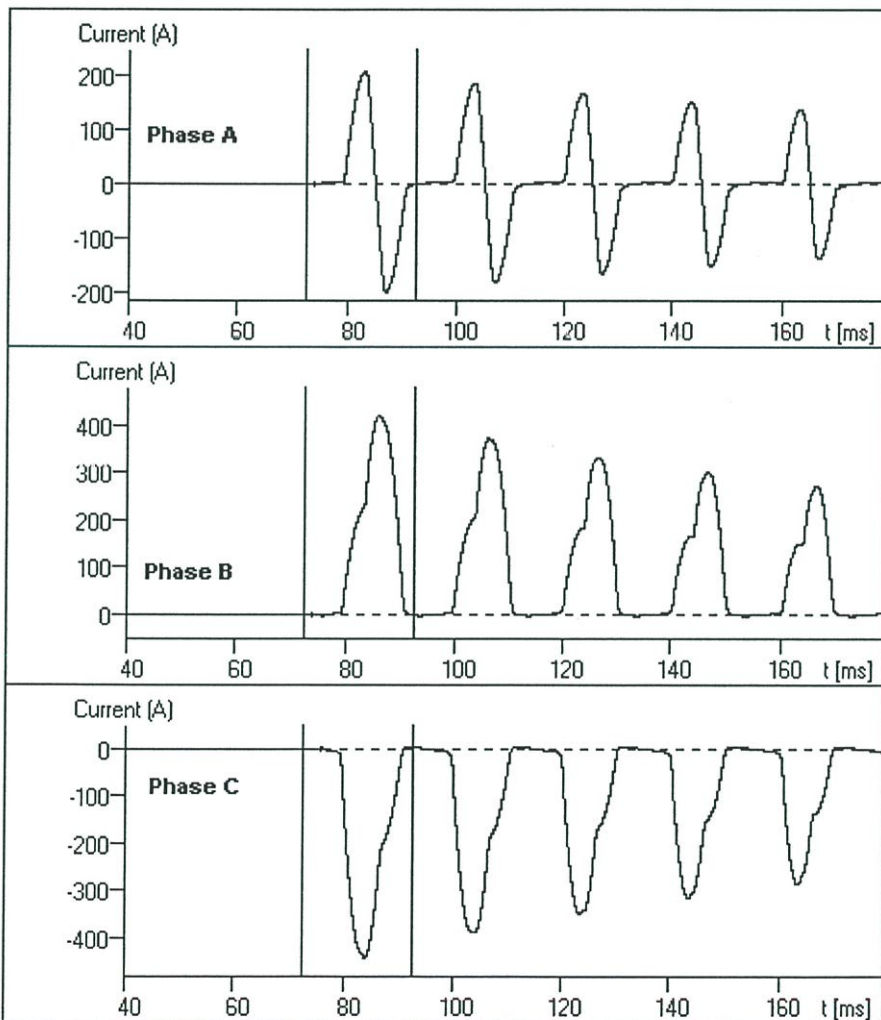
และเช่นเดียวกันจะสังเกตได้จากากรูปที่ 4.18 ถึง 4.23 ซึ่งเป็นผลการจำลองของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ทั้ง 3 กรณี คือ การเกิดกระแสอินรัช, การเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน และการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ โดยที่มุมสวิทช์ซึ่งและมุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์เท่ากับ  $135^{\circ}$  รูปคลื่นดังกล่าวแสดงให้เห็นขนาดของกระแสและมุมของรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการปรับปรุงดังกล่าวตามทฤษฎีแล้ว ในภาพขยายรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 กรณี จะสามารถสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกับการสวิทช์ซึ่งหรือการเกิดฟอลต์ ซึ่งข้อสังเกตเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เพื่อประยุกต์การตรวจจับตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าในบทที่ 5 ต่อไป

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาช่วงกระแส  $1/4$  ไซเคิลของภาพขยายกระแสทั้ง 3 กรณี พบว่าสำหรับกรณีการเกิดกระแสอินรัช การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาดังกล่าวมีลักษณะแตกต่างไปจากกรณีการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันและการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ สำหรับกรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟรูปคลื่นที่ได้มีความพิเศษ คือ กระแสในขดลวด 2 เฟสจะได้รับผลกระทบจากการเกิดฟอลต์อย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากผลของการต่อขดลวดแบบเดลต้า ส่วนอีกเฟสที่ไม่ได้รับผลกระทบจะแสดงผลของกระแสอินรัช ซึ่งด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ในปัจจุบันที่อาศัยการเปรียบเทียบอัตราส่วนขององค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 กับองค์ประกอบความถี่มูลฐาน เพื่อใช้ในการห้วงเวลาการทำงานของรีเลย์ป้องกันนั้น อาจจะสามารถตรวจจับอัตราส่วนดังกล่าวและนำมาซึ่งการห้วงเวลาของรีเลย์ป้องกันได้ ดังนั้นจากข้อสังเกตที่พบซึ่งพิจารณาการเกิดกระแสอินรัชเพียงกรณีเดียวแยกออกจาก การเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันและการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ จึงสามารถนำมาประยุกต์เทคนิคการวิเคราะห์ทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงในบทที่ 5 ต่อไป

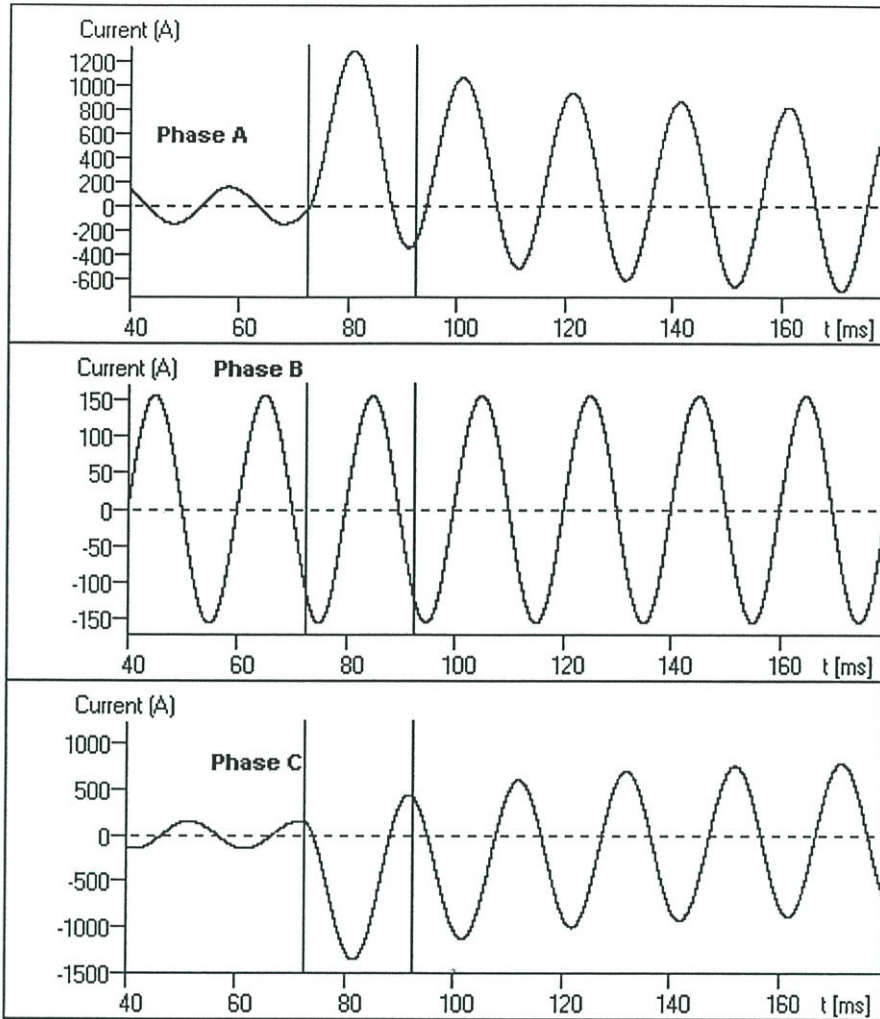
## บทที่ 5

### การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต

จากรูปคลื่นกระแสไหลเข้าหม้อแปลงที่ได้จากการจำลองได้ในบทที่ 4 ด้วยเงื่อนไขการจำลองคือ มุมสวิทช์ซิ่งและมุมของแรงดันขณะเกิดฟอลต์เป็น 45 องศาไฟฟ้าสามารถแบ่งแยกตามกระแสในแต่ละเฟสได้ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 สำหรับกรณีการเกิดกระแสอินรัชและฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ตามลำดับ เมื่อหม้อแปลงทดสอบชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัดกำลัง 16 MVA และพิกัดแรงดัน 33/11.7 kV



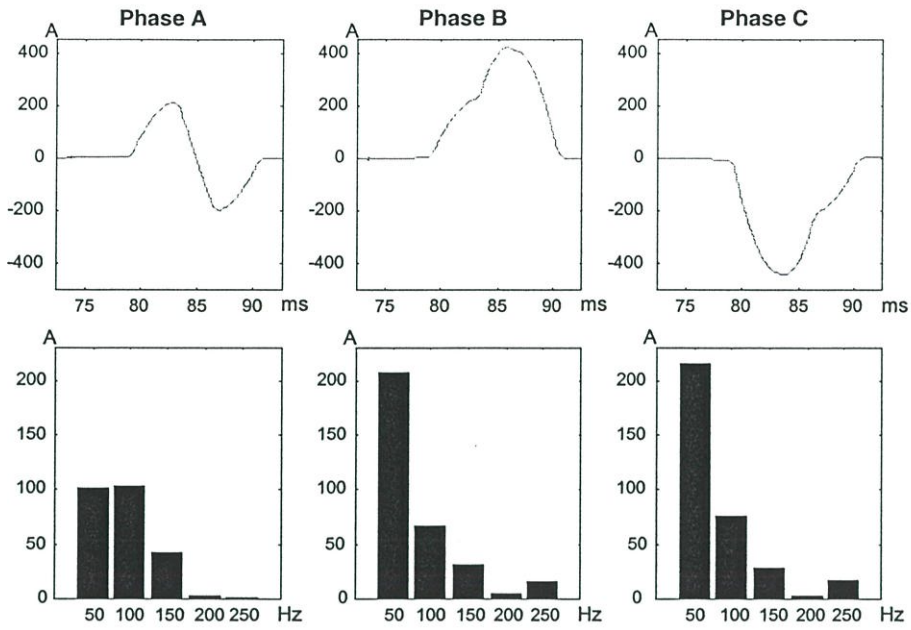
รูปที่ 5.1 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดกระแสอินรัช (เส้นขึ้นแสดงช่วงข้อมูลกระแส 1 ไซเคิลหลังการเกิดกระแสอินรัช)



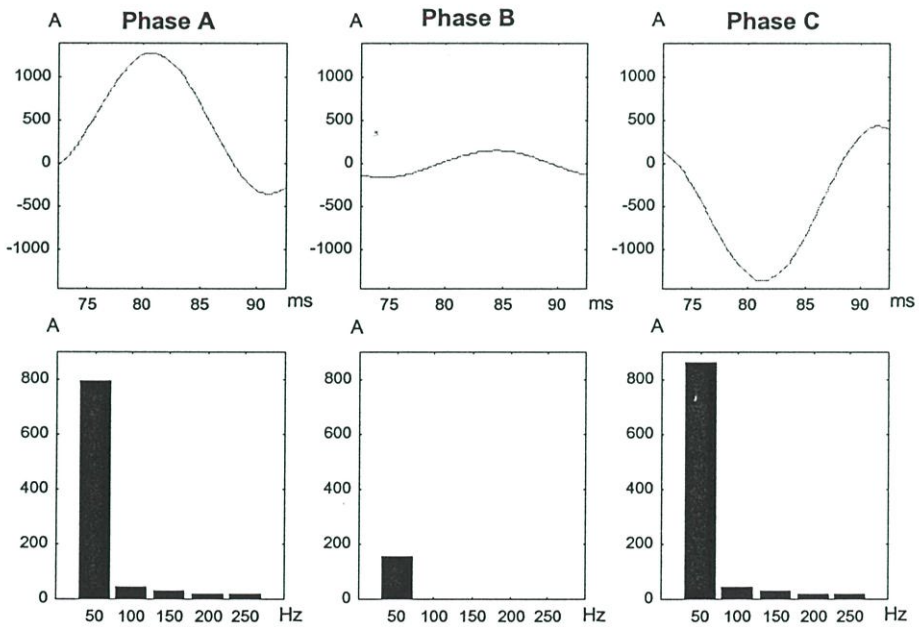
รูปที่ 5.2 รูปคลื่นกระแส เฟส A ที่ไหลเข้าหม้อแปลงชนิด Dyn11 กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันชนิดเฟส A ลงดิน (เส้นขึ้นแสดงช่วงข้อมูลกระแสที่ 1 ไซเคิลหลังการเกิดฟอลต์)

### 5.1 พิจารณารูปแบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์ในปัจจุบัน [28]

เมื่อนำรูปคลื่นทั้งสองมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการตอบสนองกรณีเกิดกระแสอินรัชกับกรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง โดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์ (FFT) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ในปัจจุบัน เมื่อเลือกช่วงข้อมูลการแปลงฟูเรียร์จากรูปคลื่นกระแสในรูปที่ 5.1 และ 5.2 เท่ากับ 1 ไซเคิล หลังเกิดการเปลี่ยนแปลง จะได้ผลการแปลงฟูเรียร์ของกรณีกระแสอินรัชดังรูปที่ 5.3 และกรณีฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงดังรูปที่ 5.4 โดยกรณีกระแสอินรัชจะมีมุมสวิทช์ซึ่งที่ 45 องศาไฟฟ้า และลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์คือ A [1ms] B [2ms] C ส่วนกรณีฟอลต์จะมีมุมสวิทช์ซึ่งที่ 45 องศาไฟฟ้า และเกิดฟอลต์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน (A-N)



รูปที่ 5.3 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีกระแสอินรัชของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง 1 ไซเคิล (20 ms) หลังการเกิดกระแสอินรัช

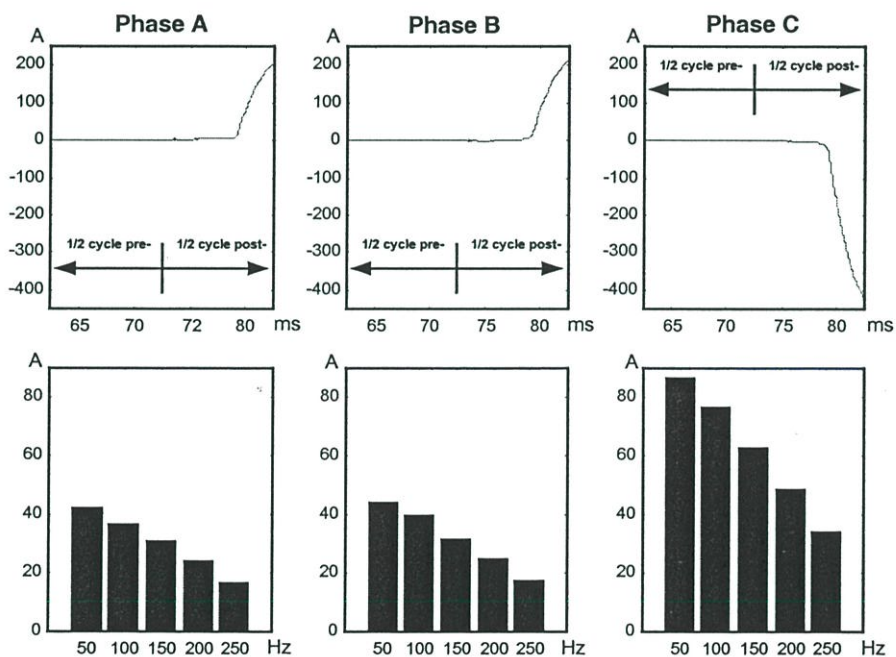


รูปที่ 5.4 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง 1 ไซเคิล (20 ms) หลังการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง

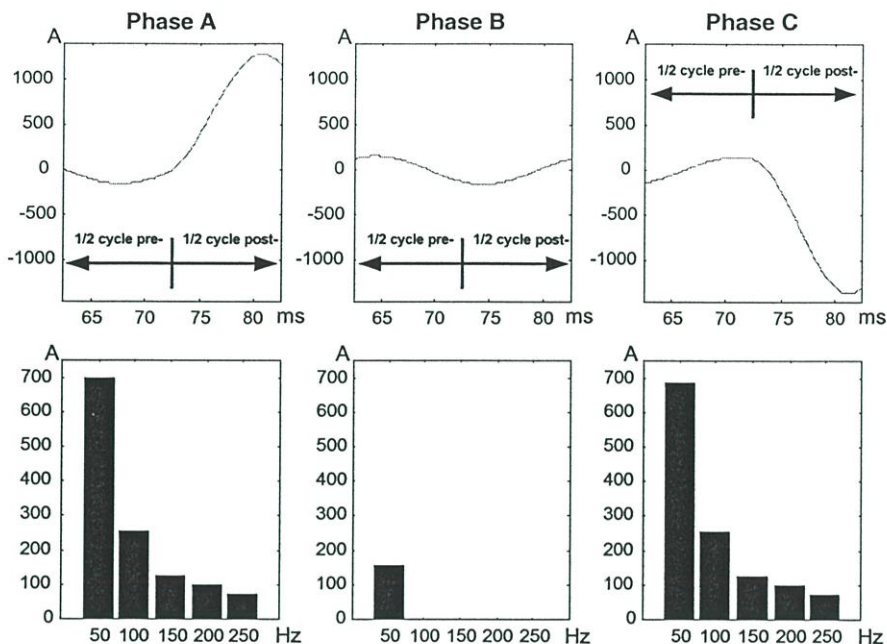
จากรูปผลการตอบสนองทั้งสองกรณี ลักษณะความแตกต่างที่สามารถสังเกตได้จะมีลักษณะ เช่นเดียวกับเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อแบ่งแยกระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกัน

ของหม้อแปลงในปัจจุบัน โดยที่อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กระแสขององค์ประกอบลำดับที่ 2 เทียบกับองค์ประกอบความถี่มูลฐานในกรณีกระแสอินรัช (ดูรูปที่ 5.3 ประกอบ) มีขนาดมากกว่า 20% ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหม้อแปลงเกิดกระแสอินรัช ซึ่งแตกต่างจากการเกิดฟอลต์ภายในโซน (ดูรูปที่ 5.4 ประกอบ) ที่อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กระแสดังกล่าวมีค่าต่ำกว่ามาก [29]

ต่อไปเมื่อทดลองวิเคราะห์ห้ด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเดิม โดยพยายามลดช่วงข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หลังจาก 1 ไซเคิล เหลือ  $\frac{1}{2}$  ไซเคิล แต่ด้วยข้อจำกัดของวิธีการแปลงฟูเรียร์ที่มีความจำเป็นจะต้องใช้ช่วงคาบการแปลงให้มีขนาดอย่างน้อยเท่ากับส่วนกลับขององค์ประกอบความถี่มูลฐาน ดังนั้นการใช้ช่วงข้อมูล  $\frac{1}{2}$  ไซเคิล จึงประกอบด้วยช่วงข้อมูล  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลก่อนการเปลี่ยนแปลง และช่วงข้อมูล  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลง โดยผลการแปลงฟูเรียร์แสดงไว้ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 สำหรับกรณีกระแสอินรัชและกรณีฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีกระแสอินรัชของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลก่อนการเกิดกระแสอินรัช และ  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลหลังการเกิดกระแสอินรัช



รูปที่ 5.6 ผลการแปลงฟูเรียร์ กรณีสโพลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ในช่วง  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลก่อนการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน และ  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลหลังการเกิดฟอลต์

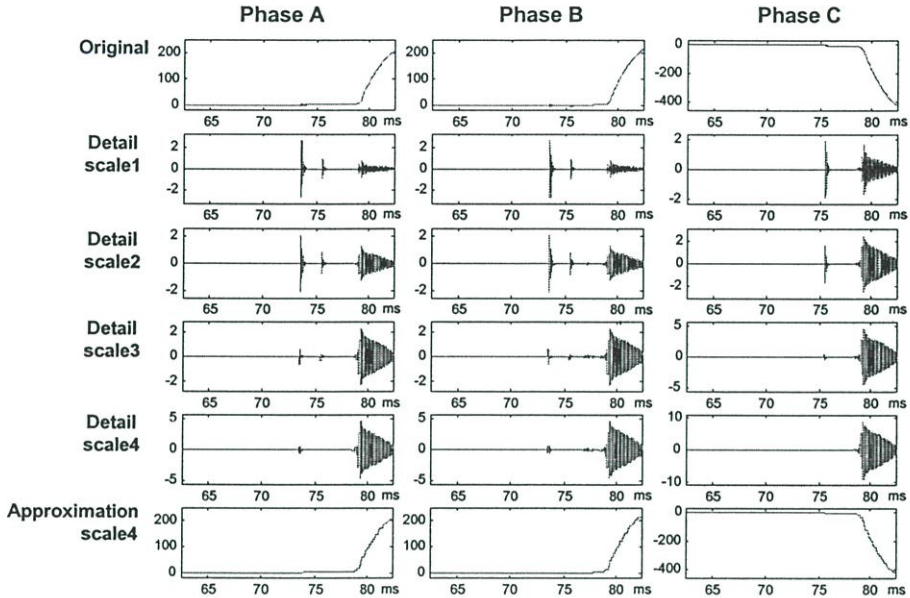
จากรูปผลการตอบสนองทั้งสองกรณีที่เลือกใช้ช่วงข้อมูลการวิเคราะห์เพียง  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลง จะสังเกตได้ว่าทั้งสองกรณีมีอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กระแสขององค์ประกอบลำดับที่ 2 เทียบกับองค์ประกอบความถี่มูลฐานในกรณีกระแสอินรัช (ดูรูปที่ 5.5 ประกอบ) และกรณีฟอลต์ภายในโซน (ดูรูปที่ 5.6 ประกอบ) ใกล้เคียงกัน จนทำให้ไม่เพียงพอที่จะใช้สำหรับวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่าง กระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าด้วยเทคนิคการแปลงฟูเรียร์ในปัจจุบันจำเป็นต้องอาศัยช่วงข้อมูลการแปลงฟูเรียร์อย่างน้อย 1 ไซเคิลของสัญญาณกระแสหลังการเปลี่ยนแปลงเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลงได้ [30]

## 5.2 พิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลตในการวิเคราะห์

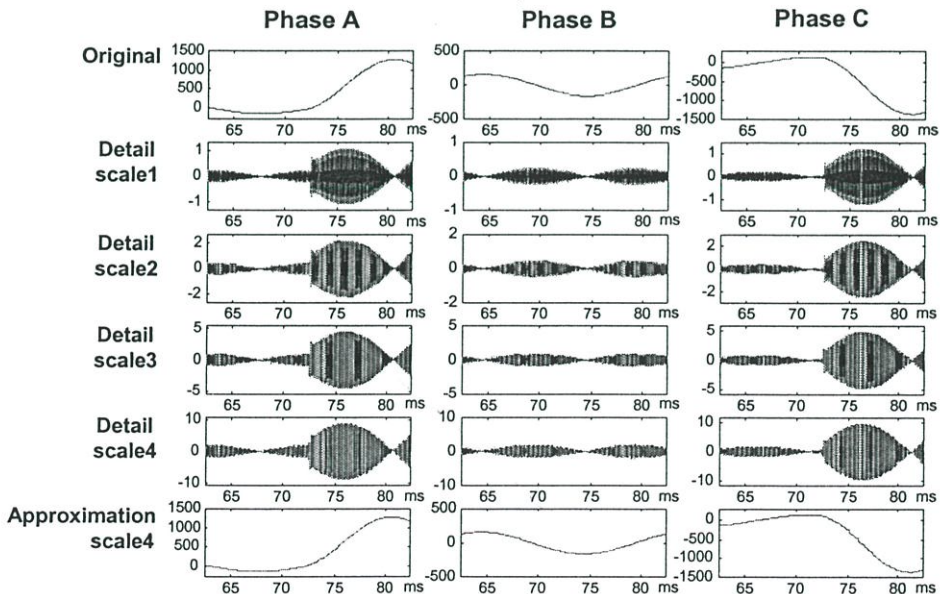
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (DWT) ในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกันหม้อแปลง โดยวิเคราะห์ผลการตอบสนองของสัญญาณกระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลง จากผลการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยจะถูกนำมาประมวลผลอีกครั้งเพื่อใช้สร้างกระบวนการแบ่งแยกความแตกต่างต่อไป

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเลตที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ว่าเป็นเทคนิคสำหรับกรองแยกสัญญาณทรานเซียนต์ออกเป็นช่วงความถี่ต่างๆ โดยคงไว้ซึ่งข้อมูลทางขนาด, เวลา และความถี่ นอกจากนี้ยังมีเหมาะสมในการกรองสัญญาณทรานเซียนต์รูปแบบต่างๆ ด้วยความสามารถในการ

ปรับเลือกตระกูลและสเกลของคู่อรรถสัญญาณ ดังนั้นเมื่อทดลองทำการแปลงเวฟเล็กกับรูปคลื่น การตอบสนองทั้งกรณีกระแสอินรัชและฟอลต์ใน โชนป้องกันหม้อแปลงด้วยเงื่อนไขการเกิด เช่นเดียวกับรูปที่ 5.5 และ 5.6 จะได้ผลการแปลงเวฟเล็กด้วยเงื่อนไขการแปลง คือ เวฟเล็กแม่ Daubechies ตระกูล 2 สเกล 4 ได้ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 ผลการแปลงเวฟเล็ก เมื่อเวฟเล็กแม่ Daubechies ตระกูล 2 สเกล 1-4 ของกรณีกระแสอินรัช โดยแสดงสัญญาณ Detail สเกล 1-4 และสัญญาณ Approximation สเกล 4



รูปที่ 5.8 ผลการแปลงเวฟเล็ก เมื่อเวฟเล็กแม่ Daubechies ตระกูล 2 สเกล 1-4 ของกรณีฟอลต์ใน โชนป้องกันหม้อแปลง โดยแสดงสัญญาณ Detail สเกล 1-4 และสัญญาณ Approximation สเกล 4

จากผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในรูปที่ 5.7 และ 5.8 เมื่อพิจารณาเลือกช่วงข้อมูลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสในรัศและฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง จะสังเกตได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาที่ผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของสัญญาณ Approximation สเกล 4 มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัมประสิทธิ์  $\theta$  ตำแหน่งเวลาที่มีการเกิดกระแสในรัศขึ้น และเช่นเดียวกันสำหรับกรณีฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง ก็สามารถสังเกตเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้เช่น  $\theta$  ตำแหน่งเวลาที่เกิดฟอลต์ขึ้น ซึ่งลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ และหากพิจารณาผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของสัญญาณ Details สเกล 4 พบว่ารูปแบบของสัมประสิทธิ์ภายในช่วง  $\frac{1}{2}$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลงระหว่างกรณีกระแสในรัศกับกรณีฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงมีรูปแบบของสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจากข้อสังเกตทั้งในด้านความคล้ายกันและความแตกต่างกันของผลการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยนี้ เมื่อนำมาประกอบการพิจารณาซึ่งกันและกัน มีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาไปสู่การสร้างอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสในรัศและฟอลต์ภายในของหม้อแปลงได้ ซึ่งนอกจากจะมีความถูกต้องในการวิเคราะห์ความแตกต่างแล้วยังสามารถลดช่วงข้อมูลในการวิเคราะห์ได้อีกด้วย [31,32]

### 5.3 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยที่นำเสนอ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดสอบสมมุติฐานข้างต้น โดยทำการทดลองร่วมกับแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ชนิดอันได้แก่ กลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 และ Dyn11 ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีการใช้ทั่วไปในระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า(Transmission) และการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า (Distribution) เพื่อที่จะหาอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสในรัศกับฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงโดยอาศัยช่วงข้อมูลในการวิเคราะห์ที่แคบที่สุดและยังคงให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือ ซึ่งในระหว่างการทำลองนั้นได้ปรับปรุงแบบจำลองตามสมมุติฐานทุกกรณีทีกล่าวไว้ในบทที่ 4 เช่น มุมสวิตซ์ซึ่ง, ชนิดของฟอลต์ เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถอธิบายรายละเอียดในการศึกษาการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสในรัศกับฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงได้ตามหัวข้อการพิจารณาด้านต่างๆ ดังนี้

#### 5.3.1 การกำหนดค่าขอบเขตการเปรียบเทียบ

เพื่อใช้กำหนดค่าขอบเขตในการตัดสินใจต่างๆ เช่น การบอกว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นเป็นกระแสในรัศหรือฟอลต์ใน โชนป้องกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงนั้นสูงขึ้นจากสภาวะปกติและมีการเปลี่ยนแปลงเท่าใด หรือเมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 เฟส ควรจะมีอัตราส่วนเป็นเช่นไร เป็นต้น ซึ่งการกำหนดค่าขอบเขตนี้จะส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ ซึ่ง

จากการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ที่ได้จากการจำลองในตัวอย่างนี้ได้ กำหนดค่าขอบเขตการเปรียบเทียบไว้ 2 เท่า โดยรายละเอียดนั้นจะกล่าวอยู่ในขั้นตอนการวิเคราะห์

### 5.3.2 การกำหนดลักษณะเด่นของการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงแต่ละแบบ

เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสอินรัชแลฟอลต์ที่เกิดขึ้นแต่ละประเภทจะมี ลักษณะเฉพาะตัวและมีรูปแบบที่แตกต่างกัน นอกจากนี้กระแสอินรัชหรือฟอลต์ประเภทเดียวกันก็ ยังสามารถมีลักษณะที่แตกต่างกันตามปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดขึ้นดังสมมุติฐานการจำลองด้วย แต่ อย่างไรก็ตามคาดว่าจะมีลักษณะที่บางประการที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการระบุความ แตกต่างระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงได้

### 5.3.3 การเลือกประเภทของเวฟเล็ตและตระกูลที่เหมาะสม

เนื่องจากทฤษฎีพื้นฐานการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในบทที่ 2 ที่กล่าวไว้แล้ว ประเภทของ เวฟเล็ตและตระกูลที่เลือกนั้นจะมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณรูปแบบที่แตกต่างกัน ใน กรณีศึกษานี้รูปแบบของสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์จะมีรูปแบบผสมผสานระหว่างสัญญาณที่มี ลักษณะเป็นทรานเซียนต์ประกอบกับสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบ (Periodic) ซึ่งคาดว่าหากการ เลือกประเภทของเวฟเล็ตและตระกูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความเหมาะสม จะช่วยให้สังเกตเห็น ลักษณะความแตกต่างชัดเจนยิ่งขึ้น จากการศึกษาเปรียบเทียบประเภทของเวฟเล็ต พบว่าเวฟเล็ต ประเภท Daubechies ตระกูล 2 มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์โดยให้ผลที่ถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 95 %

### 5.3.4 การกำหนดจำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่เหมาะสม

จำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่นำมาใช้นั้นมีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์เนื่องจากการใช้ จำนวนสเกลหรือช่วงความถี่ที่มีความหลากหลายนั้นจะทำให้มีข้อมูลในการวิเคราะห์ที่มากขึ้นการ คัดสินใจทำได้ง่ายขึ้น แต่จะทำให้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์มากตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณา จำนวนสเกลที่เหมาะสมนั้นควรจะอยู่บนพื้นฐานที่ว่าจำนวนสเกลที่น้อยที่สุดที่ให้ความถูกต้องใน การวิเคราะห์ตามเงื่อนไขที่สามารถยอมรับได้ จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าสเกลที่ 4 มีความ เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยให้ผลที่ถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 97 %

### 5.3.5 การกำหนดช่วงของข้อมูลหรือสัญญาณที่ทำการพิจารณา

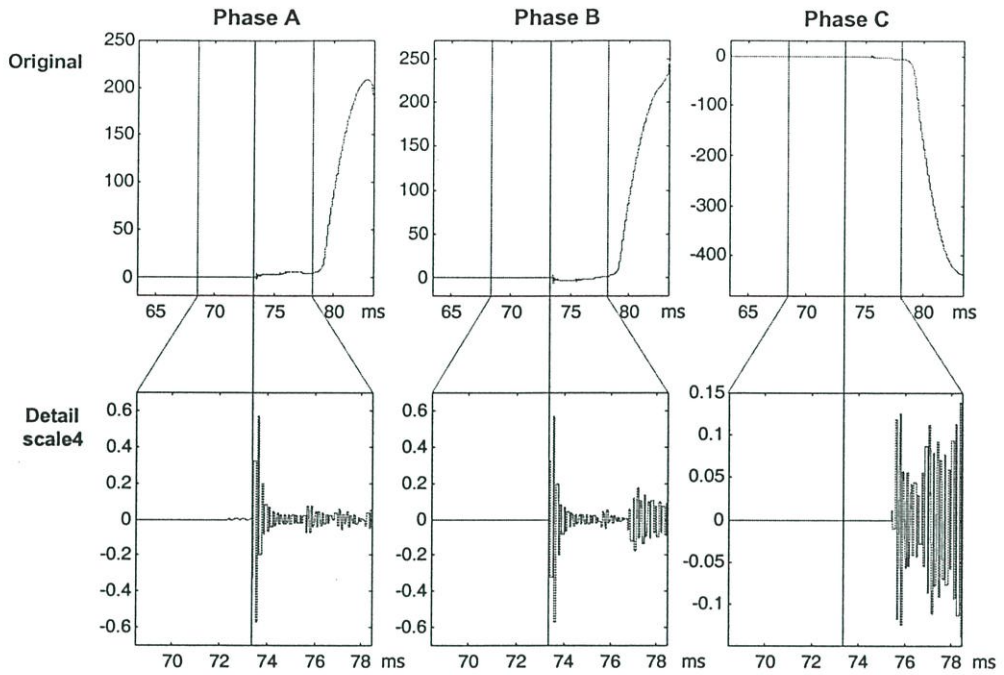
เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วกว่า เมื่อเทียบกับองค์ประกอบความถี่พื้นฐานโดยยังคงข้อมูลที่สำคัญต่างๆ ไว้ ดังนั้นการพิจารณาองค์ ประกอบความถี่สูงจึงสามารถที่จะลดขนาดของช่วงข้อมูลที่ใช้ได้ด้วย จากการศึกษานี้ได้กำหนด ช่วงของข้อมูลพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์โดยใช้ช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลง

\*\*หมายเหตุ รูปแบบของการเลือกเกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ได้มาจากการทดสอบและศึกษาผลจากการแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณพอลต์ตัวอย่าง (448 กรณีศึกษา) โดยเป็นการปรับค่าเกณฑ์ต่างๆเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ต้องการซึ่งรายละเอียดนั้นได้กล่าวไว้ในภาคผนวก

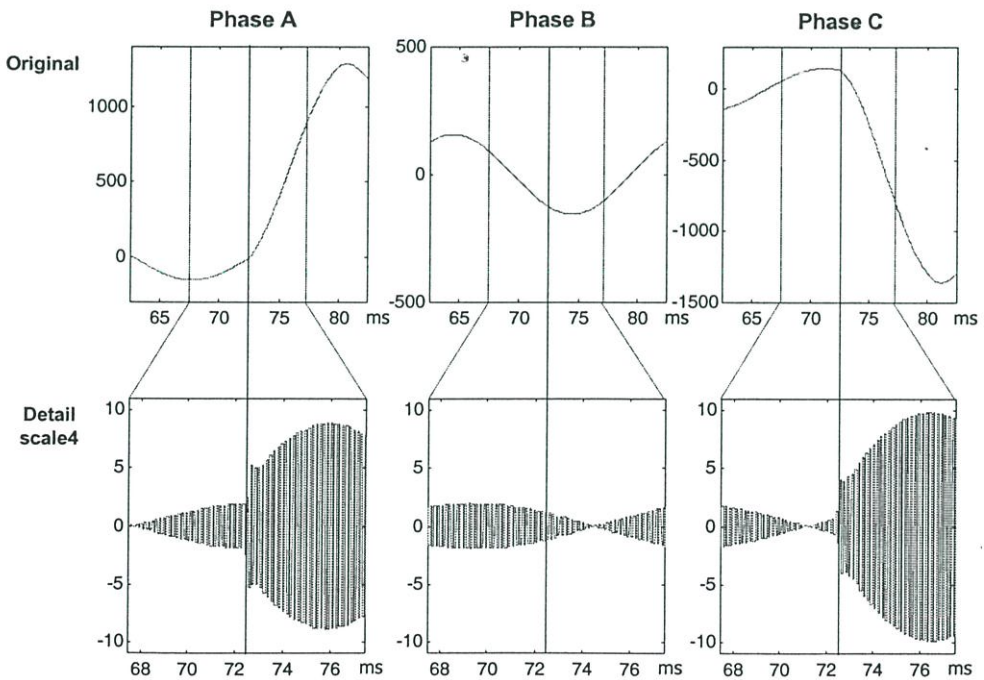
เพื่อความสะดวกในการอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์จึงได้นำตัวอย่างของสัญญาณกระแสอินรัชและพอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงที่ได้จากการจำลองตามสมมุติฐานที่ความถี่การสุ่ม (Sampling frequency rate) 200 kHz (รายละเอียดได้กล่าวในบทที่ 5) มาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเพื่อทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกจากความถี่ต่ำ และเปรียบเทียบการวิเคราะห์ในสเกลที่ 2, 4, 6 และ 8 โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่จากสัมประสิทธิ์ที่ได้ในแต่ละสเกลเพื่อวิเคราะห์ลักษณะความแตกต่าง โดยเลือกใช้ข้อมูลในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งกรณีกระแสอินรัชและพอลต์ใน โชนป้องกัน (แสดงเป็นเส้นประ) ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับหลักการเดิมที่ใช้การแปลงฟูเรียร์ที่ต้องใช้ช่วงของข้อมูลในการวิเคราะห์อย่างน้อย 1 ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลง ในการอธิบายการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดนี้จึงได้ยกตัวอย่างของสัญญาณกระแสอินรัชในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ที่มุมสวิตซ์ซึ่ง  $45^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า และลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ A [1ms] B [2ms] C โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างของพอลต์ใน โชนป้องกันดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นพอลต์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน (A-N) ที่มุมสวิตซ์ซึ่ง  $45^\circ$  ของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทั้งสองตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดดังต่อไปนี้

#### 5.4 การตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

รูปแบบการตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสภาวะปกติ (Steady state condition) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงมาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกจากองค์ประกอบความถี่ต่ำ และเปรียบเทียบการวิเคราะห์ในสเกลที่ 4 ของสัญญาณความถี่สูง Details ดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 สำหรับกรณีกระแสอินรัชและพอลต์ใน โชนของหม้อแปลงตามลำดับ



รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณ Detail สเกล 4 จากการแปลงเวฟเล็ท ด้วยเวฟเล็ทแม่ Daubechies 2 กรณีนี เกิดกระแสอินรัช เพื่อตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณ Detail สเกล 4 จากการแปลงเวฟเล็ท ด้วยเวฟเล็ทแม่ Daubechies 2 กรณีนี เกิดฟลัดซ์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน เพื่อตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง

จากผลการแปลงเวฟเล็ตสามารถสังเกตได้ว่าที่สัญญาณ Details ก่อนมีกระแสอินรัชและฟอลต์เกิดขึ้น ( $t < 0.0725$  s) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตจะมีค่ามากๆ ประมาณศูนย์ แต่ในสภาวะที่เริ่มมีการเกิดกระแสอินรัชและฟอลต์ ( $t \geq 0.0725$  s) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสัญญาณ Details สเกลที่ 4 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์ได้เปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากเกิดกระแสอินรัชและฟอลต์กับค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์เป็นจำนวนเท่า โดยพิจารณาในสเกลโคสเกลหนึ่งดังสมมุติฐานที่ว่า “ ค่าแห่งซึ่งสัมประสิทธิ์กระแสในสัญญาณ Detail สเกลที่ตรวจจับ มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 2 เท่าจากขนาดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตในสภาวะเดิมก่อนการเปลี่ยนแปลงให้ถือว่าค่าแห่งนั้นหม้อแปลงเกิดกระแสอินรัชหรือฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงนั้น ” ซึ่งจำเป็นจะต้องตรวจสอบว่าเป็นสภาวะผิดปกติหรือไม่ในลำดับต่อไป นอกจากนี้พบว่าค่าแห่งตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเฟสอาจมีค่าเท่ากันหรือไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้ค่าแห่งตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในหม้อแปลงมีเพียงค่าแห่งเดียว จึงกำหนดให้ “ ค่าแห่งการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในแต่ละเฟส เฟสใดสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วสุด ให้ถือว่าค่าแห่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ” จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงด้วยเส้นตรงที่ขีดอยู่กึ่งกลางแกนเวลา นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดกระแสอินรัชและฟอลต์ในหม้อแปลงยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบความถี่ของสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ของกระแสอินรัชและฟอลต์ด้วย แต่ด้วยรูปแบบการวิเคราะห์แบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยที่มีการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้ในบางครั้งการเปลี่ยนแปลงบางอย่างอาจจะไม่พบในสเกลที่ 4 แต่ก็สามารถพบการเปลี่ยนแปลงในสเกลถัดไปได้

## 5.5 การแบ่งแยกระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง

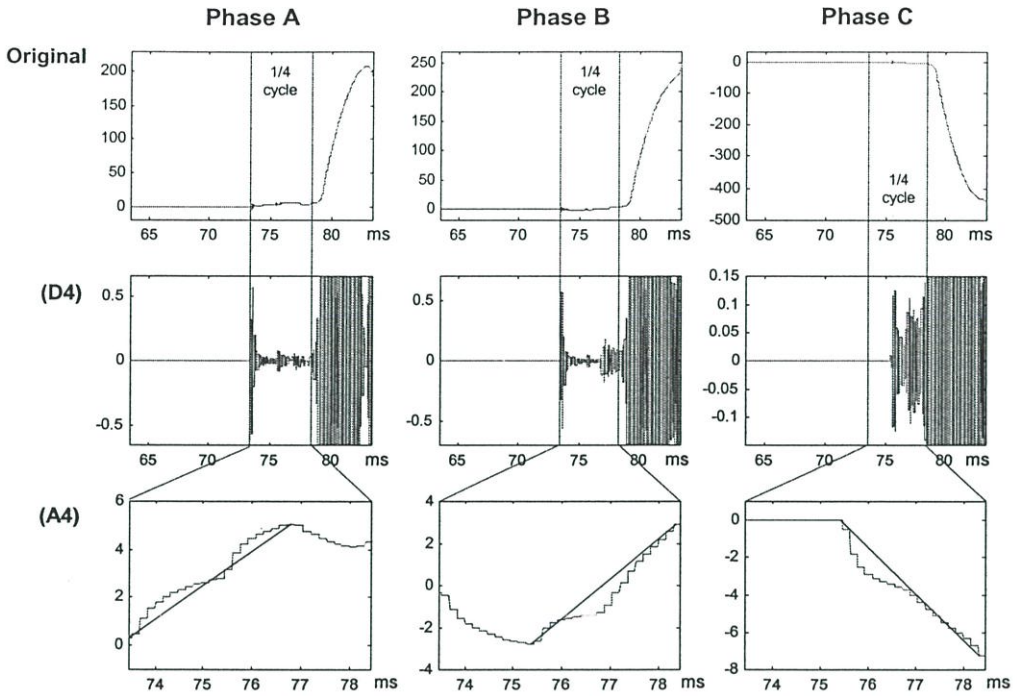
จากรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ข้างต้น ทำให้ทราบจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากการพิจารณาเฉพาะขนาดสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงในสัญญาณ Detail แต่ละสเกลไม่เพียงพอที่จะใช้ในการแบ่งแยกลักษณะระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงได้เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งหากมุ่งเน้นการวิเคราะห์รูปแบบนี้เพียงอย่างเดียว นอกจากจะส่งผลต่อความผิดพลาดในการวิเคราะห์แล้วยังอาจทำให้กระบวนการวิเคราะห์มีความซับซ้อนมากเกินไปซึ่งทำให้เวลาในการประมวลผลนานขึ้นด้วย นอกจากนี้จากผลการแปลงของสัญญาณ details ที่สเกลต่างๆ จะเป็นสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงที่ย่านความถี่สูงๆ ซึ่งจากผลของสัญญาณที่ได้จากการจำลองได้ตัดเอาผลกระทบของสัญญาณทรานเซียนต์อื่นๆ ที่เป็นปัจจัยรบกวนภายนอกออกไป เช่น การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในสายส่งที่ขนาน

กัน, ฟ้าผ่าลงสายส่ง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนดังกล่าว จึงได้ปรับปรุงการวิเคราะห์ให้พิจารณาผลการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยที่องค์ประกอบความถี่ต่ำควบคุมไปด้วยนอกเหนือจากการพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูงเพียงอย่างเดียว และเพื่อให้สะดวกในการอธิบายจึงขอกำหนดตัวแปรเพื่อให้ใช้ในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงดังนี้

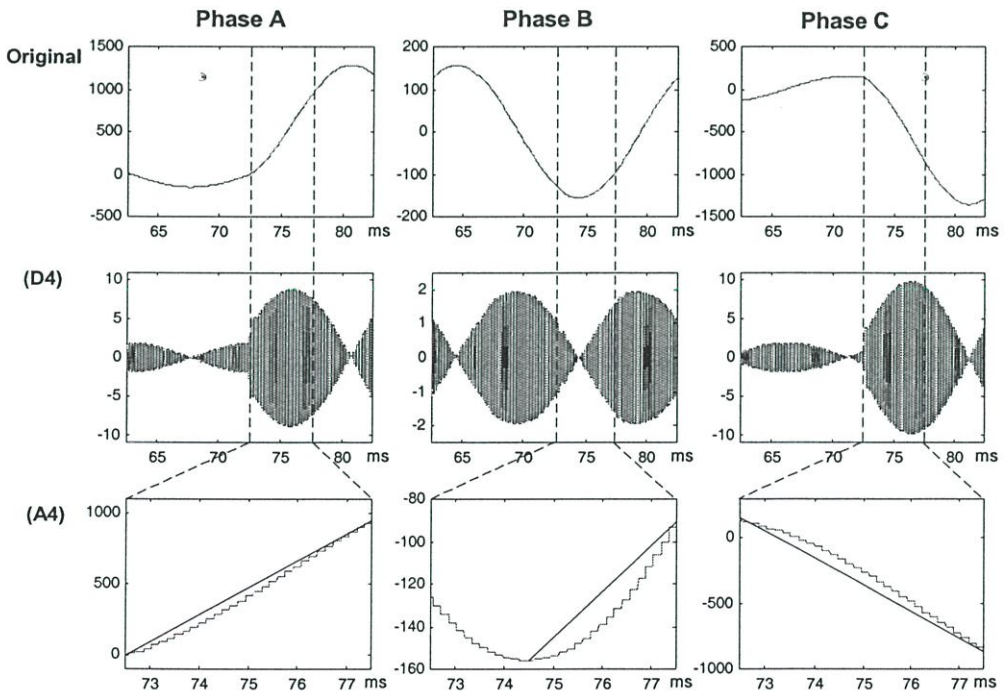
ตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

$I_A$ (max)	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสสูงสุดของเฟส A ในช่วง $1/4$ ไซเคิล
$I_B$ (max)	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสสูงสุดของเฟส B ในช่วง $1/4$ ไซเคิล
$I_C$ (max)	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสสูงสุดของเฟส C ในช่วง $1/4$ ไซเคิล
$I_A$ (min)	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดของเฟส A ในช่วง $1/4$ ไซเคิล
$I_B$ (min)	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดของเฟส B ในช่วง $1/4$ ไซเคิล
$I_C$ (min)	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดของเฟส C ในช่วง $1/4$ ไซเคิล
$I_{TR}$	คือ กระแสพิคคของหม้อแปลงทดสอบ
$t_A$ (max)	คือ ตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสสูงสุดของเฟส A
$t_B$ (max)	คือ ตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสสูงสุดของเฟส B
$t_C$ (max)	คือ ตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสสูงสุดของเฟส C
$t_A$ (min)	คือ ตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดของเฟส A
$t_B$ (min)	คือ ตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดของเฟส B
$t_C$ (min)	คือ ตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดของเฟส C
T	คือ คาบเวลาการวิเคราะห์ (ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ $1/50\text{Hz} = 20 \text{ ms}$ )

จากการปรับปรุงรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อลดข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณทรานเซียนด์รบกวนภายนอก โดยพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบของสัญญาณความถี่ต่ำ ดังนั้นตำแหน่งเวลาที่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะถูกนำมากำหนดเป็นจุดเริ่มต้นในการวิเคราะห์สัญญาณ Approximation ที่สเกลนั้นๆ จากนั้นจึงกำหนดช่วงข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ภายใน โชนป้องกัน โดยกำหนดให้เท่ากับ  $1/4$  ไซเคิลเริ่มต้นจากตำแหน่งเวลาดังกล่าว ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ข้อมูลกระแสของสัญญาณ Approximation สเกลที่ 4 ช่วง  $1/4$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลงจะแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12 สำหรับกรณีกระแสอินรัช และกรณีเกิดฟอลต์ชนิดเฟส A ถัดวงจรลงดิน ตามลำดับ



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 4 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ 1/4 ไซเคิล ณ จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย กรณีเกิดกระแสอินรัช



รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 4 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ 1/4 ไซเคิล ณ จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 4 ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย กรณีเกิดฟลัดซ์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน (A-N)

จากรูปที่ 5.11 และ 5.12 ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดและสูงสุดของสัญญาณ Approximation สเกลที่ 4 ในแต่ละเฟสจะถูกตรวจสอบในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์  $1/4$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งบันทึกค่าตำแหน่งเวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละเฟสด้วย จากนั้นข้อมูลกระแสที่ได้จะถูกปรับแต่งเพื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์กระแสในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์สอดคล้องกับพิกัดของหม้อแปลงทุกขนาด โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของจำนวนเท่าของขนาดกระแสพิกัดของหม้อแปลงกำลังนั้นๆ ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$\left. \begin{aligned} I_A \text{diff} &= \frac{I_A(\text{max}) - I_A(\text{min})}{I_{TR}} \\ I_B \text{diff} &= \frac{I_B(\text{max}) - I_B(\text{min})}{I_{TR}} \\ I_C \text{diff} &= \frac{I_C(\text{max}) - I_C(\text{min})}{I_{TR}} \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

ซึ่งจากกรณีตัวอย่างเราจะได้

กรณีกระแสอินรัศ

$$\begin{aligned} I_A \text{diff} &= \frac{5 - 0.2}{280} = 0.0171 \\ I_B \text{diff} &= \frac{3 - (-3)}{280} = 0.0214 \\ I_C \text{diff} &= \frac{0 - (-7.2)}{280} = 0.0257 \end{aligned}$$

กรณีฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง

$$\begin{aligned} I_A \text{diff} &= \frac{950 - 0}{280} = 3.3928 \\ I_B \text{diff} &= \frac{(-90) - (-155)}{280} = 0.2321 \\ I_C \text{diff} &= \frac{150 - (-850)}{280} = 3.5714 \end{aligned}$$

ในส่วนข้อมูลทางด้านเวลาที่จะถูกปรับแต่งให้สอดคล้องกับคาบเวลาเช่นกัน โดยช่วงเวลาระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากค่าต่ำสุดไปสูงสุดจะถูกเปรียบเทียบกับคาบเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังสมการที่ 5.2

$$\left. \begin{aligned} t_A \text{ diff} &= \frac{t_A(\text{max}) - t_A(\text{min})}{T} \\ t_B \text{ diff} &= \frac{t_B(\text{max}) - t_B(\text{min})}{T} \\ t_C \text{ diff} &= \frac{t_C(\text{max}) - t_C(\text{min})}{T} \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

เช่นเดียวกันจากกรณีตัวอย่างเราจะได้

กรณีกระแสอินรัช

$$\begin{aligned} t_A \text{ diff} &= \frac{76.8 - 73.45}{20} = 0.1675 \\ t_B \text{ diff} &= \frac{78.45 - 75.3}{20} = 0.1575 \\ t_C \text{ diff} &= \frac{78.45 - 75.3}{20} = 0.1575 \end{aligned}$$

กรณีฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง

$$\begin{aligned} t_A \text{ diff} &= \frac{77.49 - 72.49}{20} = 0.25 \\ t_B \text{ diff} &= \frac{77.49 - 74.5}{20} = 0.1495 \\ t_C \text{ diff} &= \frac{77.49 - 72.49}{20} = 0.25 \end{aligned}$$

### 5.5.1 พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลา

จากสมการที่ 5.1 และ 5.2 จะได้ขนาดของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสจากค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดเทียบกับกระแสพิคค์ของหม้อแปลง และช่วงเวลาที่ไ้ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ดังนั้นเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างขนาดของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดข้างต้นเทียบกับเวลาของการเปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ 5.3

$$\left. \begin{aligned} R_A &= \frac{I_A \text{diff}}{t_A \text{diff}} \\ R_B &= \frac{I_B \text{diff}}{t_B \text{diff}} \\ R_C &= \frac{I_C \text{diff}}{t_C \text{diff}} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

ดังนั้นจากกรณีตัวอย่างเราจะได้อ่า

กรณีกระแสอินรั้ช

$$R_A = \frac{0.0171}{0.1675} = 0.1023$$

$$R_B = \frac{0.0214}{0.1575} = 0.1361$$

$$R_C = \frac{0.0257}{0.1575} = 0.1633$$

กรณีฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง

$$R_A = \frac{3.3928}{0.25} = 13.5714$$

$$R_B = \frac{0.2321}{0.1495} = 1.5528$$

$$R_C = \frac{3.5714}{0.25} = 14.2857$$

ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาระหว่างกรณีกระแสอินรัชและกรณีฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ดังตารางที่ 5.1 สังเกตได้ว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วย วิธีการที่ 1 โดยเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงที่สุดของสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาในแต่ละเฟส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

ตารางที่ 5.1 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาของการแปลงเวฟ เล็ดเต็มหน่วย ตรีภาค Daubechies2 สเตจที่ 4

	กรณีกระแสอินรัช	กรณีฟอลต์ชนิด A-N
$R_A$	0.1023	13.5714
$R_B$	0.1361	1.5528
$R_C$	0.1633*	14.2857*
วิธีการที่ 1 (ค่าสูงสุด)	0.1633	14.2857
วิธีการที่ 2 (ผลรวม)	0.40167	29.4099

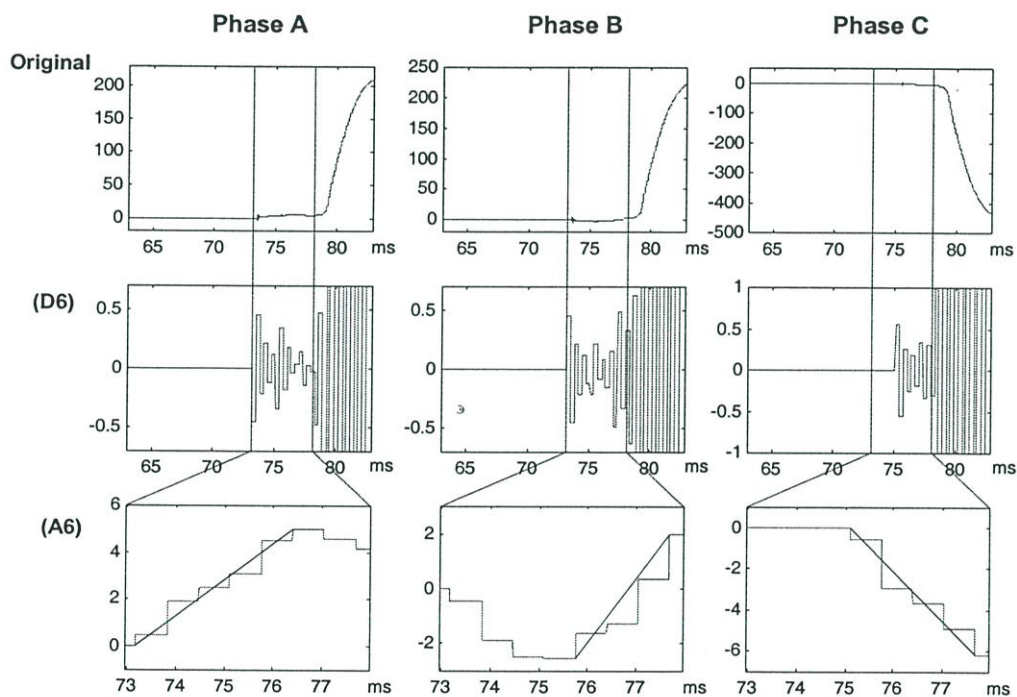
ตารางที่ 5.2 ผลการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

	กรณีกระแสอินรัช	กรณีฟอลต์ชนิด A-N
วิธีการที่ 1 (ค่าสูงสุด)	Inrush	Fault
วิธีการที่ 2 (ผลรวม)	Inrush	Fault

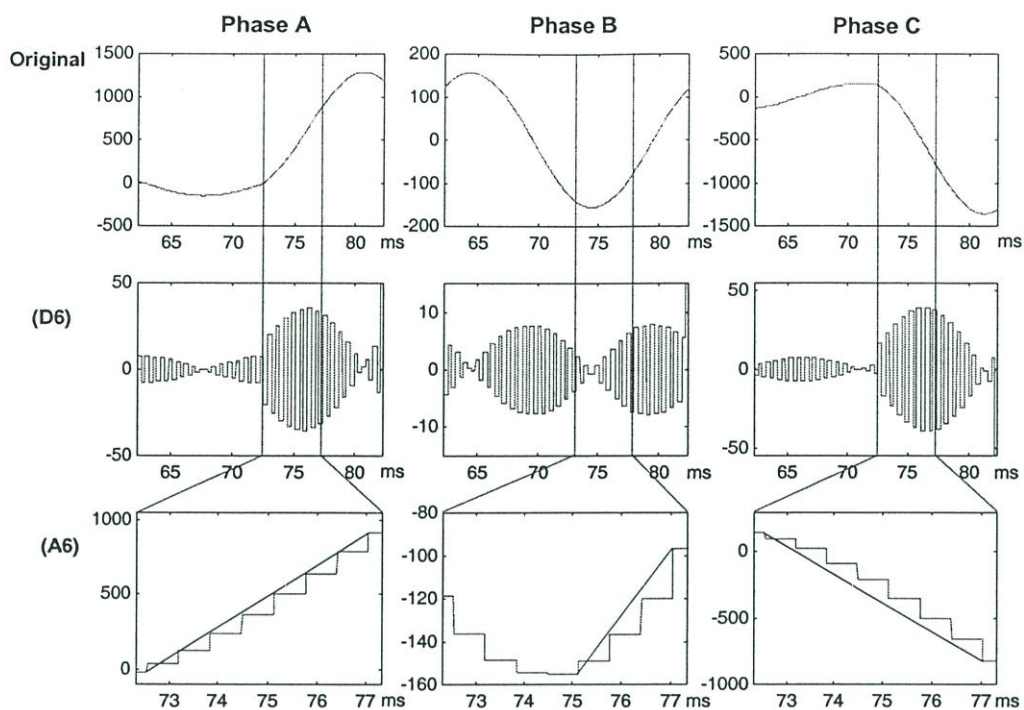
และเมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 2 คือเปรียบเทียบผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาในทุกเฟส ก็ยังสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของผลรวมการเปลี่ยนแปลงระหว่างกรณีกระแสอินรัชและกรณีฟอลต์ในโซนป้องกันได้อย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน ซึ่งจากการศึกษากับกลุ่มตัวอย่าง 448 กรณีศึกษา พบว่าทั้งสองวิธีสามารถให้ผลในการวิเคราะห์เพื่อแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงได้ แต่ให้ผลลัพธ์ในด้านความถูกต้องเฉลี่ยไม่เท่ากันในแต่ละสเตจการวิเคราะห์ ซึ่งจากการทดสอบค่าที่เหมาะสมซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อแบ่งแยกระหว่างทั้งสองกรณีและให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำที่สุดคือ เกณฑ์การเปลี่ยนแปลงที่ 7 โดยที่ “ อัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 7 ให้ถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนั้นเป็นฟอลต์ในโซนป้องกัน และหากอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 7 ให้ถือว่าการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นระหว่างการจ่ายไฟเข้าหม้อแปลง ” นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ยังประกอบด้วย มุมสวิตซ์ซึ่งที่เปลี่ยนไป, เวลาในการสับที่ไม่เท่ากันของเซอร์กิตเบรกเกอร์, รูปแบบ

ของพอลต์ภายในหม้อแปลงที่เกิดขึ้น, รูปแบบของเวฟเล็ด และตระกูลของเวฟเล็ดที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งจำเป็นต้องเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับสัญญาณวิเคราะห์เพื่อที่จะแสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างกรณีทั้งสอง ซึ่งในบทที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์โดยละเอียดเมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่กล่าวทั้งหมดข้างต้น กับผลการตอบสนองกรณีกระแสอินรัชและพอลต์ของหม้อแปลงทั้ง 2 ชนิด

เพื่อแสดงให้เห็นผลกระทบเบื้องต้นเกี่ยวกับความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่เปลี่ยนไปเมื่อปัจจัยในการวิเคราะห์ถูกปรับปรุง เมื่อนำกรณีศึกษาข้างต้นมาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ดตระกูล Daubechies 2 ที่สเกล 6 โดยรูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงสัญญาณ Details สเกลที่ 6 และสัญญาณ Approximation สเกลที่ 6 ช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังการเปลี่ยนแปลงของกรณีกระแสอินรัชและพอลต์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงคิน ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 6 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล ณ จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 6 ของการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย กรณีเกิดกระแสอินรัช



รูปที่ 5.14 แสดงสัญญาณ Approximation สเกลที่ 6 ในช่วงข้อมูลการวิเคราะห์  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล ณ จุดเริ่มต้นเดียวกับตำแหน่งที่ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงในสัญญาณ Details สเกลที่ 6 ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย กรณีเกิดฟอลต์ชนิดเฟส A ลัดวงจรลงดิน (A-N)

ตารางที่ 5.3 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาของการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วย ตรีโกณ Daubechies2 สเกลที่ 6

	กรณีกระแสอินรัช	กรณีฟอลต์ชนิด A-N
$R_A$	0.1074	13.6934
$R_B$	0.1167	1.3806
$R_C$	0.1280*	14.0779*
วิธีการที่ 1 (ค่าสูงสุด)	0.1280	14.0779
วิธีการที่ 2 (ผลรวม)	0.3521	29.1519

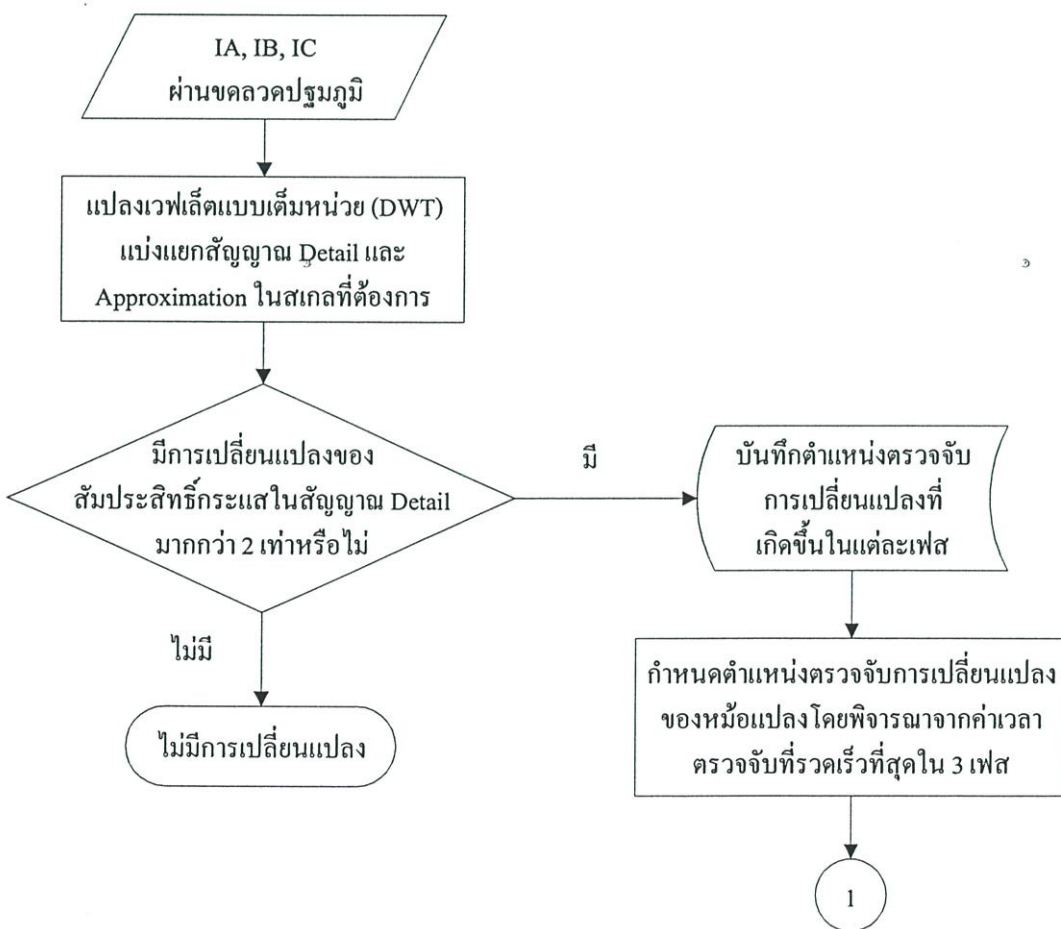
ตารางที่ 5.4 ผลการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง

	กรณีกระแสอินรัช	กรณีฟอลต์ชนิด A-N
วิธีการที่ 1 (ค่าสูงสุด)	Inrush	Fault
วิธีการที่ 2 (ผลรวม)	Inrush	Fault

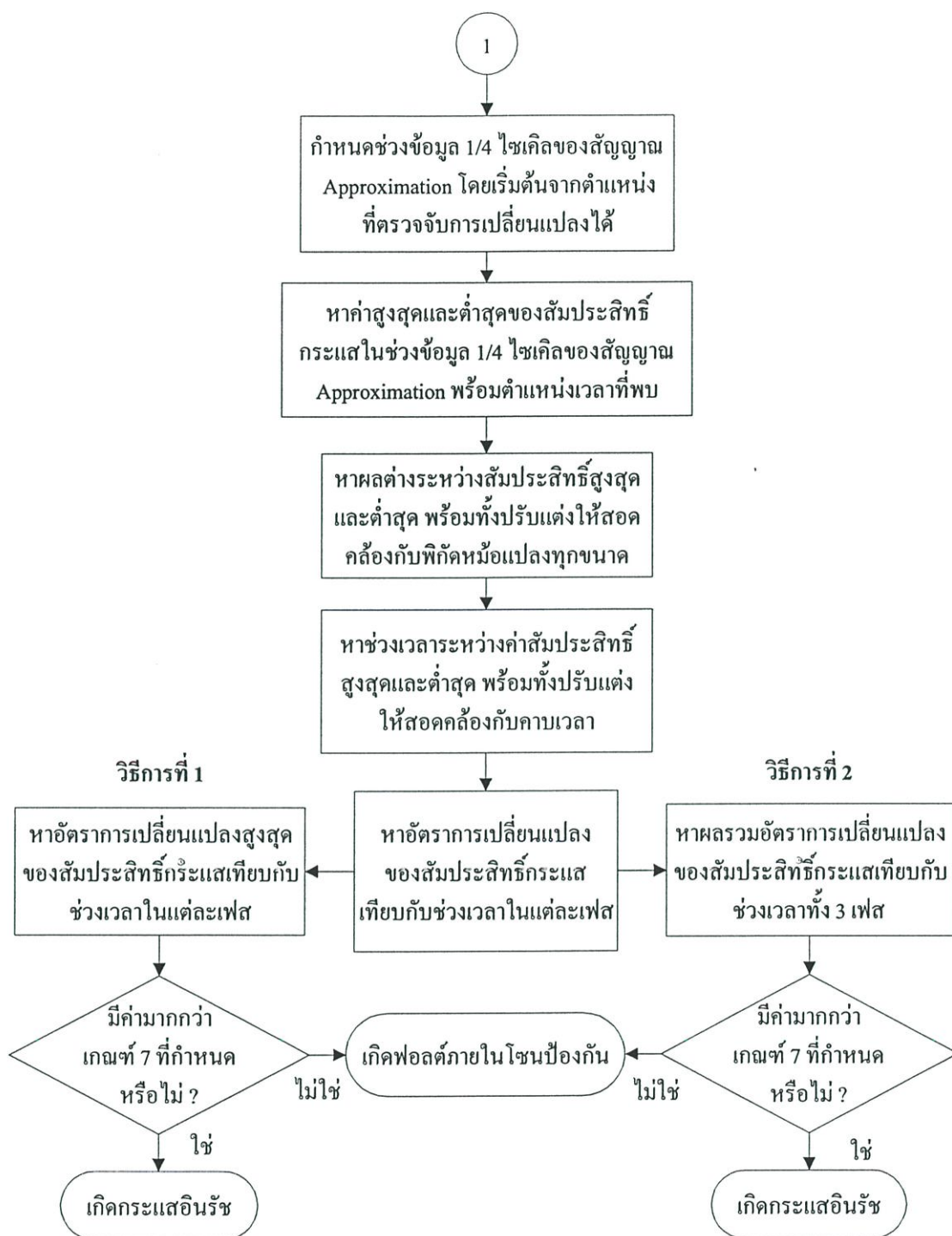
จากรูปที่ 5.13, 5.14 และผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.3 และ 5.4 สังเกตได้ว่าเมื่อทำการปรับปรุงเฉพาะสเกลที่ 4 เป็นสเกลที่ 6 โดยที่ยังคงชนิดของเวฟเล็ตที่ใช้ในการวิเคราะห์ไว้ พบว่าผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการที่ 1 และวิธีการที่ 2 ยังคงให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะพบว่า การปรับปรุงสเกลการวิเคราะห์จาก 4 เป็น 6 ซึ่งส่งผลโดยตรงให้ความละเอียดของอัตราการสุ่มข้อมูลลดลง จึงทำให้ข้อมูลตำแหน่งเวลาการตรวจจับมีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ช่วงของข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ขาดหายไปบางส่วน นอกจากนี้หากช่วงข้อมูลที่ขาดหายไปมีส่วนประกอบของค่าสัมประสิทธิ์กระแสต่ำสุดหรือสูงสุดด้วย ก็จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลามีความถูกต้องลดลงด้วย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงได้

### 5.6 แผนภาพสรุปการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย

จากรูปแบบและวิธีการที่ได้นำเสนอآنสามารถแสดงสรุปเป็นแผนภาพ (Flow chart) การวิเคราะห์ความแตกต่างได้ดังรูปที่ 5.15 - 5.16



รูปที่ 5.15 แผนภาพแสดงการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.16 แผนภาพแสดงการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงด้วยการพิจารณาจากผลการแปลงเวฟเล็คแบบเต็มหน่วยที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น จะสังเกตเห็นว่ามีการวิเคราะห์ประกอบกันทั้งสัญญาณความถี่สูงและความถี่ต่ำซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ในหม้อแปลง และที่สัญญาณความถี่ต่ำจะนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ๆ โดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งเวลาจากการวิเคราะห์สัญญาณความถี่สูงเพื่อกำหนดเป็นตำแหน่งเริ่มต้นในการวิเคราะห์ที่สัญญาณความถี่ต่ำด้วย อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์จากจุดต่ำสุดไปสู่จุดสูงสุดภายในคาบการวิเคราะห์  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลเทียบกับช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกใช้เป็นตัวตัดสินใจแบ่งแยกระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยเกณฑ์ในการตัดสินใจเท่ากับ 7 ซึ่งเกณฑ์ในการเปรียบเทียบและตัดสินใจที่นำเสนอนี้ได้มาจากการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ ในกลุ่มตัวอย่าง โดยที่รูปแบบการวิเคราะห์นี้จะ เป็นแนวทางให้สามารถนำไปวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ๆ ในรูปแบบ และหม้อแปลงอื่นๆ ได้ และเพื่อทดสอบรูปแบบการวิเคราะห์ๆ ที่เสนอนี้ จึงได้นำผลการจำลองกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ ทั้งหมดในบทที่ 4 มาทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอน โดยอาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นบนโปรแกรม MATLAB [33] เพื่อลดความซับซ้อนการทำงานด้วยมือ และกำจัดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้จากการวิเคราะห์ด้วยมนุษย์ ดังนั้นผลการทดลองและผลการวิเคราะห์นั้นได้ แสดงไว้ในบทที่ 6 ต่อไป

## บทที่ 6

### ผลการวิเคราะห์

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองตามแนวทางการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ที่เกิดขึ้นใน โชนป้องกันของ หม้อแปลงไฟฟ้าคังที่นำเสนอในบทที่ 5 โดยอาศัยแบบจำลองที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ตามรูปแบบและสมมุติฐานการจำลองในบทที่ 4 ซึ่งข้อมูลการวิเคราะห์โดยละเอียดบน โปรแกรม MATLAB [33] ตามแนวทางการศึกษานี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบเพื่อความสะดวกในการ นำเสนอได้ดังนี้

#### 6.1 รูปแบบการนำเสนอ

##### 6.1.1 ระบบการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

###### 6.1.1.1 กลุ่มของสมมุติฐานการจำลอง

- กรณีเกิดกระแสอินรัช กรณีนี้สัญญาณกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงทางฝั่งปฐมภูมิ จะมีความเพี้ยนอันเนื่องมาจากผลการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในหม้อแปลง ส่วนกระแสทางฝั่งทุติยภูมิจะมีขนาดเป็นศูนย์เนื่องจากหม้อแปลงไม่ได้ต่อ โหลด ซึ่งจะแสดงผลอยู่ในตารางที่ 6.1-6.2 และรูปที่ 6.1-6.4
- กรณีเกิดฟอลต์ในโชนป้องกันของหม้อแปลง กรณีนี้สัญญาณกระแสที่ไหล เข้าหม้อแปลงทางฝั่งปฐมภูมิจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามประเภท ของฟอลต์และมุมในขณะที่เกิดฟอลต์ ส่วนกระแสทางฝั่งทุติยภูมิที่ตรวจจับ ได้จากหม้อแปลงกระแสมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากเกิดการลัดวงจรภายใน โชน ป้องกันของหม้อแปลง ซึ่งจะแสดงผลอยู่ในตารางที่ 6.3-6.4 และรูปที่ 6.5-6.8
- กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลง กรณีนี้สัญญาณกระแสที่ไหลเข้า หม้อแปลงทางฝั่งปฐมภูมิจะประกอบไปด้วยสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากการ ลัดวงจรภายใน โชนป้องกัน และสัญญาณกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นขณะหม้อ แปลงถูกจ่ายไฟ ซึ่งจะแสดงผลอยู่ในตารางที่ 6.5-6.6 และรูปที่ 6.9-6.12

### 6.1.1.2 กลุ่มของแบบจำลองหม้อแปลงทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- หม้อแปลงทดสอบที่ 1 คือ หม้อแปลงไฟฟ้า ชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 พิกัดกำลัง 16 MVA พิกัดแรงดันไฟฟ้า 33/11.7 kV ซึ่งจะแสดงผลอยู่ในตารางที่ 6.1, 6.3 และ 6.5
- หม้อแปลงทดสอบที่ 2 คือ หม้อแปลงไฟฟ้า ชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 พิกัดกำลัง 200/200/50 MVA พิกัดแรงดันไฟฟ้า 230/121/22 kV ซึ่งจะแสดงผลอยู่ในตารางที่ 6.2, 6.4 และ 6.6

### 6.1.1.3 กลุ่มของการปรับเปลี่ยนการแปลงเวฟเล็ดโดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- การปรับเปลี่ยนชนิดเวฟเล็ดแม่และตระกูล เพื่อศึกษาหาเวฟเล็ดแม่ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ที่เกิดขึ้นใน โชนป้องกันของหม้อแปลง จากเวฟเล็ดแม่ 3 แบบ คือ Daubechies, Symlets และ Coiflets ที่มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณลักษณะทรานเซียนต์ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกตระกูลของแต่ละเวฟเล็ดแม่เพื่อความเหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ด้วย โดยในผลการวิเคราะห์นี้จะทำการปรับเปลี่ยนตระกูลการวิเคราะห์ของแต่ละเวฟเล็ดแม่เป็น ตระกูลที่ 2, 4, 6 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองตารางที่ 6.1-6.6 จะแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย เฉพาะเวฟเล็ดแม่ชนิด Daubechies ตระกูล 2 หรือเรียกย่อๆ ว่า Daubechies2 ที่สเกล 4 เท่านั้น ในส่วนการปรับเปลี่ยนอื่นๆ จะแสดงการวิเคราะห์ไว้ในตอนท้ายของบท
- การปรับเปลี่ยนสเกล เพื่อเลือกสเกลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ฯ โดยสเกลที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาของผู้วิจัย คือ สเกลที่สูงที่สุดที่ยังคงสามารถให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง หรือหมายความว่า ช่วงความถี่ของอัตราการสุ่มในการวิเคราะห์ที่น้อยที่สุดที่ยังคงให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์พัฒนาอุปกรณ์ (Hardware) ในอนาคต โดยการทดลองนี้ได้แบ่งสเกลการวิเคราะห์ออกเป็น 4 สเกล คือ สเกลที่ 2 ช่วงความถี่ระหว่าง 25-50 kHz, สเกลที่ 4 ช่วงความถี่ระหว่าง 6.25-12.5 kHz, สเกลที่ 6 ช่วงความถี่ระหว่าง 1.5625-3.125 kHz และสเกลที่ 8 ช่วงความถี่ระหว่าง 390.625-781.25 Hz

### 6.1.2 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละตาราง

การแสดงผลของตารางจะเรียงตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้น คือ การเกิดกระแสอินรัช, การเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกัน และการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลง โดยในแต่ละกรณีการเปลี่ยนแปลงจะประกอบด้วยหม้อแปลงทดสอบ 2 ชนิดดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในแต่ละตารางจะประกอบไปด้วย

**6.1.2.1 ผลการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างสัมประสิทธิ์การแปลงฯ ที่ตรวจวัดได้ก่อน และหลังการเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงกว่า 2 เท่า**

**6.1.2.2 ตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ โดยแสดงเปรียบเทียบกับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงตามการจำลอง และแสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งการตรวจจับ (Error) ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยผลการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยของสัญญาณกระแสทางฝั่งปฐมภูมิกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริงตามการจำลอง**

**6.1.2.3 การระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ผลด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย โดยแสดงเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ 2 แบบ คือ วิธีการที่ 1 จะวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าสูงสุดของผลแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยที่ผ่านการปรับค่าแล้วใน 3 เฟส และวิธีการที่ 2 จะวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าผลรวมของผลการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยที่ผ่านการปรับค่าแล้วใน 3 เฟส รายละเอียดการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยโดยละเอียดแสดงอยู่ในบทที่ 5**

**6.1.2.4 การเรียงลำดับตามสมมติการจำลอง คือ กรณีการเกิดกระแสอินรัช จะเรียงตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์, กรณีการเกิดฟอลต์ฯ จะเรียงตามประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้น และกรณีการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้กับหม้อแปลง จะเรียงตามประเภทของกราวด์ฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยแต่ละตารางจะเรียงตามมุมเฟสที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับมุมของแรงดันเฟส A โดยเรียงลำดับ ดังนี้ 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 และ 315 องศาไฟฟ้า ตามลำดับ**

### 6.1.3 รูปแสดงสรุปผลการทดลองที่ได้จากตาราง

เป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองที่ได้ในแต่ละตารางตามประเภทของหม้อแปลงทดสอบ และวิธีการวิเคราะห์ โดยแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด

## 6.2 ผลการทดลองในกรณีเกิดกระแสอินรัช

ในตารางผลการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นเฉพาะผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ได้จากการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย โดยเลือกใช้เวฟเล็ตแม่ Daubechies2 ที่สเกล 4 ในส่วนการเปรียบเทียบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนเวฟเล็ตแม่ และสเกลต่างๆ ได้แสดงไว้ในตอนท้ายของบทนี้

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Dyn11 พิกัด 17MVA กรณีเกิดกระแสอินรัช โดยใช้เวฟเล็ตแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4

ลำดับการ สับเบรก เกอร์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
A-B-C	0	ได้	72.5	73.45	0.048	0.16	Inrush	0.33	Inrush
	45	ได้	72.5	73.45	0.048	0.16	Inrush	0.40	Inrush
	90	ได้	72.5	73.45	0.048	2.15	Inrush	5.21	Inrush
	135	ได้	72.5	73.45	0.048	0.13	Inrush	0.35	Inrush
	180	ได้	72.5	73.45	0.048	0.16	Inrush	0.33	Inrush
	225	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.56	Inrush
	270	ได้	72.5	73.45	0.048	2.15	Inrush	5.21	Inrush
	315	ได้	72.5	73.45	0.048	0.13	Inrush	0.37	Inrush
A-C-B	0	ได้	72.5	73.45	0.048	0.09	Inrush	0.27	Inrush
	45	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.32	Inrush
	90	ได้	72.5	73.45	0.048	0.17	Inrush	0.36	Inrush
	135	ได้	72.5	73.45	0.048	1.82	Inrush	4.45	Inrush
	180	ได้	72.5	73.45	0.048	0.09	Inrush	0.27	Inrush
	225	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.32	Inrush
	270	ได้	72.5	73.45	0.048	0.17	Inrush	0.36	Inrush
	315	ได้	72.5	73.45	0.048	1.82	Inrush	4.45	Inrush
B-A-C	0	ได้	72.5	73.45	0.048	0.16	Inrush	0.33	Inrush
	45	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.56	Inrush
	90	ได้	72.5	73.45	0.048	2.15	Inrush	5.21	Inrush
	135	ได้	72.5	73.45	0.048	0.13	Inrush	0.35	Inrush
	180	ได้	72.5	73.45	0.048	0.16	Inrush	0.33	Inrush
	225	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.56	Inrush
	270	ได้	72.5	73.45	0.048	2.15	Inrush	5.21	Inrush
	315	ได้	72.5	73.45	0.048	0.13	Inrush	0.37	Inrush

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

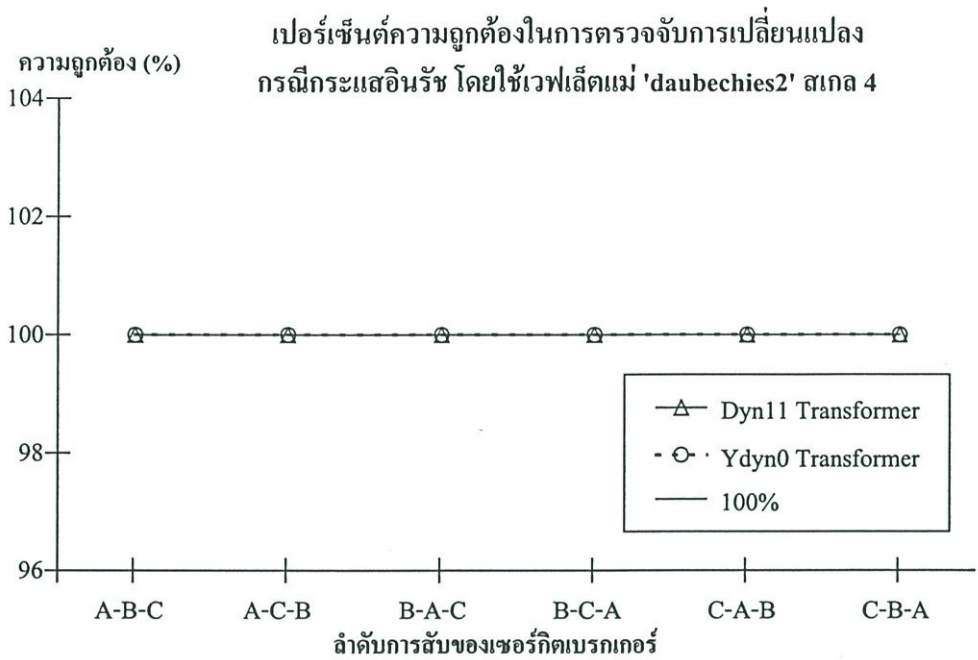
ลำดับการ สับเบรก เกอร์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพท์	ผลรวม	ผลลัพท์
B-C-A	0	ได้	72.5	73.45	0.048	0.09	Inrush	0.27	Inrush
	45	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.32	Inrush
	90	ได้	72.5	73.45	0.048	0.17	Inrush	0.36	Inrush
	135	ได้	72.5	73.45	0.048	1.82	Inrush	4.45	Inrush
	180	ได้	72.5	73.45	0.048	0.09	Inrush	0.27	Inrush
	225	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.32	Inrush
	270	ได้	72.5	73.45	0.048	0.17	Inrush	0.36	Inrush
	315	ได้	72.5	73.45	0.048	1.82	Inrush	4.45	Inrush
C-A-B	0	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.50	Inrush
	45	ได้	72.5	73.45	0.048	0.81	Inrush	1.63	Inrush
	90	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.38	Inrush
	135	ได้	72.5	73.45	0.048	0.15	Inrush	0.33	Inrush
	180	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.50	Inrush
	225	ได้	72.5	73.45	0.048	0.81	Inrush	1.63	Inrush
	270	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.36	Inrush
	315	ได้	72.5	73.45	0.048	0.15	Inrush	0.33	Inrush
C-B-A	0	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.50	Inrush
	45	ได้	72.5	73.45	0.048	0.81	Inrush	1.63	Inrush
	90	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.38	Inrush
	135	ได้	72.5	73.45	0.048	0.15	Inrush	0.33	Inrush
	180	ได้	72.5	73.45	0.048	0.22	Inrush	0.50	Inrush
	225	ได้	72.5	73.45	0.048	0.81	Inrush	1.63	Inrush
	270	ได้	72.5	73.45	0.048	0.14	Inrush	0.36	Inrush
	315	ได้	72.5	73.45	0.048	0.15	Inrush	0.33	Inrush

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Ydyn0 พิกัด 200MVA กรณีเกิด  
กระแสอินรัช โดยใช้เวฟเล็ทแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4

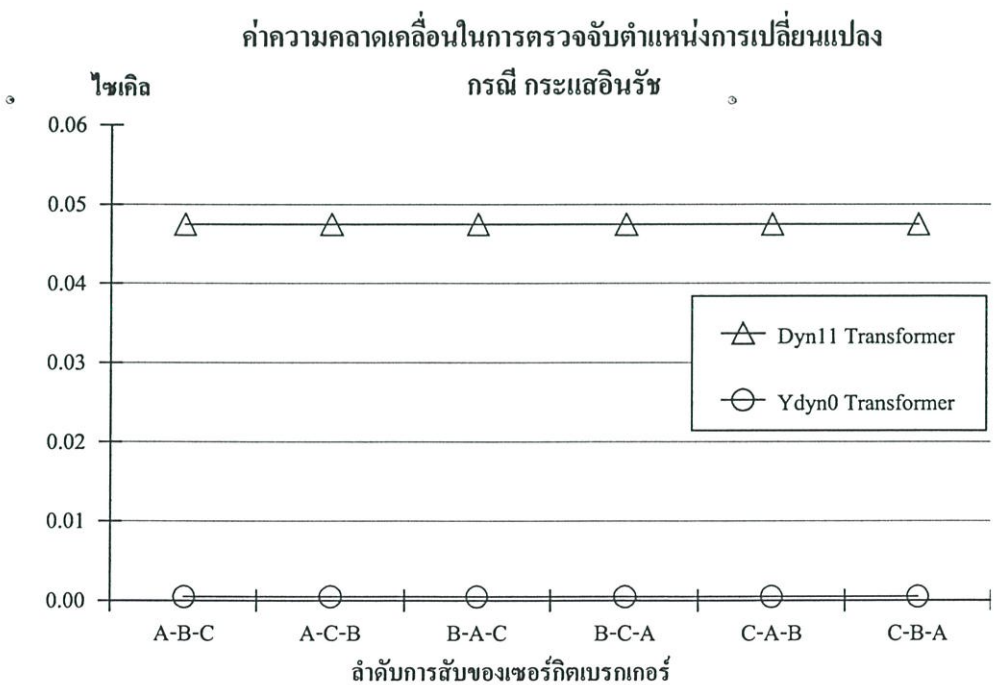
ลำดับการ สับเบรก เกอร์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุนชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพท์	ผลรวม	ผลลัพท์
A-B-C	0	ได้	72.5	72.49	0.001	0.06	Inrush	0.07	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	0.04	Inrush	0.07	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	0.28	Inrush	0.29	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	0.50	Inrush	0.89	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	0.06	Inrush	0.07	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	0.04	Inrush	0.06	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	0.31	Inrush	0.32	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	0.50	Inrush	0.89	Inrush
A-C-B	0	ได้	72.5	72.49	0.001	0.04	Inrush	0.07	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	0.06	Inrush	0.10	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	0.31	Inrush	0.35	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	0.76	Inrush	1.16	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	0.04	Inrush	0.06	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	1.14	Inrush	2.13 <sup>a</sup>	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	0.31	Inrush	0.35	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	1.17	Inrush	1.58	Inrush
B-A-C	0	ได้	72.5	72.49	0.001	0.56	Inrush	0.60	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	1.12	Inrush	2.06	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	0.12	Inrush	0.15	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	0.06	Inrush	0.11	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	0.56	Inrush	0.57	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	1.14	Inrush	2.13	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	0.12	Inrush	0.15	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	0.06	Inrush	0.11	Inrush

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

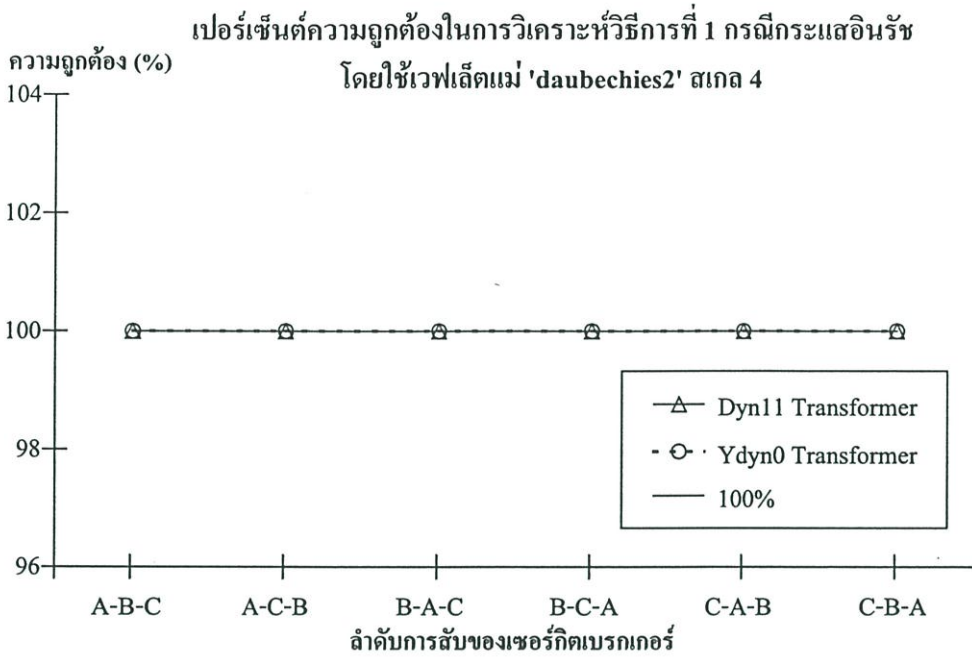
ลำดับการ สับเบรก เกอร์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุนิคตัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตา ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพท์	ผลรวม	ผลลัพท์
B-C-A	0	ได้	72.5	72.49	0.01	0.51	Inrush	0.96	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.01	0.34	Inrush	0.49	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.01	0.04	Inrush	0.08	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.01	1.19	Inrush	1.24	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.01	0.51	Inrush	0.96	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.01	0.34	Inrush	0.49	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.01	0.04	Inrush	0.08	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.01	1.19	Inrush	1.24	Inrush
C-A-B	0	ได้	72.5	72.49	0.01	0.55	Inrush	0.58	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.01	1.12	Inrush	1.15	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.01	0.05	Inrush	0.10	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.01	0.02	Inrush	0.04	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.01	0.55	Inrush	0.57	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.01	1.12	Inrush	1.15	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.01	0.05	Inrush	0.10	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.01	0.02	Inrush	0.04	Inrush
C-B-A	0	ได้	72.5	72.49	0.01	1.31	Inrush	1.71	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.01	0.27	Inrush	0.29	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.01	0.07	Inrush	0.12	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.01	1.20	Inrush	1.25	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.01	1.31	Inrush	1.71	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.01	0.41	Inrush	0.44	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.01	0.07	Inrush	0.12	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.01	1.20	Inrush	1.25	Inrush



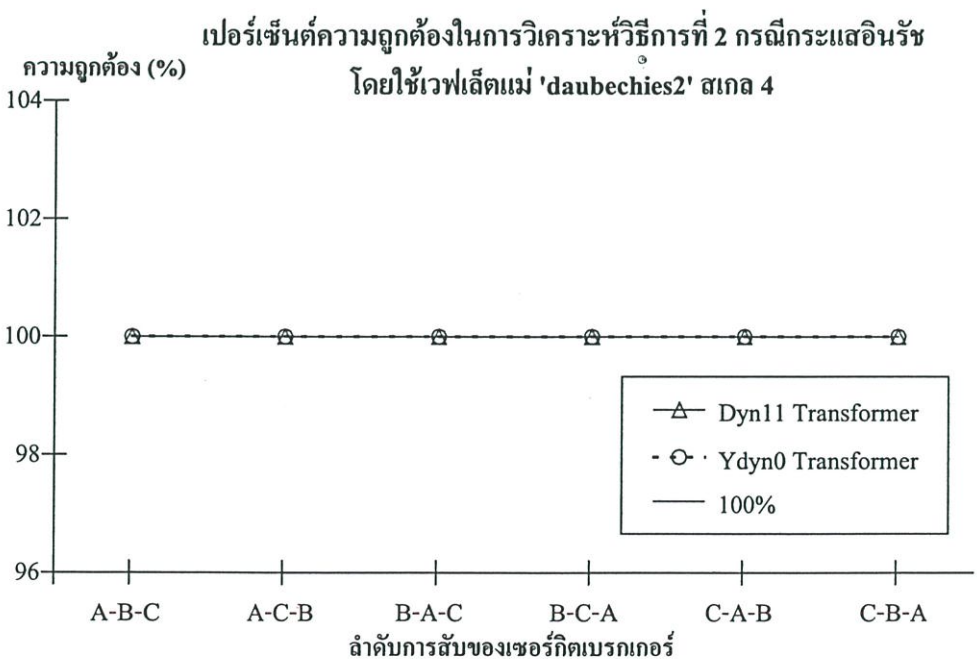
รูปที่ 6.1 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดกระแสอินรัช ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 6.2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดกระแสอินรัช ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 6.3 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ กรณีเกิดกระแสอินรัช ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าสูงสุดของการแปลงฯ (วิธีการที่ 1)



รูปที่ 6.4 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ กรณีเกิดกระแสอินรัช ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าผลรวมของการแปลงฯ (วิธีการที่ 2)

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.1-6.2 และรูปที่ 6.1-6.4 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับการเปลี่ยนแปลง ผลของการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในตารางที่ 6.1 และ 6.2 ประกอบกับรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่ากรณีเกิดกระแสอินรัช วิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตที่นำเสนอนี้สามารถตรวจจับกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงได้ถูกต้อง 100% ด้วยค่าพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ต เป็นเวฟเล็ต Daubechies ตระกูล 2 ที่สเกล 4

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง (เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริง ณ เวลา 72.5 ms)

ณ ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่า จะถูกเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริงตามการจำลองในบทที่ 4 ดังนั้นสังเกตได้ว่า ตำแหน่งที่ตรวจจับได้ของกรณีการเกิดกระแสอินรัช มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ที่  $1/4$  ไซเคิล จากรูปที่ 6.2 ค่าความคลาดเคลื่อนที่แสดงไว้คือ 0.048 ไซเคิล สำหรับกรณี หม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 และ 0.001 ไซเคิล กรณีหม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0

เมื่อพิจารณาจากผลการตรวจจับและค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ตำแหน่งตรวจจับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความแม่นยำสูงสามารถนำมาใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดจุดเริ่มต้นการวิเคราะห์เพื่อระบุคุณลักษณะระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ ในสัญญาณ Approximation สเกล 4 ต่อไปได้

การระบุประเภทระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ

โดยวิธีการที่ 1 จากรูปที่ 6.3 พบว่าสามารถระบุประเภทของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกรณีเกิดกระแสอินรัชได้ถูกต้อง 100% ทั้งในกรณีกลุ่มหม้อแปลงทดสอบชนิด Dyn11 หรือ Ydyn0 โดยวิธีการที่ 2 จากรูปที่ 6.4 พบว่าสามารถระบุประเภทของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกรณีเกิดกระแสอินรัชได้ถูกต้อง 100% ทั้งในกลุ่มหม้อแปลงทดสอบชนิด Dyn11 หรือ Ydyn0 เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 1

### 6.3 ผลการทดลองในกรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในตารางผลการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นเฉพาะผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ได้จากการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยเลือกใช้เวฟเล็ดแม่ Daubechies2 ที่สเกล 4 ในส่วนการเปรียบเทียบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนเวฟเล็ดแม่ และสเกลต่างๆ ได้แสดงไว้ในตอนท้ายของบทนี้

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Dyn11 พิกัด 17MVA กรณีเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกัน โดยใช้เวฟเล็ดแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4

ชนิดของฟอลต์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุนิคมัตถุญญการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตาไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
A-B	0	ได้	72.5	72.49	0.001	13.99	Fault	28.41	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	9.53	Fault	20.39	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	17.78	Fault	35.57	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	39.16	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	13.99	Fault	28.41	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	9.53	Fault	20.39	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	17.78	Fault	35.57	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	39.16	Fault
B-C	0	ได้	72.5	72.49	0.001	11.52	Fault	23.44	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	35.94	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	36.80	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	12.51	Fault	25.18	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	11.52	Fault	23.44	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	35.94	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	36.80	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	12.51	Fault	25.18	Fault
C-A	0	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	38.88	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	15.97	Fault	32.85	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	10.64	Fault	21.87	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	13.17	Fault	27.14	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	38.88	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	15.97	Fault	32.85	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	10.64	Fault	21.87	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	13.17	Fault	27.14	Fault

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

ชนิด ของพอลต์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่ 1		วิธีการที่ 2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
A-B-C	0	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	44.95	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	43.46	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	44.31	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	45.26	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	44.95	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	43.46	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	44.31	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	45.26	Fault
A-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	15.60	Fault	31.19	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	14.29	Fault	29.41	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	9.11	Fault	20.00	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	12.02	Fault	25.18	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	15.60	Fault	31.19	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	10.92	Fault	22.88	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	9.11	Fault	20.00	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	14.23	Fault	29.45	Fault
B-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	8.88	Fault	19.10	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	10.35	Fault	22.27	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	15.75	Fault	32.04	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	14.23	Fault	29.45	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	8.88	Fault	19.10	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	10.35	Fault	22.27	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	15.75	Fault	32.04	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	13.82	Fault	27.65	Fault

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

ชนิด ของฟอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
C-N	0	ได้	72.5	73.29	0.040	14.10	Fault	29.18	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	16.25	Fault	32.64	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	12.02	Fault	25.18	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	13.82	Fault	27.65	Fault
	180	ได้	72.5	73.29	0.040	14.10	Fault	29.18	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	16.25	Fault	32.64	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	12.02	Fault	25.18	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	7.43	Fault	17.17	Fault
AB-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	15.55	Fault	37.57	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	12.78	Fault	33.48	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	15.26	Fault	37.14	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	41.21	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	15.55	Fault	37.57	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	12.78	Fault	33.48	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	15.26	Fault	37.14	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	41.21	Fault
BC-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	14.49	Fault	36.01	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	40.24	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	41.16	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	14.91	Fault	36.90	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	14.49	Fault	36.01	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	40.24	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	41.16	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	14.91	Fault	36.90	Fault

ตารางที่ 6.3 (ต่อ)

ชนิด ของพอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตา ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
CA-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	40.92	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	15.97	Fault	38.65	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	13.30	Fault	34.61	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	15.23	Fault	36.92	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	40.92	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	15.97	Fault	38.65	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	13.30	Fault	34.61	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	15.23	Fault	36.92	Fault
ABC-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	44.95	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	43.46	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	44.31	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	45.26	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	19.44	Fault	44.95	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	17.97	Fault	43.46	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	18.40	Fault	44.31	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	19.58	Fault	45.26	Fault

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Ydyn0 พิกัด 200MVA กรณี

เกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกัน โดยใช้เวฟเล็ทแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4

ชนิด ของฟอลต์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
A-B	0	ได้	72.5	72.49	0.001	34.34	Fault	69.70	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	42.61	Fault	86.84	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	65.31	Fault	132.05	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	54.27	Fault	108.68	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	34.34	Fault	69.70	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	43.51	Fault	88.64	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	65.31	Fault	132.05	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	54.27	Fault	108.68	Fault
B-C	0	ได้	72.5	72.49	0.001	52.66	Fault	106.38	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	66.24	Fault	133.12	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	45.46	Fault	94.29	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	29.29	Fault	60.96	Fault
	180	ได้	72.5	72.65	0.008	52.66	Fault	106.38	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	66.24	Fault	133.12	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	45.46	Fault	94.29	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	29.29	Fault	60.96	Fault
C-A	0	ได้	72.5	72.49	0.001	62.51	Fault	125.00	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	40.31	Fault	81.95	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	37.37	Fault	76.59	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	59.79	Fault	121.54	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	62.51	Fault	125.00	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	40.31	Fault	81.95	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	37.37	Fault	76.59	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	59.79	Fault	121.54	Fault

ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

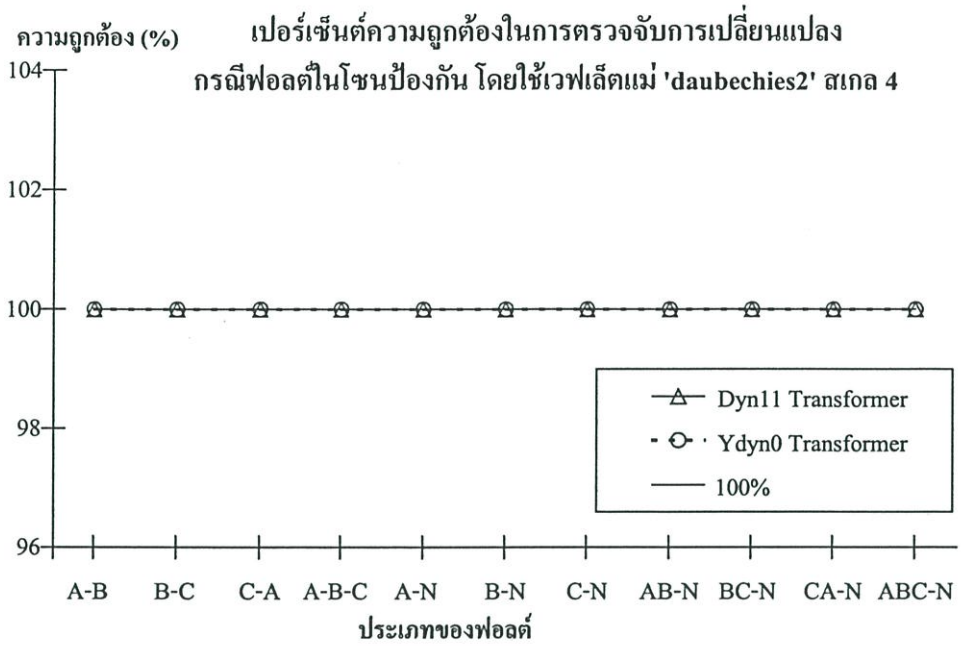
ชนิด ของพอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตา ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
A-B-C	0	ได้	72.5	72.49	0.001	74.53	Fault	169.13	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	68.86	Fault	165.18	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	71.08	Fault	170.19	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	75.50	Fault	174.05	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	74.53	Fault	169.13	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	68.86	Fault	165.18	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	71.08	Fault	170.19	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	75.50	Fault	174.05	Fault
A-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	54.01	Fault	60.94	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	34.56	Fault	41.36	Fault
	90	ได้	72.5	72.65	0.008	61.71	Fault	68.03	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	76.54	Fault	84.66	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	54.01	Fault	60.94	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	34.56	Fault	41.36	Fault
	270	ได้	72.5	72.65	0.008	61.71	Fault	68.03	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	76.54	Fault	84.66	Fault
B-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	43.15	Fault	49.47	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	69.53	Fault	76.19	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	71.60	Fault	80.20	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	48.57	Fault	55.66	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	43.15	Fault	49.47	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	70.11	Fault	76.89	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	71.60	Fault	80.20	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	48.57	Fault	55.66	Fault

ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

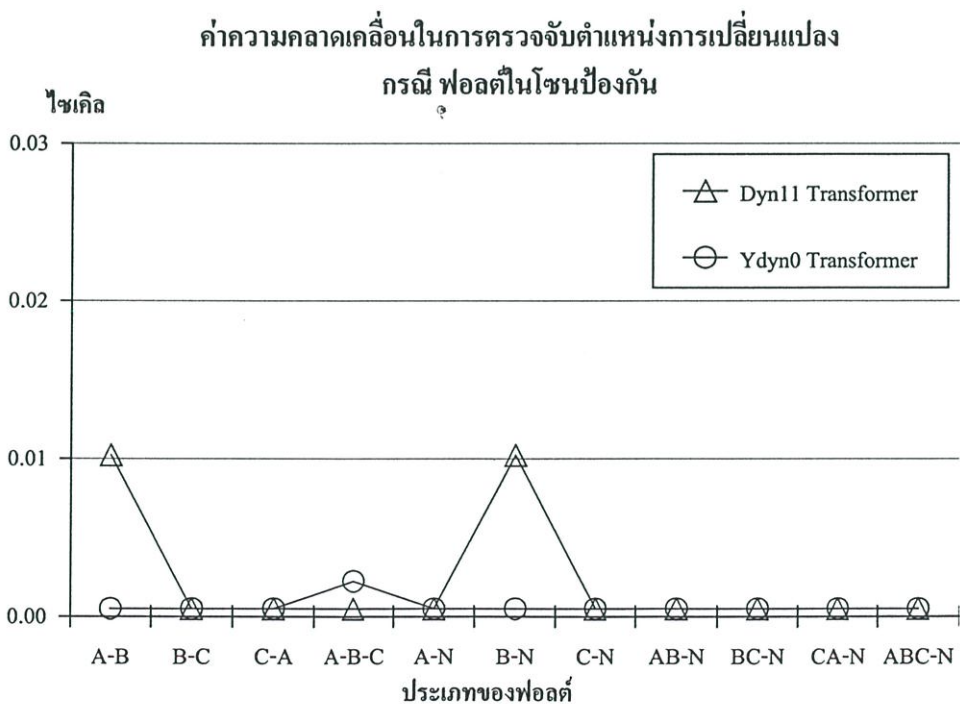
ชนิด ของพอลต์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
C-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	76.05	Fault	83.54	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	61.72	Fault	69.82	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	41.58	Fault	48.58	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	50.58	Fault	56.84	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	75.82	Fault	83.19	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	61.72	Fault	69.82	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	41.58	Fault	48.58	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	50.58	Fault	56.84	Fault
AB-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	53.60	Fault	101.56	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	69.89	Fault	109.61	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	71.20	Fault	132.71	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	76.18	Fault	126.78	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	53.60	Fault	101.56	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	69.89	Fault	109.61	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	71.20	Fault	132.71	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	76.18	Fault	126.78	Fault
BC-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	75.71	Fault	124.03	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	69.25	Fault	134.21	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	71.69	Fault	115.48	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	50.07	Fault	103.97	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	75.71	Fault	124.03	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	69.25	Fault	134.21	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	71.69	Fault	115.48	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	50.07	Fault	103.97	Fault

ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

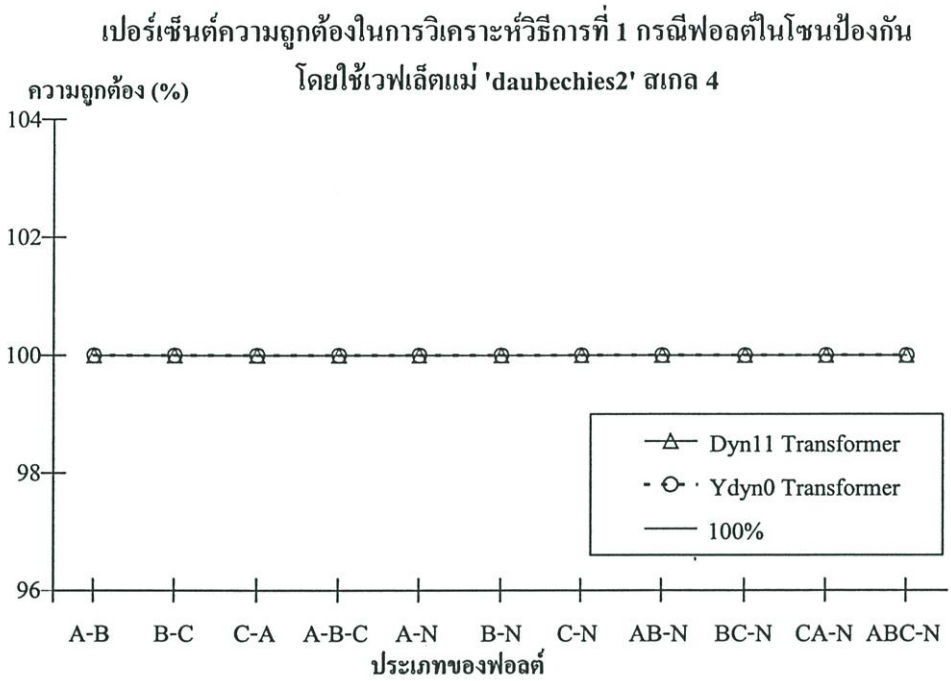
ชนิด ของพอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตา ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
CA-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	75.37	Fault	131.52	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	62.16	Fault	104.88	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	59.15	Fault	105.70	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	76.15	Fault	131.04	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	75.37	Fault	131.52	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	62.16	Fault	104.88	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	59.15	Fault	105.70	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	76.15	Fault	131.04	Fault
ABC-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	74.54	Fault	169.12	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	68.87	Fault	165.18	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	71.09	Fault	170.15	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	75.48	Fault	174.06	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	74.54	Fault	169.12	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	68.87	Fault	165.18	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	71.09	Fault	170.15	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	75.48	Fault	174.06	Fault



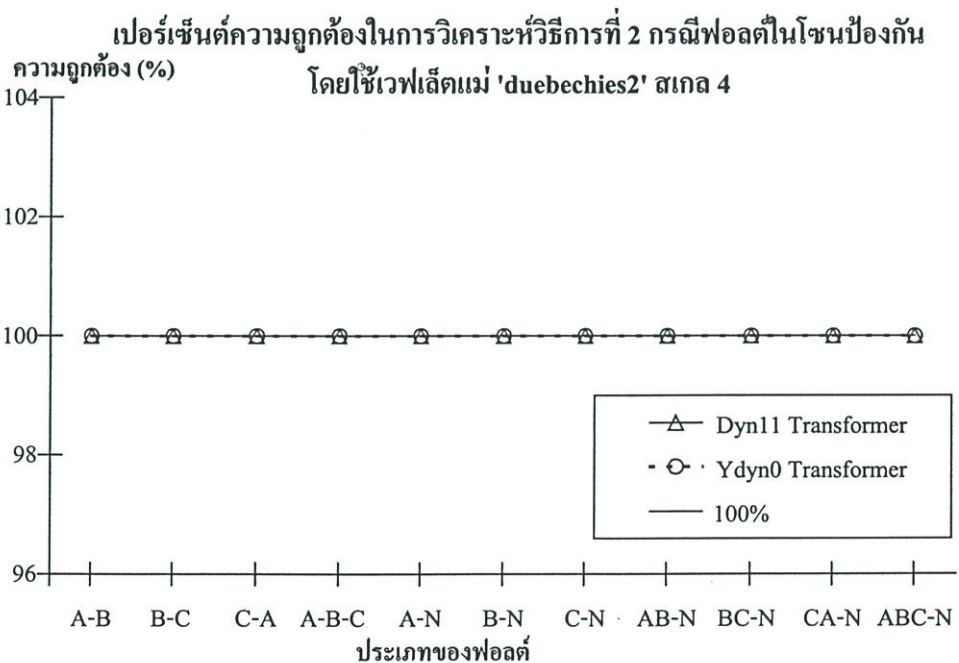
รูปที่ 6.5 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 6.6 แสดงค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 6.7 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าสูงสุดของการแปลงฯ (วิธีการที่ 1)



รูปที่ 6.8 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าผลรวมของการแปลงฯ (วิธีการที่ 2)

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.3-6.4 และรูปที่ 6.5-6.8 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับการเปลี่ยนแปลง ผลของการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในตารางที่ 6.3 และ 6.4 ประกอบกับรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าสำหรับกรณีเกิดฟอลต์ใน โซนป้องกันของหม้อแปลงวิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดที่นำเสนอนี้สามารถตรวจจับกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจาก สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงได้ถูกต้อง 100% ด้วยค่าพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ด เป็นเวฟเล็ดแม่ Daubechies ตระกูล 2 ที่สเกล 4

**ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง (เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริง ณ เวลา 72.5 ms)**

ณ ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่า จะถูกเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริงตามการจำลองในบทที่ 4 ดังนั้นสังเกตได้ว่า ตำแหน่งที่ตรวจจับได้ของกรณีการเกิดฟอลต์ใน โซนป้องกันของหม้อแปลง มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ที่  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล จากรูปที่ 6.6 ค่าความคลาดเคลื่อนที่แสดงไว้ กรณีหม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ส่วนใหญ่มีค่าเท่ากับ 0.001 ไซเคิล โดยที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.040 ไซเคิล และในกรณีหม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ส่วนใหญ่มีค่าเท่ากับ 0.001 ไซเคิล โดยที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.008 ไซเคิล

เมื่อพิจารณาจากผลการตรวจจับและความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ตำแหน่งตรวจจับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความแม่นยำสูงสามารถนำมาใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดจุดเริ่มต้นการวิเคราะห์เพื่อระบุคุณลักษณะระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ ในสัญญาณ Approximation สเกล 4 ต่อไปได้

**การระบุประเภทระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ๆ**

**โดยวิธีการที่ 1** จากรูปที่ 6.7 พบว่าสามารถระบุประเภทของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น กรณีเกิดฟอลต์ใน โซนป้องกันของหม้อแปลงได้ถูกต้อง 100% ทั้งในกรณีกลุ่มหม้อแปลงทดสอบชนิด Dyn11 หรือ Ydyn0

**โดยวิธีการที่ 2** จากรูปที่ 6.8 พบว่าสามารถระบุประเภทของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น กรณีเกิดฟอลต์ใน โซนป้องกันของหม้อแปลงได้ถูกต้อง 100% ทั้งในกลุ่มหม้อแปลงทดสอบชนิด Dyn11 หรือ Ydyn0 เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 1

#### 6.4 ผลการทดลองในกรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

ในตารางผลการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นเฉพาะผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ได้จากการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยเลือกใช้เวฟเล็ดแม่ Daubechies2 ที่สเกล 4 ในส่วนการเปรียบเทียบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนเวฟเล็ดแม่ และสเกลต่างๆ ได้แสดงไว้ในตอนท้ายของบทนี้

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Dyn11 พิกัด 17MVA กรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลง โดยใช้เวฟเล็ดแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2 สเกล 4

ชนิดของฟอลต์	ตรวจจับการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองคาไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
AN	0	ได้	72.5	72.49	0.001	55.52	Fault	56.61	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	34.25	Fault	35.32	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	55.57	Fault	56.42	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	74.62	Fault	74.66	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	55.52	Fault	56.61	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	34.25	Fault	35.32	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	55.57	Fault	56.51	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	74.62	Fault	74.66	Fault
BN	0	ได้	72.5	72.49	0.001	40.98	Fault	41.07	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	60.66	Fault	62.26	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	60.28	Fault	62.41	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	32.86	Fault	34.96	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	40.98	Fault	41.07	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	60.66	Fault	62.26	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	60.28	Fault	62.41	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	32.86	Fault	34.96	Fault
CN	0	ได้	72.5	72.49	0.001	2.87	Inrush	4.68	Inrush
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	1.27	Inrush	2.26	Inrush
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	1.44	Inrush	2.86	Inrush
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	1.18	Inrush	3.22	Inrush
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	1.13	Inrush	2.28	Inrush
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	1.27	Inrush	2.23	Inrush
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	1.44	Inrush	2.86	Inrush
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	1.49	Inrush	3.63	Inrush

ตารางที่ 6.5 (ต่อ)

ชนิด ของฟอลต์	ตรวจจบการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตา ไฟฟ้า	ตรวจจบ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจบได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพท์	ผลรวม	ผลลัพท์
AB-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	55.74	Fault	81.26	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	35.94	Fault	68.76	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	55.24	Fault	82.50	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	74.62	Fault	79.33	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	55.74	Fault	95.30	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	35.94	Fault	68.76	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	55.24	Fault	82.50	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	74.62	Fault	79.33	Fault
BC-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	25.11	Fault	26.34	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	71.55	Fault	73.81	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	27.61	Fault	29.49	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	5.45	Inrush	7.02	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	25.11	Fault	26.34	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	36.93	Fault	39.19	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	42.80	Fault	44.68	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	5.45	Inrush	7.02	Fault
CA-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	55.68	Fault	57.59	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	36.33	Fault	37.24	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	56.53	Fault	59.20	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	75.18	Fault	75.77	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	55.68	Fault	57.59	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	36.33	Fault	37.24	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	56.53	Fault	59.20	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	75.18	Fault	75.77	Fault

ตารางที่ 6.5 (ต่อ)

ชนิด ของฟอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
ABC-N	0	ได้	72.5	72.49	0.001	55.82	Fault	81.73	Fault
	45	ได้	72.5	72.49	0.001	36.08	Fault	68.36	Fault
	90	ได้	72.5	72.49	0.001	56.07	Fault	83.33	Fault
	135	ได้	72.5	72.49	0.001	75.09	Fault	84.40	Fault
	180	ได้	72.5	72.49	0.001	55.82	Fault	81.73	Fault
	225	ได้	72.5	72.49	0.001	36.08	Fault	68.36	Fault
	270	ได้	72.5	72.49	0.001	56.07	Fault	83.33	Fault
	315	ได้	72.5	72.49	0.001	75.09	Fault	80.13	Fault

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Ydyn0 พิกัด 200MVA กรณี

เกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้หม้อแปลง โดยใช้เวฟเส้นแม่ของการแปลงชนิด Daubechies2

สเกล 4

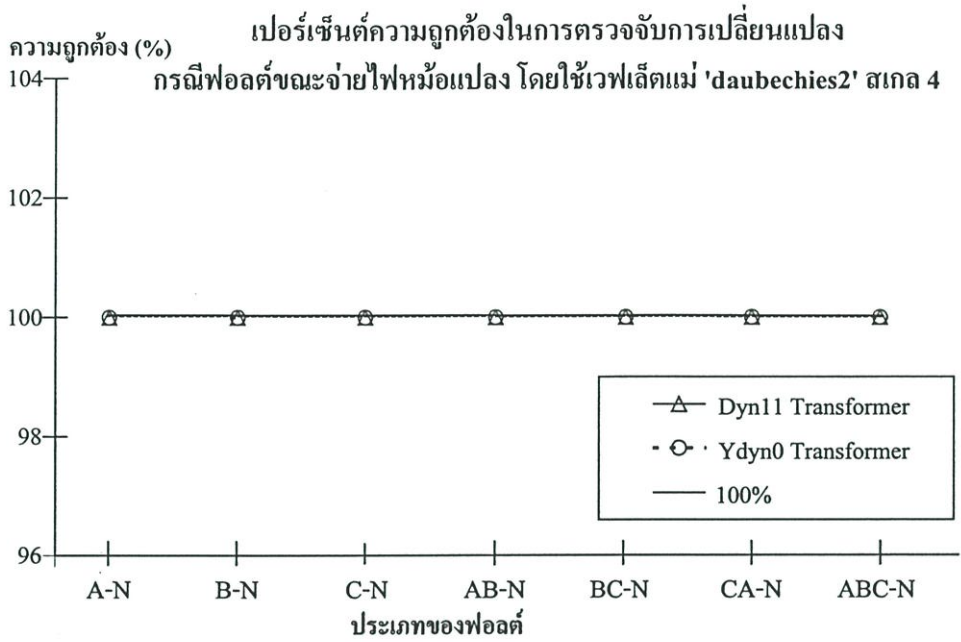
ชนิด ของฟอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
A-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	6.39	Inrush	12.88	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	5.35	Inrush	10.71	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	8.42	Fault	16.83	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	10.42	Fault	20.99	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	6.39	Inrush	12.88	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	5.35	Inrush	10.71	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	8.42	Fault	16.83	Fault
	315	ได้	72.5	73.45	0.05	10.42	Fault	20.99	Fault

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

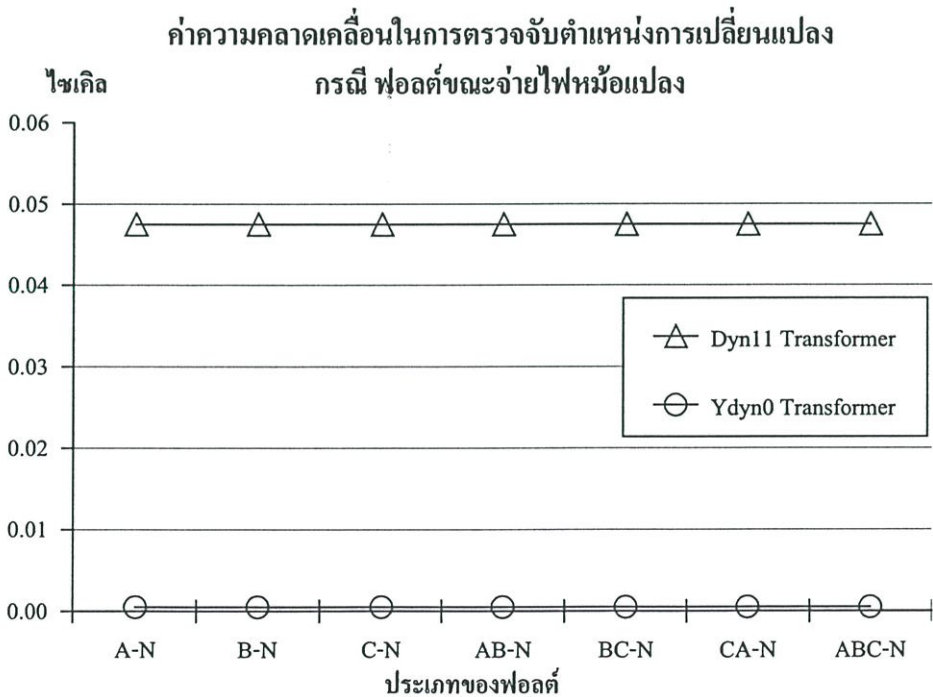
ชนิด ของพอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมองตา ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่ 1		วิธีการที่ 2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพท์	ผลรวม	ผลลัพท์
B-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	7.51	Fault	14.78	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	11.98	Fault	23.98	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	15.25	Fault	30.57	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	11.24	Fault	22.48	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	7.51	Fault	14.78	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	11.98	Fault	23.98	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	15.25	Fault	30.57	Fault
	315	ได้	72.5	73.45	0.05	11.24	Fault	22.48	Fault
C-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	16.16	Fault	26.72	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	8.45	Fault	16.91	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	9.23	Fault	16.60	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	10.48	Fault	17.00	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	16.16	Fault	26.72	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	9.71	Fault	18.47	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	9.23	Fault	16.60	Fault
	315	ได้	72.5	73.45	0.05	10.48	Fault	17.00	Fault
AB-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	11.77	Fault	27.35	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	12.70	Fault	26.54	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	19.02	Fault	38.05	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	16.27	Fault	39.52	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	11.77	Fault	27.35	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	12.70	Fault	27.34	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	19.02	Fault	38.05	Fault
	315	ได้	72.5	73.45	0.05	16.27	Fault	37.60	Fault

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

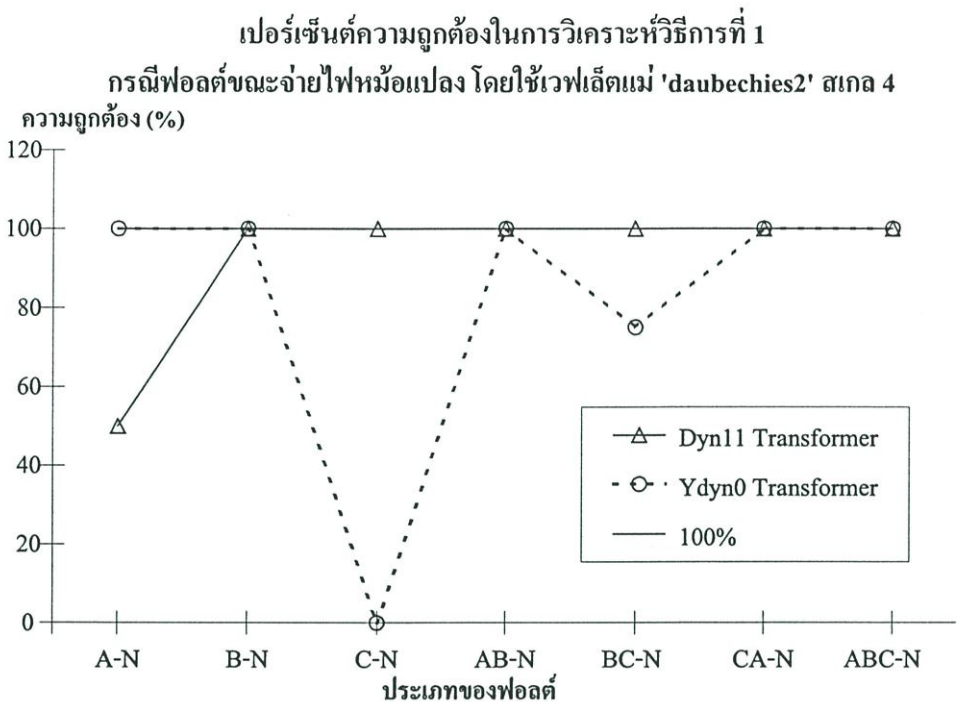
ชนิด ของฟอลต์	ตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง					ระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลง			
	มุมมอง ไฟฟ้า	ตรวจจับ	ตำแหน่ง (ms)		Error (cycle)	วิธีการที่1		วิธีการที่2	
			เริ่มต้นจริง	ตรวจจับได้ที่		ค่าสูงสุด	ผลลัพธ์	ผลรวม	ผลลัพธ์
BC-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	18.36	Fault	34.29	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	15.73	Fault	32.55	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	15.91	Fault	35.63	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	13.68	Fault	38.66	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	18.36	Fault	34.29	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	15.73	Fault	31.46	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	15.91	Fault	35.63	Fault
	315	ได้	72.5	73.45	0.05	12.57	Fault	33.81	Fault
CA-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	15.45	Fault	34.25	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	11.47	Fault	23.66	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	14.16	Fault	33.60	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	13.65	Fault	38.92	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	15.45	Fault	34.25	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	11.47	Fault	23.66	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	14.16	Fault	33.60	Fault
	315	ได้	72.5	73.45 <sup>o</sup>	0.05	13.65	Fault	38.92	Fault
ABC-N	0	ได้	72.5	73.45	0.05	18.42	Fault	38.40	Fault
	45	ได้	72.5	73.45	0.05	16.05	Fault	32.82	Fault
	90	ได้	72.5	73.45	0.05	19.73	Fault	44.09	Fault
	135	ได้	72.5	73.45	0.05	16.94	Fault	43.51	Fault
	180	ได้	72.5	73.45	0.05	18.42	Fault	38.40	Fault
	225	ได้	72.5	73.45	0.05	16.05	Fault	32.82	Fault
	270	ได้	72.5	73.45	0.05	19.73	Fault	44.09	Fault
	315	ได้	72.5	73.45	0.05	16.94	Fault	43.51	Fault



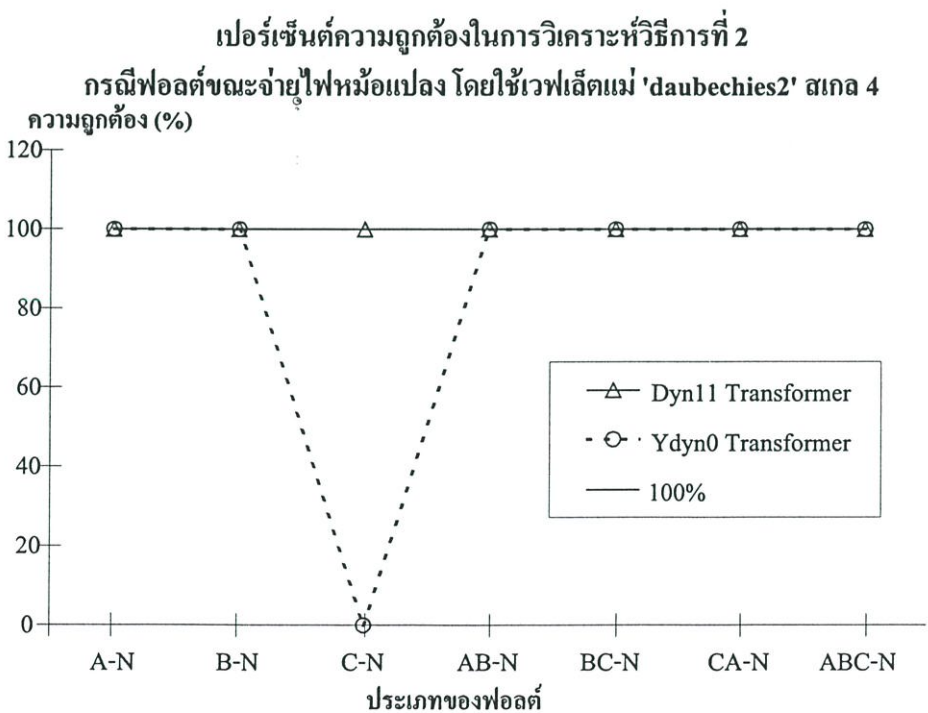
รูปที่ 6.9 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 6.10 แสดงค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 ตามลำดับการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์



**รูปที่ 6.11** แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าสูงสุดของการแปลงฯ (วิธีการที่ 1)



**รูปที่ 6.12** แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลง กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ระหว่างหม้อแปลงทดสอบ Dyn11 และ Ydyn0 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบพิจารณาค่าผลรวมของการแปลงฯ (วิธีการที่ 2)

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.5-6.6 และรูปที่ 6.9-6.12 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับการเปลี่ยนแปลง ผลของการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในตารางที่ 6.5 และ 6.6 ประกอบกับรูปที่ 6.9 แสดงให้เห็นว่าสำหรับกรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ วิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดที่นำเสนอนี้สามารถตรวจจับกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณกระแสทรานเซียนต์ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงได้ถูกต้อง 100% ด้วยค่าพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ด เป็นเวฟเล็ดแม่ Daubechies ตระกูล 2 ที่สเกล 4

**ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง (เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริง ณ เวลา 72.5 ms)**

ณ ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่า จะถูกเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริงตามการจำลองในบทที่ 4 ดังนั้นสังเกตได้ว่า ตำแหน่งที่ตรวจจับได้ของกรณีการเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ที่  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล จากรูปที่ 6.10 ค่าความคลาดเคลื่อนที่แสดงไว้ คือ 0.001 ไซเคิล ในกรณี หม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 และ 0.05 ไซเคิล กรณีหม้อแปลงกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0

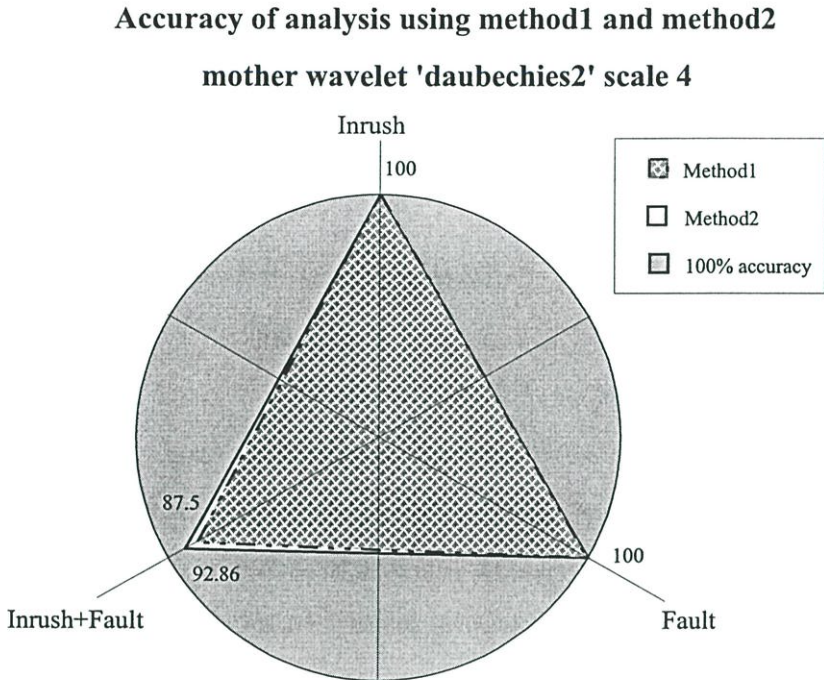
เมื่อพิจารณาจากผลการตรวจจับและความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ตำแหน่งตรวจจับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความแม่นยำสูงสามารถนำมาใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการกำหนดจุดเริ่มต้นการวิเคราะห์เพื่อระบุคุณลักษณะระหว่างกระแสในรัศและฟอลต์ๆ ในสัญญาณ Approximation สเกล 4 ต่อไปได้

**การระบุประเภทระหว่างกระแสในรัศและฟอลต์ๆ**

**โดยวิธีการที่ 1** จากรูปที่ 6.11 พบว่าสามารถระบุประเภทของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง โดยหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 จะสามารถระบุฟอลต์ประเภท 2 เฟสลงดินได้ถูกต้อง 100% ในขณะที่ยังระบุฟอลต์ประเภท 1 เฟสลงดินคลาดเคลื่อนบ้างโดยถูกต้องเฉลี่ย 83.33% สำหรับหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 มีการระบุฟอลต์ได้ไม่ค่อยชัดเจนมาก ด้วยความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับฟอลต์ทุกประเภทที่ 82.14%

**โดยวิธีการที่ 2** จากรูปที่ 6.12 พบว่าสามารถระบุประเภทของสัญญาณการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง โดยหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ลงดินทุกประเภทได้ถูกต้อง 100% สำหรับหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 สามารถระบุฟอลต์ประเภท 2 เฟสลงดินได้ถูกต้อง 100% ในขณะที่ยังระบุฟอลต์ประเภท 1 เฟสลงดินคลาดเคลื่อนบ้างโดยถูกต้องเฉลี่ย 83.33% เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 1

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณี คือ กรณีเกิดกระแสอินรัช, กรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลง และกรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ มาแสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความถูกต้อง โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 ได้ดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกกรณีทดสอบ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 โดยใช้เวฟเลต Daubechies 2 สเกลที่ 4

จากกราฟจะสังเกตได้ว่าวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 ซึ่งอาศัยค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตของสัญญาณ Approximation สเกล 4 ระหว่างกระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบทั้ง 3 เฟส ให้ผลความถูกต้องสำหรับกรณีเกิดกระแสอินรัช และกรณีเกิดฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงได้ถูกต้อง 100% เท่ากันกับวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 ซึ่งอาศัยค่าผลรวมของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตของสัญญาณ Approximation สเกล 4 ระหว่างกระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบทั้ง 3 เฟส ในขณะที่กรณีเกิดฟอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟวิธีการที่ 2 จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง 92.86% ซึ่งมากกว่าวิธีการที่ 1 คือ 87.50%

จากการวิเคราะห์ข้างต้นนี้แสดงให้เห็นชัดเจนถึงความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย โดยสำหรับกรณีทั่วไปที่หม้อแปลงมีการจ่ายไฟครั้งแรก หรือจ่ายไฟอยู่แล้วเกิดฟอลต์ขึ้นภายใน วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถให้ผลการระบุประเภทระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ได้ถูกต้อง 100% นอกจากนี้ในกรณีพิเศษสำหรับหม้อแปลงที่มีฟอลต์เกิดขึ้นขณะจ่าย

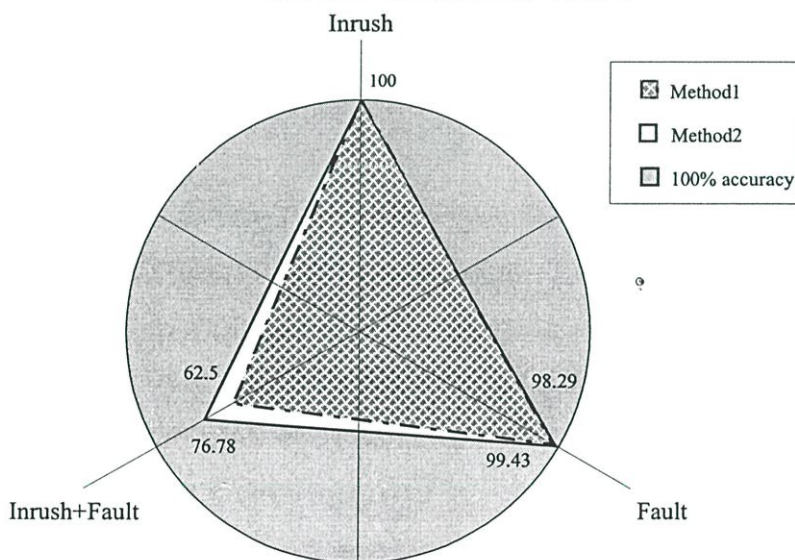
ไพนัน วิธีการวิเคราะห์นี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลการระบุประเภทระหว่างกระแสน้ำและพอลต์ฯ ได้ถูกต้องถึง 92.86%

## 6.5 การปรับปรุงพารามิเตอร์ของการแปลงเวฟเล็ต

สำหรับผลการทดลองทั้งหมดข้างต้นที่ได้แสดงมาเป็นเพียงผลการวิเคราะห์ เมื่อเลือกใช้เวฟเล็ตการแปลงฯ คือ Daubechies ตรีภูทที่ 2 สเกลที่ 4 เท่านั้น ซึ่งต่อไปจะเป็นการแสดงผลการวิเคราะห์เมื่อทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างสำหรับการแปลงเวฟเล็ตฯ เพื่อค้นหาลักษณะของเวฟเล็ตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทระหว่างกระแสน้ำและพอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ซึ่งรูปที่ 6.14 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณีโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ 1 และวิธีการที่ 2 เมื่อปรับปรุงสเกลในการวิเคราะห์เป็นสเกลที่ 8 ในขณะที่ยังคงเลือกเวฟเล็ตการแปลงฯ คือ Daubechies ตรีภูท 2

### Accuracy of analysis using method1 and method2

#### mother wavelet 'daubechies2' scale 8



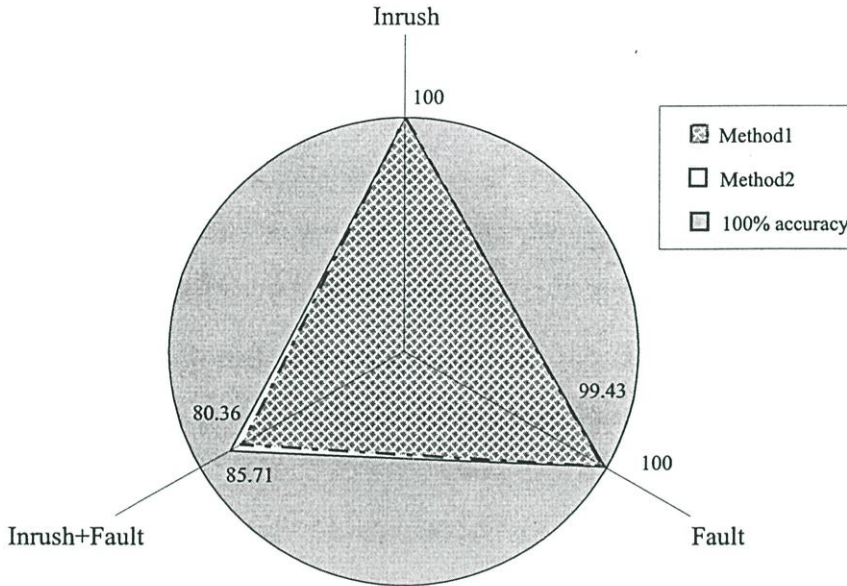
รูปที่ 6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกกรณีทดสอบ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 โดยใช้เวฟเล็ต Daubechies 2 สเกลที่ 8

จากกราฟรูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้รับผลกระทบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ตฯ ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ โดยกรณีนี้มีการปรับปรุงสเกลที่ใช้ในการวิเคราะห์จากสเกลที่ 4 ไปเป็นสเกลที่ 8 หรือจากช่วงความถี่ระหว่าง 6.25-12.5kHz ไปเป็นช่วงความถี่ระหว่าง 390.625-781.25Hz เพื่อตรวจสอบหาช่วงความถี่ที่น้อยที่สุด ที่ยังสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือ

ต่อมาเมื่อทำการทดลองปรับปรุงค่าพารามิเตอร์การแปลงฯ โดยเลือกเวฟเล็ตสำหรับการวิเคราะห์เป็นชนิด Coiflets 8 และยังคงเลือกสเกลการวิเคราะห์เดิมที่ สเกล 4 จะ ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 6.15

### Accuracy of analysis using method1 and method2

mother wavelet 'coiflets8' scale 4



รูปที่ 6.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกกรณีทดสอบ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ที่ 1 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 โดยใช้เวฟเล็ต Coiflets 8 สเกลที่ 4

จากกราฟรูปที่ 6.15 แสดงให้เห็นว่านอกเหนือการปรับปรุงสเกลที่ใช้ในการวิเคราะห์แล้ว การเลือกใช้เวฟเล็ตการแปลงและการเลือกตระกูลของเวฟเล็ตสำหรับการวิเคราะห์ก็ยังมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์กระแสที่เปลี่ยนแปลงในฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงด้วย สำหรับในรูปที่ 6.15 เป็นการปรับเปลี่ยนเวฟเล็ตการแปลงจาก Daubechies เป็น Coiflets และตระกูลของเวฟเล็ตจากตระกูลที่ 2 เป็นตระกูลที่ 8

จากกราฟรูปที่ 6.14 และ 6.15 สังเกตได้ว่าเมื่อปรับปรุงสเกลการวิเคราะห์จะมีผลกระทบต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าการปรับปรุงชนิดของเวฟเล็ตการแปลงและการเลือกตระกูลของเวฟเล็ตสำหรับการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามเพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดเงื่อนไขสำหรับการปรับปรุงพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยแบ่งลักษณะการปรับปรุงออกได้ดังนี้

### 6.5.1 การปรับปรุงเวฟเล็ตแม่

จะแบ่งลักษณะการวิเคราะห์โดยเลือกชนิดของเวฟเล็ตแม่ 3 ประเภท ที่มีเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณทรานเซียนด์ คือ Daubechies, Symlets และ Coiflets

### 6.5.2 การปรับปรุงตระกูลของเวฟเล็ต

ในแต่ละการทดลองจะปรับปรุงตระกูลของเวฟเล็ตที่ละ 2 หน่วย ทั้งหมด 5 ค่า คือ ตระกูลที่ 2, ตระกูลที่ 4, ตระกูลที่ 6, ตระกูลที่ 8 และตระกูลที่ 10

### 6.5.3 การปรับปรุงสเกลสำหรับการวิเคราะห์

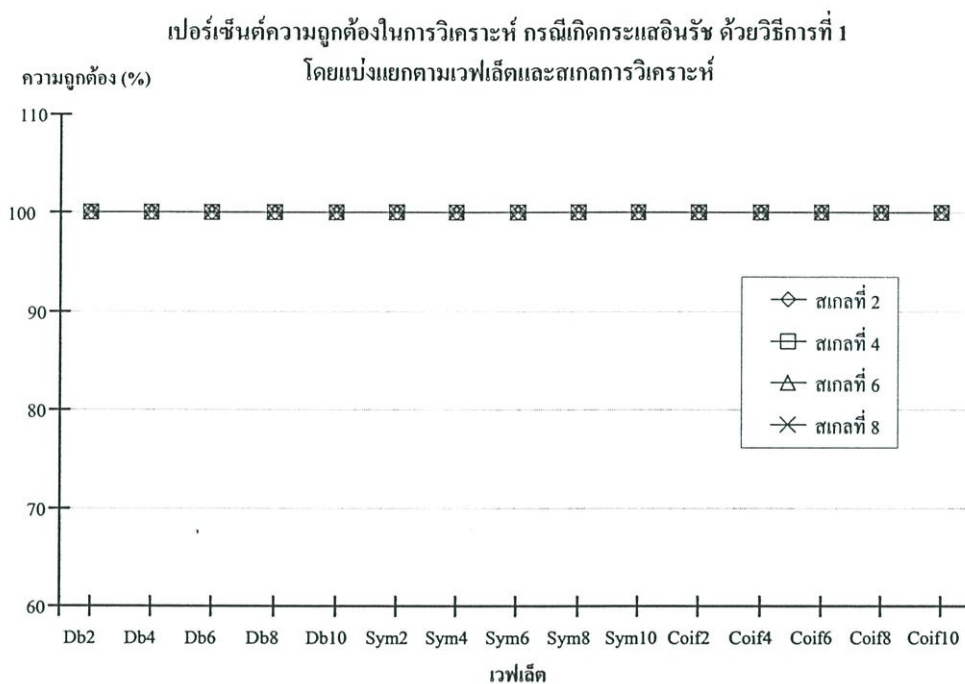
การปรับปรุงสเกลการวิเคราะห์จะค่อยๆ ลดช่วงความถี่ในการวิเคราะห์ครั้งละ 4 เท่า ทั้งหมด 4 สเกล คือ สเกลที่ 2, สเกลที่ 4, สเกลที่ 6 และสเกลที่ 8

สำหรับผลการวิเคราะห์เมื่อทำการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลง ตามเงื่อนไขข้างต้น จะแบ่งการแสดงผลออกตามกรณีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังนี้

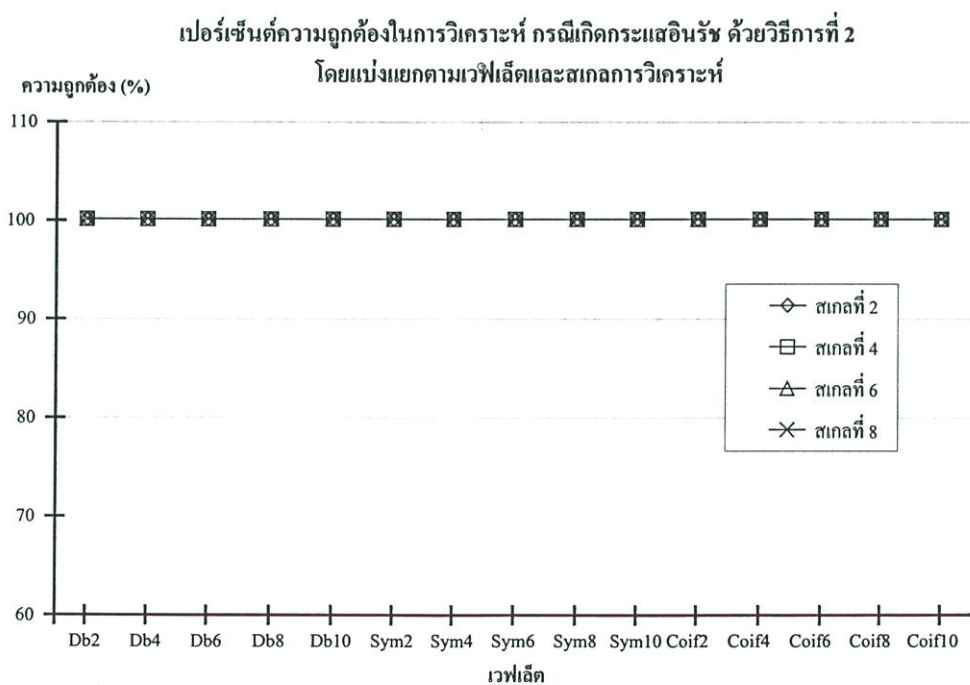
รูปที่ 6.16 และ 6.17 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสนินรัช โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการที่ 1 และวิธีการที่ 2 ตามลำดับ

รูปที่ 6.18 และ 6.19 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟลัดต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการที่ 1 และวิธีการที่ 2 ตามลำดับ

รูปที่ 6.20 และ 6.21 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟลัดต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการที่ 1 และวิธีการที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.16 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสน้ำ ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์



รูปที่ 6.17 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสน้ำ ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์

จากรูปที่ 6.16 และ 6.17 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### วิธีการวิเคราะห์ที่ 1

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ตามการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย

**ชนิดของเวฟเล็ดแม่** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสวนรัศในหม้อแปลงมีค่าถูกต้อง 100% ไม่ว่าจะเลือกใช้เวฟเล็ดแม่ชนิดใดในการวิเคราะห์

**ตระกูลของเวฟเล็ดการแปลงฯ** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าถูกต้อง 100% ไม่ว่าจะเลือกใช้ตระกูลของเวฟเล็ดการแปลงฯ เท่าใดในการวิเคราะห์

**สเกลการวิเคราะห์** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าถูกต้อง 100% ไม่ว่าจะเลือกใช้สเกลการวิเคราะห์เท่าใด

### วิธีการวิเคราะห์ที่ 2

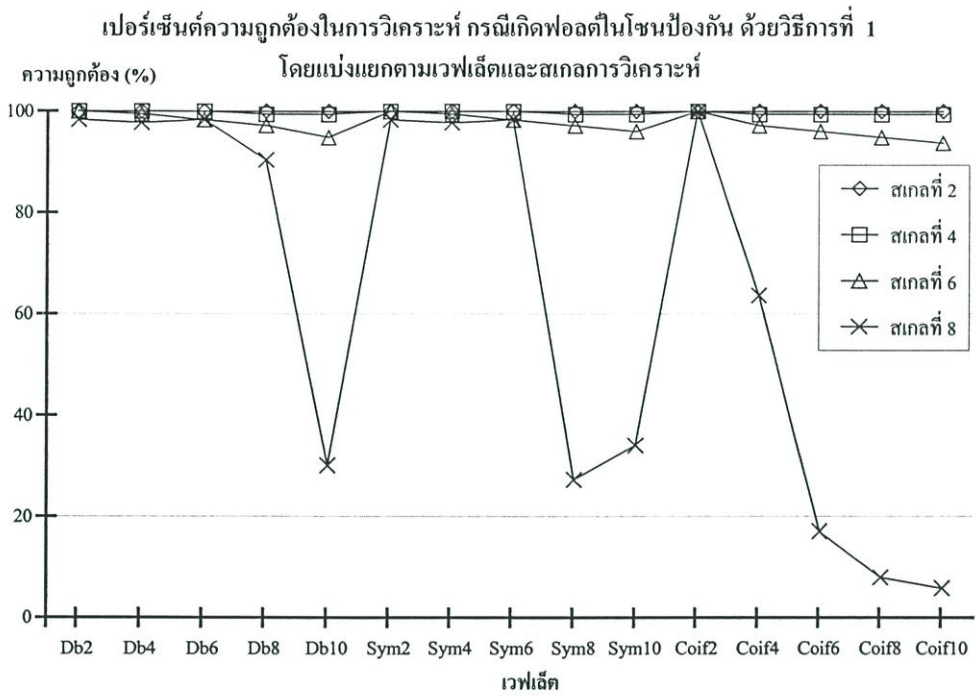
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ตามการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย

**ชนิดของเวฟเล็ดแม่** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดกระแสวนรัศในหม้อแปลงมีค่าถูกต้อง 100% ไม่ว่าจะเลือกใช้เวฟเล็ดแม่ชนิดใดในการวิเคราะห์

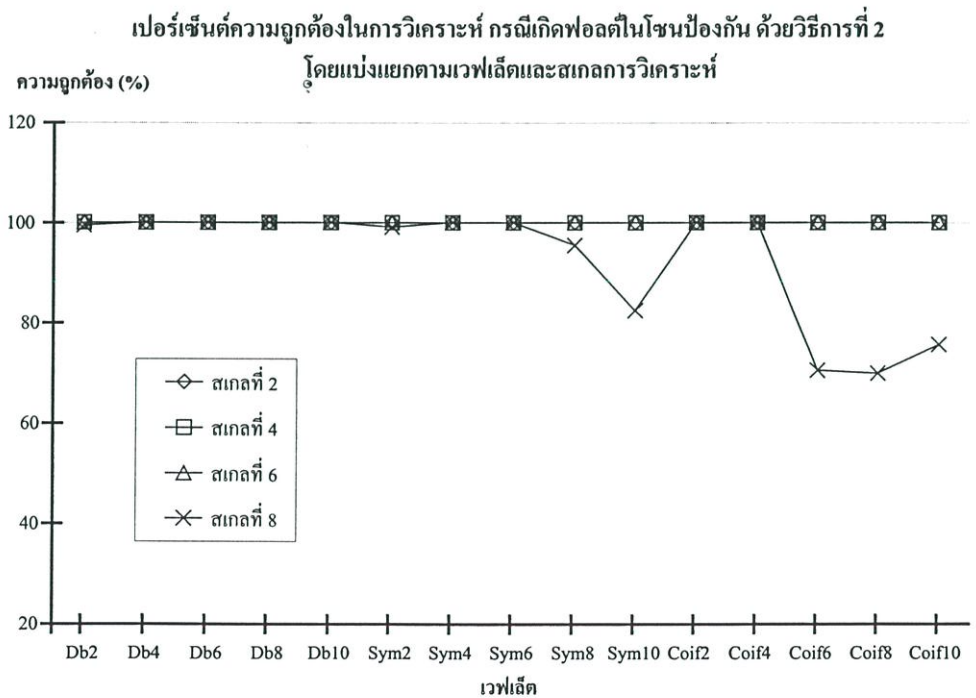
**ตระกูลของเวฟเล็ดการแปลงฯ** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าถูกต้อง 100% ไม่ว่าจะเลือกใช้ตระกูลของเวฟเล็ดการแปลงฯ เท่าใดในการวิเคราะห์

**สเกลการวิเคราะห์** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าถูกต้อง 100% ไม่ว่าจะเลือกใช้สเกลการวิเคราะห์เท่าใด

แสดงให้เห็นว่าจากคุณลักษณะเฉพาะของกระแสวนรัศที่เกิดขึ้น ดังนั้นถึงแม้ว่าจะพารามิเตอร์การแปลงฯ จะเปลี่ยนแปลงไป ก็ยังให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง 100%



รูปที่ 6.18 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์



รูปที่ 6.19 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์

จากรูปที่ 6.18 และ 6.19 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### วิธีการวิเคราะห์ที่ 1

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ตามการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย

**ชนิดของเวฟเล็ทแม่** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ในกรณีเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง มีผลวิเคราะห์คล้ายกัน ไม่ว่าจะเลือกใช้เวฟเล็ทแม่ชนิดใด โดยมีค่าตั้งแต่ต่ำๆ ไปจนถูกต้อง 100% โดยส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงตามตระกูลที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ เบื้องต้นพบว่าตระกูล Daubechies และ Symlets จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงกว่า Coiflets

**ตระกูลของเวฟเล็ทการแปลงฯ** โดยส่วนใหญ่เมื่อตระกูลของเวฟเล็ทการแปลงฯ มีค่าสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ จะมีค่าลดลง สังเกตการเปลี่ยนแปลงจากสเกลที่ 8 ไปยัง 10 ของเวฟเล็ท Daubechies

**สเกลการวิเคราะห์** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าลดลง เมื่อสเกลที่ใช้การวิเคราะห์เพิ่มขึ้น หรือช่วงความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าช่วงจากสเกลที่ 6 ไป 8 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็ว

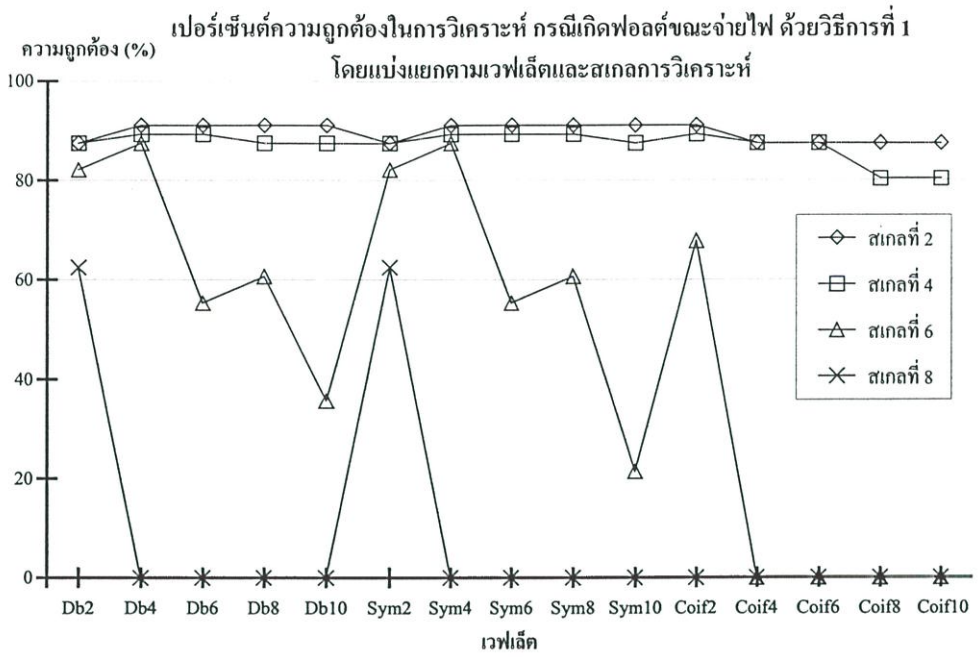
### วิธีการวิเคราะห์ที่ 2

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ตามการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย

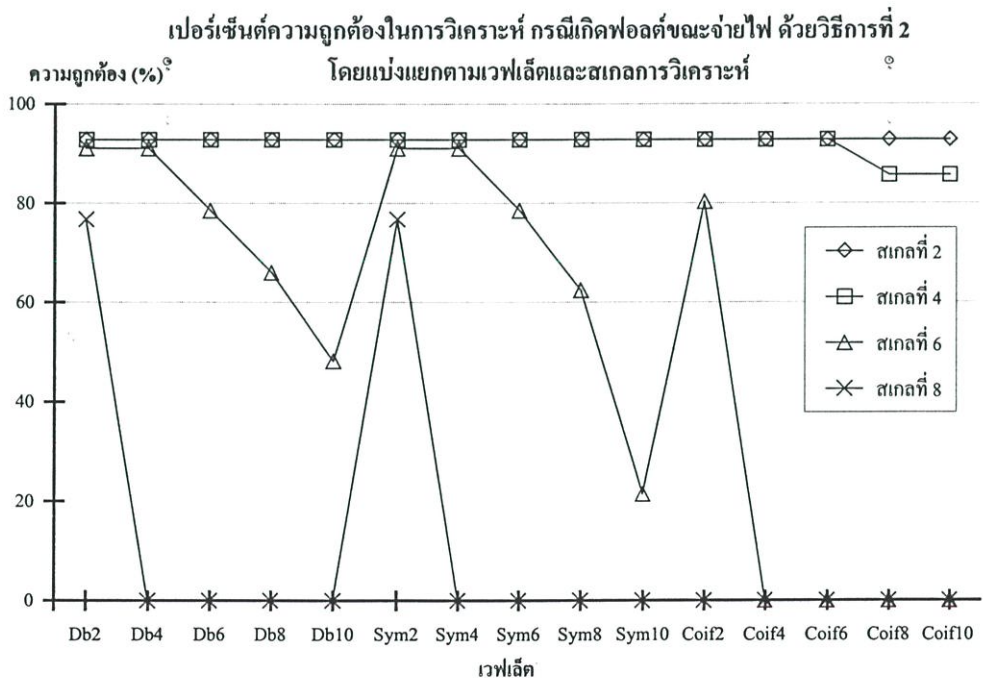
**ชนิดของเวฟเล็ทแม่** สังเกตได้ชัดเจนว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีเกิดฟอลต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง เมื่อเลือกใช้เวฟเล็ทแม่ชนิด Daubechies จะให้ความถูกต้องสูงสุด ส่วน Coiflets จะมีค่าต่ำสุด นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์ที่ 2 ให้ผลความถูกต้องสูงกว่าวิธีการที่ 1 มาก

**ตระกูลของเวฟเล็ทการแปลงฯ** พบว่าเมื่อตระกูลของเวฟเล็ทการแปลงฯ มีค่าสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ฯ จะมีค่าลดลง สังเกตได้ชัดเจนในช่วงจากสเกลที่ 8 ไปยัง 10 ของเวฟเล็ท Symlets ซึ่งคล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 1 แต่ให้ผลความถูกต้องในการวิเคราะห์ที่สูงกว่ามากในทุกด้าน

**สเกลการวิเคราะห์** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าลดลง เมื่อสเกลที่ใช้การวิเคราะห์เพิ่มขึ้น หรือช่วงความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่าช่วงจากสเกลที่ 6 ไป 8 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6.20 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีกเกิดพอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามเวฟเลตและสเกลการวิเคราะห์



รูปที่ 6.21 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีกเกิดพอลต์ขณะหม้อแปลงจ่ายไฟ ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามเวฟเลตและสเกลการวิเคราะห์

จากรูปที่ 6.20 และ 6.21 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### วิธีการวิเคราะห์ที่ 1

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ตามการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย

**ชนิดของเวฟเล็ทแม่** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ กรณีห้อยแปลงเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟ จะมีค่าต่ำกว่ากรณีเกิดกระแสอินรัชหรือฟอลต์ใน โชนป้องกันเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของเวฟเล็ทแม่ พบว่าค่าเฉลี่ยความถูกต้องมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 100% โดยส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงตามตระกูลที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ เบื้องต้นพบว่าตระกูล Daubechies และ Symlets จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงกว่า Coiflets

**ตระกูลของเวฟเล็ทการแปลง** โดยส่วนใหญ่เมื่อตระกูลของเวฟเล็ทการแปลง มีค่าสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ จะมีค่าลดลง สังเกตได้ชัดเจนในช่วงจากสเกลที่ 8 ไปยัง 10 ของเวฟเล็ท Symlets

**สเกลการวิเคราะห์** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าลดลง เมื่อสเกลที่ใช้การวิเคราะห์เพิ่มขึ้น หรือช่วงความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น พบว่าในช่วงจากสเกลที่ 6 ไป 8 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็ว

### วิธีการวิเคราะห์ที่ 2

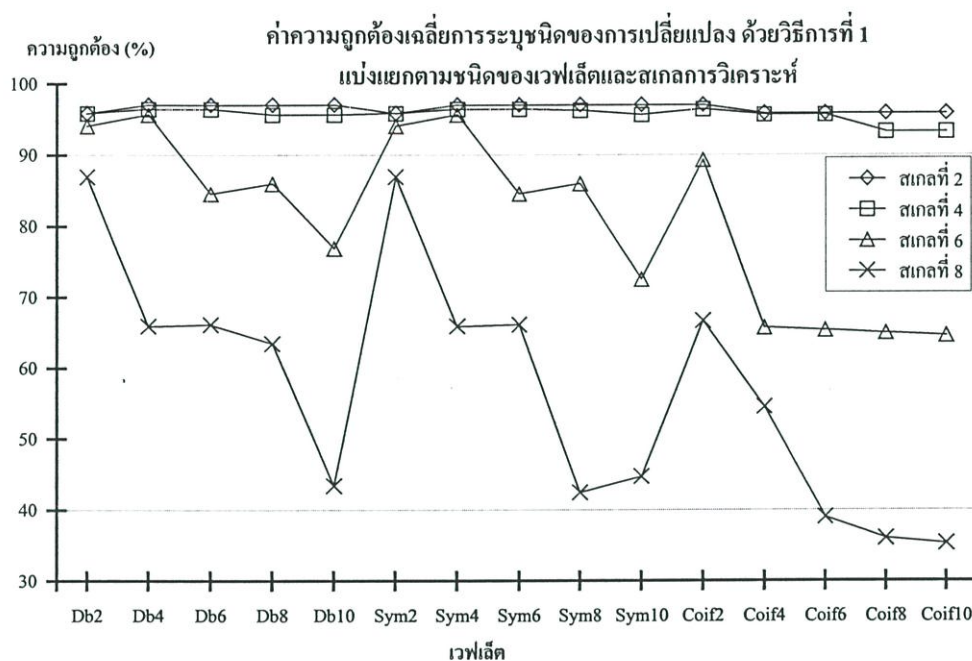
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ ตามการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย

**ชนิดของเวฟเล็ทแม่** สังเกตได้ชัดเจนว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ความแตกต่างกรณีเกิดฟอลต์ขณะห้อยแปลงจ่ายไฟ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ทแม่ Daubechies จะมีค่าความถูกต้องสูงสุด ส่วน Coiflets จะมีค่าต่ำสุด เปรียบเทียบที่สเกล 6 และวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 ยังให้ความถูกต้องสูงกว่าวิธีการที่ 1

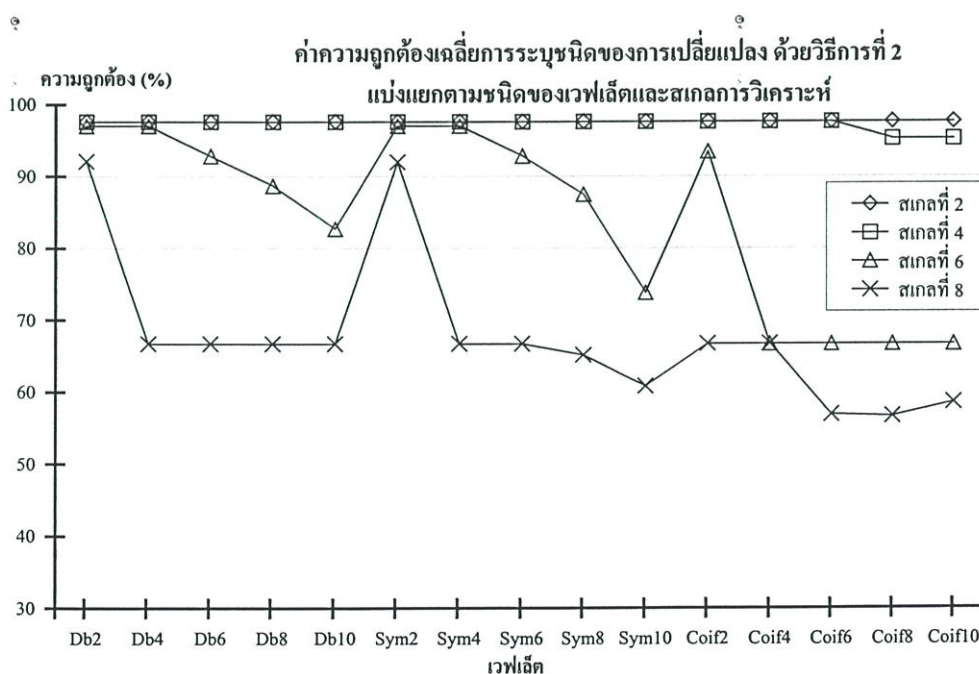
**ตระกูลของเวฟเล็ทการแปลง** พบว่าเมื่อตระกูลของเวฟเล็ทการแปลง มีค่าสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ จะมีค่าลดลง สังเกตช่วงการเปลี่ยนแปลงจากสเกลที่ 8 ไปยัง 10 ของเวฟเล็ท Symlets ซึ่งคล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ 1 แต่ให้ผลความถูกต้องในการวิเคราะห์ที่สูงกว่า

**สเกลการวิเคราะห์** ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ มีค่าลดลง เมื่อสเกลที่ใช้การวิเคราะห์เพิ่มขึ้น หรือช่วงความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น พบว่าในช่วงจากสเกลที่ 6 ไป 8 ค่าเฉลี่ยความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในทุกกรณีศึกษา โดยเปรียบเทียบตาม ชนิดของเวฟเล็ตแม่, ตระกูลของเวฟเล็ตการแปลง, สเกลการวิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ ดังแสดงผลในรูปที่ 6.22 และ 6.23 ตามลำดับ

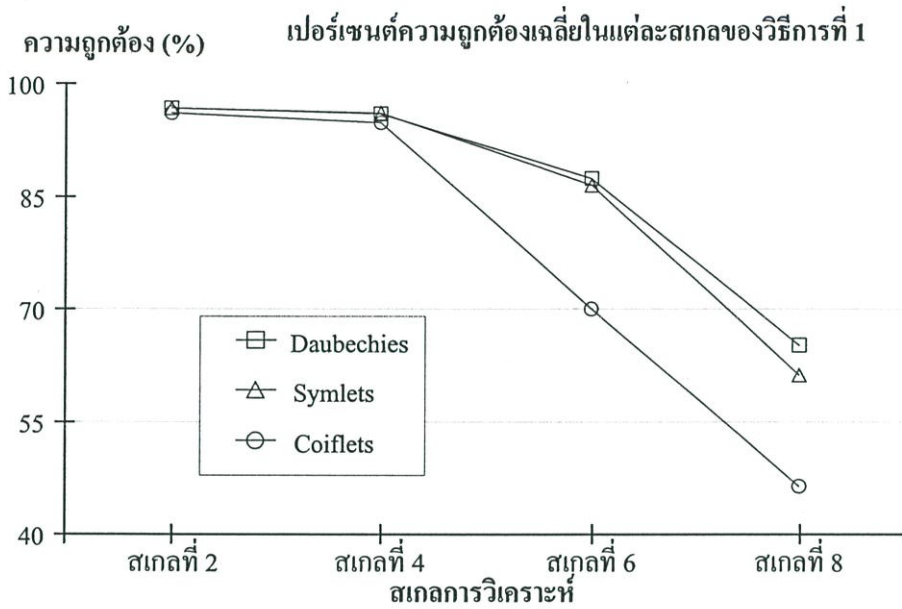


รูปที่ 6.22 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์

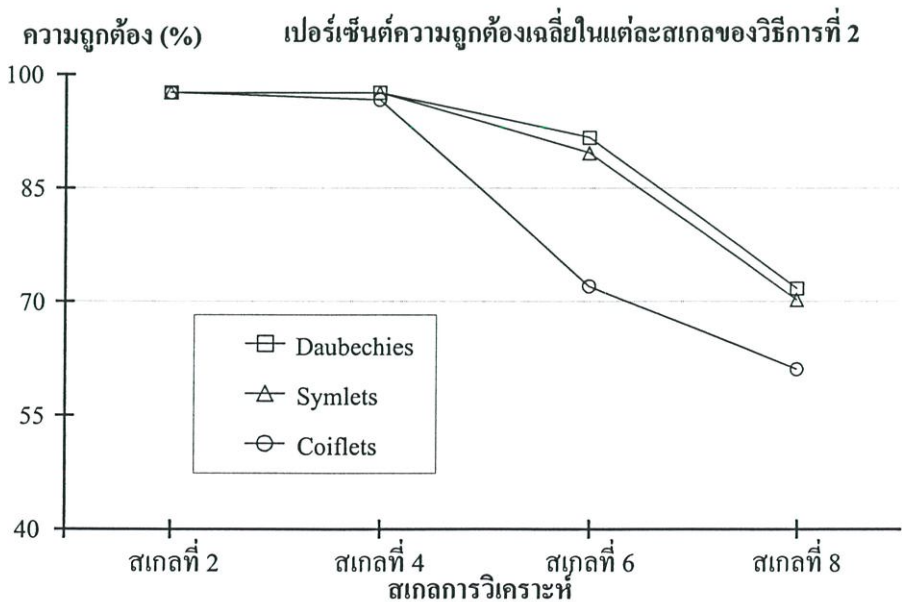


รูปที่ 6.23 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ตและสเกลการวิเคราะห์

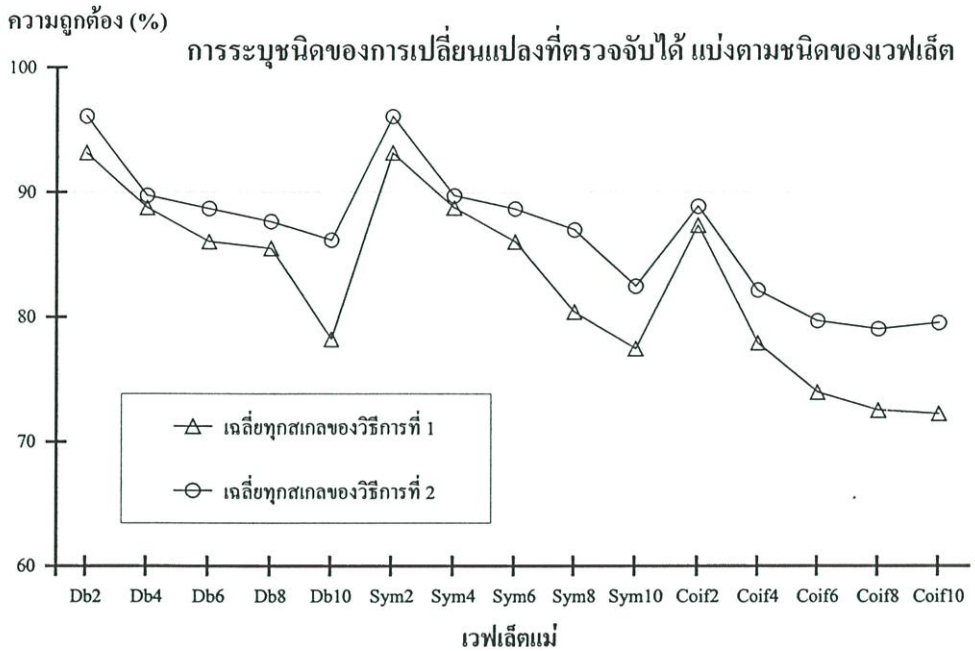
ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด เมื่อนำมาจัดกลุ่มใหม่ตามค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในแต่ละสเกลการวิเคราะห์ของแต่ละวิธีการ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.24 และ 6.25 นอกจากนี้เมื่อนำมาจัดกลุ่มตามชนิดและตระกูลของเวฟเล็ตแม่ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ของแต่ละวิธีการ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.24 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ด้วยวิธีการที่ 1 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ตแม่และสเกลการวิเคราะห์



รูปที่ 6.25 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ด้วยวิธีการที่ 2 โดยแบ่งแยกตามชนิดของเวฟเล็ตแม่และสเกลการวิเคราะห์



รูปที่ 6.26 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ โดยแบ่งตามชนิดของเวฟเล็ตและวิธีการวิเคราะห์

## 6.6 ผลการปรับปรุงพารามิเตอร์การแปลงเวฟเล็ต

จากกราฟรูปที่ 6.22- 6.26 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

### 6.6.1 ผลการปรับปรุงเวฟเล็ตแม่

พบว่าทั้งวิธีการที่ 1 และวิธีการที่ 2 นั้น แนวโน้มของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกัน โดยเรียงลำดับของค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการวิเคราะห์จากเวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies, Symlets และ Coiflets ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาประกอบกราฟรูปที่ 6.26 สามารถสรุปได้ว่าชนิดของเวฟเล็ตแม่ที่มีความเสถียรและเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยคือ เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies

### 6.6.2 ผลการปรับปรุงตระกูลของเวฟเล็ต

พบว่า การปรับปรุงตระกูลของเวฟเล็ตสำหรับการวิเคราะห์จะมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ โดยตระกูลของเวฟเล็ตที่มีค่าน้อยกว่าจะให้ค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงกว่า นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากช่วงตระกูลที่ 2 ไป 4 และ 4 ไป 6 (ตระกูลส่วนต้น) จะมีค่าน้อยกว่าช่วงจาก 6 ไป 8 และ 8 ไป 10 (ตระกูลส่วนท้าย) ดังนั้นตระกูลของเวฟเล็ตฯ ในส่วนต้น จึงมีความเหมาะสมสำหรับการ

วิเคราะห์มากกว่าตระกูลของเวฟเล็ทๆ ในส่วนท้าย โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟ 6.24 และ 6.25 แล้ว ตระกูลของเวฟเล็ทที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์คือ ตระกูลที่ 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงสุด

### 6.6.3 ผลการปรับปรุงสเกลการวิเคราะห์

พบว่า การปรับปรุงสเกลการวิเคราะห์มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ โดยสเกลการวิเคราะห์ที่ต่ำกว่าจะให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องสูงกว่า เนื่องจากช่วงความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความละเอียดสูง ในขณะที่สเกลการวิเคราะห์ที่สูงๆ ให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงมาก จากรูป 6.25 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความถูกต้องดังกล่าว พบว่าจากช่วงสเกลที่ 2 ไปสเกลที่ 4 มีค่าลดลงน้อยกว่า ช่วงจากสเกลที่ 4 ไปสเกลที่ 6 และสเกลที่ 6 ไปสเกลที่ 8 โดยสเกลที่ให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงสุดคือ สเกลที่ 2 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสเกลที่ 4 พบว่าสามารถให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องต่ำกว่าในสเกลที่ 2 เพียงเล็กน้อย โดยในช่วงความถี่ข้อมูลในการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าถึง 4 เท่า ดังนั้นสเกลการวิเคราะห์ที่ 4 จึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย

## บทที่ 7

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยตั้งแต่การจำลองสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในโซนป้องกันของหม้อแปลงกำลัง ประกอบกับการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟซึ่งมีผลกระทบจากการเกิดกระแสอินรัชด้วย ไปจนกระทั่งการวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าวด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยและนำผลที่ได้มาประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

### 7.1 การจำลองสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์

สัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP โดยสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า 2 แบบคือ หม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 ขนาดพิกัด 16MVA แรงดัน 33/11.7kV และหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Ydyn0 ขนาดพิกัด 200MVA(50MVA ตติยภูมิ) แรงดัน 230/121/22kV ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีใช้อย่างแพร่หลายในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยสัญญาณกระแสที่ได้จากแบบจำลองหม้อแปลงที่ได้จะถูกกำหนดตามการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ตามเงื่อนไขการจำลองที่กำหนดขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะของกระแสอินรัชและฟอลต์ในหลายรูปแบบที่อัตราการสุ่ม 200kHz

สำหรับการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการจำลองจะพิจารณาตามปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอินรัชและฟอลต์ เช่น มุมในการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Switching angle), ชนิดของฟอลต์ เป็นต้น

### 7.2 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย

รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย อาศัยการพิจารณาทั้งการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงและการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่อยู่ในสัญญาณกระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงควบคู่กัน โดยองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณกระแสจะถูกแยกออกมาด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ตามเวฟเล็ตแม่และสเกลการวิเคราะห์ที่กำหนด จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาประมวลผลในอีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และใช้ระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดกระแสอินรัชกับการเกิดฟอลต์ในโซนป้องกัน นอกจากนี้เพื่อศึกษาหารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยและสเกลที่ดีที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเลือกใช้เวฟเล็ตแม่แบบต่างๆ 15 แบบ คือ

ตารางที่ 7.1 แสดงเวฟเล็ดแม่ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย

ตระกูล \ ชนิด	Daubechies	Symlets	Coiflets
2	Daubechies 2	Symlets 2	Coiflets 2
4	Daubechies 4	Symlets 4	Coiflets 4
6	Daubechies 6	Symlets 6	Coiflets 6
8	Daubechies 8	Symlets 8	Coiflets 8
10	Daubechies 10	Symlets 10	Coiflets 10

โดยเลือกสเกลการวิเคราะห์ที่ 2, 4, 6 และ 8 ตามรายละเอียดของช่วงความถี่ของสัญญาณดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.2 แสดงสเกลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงตามช่วงความถี่ของสัญญาณ

สเกลที่ 2	แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz
สเกลที่ 4	แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz
สเกลที่ 6	แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 1.5625-3.125 kHz
สเกลที่ 8	แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 390.625-781.25 Hz

ดังนั้นที่ เวฟเล็ดแม่ Daubechies 2 สเกล 2 สัญญาณกระแสดังกล่าวหลังการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยจะถูกแบ่งออกเป็น องค์ประกอบความถี่สูงในช่วงความถี่ 25-50 kHz หรือเรียกว่า สัญญาณ Detail สเกล 2 และองค์ประกอบความถี่ต่ำในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 25 kHz ลงมา หรือ สัญญาณ Approximation สเกล 2

### 7.3 การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงและระบุชนิดสัญญาณที่เปลี่ยนแปลง

รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจสำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงและระบุชนิดสัญญาณที่เปลี่ยนแปลง ทำได้โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลหลังจากการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ โดยอาศัยการเปรียบเทียบข้อมูลดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบความถี่สูง (Detail) ระหว่างก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นการเกิดกระแสดินรัชหรือฟอลต์ในหม้อแปลงเพื่อใช้สำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
- การเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation) ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยเทียบกับช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงจากค่าสัมประสิทธิ์ต่ำสุดไปยังค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิลตั้งแต่ตำแหน่ง

เวลาที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ขององค์ประกอบความถี่สูง เพื่อใช้ในการระบุชนิดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยแบ่งวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกเป็น 2 วิธีการ เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการวิเคราะห์ คือ

**วิธีการที่ 1** จะเปรียบเทียบค่าสูงสุดของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเทียบกับช่วงเวลาดังกล่าว ในเฟสใดเฟสหนึ่ง

**วิธีการที่ 2** จะเปรียบเทียบค่าผลรวมของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเทียบกับช่วงเวลาดังกล่าว ในทุกเฟส

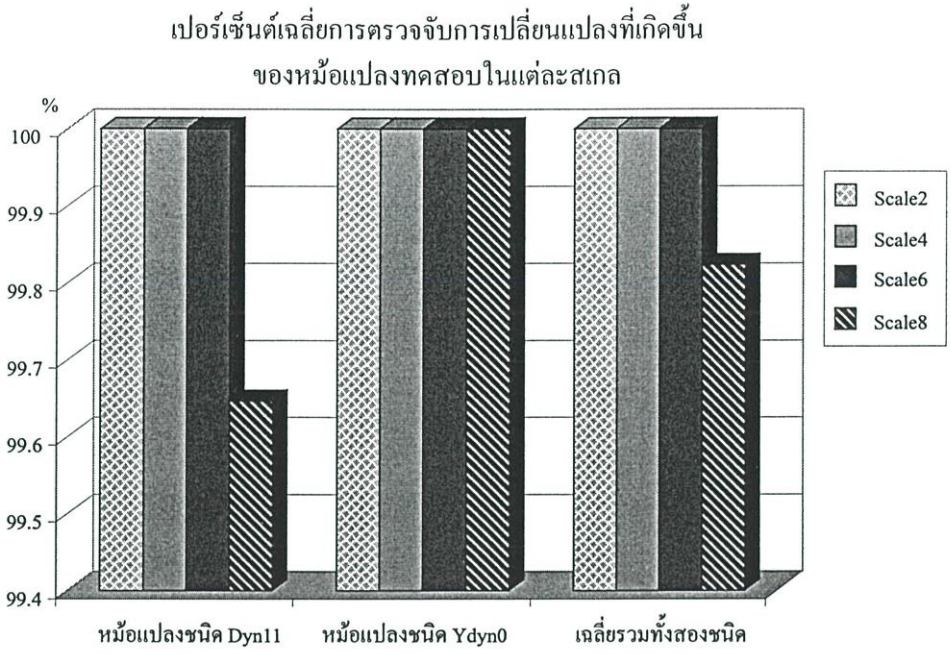
สำหรับการเปรียบเทียบต่างๆ เป็นการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สัญญาณกระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบทั้งองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่ต่ำ โดยสร้างโปรแกรมวิเคราะห์และตัดสินใจบนโปรแกรม MATLAB [33]

## 7.4 ผลการทดลอง

การทดลองโดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองด้วยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ใน โชนป้องกันของหม้อแปลงที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบ 2 ชนิด คือ ชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 และ Ydyn0 ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ 1 ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตกับช่วงเวลาขององค์ประกอบความถี่ต่ำในเฟสใดเฟสหนึ่ง กับวิธีการที่ 2 ที่อาศัยการวิเคราะห์ค่าผลรวมของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตกับช่วงเวลาขององค์ประกอบความถี่ต่ำในทุกเฟส นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้ในแต่ละเงื่อนไขการจำลองที่กำหนด เช่น มุมในการสับของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประกอบกับการศึกษาพิจารณาตัวแปรต่างๆ ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ เช่น ชนิดของเวฟเล็ตแม่และ สเกลการวิเคราะห์ โดยในส่วนผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

### 7.4.1 การตรวจจับการเปลี่ยนแปลง

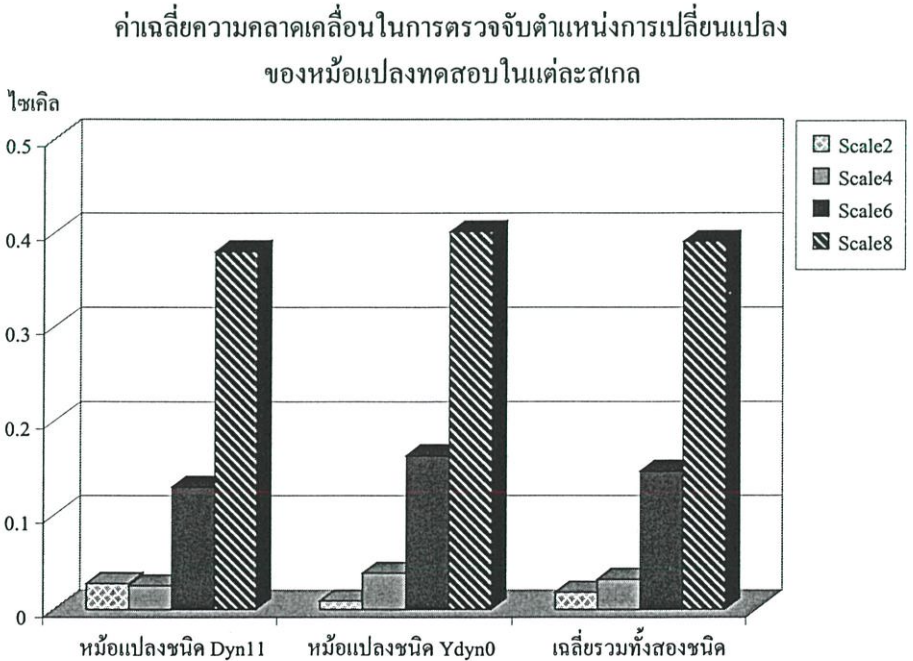
ผลการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงตามวิธีการที่นำเสนอ นั้นสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยเฉลี่ยมีความถูกต้องมากกว่า 99.9% สำหรับทุกเงื่อนไขในการทดลองและเวฟเล็ตที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 8.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการในการตรวจจับที่นำเสนอเป็นคุณลักษณะเฉพาะในสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลง สังเกตได้ว่าในสเกลที่ 8 ประสิทธิภาพในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงความถี่ของสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์มีผลต่อความแม่นยำในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงโดยตรง แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะในสเกลที่ 4 ซึ่งเป็นสเกลการวิเคราะห์ที่เลือกใช้ตามที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่าความถูกต้องสำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบทั้งสองมีค่าสูงถึง 100%



รูปที่ 7.1 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทดสอบ แบ่งตามสเกลการวิเคราะห์

7.4.2 ความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลง

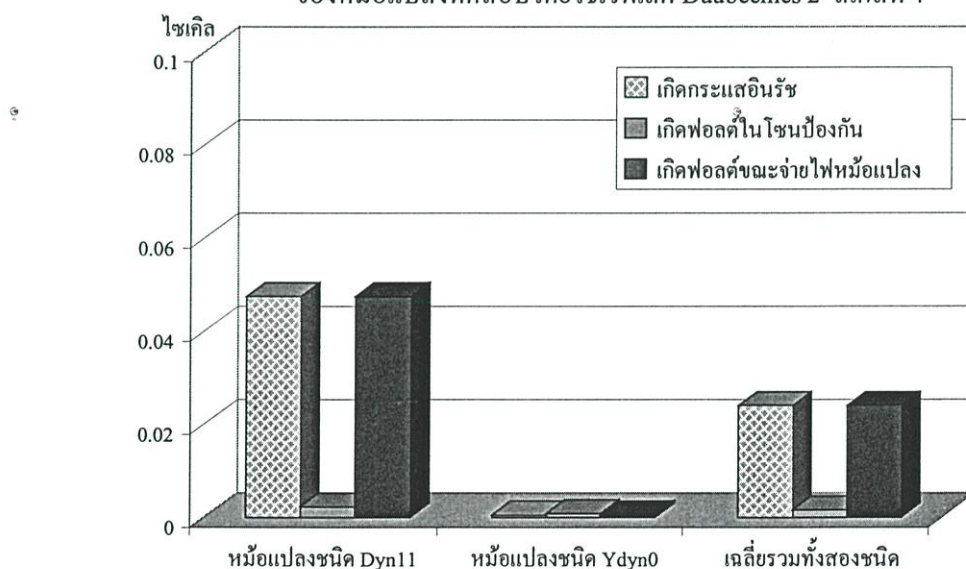
สำหรับผลของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงที่ใช้กำหนดจุดเริ่มต้นของช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ในสัญญาณ Approximation แสดงตามรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบ แบ่งตามสเกลการวิเคราะห์

จากรูปที่ 7.2 พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบทั้งสองมีค่าสูงขึ้นที่สเกลการวิเคราะห์ที่มากขึ้น หรือช่วงความถี่ของสัญญาณที่ลดลง และถ้าพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวพบว่า จากสเกลที่ 2 ไป 4 จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าจากสเกลที่ 4 ไป 6 และสเกลที่ 6 ไป 8 นอกจากนี้จากสมมุติฐานในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการเลือกใช้สัญญาณกระแสในช่วง  $1/4$  ไซเคิลเพื่อระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากขึ้น จะส่งผลโดยตรงช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาสเกลที่ 6 และ 8 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง คือ 0.147 และ 0.39 ไซเคิล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะทำให้ช่วงข้อมูลการวิเคราะห์ถูกเลื่อนออกไปเกินกว่าครึ่งหนึ่งของ  $1/4$  ไซเคิล หรือ 0.125 ไซเคิล จนอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ขึ้นได้ สเกลดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมที่ใช้เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบ โดยใช้เวฟเล็ต Daubechies 2 สเกลที่ 4 แบ่งแยกตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จะแสดงผลดังรูปที่ 7.3

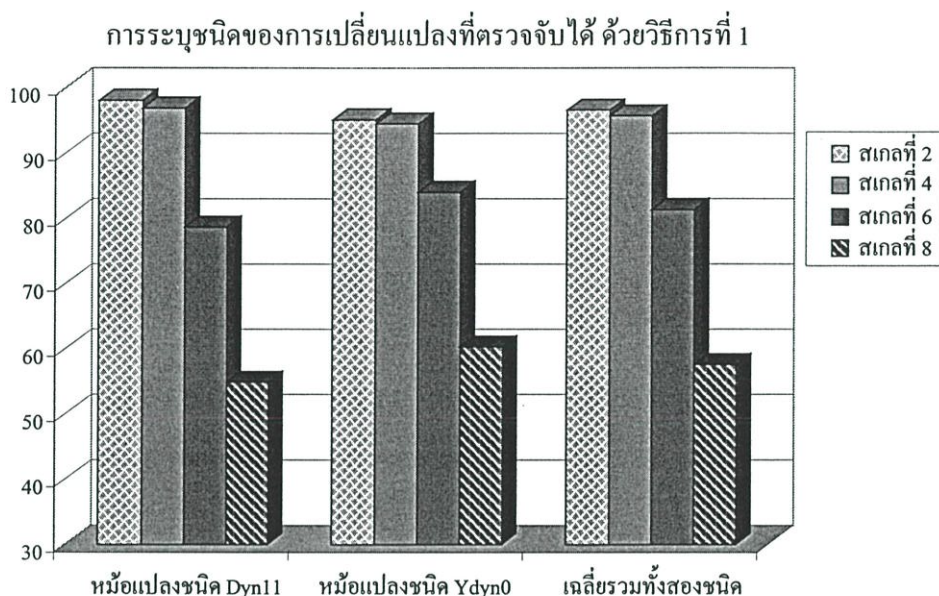
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบโดยใช้เวฟเล็ต Daubechies 2 สเกลที่ 4



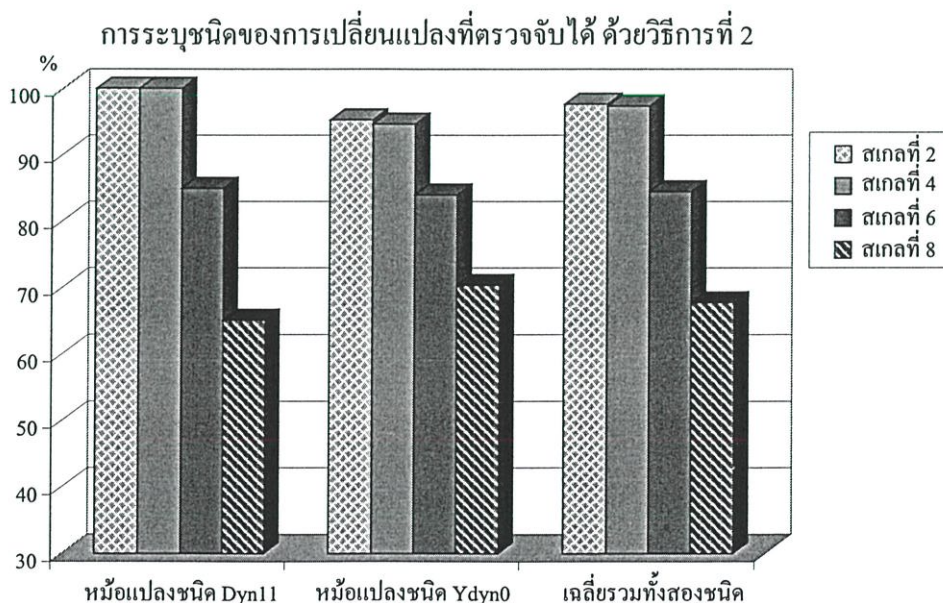
รูปที่ 7.3 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงทดสอบ โดยใช้เวฟเล็ต Daubechies 2 สเกลที่ 4

### 7.4.3 การระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้

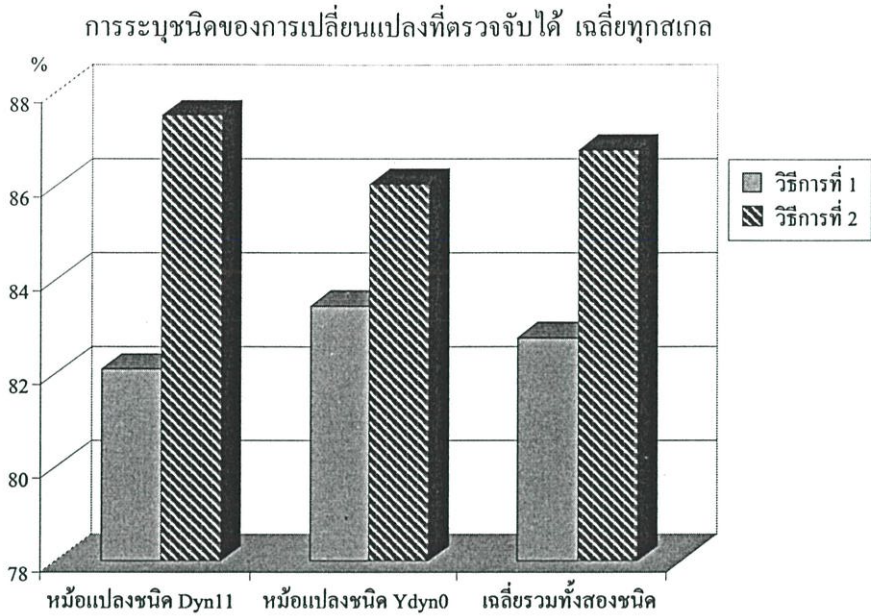
จากผลการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.4 – 7.9



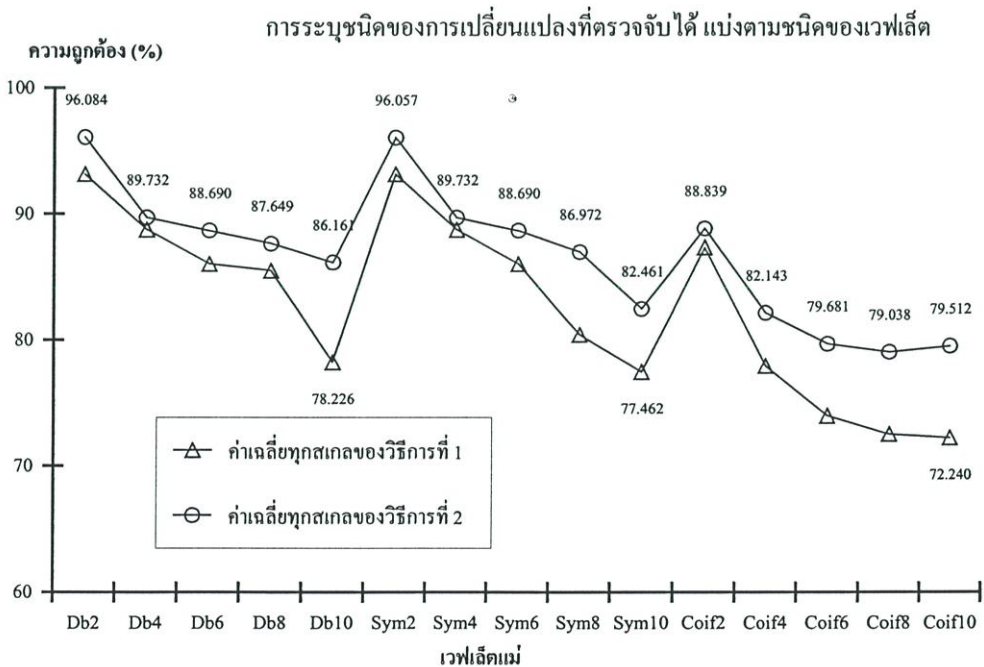
รูปที่ 7.4 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง ด้วยวิธีการที่ 1 แบ่งแยกตามสเกลการวิเคราะห์



รูปที่ 7.5 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง ด้วยวิธีการที่ 2 แบ่งแยกตามสเกลการวิเคราะห์

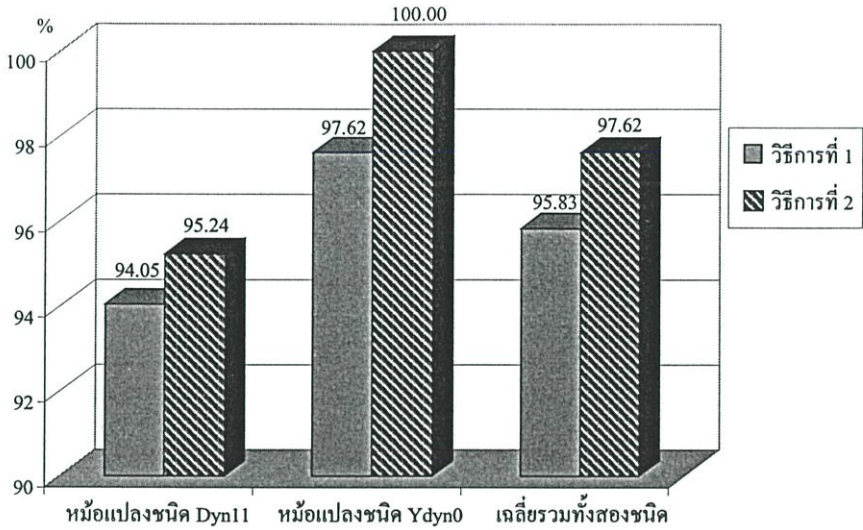


รูปที่ 7.6 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง เปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ 1 และ 2



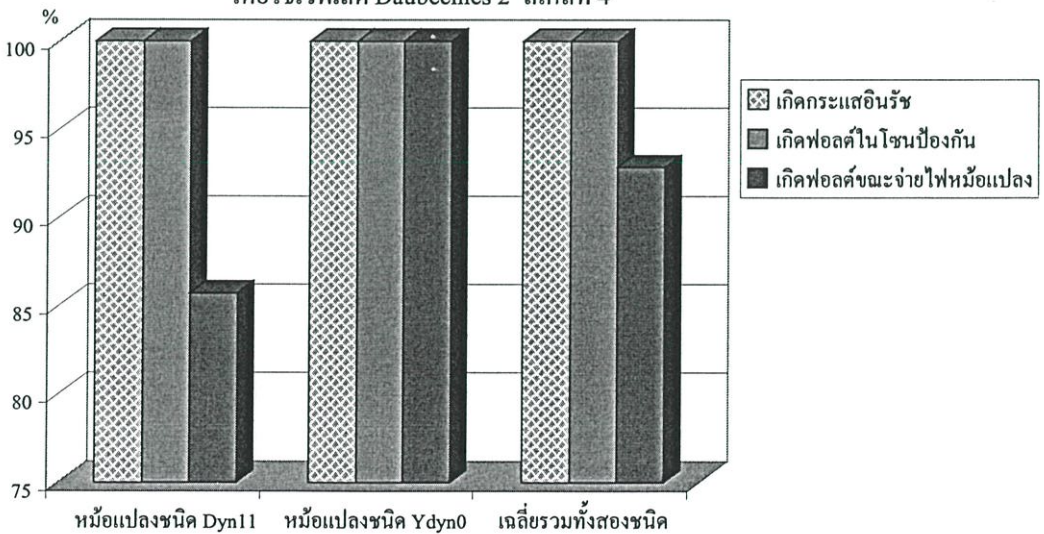
รูปที่ 7.7 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง เปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่ 1 และ 2 แบ่งตามชนิดเวฟเล็ด

การระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้  
โดยใช้เวฟเล็ท Daubechies 2 สเกลที่ 4



รูปที่ 7.8 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง โดยใช้เวฟเล็ท Daubechies 2 สเกลที่ 4 แบ่งแยกตามวิธีการวิเคราะห์

การระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้  
โดยใช้เวฟเล็ท Daubechies 2 สเกลที่ 4



รูปที่ 7.9 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ในหม้อแปลงทดสอบทั้งสอง โดยใช้เวฟเล็ท Daubechies 2 สเกลที่ 4 แบ่งแยกตามชนิดการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 7.4 และ 7.5 เมื่อพิจารณาผลการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้ พบว่าวิธีการวิเคราะห์ทั้งสองให้ค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการวิเคราะห์สูงมากกว่า 80% และเมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟพบว่ามีความคล้ายคลึงกัน คือ ค่าเฉลี่ยความถูกต้องดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อสเกลการวิเคราะห์มีค่าสูงขึ้น หรือช่วงความถี่ของสัญญาณมีค่าลดลง และมีความสอดคล้องกับค่าความเคลื่อนของตำแหน่งในการตรวจจับด้วย คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยความถูกต้อง ช่วงจากสเกลที่ 2 ไป 4 จะมีค่าลดลงน้อยกว่าช่วงจากสเกลที่ 4 ไป 6 และสเกลที่ 6 ไป 8 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการระบุประเภทการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้โดยแบ่งแยกตามวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 7.6 พบว่าวิธีการที่ 2 ให้ผลความถูกต้องสูงกว่าวิธีการที่ 1 นอกจากนี้ จากรูปที่ 7.7 แบ่งแยกผลความถูกต้องตามชนิดของเวฟเล็ดยังพบว่าวิธีการที่ 2 ให้ผลความถูกต้องสูงกว่าวิธีการที่ 1 เช่นกัน ดังนั้นวิธีการที่ 2 จึงมีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง จากรูปที่ 7.7 พบว่าเวฟเล็ดยังให้ผลความถูกต้องที่สูงที่สุดคือ Daubechies 2 โดยมีค่า 96.084 % อันดับรองลงมาคือ Symlets 2 มีค่า 96.057 % ดังนั้นถ้าพิจารณาสเกลที่สูงที่สุดซึ่งยังให้ผลความถูกต้องที่น่าเชื่อถือ จึงสรุปได้ว่าเวฟเล็ดยังและสเกลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ในโซนป้องกันของหม้อแปลง คือ เวฟเล็ดยัง Daubechies 2 สเกลที่ 4

สำหรับผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ เวฟเล็ดยัง Daubechies 2 สเกลที่ 4 แสดงดังรูปที่ 7.8 และ 7.9 พบว่าด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ 2 ให้ผลความถูกต้องเฉลี่ยในการระบุชนิดของการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจจับได้สูงถึง 97.62 % และเมื่อพิจารณาโดยแบ่งแยกตามประเภทของการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 7.9 พบว่าสำหรับกรณีเกิดกระแสอินรัช หรือกรณีเกิดฟอลต์ในโซนป้องกันเพียงอย่างเดียววิธีที่นำเสนอสามารถให้ความถูกต้องในการวิเคราะห์สูงถึง 100% ยกเว้นเพียงกรณีเกิดฟอลต์ขณะจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงชนิดกลุ่มเวกเตอร์ Dyn11 มีค่า 85.71% ซึ่งกรณีดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นค่อนข้างยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากก่อนการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงจะมีการตรวจค่าความต้านทานระหว่างขดลวดกับดินทุกครั้ง แต่อย่างไรก็ตามมีโอกาสที่ฉนวนจะเสื่อมสภาพทันทีทันใดได้ขณะจ่ายไฟ หรืออาจมีการลัดวงจรตรวจสอบสายกราวด์ที่ต่ออยู่กับขั้วของหม้อแปลงขณะการซ่อมบำรุงได้

## 7.5 สิ่งที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

นอกเหนือจากการระบุชนิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ ควรพัฒนาการวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย และพิจารณาผลกระทบต่อหม้อแปลงอีกตัวที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าอาจจะต่อขนานหรืออนุกรมอยู่กับหม้อแปลงกำลังถูกจ่ายไฟ หรือเกิดฟอลต์ขึ้น รวมถึงขยายขอบเขตการวิเคราะห์โดยพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น ฟ้าผ่า หรือสัญญาณ Power line carrier ในสายส่ง เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า “MAIDENSHA 10MVA 121kV/11kV of Substation no. 200 of Thai Oil Co., Ltd.”, September 200, Japan.
- [2] Bo Z.Q., Jiang F., Chen Z., Dong X.Z., Weller G., Redfern M.A. , “Transient based protection for power transmission systems. ” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting , vol. 3, 2000, pp. 1832 –1837.
- [3] GEC ALSTHOM MEASUREMENTS LIMITED, “Protective Relays Application Guide”, Stafford, England, 1987.
- [4] H. J. Li and J. L. Blackburn , **Applied Protective Relaying** , First Edition, Westinghouse-Electric Corporation, 1976
- [5] A. A. Hudson. , “Transformer Magnetizing Inrush Current A Resume of Published Information.” Electrical Research Association , Report No. 5152, August, 1966.
- [6] Driesen, J., Van Craenenbroeck T., Reekmans R. and Van Dommelen D., “Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform. ”, Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Quality Measurements : The Indispensable Bridge between Theory and Reality., vol. 1, June 4-6 1966 ., pp. 474 -479 .
- [7] Lazzaroni N., Ragaini E., “ Gabor-like transforms for transient analysis in electrical systems.” Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Quality Measurements: The Indispensable Bridge between Theory and Reality., vol. 2, June4-6 1996., pp. 885 –890.
- [8] Robertson D.C. , Camps O.I. , Mayer J.S. and Gish W.B., “ Wavelets and electromagnetic power system transients.” , IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11., Issue: 2 , April 1996.pp. 1050 –1058.
- [9] Albert Cohen and Jellena Kovacevic, “Wavelet: The Mathematical Background.” , Proc. IEEE vol. 84, No. 4, April 1996, pp. 514-522.
- [10] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล , “ การลดขนาดข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนเวฟเล็ตแพ็คเกจ (ECG compression based on wavelet packet ).” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544

- [11] Pham V.L. and Wong K.P., “ Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms .”, Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, Issue: 3 , May 1999, pp. 249 –254.
- [12] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim and Jean-Michel Poggi, **Wavelet Toolbox User’s Guide Version 1.** , First Printing, MathWorks, Inc. March 1996.
- [13] วรรัตน์ ภัทรอมรกุล , รศ. ดร . มนัส สัจจวรศิลป์ , คู่มือการใช้ MATLAB ฉบับสมบูรณ์, พิมพ์ครั้งที่ 1 , สำนักพิมพ์ Info press , เมษายน 2543.
- [14] Chul Hwan Kim and Raj aggarwal, “ Wavelet transforms in power systems: Part. 1 General introduction to the wavelet transform.”, Proc. IEEE Power Engineering Journal ,2000, pp. 81-87.
- [15] Santoso S., Powers E.J. and Grady W.M., “ Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. ”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, Issue: 3, July 1997 , pp. 1250 -1257
- [16] C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo, **Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms .** , Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1998.
- [17] Brito, N.S.D., Souza, B.A.and Pires F.A.C., “Daubechies wavelets in quality of electrical power.”, Proc. IEEE /PES 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. , vol. 1 , 1998 ,pp. 511 -515 .
- [18] Santoso S., Powers E.J., Grady W.M. and Hofmann P., “ Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis ,” IEEE Trans. on Power Delivery , Vol.11, No. 2 , April 1996. pp. 924-930.
- [19] K.S. Smith B.Sc.(Eng), Ph.D., A.M.I.E.E., F.R.S.A., Li Ran B.Sc., Ph.D. “ Douglas Platform: Export Compressor Drive Transformer Inrush Currents.”, Report for BHP Petroleum, Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, July 1997.
- [20] Fuji 200MVA, 230/121-22kV Auto Transformer Test Report, “Ao Udom 2 Substation”, Contract No. CA97000691, vol. 1, Thai Oil Co., Ltd.
- [21] 16MVA Brush Transformer, “Operating and Maintenance Instruction Manual”, Customers- Order No. TS2E2A1037, Brush Transformers Limited., Thai Oil Co., Ltd.
- [22] รายงานการตรวจรับสวิตช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ “AEG 145kV, 3150A, type S1-145 F1” , สถานีไฟฟ้าอ่าวอุดม 2, บริษัทไทยออยล์ จำกัด
- [23] Test Report “ABB SF6 Circuit Breaker, type HPL245A2, Std. ANSI C37”, April 1998 , ABB Switchgear AB , Sweden.

- [24] Laszlo Prikler and Hans Kr. Holdalen, **ATPdraw for Windows 3.1/95/NT version 1.0 User's Manual**, Release 1.0.1, Nov 1998.
- [25] D. Van, **Alternative Transient Program Rule Book**, U. Leuven EMTP Center, Belgium, 1991.
- [26] Hermann W. Dommel, **Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book**, University of British Columbia, Vancouver Canada, August 1986.
- [27] สรพล คำรงกิตติกุล, คร., ประดิษฐ์พงษ์ สุขสิริถาวรกุล, เอกสารการอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง “**Application of Electromagnetic Transients Program for Electrical Transients in Power System.**”, 18-22 พฤษภาคม 2541.
- [28] Theodore Wildi, **Electrical Machines, Drives, and Power Systems**, Fourth Edition. Prentice Hall, Inc. United States of America, 2000
- [29] C.H. Kim and R. Aggarwal, “Wavelet transforms In power systems: I. General introduction to the wavelet transforms”, IEE Power Engineering Journal, Vol.14, Issue.2, April 2000, pp. 81–87.
- [30] Moises Gomez-Morante, Denise W. Nicoletti, “A Wavelet-based Differential Transformer Protection.”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999, pp. 1351 –1358.
- [31] Zhiqian Bo, Geoff Weller, and Tom Lomas., “A New Technique for Transformer Protection Based on Transient Detection.”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no.3, July 2000, pp. 870 -875.
- [32] Zhonghao Yang, J.Z. Liu, Dong Xinzhou, F. Jiang, Z.Q. Bo, and N.F. Chin, “A New Technique for Power Transformer Protection Using Discrete Dyadic Wavelet Transform”, IEEE Development in Power System Protection, Conference Publication no. 479, 2001, pp. 383 -386.
- [33] **MATLAB User's Guide version 5.**, MathWorks, Inc. September 1998.

ภาคผนวก

บทวิเคราะห์

## 1. สัญญาณชนิดไม่คงรูปคลื่นไซน์ (Non-Sinusoidal waveform)

ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หารูปแบบซึ่งสามารถนำมาใช้แบ่งแยกความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัทซ์ที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงจ่ายไฟและกระแสฟลด์ชนิดที่เกิดขึ้นภายในโซนป้องกันของหม้อแปลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเฉพาะลักษณะของรูปคลื่นในทั้งสองกรณี พบว่าเป็นสัญญาณชนิดไม่คงรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทั่วไปซึ่งสามารถเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าและทำให้คุณภาพของระบบไฟฟ้าไม่ดี โดยสามารถแบ่งแยกชนิดของสัญญาณดังกล่าวได้ดังนี้

### 1.1 เกิดจากการรบกวนระบบไฟฟ้า (Disturbances)

การรบกวนระบบไฟฟ้า สามารถตีความให้สัมพันธ์กับคุณภาพของระบบไฟฟ้าโดยหมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นชั่วขณะจนเป็นสาเหตุให้รูปคลื่นในสภาวะคงตัวมีความผิดเพี้ยนไป โดยอาจมีสาเหตุได้จาก ฟลด์ หรือการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย

#### 1.1.1 แรงดันตก (Voltage Dips or Sags)

คือ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลง จนเหลือค่าระหว่าง 10% ถึง 90% ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และคงสถานะอยู่นานอย่างน้อย 0.5 ไซเคิล

#### 1.1.2 แรงดันเกิน (Voltage Increases or Swells)

คือ แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะตรงข้ามกับแรงดันตก โดยสามารถเห็นได้ในเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ขณะเกิดการลัดวงจรเฟสใดเฟสหนึ่ง

#### 1.1.3 สัญญาณทรานเซียนต์ (Transients)

คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่มีระยะเวลาในการเกิดขึ้นน้อยกว่า 0.5 ไซเคิล

#### 1.1.4 แรงดันน็อต (Voltage Notches)

คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นทรานเซียนต์เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ ในทุกๆ ไซเคิล เช่นเดียวกับผลของการลัดวงจรระหว่างเฟสในซีแปลงถ่านของ a.c.-d.c. converters.

### 1.2 เกิดจากระบบไฟฟ้าไม่สมดุล (Unbalance)

การเกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า หมายถึง การที่แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีมุมระหว่างเฟสไม่เท่ากับ 120 องศาไฟฟ้า หรือมีขนาดของแรงดันที่ไม่เท่ากัน หรือทั้งสองอย่าง ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดความไม่สมดุลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากโหลดชนิดเฟสเดียว และสายส่งที่ไม่มีการไขว้ (Untransposed)

### 1.3 เกิดจากความผิดเพี้ยน (Distortion)

โดยทั่วไปจะพบในรูปแบบของสัญญาณฮาร์มอนิก ซึ่งมีความถี่ของสัญญาณแรงดันหรือกระแสเป็นจำนวนเท่าของความถี่ในระบบไฟฟ้า โดยความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นสามารถส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ทำให้อุปกรณ์ควบคุมทำงานผิดพลาด, รบกวนระบบโทรศัพท์, เพิ่มความสูญเสียในตัวเก็บประจุหรือหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อที่จะลดผลของความผิดเพี้ยนในระบบไฟฟ้าจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่เป็นฟิลเตอร์ทั้งที่เป็นลักษณะพาสซีฟและแอคทีฟ เพื่อกรองเฉพาะช่วงความถี่ของสัญญาณที่ต้องการเท่านั้น

### 1.4 เกิดจากการแกว่งของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Fluctuations)

การแกว่งของแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งแยกออกเป็น 2 ลักษณะคือ

- การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเป็นขั้นๆ สม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น แรงดันไฟฟ้าของเครื่องเชื่อม, เครื่องรีดเหล็ก เป็นต้น
- การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเป็นรอบๆ หรือไม่แน่นอน โดยไม่ขึ้นกับช่วงเวลา เช่น การอาร์กของเตาเหนี่ยวนำ หรือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในโหลดที่ปรับค่าได้

โดยปรกติการเกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าจะมีขนาดไม่เกิน  $\pm 10\%$  ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะไม่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนชนิดนี้

## 2. การกำหนดขั้นตอนและเกณฑ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอน

- เนื่องจากรูปแบบของการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง โดยกำหนดรูปแบบของกระแสอินรัชและฟอลต์ให้เป็นเหตุการณ์เฉพาะโดยไม่มีการพิจารณาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนใดๆ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาในเบื้องต้น

- สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อวิเคราะห์รูปแบบความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้เช่น การกำหนดจำนวน 7 เท่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์กระแสเทียบกับช่วงเวลาของสัญญาณความถี่ต่ำ (Approximation) หรือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์กระแสในสัญญาณความถี่สูงที่ใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นรวมถึงรูปแบบที่ใช้ในการตัดสินใจต่างที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น ได้มาจากการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ 96 ตัวอย่างแรกตามที่ได้กล่าวไว้ในบทการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต ซึ่งสัญญาณกระแสอินรัชและฟอลต์ดังกล่าวมีรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งประเภท, ตำแหน่งที่เกิดและขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่มูมสวิตซ์ซึ่งต่างๆ ซึ่งเมื่อนำมาทำการแปลงเวฟเล็ตเพื่อมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดขึ้นแล้วจึงมาทำการกำหนดรูปแบบ, ขอบเขต, จำนวนสเกล และเกณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์จากภาพรวมที่สังเกตได้ ซึ่งอาจจะต้องมีการ

กำหนดค่าเบื้องต้นในการเปรียบเทียบขึ้นมาค่าหนึ่งในลักษณะของการลองผิดลองถูก (Trial and error) หลังจากนั้นจะทำการปรับค่าต่างๆ รวมทั้งรูปแบบที่ใช้จนกระทั่งได้ผลการวิเคราะห์ตามที่ต้องการ(วิเคราะห์ได้ถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 90%) และนำมาทดสอบกับสัญญาณกระแสอินรัชและพอลต์ที่ได้จากการจำลองจากระบบทดสอบที่สร้างขึ้นจากหม้อแปลงทดสอบ 2 ระบบ ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 448 ตัวอย่าง (แตกต่างจากสัญญาณกระแสอินรัชและพอลต์ 96 ตัวอย่างแรก) ซึ่งรูปแบบของวิธีการที่นำเสนออาจจะไม่ใช่รูปแบบที่ดีที่สุด แต่สิ่งที่ต้องการนำเสนอเป็นเพียงอีกหนึ่งแนวคิดที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชและพอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วให้ผลการทดลองตามที่ต้องการ

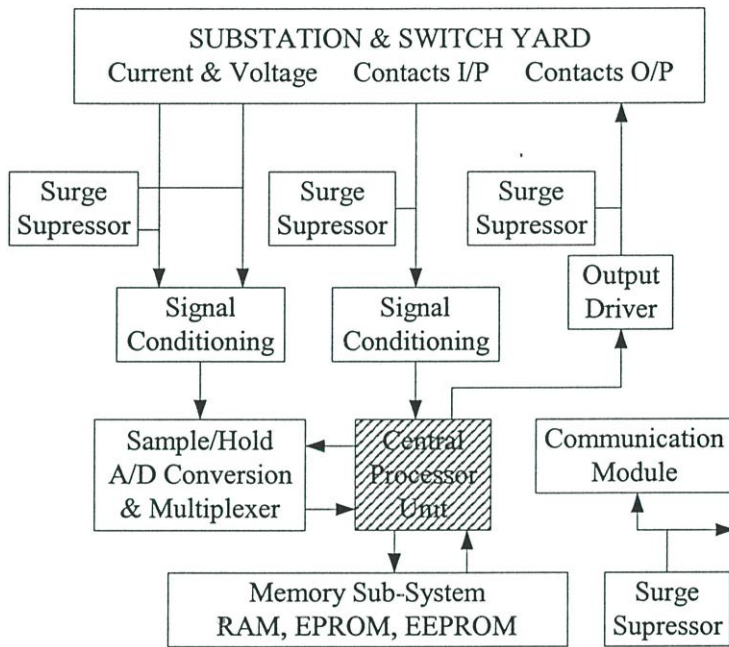
- การกำหนดจำนวนสเกลที่เลือกใช้นั้นได้มาจากการศึกษาความเหมาะสมที่จะให้ผลการวิเคราะห์ตามที่ต้องการคือ ในสเกลที่ต่ำ(ความถี่สูง)จะให้ผลในการหาตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ดีกว่า แต่ก็ทำให้อัตราการสุ่มข้อมูลของสัญญาณกระแสมีค่าสูงเกินไป ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการใช้สเกลที่สูงขึ้น(ความถี่ต่ำ) ที่ยังคงให้ผลการระบุประเภทของการเปลี่ยนแปลงในหม้อแปลงมีความแม่นยำลดลงเล็กน้อยแต่ความถี่ของอัตราการสุ่มลดลงถึง 4 เท่า ดังนั้นในการเลือกสเกลและจำนวนสเกลจึงได้พิจารณาเพื่อให้สามารถได้ผลการวิเคราะห์ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้เป็นสำคัญ

จากสิ่งที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ถึงแม้ว่ารูปแบบของขั้นตอนที่นำเสนอจะเป็นการใช้การสังเกตและการนำรูปแบบของวิธีการลองผิดลองถูกมาใช้เป็นส่วนมากแต่ก็ได้ยึดแนวทางการวิเคราะห์เดิมเป็นหลัก และจากผลการทดลองที่ได้เมื่อทดสอบกับสัญญาณกระแสอินรัชและพอลต์ที่แตกต่างกันจากการจำลองตามเงื่อนไขที่กำหนดพบว่าสามารถให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ที่ใช้ช่วงของข้อมูลที่ลดลงและรูปแบบการตัดสินใจมากกว่าจึงไม่ได้พิจารณาผลจากเวลาเท่าใดนัก แต่ในทางปฏิบัตินั้นผลทางเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเป็นสิ่งที่จะต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากขึ้น

### 3. รีเลย์แบบดิจิทัล (Digital Relay)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอถึงพัฒนาการของระบบรีเลย์ป้องกันตั้งแต่อดีตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาการกระบวนการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชกับพอลต์ในโซนป้องกันแล้วนั้น เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับรีเลย์แบบดิจิทัลชัดเจนยิ่งขึ้นเกี่ยวกับส่วนโครงสร้างภายในและความสัมพันธ์ของเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในรีเลย์ดังกล่าว จากภาพแสดงบล็อกไคแกรมของรีเลย์ดิจิทัล จะพบว่ารีเลย์ดังกล่าวจะ

มีลักษณะเหมือนกับรีเลย์แบบอนาล็อก (Analog Relay) ซึ่งรับสัญญาณเข้า ประมวลผลสัญญาณเหล่านั้น แล้วสร้างเป็นแรงบิด หรือ Logic Output ซึ่งคือ System Quantity และทำการตัดสินใจเพื่อให้หน้าสัมผัสปิดหรือเปิด ต่อมาเมื่อได้มีการพัฒนาไมโครโพรเซสเซอร์ขึ้น จะเห็นได้ว่ารีเลย์ดิจิทัลสามารถทำงานเป็นรีเลย์ป้องกันได้เช่นกัน โดยจะประกอบด้วย ระบบประมวลผลกลาง(CPU), ระบบหน่วยความจำ, ระบบรับและรวบรวมข้อมูล, ระบบปรับแต่งสัญญาณ, ระบบป้องกันสัญญาณเสิร์จ, ระบบไฟเลี้ยง และระบบสื่อสารข้อมูล เป็นต้น



รูปแสดงบล็อกไดอะแกรมในรีเลย์ป้องกันแบบดิจิทัล

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนากระบวนการตัดสินใจในหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ของรีเลย์ ซึ่งทำหน้าที่ในการคำนวณค่าต่างๆ ที่จำเป็นต่อการตัดสินใจในการควบคุมเวลา รวมทั้งการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

## ประวัติผู้เขียน

นาย เกรียงไกร กิตติวรารุณี เกิดเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2519 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540

ปัจจุบันทำงานที่ บริษัท ไทยออยล์ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ที่ผ่านมามีผลงานทางด้านไฟฟ้าดังนี้

- |              |  |
|--------------|--|
| ปี 2540-2543 | วิศวกรโครงการ ดูแลรับผิดชอบโครงการร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115 kV สฟ.อ่าวอุดม จาก 66 MVA เป็น 166 MVA, ขยายสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV สฟ.อ่าวไผ่, ก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง 230 kV สฟ.อ่าวอุดม2 ขนาด 400 MVA, ปรับเปลี่ยนสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 kV 2 วงจร เป็น 230 kV 4 วงจร ระหว่าง สฟ.อ่าวไผ่ กับ สฟ.อ่าวอุดม2 |
| ปี 2543-2544 | วิศวกรทดสอบ ดูแลรับผิดชอบวางแผนการทดสอบเบรคป้องกันในระบบไฟฟ้าของบริษัท ไทยออยล์ จำกัด  |
| ปี 2544-2545 | วิศวกรซ่อมบำรุง ดูแลรับผิดชอบซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าทั้งหมด ในส่วนโรงกลั่นที่ 1 และ 2 ของบริษัท ไทยออยล์ จำกัด  |

เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปี 2543 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการตีพิมพ์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษาปริญญาโท 2 บทความคือ วิศวกรรมลาดกระบังจำนวน 1 บทความ และในวารสารสัมมนาวิชาการสายงานธุรกิจระบบส่งปี 2545 จำนวน 1 บทความ

### ผลงานทางวิชาการ

1. เกรียงไกร กิตติวรารุณี, อานันท์วัฒน์ คุณากร, ศุติ บรรจงจิตร, “ การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกระแสอินรัชและฟอลต์ของหม้อแปลงด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย.”, วิศวกรรมลาดกระบัง,ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2545 , หน้า 65-70.
2. เกรียงไกร กิตติวรารุณี, อานันท์วัฒน์ คุณากร, ศุติ บรรจงจิตร, “ การแปลงเวฟเล็ดสำหรับการวิเคราะห์กระแสอินรัชทรานเซียนต์ในหม้อแปลงกำลัง.”, สัมมนาวิชาการสายงานธุรกิจระบบส่งปี 2545 , การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, มิถุนายน 2545 , บทความวิชาการสาขา Substation , บทความที่ S11.