

การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อแบ่งแยกความผิดปกติ
ภายในและภายนอกหม้อแปลง

APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM FOR CLASSIFICATION OF
INTERNAL AND EXTERNAL FAULT IN TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-096

การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อแบ่งแยกความผิดพร่อง
ภายในและภายนอกหม้อแปลง

APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM FOR CLASSIFICATION OF
INTERNAL AND EXTERNAL FAULT IN TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-020-096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF DISCRETE WAVELET TRANSFORM FOR CLASSIFICATION OF
INTERNAL AND EXTERNAL FAULT IN TRANSFORMER



THE THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-020-096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อแบ่งแยกความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลง

Thesis Title Application of Discrete Wavelet Transform for Classification of Internal and External Fault in Transformer

นักศึกษา นายจินตสิทธิ์ เริมคิดการณ

รหัสประจำตัว 55610728

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อรรถพล เ่ง่าพิทักษ์กุล

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-096

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์	จิระเดชะ	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
รศ.ดร.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	
รศ.ดร.อรรถพล	เ่ง่าพิทักษ์กุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยในชั้นเรียนด้านการค้า
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อแบ่งแยกความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลง
นักศึกษา	นายจินตสิทธิ์ เริ่มคิดการณ์
รหัสประจำตัว	55610728
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า โดยวิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย มาวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติที่ได้จากการจำลองการเกิดความผิดปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้าผ่านชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจำลองให้เกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลง และบันทึกสัญญาณกระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขณะเกิดความผิดปกติในแต่ละประเภท นำไปหาสัญญาณกระแสผลต่าง และนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เพื่อแยกองค์ประกอบของความถี่สูงและความถี่ต่ำของสัญญาณความผิดปกติและนำสัญญาณดังกล่าวมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้

Thesis Title	Application of Discrete Wavelet Transform For Classification Of Internal and External Fault in Transformer
Student	Mr. Jintasit Rumkidkarn
Student ID.	55610728
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul

ABSTRACT

This research study and analyze fault of transformer. The detection and classification algorithm for internal and external fault using discrete wavelet transform also been proposed. Fault signal has been analyze by using experimental test set in laboratory to simulate internal and external fault of transformer. The primary and secondary current signal in each category of fault has been used to calculate differential signal for further discrete wavelet transform analysis. The High frequency and low frequency component has been extract from fault signal in order to calculate coefficient value and construct condition for fault detection and classification in transformer.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเป็นเพราะการให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการวิจัย จาก รศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งที่ได้รับคำแนะนำจากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณนายจิตติพงษ์ กล่อมจิตต์ ผู้คอยให้คำปรึกษา และช่วยให้คำแนะนำ รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอน และให้ความรู้ผู้วิจัย จนสามารถนำความรู้มาต่อยอดเพื่อสร้างงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ร่วมอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือ จนงานวิจัยเสร็จลุล่วงไปได้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาด้านระบบป้องกันหรือรีเลย์ป้องกันในระบบไฟฟ้าและสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยฉบับนี้ไปต่อยอดเพื่อใช้ในการทำงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอื่น ๆ ต่อไปได้

จินตสิทธิ์ เริ่มคิดการณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวโน้มงานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	6
2.1.1 การตรวจจับความผิดปกติจากความดันภายในตัวถังหม้อแปลง.....	6
2.1.1.1 อุปกรณ์ปล่อยความดัน (Pressure Relief Device).....	6
2.1.1.2 รีเลย์ความดัน (Pressure Relay).....	7
2.1.1.3 บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay).....	7
2.1.1.4 อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน.....	8
2.1.1.5 ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Detection Device).....	8
2.1.2 การตรวจจับความผิดปกติจากอุณหภูมิภายในหม้อแปลง.....	8
2.1.2.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันของหม้อแปลงฉนวนน้ำมัน.....	8
2.1.2.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดหม้อแปลงแบบแห้ง.....	9
2.1.3 การตรวจจับความผิดปกติทางไฟฟ้า.....	9
2.1.3.1 รีเลย์กระแสเกิน (Over-current Relay).....	9
2.1.3.2 รีเลย์ผลต่าง (Differential Relay).....	9
2.2 การแปลงเวฟเล็ด.....	10
บทที่ 3 การจำลองความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลงจากชุดทดลอง.....	15
3.1 การทดลองการเกิดความผิดปกติ.....	15
3.1.1 ปรับเปลี่ยนลักษณะการเกิดฟอลต์ในชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า.....	16
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลองการเกิดความผิดปกติ.....	17
3.2.1 ตำแหน่งที่ตรวจจับสัญญาณความผิดปกติ.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สัญญาณความผิดปกติที่ได้จากการทดลอง.....	20
3.3.1 สัญญาณความผิดปกติที่หม้อแปลง เมื่อเกิดความผิดปกติ ภายในหม้อแปลง.....	20
3.3.2 สัญญาณความผิดปกติที่หม้อแปลง เมื่อเกิดความผิดปกติ ภายนอกหม้อแปลง.....	38
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ.....	43
4.1 การวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติ.....	43
4.2 การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ จากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง.....	51
4.3 การแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ.....	56
บทที่ 5 ผลการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ.....	62
5.1 ผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ.....	62
5.1.1 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์.....	62
5.1.2 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 20 เพอร์เซ็นต์.....	64
5.1.3 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 30 เพอร์เซ็นต์.....	65
5.1.4 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 40 เพอร์เซ็นต์.....	66
5.1.5 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 50 เพอร์เซ็นต์.....	67
5.1.6 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 60 เพอร์เซ็นต์.....	67
5.1.7 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 70 เพอร์เซ็นต์.....	68
5.1.8 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 80 เพอร์เซ็นต์.....	69
5.1.9 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 90 เพอร์เซ็นต์.....	70
5.1.10 กรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า.....	70
5.2 ความถูกต้องในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ.....	71
บทที่ 6 สรุปผล.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	87
ประวัติผู้จัดทำโครงการวิจัย.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลง หลังเกิดความผิดปกติ ภายในขดลวดหม้อแปลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง แทขดลวดจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์.....	36
3.2	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลง หลังเกิดความผิดปกติ ภายนอกหม้อแปลง (หรือที่สายส่งระยะต่างๆ).....	41
4.1	ช่วงความถี่ของการแปลงเวฟเล็ดแต่ละสเกล.....	51
4.2	แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ดขององค์ประกอบความถี่สูง.....	51
4.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ จากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง.....	56
4.4	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากสัมประสิทธิ์ องค์ประกอบความถี่สูง.....	56
4.5	แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ (RA_{chk}^{diff}) จากสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ.....	59
4.6	ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ (RA_{chk}^{diff}) และ ผลลัพธ์ในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ.....	61
4.7	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ จากสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่ต่ำ.....	61
5.1	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้ การแปลงเวฟเล็ด กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 10%.....	62
5.2	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้ การแปลงเวฟเล็ด กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 20%.....	64
5.3	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้ การแปลงเวฟเล็ด กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 30%.....	65
5.4	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้ การแปลงเวฟเล็ด กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 40%.....	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.5	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ต่างกัน 50%.....67
5.6	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ต่างกัน 60%.....68
5.7	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ต่างกัน 70%.....68
5.8	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ต่างกัน 80%.....69
5.9	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ต่างกัน 90%.....70
5.10	แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงหรือที่สายส่งระยะต่าง ๆ70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบการติดตั้งบุคโฮลซ์รีเลย์ที่หม้อแปลง..... 7
2.2	บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchhol relay)..... 8
2.3	แสดงหลักการทำงานของรีเลย์แบบผลต่าง (Differential relay)..... 10
2.4	แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet..... 11
2.5	แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด..... 11
2.6	แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ด..... 12
2.7	แสดงแผนผังการกรองสัญญาณเวฟเล็ด..... 13
2.8	แสดงแผนผังการกระจายสัญญาณเวฟเล็ด และการรวมกลับเวฟเล็ด..... 14
3.1	วงจรจำลองการเกิดความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้า..... 15
3.2	วงจรทดลองและชุดทดลองการเกิดความผิดปกติ..... 18
3.3	เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า..... 19
3.4	แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ด้านแรงดันสูงระหว่างแทบขดลวด 44 กับ 396..... 21
3.5	แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ด้านแรงดันต่ำระหว่างแทบขดลวด 22 กับ 198..... 22
3.6	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติภายใน ขดลวดหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำระหว่างแทบขดลวด 44 กับ 396..... 23
3.7	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน กรณีเกิดความผิดปกติภายใน ขดลวดหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำระหว่างแทบขดลวด 22 กับ 198..... 24
3.8	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 26
3.9	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 20 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 27
3.10	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 30 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 29
3.11	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 40 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 30
3.12	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 50 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 32
3.13	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 60 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 33
3.14	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 70 เพอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน..... 34

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.15	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพร่องภายในขดลวดหม้อแปลง ระหว่างแทขดลวดที่ห่างกัน 80 เอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งแทขดลวดที่ต่างกัน.....	35
3.16	แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพร่องภายในขดลวดหม้อแปลง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแทขดลวดจาก 10 เอร์เซ็นต์ ถึง 90 เอร์เซ็นต์.....	37
3.17	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า กรณีเกิดความผิดพร่องภายนอกหม้อแปลง.....	39
3.18	ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลง กรณีเกิดความผิดพร่อง ภายนอกหม้อแปลง (หรือที่สายส่งระยะ 70 เอร์เซ็นต์).....	40
3.19	แสดงค่าสูงสุดกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพร่องภายนอกหม้อแปลง หรือที่สายส่งระยะต่าง ๆ	41
4.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่หม้อแปลงไฟฟ้า.....	44
4.2	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 ของสัญญาณกระแสผลต่าง.....	47
4.3	สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำสเกลที่ 1-10 ของสัญญาณกระแสผลต่าง.....	50
4.4	แผนผังเงื่อนไขการตรวจจับการเกิดความผิดพร่อง และแบ่งแยกประเภทความผิดพร่อง จากสัมประสิทธิ์ของความถี่สูง.....	53
4.5	ตัวอย่างสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่ใช้ในการตรวจจับ และแบ่งแยกประเภทความผิดพร่อง.....	55
4.6	แสดงการตรวจจับค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ ของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพร่อง.....	58
4.7	แผนผังเงื่อนไขการแยกประเภทความผิดพร่องจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ.....	60
5.1	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดพร่อง.....	72

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ซึ่งส่งผลทำให้อัตราความต้องการใช้งานกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีจำนวนมากขึ้น เพื่อมารองรับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย ก็มีแนวโน้มอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน ในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีระดับแรงดันการใช้งานที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการใช้งานในระบบไฟฟ้า เนื่องด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น ระบบส่งกำลังไฟฟ้าต้องออกแบบให้มีระดับแรงดันสูงเพื่อที่จะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าในระยะไกล ส่วนระบบแรงดันต่ำเหมาะสมใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานในบ้านเรือนทั่วไป เป็นต้น ทำให้ต้องมีหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อใช้สำหรับแปลงระดับแรงดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการใช้งาน ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหาย ย่อมส่งผลเสียต่อความน่าเชื่อถือทางไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าย่อมเป็นสิ่งที่สำคัญ เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย ความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น เกิดจากความเสื่อมสภาพของฉนวนภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า จนทำให้เกิดจากการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลง และทำให้หม้อแปลงเกิดความเสียหายได้ หรืออาจเกิดการลัดวงจรจากภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ส่งผลให้หม้อแปลงเกิดความเสียหาย เป็นต้น การเกิดลัดวงจรอาจเกิดจากภายในหม้อแปลงไฟฟ้า หรืออาจเกิดจากการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการเกิดความผิดปกติย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงได้ ดังนั้นการตรวจจับการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเป็นเรื่องที่สำคัญ เพื่อนำไปสู่การออกแบบป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดความเสียหาย ซึ่งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือทางไฟฟ้าในระบบอีกด้วย การเกิดความผิดปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้า มีผลกระทบอย่างมากต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ทำให้ความน่าเชื่อถือทางไฟฟ้าลดลง และเกิดไฟดับเป็นวงกว้างได้ ดังนั้นควรมีระบบป้องกันในการตรวจจับความผิดปกติที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว เพื่อให้ระบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การมีระบบป้องกันที่สามารถระบุตำแหน่งการเกิดความผิดปกติ และชนิดการเกิดความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำสูง ย่อมแสดงว่าระบบป้องกันมีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ส่งผลทำให้สามารถวางแผนในการบำรุงรักษาและแก้ไขระบบไฟฟ้าได้รวดเร็วมากขึ้น

อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงที่สำคัญและนิยมใช้ในระบบไฟฟ้าคือการใช้รีเลย์ป้องกัน ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ารวมถึงหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย ดังนั้นความรวดเร็วในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นของรีเลย์ย่อมบ่งบอกถึงความสามารถของรีเลย์นั้น ๆ ยิ่งรีเลย์ที่มีความสามารถตรวจจับความผิดปกติได้รวดเร็วและแม่นยำสูง หม้อแปลงหรืออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ายิ่งปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นรีเลย์จะทำงานได้มีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับความแม่นยำและรวดเร็วในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น

งานวิจัยนี้จึงสนใจในการวิเคราะห์เรื่องการตรวจจับการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสผลต่าง (Differential current) ณ เวลาที่เกิดความผิดปกติ ในช่วงทรานเซียน เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติให้มีความรวดเร็วและแม่นยำ ผ่านวิธีการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ทมาเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 แนวโน้มงานวิจัยที่ผ่านมา

ความผิดปกติของหม้อแปลงก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบส่งกำลังไฟฟ้าอย่างมาก เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ เพื่อช่วยให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดความผิดปกติได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบระบบป้องกันเพื่อให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานที่สูงขึ้น ทำให้นักวิจัยหลายท่านมีความสนใจในการศึกษาความผิดปกติภายในหม้อแปลงมากขึ้น โดยความผิดปกติของหม้อแปลงแบ่งออกเป็นความผิดปกติที่เกิดจากภายในหม้อแปลงหรือความผิดปกติอันเกิดจากสาเหตุภายนอก โดยความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ความผิดปกติทางกลและความผิดปกติทางไฟฟ้า ความผิดปกติของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อห้องค้ประกอบภายในหม้อแปลงผิดปกติไปจากเดิม คือความผิดปกติทางกล เช่น อุณหภูมิขดลวดสูงผิดปกติ อุณหภูมิน้ำมันซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนของหม้อแปลงสูงผิดปกติ ความดันภายในหม้อแปลงสูงผิดปกติ หรืออาจพบก๊าซที่เกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงได้ เป็นต้น จากความผิดปกติที่เกิดขึ้นดังได้กล่าวมานี้จึงทำให้มีการวิเคราะห์การตรวจจับความผิดปกติภายในหม้อแปลงได้หลายวิธีดังนี้ เช่น การตรวจจับความดันภายในหม้อแปลงโดยใช้รีเลย์แบบวัดความดันภายในหม้อแปลง ซึ่งเมื่อเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงจะทำให้ความดันภายในเปลี่ยนแปลงไปอย่างทันทีทันใดซึ่งอาศัยหลักการดังกล่าวไปดันหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อปลดวงจร นอกจากนั้นอาจใช้หลักการวัดปริมาณน้ำมันภายในหม้อแปลงมาช่วยในการเตือนว่าหม้อแปลงเกิดความผิดปกติ ซึ่งเมื่อเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงจะทำให้เกิดก๊าซปริมาณมากไปแทนที่ ทำให้ระดับน้ำมันลดลง อาศัยหลักการดังกล่าวไปแจ้งเตือนหรือสั่งปลดวงจรเพื่อป้องกันหม้อแปลง และมีหลายๆงานวิจัยศึกษาและออกแบบการป้องกันการเกิดความผิดปกติในหม้อแปลงซึ่งเป็นการป้องกันโดยใช้การตรวจจับความผิดปกติทางกล เช่น ตรวจจับความดันที่เกิดจากก๊าซภายในหม้อแปลงเมื่อฉนวนหม้อแปลงมีความเสียหายเกิดขึ้น หรือตรวจจับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในขดลวดหม้อแปลง เป็นต้น ต่อมามีการใช้หลักการป้องกันโดยใช้การตรวจจับก๊าซภายในหม้อแปลง ซึ่งเมื่อเกิดความผิดปกติหรืออาร์คเกิดขึ้นภายในหม้อแปลง ทำให้น้ำมันแตกตัวเป็นก๊าซเกิดขึ้น เมื่อรีเลย์ตรวจจับก๊าซเหล่านี้ได้จะไปสั่งแจ้งเตือนหรือปลดวงจรเพื่อป้องกันหม้อแปลง การตรวจจับความผิดปกติภายในหม้อแปลงมีการวิจัยเพื่อแบ่งแยกประเภทการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงโดยใช้หลักการวัดปริมาณก๊าซแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นและเทียบอัตราส่วนเพื่อสร้างเงื่อนไขในการระบุประเภทความผิดปกติแต่ละประเภทได้ [1]-[3] มีงานวิจัยอีกมากมายวิเคราะห์ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเพื่อวินิจฉัยการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง[1]-[16] นอกจากการตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงโดยอาศัยการผิดปกติทางกลและทางเคมีดังกล่าวไป เป็นการตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงที่มีฉนวนเป็นน้ำมันเท่านั้น และวิธีการตรวจจับก๊าซภายในหม้อแปลง เป็นวิธีที่ค่อนข้างซับซ้อนและต้องใช้วิธีการทางเคมีมาช่วยในการวิเคราะห์ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาค่อนข้างมากในการนำตัวอย่างน้ำมันมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุโดยวิธีดังกล่าว ดังนั้นการตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงทางไฟฟ้าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว คือ อาศัยหลักการของกระแสลัดวงจร เช่น รีเลย์กระแสเกิน (Over-current relay) การทำงานของรีเลย์กระแสเกินจะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านเกินค่าที่ตั้งไว้ หรือใช้รีเลย์ผลต่าง (Differential relay) ในการป้องกันหม้อแปลง อาศัยหลักการผลต่างระหว่างกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยเทียบอัตราส่วนของหม้อแปลง หากมีค่ากระแสผลต่างเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ รีเลย์จะทำงาน เป็นต้น หลักการตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงโดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสผลต่างมีหลายงานวิจัยศึกษาพฤติกรรมระหว่างกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ที่เกิดขึ้นขณะสวิตช์จ่ายไฟให้หม้อแปลงกับกระแสความผิดพลาด[17]-[19] เพื่อให้รีเลย์ทำงานได้อย่างถูกต้อง และต้องไม่ทำงานกรณีกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลง มีหลายงานวิจัยศึกษาลักษณะของกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงเพื่อแยกความแตกต่างออกจากกระแสความผิดพลาดเพื่อให้รีเลย์ทำงานได้อย่างถูกต้อง[20]-[30] ใช้การเทียบอัตราส่วนค่าพลังงานที่คำนวณได้ในกรณีเกิดกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงและกรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงมาใช้เป็นค่าในการแบ่งแยกระหว่างกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงกับกระแสความผิดพลาด[28] ใช้การแปลงเวฟเล็ทองค์ประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณเวฟเล็ทในสเกลที่ 5 มาสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกระหว่างกระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงกับกระแสความผิดพลาด[23] ในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเกิดความผิดพลาดที่หม้อแปลงหลายวิธี ส่วนใหญ่มีวิเคราะห์การจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [31]-[33] เช่น ATP/EMTP และ PSCAD เป็นต้น เนื่องจากง่ายต่อการวิจัยศึกษา และมีความปลอดภัยมากกว่าที่จะทำการทดลองการเกิดความผิดพลาดจริงที่หม้อแปลง ซึ่งอาจมีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ด้านอุปกรณ์ป้องกัน เป็นต้น ต้องเป็นหม้อแปลงที่ออกแบบมาให้ทดลองความผิดพลาดโดยเฉพาะ ไม่เช่นนั้นหม้อแปลงที่นำมาทดลองอาจเกิดเสียหายได้ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้โปรแกรม MATLAB มาช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้น [31]-[37] มีงานวิจัยการเกิดความผิดพลาดที่หม้อแปลงจากสัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม ATP/EMTP และ PSCAD เพื่อนำมาวิเคราะห์การทำงานของรีเลย์ป้องกัน[32]-[33] ใช้ระบบพีซีมาสร้างเงื่อนไขเพื่อปรับปรุงการตรวจจับความผิดพลาดที่หม้อแปลงของรีเลย์ โดยใช้การจำลองความผิดพลาดที่หม้อแปลงด้วยโปรแกรม ATP/EMTP [36] นอกจากงานวิจัยที่ศึกษาและปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ดังที่กล่าวไปแล้ว มีงานวิจัยศึกษาพฤติกรรมของกระแสที่หม้อแปลงเพื่อแบ่งแยกระหว่างกระแสพุ่งเข้า (Inrush current) อันเนื่องมาจากสวิตช์จ่ายไฟให้หม้อแปลงกับกระแสความผิดพลาด โดยใช้การพิจารณาจากรูปคลื่นสัญญาณเวฟเล็ท [22] จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการเกิดความผิดพลาดที่หม้อแปลง เป็นหัวข้อที่น่าค้นหาเพื่อหาวิธีการปรับปรุงการทำงานของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว เพื่อให้สามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงหรือระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบ เพื่อช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาเรื่องพฤติกรรมการเกิดความผิดพลาดที่หม้อแปลงรวมถึงระบบป้องกันหม้อแปลง โดยในปัจจุบันอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ รีเลย์ป้องกันหม้อแปลง โดยรีเลย์ที่นิยมใช้ป้องกันหม้อแปลงคือ รีเลย์ผลต่าง (Differential relay) ซึ่งใช้หลักการของกระแสผลต่างมาใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดที่หม้อแปลง จึงมีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาการตรวจจับความผิดพลาดภายในหม้อแปลงโดยใช้หลักการของรีเลย์ผลต่าง โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาจากการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น ATP/EMTP หรือ PSCAD เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการจำลองสัญญาณความผิดพลาดผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อนำสัญญาณความผิดพลาดไปวิเคราะห์ต่อ นั้น ผลของสัญญาณความผิดพลาดอาจไม่เหมือนกับข้อมูลจากการเกิดความผิดพลาดจริงได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ ทำให้ผลของสัญญาณที่วิเคราะห์จากโปรแกรมคลาดเคลื่อนไปเมื่อนำมาวิเคราะห์ในระบบจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการตรวจจับความผิดพลาดของหม้อแปลงโดยวิเคราะห์จากสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงจากชุดจำลองการเกิดความผิดพลาดที่หม้อแปลง โดยหม้อแปลงที่ใช้ถูกออกแบบให้รองรับการเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยงานวิจัยนี้้นำการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยมาตรวจจับความผิดพลาดและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากสัญญาณความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ่วงที่เกิดขึ้นจริง โดยวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลง เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบรีเลย์ผลต่าง เพื่อพัฒนาการตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลง และสามารถวิเคราะห์ประเภทการเกิดความผิดปกติได้
- 2) เพื่อประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย มาวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติ เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้
- 3) เพื่อประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ทั้งวิธีวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง และองค์ประกอบความถี่ต่ำ มาสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลงได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาการเกิดความผิดปกติภายในระบบไฟฟ้า โดยเน้นศึกษาและวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจำลองการเกิดความผิดปกติจากชุดจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า ให้เกิดความผิดปกติระหว่างสายส่งไฟฟ้ากับภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเกิดความผิดปกติภายในระบบไฟฟ้าจะส่งผลทำให้ความถี่ของสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นนำวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย เป็นวิธีช่วยในการแยกองค์ประกอบความถี่ออกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแยกองค์ประกอบความถี่สูง และความถี่ต่ำ ในแต่ละสเกล และหาสเกลที่เหมาะสม เพื่อมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณความผิดปกติในองค์ประกอบความถี่ จากนั้นนำความสัมพันธ์ขององค์ประกอบความถี่ที่เกิดขึ้นไปตรวจจับการเกิดความผิดปกติและสร้างเงื่อนไขในการจำแนกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นระหว่างภายในขดลวดกับภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบป้องกันต่อไป

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ทำการจำลองการเกิดความผิดปกติภายในขดลวดและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าจากชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้าที่อยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยตรวจจับสัญญาณกระแสผลต่าง (Differential current) ของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณกระแสผลต่าง (Differential current) ก่อนและหลังเกิดความผิดปกติ
- 2) ทำการศึกษาลักษณะของสัญญาณความผิดปกติของกระแสผลต่าง ของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณ ด้วยวิธีประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อแยกองค์ประกอบของความถี่ของสัญญาณ ความถี่สูง และความถี่ต่ำ เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการตรวจจับการเกิดความผิดปกติ และแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

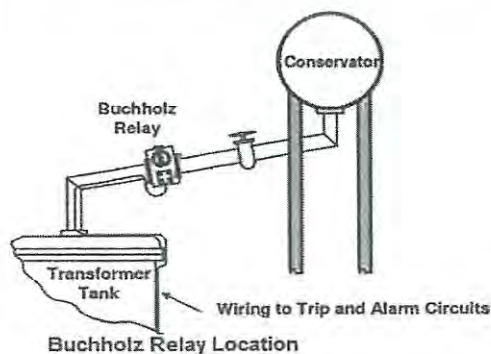
2.1.1.2 รีเลย์ความดัน (Pressure Relay)

ใช้กับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันแต่ถ้าเป็นหม้อแปลงที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator Tank) จะไม่ใช่รีเลย์ความดันเพราะสามารถใช้บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay) ทำงานแทนได้ รีเลย์ความดัน (Pressure Relay) แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ รีเลย์ความดันก๊าซ (Gas Pressure Relay) ติดตั้งด้านบนของตัวถังเหนือระดับน้ำมัน และรีเลย์ความดันน้ำมัน (Oil Pressure Relay) ติดตั้งด้านล่างของตัวถังหม้อแปลง รีเลย์ความดัน จะทำงานเมื่อเกิดความดันสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ และส่งสัญญาณเตือนให้ผู้ปฏิบัติงานทราบ

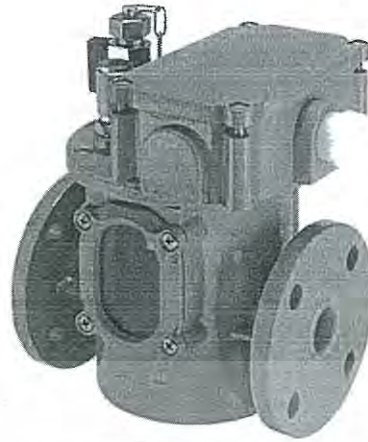
2.1.1.3 บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay)

ใช้กับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันที่มีถังคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator Tank) โดยการทำงานของบุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay) แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

- 1) การป้องกันการสะสมของก๊าซในตัวถังหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดที่มีค่ากระแสลัดวงจรต่ำหรือเกิดการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ทำให้เกิดก๊าซภายในฉนวนน้ำมัน ซึ่งก๊าซนี้จะลอยตัวสู่ด้านบนและไปสะสมที่ตัวบุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay) และเมื่อเกิดขึ้นหลายครั้งปริมาณก๊าซที่สะสมมีมากจนทำให้ลุดลอยด้านบนในตัวบุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay) เลื่อนต่ำลงไปกดแผ่นหน้าสัมผัสและส่งสัญญาณเตือน (ALARM) ไปยังห้องควบคุม
- 2) การป้องกันความดันสูงทันทีทันใด ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในตัวถังหม้อแปลงอย่างรุนแรงทำให้เกิดการอาร์ค (Electric Arc) และทำให้ความดันของน้ำมันสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและพุ่งขึ้นสู่ถังคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator Tank) ซึ่งน้ำมันที่มีความดันสูงจะต้องไหลผ่านตัวบุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz Relay) ไปชนแผ่นหน้าสัมผัสและกดลุดลอยด้านล่าง และส่งสัญญาณทริปไปยังห้องควบคุมเพื่อสั่งปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ทำให้หม้อแปลงปลดออกจากระบบไฟฟ้า
- 3) การป้องกันตัวถังหม้อแปลงรั่ว ในกรณีที่เกิดการรั่วของตัวถังหม้อแปลงนั้นซึ่งปกติระดับน้ำมันจะสูงเกินตัวถังหลักของหม้อแปลงโดยระดับน้ำมันสูงสุดจะอยู่ในถังคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator Tank) และตัวบุคโฮลซ์ติดตั้งระหว่างตัวถังทั้งสอง เมื่อเกิดการรั่วที่ตัวถังหลักระดับน้ำมันลดต่ำลงทำให้ลุดลอยด้านล่างเคลื่อนที่ต่ำลงและส่งสัญญาณทริป (TRIP) ไปยังห้องควบคุมเพื่อสั่งปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ทำให้หม้อแปลงออกจากระบบไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2.1 รูปแบบการติดตั้งบุคโฮลซ์รีเลย์ที่หม้อแปลงใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 บุคโฮลซรีเลย์ (Buchholz Relay)

2.1.1.4 อุปกรณ์ระบายความดันและวัดความดัน

อุปกรณ์นี้ช่วยรักษาระดับความดันของหม้อแปลงใช้กับหม้อแปลงแบบระบบปิดที่ไม่ใช่แบบคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator) และใช้กับหม้อแปลงตั้งแต่ขนาด 2500 kVA ขึ้นไป เพื่อป้องกันการเพิ่มอย่างช้าๆ ของความดันทั้งความดันบวกและความดันลบ โดยจะมีไบมิตไว้เจาะแผ่นระบายความดัน เพื่อให้อากาศจากภายนอกเข้ามาในตัวถังเมื่อความดันเป็นลบเกินค่าที่กำหนดไว้ และไบมิตจะเจาะระบายความดันภายในออกสู่อากาศภายนอกเมื่อความดันเป็นบวกเกินค่าที่กำหนดไว้

2.1.1.5 ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Detection Device)

ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติหรือความเสียหายของฉนวนภายในถังคอนเซอร์เวเตอร์ของหม้อแปลง เมื่อฉนวนมีรอยรั่ว อากาศภายในถัง (Rubber Bag) จะเข้าไปปนกับน้ำมันในถังคอนเซอร์เวเตอร์ (Conservator Tank) และลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนไปสะสมที่ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Detection Device) หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังแผงควบคุม เพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ปฏิบัติงานทราบ

2.1.2 การตรวจจับความผิดปกติจากอุณหภูมิภายในหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเกิดการอาร์ค (Electric Arc) หรือลัดวงจรที่ขดลวด (Winding Fault) จะเกิดความร้อนสูงสะสมในขดลวดและแกนเหล็ก เนื่องจากกระแสเกินพิกัด (Over-current) ดังนั้นสามารถใช้หลักการดังกล่าวในการตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงได้ โดยอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการดังกล่าวมีดังนี้

2.1.2.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันของหม้อแปลงฉนวนน้ำมัน

อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิขดลวด คือ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่จุ่มในบ่อวัด โดยที่บ่อวัดนี้จะอยู่ที่ด้านบนของตัวถังหม้อแปลงซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำมันลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน และตัวเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) นี้จะต่อสายสัญญาณไปยังตัวเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) และรับสัญญาณจากหม้อแปลงกระแส (CT) มายังตัวแปลงสัญญาณและส่งไปยังตัวเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) วัดอุณหภูมิแสดงออกมาเป็นตัวเลข ส่วนการวัดอุณหภูมิของด้านบนจะใช้สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่จุ่มในบ่อวัดเพียงอันเดียว ถ้าอุณหภูมิเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ ก็จะส่งสัญญาณไปแจ้งเตือน (ALARM) หรือสั่งปลดวงจร (TRIP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิขดลวดหม้อแปลงแบบแห้ง

การวัดค่าอุณหภูมิของขดลวดจะใช้ตัว RTD (Resistance Temperature Detectors) ติดตั้งที่บริเวณขดลวดด้านแรงต่ำและบริเวณอื่นๆ หลายจุดเพื่อวัดค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉพาะจุดและอุณหภูมิเฉลี่ย จากนั้นจะส่งสัญญาณไปที่รีเลย์วัดความร้อน หรือตัวแสดงอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ ก็จะส่งสัญญาณไปแจ้งเตือน (ALARM) หรือสั่งปลดวงจร (TRIP)

2.1.3 การตรวจจับความผิดปกติทางไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในหม้อแปลง จะทำให้เกิดกระแสสูงไหลภายในขดลวดหม้อแปลง ซึ่งมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า ดังนั้นสามารถใช้หลักการดังกล่าวในการตรวจจับความผิดปกติของหม้อแปลงได้ โดยอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการดังกล่าวมีดังนี้

2.1.3.1 รีเลย์กระแสเกิน (Over-current Relay)

รีเลย์กระแสเกิน จะทำงานเมื่อมีกระแสไหลเกินพิกัด ในระบบที่ต้องการป้องกัน รีเลย์ชนิดนี้นิยมใช้กันมากในการป้องกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่ง บัสบาร์ ทั้งในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย ตลอดจนใช้ป้องกัน กระแสไหลเกินกับมอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป รีเลย์กระแสเกิน ชนิดทำงานทันทีทันใด (Instantaneous Over-current Relay) เป็นรีเลย์ที่ทำงานทันทีทันใดเมื่อมีกระแสไหลเกินค่าพิกัด (Pick up) ของรีเลย์ โครงสร้างที่ใช้จะเป็นแบบดึงดูดอาร์เมเจอร์ (Attractive) หรือแบบโรเตอร์หมุนหรือแบบสถิต (Static) ก็ได้ โดยปกติรีเลย์ชนิดนี้มักใช้งานร่วมกับรีเลย์กระแสเกินชนิดอื่นๆ เช่น การทำงานร่วมกับรีเลย์แบบดีฟิไนต์ไทม์ (Definite Time) การตั้งค่ากระแสพิกัดสามารถทำได้โดยการปรับช่องว่างระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดอาร์เมเจอร์

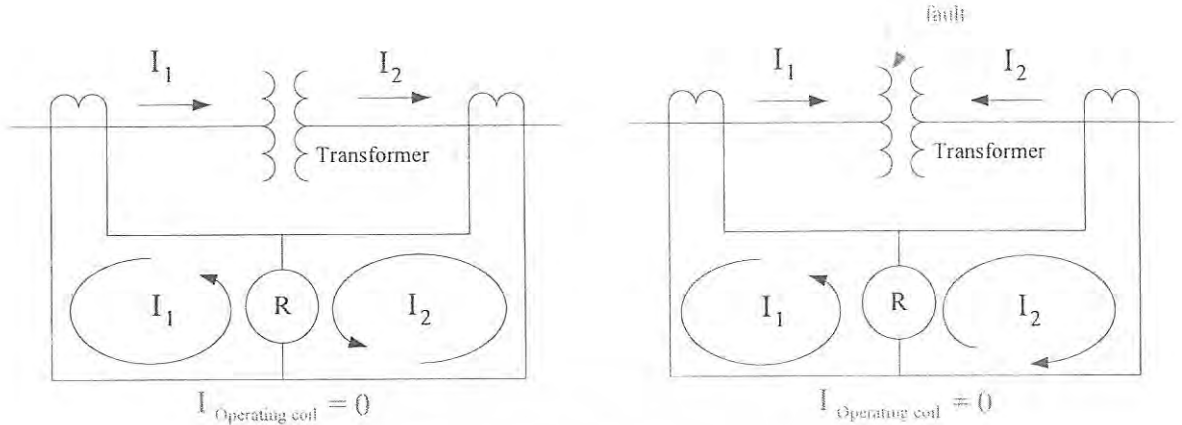
2.1.3.2 รีเลย์ผลต่าง (Differential Relay) [38]

รีเลย์ผลต่าง หลักการนี้มาจากการอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิ โดยมีความสัมพันธ์กันระหว่างกระแสทั้งสองด้านตามอัตราส่วนหม้อแปลง (Transformer Ratio) ซึ่งเป็นไปตามความเป็นจริงของหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดจากการผิดปกติของหม้อแปลงขึ้น ความสัมพันธ์ของกระแสทั้งสองด้านจะไม่เป็นไปตามอัตราส่วนหม้อแปลง (Transformer Ratio) นั่นคือมีกระแสไม่สมดุลเกิดขึ้น กระแสนี้จะสามารถตรวจจับได้โดยอาศัยรีเลย์ผลต่าง (Differential Relay)

กรณีในสภาวะปกติกระแสที่เกิดขึ้นที่รีเลย์ผลต่าง (Differential Relay) เมื่อหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (CT) ทั้งสองมีอัตราส่วนเท่ากัน ทำให้กระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิจะมีทิศทางตามลูกศรตามรูปที่ 2.3 (ก) ทำให้ผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านคอยล์ทำงาน (Operating Coil) เป็นศูนย์ รีเลย์จึงไม่ทำงาน

กรณีเกิดความผิดปกติในเขตป้องกันของรีเลย์ผลต่าง กระแสจะไหลมายังจุดที่เกิดความผิดปกติทั้งสองด้านผ่านหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (CT) ของแต่ละตัวทำให้ขนาดของกระแสที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (CT) ทั้งสองตัวไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านคอยล์ทำงาน (Operating coil) ไม่เป็นศูนย์ กระแสอันนี้จะทำให้รีเลย์ทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เมื่ออยู่ในสภาวะปกติ (ข) เมื่อเกิดความผิดปกติที่หม้อแปลง
รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของรีเลย์กระแสต่าง (Differential Relay)

2.2 การแปลงเวฟเลต

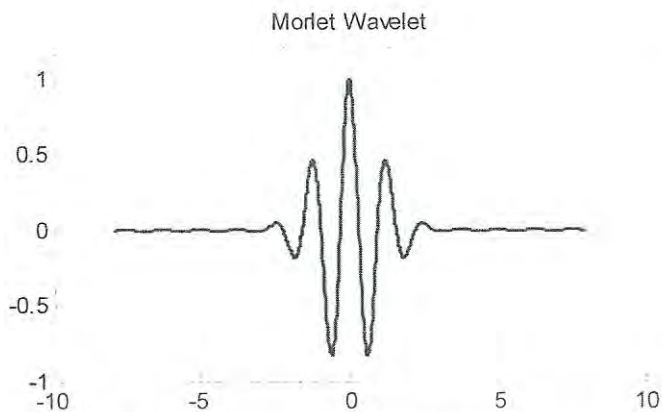
การแปลงเวฟเลตเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้ทั้งข้อมูลทางเวลาและความถี่ ซึ่งถูกพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณฟูเรียร์ เนื่องจากการแปลงสัญญาณฟูเรียร์จะได้เฉพาะความถี่เท่านั้น โดยไม่ได้ข้อมูลทางเวลา โดยข้อมูลทางเวลามีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก เพื่อได้ทราบตำแหน่งของเวลาที่เกิดความถี่ของสัญญาณในช่วงที่ต้องการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสัญญาณความผิดปกติทางไฟฟ้าได้ โดยการแปลงเวฟเลตสามารถปรับเปลี่ยนความถี่และช่วงเวลาให้เหมาะสมกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ได้ เมื่อใช้ความละเอียดของเวลาสูง จะทำให้ความละเอียดของความถี่ต่ำ และเมื่อให้ความละเอียดของความถี่สูง จะทำให้ความละเอียดของเวลาต่ำ

ทฤษฎีเวฟเลต (Wavelet Theory) คือ ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการสักรางโมเดลของสัญญาณระบบหรือขบวนการทางฟิสิกส์ใดๆ โดยจะสามารถประมาณได้ว่าสัญญาณจะประกอบขึ้นด้วยเซตของสัญญาณเฉพาะย่อยๆ มารวมกันเป็นสัญญาณนั้นๆ สัญญาณประเภทนี้จะถูกเรียกว่า เวฟเลต (Wavelet) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการนำเวฟเลตหลายๆ อันมารวมกันเป็นเซตเพื่อใช้ในการอธิบายสัญญาณใดๆ นั้น รูปคลื่นเวฟเลตแต่ละตัวจะต้องมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกัน เรียกว่า เวฟเลตแม่ (Mother wavelet) โดยรูปคลื่นเวฟเลตแต่ละตัวที่นำมารวมกันนั้นจะเกิดจากการสเกล (Scaling : a) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translate : k) แสดงลักษณะของเวฟเลตแม่และเวฟเลตที่ถูกสเกลจะต้องมีการปรับให้อยู่ในสภาวะปกติ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอดังนั้นหาก

กำหนดให้ $\psi_{a,k}(t)$ เป็นเวฟเลตแม่ จะสามารถเขียนสมการทั่วไปของเวฟเลตที่สเกล a และตำแหน่ง k ใดๆ ที่สัมพันธ์กับเวฟเลตแม่ได้ดังนี้

$$\psi_{a,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) \tag{2.1}$$

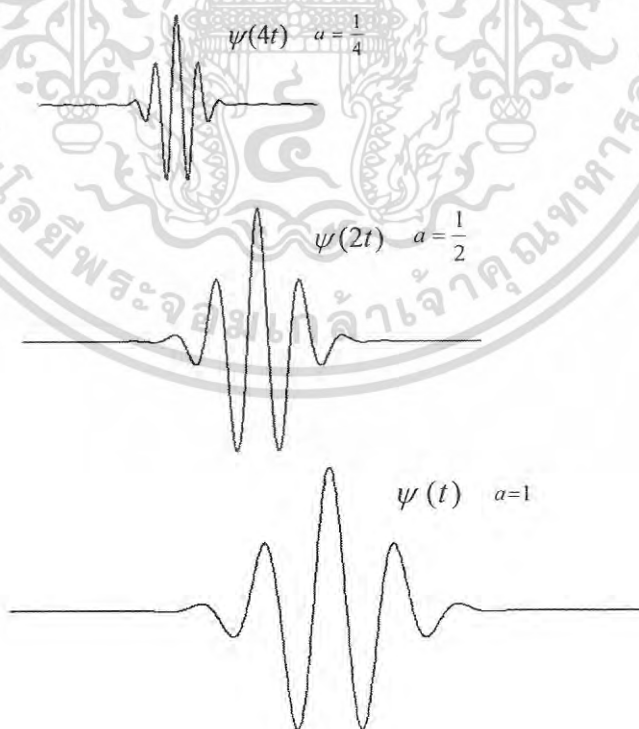
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ตแบบ Morlet

จาก $\psi_{a,k}(t)$ แทนด้วยเวฟเล็ตแม่ สามารถอธิบายการสเกล (Scaling : a) และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or Shifting : k) ซึ่งมีสัมพันธ์กับเวฟเล็ตแม่ได้ดังนี้

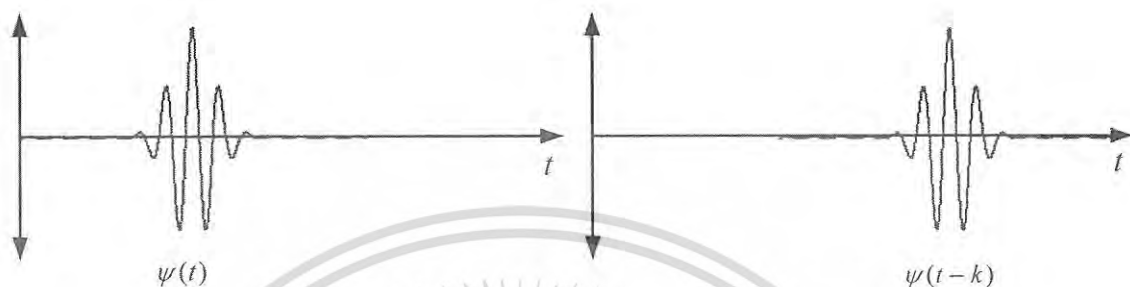
1) การสเกล (Scaling : a) เป็นการวิเคราะห์สัญญาณเวฟเล็ตซึ่งแสดงตำแหน่งของเวลา และขนาดสัญญาณ โดยการเปลี่ยนแปลงของสเกล จะเป็นเสมือนการบีบอัดและขยายสัญญาณเวฟเล็ตแม่ สเกลทางเวฟเล็ตจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบของขนาดซึ่งแทนด้วย a เมื่อตัวประกอบของขนาดมีค่ามากขึ้น คือการขยายสัญญาณเวฟเล็ตแม่ ซึ่งเป็นการเพิ่มความถี่ แต่ถ้าตัวประกอบของขนาดสเกลมีค่าลดลง คือการบีบสัญญาณเวฟเล็ตแม่ ซึ่งเป็นการลดความถี่ ซึ่งพิจารณาสัญญาณเวฟเล็ตที่ตัวประกอบขนาดแตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or Shifting : k) โดยการเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ตจะหมายถึง การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน $\Psi(t)$ ด้วย k จะแสดงได้โดย $\Psi(t-k)$ การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดยพารามิเตอร์ “k” ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ตบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ตที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform :DWT) มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกล (Scaling : a) และการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกันโดยเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด a ซึ่งมี k หลายๆ ตำแหน่งมารวมกันให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุทจริง รูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า แล้วได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Dyadic Wavelet Transform โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi \left[\frac{n - k2^m}{2^m} \right] \quad (2.2)$$

m, n, k เป็นเลขจำนวนเต็มโดยที่

$$\psi \left[\frac{n - k2^m}{2^m} \right] = \text{mother wavelet}$$

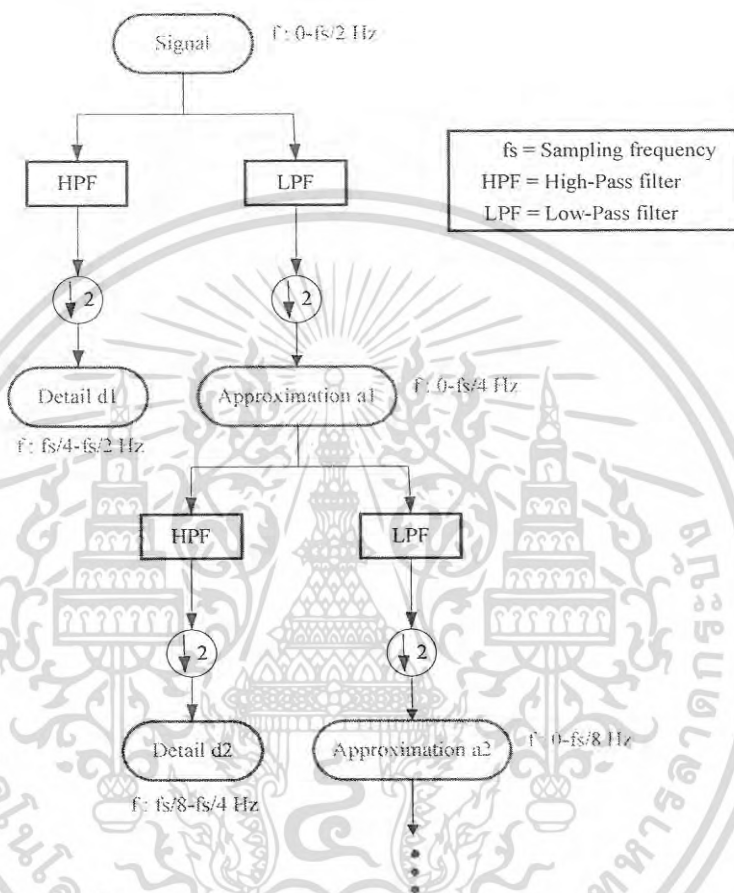
n คือ จำนวนข้อมูล

m คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

k คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

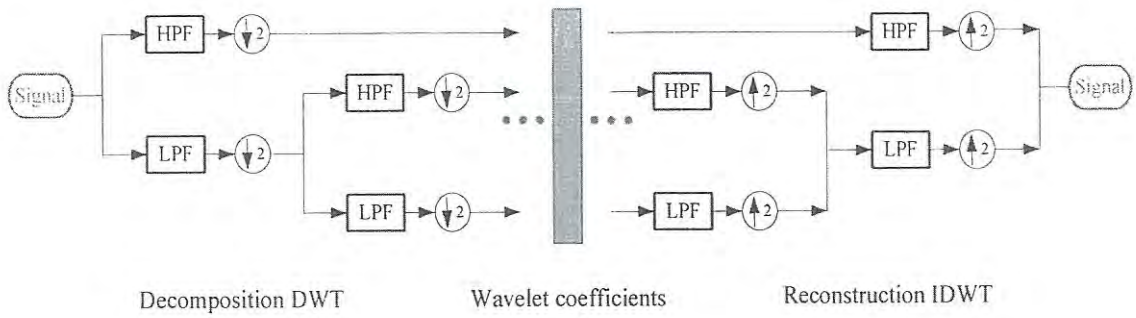
การแปลงเวฟเล็ตใช้หลักการกรองสัญญาณแบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave filter banks) เป็นเหมือนการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ ซึ่งจะแบ่งแยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการกรองความถี่สูง (High-Pass filter) หรือเรียกว่า Detail และส่วนของการกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass filter) หรือเรียกว่า Approximation โดยความถี่จะเปลี่ยนแปลงไปอัตราครึ่งละสองเท่าจากสัญญาณอินพุตเดิม แสดงตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังการกรองสัญญาณเวฟเล็ต

การกระจายเวฟเล็ต (Wavelet Decomposition) คือ การนำสัญญาณนั้นๆมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตโดยเป็นการแตกสัญญาณอินพุตมาอยู่ในฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ ที่มีช่วงตำแหน่งของเวลาและสเกลที่แตกต่างกัน และในกระบวนการกลับกัน สามารถรวมสัญญาณของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่กลับไปเป็นสัญญาณอินพุตเดิมได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction) ซึ่งรูปแสดงกระบวนการกระจายเวฟเล็ตและการรวมกลับเวฟเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังการกระจายสัญญาณเวฟเล็ต และการรวมกลับเวฟเล็ต



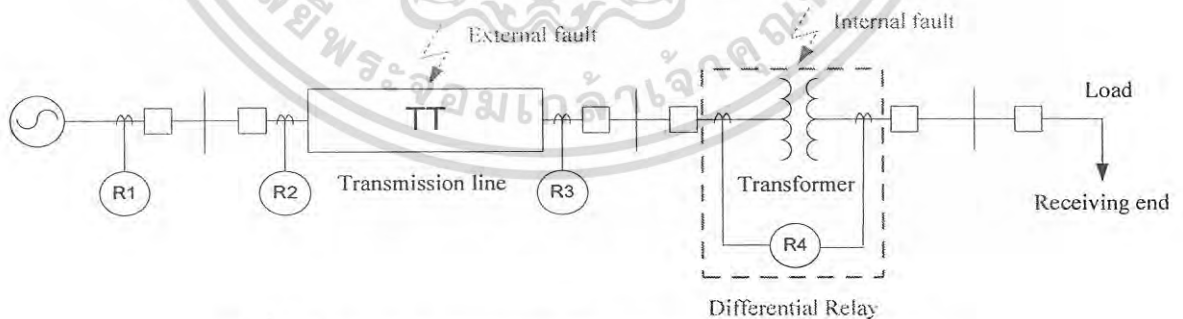
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการเกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าจากชุดทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสผ่านชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยสายส่งต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสและทำการตรวจจับสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงทรานเซียนต์ในขณะที่เกิดความผิดพร่องนำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Wavelet เพื่อแยกองค์ประกอบของความถี่ที่แตกต่างกันซึ่งวิธีการจำลองความผิดพร่อง และการวิเคราะห์สัญญาณมีรายละเอียดดังที่จะได้กล่าวให้หัวข้อต่อไป

3.1 การทดลองการเกิดความผิดปกติ

ชุดทดลองการเกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีระบบสายส่งไฟฟ้า 3 เฟส เชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสเพื่อจ่ายไปยังโหลด งานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพร่องที่หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสซึ่งอยู่ในโซนป้องกันหม้อแปลงของรีเลย์ผลต่าง (R4) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการวิเคราะห์ทำการจำลองให้เกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าหรือที่สายส่งไฟฟ้าแล้ววิเคราะห์การตรวจจับการเกิดความผิดพร่องที่หม้อแปลงไฟฟ้า คือตรวจจับสัญญาณความผิดพร่องที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลงโดยอาศัยสัญญาณกระแสผลต่าง คือตรวจจับสัญญาณกระแสความผิดพร่องที่เกิดขึ้นที่ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ตรงโซนป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ตำแหน่งรีเลย์ R4 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรจำลองการเกิดความผิดปกติในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับชุดจำลองเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เป็นชนิดแห้ง (Dry type) ขนาดพิกัด 15 kVA แรงดันพิกัด 220/440 โวลต์ และถูกออกแบบให้มีแทปขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำออกมาทุก ๆ 10 เปอร์เซ็นต์เป็นจำนวน 10 แทป เพื่อใช้ในการจำลองการ

เกิดความผิดพลาดภายในขดลวดหม้อแปลงได้ ส่วนในการจำลองระบบสายส่งไฟฟ้า ใช้การจำลองรูปแบบสายส่งแบบไพ(Pi) ซึ่งสามารถจำลองการเกิดความผิดพลาดได้ 5 ระยะสายส่ง คือ ที่ระยะ 30 เปอร์เซ็นต์ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในการทดลอง ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดทดลองด้วยหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variable Voltage Transformer) 3 เฟส ขนาดพิกัด 15 kVA พิกัดกระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์ ซึ่งสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 420 โวลต์ในการวิจัยนี้ป้อนแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ 380 โวลต์ จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อผ่านฟิวส์ขนาดพิกัด 30 แอมแปร์เพื่อป้องกันแหล่งจ่ายขณะทดลองการเกิดความผิดพลาด ก่อนต่อเข้าวงจรจำลองระบบสายส่งแบบไพ (Pi) และต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันพิกัด 15 kVA พิกัดแรงดัน 220/440 โวลต์มีการป้องกันหม้อแปลงด้วยฟิวส์ (Fuse) ขนาด 30 แอมแปร์ ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงต่อเข้ากับโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ เป็นการจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งมีสายส่งต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อใช้ในการทดลองการเกิดความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ในการทดลองการเกิดความผิดพลาดภายในขดลวดหม้อแปลง ใช้วงจรซีโร่ครอสซิง (Zero-crossing Circuit) ในการควบคุมมุมเริ่มเกิดลัดวงจรด้วยคอนโทรลเลอร์ (Controller) เพื่อสั่งไปยังแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) ให้ต่อวงจรเพื่อลัดวงจรระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลง และต่อฟิวส์ (Fuse) ขนาด 60 แอมแปร์ ป้องกันกระแสลัดวงจรที่ขดลวดหม้อแปลงที่ทำการลัดวงจร ส่วนการทดลองการเกิดความผิดพลาดที่จุดจำลองสายส่ง ใช้สั่งต่อวงจรผ่านแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) โดยตรง เพื่อลัดวงจรระหว่างสายส่งลงดิน (Single-line to Ground Fault) หลังการทดลองการเกิดความผิดพลาดให้ทำการตรวจจับสัญญาณกระแสความผิดพลาดด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ตำแหน่งหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า (Primary side) และหลังหม้อแปลงไฟฟ้า (Secondary side) เพื่อจับสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า แล้วนำสัญญาณกระแสความผิดพลาดที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อไป รูปร่างการทดลองการเกิดความผิดพลาด แสดงได้ตามรูปที่ 3.3

3.1.1 ปรับเปลี่ยนลักษณะการเกิดความผิดพลาดในชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดความผิดพลาดให้ครอบคลุมมากขึ้น จึงทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า และตำแหน่งของการเกิดความผิดพลาดภายในสายส่งกำลังไฟฟ้างดังต่อไปนี้

1. ประเภทความผิดพลาด แบ่งเป็น 2 คือความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลง (หรือบนสายส่งไฟฟ้า)
2. ปรับเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดตามประเภทความผิดพลาดดังนี้
 - 2.1 กรณีเกิดความผิดพลาดภายในขดลวดหม้อแปลง ปรับตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลงที่ตำแหน่งขดต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กรณีเกิดฟอลต์ภายในสายส่งกำลังไฟฟ้า ปรับตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดตามระยะสายส่งตั้งแต่ที่ระยะ 30 เปอร์เซ็นต์ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของระยะความยาวสายส่ง

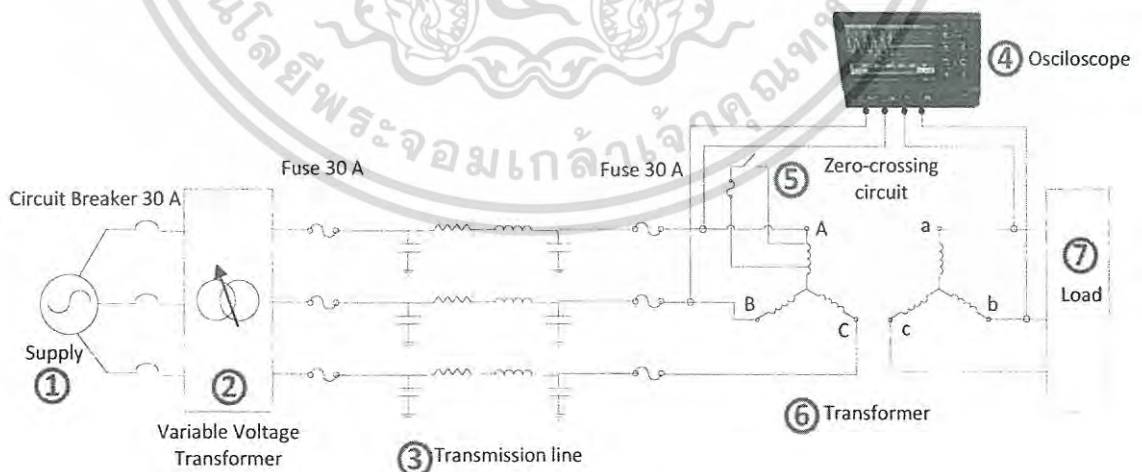
3. ปรับเปลี่ยนโหลดเป็น 2 ประเภท คือ โหลดความต้านทานขนาด 600 วัตต์ และโหลดแบบผสมระหว่างความต้านทาน 300 วัตต์ กับความเหนี่ยวนำ 240 วัตต์

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลองการเกิดความผิดพลาด

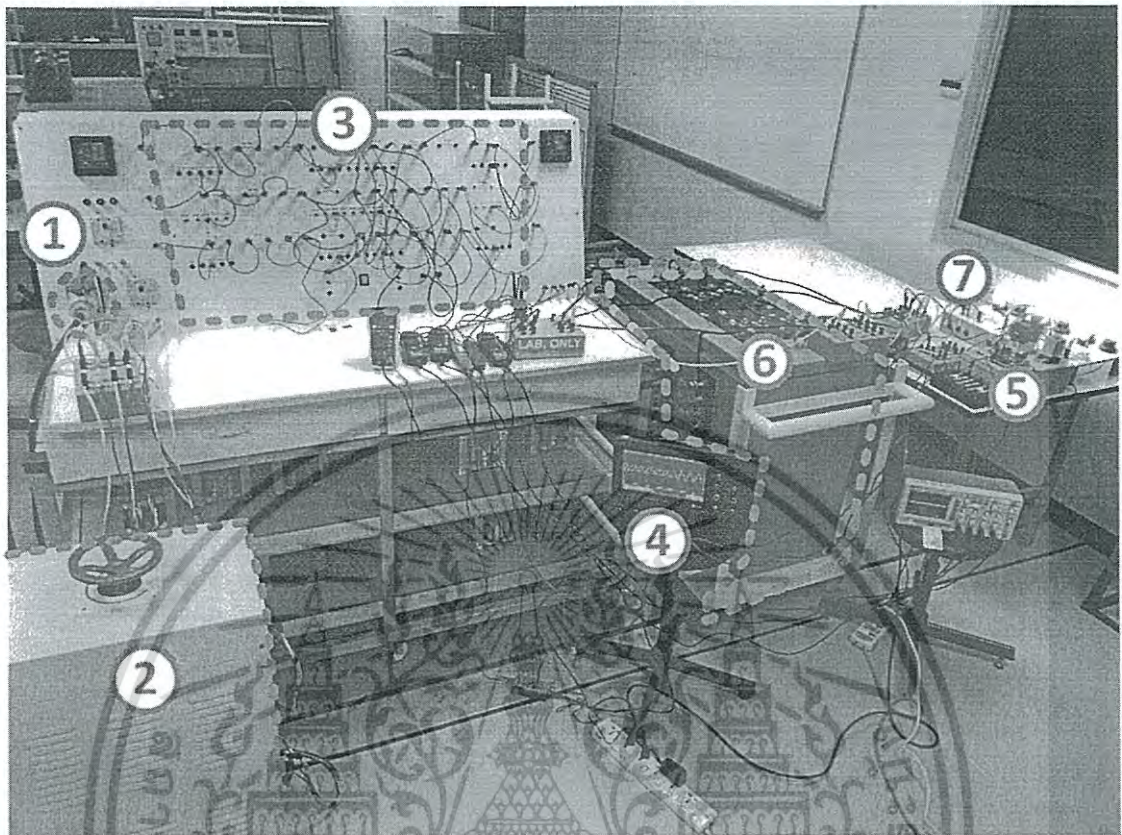
ชุดทดลองการเกิดความผิดพลาดประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆคือ ส่วนของสายส่งไฟฟ้าและส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อทำการทดลองการเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า (หรือที่สายส่งไฟฟ้า) อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดทดลองการเกิดความผิดพลาดมีทั้งหมดดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส (Supply)
2. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ 3 เฟส (Variable Voltage Transformer) พิกัดแรงดัน 0-420 โวลต์
3. ชุดจำลองระบบสายส่งแบบไพ (Pi) 3 เฟส
4. เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า (Oscilloscope)
5. ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมเริ่มต้นลัดวงจรภายในหม้อแปลงไฟฟ้า (Zero-crossing Circuit)
6. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) 3 เฟส พิกัดแรงดัน 220/440 โวลต์
7. ชุดโหลดความต้านทาน 600 วัตต์ และโหลดความต้านทาน 300 วัตต์ กับความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์

ซึ่งรูปวงจรการทดลองและชุดการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



(ก) วงจรทดลอง

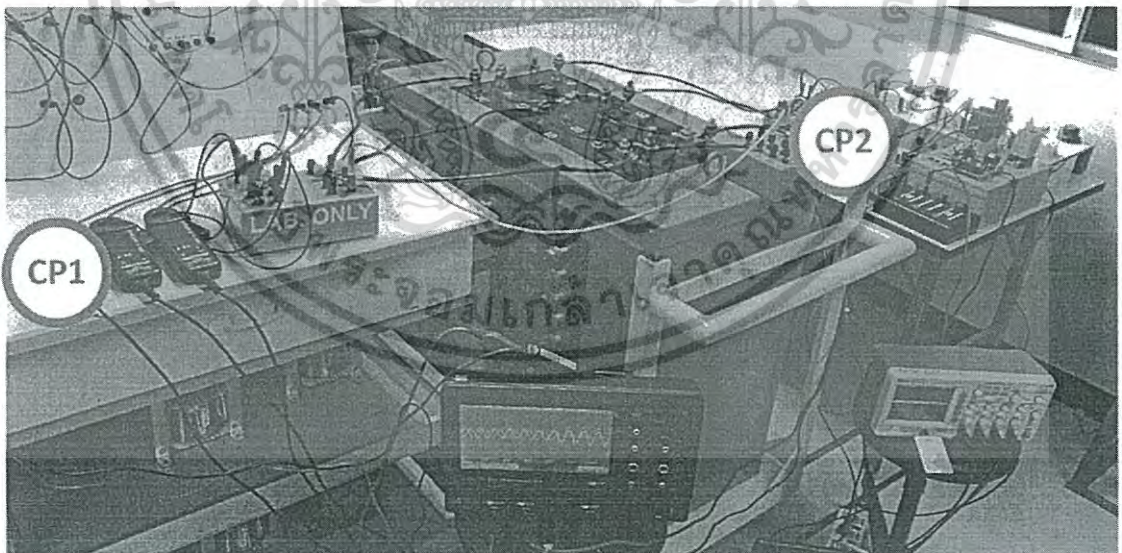
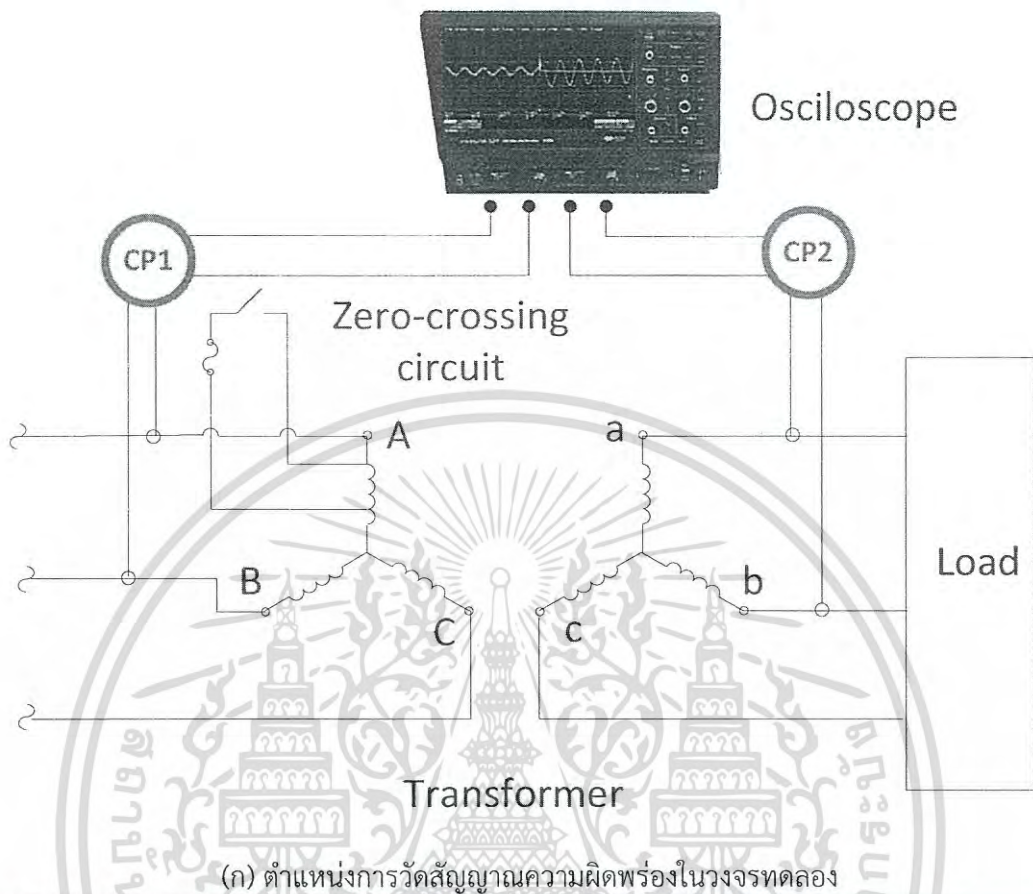


(ข) ชุดทดลอง

รูปที่ 3.2 วงจรทดลองและชุดทดลองการเกิดความผิดปกติ

3.2.1 ตำแหน่งที่ตรวจจับสัญญาณความผิดปกติ

ใช้เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้าในการทดลองคือ ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลของสัญญาณและรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง เฟสที่เกิดความผิดปกติและเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ ในตำแหน่ง CP1 และ CP2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



CP1 คือ ตำแหน่งวัดสัญญาณความผิดพลาดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

CP2 คือ ตำแหน่งวัดสัญญาณความผิดพลาดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

.(ข) ตำแหน่งวัดสัญญาณความผิดพลาดในชุดทดลอง

รูปที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า

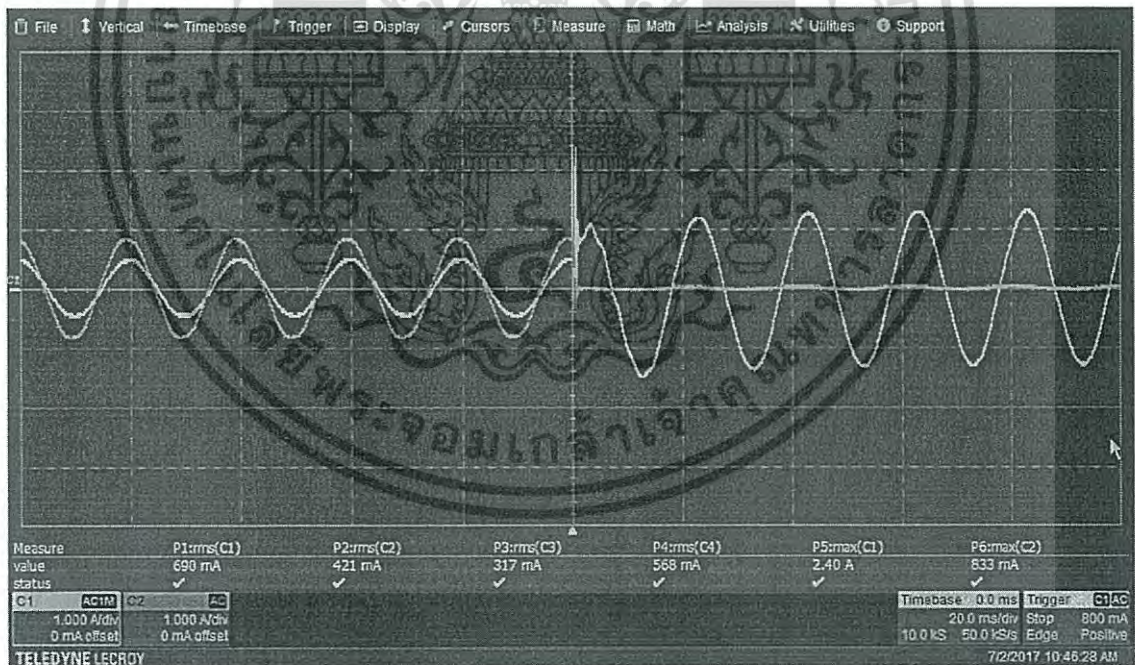
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองการเกิดความผิดพลาดในชุดทดลอง ทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary side) และด้านทุติยภูมิ (Secondary side) ซึ่งสัญญาณที่ได้แสดงได้ดังต่อไปนี้

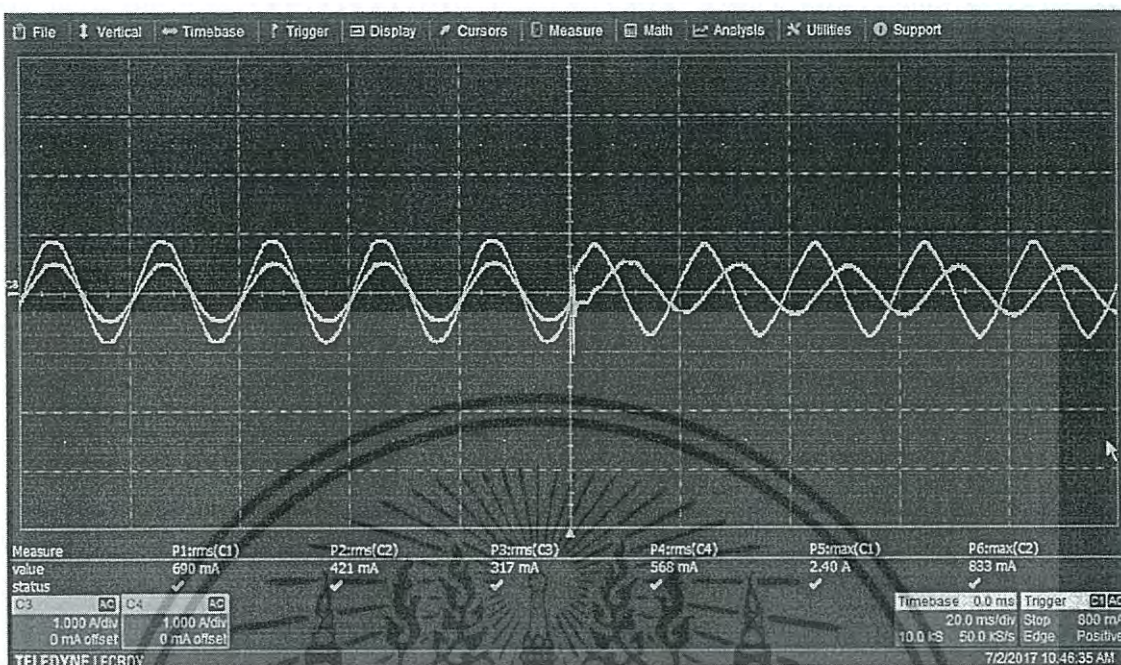
3.3.1 สัญญาณความผิดพลาดที่หม้อแปลง เมื่อเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง

จากการทดลองการเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary side) และด้านทุติยภูมิ (Secondary side) ซึ่งแสดงตัวอย่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าขณะที่เกิดความผิดพลาดภายในชุดลดหม้อแปลงด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำที่บันทึกได้ตามรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ จากรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ตามในรูปที่ 3.4 (ก) เห็นได้ว่ากระแสด้านปฐมภูมิของเฟสที่เกิดความผิดพลาดหลังเกิดความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าก่อนเกิดความผิดพลาด ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาด และกระแสด้านทุติยภูมิของเฟสที่เกิดความผิดพลาดมีค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์หลังเกิดความผิดพลาด ส่วนรูปคลื่นกระแสของเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด กระแสด้านปฐมภูมิมีค่าสูงกว่าหลังเกิดความผิดพลาดเล็กน้อย และกระแสด้านทุติยภูมิมีค่าใกล้เคียงเดิม ณ เวลาก่อนเกิดความผิดพลาดตามรูปที่ 3.4 (ข)



(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่เกิดความผิดพลาด

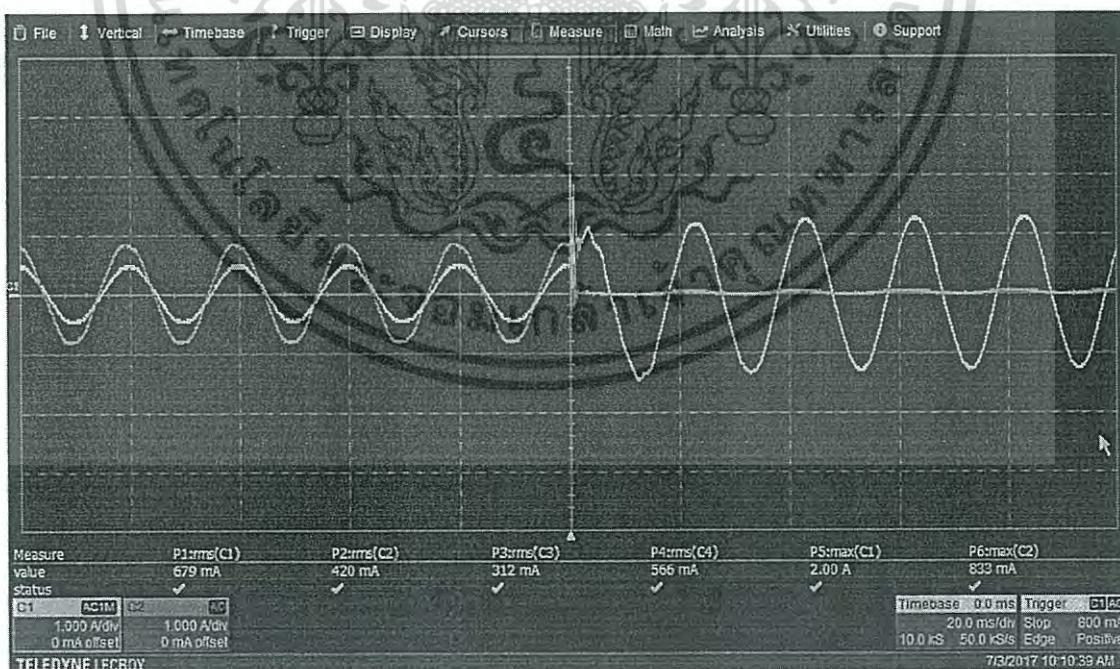
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่ไม่เกิดความผิดพ้อง

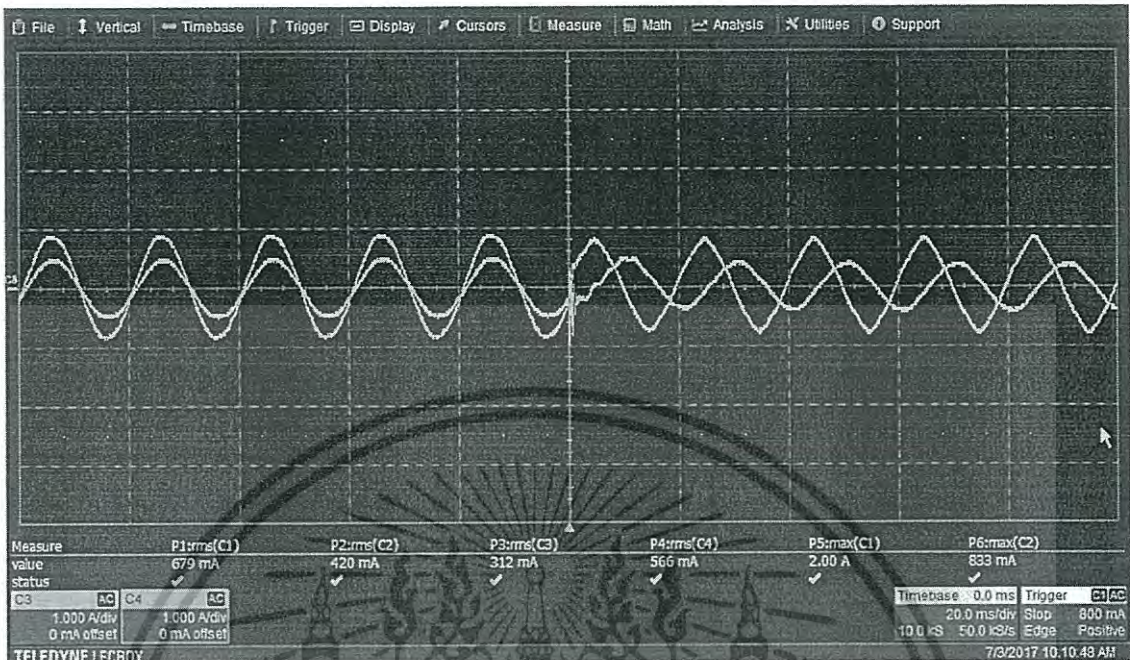
(ค)

รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้า กรณีเกิดความผิดพ้องในเขตสวดหม้อแปลงด้านแรงดันสูงระหว่างแทบขดลวด 44 กับ 396



(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่เกิดความผิดพ้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



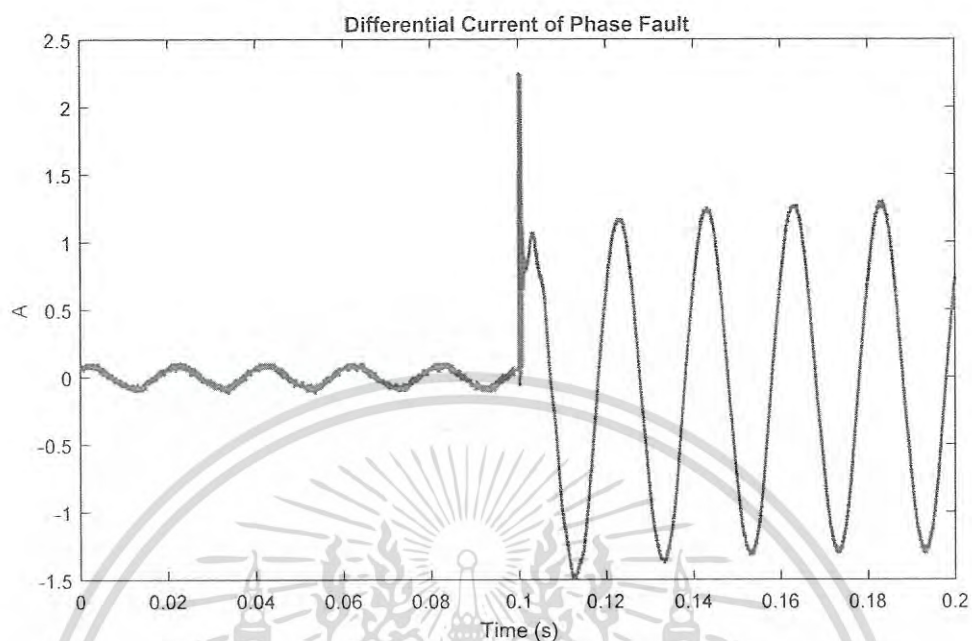
(ข) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด

(ค)

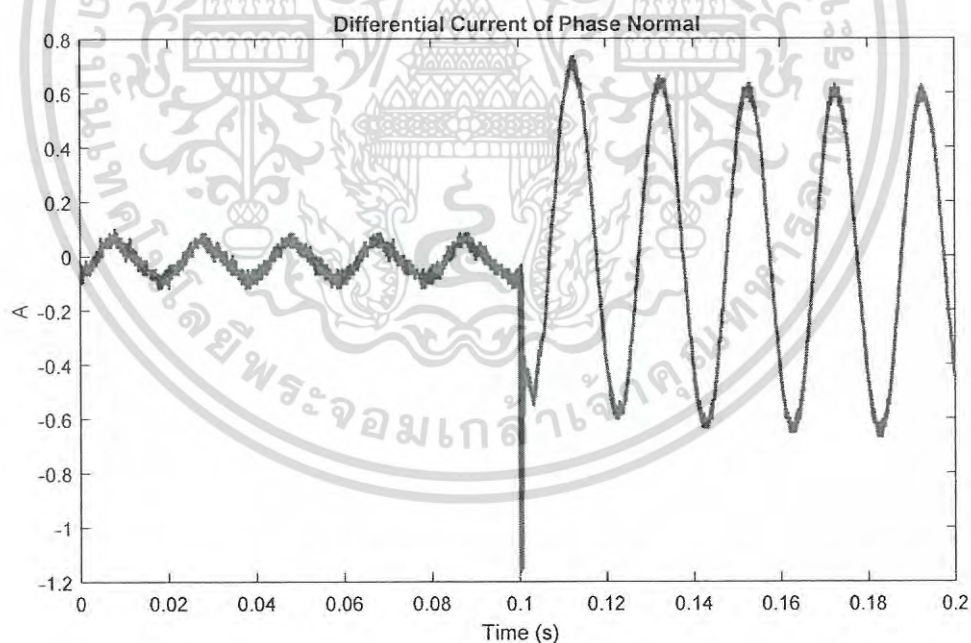
รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้า กรณีเกิดความผิดพลาดภายในขดลวดหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำระหว่างแทขดลวด 22 กับ 198

จากนั้นนำข้อมูลกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่บันทึกได้ มาหากระแสผลต่าง (Differential current) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งตัวอย่างสัญญาณกระแสผลต่างที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าของสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลงระหว่างก่อนเกิดความผิดพลาดและหลังเกิดความผิดพลาด ซึ่งเกิดสัญญาณความถี่สูงขึ้น ณ เวลาที่เกิดความผิดพลาด และสัญญาณกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าก่อนเกิดความผิดพลาด ค่าสูงสุดของกระแสผลต่างอยู่ที่ ณ เวลาที่เกิดความผิดพลาด และค่าสูงสุดของกระแสผลต่างในเฟสที่เกิดความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาดอย่างชัดเจน ทั้งกรณีเกิดความผิดพลาดภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ และกระแสผลต่างสูงสุดเมื่อเกิดความผิดพลาดด้านปฐมภูมิซึ่งเป็นขดลวดด้านแรงดันสูง มีค่าสูงกว่ากรณีเกิดความผิดพลาดด้านทุติยภูมิซึ่งเป็นขดลวดด้านแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



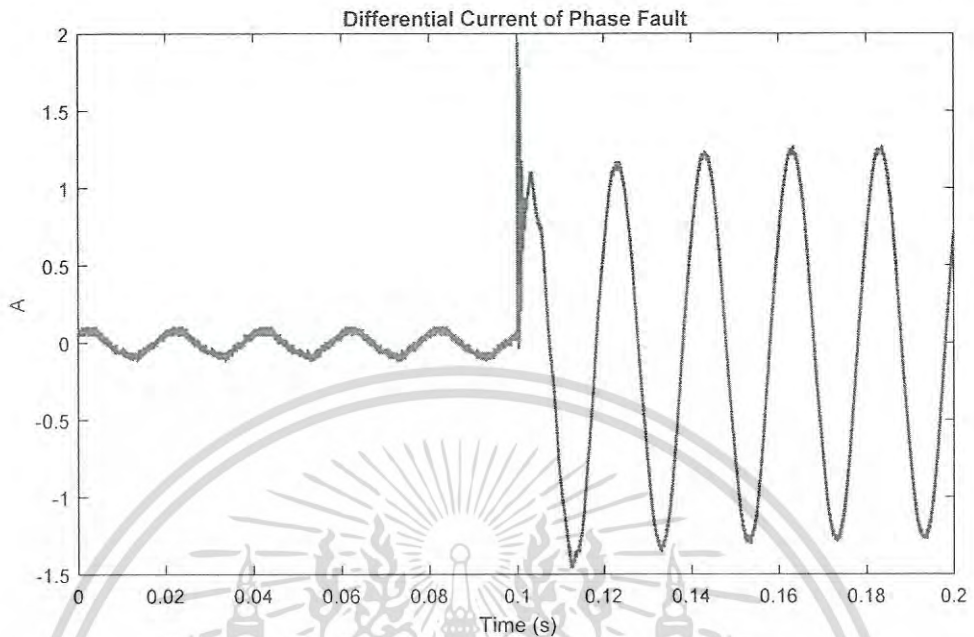
(ก) เฟสที่เกิดความผิดปกติ



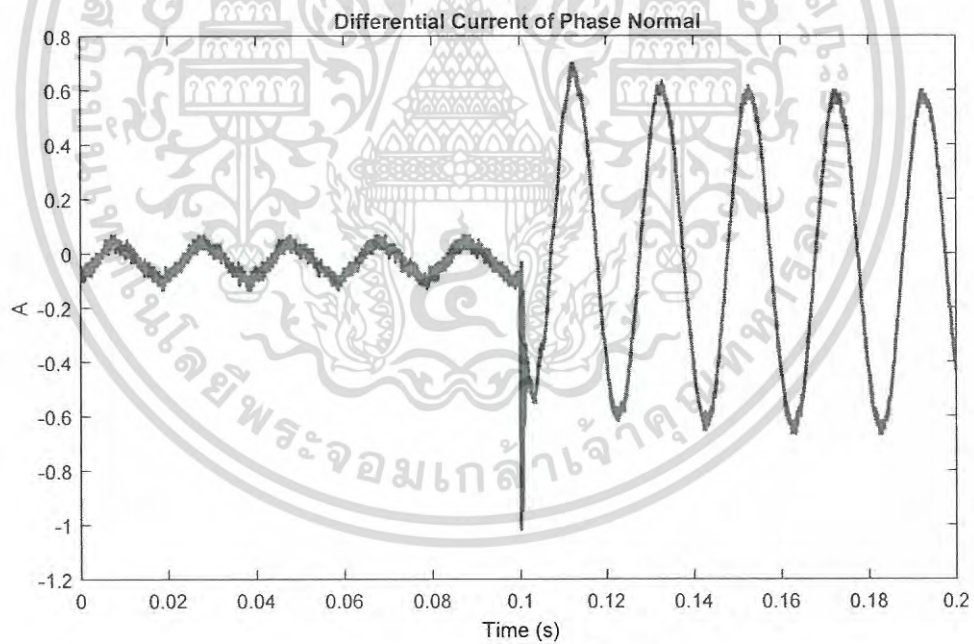
(ข) เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลง กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ไฟฟ้าต้านแรงดันสูงระหว่างแทบขดลวด 44 กับ 396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เฟสที่เกิดความผิดปกติ



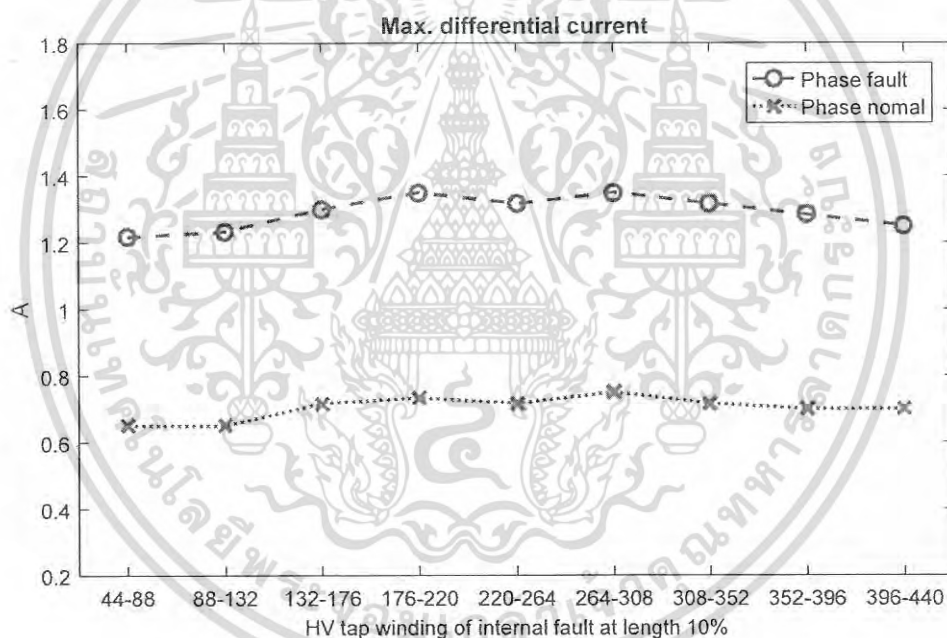
(ข) เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลง กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำระหว่างแทบขดลวด 22 กับ 198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

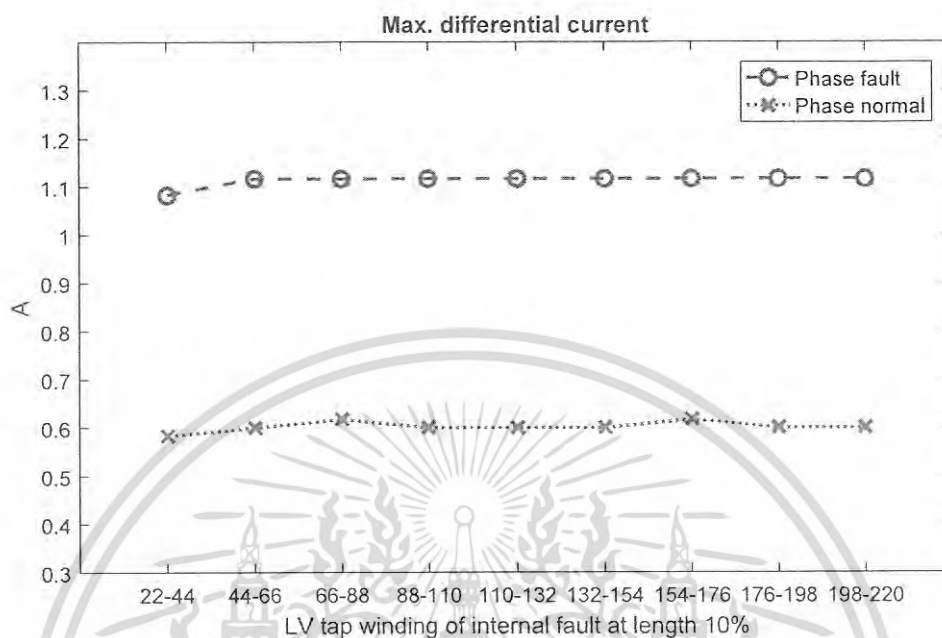
นำสัญญาณกระแสผลต่างที่ตรวจจับได้ขณะเกิดความผิดปกติในแต่ละกรณี มาหาค่าสูงสุดซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

จากรูปที่ 3.8 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงเฟสที่เกิดความผิดปกติ ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกัน 10 เพอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟสที่เกิดความผิดปกติ ทั้งกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกระแสผลต่างสูงสุดของเฟสที่เกิดความผิดปกติที่ขดลวดหม้อแปลงตำแหน่งเดียวกันของด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง พบว่าค่ากระแสผลต่างสูงสุดด้านปฐมภูมิมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เช่น ค่ากระแสผลต่างสูงสุดเฟสที่เกิดความผิดปกติหลัง ระหว่างกรณีเกิดความผิดปกติในขดลวดที่ 44-88 ของด้านปฐมภูมิและขดลวดที่ 22-44 ของด้านทุติยภูมิ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.216 แอมแปร์ และ 1.083 แอมแปร์ ตามลำดับ เป็นต้น



(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

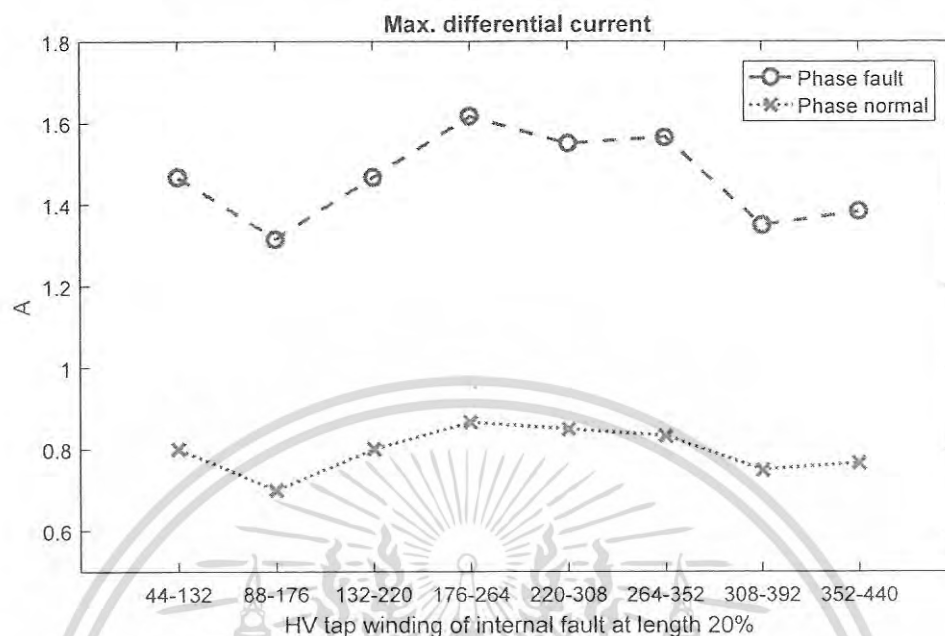
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



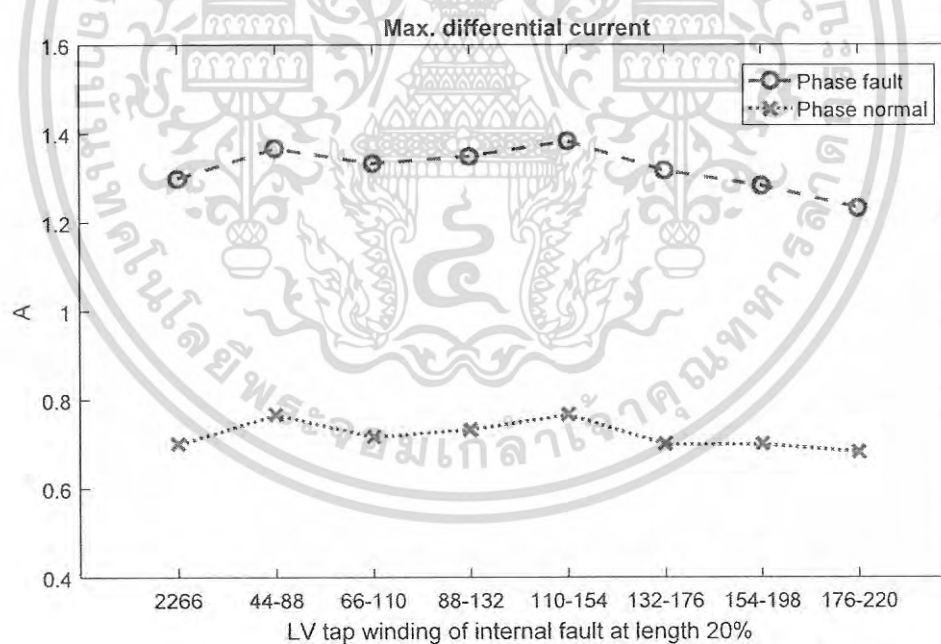
(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.8 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ห่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ต่างกัน

ในรูปที่ 3.9 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงเฟสที่เกิดความผิดปกติ ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีพฤติกรรมของค่ากระแสผลต่างเช่นเดียวกับ กรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ ก่อนหน้านั้น คือ ค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟสที่เกิดความผิดปกติ ทั้งกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ และค่ากระแสผลต่างสูงสุดด้านปฐมภูมิมีค่าสูงกว่าด้านทุติยภูมิเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสผลต่างเฉลี่ยของการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ห่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์กับ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความผิดปกติที่ระยะห่างแทปขดลวด 20 เปอร์เซ็นต์มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย



(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

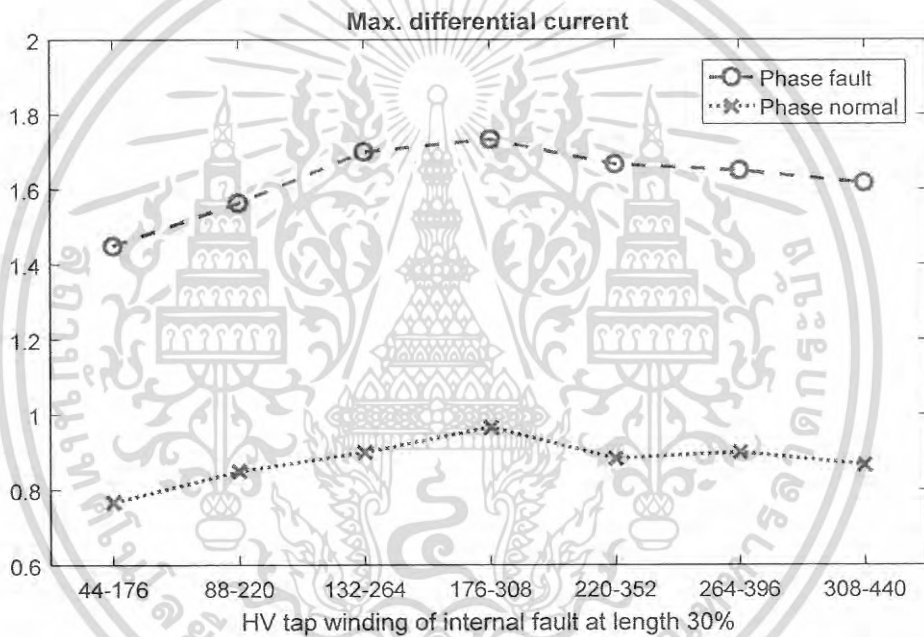


(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.9 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ห่างกัน 20 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ต่างกัน

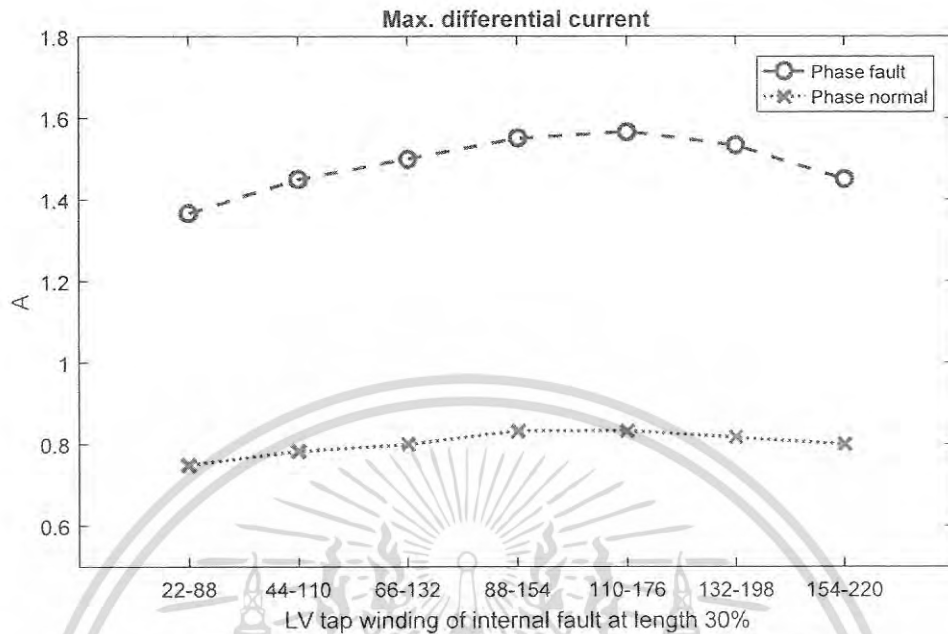
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.10 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงเฟสที่เกิดความผิดปกติ ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมของค่ากระแสผลต่างจากกรณีก่อนหน้านี้คือ กรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ ก่อนหน้านี้ พบว่ามีพฤติกรรมของค่ากระแสผลต่างเช่นเดียวกัน คือ ค่ากระแสผลต่างมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่เฟสที่เกิดความผิดปกติ ทั้งกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ และค่ากระแสผลต่างสูงสุดด้านปฐมภูมิมีค่าสูงกว่าด้านทุติยภูมิ และสังเกตได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติ ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกันมากขึ้น ค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

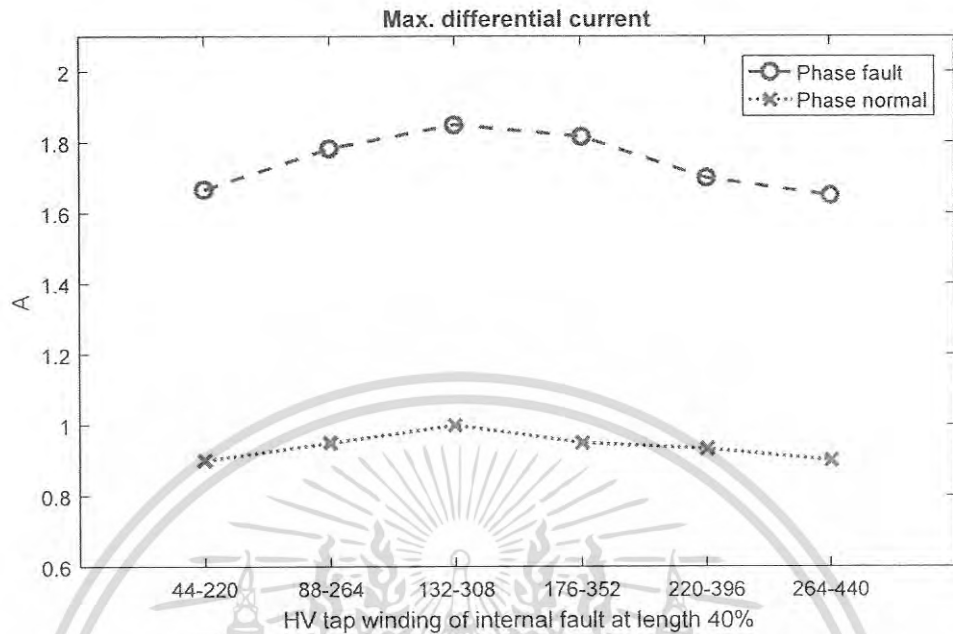
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



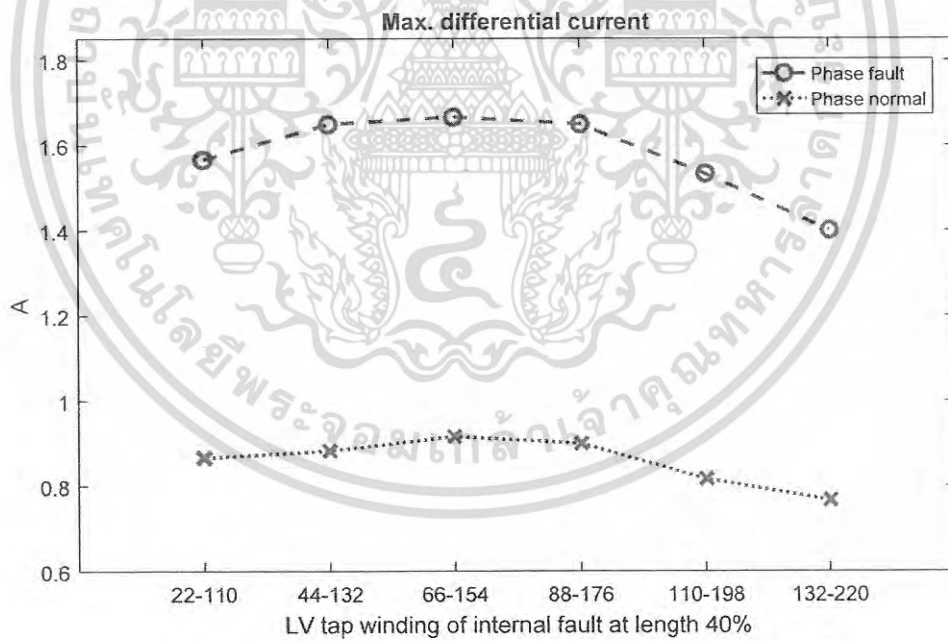
(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.10 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 30 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน

ในรูปที่ 3.11 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงเฟสที่เกิดความผิดปกติ ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ห่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมของค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติจากกรณีก่อนหน้านี้ สังเกตได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติ ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ห่างกันมากขึ้น ค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังสังเกตร่วมกันจากกราฟในรูปที่ 3.8 - 3.11



(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

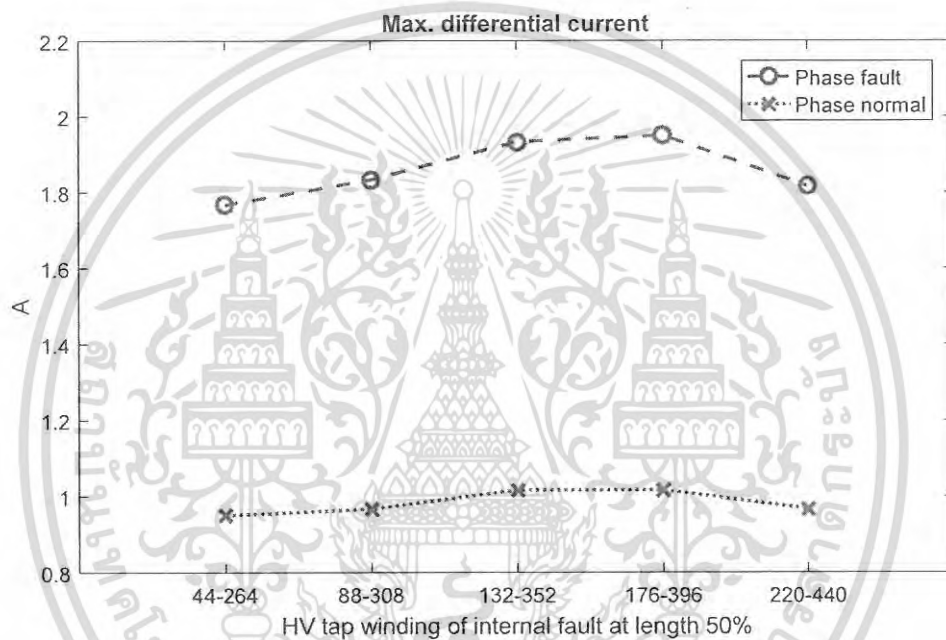


(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.11 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 40 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน

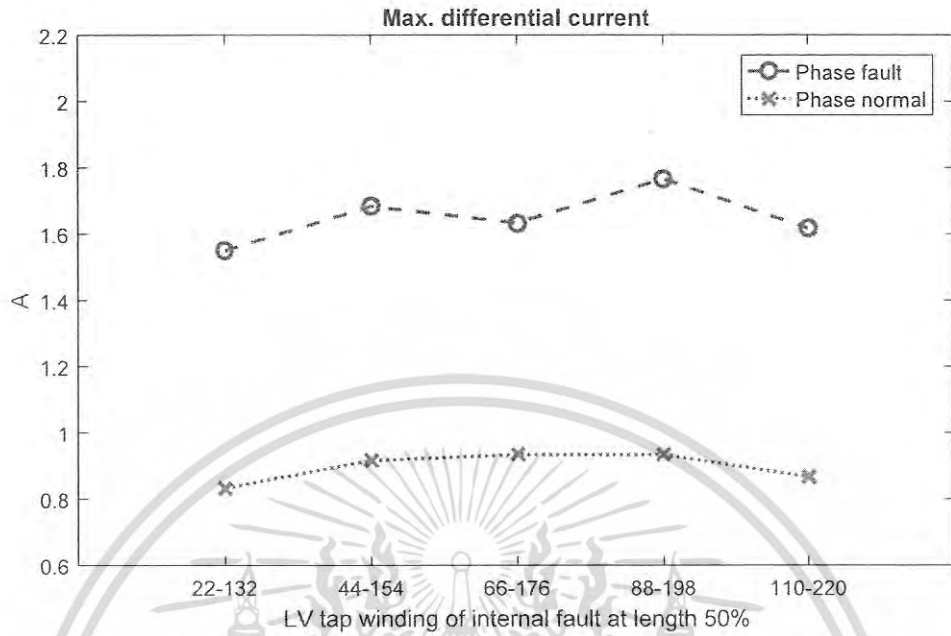
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับกับพฤติกรรมของค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติจากกรณีก่อนหน้านี้ซึ่งกราฟในรูปที่ 3.8-3.11 สังเกตได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ยิ่งห่างกันมากขึ้นทำให้ค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่ายิ่งเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงที่ระยะแทปห่างกันมากๆ ทำให้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังค่าที่แสดงไว้ในกราฟในรูปที่ 3.8-3.15 ซึ่งแสดงค่าผลต่างกระแสสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติเริ่มตั้งแต่กรณีที่เกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดหม้อแปลงที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ห่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ไปจนถึง 90 เฟอร์เซ็นต์



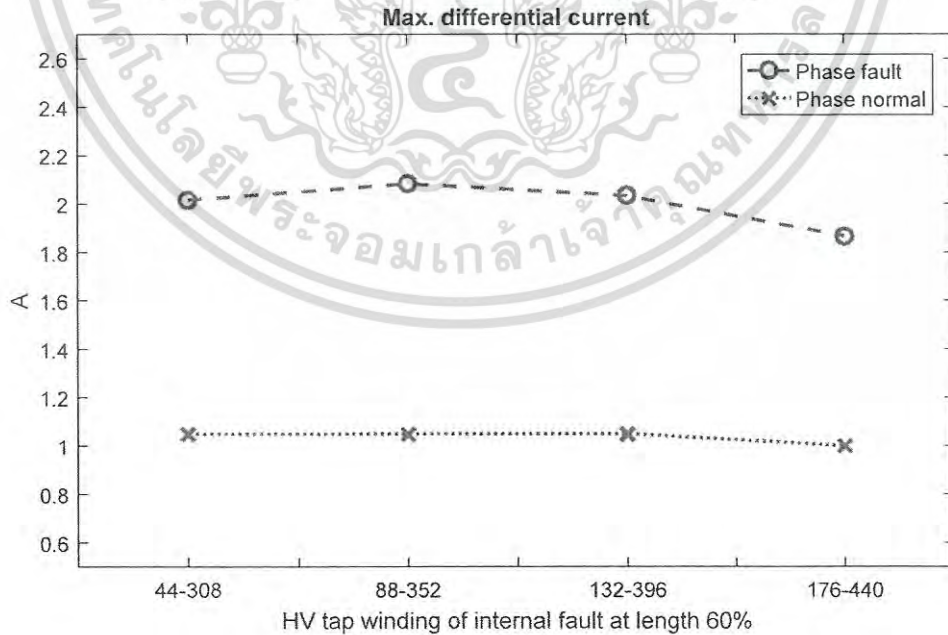
(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



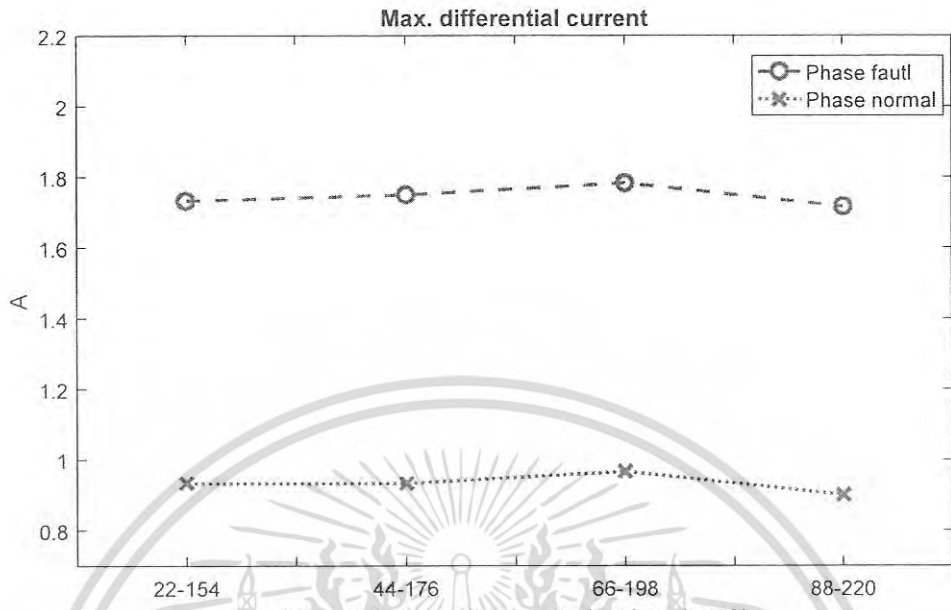
(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.12 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทขดลวดที่ห่างกัน 50 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทขดลวดที่ต่างกัน

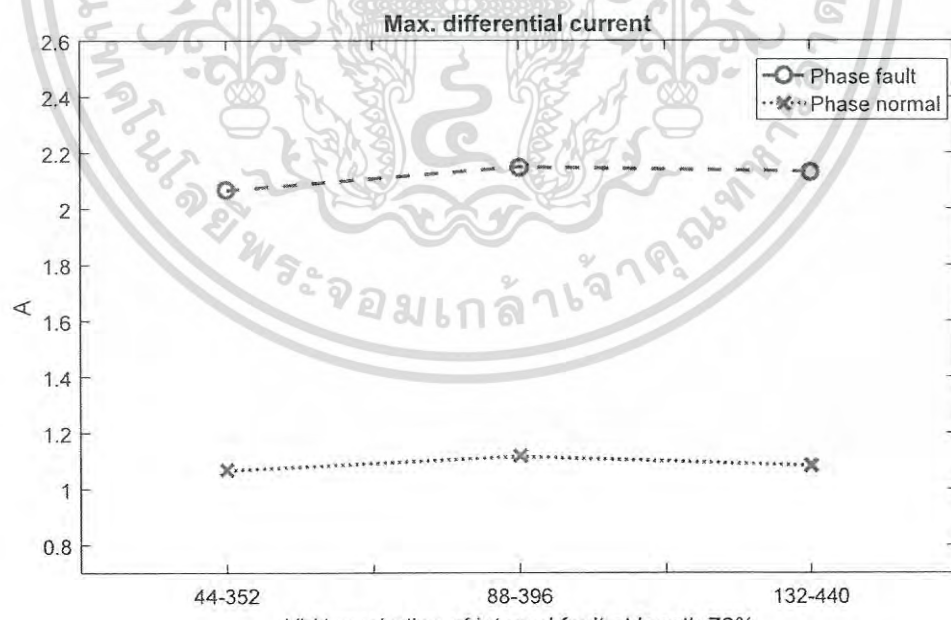


(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

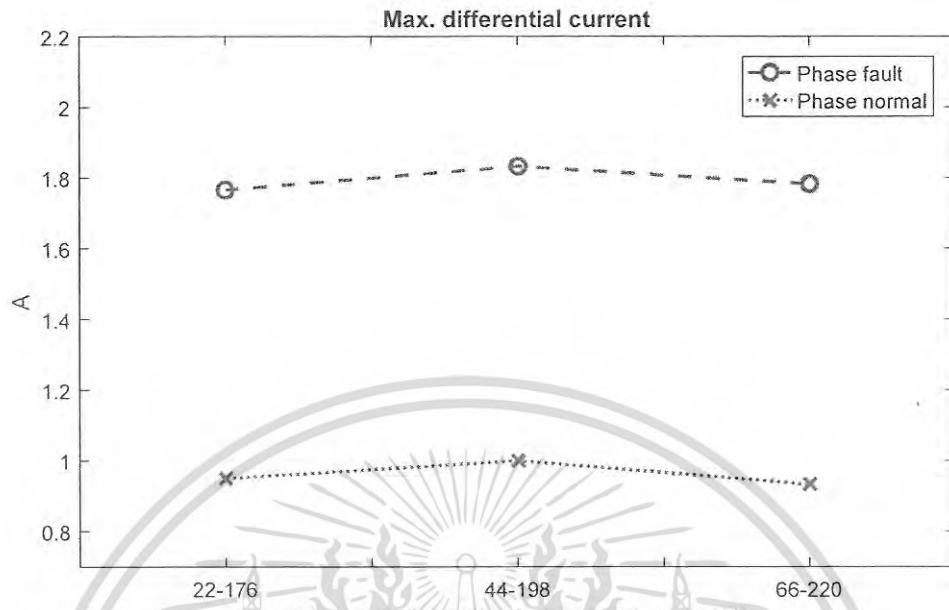


รูปที่ 3.13 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทบขดลวดที่ห่างกัน 60 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทบขดลวดที่ต่างกัน
(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ



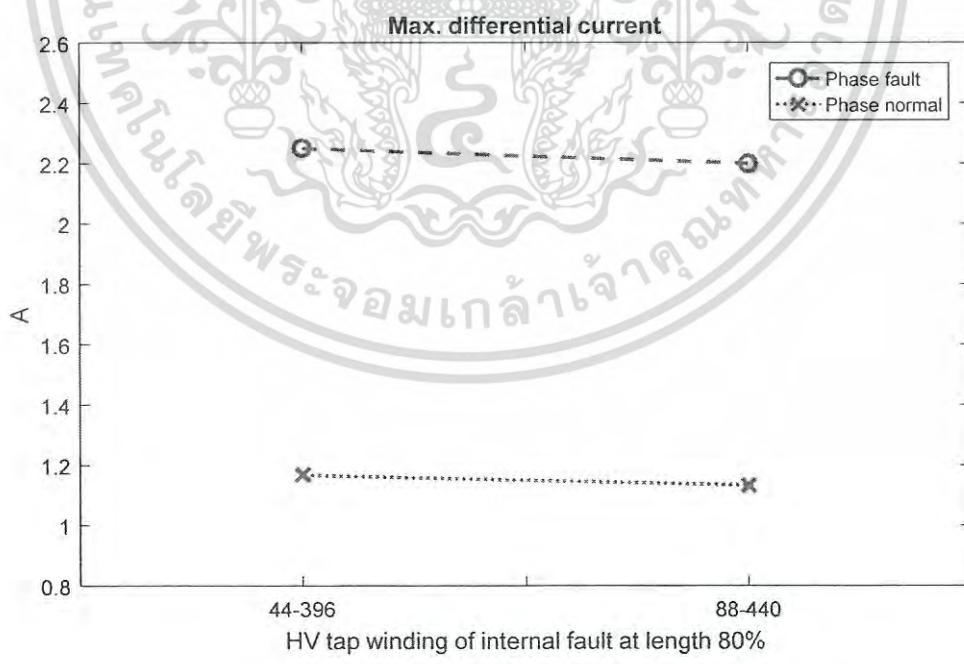
(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



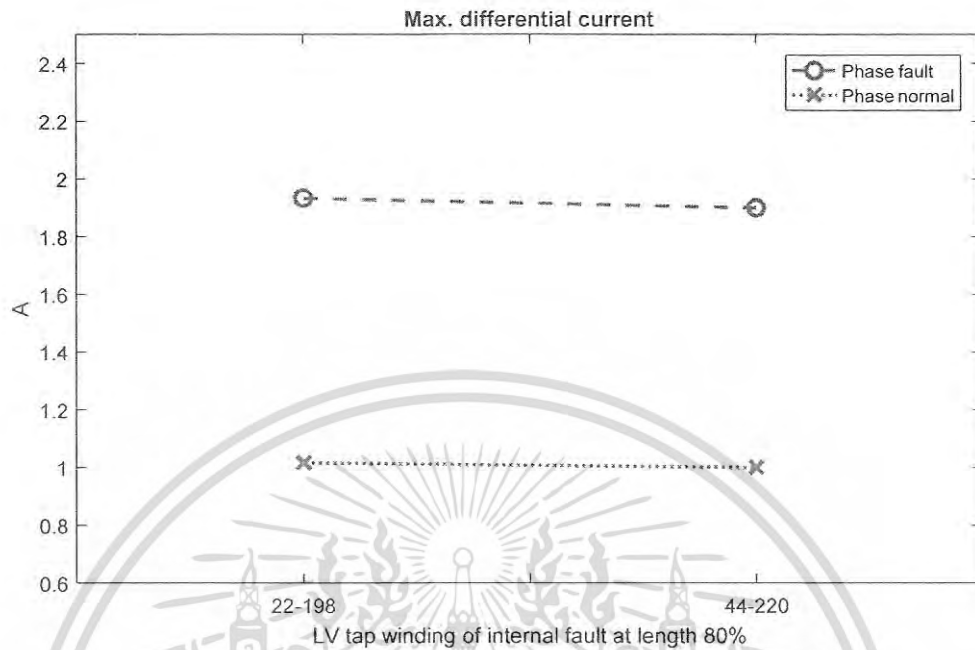
LV tap winding of internal fault at length 70%
 (ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.14 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทขดลวดที่ห่างกัน 70 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทขดลวดที่ต่างกัน



(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



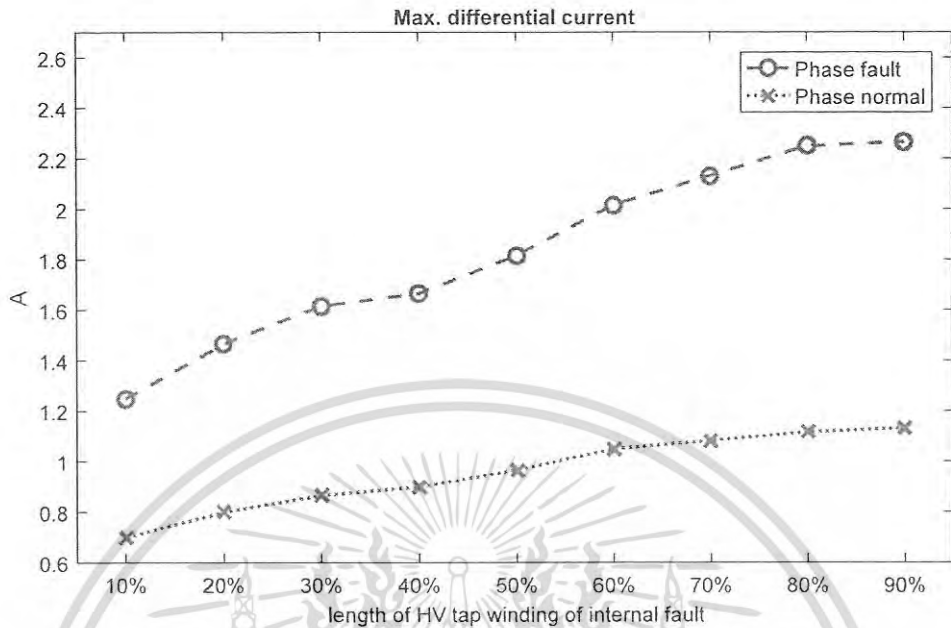
(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ
รูปที่ 3.15 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ห่างกัน 80 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งแทปขดลวดที่ต่างกัน

เมื่อศึกษาพฤติกรรมของค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงระหว่างแทปขดลวดที่ห่างกัน พบว่า ค่ากระแสผลต่างสูงสุดของเฟสที่เกิดความผิดปกติมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติระหว่างแทปขดลวดที่ห่างกันมากขึ้น และมีค่าสูงกว่ากระแสผลต่างสูงสุดในเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ และเมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิพบว่ากระแสผลต่างสูงสุดกรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิมีค่าสูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และกราฟในรูปที่ 3.16

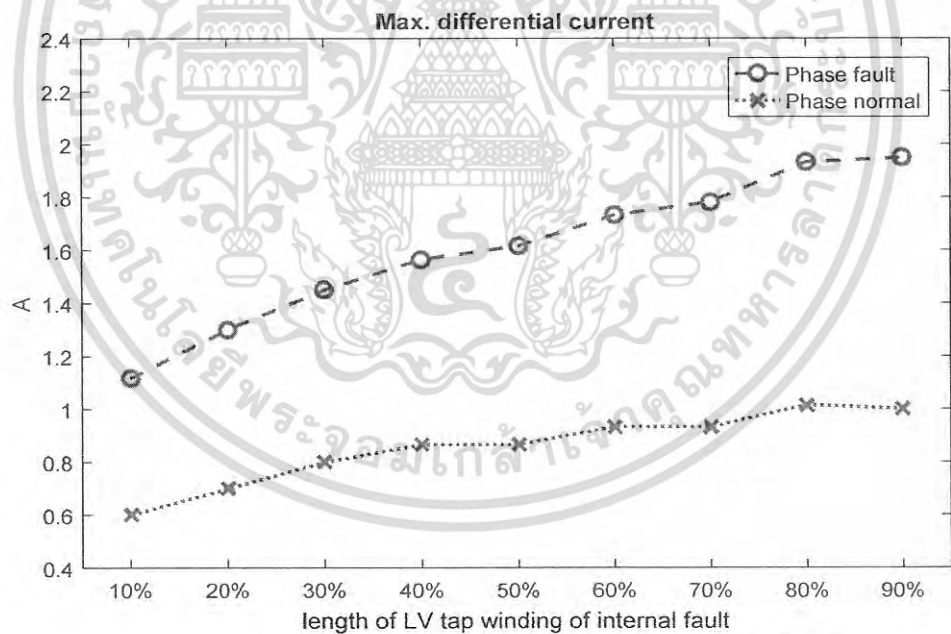
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง เมื่อเกิดความผิดปกติระหว่างขดลวดที่ห่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์ถึง 90 เฟอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ตำแหน่งขดลวดที่เกิดความผิดปกติ	กระแสผลต่างสูงสุด(A)	
		เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ
Interturn fault 10%	44-88 ด้านปฐมภูมิ	1.249	0.700
	22-44 ด้านทุติยภูมิ	1.116	0.600
Interturn fault 20%	44-132 ด้านปฐมภูมิ	1.466	0.800
	22-66 ด้านทุติยภูมิ	1.300	0.700
Interturn fault 30%	44-176 ด้านปฐมภูมิ	1.616	0.866
	22-88 ด้านทุติยภูมิ	1.450	0.800
Interturn fault 40%	44-220 ด้านปฐมภูมิ	1.666	0.900
	22-110 ด้านทุติยภูมิ	1.566	0.866
Interturn fault 50%	44-264 ด้านปฐมภูมิ	1.816	0.966
	22-132 ด้านทุติยภูมิ	1.616	0.866
Interturn fault 60%	44-308 ด้านปฐมภูมิ	2.016	1.050
	22-154 ด้านทุติยภูมิ	1.733	0.933
Interturn fault 70%	44-352 ด้านปฐมภูมิ	2.133	1.083
	22-176 ด้านทุติยภูมิ	1.783	0.933
Interturn fault 80%	44-396 ด้านปฐมภูมิ	2.250	1.116
	22-198 ด้านทุติยภูมิ	1.933	1.016
Interturn fault 90%	44-440 ด้านปฐมภูมิ	2.266	1.133
	22-220 ด้านทุติยภูมิ	1.949	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านปฐมภูมิ



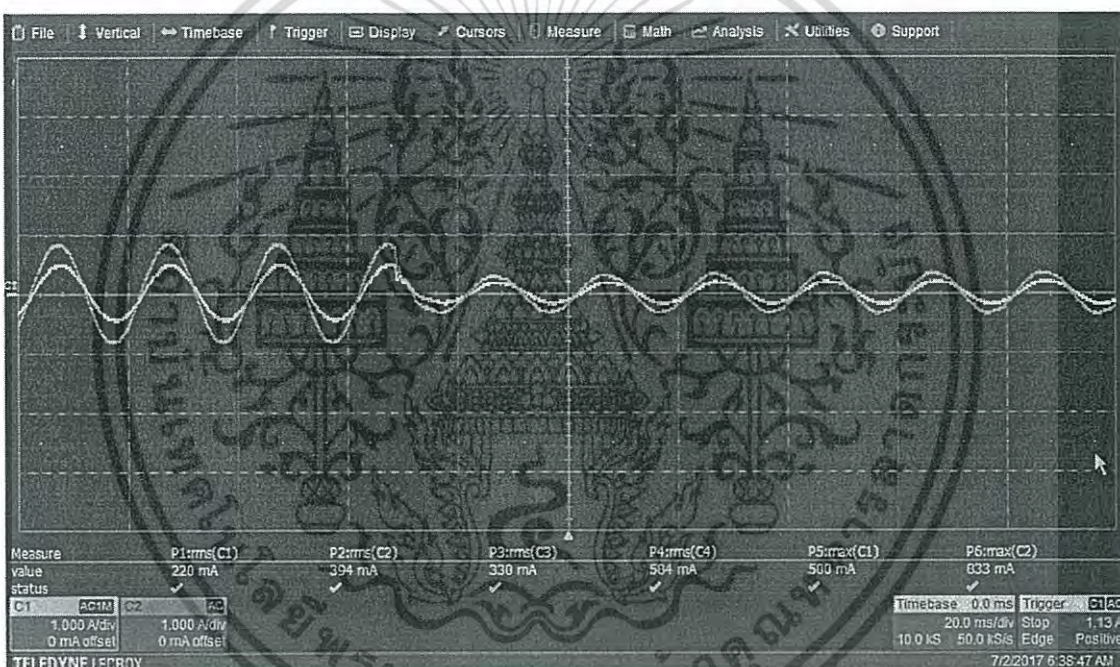
(ข) กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 3.16 แสดงค่าสูงสุดกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลง เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแทขดลวดจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์

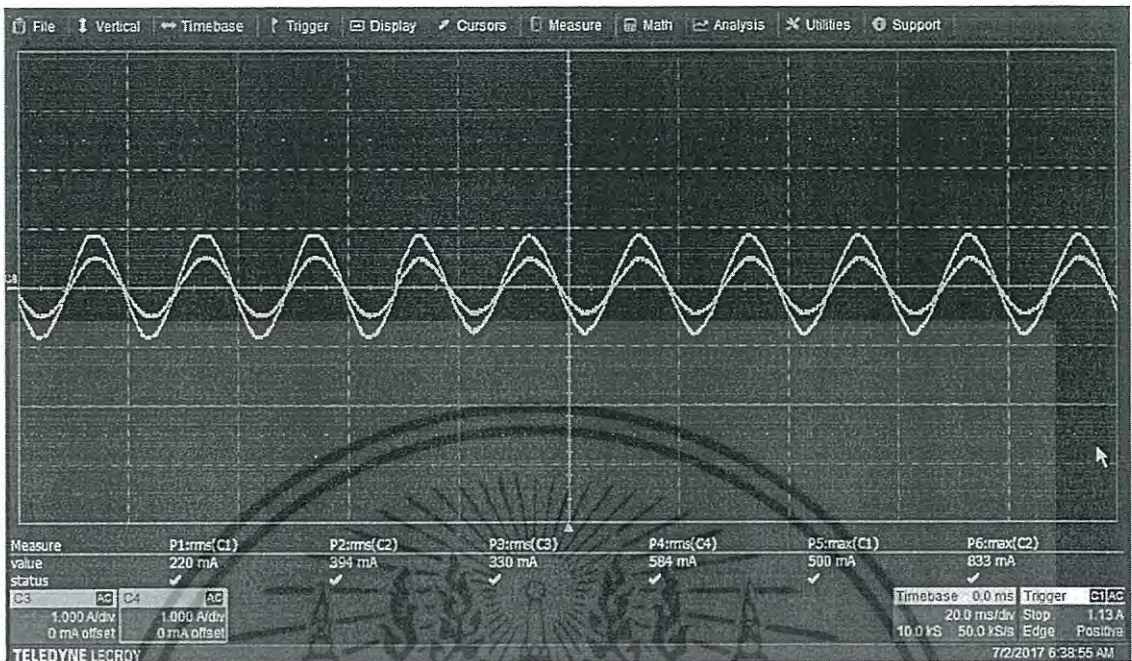
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 สัญญาณความผิดพลาดที่หม้อแปลง เมื่อเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง

จากการทดลองการเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง (หรือที่สายส่ง) โดยให้เกิดความผิดพลาดหนึ่งเฟส ลงดิน แล้วทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary side) และด้านทุติยภูมิ (Secondary side) ของเฟสที่เกิดความผิดพลาดและเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด ซึ่งลักษณะของสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงได้ตามรูปที่ 3.17 (ก) และ 3.17 (ข) ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลสัญญาณกระแสที่บันทึกได้ นำมาหากระแสผลต่าง (Differential current) โดยใช้โปรแกรม MATLAB สัญญาณกระแสผลต่างที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 จากรูปคลื่นกระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ตามในรูปที่ 3.17 (ก) และ 3.17 (ข) เห็นได้ว่ากระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่เกิดความผิดพลาดมีค่าลดลง ส่วนเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาดค่ากระแสด้านปฐมภูมิมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ด้านทุติยภูมิมีค่าใกล้เคียงเดิม



(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่เกิดความผิดพลาด

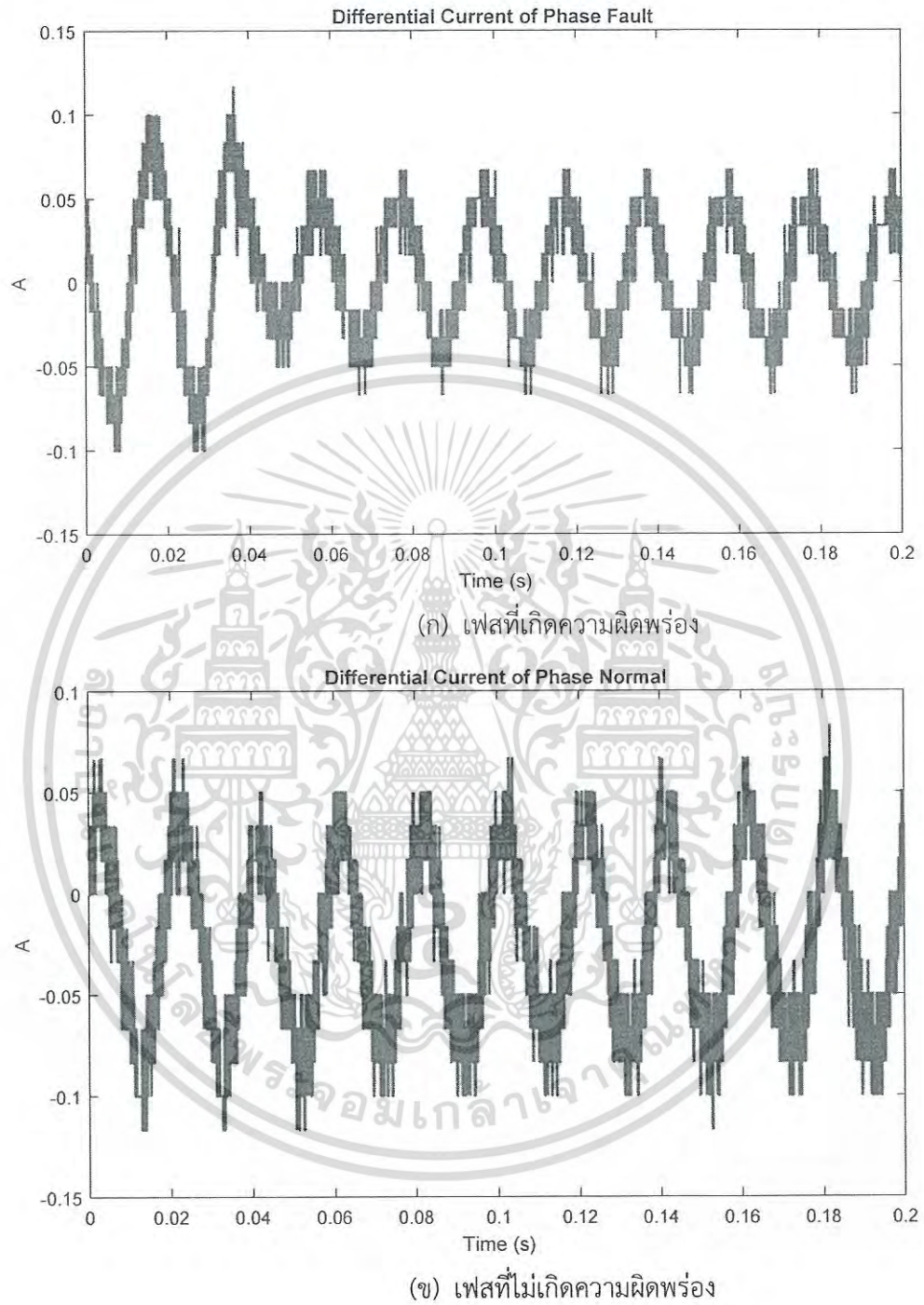


(ข) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด

รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า กรณีเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง ที่ระยะสายส่ง 70 เปอร์เซ็นต์

จากสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลงหรือที่สายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพลาดมีค่าสูงขึ้นทั้งเฟสที่เกิดความผิดพลาดและเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากหม้อแปลงต่อกันแบบวาย-วาย ซึ่งมีจุดต่อลงดินร่วมกัน เป็นผลทำให้มีผลกับเฟสข้างเคียงด้วย และความถี่ของสัญญาณกระแสผลต่าง ณเวลาที่เกิดความผิดพลาดมีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสผลต่าง กรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงดังในรูปที่ 3.6 และ 3.7พบว่ามีความแตกต่างกัน คือกรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงสัญญาณกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดพลาดจะมีความถี่สูงกว่ากรณีเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง ส่วนกรณีเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลงกระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดพลาดจะมีค่าใกล้เคียงเดิมหรือลดลงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณกระแสผลต่างของหม้อแปลง กรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง (หรือที่สายส่งระยะ 70 เปอร์เซ็นต์)

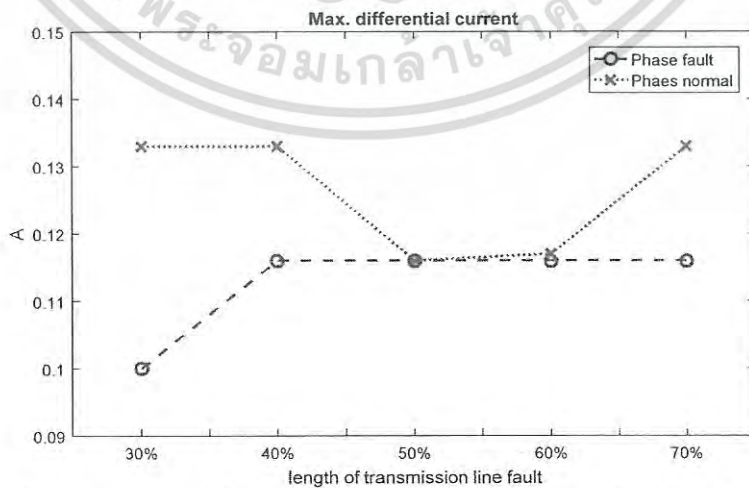
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสัญญาณกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติในแต่ละกรณี มาหาค่าสูงสุดซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสูงสุดของกระแสผลต่างของหม้อแปลง หลังเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง (หรือที่สายส่งระยะต่างๆ)

ประเภทความผิดปกติ	เกิดความผิดปกติที่ระยะสายส่ง	กระแสผลต่างสูงสุด(A)	
		เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ
External fault	30เปอร์เซ็นต์	0.100	0.133
	40เปอร์เซ็นต์	0.116	0.133
	50เปอร์เซ็นต์	0.116	0.116
	60เปอร์เซ็นต์	0.115	0.117
	70เปอร์เซ็นต์	0.116	0.133

จากรูปที่ 3.19 แสดงค่ากระแสผลต่างสูงสุดของหม้อแปลงหลังเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง โดยเกิดความผิดปกติที่สายส่งหนึ่งเฟสลงดินที่ระยะต่าง ๆ ของสายส่ง คือ 30 เปอร์เซ็นต์ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าคือที่สายส่งระยะต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสผลต่างสูงสุดหลังเกิดความผิดปกติพบว่าในเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติมีค่ากระแสผลต่างสูงสุดสูงกว่าเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ เนื่องจากหลังเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง ทำให้กระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเฟสที่เกิดความผิดปกติมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อนำมาหาค่ากระแสผลต่างจึงทำให้ได้สัญญาณที่ลดลงเล็กน้อย แตกต่างกับเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติที่มีค่ากระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิใกล้เคียงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.19 แสดงค่าสูงสุดกระแสผลต่างหลังเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง หรือที่สายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสผลต่างของหม้อแปลงระหว่างเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง กับเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงพบว่าค่ากระแสผลต่างกรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงมีค่าสูงกว่ากรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง และความถี่ของสัญญาณกระแสผลต่างมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงนำผลของสัญญาณกระแสผลต่างดังกล่าว ไปวิเคราะห์เพื่อหาวิธีการตรวจจับความผิดปกติและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่หม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



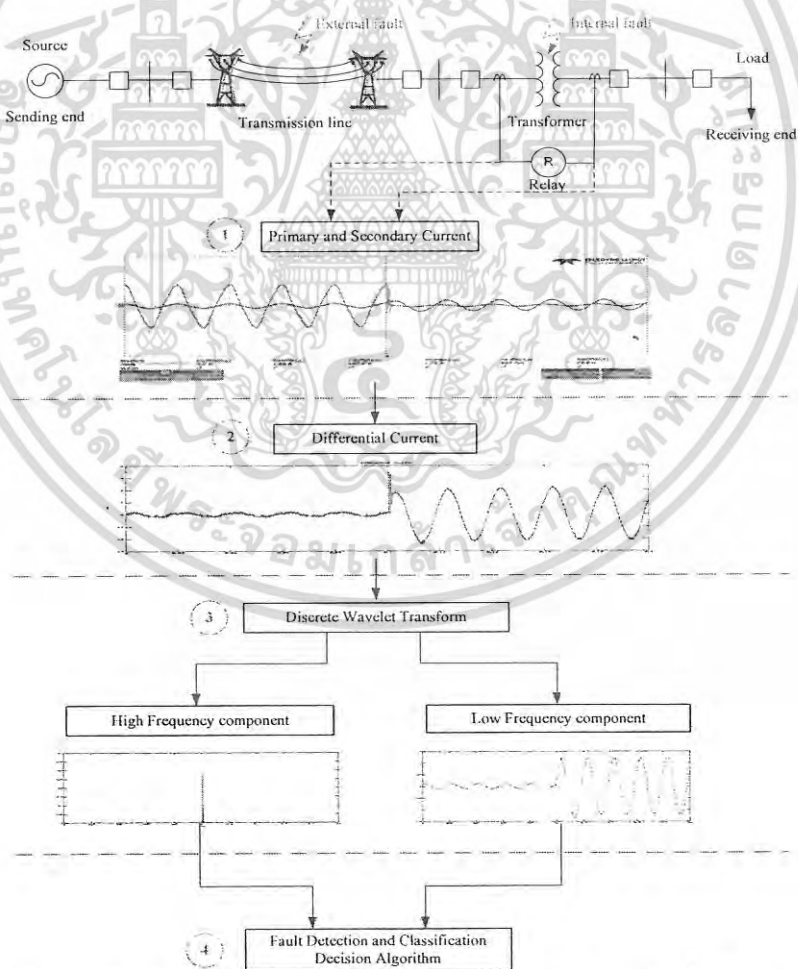
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตในการตรวจจับ และแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ

4.1 การวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform, DWT) ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณได้ ซึ่งสามารถแยกได้ทั้งองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในเชิงมาตราส่วน (Scale) โดยสมมุติฐานในงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติในเชิงความถี่ โดยในสภาวะปกติของระบบไฟฟ้ารูปคลื่นสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของความถี่ของสัญญาณซึ่งคือ 50 Hz แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นภายในระบบ จะทำให้สัญญาณกระแสมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้น โดยทำให้มีสัญญาณความถี่สูงเกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดความผิดปกติ และหากมีการเกิดความผิดปกติที่ตำแหน่งที่แตกต่างกัน ผลของสัญญาณความผิดปกติที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบย่อมมีความแตกต่างกัน และการเกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลง น่าจะส่งผลต่อสัญญาณกระแสที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่นกัน ดังนั้นจากสมมุติฐานดังกล่าว จึงประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติโดยการแยกองค์ประกอบความถี่ เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ทั้งหมด มาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับการเกิดความผิดปกติ และมาประยุกต์ใช้ในการแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นระหว่างความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองให้เกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงที่สายส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบระบบป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ เช่น การใช้งานรีเลย์ป้องกัน เป็นต้น งานวิจัยนี้ใช้การตรวจจับสัญญาณความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหลัก งานวิจัยนี้ใช้การจำลองการเกิดความผิดปกติจากชุดจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยประกอบด้วยวงจรสายส่ง 3 เฟส ต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสเพื่อจ่ายไปยังโหลด และทดลองให้เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าหรือที่สายส่งกำลังไฟฟ้า และตรวจจับสัญญาณความผิดปกติด้วยสัญญาณความผิดปกติกระแสผลต่างของหม้อแปลง (Differential current) ซึ่งเก็บสัญญาณมาจากออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ซึ่งมีอัตราการสุ่ม (Sampling rate) เท่ากับ 100 kHz นำสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (Primary current) และทุติยภูมิ (Secondary current) ที่บันทึกได้นำไปเข้าโปรแกรม MATLAB เพื่อหาสัญญาณกระแสผลต่าง (Differential current) แล้ววิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณที่เกิดขึ้น จากวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) ของฟังก์ชันเวฟเล็ต ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถกรองข้อมูลของสัญญาณผ่านเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) ชนิด (Daubechies:db2) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณความผิดปกติในสเกลที่ 1-5 หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมา ยกกำลังสอง เพื่อให้สัญญาณเวฟเล็ตมีค่าสูงขึ้นสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น และส่วนของการแยก

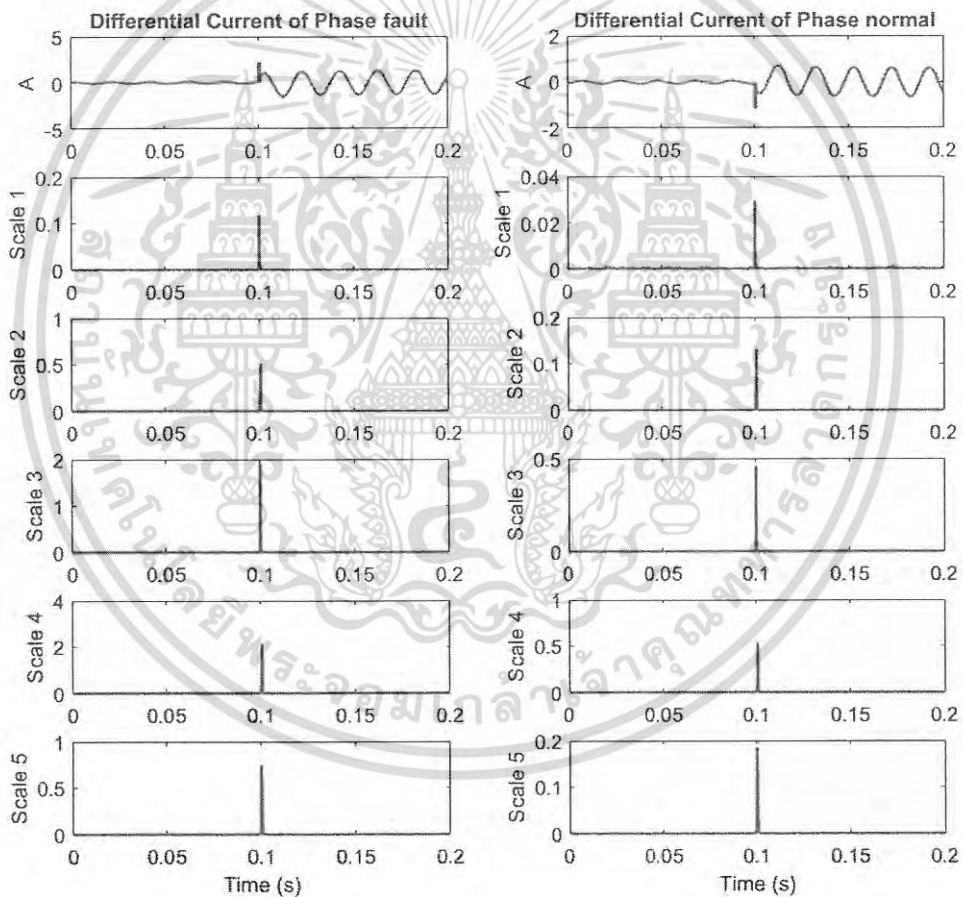
องค์ประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณความผิดพลาดในสเกลที่ 1-10 สามารถอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณได้ตามแผนผังดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ตามรูปที่ 4.2 (ก) เห็นได้ว่าในตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดค่าสัมประสิทธิ์มีค่าสูงอย่างเห็นได้ชัดเจนในสเกลที่ 3-5 และมีความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ระหว่าง ณ เวลาที่เกิดความผิดพลาดกับช่วงเวลาที่ไม่เกิดความผิดพลาดชัดเจนที่สุดในสเกลที่ 5 ผู้วิจัยจึงเลือกค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 5 มาใช้ในการวิเคราะห์ รวบรวมข้อมูลสัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากการจำลองผ่านชุดทดลองที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 มาหาพฤติกรรมเพื่อนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อถัดไป ผู้วิจัยไม่ได้นำองค์ประกอบความถี่ต่ำมาใช้ในการตรวจจับความผิดพลาด เนื่องจากสัญญาณความผิดพลาดเป็นส่วนหนึ่งของความถี่สูง จึงเหมาะสมที่จะใช้ องค์ประกอบความถี่สูงมาตรวจจับความผิดพลาด ส่วนองค์ประกอบความถี่ต่ำ ผู้วิจัยได้ศึกษาจากบทวิจัยในอดีตเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการนำไปสร้างอัลกอริทึมในการแบ่งแยกประเภทการเกิดความผิดพลาดระหว่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



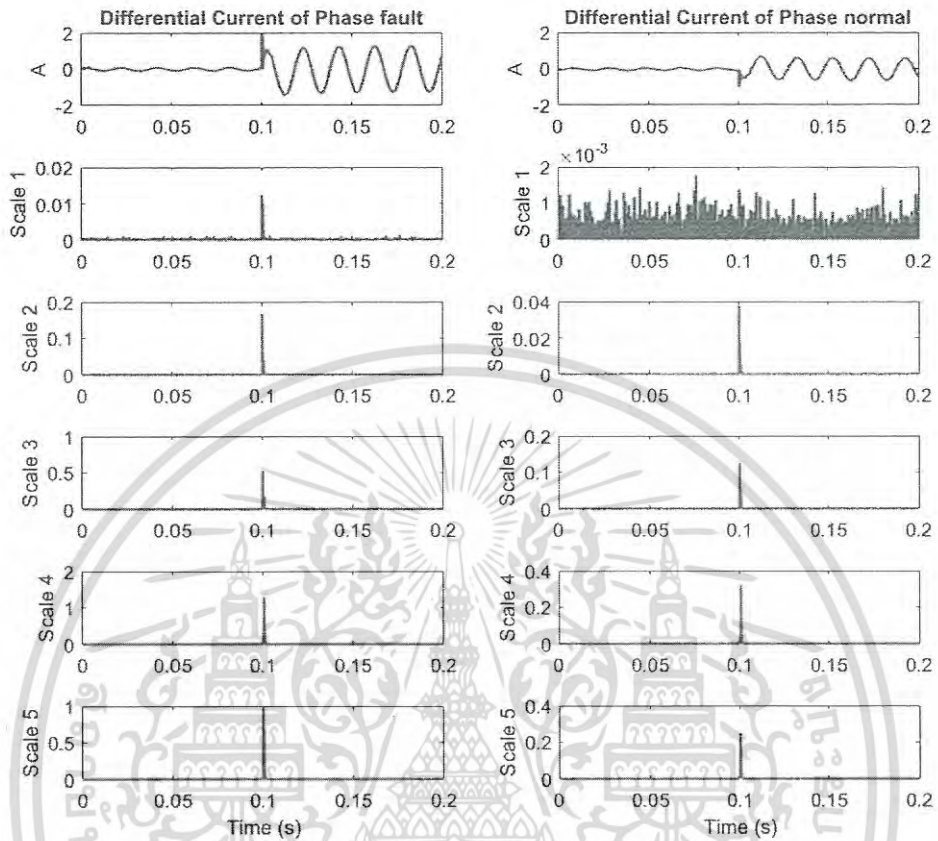
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดที่หม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

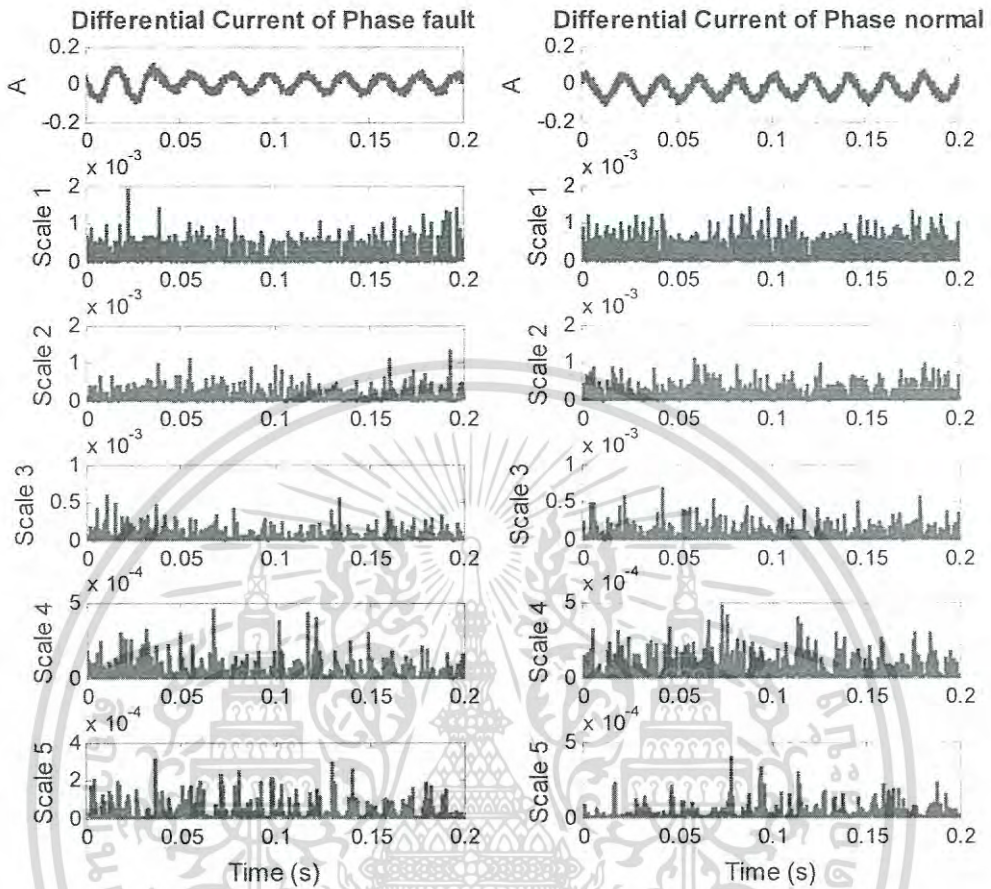
จากรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณเวฟเล็ทขององค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่างของหม้อแปลงในสเกลที่ 1-5 เมื่อเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ทมีค่าสูงสุด ณ เวลาที่เกิดความผิดปกติ โดยเริ่มเห็นได้ชัดเจนทั้งเฟสที่เกิดความผิดปกติและเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติในสเกลที่ 4 และ 5 ส่วนในรูปที่ 4.2 (ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณเวฟเล็ทขององค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่างของหม้อแปลงเมื่อเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง หรือเกิดความผิดปกติที่สายส่งไฟฟ้าลงดิน พบว่าสัญญาณค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ทสูงสุดแตกต่างจากสัญญาณในกรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง งานวิจัยนี้เลือกวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 2 นำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติ จะได้ว่ากล่าวได้หัวข้อถัดไป



(ก) เมื่อเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 80 เฟอร์เซ็นต์ (ระหว่างขดลวด 44 กับ 396)

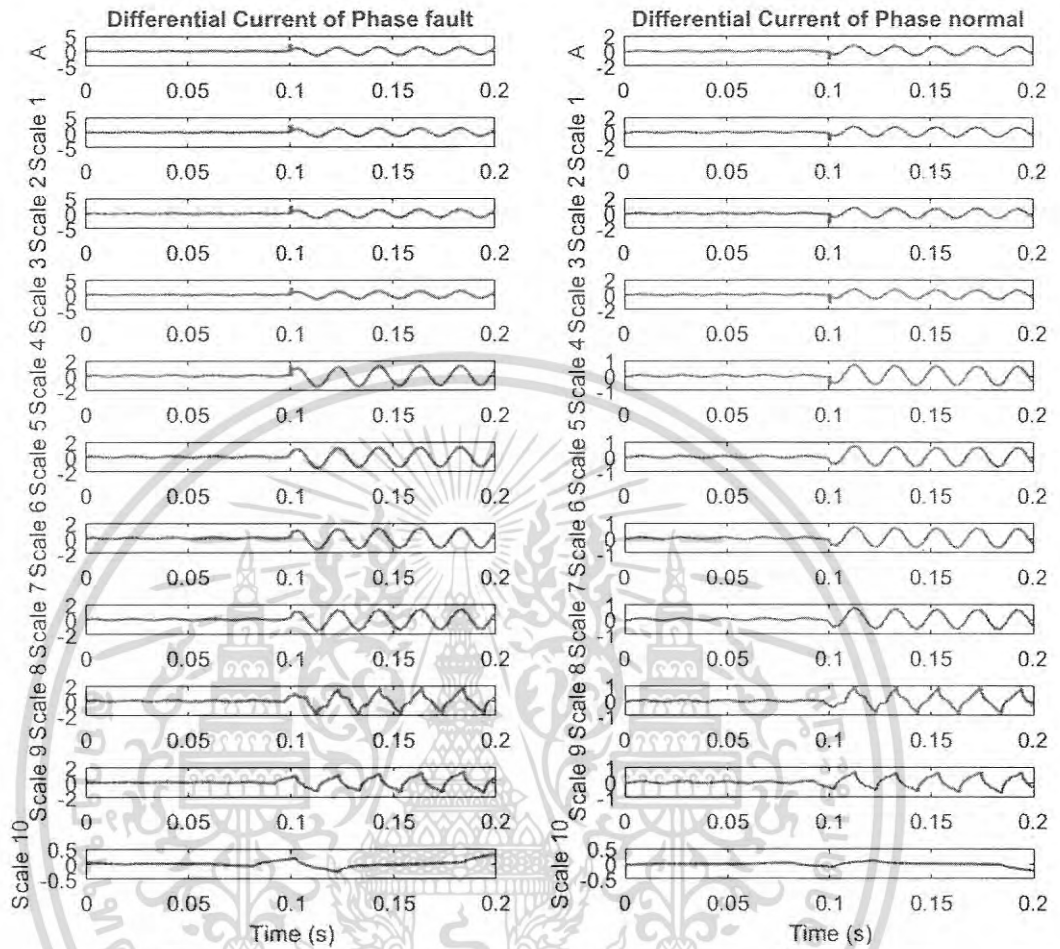


(ข) เมื่อเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านทุติยภูมิระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 80 เปอร์เซ็นต์ (ระหว่างขดลวด 22 กับ 198)



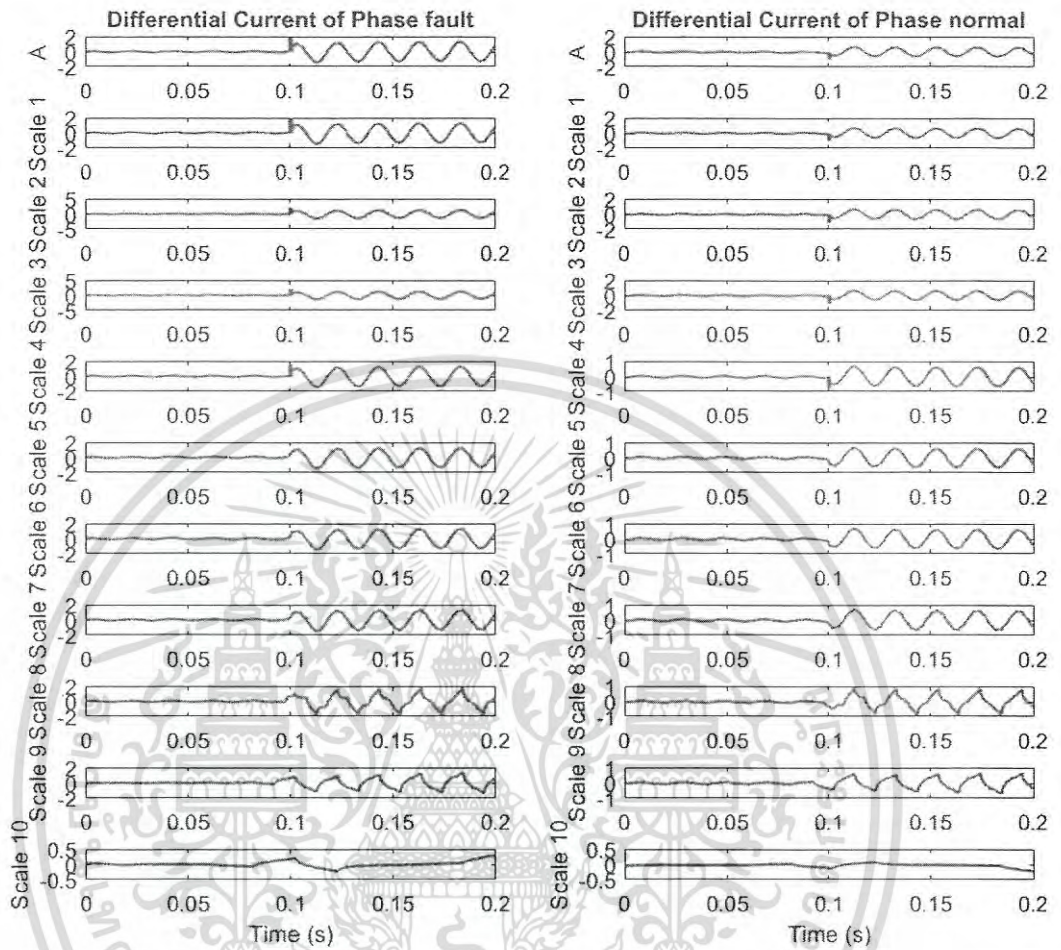
(ค) เมื่อเกิดความผิดปกติเฟส A ลงดินที่สายส่งไฟฟ้าระยะ 70 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวสายส่ง รูปที่ 4.2 สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 ของสัญญาณกระแสผลต่าง

จากรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างสัญญาณเวฟเล็ตขององค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแสผลต่างของหม้อแปลงในสเกลที่ 1-10 กรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 4.3 (ค) เป็นกรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง พบว่าสัญญาณเวฟเล็ตที่ได้ทุกกรณีมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณกระแสผลต่างเดิม โดยในสเกลที่สูงขึ้นลักษณะของสัญญาณจะเรียบขึ้น เนื่องจากการแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำ โดยเริ่มมีสัญญาณที่เรียบได้ชัดเจนในสเกลที่ 5



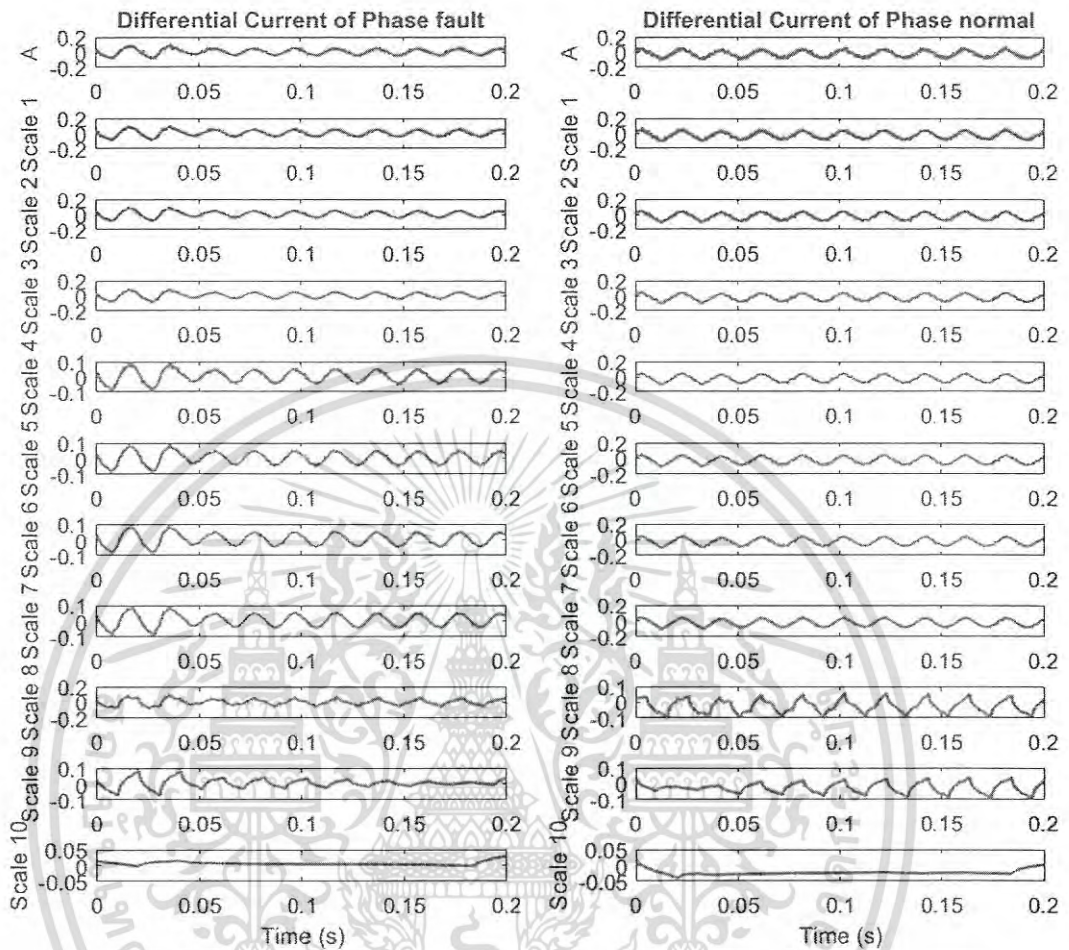
(ก) เมื่อเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 80 เฟอร์เซ็นต์ (ระหว่างขดลวด 44 กับ 396)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เมื่อเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านทุติยภูมิระหว่างแท่งขดลวดที่ต่างกัน 80 เฟอร์เซ็นต์ (ระหว่างขดลวด 22 กับ 198)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) เมื่อเกิดความผิดปกติเฟส A ลงดินที่สายส่งไฟฟ้าระยะ 70 เปอร์เซ็นต์ของความยาวสายส่งไฟฟ้า

รูปที่ 4.3 สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำสเกลที่ 1-10 ของสัญญาณกระแสผลต่าง

จากสัญญาณเวฟเลิตที่ได้จากกระแสผลต่างของหม้อแปลงขณะเกิดความผิดปกติ สามารถกรองข้อมูลของสัญญาณออกเป็นองค์ประกอบความถี่สูง และองค์ประกอบความถี่ต่ำ และนำมาวิเคราะห์ เพื่อสร้างเงื่อนไขการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติได้

4.2 การตรวจจับความผิดปกติและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากความถี่สูง

ในขั้นตอนการตรวจจับการเกิดฟอลต์ที่หม้อแปลงไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ ใช้การวิเคราะห์และตรวจจับสัญญาณความผิดปกติจากกระแสผลต่าง (Differential current) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำการเก็บข้อมูลสัญญาณกระแสต้านปฐมภูมิและต้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเสมือนการใช้งานรีเลย์ผลต่าง ด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) บันทึกข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่หม้อแปลงในเฟสที่เกิดความผิดปกติและไม่เกิดความผิดปกติ จากการทดลองให้เกิดความผิดปกติภายในและภายนอกหม้อแปลง แล้วนำข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่บันทึกได้นำมาเข้าโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาสัญญาณกระแสผลต่าง (Differential current) ของหม้อแปลงไฟฟ้า และใช้ฟังก์ชันเวฟเล็ตในโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้อังก์ประกอบความถี่สูงในการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับการเกิดความผิดปกติ เนื่องจากสัญญาณความผิดปกติเป็นส่วนที่มีความถี่สูง ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต เพื่อกรองสัญญาณในส่วนขององค์ประกอบความถี่สูงจากสัญญาณกระแสผลต่างในสเกลที่ 1-5 แล้วนำค่ามายกกำลังสอง เพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์จากสัญญาณเวฟเล็ตขององค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 2 เนื่องจากเป็นสเกลที่เห็นความเปลี่ยนแปลงของความถี่สูงของสัญญาณความผิดปกติได้ชัดเจนในทุกกรณีจากสัญญาณที่บันทึกได้จากการจำลองความผิดปกติแต่ละประเภท ซึ่งช่วงความถี่ของการแปลงเวฟเล็ตและตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดหลังเกิดความผิดปกติแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ (กำหนดให้ CO_{max}^{diff} แทนค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดหลังเกิดความผิดปกติ)

ตารางที่ 4.1 ช่วงความถี่ของการแปลงเวฟเล็ตแต่ละสเกล

Scale	Detail 1	Detail 2	Detail 3	Detail 4	Detail 5	Approximation 2
Frequency Range (kHz)	2.5-5.0	2.5-1.25	1.25-0.625	0.625-0.3125	0.3125-0.15625	1.25-0

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตขององค์ประกอบความถี่สูง

ประเภทความผิดปกติ	เกิดความผิดปกติระหว่างขดลวดหรือที่ระยะสายส่ง	แรงดัน	โวลต์	CO_{max}^{diff}	
				เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ
Internal fault ที่ขดลวดต้านปฐมภูมิ	44-396	400	ความต้านทาน 600 วัตต์	0.513	0.130
	88-440			0.216	0.058
	44-396			0.313	0.075
	88-440			0.252	0.054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

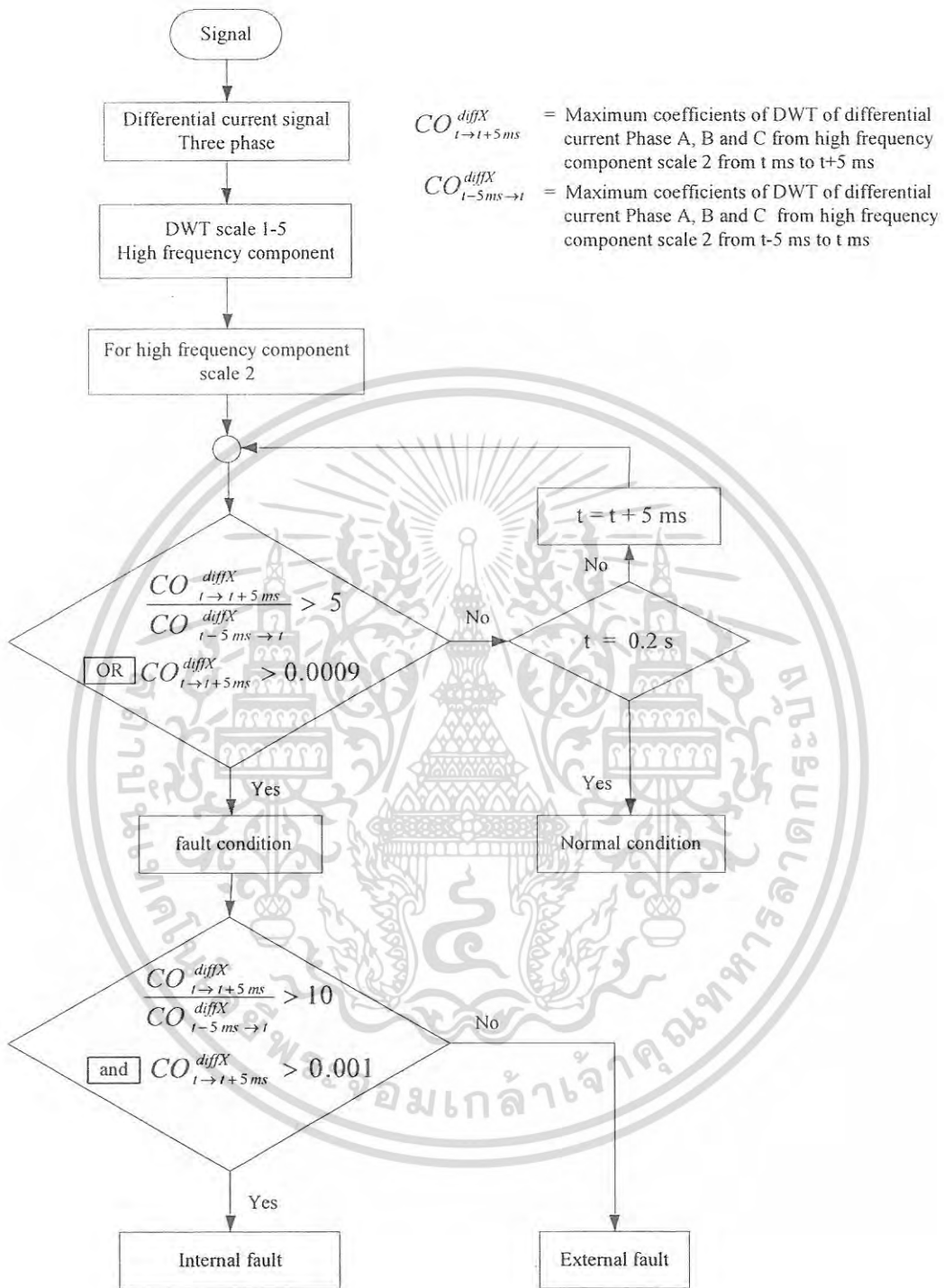
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตขององค์ประกอบความถี่สูง

ประเภทความ ผิดพร่อง	เกิดความผิดพร่อง ระหว่างขดลวด หรือ ที่ระยะสายส่ง	แรงดัน	โหนด	CO_{max}^{diff}	
				เฟสที่เกิด ความผิดพร่อง	เฟสที่ไม่เกิด ความผิดพร่อง
Internal fault ที่ขดลวดด้าน ทุติยภูมิ	22-198	400 โวลต์	ความต้านทาน 600 วัตต์	0.167	0.037
	44-220			0.100	0.018
	22-198		ความต้านทาน 300 วัตต์ กับ ความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์	0.143	0.033
	44-220			0.071	0.018
External fault ที่สายส่ง	30%	400 โวลต์	ความต้านทาน 600 วัตต์	0.00100	0.00127
	40%			0.00136	0.00151
	50%			0.00100	0.00127
	60%			0.00124	0.00118
	70%		ความต้านทาน 300 วัตต์ กับ ความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์	0.00101	0.00120
	30%			0.00129	0.00107
	40%			0.00126	0.00129
	50%			0.00119	0.00144
60%	0.00126	0.00121			
70%	0.00133	0.00115			

จากตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตความถี่สูงในสเกลที่ 2 ระหว่างข้อมูลที่ได้จากสัญญาณกระแสผลต่างเมื่อเกิดความผิดพร่องภายในขดลวดหม้อแปลงและภายนอกหม้อแปลง แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ในกรณีที่เกิดความผิดพร่องภายในหม้อแปลงมีค่าสูงกว่ากรณีเกิดความผิดพร่องภายนอกหม้อแปลงหลายเท่า จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ ดังจะได้กล่าวต่อไป

ทำการตรวจจับสัญญาณกระแสผลต่างแต่ละเฟสทุก ๆ 5 มิลลิวินาทีจนครบเวลาของข้อมูลของสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคปคือ 0.2 วินาที ถ้าค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพร่องของแต่ละเฟสมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดพร่อง หรือค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพร่องของเฟสใดมีค่ามากกว่า 0.0009 ได้ผลลัพธ์เป็นเกิดความผิดพร่อง แต่ถ้าไม่ใช่ได้ผลลัพธ์เป็นไม่เกิดความผิดพร่อง เมื่อตรวจจับว่าเกิดความผิดพร่อง นำค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพร่องที่ตรวจจับได้ในแต่ละเฟสไปเข้าเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดพร่อง คือถ้าค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดฟอล์กของแต่ละเฟสมีค่ามากกว่า 10 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดพร่อง และค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพร่องมีค่ามากกว่า 0.001 คือได้ผลลัพธ์เป็นเกิดความผิดพร่องภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ถ้าไม่ใช่ คือได้ผลลัพธ์เป็นเกิดความผิดพร่องภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า โดยขั้นตอนการตรวจจับความผิดพร่องแสดงดังรูปที่ 4.4

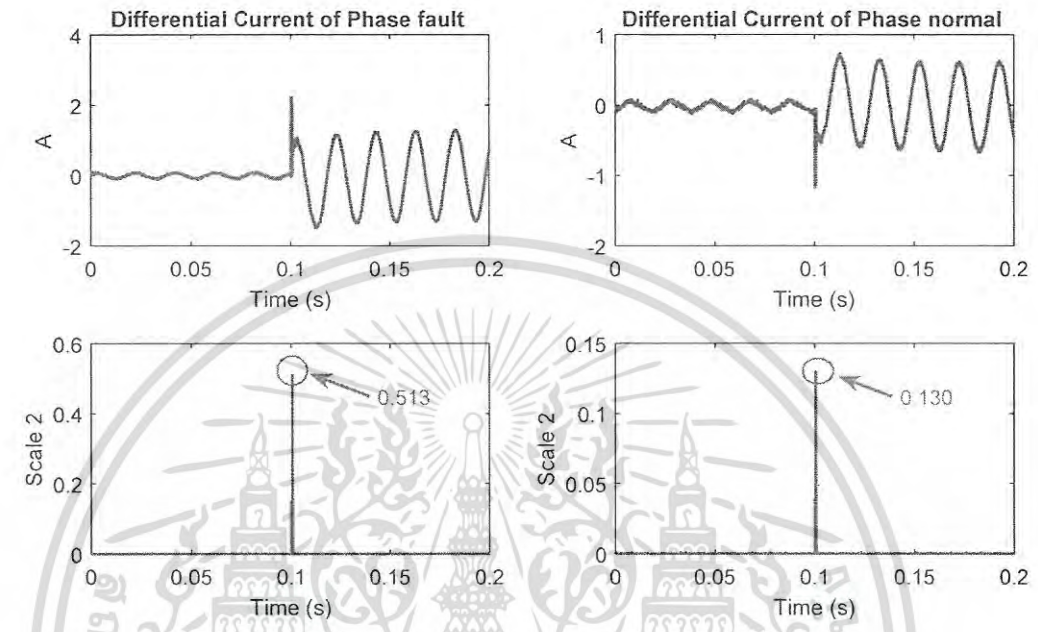
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



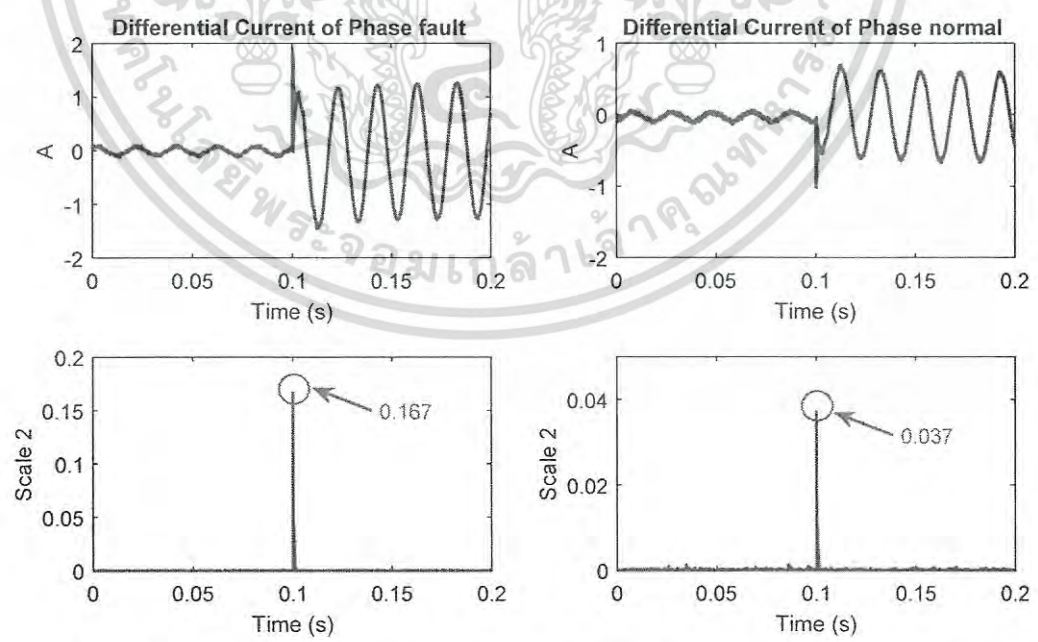
รูปที่ 4.4 เงื่อนไขการตรวจจับการเกิดความผิดปกติ และแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ จากสัมประสิทธิ์ของความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $CO_{t \rightarrow t+5ms}^{diff}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 2 หลังเกิดความผิดปกติ
 $CO_{t-5ms \rightarrow t}^{diff}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 2 ก่อนเกิดความผิดปกติ

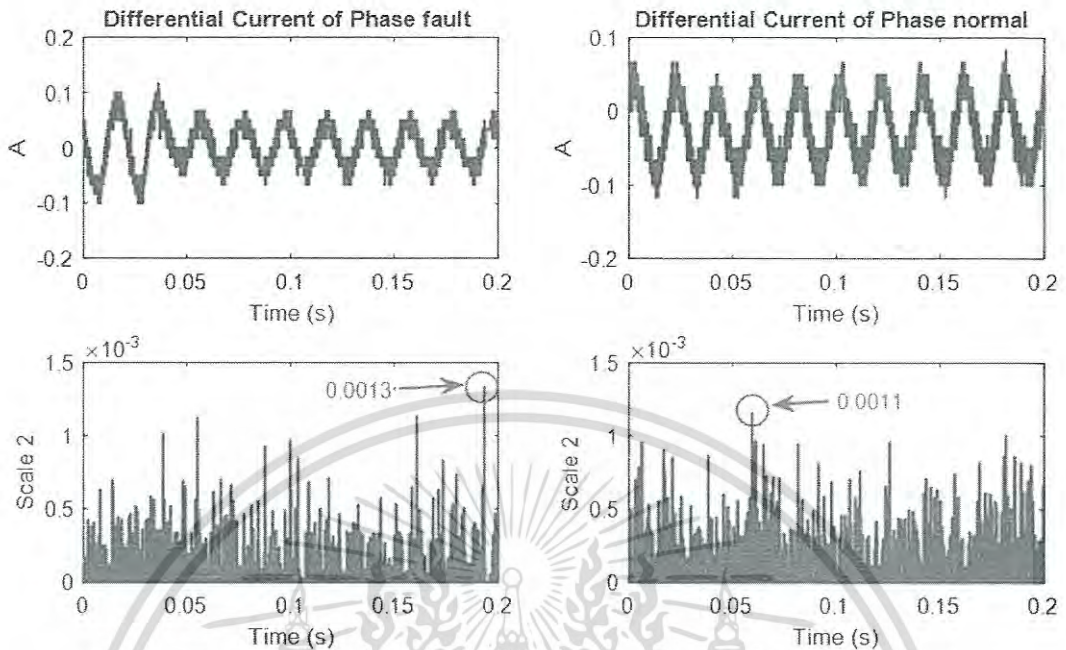


(ก) สัญญาณความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติภายในขดลวดหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ



(ข) สัญญาณความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติในหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สัญญาณความผิดปกติที่เกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่ใช้ในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ

เมื่อนำข้อมูลตัวอย่างจากการบันทึกค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสผลต่างจากรีเลย์ สเกลที่ 2 ในช่วงที่เกิดความผิดปกติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 มาเข้าเงื่อนไขการตรวจจับความผิดปกติตามแผนผังในรูปที่ 4.4 ตัวอย่างสัญญาณที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดปกติของเฟส A และเฟส B คือ 0.513 และ 0.130 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดปกติคือ 0.0009 ดังนั้นเข้าเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติ และนำไปเข้าเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่ามากกว่า 10 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดปกติคือ 0.0009 และมีค่ามากกว่า 0.001 ตามเงื่อนไขต่อมา ดังนั้นจึงได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนตัวอย่างสัญญาณที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดปกติของเฟส A และเฟส B คือ 0.167 และ 0.037 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดปกติคือ 0.0009 ดังนั้นเข้าเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติ และนำไปเข้าเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่ามากกว่า 10 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดปกติคือ 0.0009 และมีค่ามากกว่า 0.001 ตามเงื่อนไขต่อมา ดังนั้นจึงได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และตัวอย่างสัญญาณที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดปกติของเฟส A และเฟส B คือ 0.0013 และ 0.0011 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.0009 ดังนั้นเข้าเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติ และนำไปเข้าเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อย 10 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดปกติคือ 0.0009 ดังนั้นจึงได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด
จากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง

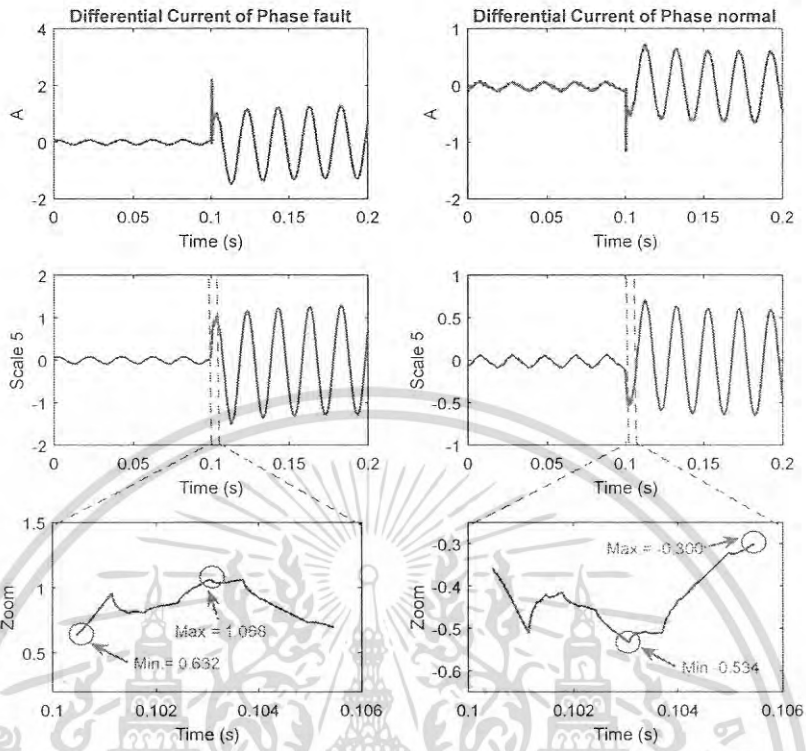
จากสัญญาณ ทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณความถี่สูงของผลต่างกระแสจากสเกลที่ 2 (CO_r^{diff})				ผลลัพธ์
	ก่อนเกิดความผิดพลาด		หลังเกิดความผิดพลาด		
	เฟสที่เกิด ความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิด ความผิดพลาด	เฟสที่เกิด ความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิด ความผิดพลาด	
สัญญาณจากรูป ที่ 4.5 (ก)	0.0009	0.0009	0.513	0.130	เกิดความผิดพลาด ภายในหม้อแปลง
สัญญาณจากรูป ที่ 4.5 (ข)	0.0009	0.0009	0.167	0.037	เกิดความผิดพลาด ภายในหม้อแปลง
สัญญาณจากรูป ที่ 4.5 (ค)	0.0009	0.0009	0.0013	0.0011	เกิดความผิดพลาด ภายนอกหม้อแปลง

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากสัมประสิทธิ์
องค์ประกอบความถี่สูง

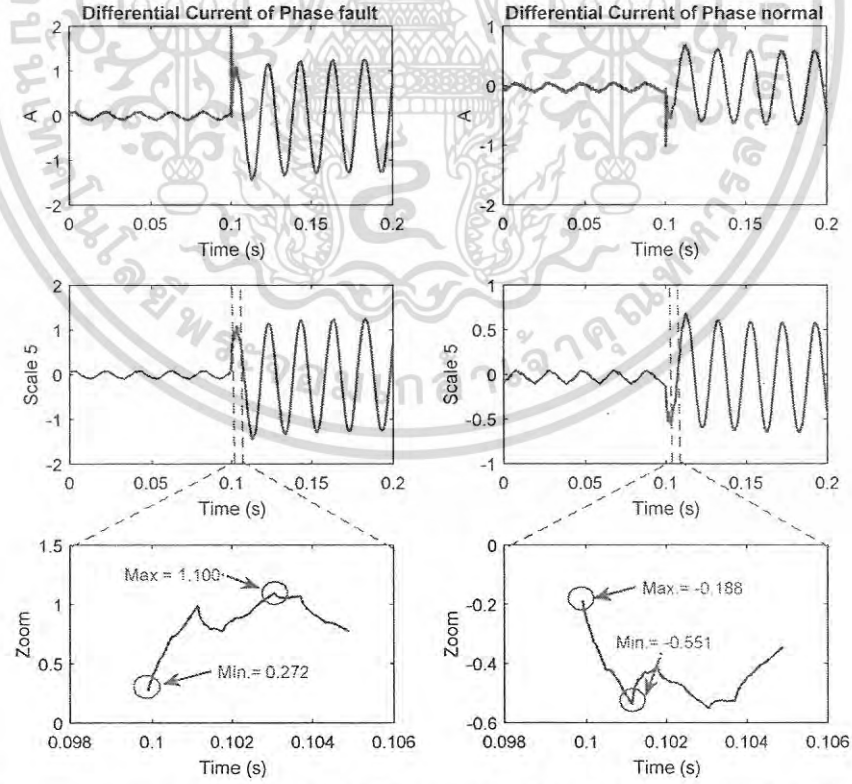
ชนิดการเกิดความผิดพลาด	เกิดความผิดพลาดภายใน หม้อแปลง	เกิดความผิดพลาดภายนอก หม้อแปลง
จำนวนข้อมูลทดสอบ	180	10
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	100%	100%

4.3 การแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ

วิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากการการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งสามารถกรองข้อมูลของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแสผลต่าง (Differential current) ของหม้อแปลงไฟฟ้าในสเกล 1-10 งานวิจัยนี้เลือกวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำในสเกลที่ 5 เนื่องจากเป็นสเกลที่แยกความถี่ต่ำออกมาได้ชัดเจนในทุกกรณีศึกษา ทำให้สัญญาณที่ได้เรียกว่าสัญญาณกระแสผลต่างเดิม ใช้สัญญาณความถี่ต่ำเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด หลังจากตรวจจับการเกิดความผิดพลาดด้วยสัญญาณความถี่สูง โดยทำการบันทึกสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำในช่วงเวลา 5 มิลลิวินาที ซึ่งเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ไซเคิลนับจาก ณ เวลาที่ตรวจจับว่าความผิดพลาดเกิดขึ้น เพื่อตรวจจับค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณในช่วงเวลานั้น ๆ ได้ดังแสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นนำค่าสูงสุดและต่ำสุดในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลนั้น มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ โดยอาศัยการศึกษาจากงานวิจัยในอดีต [23] เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวระหว่างกรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงกับภายนอกหม้อแปลง เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด ซึ่งจะอธิบายต่อไป

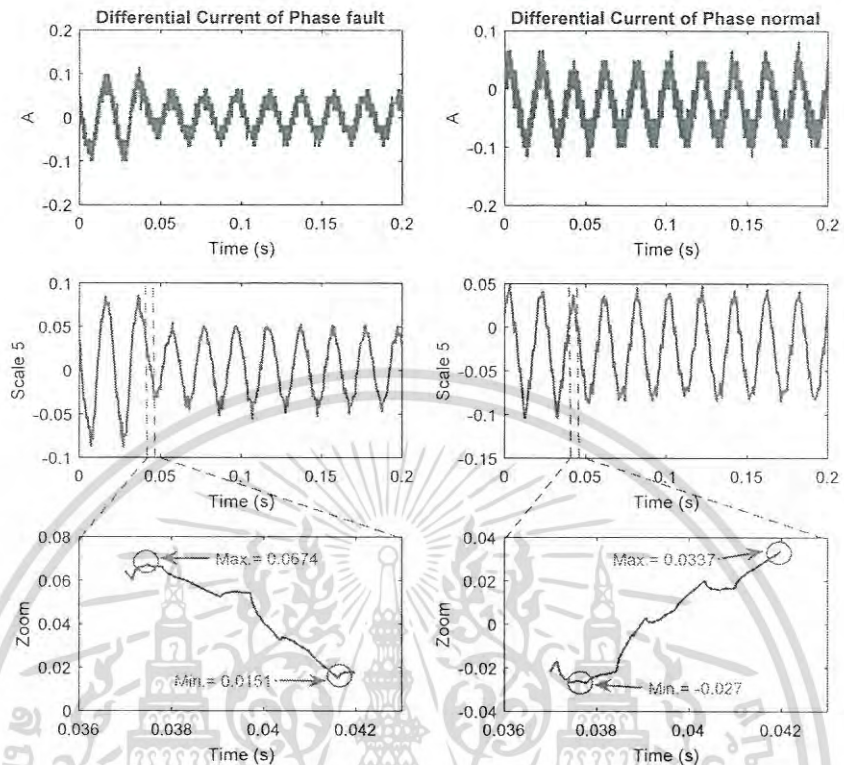


(ก) สัญญาณความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ



(ข) สัญญาณความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สัญญาณความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงหรือที่สายส่ง รูปที่ 4.6 แสดงการตรวจจับค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแสผลต่าง หลังเกิดความผิดพลาด

จากรูปที่ 4.6 แสดงการตรวจจับค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ สเกลที่ 5 โดยเริ่มตรวจจับสัญญาณตั้งแต่เริ่มเกิดความผิดปกติไปเป็นเวลา 5 มิลลิวินาที แล้วบันทึก ค่าสูงสุดและต่ำสุดในช่วงเวลาที่ตรวจจับนั้น ๆ เพื่อนำมาเข้าสมการหาค่าสัมประสิทธิ์เพื่อใช้ในการ แบ่งแยกประเภทความผิดพลาด (RA_{chk}^{diff}) โดยใช้สมการจากการศึกษางานวิจัยในอดีต [23] ดังนี้

$$\text{โดย } RA_{chk}^{diff} = \frac{(X_{max}^{diff} - X_{min}^{diff}) / I_{rated}}{(t_{max}^{diff} - t_{min}^{diff}) / T}$$

(4.1)

เมื่อ RA_{chk}^{diff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการสร้างเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด

X_{max}^{diff} คือ ค่าสูงสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแสผลต่าง

X_{min}^{diff} คือ ค่าต่ำสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแสผลต่าง

- t_{max}^{diff} คือ เวลา ณ ตำแหน่งค่าสูงสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแส
ผลต่าง
- t_{min}^{diff} คือ เวลา ณ ตำแหน่งค่าต่ำสุดของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำของกระแส
ผลต่าง
- I_{rated} คือ กระแสพิกัดของหม้อแปลง
- T คือ คาบเวลา

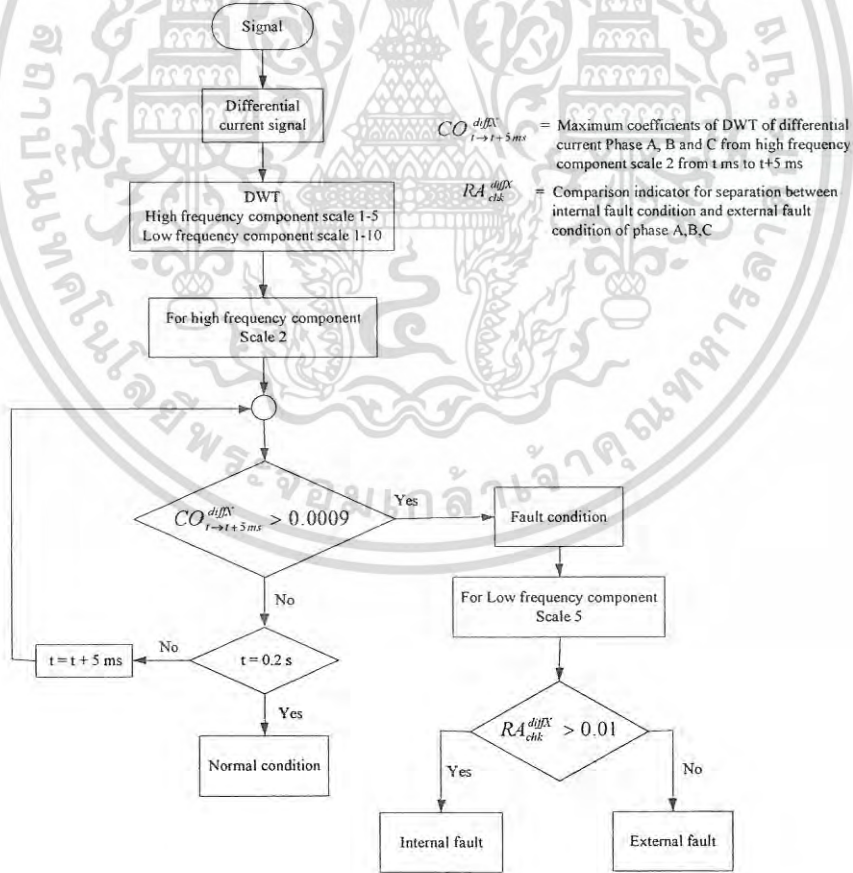
ตารางที่ 4.5 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ (RA_{chk}^{diff}) จากสัญญาณ
องค์ประกอบความถี่ต่ำ

ประเภทความ ผิดปกติ	เกิดความผิดปกติ ระหว่างขดลวด	แรงดัน	โพลต์	RA_{chk}^{diff}		
				เฟสที่เกิดความ ผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิด ความผิดปกติ	
Internal fault	44-396	400 โวลต์	ความต้านทาน 600 วัตต์	0.0986	0.0572	
	88-440			0.0962	0.0574	
	44-396		ความต้านทาน 300 วัตต์และ ความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์	0.0939	0.0604	
	88-440			0.0933	0.0564	
	22-198		400 โวลต์	ความต้านทาน 600 วัตต์	0.154	0.0675
	44-220				0.0869	0.0550
	22-198			ความต้านทาน 300 วัตต์และ ความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์	0.1305	0.0620
	44-220				0.1328	0.0654
External fault	30%	400 โวลต์	ความต้านทาน 600 วัตต์	0.0072	0.0109	
	40%			0.0040	0.0086	
	50%			0.0057	0.0116	
	60%			0.0058	0.0111	
	70%	400 โวลต์	ความต้านทาน 300 วัตต์และ ความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์	0.0051	0.0146	
	30%			0.0074	0.0089	
	40%			0.0071	0.0096	
	50%			0.0068	0.0075	
60%			0.0069	0.0078		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ (RA_{chk}^{diff}) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์ในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงมีค่าสูงกว่ากรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงอย่างชัดเจน จากค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว สามารถนำมาสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติได้ดังจะได้อธิบายต่อไป

ใช้เงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติจากค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง คือ ทำการตรวจจับสัญญาณทุก ๆ 5 มิลลิวินาทีจนครบเวลาของข้อมูลของสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคปคือ 0.2 วินาที ถ้าค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดปกติของเฟสใดมีค่ามากกว่า 0.0009 เข้าเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติ เมื่อตรวจพบว่ามีค่าผิดปกติเกิดขึ้นแล้ว ให้บันทึกสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำในสเกลที่ 5 เริ่มจากสัญญาณ ณ เวลาที่เกิดความผิดปกติไป ¼ ไซเคิล หรือ 5 มิลลิวินาที และตรวจจับค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณในช่วงดังกล่าว นำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ (RA_{chk}^{diff}) ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์ (RA_{chk}^{diff}) มีค่ามากกว่า 0.06 ตามเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ถ้ามีค่าไม่เกิน 0.06 ตามเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า โดยขั้นตอนการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติด้วยสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนผังเงื่อนไขการแยกประเภทความผิดปกติจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด (RA_{chk}^{diff})

และผลลัพธ์ในการแบ่งแยกความผิดพลาด

จากสัญญาณทดลอง	RA_{chk}^{diff}		ผลลัพธ์การเกิดความผิดพลาด
	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	
สัญญาณจากรูปที่ 4.6 (ก)	0.0986	0.0572	เกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง
สัญญาณจากรูปที่ 4.6 (ข)	0.0869	0.0550	เกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง
สัญญาณจากรูปที่ 4.6 (ค)	0.0074	0.0079	เกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง

ใช้ข้อมูลตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงตามในตารางที่ 4.3 และตัวอย่างข้อมูลค่า RA_{chk}^{diff} ตามในตารางที่ 4.6 นำมาผ่านเงื่อนไขการตรวจจับการเกิดความผิดพลาดและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดตามแผนผังในรูปที่ 4.7 ได้ดังนี้ กรณีสัญญาณจากรูปที่ 4.6 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพลาด เฟส A และ เฟส B คือ 0.513 และ 0.130 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.0009 ดังนั้นเข้าเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดพลาด จากนั้นนำค่า RA_{chk}^{diff} มาเข้าเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด และค่า RA_{chk}^{diff} ของเฟส A และ เฟส B ได้ค่าเท่ากับ 0.0986 และ 0.0572 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.01 ตามเงื่อนไขจึงได้ผลลัพธ์ คือ เกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนในกรณีสัญญาณจากรูปที่ 4.6 (ข) ค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพลาด เฟส A และ เฟส B คือ 0.167 และ 0.037 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.0009 ดังนั้นเข้าเงื่อนไขได้ผลลัพธ์เป็น เกิดความผิดพลาด จากนั้นนำค่า RA_{chk}^{diff} มาเข้าเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด และค่า RA_{chk}^{diff} ของเฟส A และ เฟส B ได้ค่าเท่ากับ 0.0869 และ 0.0550 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.01 ตามเงื่อนไขจึงได้ผลลัพธ์ คือ เกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และ สัญญาณจากรูปที่ 4.6 (ค) RA_{chk}^{diff} ของเฟส A และ เฟส B ได้ค่าเท่ากับ 0.0074 และ 0.0079 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.01 ตามเงื่อนไขจึงได้ผลลัพธ์ คือ เกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่ต่ำ

ชนิดการเกิดความผิดพลาด	เกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง	เกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง
จำนวนข้อมูลทดสอบ	180	10
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	100%	100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด

จากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในการออกแบบวิธีการสร้างเงื่อนไขการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่หม้อแปลงไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดได้จาก 2 วิธีคือ จากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง และสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งสามารถตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งสองวิธี ซึ่งผลลัพธ์ในการตรวจจับความผิดพลาดจากข้อมูลสัญญาณความผิดพลาดกรณีเกิดความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลง จะได้แสดงในหัวข้อถัดไป

5.1 ผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด

จากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงและความถี่ต่ำของสัญญาณความผิดพลาดที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณตามที่ได้กล่าวในบทที่ 4 จึงสามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดได้ ทั้งในกรณีวิเคราะห์ด้วยสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง และสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ ดังแสดงค่าในหัวข้อถัดไป

5.1.1 กรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงระหว่างขดลวดที่ห่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่หม้อแปลงไปเข้าเงื่อนไขตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.7 ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณีดังแสดงค่าในตารางที่ 5.1 เมื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่สูงพบว่าของเฟสที่เกิดความผิดพลาดมีค่าสูงกว่าในเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด

ตารางที่ 5.1 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด กรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง ระหว่างแทปขดลวดที่ต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดพลาด	ระหว่างแทปขดลวด	โหลด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}		RA_{ch}^{diff}		CO_{max}^{diff}		RA_{ch}^{diff}	
			เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 10% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-88	R	0.0270	0.0105	In_Fault	ถูกต้อง	0.1141	0.0499	In_Fault	ถูกต้อง
	88-132		0.0343	0.0086	In_Fault	ถูกต้อง	0.1278	0.0306	In_Fault	ถูกต้อง
	132-176		0.0294	0.0085	In_Fault	ถูกต้อง	0.1128	0.0507	In_Fault	ถูกต้อง
	176-220		0.0544	0.0130	In_Fault	ถูกต้อง	0.0950	0.0314	In_Fault	ถูกต้อง
	220-264		0.0526	0.0197	In_Fault	ถูกต้อง	0.1123	0.0489	In_Fault	ถูกต้อง
	264-308		0.0469	0.0109	In_Fault	ถูกต้อง	0.1318	0.0595	In_Fault	ถูกต้อง
	308-352		0.0412	0.0154	In_Fault	ถูกต้อง	0.1318	0.0605	In_Fault	ถูกต้อง
	352-396		0.0413	0.0173	In_Fault	ถูกต้อง	0.1140	0.0497	In_Fault	ถูกต้อง
396-440	0.0241	0.0073	In_Fault	ถูกต้อง	0.1146	0.0503	In_Fault	ถูกต้อง		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด กรณีเกิดความผิดพลาด ภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดพลาด	ระหว่างแทบขดลวด	โหลด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{line}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 10% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-88	RL	0.0366	0.0071	In_Fault	ถูกต้อง	0.1141	0.0500	In_Fault	ถูกต้อง
	88-132		0.0280	0.0073	In_Fault	ถูกต้อง	0.1106	0.0467	In_Fault	ถูกต้อง
	132-176		0.0687	0.0168	In_Fault	ถูกต้อง	0.1128	0.0508	In_Fault	ถูกต้อง
	176-220		0.0682	0.0156	In_Fault	ถูกต้อง	0.1148	0.0491	In_Fault	ถูกต้อง
	220-264		0.0428	0.0110	In_Fault	ถูกต้อง	0.1123	0.0490	In_Fault	ถูกต้อง
	264-308		0.0838	0.0196	In_Fault	ถูกต้อง	0.1112	0.0503	In_Fault	ถูกต้อง
	308-352		0.0455	0.0129	In_Fault	ถูกต้อง	0.1148	0.0507	In_Fault	ถูกต้อง
	352-396		0.0413	0.0173	In_Fault	ถูกต้อง	0.1140	0.0498	In_Fault	ถูกต้อง
	396-440		0.0242	0.0044	In_Fault	ถูกต้อง	0.1147	0.0504	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 10% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-44	R	0.0295	0.0047	In_Fault	ถูกต้อง	0.2662	0.1317	In_Fault	ถูกต้อง
	44-66		0.0333	0.0092	In_Fault	ถูกต้อง	0.2702	0.1284	In_Fault	ถูกต้อง
	66-88		0.0130	0.0073	In_Fault	ถูกต้อง	0.2568	0.0391	In_Fault	ถูกต้อง
	88-110		0.0356	0.0090	In_Fault	ถูกต้อง	0.2691	0.1292	In_Fault	ถูกต้อง
	110-132		0.0090	0.0035	In_Fault	ถูกต้อง	0.2677	0.13125	In_Fault	ถูกต้อง
	132-154		0.0214	0.0053	In_Fault	ถูกต้อง	0.2705	0.1332	In_Fault	ถูกต้อง
	154-176		0.0274	0.0077	In_Fault	ถูกต้อง	0.2638	0.1315	In_Fault	ถูกต้อง
	176-198		0.0265	0.0096	In_Fault	ถูกต้อง	0.2757	0.1360	In_Fault	ถูกต้อง
	198-220		0.0254	0.0065	In_Fault	ถูกต้อง	0.2726	0.1362	In_Fault	ถูกต้อง
	22-44	RL	0.0155	0.0059	In_Fault	ถูกต้อง	0.0887	0.0685	In_Fault	ถูกต้อง
	44-66		0.0207	0.0055	In_Fault	ถูกต้อง	0.0892	0.0680	In_Fault	ถูกต้อง
	66-88		0.0245	0.0054	In_Fault	ถูกต้อง	0.0892	0.0738	In_Fault	ถูกต้อง
	88-110		0.0166	0.0057	In_Fault	ถูกต้อง	0.1115	0.0710	In_Fault	ถูกต้อง
	110-132		0.0228	0.0041	In_Fault	ถูกต้อง	0.1126	0.0708	In_Fault	ถูกต้อง
	132-154		0.0215	0.0053	In_Fault	ถูกต้อง	0.0879	0.0704	In_Fault	ถูกต้อง
154-176	0.0245		0.0054	In_Fault	ถูกต้อง	0.1152	0.0737	In_Fault	ถูกต้อง	
176-198	0.0099		0.0019	In_Fault	ถูกต้อง	0.0896	0.0702	In_Fault	ถูกต้อง	
198-220	0.0137		0.0035	In_Fault	ถูกต้อง	0.0797	0.0338	In_Fault	ถูกต้อง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์

นำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ของกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.2 ไปเข้าเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี

ตารางที่ 5.2 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทขดลวดที่ต่างกัน 20 เฟอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ระหว่างแทขดลวด	โพลต์	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ				
			CO_{max}^{diff}				RA_{chk}^{diff}				
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	
Internal fault 20% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-132	R	0.0462	0.0137	In_Fault	ถูกต้อง	0.0902	0.0746	In_Fault	ถูกต้อง	
	88-176		0.0831	0.0148	In_Fault	ถูกต้อง	0.1259	0.0593	In_Fault	ถูกต้อง	
	132-220		0.0566	0.0185	In_Fault	ถูกต้อง	0.0704	0.0723	In_Fault	ถูกต้อง	
	176-264		0.0545	0.0131	In_Fault	ถูกต้อง	0.1496	0.0690	In_Fault	ถูกต้อง	
	220-308		0.0495	0.0126	In_Fault	ถูกต้อง	0.0682	0.0301	In_Fault	ถูกต้อง	
	264-352		0.0350	0.0069	In_Fault	ถูกต้อง	0.1220	0.0723	In_Fault	ถูกต้อง	
	308-396		0.0291	0.0065	In_Fault	ถูกต้อง	0.1231	0.0540	In_Fault	ถูกต้อง	
	352-440		0.0425	0.0173	In_Fault	ถูกต้อง	0.1220	0.0520	In_Fault	ถูกต้อง	
	44-132		RL	0.0539	0.0148	In_Fault	ถูกต้อง	0.1250	0.0584	In_Fault	ถูกต้อง
	88-176			0.0832	0.0243	In_Fault	ถูกต้อง	0.1259	0.0594	In_Fault	ถูกต้อง
	132-220			0.1232	0.0367	In_Fault	ถูกต้อง	0.1284	0.0607	In_Fault	ถูกต้อง
	176-264			0.1268	0.0312	In_Fault	ถูกต้อง	0.1278	0.0599	In_Fault	ถูกต้อง
	220-308			0.1229	0.0297	In_Fault	ถูกต้อง	0.1289	0.0607	In_Fault	ถูกต้อง
	264-352			0.0609	0.0193	In_Fault	ถูกต้อง	0.1315	0.0610	In_Fault	ถูกต้อง
308-396	0.0666	0.0192		In_Fault	ถูกต้อง	0.1295	0.0621	In_Fault	ถูกต้อง		
352-440	0.0605	0.0194	In_Fault	ถูกต้อง	0.1216	0.0570	In_Fault	ถูกต้อง			
Internal fault 20% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-66	R	0.0589	0.0143	In_Fault	ถูกต้อง	0.1251	0.1465	In_Fault	ถูกต้อง	
	44-88		0.0370	0.0136	In_Fault	ถูกต้อง	0.1053	0.1502	In_Fault	ถูกต้อง	
	66-110		0.0452	0.0133	In_Fault	ถูกต้อง	0.1296	0.0584	In_Fault	ถูกต้อง	
	88-132		0.0368	0.0087	In_Fault	ถูกต้อง	0.1230	0.1419	In_Fault	ถูกต้อง	
	110-154		0.0266	0.0051	In_Fault	ถูกต้อง	0.1260	0.1429	In_Fault	ถูกต้อง	
	132-176		0.0234	0.0069	In_Fault	ถูกต้อง	0.1232	0.1442	In_Fault	ถูกต้อง	
	154-198		0.0299	0.0060	In_Fault	ถูกต้อง	0.1304	0.0574	In_Fault	ถูกต้อง	
	176-220		0.0317	0.0101	In_Fault	ถูกต้อง	0.1083	0.0581	In_Fault	ถูกต้อง	
	22-66		RL	0.0478	0.0134	In_Fault	ถูกต้อง	0.1151	0.0518	In_Fault	ถูกต้อง
	44-88			0.0331	0.0081	In_Fault	ถูกต้อง	0.1134	0.0532	In_Fault	ถูกต้อง
	66-110			0.0469	0.0139	In_Fault	ถูกต้อง	0.1151	0.0529	In_Fault	ถูกต้อง
	88-132			0.0611	0.0133	In_Fault	ถูกต้อง	0.1158	0.0524	In_Fault	ถูกต้อง
	110-154			0.0681	0.0157	In_Fault	ถูกต้อง	0.1148	0.0515	In_Fault	ถูกต้อง
	132-176			0.0224	0.0031	In_Fault	ถูกต้อง	0.1122	0.0500	In_Fault	ถูกต้อง
154-198	0.0328	0.0120		In_Fault	ถูกต้อง	0.1130	0.0500	In_Fault	ถูกต้อง		
176-220	0.0299	0.0062		In_Fault	ถูกต้อง	0.1130	0.0504	In_Fault	ถูกต้อง		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ของกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.3 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 10 เฟอร์เซ็นต์และ 20 เฟอร์เซ็นต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของเฟสที่เกิดความผิดปกติมีค่าสูงกว่าเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ เช่นเดียวกันและเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ ยังสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี

ตารางที่ 5.3 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 30 เฟอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ระหว่างแทบขดลวด	โหนด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{cht}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 30% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-176	R	0.0880	0.0177	In_Fault	ถูกต้อง	0.0925	0.0586	In_Fault	ถูกต้อง
	88-220		0.0899	0.0251	In_Fault	ถูกต้อง	0.1441	0.0639	In_Fault	ถูกต้อง
	132-264		0.0574	0.0147	In_Fault	ถูกต้อง	0.0893	0.0309	In_Fault	ถูกต้อง
	176-308		0.0508	0.0117	In_Fault	ถูกต้อง	0.1263	0.0542	In_Fault	ถูกต้อง
	220-352		0.0385	0.0132	In_Fault	ถูกต้อง	0.1285	0.0443	In_Fault	ถูกต้อง
	264-396		0.0455	0.0096	In_Fault	ถูกต้อง	0.0803	0.0577	In_Fault	ถูกต้อง
	308-440		0.0445	0.0148	In_Fault	ถูกต้อง	0.1461	0.0667	In_Fault	ถูกต้อง
	44-176	RL	0.0729	0.0198	In_Fault	ถูกต้อง	0.1249	0.0579	In_Fault	ถูกต้อง
	88-220		0.1426	0.0343	In_Fault	ถูกต้อง	0.1298	0.0601	In_Fault	ถูกต้อง
	132-264		0.1405	0.0430	In_Fault	ถูกต้อง	0.1277	0.0576	In_Fault	ถูกต้อง
	176-308		0.0739	0.0161	In_Fault	ถูกต้อง	0.1300	0.0619	In_Fault	ถูกต้อง
	220-352		0.0872	0.0260	In_Fault	ถูกต้อง	0.1315	0.0633	In_Fault	ถูกต้อง
	264-396		0.1269	0.0370	In_Fault	ถูกต้อง	0.1304	0.0602	In_Fault	ถูกต้อง
	308-440		0.0979	0.0230	In_Fault	ถูกต้อง	0.1236	0.0578	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 30% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-88	R	0.0505	0.0125	In_Fault	ถูกต้อง	0.1427	0.0623	In_Fault	ถูกต้อง
	44-110		0.0846	0.0261a	In_Fault	ถูกต้อง	0.1386	0.0627	In_Fault	ถูกต้อง
	66-132		0.0365	0.0108	In_Fault	ถูกต้อง	0.1408	0.0638	In_Fault	ถูกต้อง
	88-154		0.0349	0.0093	In_Fault	ถูกต้อง	0.1403	0.0630	In_Fault	ถูกต้อง
	110-176		0.0342	0.0101	In_Fault	ถูกต้อง	0.1372	0.0643	In_Fault	ถูกต้อง
	132-198		0.0466	0.0118	In_Fault	ถูกต้อง	0.1368	0.0650	In_Fault	ถูกต้อง
	154-220		0.0427	0.0143	In_Fault	ถูกต้อง	0.1360	0.0609	In_Fault	ถูกต้อง
	22-88	RL	0.0702	0.0196	In_Fault	ถูกต้อง	0.1265	0.0585	In_Fault	ถูกต้อง
	44-110		0.0585	0.0135	In_Fault	ถูกต้อง	0.1288	0.0586	In_Fault	ถูกต้อง
	66-132		0.0781	0.0249	In_Fault	ถูกต้อง	0.1237	0.0574	In_Fault	ถูกต้อง
	88-154		0.0855	0.0240	In_Fault	ถูกต้อง	0.1274	0.0590	In_Fault	ถูกต้อง
	110-176		0.0691	0.0159	In_Fault	ถูกต้อง	0.1243	0.0589	In_Fault	ถูกต้อง
	132-198		0.0518	0.0127	In_Fault	ถูกต้อง	0.1202	0.0562	In_Fault	ถูกต้อง
	154-220		0.0425	0.0086	In_Fault	ถูกต้อง	0.1224	0.0564	In_Fault	ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 กรณีเกิดความผิดพลาดระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ของกรณีเกิดความผิดพลาดระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.4 มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.1.1-5.1.3 และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี

ตารางที่ 5.4 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 40 เฟอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดพลาด	ระหว่างแทบขดลวด	โพล	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{chk}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 40% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-220	R	0.0921	0.0239	In_Fault	ถูกต้อง	0.0912	0.0556	In_Fault	ถูกต้อง
	88-264		0.0961	0.0276	In_Fault	ถูกต้อง	0.0954	0.0296	In_Fault	ถูกต้อง
	132-308		0.1844	0.1004	In_Fault	ถูกต้อง	0.0958	0.0296	In_Fault	ถูกต้อง
	176-352		0.0632	0.0152	In_Fault	ถูกต้อง	0.1275	0.0540	In_Fault	ถูกต้อง
	220-396		0.0454	0.0137	In_Fault	ถูกต้อง	0.1278	0.1526	In_Fault	ถูกต้อง
	264-440		0.0348	0.0088	In_Fault	ถูกต้อง	0.1252	0.0512	In_Fault	ถูกต้อง
	44-220	RL	0.0353	0.0132	In_Fault	ถูกต้อง	0.0877	0.0592	In_Fault	ถูกต้อง
	88-264		0.0519	0.0133	In_Fault	ถูกต้อง	0.1314	0.0612	In_Fault	ถูกต้อง
	132-308		0.0822	0.0221	In_Fault	ถูกต้อง	0.1203	0.0567	In_Fault	ถูกต้อง
	176-352		0.1880	0.0566	In_Fault	ถูกต้อง	0.1300	0.0614	In_Fault	ถูกต้อง
	220-396		0.0649	0.0182	In_Fault	ถูกต้อง	0.1323	0.0631	In_Fault	ถูกต้อง
	264-440		0.0395	0.0121	In_Fault	ถูกต้อง	0.0876	0.0565	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 40% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-110	R	0.0408	0.0103	In_Fault	ถูกต้อง	0.1436	0.0521	In_Fault	ถูกต้อง
	44-132		0.1128	0.0330	In_Fault	ถูกต้อง	0.1405	0.0623	In_Fault	ถูกต้อง
	66-154		0.0638	0.0195	In_Fault	ถูกต้อง	0.1421	0.0631	In_Fault	ถูกต้อง
	88-176		0.0915	0.0312	In_Fault	ถูกต้อง	0.1434	0.0627	In_Fault	ถูกต้อง
	110-198		0.0563	0.0136	In_Fault	ถูกต้อง	0.1441	0.0650	In_Fault	ถูกต้อง
	132-220		0.0392	0.0134	In_Fault	ถูกต้อง	0.1353	0.069	In_Fault	ถูกต้อง
	22-110	RL	0.0465	0.0132	In_Fault	ถูกต้อง	0.1300	0.0598	In_Fault	ถูกต้อง
	44-132		0.1137	0.0254	In_Fault	ถูกต้อง	0.1303	0.0618	In_Fault	ถูกต้อง
	66-154		0.0870	0.0310	In_Fault	ถูกต้อง	0.1303	0.0599	In_Fault	ถูกต้อง
	88-176		0.0698	0.0190	In_Fault	ถูกต้อง	0.1337	0.0616	In_Fault	ถูกต้อง
	110-198		0.0570	0.0167	In_Fault	ถูกต้อง	0.1261	0.0584	In_Fault	ถูกต้อง
	132-220		0.0726	0.0136	In_Fault	ถูกต้อง	0.1354	0.0609	In_Fault	ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 50 เปอร์เซ็นต์

นำค่าสัมประสิทธิ์ ของกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 50 เปอร์เซ็นต์ ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 50 เปอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ระหว่างแทบขดลวด	โหนด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{min}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 50% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-264	R	0.1077	0.0266	In_Fault	ถูกต้อง	0.0756	0.0293	In_Fault	ถูกต้อง
	88-308		0.2467	0.0657	In_Fault	ถูกต้อง	0.0930	0.0305	In_Fault	ถูกต้อง
	132-352		0.1019	0.0298	In_Fault	ถูกต้อง	0.1017	0.0526	In_Fault	ถูกต้อง
	176-396		0.1119	0.0583	In_Fault	ถูกต้อง	0.0923	0.0522	In_Fault	ถูกต้อง
	220-440		0.1434	0.0346	In_Fault	ถูกต้อง	0.0930	0.0510	In_Fault	ถูกต้อง
	44-264	RL	0.0623	0.0246	In_Fault	ถูกต้อง	0.1192	0.0553	In_Fault	ถูกต้อง
	88-308		0.1252	0.0317	In_Fault	ถูกต้อง	0.0951	0.0564	In_Fault	ถูกต้อง
	132-352		0.1795	0.0399	In_Fault	ถูกต้อง	0.1000	0.0531	In_Fault	ถูกต้อง
	176-396		0.2683	0.0205	In_Fault	ถูกต้อง	0.0988	0.0547	In_Fault	ถูกต้อง
	220-440		0.0767	0.0164	In_Fault	ถูกต้อง	0.0926	0.0572	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 50% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-132	R	0.0660	0.0172	In_Fault	ถูกต้อง	0.1560	0.0710	In_Fault	ถูกต้อง
	44-154		0.0480	0.0112	In_Fault	ถูกต้อง	0.1307	0.0542	In_Fault	ถูกต้อง
	66-176		0.1382	0.0388	In_Fault	ถูกต้อง	0.1578	0.0683	In_Fault	ถูกต้อง
	88-198		0.0507	0.0155	In_Fault	ถูกต้อง	0.1474	0.0643	In_Fault	ถูกต้อง
	110-220		0.0392	0.0125	In_Fault	ถูกต้อง	0.1496	0.0660	In_Fault	ถูกต้อง
	22-132	RL	0.0778	0.0169	In_Fault	ถูกต้อง	0.1380	0.0620	In_Fault	ถูกต้อง
	44-154		0.0890	0.0155	In_Fault	ถูกต้อง	0.1371	0.0615	In_Fault	ถูกต้อง
	66-176		0.1497	0.0355	In_Fault	ถูกต้อง	0.1362	0.0612	In_Fault	ถูกต้อง
	88-198		0.0822	0.0197	In_Fault	ถูกต้อง	0.1391	0.0623	In_Fault	ถูกต้อง
	110-220		0.0822	0.0202	In_Fault	ถูกต้อง	0.1367	0.0610	In_Fault	ถูกต้อง

5.1.6 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 60 เปอร์เซ็นต์

นำค่าสัมประสิทธิ์ของกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 60 เปอร์เซ็นต์ ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงผลลัพธ์การตรวจนับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 60 เอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดพลาด	ระหว่างแทบขดลวด	โหนด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{cht}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจนับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจนับ	ผลลัพธ์
Internal fault 60% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-308	R	0.2109	0.0500	In_Fault	ถูกต้อง	0.1002	0.0335	In_Fault	ถูกต้อง
	88-352		0.1093	0.0292	In_Fault	ถูกต้อง	0.1012	0.00346	In_Fault	ถูกต้อง
	132-396		0.2664	0.0613	In_Fault	ถูกต้อง	0.1033	0.0337	In_Fault	ถูกต้อง
	176-440		0.0778	0.0186	In_Fault	ถูกต้อง	0.1038	0.0360	In_Fault	ถูกต้อง
	44-308	RL	0.1693	0.0339	In_Fault	ถูกต้อง	0.1003	0.0596	In_Fault	ถูกต้อง
	88-352		0.9361	0.0493	In_Fault	ถูกต้อง	0.1067	0.0615	In_Fault	ถูกต้อง
	132-396		0.1198	0.0321	In_Fault	ถูกต้อง	0.1018	0.0702	In_Fault	ถูกต้อง
	176-440		0.0789	0.0187	In_Fault	ถูกต้อง	0.0993	0.0743	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 60% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-154	R	0.0776	0.0225	In_Fault	ถูกต้อง	0.1566	0.0691	In_Fault	ถูกต้อง
	44-176		0.0899	0.0232	In_Fault	ถูกต้อง	0.1567	0.0694	In_Fault	ถูกต้อง
	66-198		0.1058	0.0300	In_Fault	ถูกต้อง	0.1538	0.0672	In_Fault	ถูกต้อง
	88-220		0.0391	0.0078	In_Fault	ถูกต้อง	0.0881	0.0054	In_Fault	ถูกต้อง
	22-154	RL	0.1448	0.0347	In_Fault	ถูกต้อง	0.1362	0.0620	In_Fault	ถูกต้อง
	44-176		0.1619	0.0392	In_Fault	ถูกต้อง	0.1393	0.0621	In_Fault	ถูกต้อง
	66-198		0.0813	0.0236	In_Fault	ถูกต้อง	0.1352	0.0611	In_Fault	ถูกต้อง
	88-220		0.0756	0.0289	In_Fault	ถูกต้อง	0.1294	0.0618	In_Fault	ถูกต้อง

5.1.7 กรณีเกิดความผิดพลาดระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 70 เอร์เซ็นต์

นำค่าสัมประสิทธิ์ของกรณีเกิดความผิดพลาดระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 70 เอร์เซ็นต์ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงผลลัพธ์การตรวจนับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 70 เอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดพลาด	ระหว่างแทบขดลวด	โหนด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{cht}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจนับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจนับ	ผลลัพธ์
Internal fault 70% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-352	R	0.1648	0.0491	In_Fault	ถูกต้อง	0.0977	0.0321	In_Fault	ถูกต้อง
	88-396		0.1314	0.0405	In_Fault	ถูกต้อง	0.1241	0.1523	In_Fault	ถูกต้อง
	132-440		0.2003	0.0492	In_Fault	ถูกต้อง	0.0879	0.0583	In_Fault	ถูกต้อง
	44-352	RL	0.1673	0.0452	In_Fault	ถูกต้อง	0.1126	0.0492	In_Fault	ถูกต้อง
	88-396		0.1723	0.0424	In_Fault	ถูกต้อง	0.0869	0.0566	In_Fault	ถูกต้อง
	132-440		0.1721	0.0479	In_Fault	ถูกต้อง	0.0969	0.0580	In_Fault	ถูกต้อง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 (ต่อ) แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ กรณีเกิดความผิดปกติ
ภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 70 เอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ระหว่างแทบขดลวด	โหลด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{cst}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 70%	22-176	R	0.0990	0.0254	In_Fault	ถูกต้อง	0.1560	0.0696	In_Fault	ถูกต้อง
	44-198		0.0695	0.0178	In_Fault	ถูกต้อง	0.1553	0.0695	In_Fault	ถูกต้อง
	66-220		0.0650	0.0137	In_Fault	ถูกต้อง	0.1573	0.0678	In_Fault	ถูกต้อง
ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-176	RL	0.0576	0.0177	In_Fault	ถูกต้อง	0.1315	0.0606	In_Fault	ถูกต้อง
	44-198		0.1597	0.0414	In_Fault	ถูกต้อง	0.1331	0.0628	In_Fault	ถูกต้อง
	66-220		0.0976	0.0243	In_Fault	ถูกต้อง	0.1402	0.0636	In_Fault	ถูกต้อง

5.1.8 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 80 เอร์เซ็นต์

นำค่าสัมประสิทธิ์ของกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 80 เอร์เซ็นต์ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 80 เอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ระหว่างแทบขดลวด	โหลด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{cst}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 80%	44-396	R	0.5139	0.1309	In_Fault	ถูกต้อง	0.0986	0.0572	In_Fault	ถูกต้อง
	88-440		0.3132	0.0752	In_Fault	ถูกต้อง	0.0962	0.0574	In_Fault	ถูกต้อง
ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-396	RL	0.2526	0.0543	In_Fault	ถูกต้อง	0.0936	0.0604	In_Fault	ถูกต้อง
	88-440		0.2167	0.0580	In_Fault	ถูกต้อง	0.0933	0.0564	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 80%	22-198	R	0.1677	0.0375	In_Fault	ถูกต้อง	0.1540	0.0675	In_Fault	ถูกต้อง
	44-220		0.0713	0.0184	In_Fault	ถูกต้อง	0.0859	0.550	In_Fault	ถูกต้อง
ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-198	RL	0.1431	0.0337	In_Fault	ถูกต้อง	0.1305	0.062	In_Fault	ถูกต้อง
	44-220		0.0776	0.0999	In_Fault	ถูกต้อง	0.1328	0.0625	In_Fault	ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.9 กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 90 เอร์เซ็นต์

นำค่าสัมประสิทธิ์ของกรณีเกิดความผิดปกติระหว่างรอบของขดลวดที่ห่างกัน 90 เอร์เซ็นต์ไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลง ระหว่างแทบขดลวดที่ต่างกัน 90 เอร์เซ็นต์

ประเภทความผิดปกติ	ระหว่างแทบขดลวด	โหนด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{ch}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
Internal fault 90% ที่ขดลวดด้านปฐมภูมิ	44-440	R	0.1675	0.0476	In_Fault	ถูกต้อง	0.1173	0.0461	In_Fault	ถูกต้อง
	44-440	RL	0.2183	0.0544	In_Fault	ถูกต้อง	0.0981	0.0575	In_Fault	ถูกต้อง
Internal fault 90% ที่ขดลวดด้านทุติยภูมิ	22-220	R	0.1369	0.0313	In_Fault	ถูกต้อง	0.1564	0.0691	In_Fault	ถูกต้อง
	22-220	RL	0.1245	0.0297	In_Fault	ถูกต้อง	0.1387	0.0654	In_Fault	ถูกต้อง

5.1.10 กรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

นำค่าสัมประสิทธิ์ของกรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าหรือที่สายส่งระยะต่างๆไปเข้าเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติ ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดปกติจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง หรือที่สายส่งระยะต่าง ๆ

ประเภทความผิดปกติ	ที่ระยะสายส่ง	โหนด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{ch}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดปกติ	เฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติ	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
External fault	30%	R	0.00100	0.00127	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00723	0.01099	Ex_Fault	ถูกต้อง
	40%		0.00136	0.00151	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00408	0.00861	Ex_Fault	ถูกต้อง
	50%		0.00097	0.00127	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00572	0.01169	Ex_Fault	ถูกต้อง
	60%		0.00124	0.00118	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00570	0.01116	Ex_Fault	ถูกต้อง
	70%		0.00101	0.00144	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00512	0.01460	Ex_Fault	ถูกต้อง

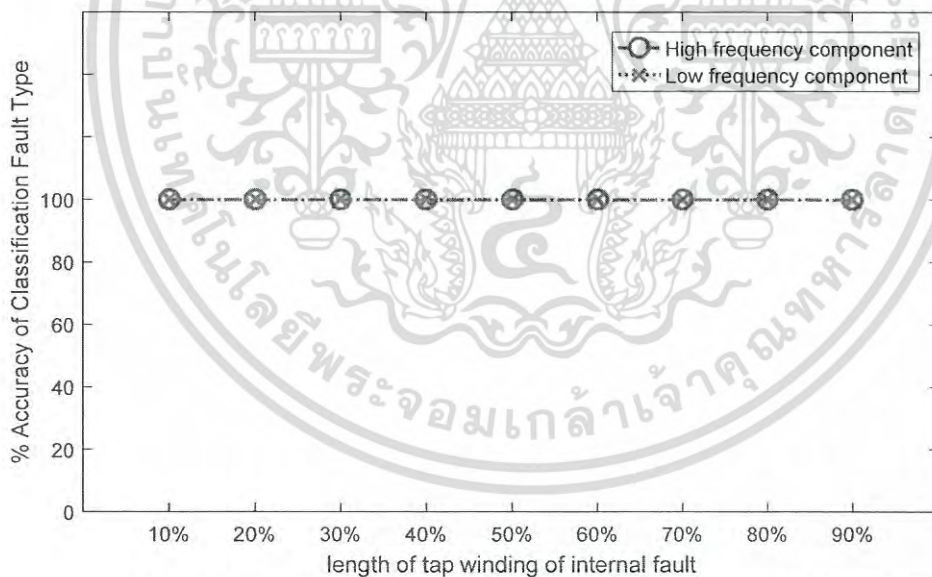
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 (ต่อ) แสดงผลลัพธ์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต กรณีเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง หรือที่สายส่งระยะต่าง ๆ

ประเภทความผิดพลาด	ที่ระยะสายส่ง	โหลด	สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง				สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ			
			CO_{max}^{diff}				RA_{ch}^{diff}			
			เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์	เฟสที่เกิดความผิดพลาด	เฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด	ผลการตรวจจับ	ผลลัพธ์
External fault	30%	RL	0.00129	0.00107	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00745	0.00893	Ex_Fault	ถูกต้อง
	40%		0.00126	0.00129	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00717	0.00962	Ex_Fault	ถูกต้อง
	50%		0.00119	0.00144	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00686	0.00753	Ex_Fault	ถูกต้อง
	60%		0.00126	0.00121	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00697	0.00787	Ex_Fault	ถูกต้อง
	70%		0.00133	0.00115	Ex_Fault	ถูกต้อง	0.00740	0.00790	Ex_Fault	ถูกต้อง

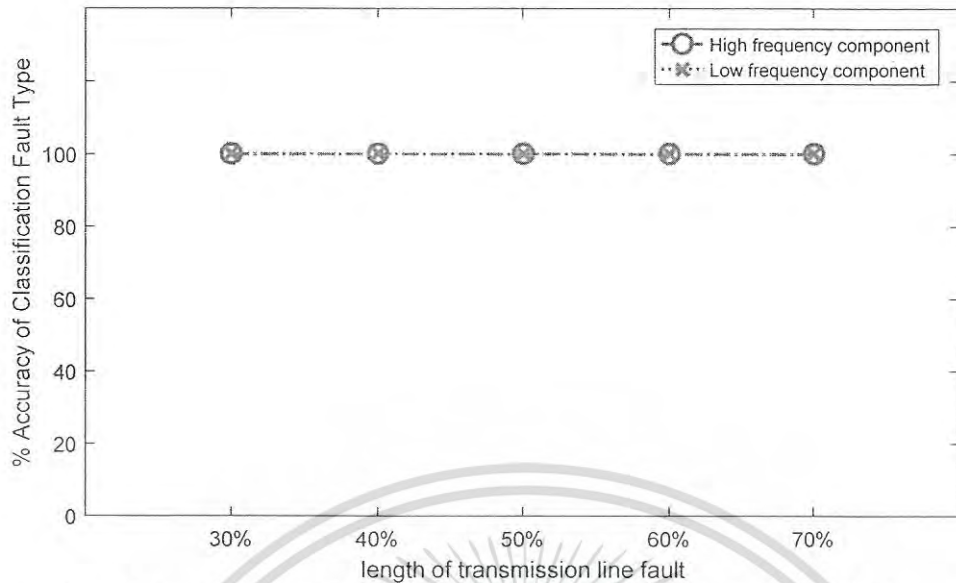
5.2 ความถูกต้องในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด

จากผลลัพธ์ในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่ต่างกันที่หม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดด้วยวิธีแยกองค์ประกอบความถี่สูง และวิธีแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งทั้ง 2 วิธี สามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าได้ทุกกรณีศึกษา ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.1



(ก) กรณีตรวจจับจากสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (ข) กรณีตรวจจับจากสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า หรือที่สายส่ง
รูปที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลง โดยศึกษาจากพฤติกรรมของกระแสผลต่างของหม้อแปลง จากสมมุติฐานว่าเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่หม้อแปลง จะส่งผลทำให้สัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นที่ตรวจจับได้ที่หม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างทันทีทันใด ณ ตำแหน่งเวลาที่เกิดความผิดพลาด และความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีความแตกต่างกัน เมื่อเกิดความผิดพลาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงอาศัยพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณความผิดพลาดของกระแสผลต่างที่หม้อแปลงและประยุกต์ใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบของความถี่ของสัญญาณออกมาได้ งานวิจัยนี้อาศัยหลักการทำงานของรีเลย์ผลต่าง (Differential relay) เพื่อนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลง จากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย

ทำการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณผลต่างกระแส (Differential current) จากการทดลองการเกิดความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นนำสัญญาณผลต่างกระแสดังกล่าวมาแยกองค์ประกอบของความถี่ของสัญญาณจากการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตซึ่งสามารถวิเคราะห์สัญญาณได้รวดเร็วขึ้นจากการสเกลของเวฟเล็ต นำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการตรวจจับการเกิดความผิดพลาดทุกๆ 5 มิลลิวินาที และบันทึกสัญญาณกระแสผลต่างของเฟสที่เกิดความผิดพลาดและเฟสที่ไม่เกิดความผิดพลาด นำสัญญาณที่บันทึกได้มาผ่านการกรองความถี่ของสัญญาณโดยผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยแยกเป็นสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงและ องค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้วิเคราะห์เพื่อตรวจจับความผิดพลาด ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 2 ถ้าค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพลาดมีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนเกิดความผิดพลาด หรือค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดความผิดพลาดสูงสุดมีค่ามากกว่า 0.0009 ให้แสดงผลพัลส์ว่าเกิดความผิดพลาด แต่ถ้าไม่ใช่ ให้แสดงผลพัลส์ว่าไม่เกิดความผิดพลาด จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถตรวจจับการเกิดความผิดพลาดได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งกรณีเกิดความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นเมื่อตรวจจับพบว่าเป็นเกิดความผิดพลาดให้วิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูงและความถี่ต่ำ เพื่อสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลง ซึ่งการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดสามารถทำได้ 2 วิธีดังนี้

- 1.) วิเคราะห์การแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดด้วยสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง นำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดในสเกลที่ 2 ที่ตรวจจับได้ ณ เวลาที่เกิดความผิดพลาดทุกข้อมูล มาสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงและภายนอกหม้อแปลง ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ตามตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) วิเคราะห์การแบ่งแยกความผิดพลาดด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ โดยตรวจจับสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำตั้งแต่ ณ เวลาที่เกิดความผิดพลาดเป็นเวลา 5 มิลลิวินาที หรือ $\frac{1}{4}$ ไซเคิล นำมาตรวจจับค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณช่วงนั้นๆ นำมาหาค่าเพื่อใช้ในการสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลง โดยสามารถแยกประเภทความผิดพลาดได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ตามตารางที่ 6.1

ความถูกต้องในการตรวจจับการเกิดความผิดพลาด

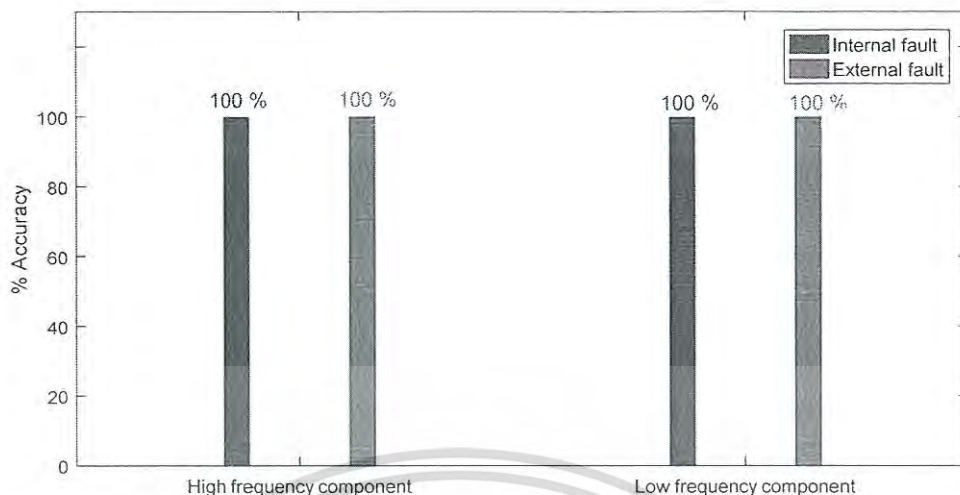
การตรวจจับการเกิดความผิดพลาด ใช้การสร้างเงื่อนไขจากค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่ได้จากการกรองสัญญาณของผลต่างกระแสของหม้อแปลง ซึ่งสามารถตรวจจับการเกิดความผิดพลาดได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งในกรณีเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง และกรณีเกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการตรวจจับการเกิดความผิดพลาด

ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด ระหว่างความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลง

การแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างความผิดพลาดภายในและภายนอกหม้อแปลง วิเคราะห์ได้ 2 วิธี คือ วิธีวิเคราะห์จากองค์ประกอบความถี่สูง และวิธีวิเคราะห์จากองค์ประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณกระแสผลต่าง ซึ่งสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 2 วิธี



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด

ตารางที่ 6.1 สรุปความถูกต้องจากการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาด

การตรวจจับความผิดพลาด	ประเภทการเกิดความผิดพลาด		สถานะปกติ	รวม
	เกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลง	เกิดความผิดพลาดภายนอกหม้อแปลง		
ข้อมูลทดลอง	180	10	2	192
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากวิธีวิเคราะห์สัญญาณความถี่สูง	100%	100%	100%	100%
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากวิธีวิเคราะห์สัญญาณความถี่ต่ำ	100%	100%	100%	100%

จากผลการวิจัยการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเติมหน่วยมาช่วยในการแยกองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงขณะเกิดความผิดพลาด พบว่าสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 2 มาใช้ในการสร้างเงื่อนไขการตรวจจับการเกิดความผิดพลาดได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ และนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงที่บันทึกได้ สามารถนำมาสร้างเงื่อนไขในแบ่งแยกประเภทการเกิดความผิดพลาดระหว่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลงได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ ในสเกลที่ 5 สามารถนำมาสร้างเงื่อนไขในแบ่งแยกประเภทการเกิดความผิดพลาดระหว่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกหม้อแปลงได้อย่างถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน เปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงและความถี่ต่ำพบว่า สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงสามารถตรวจจับความผิดพลาดและสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทความผิดพลาดที่หม้อแปลงได้ เนื่องจากสัญญาณความผิดพลาดที่หม้อแปลง ณ เวลาที่เกิดความผิดพลาด ประกอบด้วยส่วนขององค์ประกอบความถี่สูง ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ต่ำ สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่ต้องอาศัยการตรวจจับการเกิดความผิดปกติจากส่วนขององค์ประกอบสัญญาณความถี่สูงก่อน

จากการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตเป็นวิธีที่สามารถในการตรวจจับสัญญาณความผิดปกติซึ่งมีความแตกต่างของความถี่ของสัญญาณ ณ เวลาเกิดความผิดปกติได้ และยังสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว ขึ้น เนื่องจากสามารถเลือกตรวจจับสัญญาณความผิดปกติในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้ โดยไม่ต้องเปลืองจำนวนข้อมูล และอาศัยการแบ่งช่วงสัญญาณในการตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถแบ่งแยกประเภทความผิดปกติได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบระบบป้องกันของหม้อแปลง เช่น รีเลย์ป้องกัน เป็นต้น จากผลการวิจัยโดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ต่อยอดในการออกแบบรีเลย์ป้องกันหม้อแปลง หรือใช้เป็นวิธีในการแบ่งแยกประเภทความผิดปกติที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนบำรุงรักษาหม้อแปลงได้อีกด้วย ทั้งนี้นอกจากการวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติจากหม้อแปลงแล้ว ผู้วิจัยเห็นว่าการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตยังสามารถวิเคราะห์สัญญาณอื่น ๆ ได้ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในเชิงความถี่ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจจับความผิดปกติในลักษณะอื่นได้อีกด้วย ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนารีเลย์ป้องกันในระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jawad Faiz and Milad Soleimani. "Dissolved Gas Analysis Evaluation in Electric Power Transformers Using Conventional Methods a Review". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24, Issue. 2, 2017, pp. 1239-1248.
- [2] Seifeddine Souahlia, Khmais Bacha, Abdelkader Chaari. "SVM-Based Decision for Power Transformers Fault Diagnosis Using Rogers and Doernenburg Ratios DGA". *10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13)*, 2013, pp. 1-6
- [3] Shuaibing Li, Guangning Wu, Bo Gao, Changjin Hao, Dongli Xin, Xiaobing Yin. "Interpretation of DGA for Transformer Fault Diagnosis with Complementary SaE-ELM and Arctangent Transform". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, Issue 1, 2016, pp. 586-595
- [4] Shakeb A. Khan, Md. Danish Equbal, Tarikul Islam. "A Comprehensive Comparative Study of DGA Based Transformer Fault Diagnosis Using Fuzzy Logic and ANFIS Models". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, Issue 1, 2015, pp. 590-596
- [5] Hasmat Malik and Sukumar Mishra. "Application of Gene Expression Programming (GEP) in Power Transformers Fault Diagnosis Using DGA". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, Issue 6, 2016, pp. 4556-4565
- [6] N. A. Muhamad, B. T. Phung, T. R. Blackburn. "Dissolved Gas Analysis (DGA) of Partial Discharge Fault in Bio-Degradable Transformer Insulation Oil". *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 1-6
- [7] Sukhbir Singh and M. N. Bandyopadhyay. "Dissolved Gas Analysis Technique for Incipient Fault Diagnosis in Power Transformers : A Bibliographic Survey". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 26, Issue 6, 2010, pp. 41-46
- [8] Zahriah Sahri and Rubiyah Yusof. "Fault Diagnosis of Power Transformer Using Optimally Selected DGA Features and SVM". *10th Asian Control Conference (ASCC)*, 2015, pp. 1-5
- [9] Imadullah Khan, Zhongdong Wang, Jie Dai, Ian Cotton, Susan Northcote. "Fault Gas Generation in Ester Based Transformer Fluids and Dissolved Gasanalysis (DGA)" *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, pp. 909-913
- [10] Shufali A Wani, Md. Umer Farooque, Shakeb A. Khan, Dhawal Gupta, Md. Ajmal Khan. "Fault Severity Determination in Transformers Using Dissolved Gasanalysis (DGA)". *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2015, pp. 1-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Quan Zhou, Shizheng Wang, Wendou An, Chao Sun, Huili Xie, Junxing Rao. "Power Transformer Fault Diagnosis Based on DGA Combined with Cloud model". *ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2014, pp. 1-4
- [12] C. H. R. Martins, M. A. Araujo Araujo, R. A. Flauzino. "Power Transformer Fault Diagnosis Using DGA and Group Decision Making with Intuitionistic fuzzy Preference Relations". *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 2015, pp. 344-348
- [13] Ibrahim B. M. Taha, Sherif S. M. Ghoneim, Abdulaziz. S. A. Duaywah. "Refining DGA Methods of IEC Code and Rogers Four Ratios for Transformer Fault Diagnosis". *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, pp. 1-5
- [14] Li Peng, Fang-cheng Lu, Ning-yuan Li, Hua-ping Huang, Qing Xie. "Study on Fault Diagnosis for Power Transformer Based on Cloud Matterelement Analysis principle and DGA". *IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009, pp. 244-248
- [15] An-xin Zhao, Xiao-jun Tang, Zhong-hua Zhang, Jun-hua Liu, "The DGA Interpretation Method Using Relative Content of Characteristicgases and Gas-Ratio Combinations for Fault Diagnosis of Oil-Immersed Power Transformers". *Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 2014, pp. 124-127
- [16] Dong-Hui Liu, Jian-Peng Bian, Xiao-Yun Sun. "The DGA Interpretation Method Using Relative Content of Characteristicgases and Gas-Ratio Combinations for Fault Diagnosis of Oil-Immersed Power Transformers". *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2008, pp. 1505-1509
- [16] Dong-Hui Liu, Jian-Peng Bian, Xiao-Yun Sun. "The Study of Fault Diagnosis Model of DGA for Oil-Immersed Transformer Based on Fuzzy means Kernel Clustering and SVM Multi-Class Object Simplified Structure". *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2008, pp. 1505-1509
- [17] Yi Zhu, Qingping Wang, Zhiqian Bo, Xiaowei Ma, Yingke Zhao, Ming Zhang. "Simulation Study of Power Transformer Inrush Current and Internal Fault". *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2016, pp. 1-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] Razvan-Andrei Radu, Dan Ovidiu Micu, Dan Doru Micu, Andrei Ceclan. "Analysis of Inrush and Fault Currents Measurement Errors Generated by The Current Transformer Saturation". 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2014, pp. 1-5
- [19] M. Jamali, M. Mirzaie, S. Asghar Gholamian, S. Mahmodi Cherati. "A Wavelet-Based Technique for Discrimination of Inrush Currents From Faults in Transformers Coupled with Finite Element Method". IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), 2011, pp. 138-142
- [20] X. L. Feng, J. C. Tan, Z. Q. Bo. "A New Wavelet Transform Approach to Discriminate Magnetizing Inrush Current and Fault Current". Proceedings of The 41st International Universities Power Engineering Conference, 2006, pp. 876-880
- [21] H. Abniki, H. Monsef, P. Khajavi, H. Dashti. "A Novel Inductance-Based Technique for Discrimination of Internal Faults From Magnetizing Inrush Currents in Power Transformers". Modern Electric Power Systems, 2010, pp. 1-6
- [22] Yang Long and Ning Jingdong. "A Wavelet Transform Based Discrimination Between Internal Faults and Inrush Currents in Power Transformers". International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2011, pp. 1127-1129
- [23] Chaiyan Jettanasen, Chaichan Pothisarn, Jittiphong Klomjit, Atthapol Ngaopitakkul. "Discriminating Among Inrush Current External Fault and Internal Fault in Power Transformer Using Low Frequency Components Comparison of DWT". 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012, pp. 1-6
- [24] A. M. Gaouda and M. M. A. Salama. "DSP Wavelet-Based Tool for Monitoring Transformer Inrush Currents and Internal Faults". IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, pp. 1258-1267
- [25] A. Ashrafian, M. Rostami, G. B. Gharehpetian. "Hyperbolic S-transform-Based Method for Classification of External Faults, Incipient Faults, Inrush Currents and Internal Faults in Power Transformers". IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, pp. 940-950
- [26] Qing Zhang, Shangbin Jiao, Sha Wang. "Identification Inrush Current and Internal Faults of Transformer Based on hyperbolic S-transform". 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009, pp. 258-263

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [27] H. Abniki, A. Majzoubi, H. Monsef, H. Dashti, H. Ahmadi, P. Khajavi. "Identifying Inrush Currents From Internal Faults Using Symmetrical Components In Power Transformers". *Modern Electric Power Systems*, 2010, pp. 1-6
- [28] Shangbin Jiao, Huang Huang. "Research on Identification Between Inrush Current and Internal Faults of Power Transformer Based on H-S transform". *3rd International Congress on Image and Signal Processing*, 2010, pp. 3619-3624
- [29] Aleksandrs Dolgicers, Jevgenijs Kozadajevs. "Signal Extraction from Inrush Current for Inter-winding Fault Protection of Power Transformers". *IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1-6
- [30] Wencong Wu, Tianyao Ji, Mengshi Li, Qinghua Wu. "Using Mathematical Morphology to Discriminate Between Internal Fault and Inrush Current of Transformers". *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, pp. 73-80
- [31] Liman Zhuang, Brian K. Johnson, Xusheng Chen, Edward William. "A Topology-Based Model for Two-Winding, Shell-Type, Single-Phase Transformer Inter-turn Faults". *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2016, pp. 1-5
- [32] M. Kezunovic, Yong Guo. "Modeling and Simulation of The Power Transformer Faults and Related Protective Relay Behavior". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, pp. 44-50
- [33] B S Shruthi, K Panduranga Vittal. "Modelling and Simulation Studies of Inter-Winding Faults in a Three Phase Distribution Transformer Using EMTDC/PSCAD". *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 2013, pp. 1-6
- [34] Tu Yong, Su Shenghao, Chen Qingfang, Tang Luqing, Yang Shuang, Chen Dinghui, Xiangli Deng, Li Qingbo, Nan Meng. "Establishment of Transformer Turn-to-Turn Fault Model Based on Relay Protection Management System". *IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2015, pp. 763-767
- [35] Mohammad Gholami, Ehsan Hajipour, Mehdi Vakilian. "A Single Phase Transformer Equivalent Circuit for Accurate Turn to Turn Fault Modeling". *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2016, pp. 592-597
- [36] Daniel Barbosa, Ulisses Chemin Netto, Denis V. Coury, Mário Oleskovicz. "Power Transformer Differential Protection Based on Clarke's Transform and Fuzzy Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, pp. 1212-1220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [37] Yi Zhu, Qingping Wang, Zhiqian Bo, Xiaowei Ma, Yingke Zhao, Ming Zhang, "Simulation Study of Power Transformer Inrush Current and Internal Fault". China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2016, pp. 1-6
- [38] สุชาติ ปรีชาธร. 2556. วิศวกรรมการป้องกันระบบไฟฟ้าแรงสูง (เล่ม 2). กรุงเทพฯ : วี.พริ้นท์ (1991) จำกัด.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



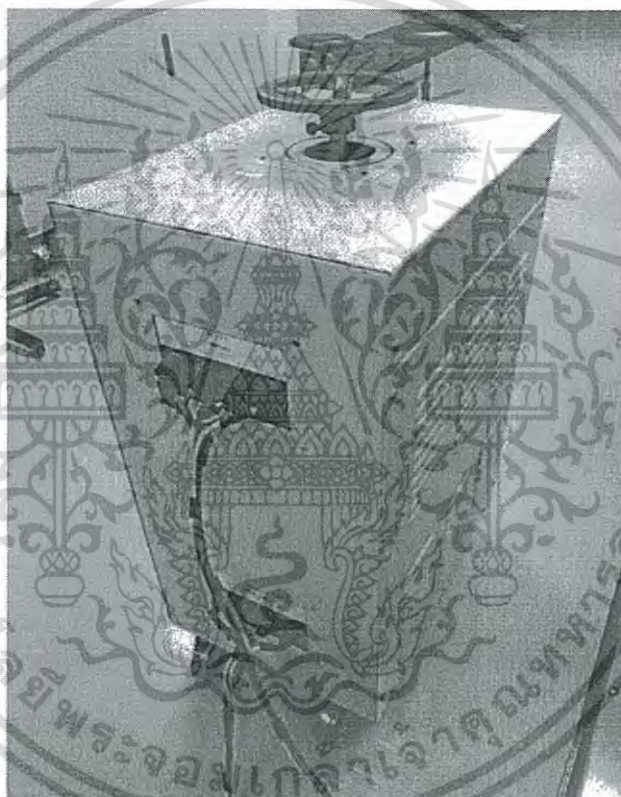
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการเกิดความผิดพลาด

แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับชุดทดลอง

ในการทดลองใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากห้องปฏิบัติการ จ่ายให้กับหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า(Variable Voltage Transformer) เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดทดลอง ซึ่งเป็นระบบ 3 เฟสและหม้อแปลงที่ใช้ในชุดทดลองเป็นหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดแห้ง (Dry type) พิกัด 15 kVA จึงใช้หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variable Voltage Transformer)เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดทดลอง ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้คือหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส พิกัด 30 แอมแปร์ สามารถปรับแรงดันได้สูงสุด 420 โวลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า

ชุดจำลองสายส่งไฟฟ้า

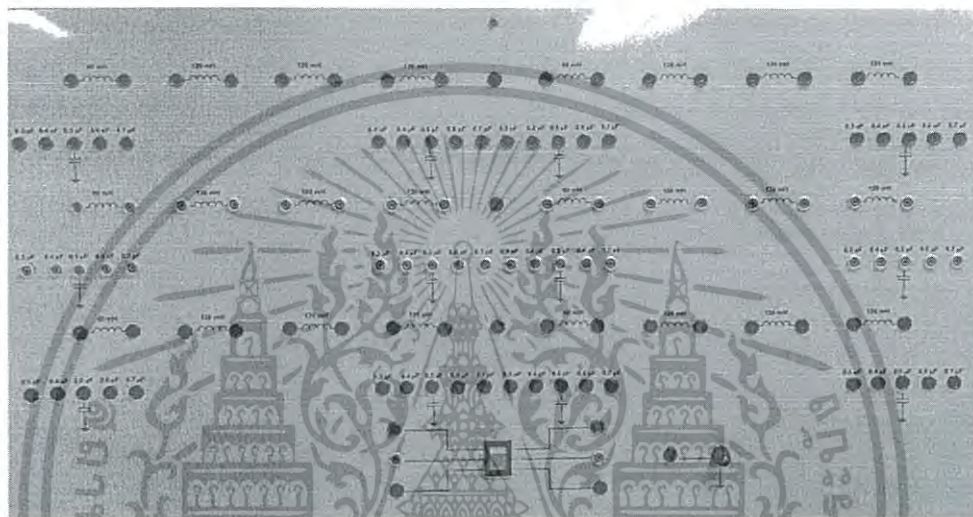
ชุดจำลองระบบสายส่งไฟฟ้า เป็นการจำลองระบบสายส่ง 500 kV ระยะความยาว 325.6 กิโลเมตร จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มายังสถานีไฟฟ้าท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์ ทำการจำลองโดยใช้ข้อมูลอิมพีแดนซ์(Impedance) ของสายส่งจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มาคำนวณให้อยู่ในระบบเพอร์ยูนิต (Per Unit) โดยใช้ค่าฐาน (Base value) จากนั้นนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ในระบบจำลอง โดยใช้วงจรสมมูลของสายส่งระยะไกลแบบไพ (Pi) ในการออกแบบจำลองระบบสายส่งดังกล่าว ซึ่งชุดจำลองสายส่งสามารถปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Impedance) ได้ เพื่อใช้ในการทดลองการเกิดความผิดพลาดที่ระยะต่าง ๆ ของสายส่งได้ ซึ่งแบ่งได้เป็น 5 ระยะของสายส่งดังนี้

1. ที่ระยะสายส่ง 30 เปอร์เซ็นต์
2. ที่ระยะสายส่ง 40 เปอร์เซ็นต์
3. ที่ระยะสายส่ง 50 เปอร์เซ็นต์
4. ที่ระยะสายส่ง 60 เปอร์เซ็นต์
5. ที่ระยะสายส่ง 70 เปอร์เซ็นต์

ซึ่งรูปชุดจำลองระบบสายส่งแสดงได้ดังรูปที่ 2

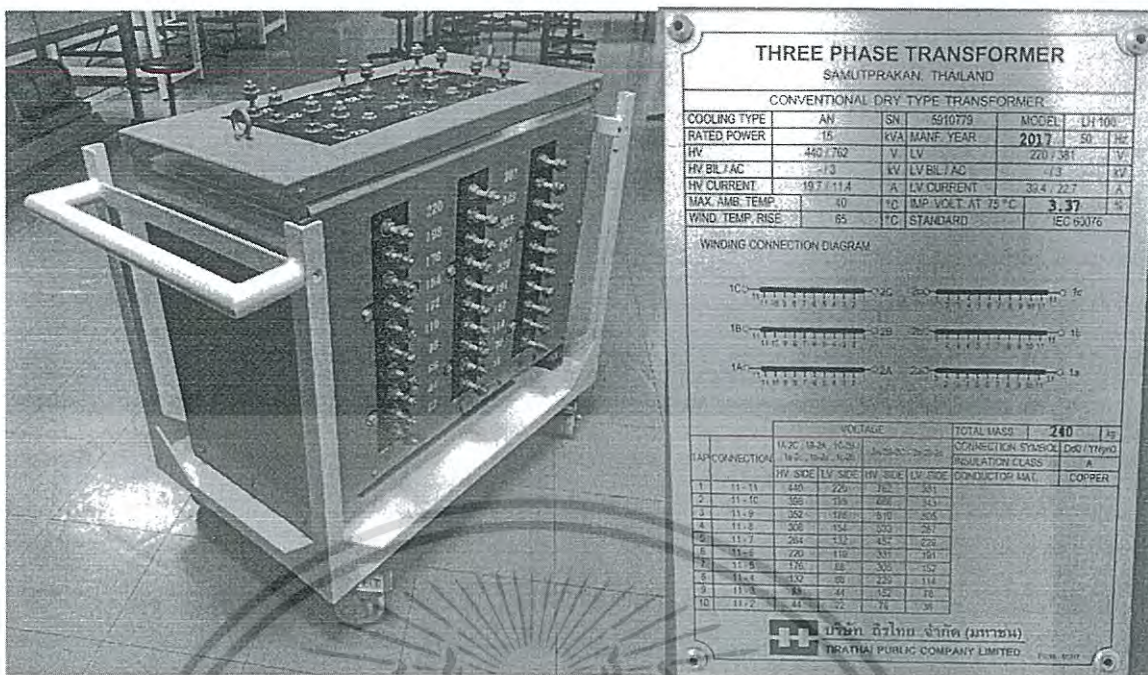


รูปที่ 2 ชุดจำลองสายส่งไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เป็นชนิดแห้ง (Dry type) เนื่องจากเราใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ เป็นการใช้งานภายในอาคารกรณีเกิดความเสียหายจากความผิดพลาดต่าง ๆ กับหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงชนิดแห้งจะเสียหายที่ตัวอุปกรณ์ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งรอบข้างเหมือนหม้อแปลงชนิดน้ำมัน จึงเหมาะสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ หม้อแปลงที่ใช้ทดลองมีพิกัด 15 kVA พิกัดแรงดัน 220/440 โวลต์ และออกแบบให้มีแทบขดลวดด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำออกมาทุก ๆ 10 เปอร์เซ็นต์ คือแทบขดลวด 44, 88, 132, 176, 220, 264, 308, 352, 396 และ 440 โวลต์ ด้านแรงสูง และแทบขดลวด 22, 44, 66, 88, 110, 132, 154, 176, 198 และ 220 โวลต์ การออกแบบแทบขดลวดภายในหม้อแปลงออกมา เพื่อใช้สำหรับทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลงถูกออกแบบมาให้รองรับแรงทางกล และทางไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดพลาดได้ โดยไม่เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงเมื่อเกิดความผิดพลาดดังกล่าว จึงมีความปลอดภัยต่อการนำมาทดลองในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

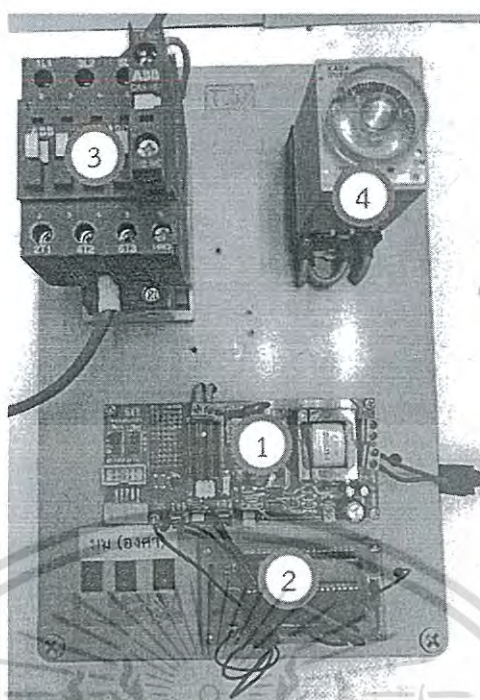


รูปที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้า

ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุมเริ่มต้นลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลง เพื่อควบคุมให้เกิดความผิดพลาดที่มุมเริ่มต้นเดียวกันในการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาด หลักการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมมุมเริ่มต้นลัดวงจร คือใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) รุ่น dspic30f4011 เขียนคำสั่งให้ไตรแอก (Triac) ทำงานสั่งแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) ต่อดวงจรระหว่างขดลวดที่ทำการลัดวงจร โดยจ่ายไฟ 220 โวลต์ให้กับวงจร ซีโรครอสซิง (Zero-crossing Circuit) เพื่อควบคุมมุมเริ่มต้นลัดวงจร หลังการเกิดลัดวงจรแล้ว ใช้ตัวตั้งเวลา (Timer) ในการสั่งให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) ปลดวงจรออกภายในเวลา 2 วินาที เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

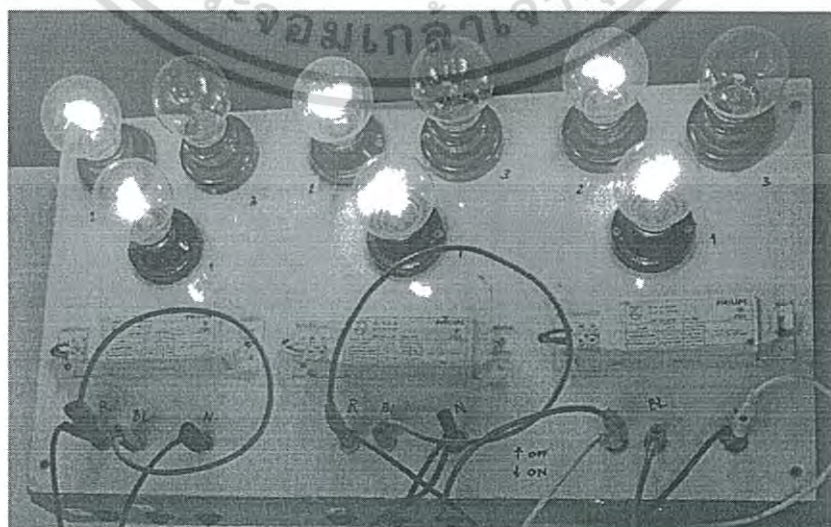


1. วงจร ซีโรครอสซิง (Zero-crossing Circuit)
2. ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor)
3. แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)
4. ตัวตั้งเวลา (Timer)

รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมมุ่มเริ่มต้นลัดวงจรภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

ชุดโหลดสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

ชุดโหลดที่ใช้สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าในชุดทดลอง ใช้โหลดความต้านทาน 600 วัตต์ และโหลดความต้านทาน 300 วัตต์กับความเหนี่ยวนำ 120 วัตต์ โดยปรับเปลี่ยนชนิดโหนดเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเกิดความผิดพลาดที่หม้อแปลงไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5 โหลดความต้านทานความเหนี่ยวนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
บทความทางวิชาการระดับนานาชาติ

JintasitRumkidkarn,AtthapolNgaopitakkul “Behavior Analysis of Winding to Ground Fault in Transformer Using High and Low Frequency Component From Discrete Wavelet Transform”. ICASI 2017 IEEE International Conference On Applied System Innovation, Sapporo, Japan, May 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation (IEEE ICASI 2017)

**May 13 - 17, 2017
Sapporo, Japan**

Organized by

National Sun Yat-Sen University, Taiwan
Fujian University of Technology, P.R. China
National Formosa University, Taiwan
Xi'An Technological University, P.R. China
Chia Nan University of Pharmacy & Science, Taiwan
Kun Shan University, Taiwan
Southern Taiwan University of Science and Technology, Taiwan
St. John's University, Taiwan
National United University, Taiwan
University of the Ryukyus, Japan
Kongju National University, Korea
Hannam University, Korea
Jimei University Fujian, China
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
IEEE Sapporo Section
IEEE Tainan Section
IEEE Tainan Section Sensors Council (IEEE TSSC)
Taiwanese Institute of Knowledge Innovation (TIKI)
iVAN Technology Enterprise Group. (Singapore)
Minhe Education Consultion Co. LTD
Science Education Center (NTNU)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0184

Behavior Analysis of Winding to Ground Fault in Transformer using High and Low Frequency Component from Discrete Wavelet Transform

Jintasit Rumkidkarn^{1,a} and Atthapol Ngaopitakkul^{1,b}

¹Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

^achamp_kung6@hotmail.com, ^bAtthapol.ng@kmitl.ac.th

Corresponding author: Atthapol Ngaopitakkul, Atthapol.ng@kmitl.ac.th

Keywords: Discrete Wavelet Transform, Winding-to-Ground Fault, Transformer

Abstract:

This research aim to presented analysis on behavior and characteristic of single-phase transformer when winding to ground fault occur in the system. The experimental setup consists of single-phase transformer with rated 15 kVA, 220/440V and fault generating unit has been built on laboratory level. The winding to ground fault is varied in term of voltage tap from 44-440V every with 10% of rated voltage interval. The obtain data from both primary and secondary winding of single-phase transformer are record and differential current of the transformer while fault occurring has been calculated. Winding fault to ground in the single-phase transformer is analyzed by using discrete wavelet transform (DWT) method. Comparison of DWT coefficient between high frequency component and low frequency component has been done for further study the behavior of winding to ground fault in the single-phase transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Behavior Analysis of Winding to Ground Fault in Transformer using High and Low Frequency Components from Discrete Wavelet Transform

Jintasit Rumkidkarn, and Atthapol Ngaopitakkul

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Champ_kung6@hotmail.com, knatthap@kmitl.ac.th

Abstract

This paper analyzes the behavior of winding to ground fault in the single-phase transformer using experimental setup in laboratory level. The winding to ground fault in each voltage winding of the single-phase transformer is first obtained in order to analyze the behavior of the differential current of the transformer. For different winding voltages of the transformer, the calculated differential current of the transformer will be employed to analyze the behavior of winding fault to ground in the single-phase transformer using discrete wavelet transform (DWT) method. The coefficient comparison between high frequency component and low frequency component will be done in order to confirm the effectiveness of the applied technique in this study.

Key words: Single Phase Transformer, Discrete Wavelet Transform; Differential Current, Coefficient of DWT

Introduction

Transformer is the main equipment for transmission and distribution system due to its function as power transfer from one voltage level to another level before transmitting power to end users. However, transformer can be deteriorated over the period of time. This results in fault occurrence in transformer and severe damage of both equipment and system. The main concern for transformer is deterioration of insulation in transformer winding. This is the main cause for winding fault. Thus, the behavior and characteristics of winding fault in transformer must be analyzed for further improving protection system and increasing reliability of the system.

Literature reviews on transformer characteristics and fault analysis in transformer have been done. The fault in transformer winding using simulation software was presented in [1]-[2]. The winding to ground fault in the transformer using MATLAB software was discussed in [3]-[4]. The protection methodology for transformer has been proposed and discussed [5]. This research used ATP/EMTP and MATLAB software to simulate fault and transformer characteristics. In [6], the research presented fault in transformer in terms of inrush current and then used PSCAD software to simulate and design model for protection system. In [7], fault in transform has been presented. The model and simulation has been done using MATLAB/Simulink software. In addition, the fault detection algorithm in transformer has also been proposed. The

application of finite element method (FEM) for analyzed internal arcing faults characteristics in power transformer was discussed [8]. The research analyzes the transformer windings under short-circuit fault using a coupled electromagnetic-structural analysis solution by the 3-D finite-element method, which was discussed in [9]. Another research presented Simulation of fault using ATP/EMTP software and low frequency component comparison of DWT to discriminate among inrush current, external fault and internal fault in power transformer [10]. Analysis of internal arcing fault in transformer by FEM simulation model was discussed in [11]. The analysis of winding interturn fault in transformer was discussed in [12]. Some research papers have focused on diagnosis of transformer winding faults based on FEM and simulation by ATP/EMTP to model transformer winding faults [13].

From the literature reviews discussed above, it can be seen that many researches and studies analyzed fault in the transformer using only simulation software. Hence, this research aims to analyze behavior and characteristics of winding fault in the single-phase transformer by using a real experimental test bench. The differential current will be obtained during winding fault in single-phase transformer and then used for further analysis with discrete wavelet transform (DWT) both high and low component frequencies.

Experimental Setup

This research used the single-phase transformer with rated 15 kVA, 220/440V. The secondary winding has been connected to ground with tap varied option for the winding. The step changing is every 10% of rated voltage. All tap voltages are 44, 88, 132, 176, 220, 264, 308, 352, 396 and 440 V. The winding short circuit has been controlled by using zero-crossing circuit and magnetic contactor with time relay. The diagram and actual experimental setup are shown in Fig. 1 (a) and (b) respectively. The experimental setup is supplied from laboratory through variac as indicated by number 1. The protection system consists of circuit breaker and fuse 30 A before connected to high voltage winding side of transformer indicated by number 2. Low-voltage winding side is connected to the load (200W) indicated by number 5 with its winding having zero-crossing circuit as indicated by number 3 to simulate fault for winding to ground fault in low-voltage winding side in transformer. The oscilloscope has been used to visualize differential signals as indicated in number 4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

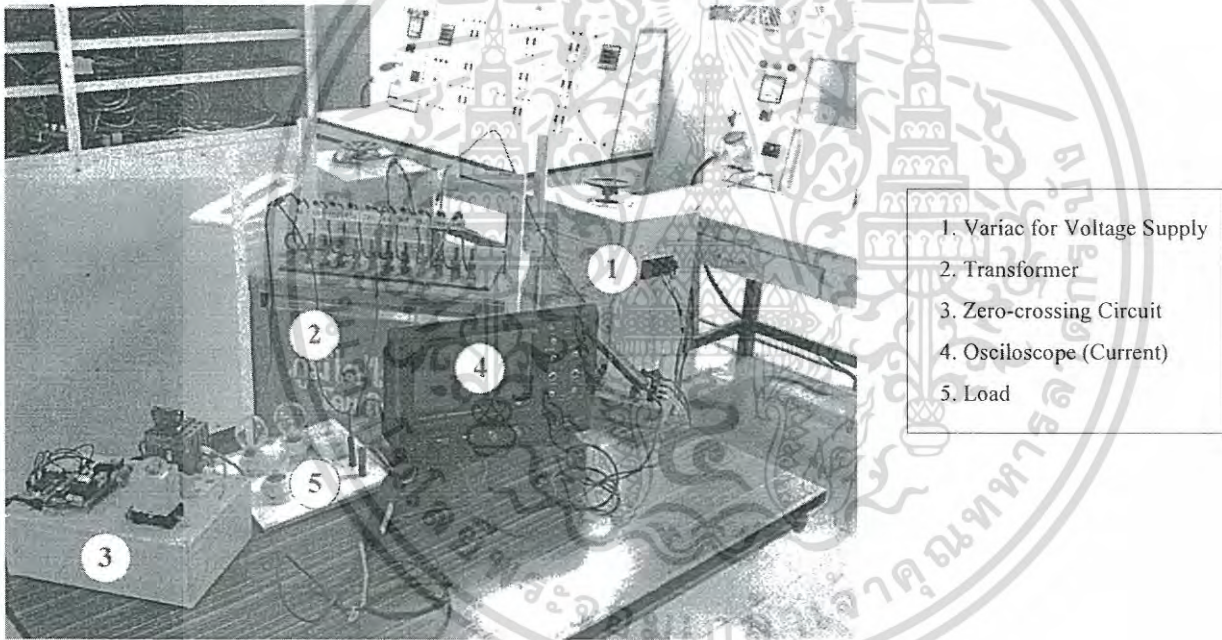
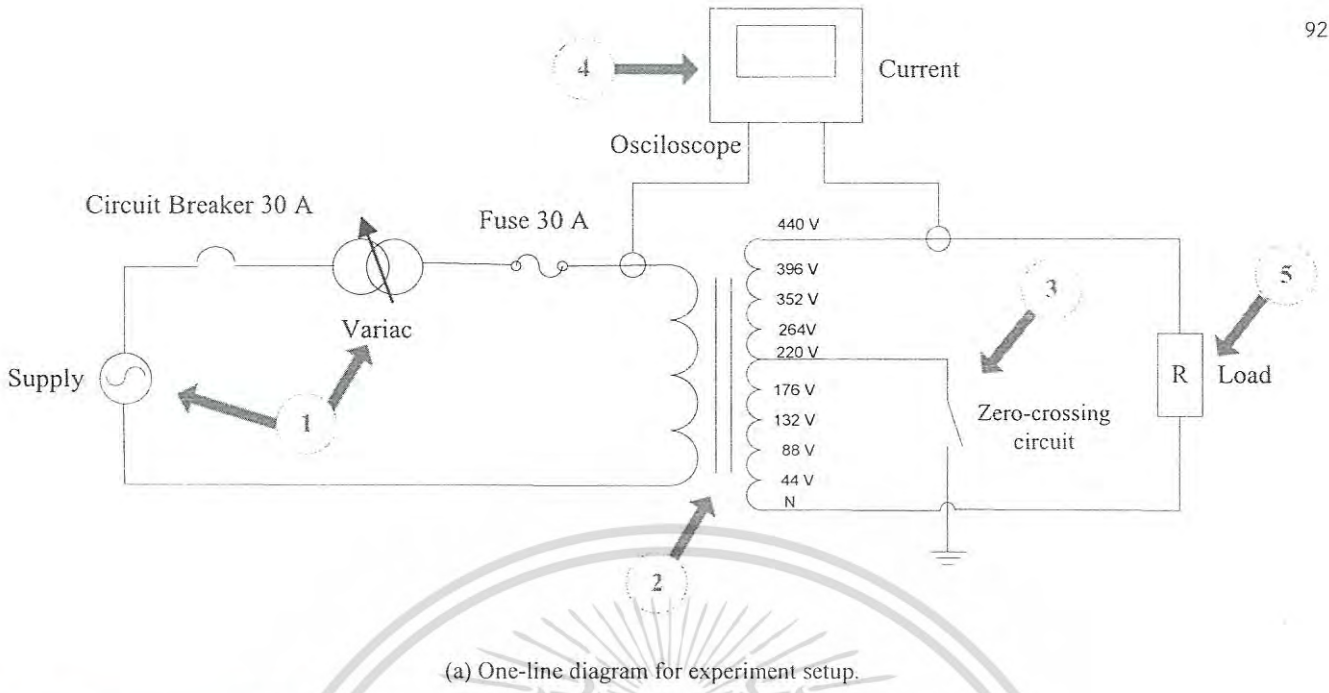


Fig. 1. Diagram and Experiment setup.

Results and Analysis

The results from experimental setup can be described as follows. When considering the current, the current between before and after winding to ground fault in the single-phase transformer revealed that the primary current after winding fault occurrence tended to increase when changing tap to high voltage winding as shown in Fig. 2 (a) and Fig. 3. (a). However, the secondary current tends to decrease. From the results of the

primary and secondary currents obtained from single-phase transformer during the winding to ground fault, the differential current of the transformer has been investigated and analyzed in order to evaluate behavior of the winding to ground fault in the transformer. When analyzing the differential current between before and after winding to ground fault of the transformer, it is found that the differential current tends to increase when changing tap to high voltage winding as illustrated in Fig. 2 (b) and Fig. 3 (b).

The current signal obtained from oscilloscope when winding to ground fault occurs has been used to calculate differential current by MATLAB software. The differential current signal from transformer is then applied with discrete wavelet transform (DWT) method using ATP/EMTP software in order to extract coefficient value for further analysis. The high frequency component from differential current signals has been extracted by using mother wavelet daubechies2 (db2) into scale 1-5 and then squared values of all coefficients are done as depicted in Fig. 4. It can be seen that high frequency component cannot be detected and empathize actual fault time. In case analyzing the coefficient of DWT using low frequency component decomposition, it can detect the DWT coefficient of differential current on scale 5. This value is consistent with coefficient of DWT from high frequency component. The

ATP/EMTP software has been sampling signal every 5 ms in order to determine maximum and minimum coefficients of DWT as shown in Fig.5 and the coefficient can be calculated by ratio as described in [10]. When analyzing, using high frequency component decomposition, the coefficient of DWT from differential current in the transformer when winding to ground fault occurs has lower amplitude compared to low frequency component decomposition and tends to increase when increasing primary voltage supply as shown in Fig. 6. When analyzing, using low frequency component decomposition, the DWT coefficient of differential current in the transformer when winding to ground fault occurs tends to increase as voltage level increases and tends to increase when increasing the primary voltage supply as shown in Fig.7.

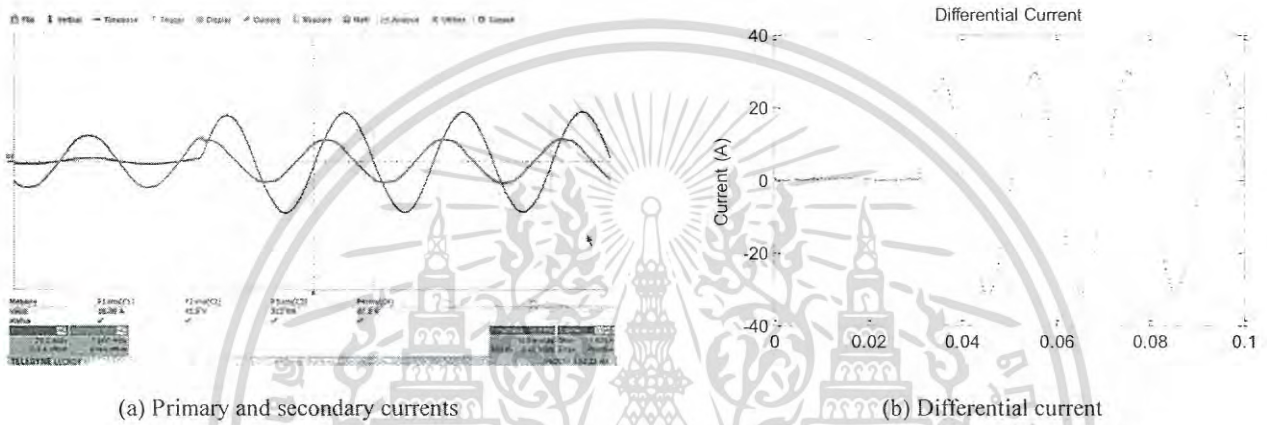


Fig. 2. Signal currents when the winding to ground fault occurs at winding voltage tap 88 V (load 200W)

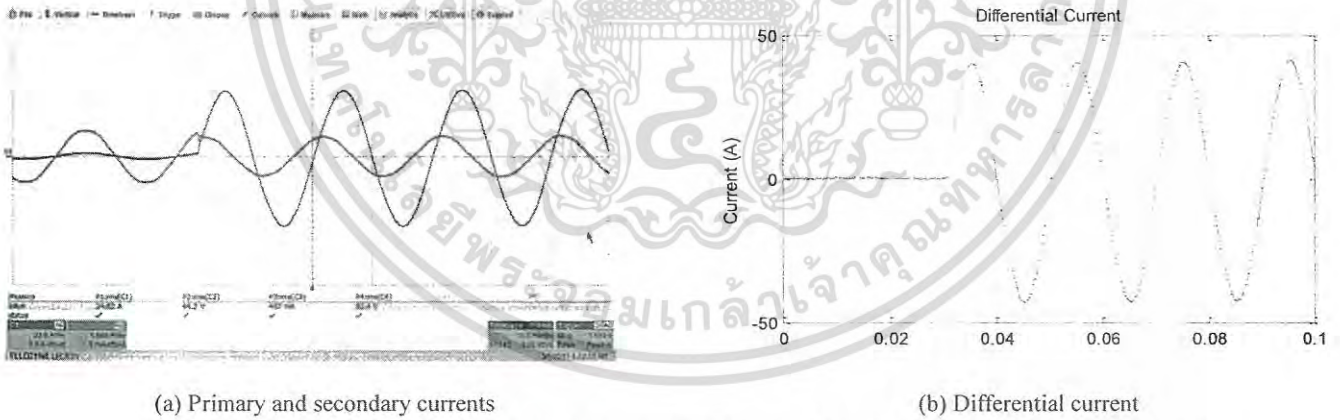
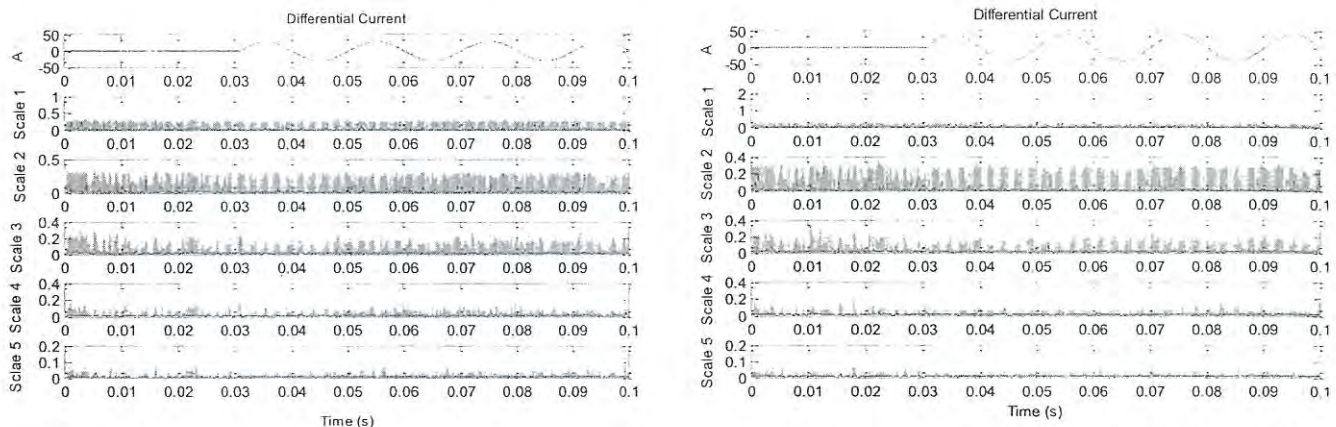
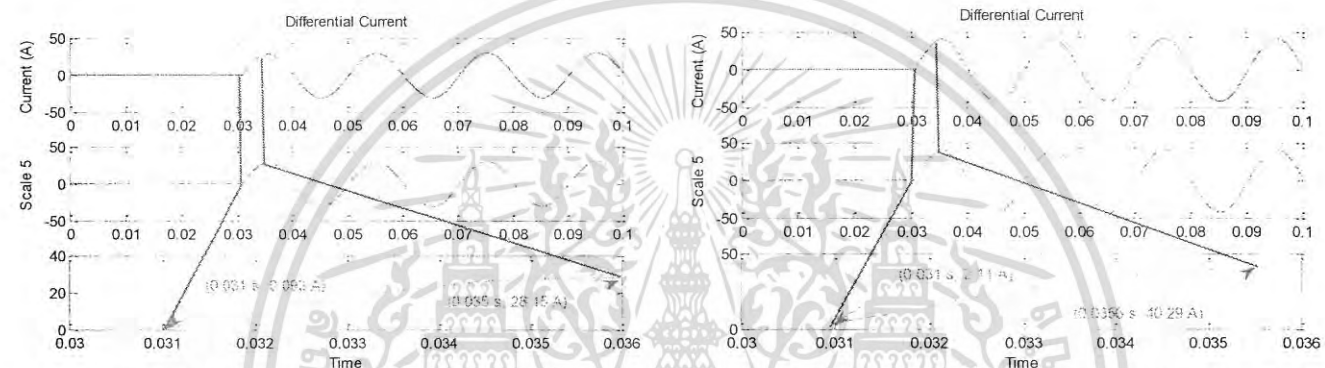


Fig. 3. Signal currents when the winding to ground fault occurs at winding voltage tap 220 V (load 200W)

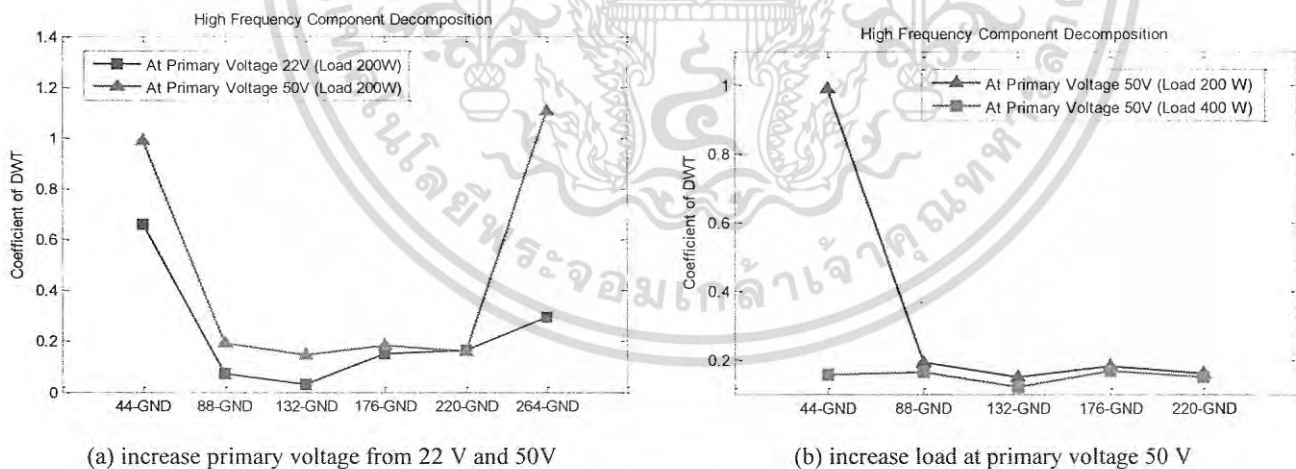
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) the winding to ground fault at winding voltage tap 88 V (b) the winding to ground fault at winding voltage tap 220 V
 Fig. 4. Signal coefficient of DWT by decomposing high frequency component



(a) the winding to ground fault at winding voltage tap 88 V (b) the winding to ground fault at winding voltage tap 220 V
 Fig. 5. Signal coefficient of DWT by decomposing low frequency component



(a) increase primary voltage from 22 V and 50V (b) increase load at primary voltage 50 V
 Fig. 6. Comparison for coefficient of DWT by decomposing high frequency component

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

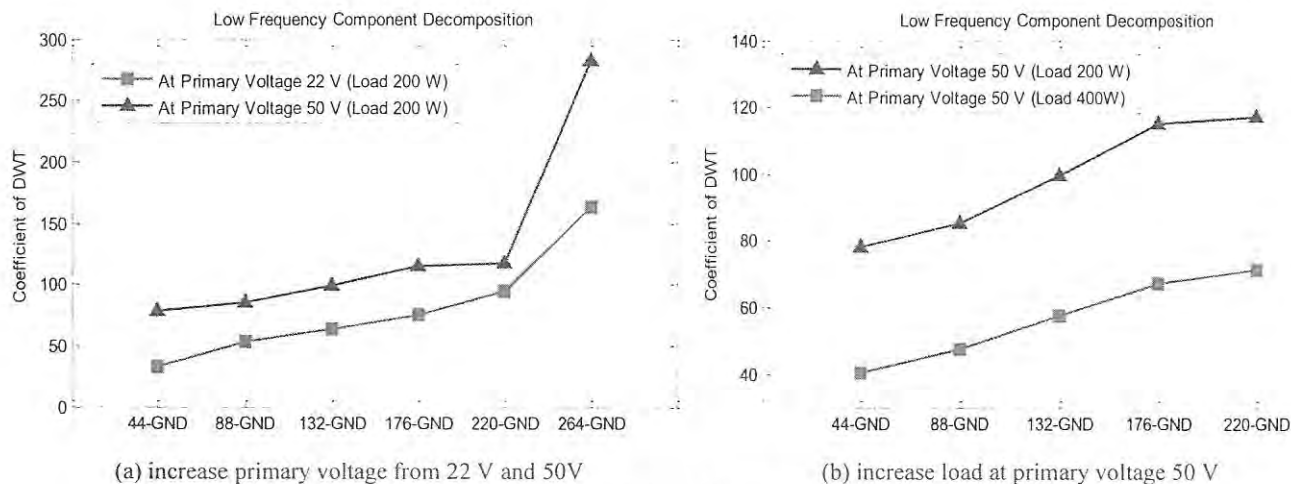


Fig. 7. Comparison for coefficient of DWT by decomposing low frequency component

Conclusion

This research aimed to study behavior of winding to ground fault in the single-phase transformer using discrete wavelet transform (DWT). The comparison result of the coefficient of DWT between high frequency component and low frequency component can be concluded as follows. The coefficient of DWT from high frequency component decomposition is difficult to be analyzed because it cannot be detected and empathize actual fault time, therefore, it should be analysis from low frequency component method. The coefficient of DWT from low frequency component decomposition tends to increase when winding to ground fault occurs at higher winding voltage tap corresponding to fault current and differential current is increased. For this behavior of coefficient of DWT, it can be used to analyze or classify fault location in transformer further.

Acknowledgment

The author wishes to acknowledge financial support from Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang research fund.

References

- [1] G. Ghanavati, S. M. Kouhsari, A. Koochaki and M. Mahmoodan, "Calculation of transformer internal faults in short circuit analysis," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1-7.
- [2] M. J. Mousaviand and K. L. Butler-Purry, "Transformer internal incipient fault simulations," in Proc. North Amer. Power Symp., Rolla, MO, 2003, pp. 195-203.
- [3] A. I. Megahed, "A model for simulating internal earth faults in transformers," in Proc. 2001 IEE Developments in Power System Protection Conf., pp. 359-362.
- [4] H. B. Elrefaie and A. I. Megahed, "Modeling transformer internal faults using Matlab," 11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.02CH37379), 2002, pp. 226-230.
- [5] A. Wiszniewski, W. Rebizant, and L. Schiel, "New algorithms for power transformer inter-turn fault protection," Electric Power Systems Research, vol. 79, no. 10, October 2009, pp. 1454-1461.
- [6] M. Rasoulpoor, and M. Banejad, "A correlation based method for discrimination between inrush and short circuit currents in differential protection of power transformer using Discrete Wavelet Transform: Theory, simulation and experimental validation," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 51, October 2013, pp. 168-177.
- [7] A. A. A. Etumi, F. J. Anayi, A. A. Fahmy, and E. E. Eldukhri, "New algorithm based on auto-correlation and cross-correlation scheme to detect the internal fault in single phase transformer," 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014, pp. 1-5.
- [8] C. Yan et al., "Simulation and analysis of power transformer internal arcing faults overpressure characteristics," 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, 2014, pp. 685-690.
- [9] H. J. Zhang, S. H. Wang, and S. Wang, "Cumulative deformation analysis of transformer winding under short-circuit fault using 3-D FEM," 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), Shanghai, 2015, pp. 370-371.
- [10] C. Jettanasen, C. Pothisarn, J. Klomjit and A. Ngaopitakkul, "Discriminating among inrush current, external fault and internal fault in power transformer using low frequency components comparison of DWT," 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, 2012, pp. 1-6.
- [11] X. Yang et al., "Dynamic pressure analysis and protection of transformer in internal arcing fault by FEM," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 882-887.
- [12] N. Asadi, and H. M. Kelk, "Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 6, pp. 2419-2426, Dec. 2015.
- [13] S. Liu, Y. Liu, H. Li and F. Lin, "Diagnosis of transformer winding faults based on FEM simulation and on-site experiments," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 6, pp. 3752-3760, Dec. 2016.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจันทสิทธิ์ เริ่มคิดการณ์
วัน เดือน ปี เกิด	26 กรกฎาคม 2531
สถานที่เกิด	เพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2554
ประวัติการทำงาน	ปี พ.ศ. 2555-ปัจจุบัน งานมาตรฐานสายใต้ดิน (ออกแบบมาตรฐานติดตั้งระบบสายส่งใต้ดิน) กองมาตรฐานไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง
ผลงานทางวิชาการ	“Behavior Analysis of Winding to Ground Fault in Transformer Using High and Low Frequency Component From Discrete Wavelet Transform”. ICASI 2017 IEEE International Conference On Applied System Innovation, Sapporo, Japan, May 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้