

## การเปรียบเทียบวิธีการแยกฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงด้วยการแปลงเวฟเล็ต

### DISCRIMINATING COMPARISON BETWEEN INTERNAL FAULT AND EXTERNAL FAULT IN POWER TRANSFORMER USING DISCRETE WAVELET TRANSFORM

จิตติพงษ์ กล่อมจิตต์\* อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

Jittiphong Klomjit\*, Athapol Ngaopitakkul

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

\*Corresponding author, E-mail: tor\_1\_4@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เสนอวิธีการแยกฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงโดยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด daubechies 4 (db4) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตของกระแสผลต่างแต่ละเฟสและกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) นำมาวิเคราะห์เพื่อแยกฟอลต์ภายในหรือภายนอกหม้อแปลง และเปรียบเทียบความถูกต้องในการแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูง และองค์ประกอบความถี่ต่ำ จากค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต การวิเคราะห์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูงจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดสเกล 1 สร้างเงื่อนไขในการแยกประเภทฟอลต์ ส่วนการวิเคราะห์ด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำจะใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ ผลที่ได้คือการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูงมีความถูกต้องมากกว่าและใช้ตัวแปรในการสร้างเงื่อนไขน้อยกว่า ซึ่งจะเป็นเทคนิคที่ดีในการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ต่อไป

**คำสำคัญ:** การแปลงเวฟเล็ต รีเลย์แบบผลต่าง หม้อแปลง ฟอลต์ภายในหม้อแปลง

#### Abstract

This paper presents a method in order to discriminate internal fault and external fault by using mother wavelet daubechies (db4) of Discrete Wavelet Transform that use coefficients from Discrete Wavelet Transform (DWT) in differential current each phase, and zero sequence to discriminate internal fault and external fault. The comparison between high frequency component and low frequency component obtained from Discrete Wavelet Transform (DWT). In case of high frequency component is used peak coefficient at scale 1 for designed conditions to discriminate internal fault and external fault and in case of low frequency component is used coefficient of variance rate for designed condition to discriminate internal fault and external fault. The result shows that high frequency component have more accuracy than low frequency component. This is good technique for classify internal fault and external fault as well.

**Keywords:** Discrete Wavelet Transform (DWT), Differential Relay, Transformer, Internal Fault

## บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูง และมีความสำคัญลำดับต้นๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อใดก็ตามที่เกิดความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้ขาดความต่อเนื่องของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีความจำเป็นต้องจัดการระบบป้องกันที่แม่นยำและรวดเร็ว ปัจจุบันการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีความน่าเชื่อถือได้และมีความเร็วสูงวิธีหนึ่งก็คือ การใช้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection Relay) เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลง ถ้าระบบป้องกันที่ดีสามารถแยกแยะความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหรือภายนอกหม้อแปลง (Internal Fault, External Fault) ทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการต่างๆ การวิเคราะห์ด้วยผลต่างกระแสโดยใช้การตัดสินใจแบบกิ่งก้านสาขา Decision Tree (DT) [1] ในการฝึกสอนเพื่อใช้ในการแบ่งแยกกระแสอินรัชและฟอลต์ภายใน หรือเป็นการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์ [2] เพื่อคุณสมบัติของแต่ละความถี่เพื่อแบ่งแยกกระแสอินรัชและฟอลต์ภายใน แต่การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์เป็นเรื่องยากในการวิเคราะห์เวลาในการเกิดฟอลต์ ปัจจุบันมีวิธีการแปลงเวฟเล็ตที่ช่วยในการวิเคราะห์เรื่องของความถี่กับเวลาได้ โดยส่วนใหญ่งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเพื่อแบ่งแยกฟอลต์ภายในกับอินรัช หรือวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธีอื่นๆ เช่น Gaussian Mixture Models (GMM) [3], Support Vector Machine (SVM) [4], Artificial Neural Networks (ANN) [5], เพื่อให้ได้ความถูกต้องแม่นยำที่ดีขึ้นกว่าการวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ตเพียงอย่างเดียว จากเอกสารอ้างอิง [3-5] ใช้ค่า

ที่ได้จากการแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของผลต่างกระแส 3 เฟสของสเกล 1-5 แปลงให้เป็นค่าพลังงานในช่วงที่พิจารณา และนำผ่าน (GMM), (SVM), (ANN) ในการฝึกสอนเพื่อแบ่งแยกประเภทฟอลต์, การใช้ Median Absolute Deviation (MAD) [6] ในการวิเคราะห์โดยนำข้อมูลจากการแปลงเวฟเล็ตสเกลที่ 3 และ 4 นำมาหาอัตราส่วนค่ากลางการเบี่ยงเบนของสเกลที่ 3 และ 4 ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้ของฟอลต์แต่ละประเภทแตกต่างกัน และยังมีการใช้อัลกอริทึมที่ดูความสัมพันธ์การเปลี่ยนของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต [7-8] ซึ่งส่วนใหญ่วิเคราะห์ที่ความถี่สูงในสเกล 1-5 และใช้การแปลงผ่านเวฟเล็ตแม่ซนิต daubechies (db)

งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณการเกิดความผิดปกติ เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีการพัฒนามาจากการแปลงฟูเรียร์คือ สามารถวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความถี่ในแกนของเวลา จึงมีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์สัญญาณการเกิดฟอลต์ที่ขึ้นกับเวลาและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทำให้การตรวจจับการเกิดฟอลต์มีความรวดเร็วและมีความแม่นยำมากขึ้น ในส่วนของการแบ่งแยกการเกิดฟอลต์ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบ 2 วิธีการ 1. วิเคราะห์ด้วยความถี่สูง 2. วิเคราะห์ด้วยความถี่ต่ำ ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต เพื่อแบ่งแยกการเกิดฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลง โดยทั่วไปการวิเคราะห์การเกิดฟอลต์ส่วนใหญ่วิเคราะห์ด้วยความถี่สูง เนื่องจากเมื่อเกิดการรบกวนในระบบจะเกิดความถี่สูงแทรกในระบบเป็นส่วนใหญ่ ในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยความถี่ต่ำได้จากการสังเกตจากกระแสผลต่างเนื่องจากการเกิดฟอลต์แต่ละชนิดมีลักษณะของลูกคลื่นที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน จึงมีการศึกษาใน 2 ส่วนเพื่อเปรียบเทียบผลของคำตอบและนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนารูปแบบการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทการเกิด

พลวัตร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ได้ความถูกต้องที่ดียิ่งขึ้นไป

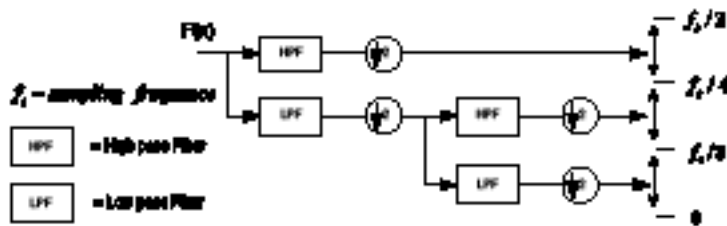
**การแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย**

การแปลงเวฟเล็ทเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น) เวฟเล็ท เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ท” ซึ่งฟังก์ชันนี้เป็นเวฟเล็ทต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ทแม่” (Mother Wavelets) การวิเคราะห์เวฟเล็ทมีด้วยกันหลายรูปแบบ สำหรับบทความนี้ใช้การวิเคราะห์ด้วยเวฟเล็ทแบบตัวกรองสัญญาณเมื่อนำสัญญาณอินพุตมาผ่านการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย สัญญาณถูกแยกองค์ประกอบ

(Decomposition) โดยตัวกรองแบบ 2 ช่อง (Two Channel Filter Banks) ซึ่งแยกความถี่ในแบนด์ที่ต้องการออกเป็น 2 ส่วน คือ

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

ลักษณะของตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณในลักษณะของ Dyadic Wavelet Transform ดังแสดงในภาพที่ 1 เป็นการนำฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณมาเรียงต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนความถี่ต่ำมาทำการแยกความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave Analysis Filter Banks) โดยที่แต่ละขั้นตอนมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละ 2 เท่า



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ทโดยใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ

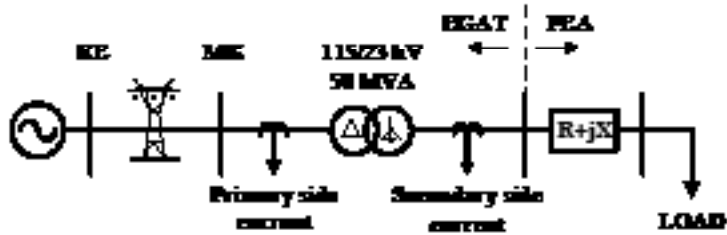
**การจำลองการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม EMTP**

การศึกษาความผิดพลาดของระบบไฟฟ้าได้ใช้โปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP) ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยในการสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะเพื่อศึกษาพฤติกรรมตอบสนองทางด้านไฟฟ้าแบบชั่วคราว (Transient) ในการจำลองความผิดพลาดของระบบไฟฟ้าใช้ BCTRAN จำลองการผิดพลาดภายในหม้อแปลงซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยที่อยู่ใน

โปรแกรม EMTP ซึ่งจะใช้เมทริก 6x6 ของความเหนี่ยวนำ [L] และความต้านทาน [R] ในการจำลองวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 2 ขดลวดในสภาวะที่หม้อแปลงทำงานปกติ (Normal Case) ถ้าจำลองการเกิดความผิดพลาดภายในหม้อแปลงจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเมทริกความเหนี่ยวนำ [L] และความต้านทาน [R] เป็น 7x7 ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault)

เพื่อศึกษาความผิดพร่องให้สอดคล้องกับระบบจริงจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองระบบจริงตามภาพที่ 2 โดยใช้หม้อแปลงขนาด 50MVA (115/23kV) รับไฟจากสายส่งของการไฟฟ้าผลิต

(EGAT) และลดขนาดแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อจ่ายโหลดให้สถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ที่พิกัดโหลด 100% (50MVA)



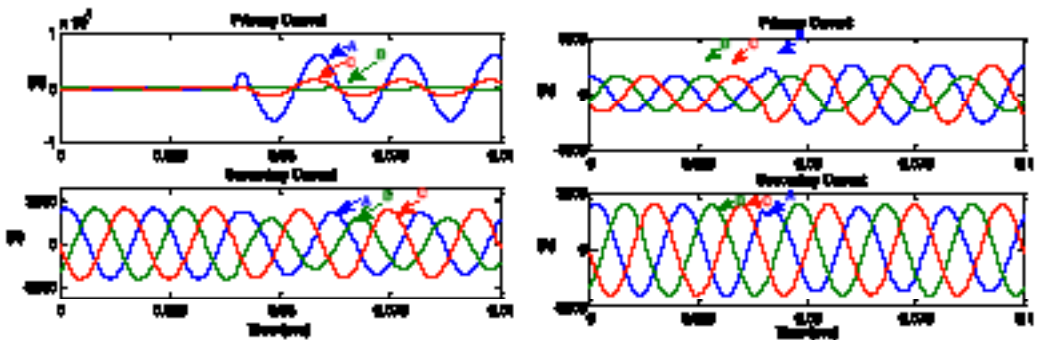
ภาพที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง

1. ความผิดพร่องภายในหม้อแปลง

ทำการจำลองการเกิดความผิดพร่องภายในโดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ การปรับมุมและตำแหน่งของความยาวขดลวดที่เกิดความผิดพร่อง ทั้งด้านไฟฟ้าแรงดันสูงและด้านไฟฟ้าแรงดันต่ำ

รูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรม EMTP เมื่อระบบเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง ทำให้ด้านแรงดันสูง (HV Side) มีค่ากระแสที่สูงมากกว่าค่าปกติ แต่ด้านแรงดันต่ำ (LV Side) มีค่ากระแสน้อยลงกว่าปกติสังเกตจากภาพที่ 3(a) และ 3(b) เมื่อผ่านหม้อแปลงกระแส (CT) ทั้งสองฝั่งทำให้ผลต่างกระแส (Difference of Current) มีค่ามากผิดปกติ

ถ้าฟอลต์เกิดที่ระยะขดลวดน้อยทำให้มีค่ากระแสสูงมากกว่าการเกิดฟอลต์ที่ระยะขดลวดมาก เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีค่ามากขึ้นทำให้กระแสมีค่าลดลง กรณีการเกิดฟอลต์ที่ 50% ของขดลวดแรงดันสูงด้าน AC มีค่ากระแสเพียง 10% เพราะว่าการต่อขดลวดแบบเดลต้าและมีค่ามากเมื่อเกิดที่ 10% และ 90% แต่ถ้าเป็นการต่อแบบสตาร์ กระแสมีค่าน้อยสุดเมื่อเกิดฟอลต์ที่ 90% และมากที่สุดที่ 10% ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอีกคือ มุมที่เกิดฟอลต์ ถ้ามุมที่เกิดตรงกับมุมของกระแสที่ 0 และ 180 องศา ทำให้ค่าของกระแสมีค่าน้อย ถ้าเกิดที่มุม 90 และ 270 องศา ทำให้มีค่ามาก



(a) เกิดฟอลต์ที่ 20% ของขดลวด AC ด้านแรงดันสูง (b) เกิดฟอลต์ที่ 20% ของขดลวด A ด้านแรงดันต่ำ

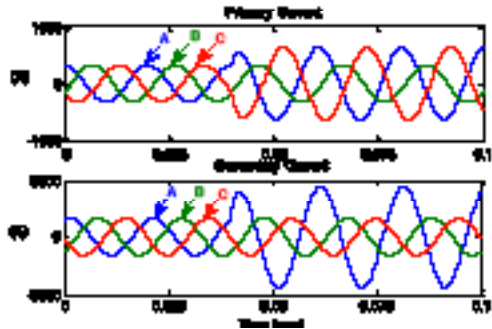
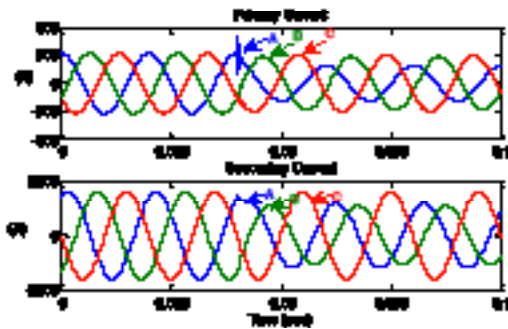
ภาพที่ 3 รูปคลื่นการเกิดความผิดพร่องภายในหม้อแปลง

## 2. ความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง

ทำการจำลองการเกิดความผิดปกติภายนอก โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ การปรับมุมและตำแหน่งของความยาวขดลวด ที่เกิดความผิดปกติ ทั้งด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ เช่นเดียวกับความผิดปกติภายใน

ลักษณะรูปคลื่นที่ได้จากโปรแกรม EMTP เมื่อระบบเกิดฟอลต์ด้านหน้าหม้อแปลงกระแส ด้านไฟฟ้าแรงดันสูง (HV Side) และไฟฟ้า ด้านแรงดันต่ำ (LV Side) มีค่ากระแสที่ต่ำกว่า ค่าปกติทั้งสองฝั่ง สังเกตจากภาพที่ 4(a) เมื่อผ่าน

หม้อแปลงกระแส (CT) ทั้งสองฝั่งทำให้ผลต่าง กระแส (Difference of Current) มีค่าผิดปกติ เล็กน้อยขณะที่เกิดฟอลต์ ถ้าฟอลต์เกิดหลังหม้อแปลง ค่ากระแสจะมีค่าที่มากกว่าปกติทั้งสองฝั่ง สังเกต จากภาพที่ 4(b) ผลต่างกระแสมีลักษณะคล้ายกับ การเกิดด้านหน้าหม้อแปลง ลักษณะของมุมที่ เกิดฟอลต์ก็จะมีลักษณะที่เช่นเดียวกับการเกิดฟอลต์ ภายในคือ ถ้ามุมที่เกิดตรงกับมุมของกระแสที่ 0 และ 180 องศา ทำให้ค่าของกระแสมีค่าน้อย ถ้าเกิดที่มุม 90 และ 270 องศา ทำให้มีค่ามาก



(a) เกิดฟอลต์ที่ 20% ของสายส่งเฟส A ด้านแรงดันสูง (b) เกิดฟอลต์ที่ 20% ของสายส่งเฟส A ด้านแรงดันต่ำ  
ภาพที่ 4 รูปคลื่นการเกิดความผิดปกติภายนอกหม้อแปลง

### การตรวจจับฟอลต์และการแบ่งแยกการ เกิดฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลง

การตรวจจับฟอลต์และการแบ่งแยกการเกิด ฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลง ได้จาก การนำสัญญาณที่ได้โปรแกรม EMTP มาหา ผลต่างของกระแสไฟฟ้าด้านเข้า (Primary) และด้านออก (Secondary) ในลักษณะของผลต่าง กระแส (Differential Relay) โดยผ่านการ ลดทอนสัญญาณในรูปแบบการต่อหม้อแปลง กระแส (Current Transformer) และคิดกระแส องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) [9-10] เพราะว่าหม้อแปลงเป็นวงจรแบบ DY11 ที่มีการคำนวณวงจรองค์ประกอบลำดับศูนย์ ที่แตกต่างกัน จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มา

แปลงเวฟเลิตแบบเต็มหน่วย (DWT) โดยใช้ เวฟเลิตแม่ชนิด daubechies 4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงและความถี่ต่ำ ซึ่งความถี่ในการจำลองระบบอยู่ที่ 200 KHz ได้ช่วงความถี่ของแต่ละสเกลได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ช่วงความถี่ของการแปลงเวฟเล็แต่ละสเกล

Scale	Detail 1	Detail 2	Detail 3	Detail 4	Detail 5	Approximation 5
Frequency Range (kHz)	50-100	25-50	25-12.5	12.5-6.25	6.25-3.125	3.125-0

**1. การตรวจจับฟอลต์**

การตรวจจับฟอลต์เนื่องจากขณะเกิดฟอลต์จะมีค่าความถี่สูงแทรกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจึงเป็นเหตุผลให้ทำการวิเคราะห์ที่ความถี่สูงคือ สังเกตค่าจากองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 (ซึ่งมีความถี่สูงสุดจากตารางที่1) ทำการตรวจสอบค่าทุก 1/4 ไซเคิล หรือ 5 ไมโครวินาที จนครบเวลาที่ทำการทดลอง (0.1 วินาที) โดยบันทึกค่าของกระแสผลต่างแต่ละเฟส ( $I_A^{diff}$ ,

$I_B^{diff}$ ,  $I_C^{diff}$ ) และกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ ( $I_{Zero}^{diff}$ ) รวม 4 เฟส ถ้าค่าที่ได้ภายหลังการเกิดฟอลต์มีมากกว่า 5 เท่าของค่าก่อนการเกิดฟอลต์ให้ตรวจจับและบันทึกค่าของแต่ละเฟสไว้ [5] ถ้าบันทึกค่าได้มากกว่า 1 เฟส ให้ถือว่าเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าบันทึกค่าได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เฟส ถือว่าไม่มีการเกิดฟอลต์

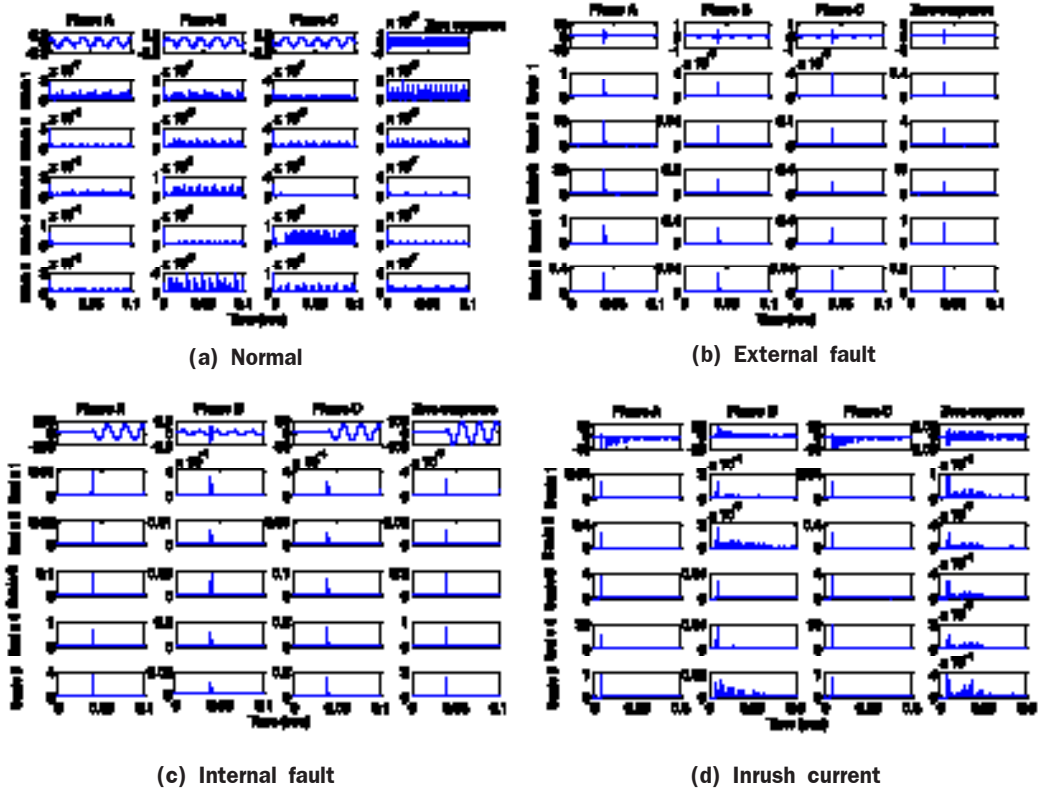
ตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็แต่ในการตรวจจับฟอลต์

สเกลที่ 1	ผลต่างกระแสจากรีเลย์								ผลรวมเฟส	ผลลัพธ์
	Phase A		Phase B		Phase C		Zero sequence			
	Pre-fault	Post-fault	Pre-fault	Post-fault	Pre-fault	Post-fault	Pre-fault	Post-fault		
ค่าสัมประสิทธิ์	1.52E-7	9.60E-3	1.06E-7	2.88E-4	1.24E-7	2.10E-4	1.85E-08	2.60E-03	4	ฟอลต์

เมื่อนำสัญญาณที่จากโปรแกรม EMTP มาตรวจจับการเกิดฟอลต์จะได้ค่าตามตารางที่ 2 แสดงค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเล็แต่ กรณีการฟอลต์ภายในหม้อแปลงด้านแรงดันสูง เมื่อเกิดฟอลต์สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็แต่มีค่าสูงขึ้นมากเมื่อนำมาผ่านเงื่อนไขการตรวจจับฟอลต์ ค่าที่ได้หลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าก่อนเกิดฟอลต์ทั้ง 4 เฟส ทำให้ผลรวมมีค่ามากกว่า 1 เฟส คือตรวจจับได้ว่าเกิดฟอลต์ หลังจากการตรวจจับฟอลต์ 4.1 ถ้าพบว่าการเกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการแยกตัวเกิดฟอลต์ที่ภายในหรือภายนอกหม้อแปลงโดยจะมีการเปรียบเทียบด้วย 2 วิธีการคือ แบ่งแยกด้วยองค์ประกอบความถี่สูงและแบ่งแยกด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ

**2. การแยกองค์ประกอบความถี่สูง**

การแยกองค์ประกอบความถี่สูง โดยทั่วไปการเกิดฟอลต์ส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ด้วยความถี่สูงเนื่องจากเมื่อเกิดการรบกวนในระบบจะเกิดความถี่สูงแทรกในระบบเป็นส่วนใหญ่

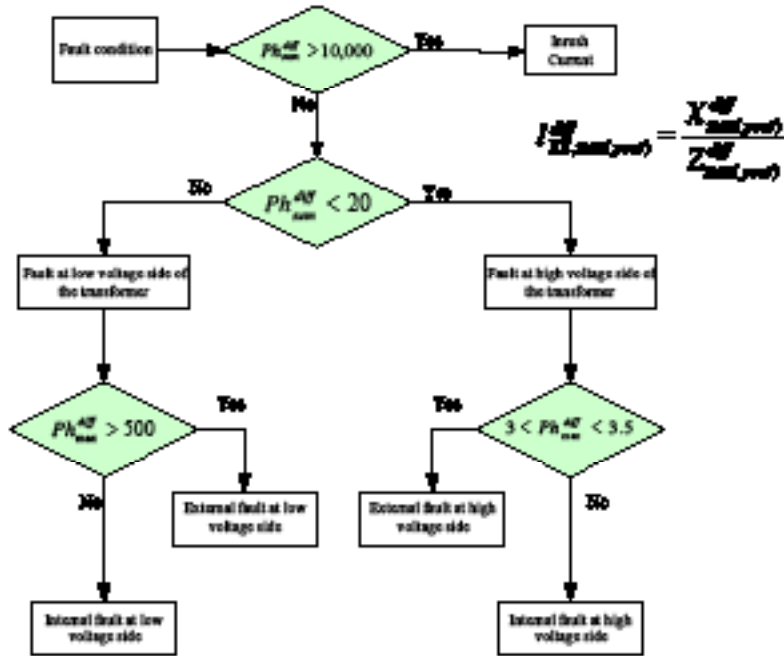


ภาพที่ 5 การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 (a) กรณีไม่เกิดฟอลต์, (b) การเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง, (c) การเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง, (d) กระแสอินรัช

จากภาพที่ 5 การแปลงเวฟเลิตองค์ประกอบความถี่สูง จะสังเกตได้อย่างชัดเจนสำหรับลูกคลื่นที่เกิดฟอลต์จะมีลักษณะของลูกคลื่นที่ได้จากการแปลงเวฟเลิตที่สเกล 1-5 พุ่งขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับลูกคลื่นปกติจะไม่มีพุ่งขึ้นของกราฟที่ชัดเจนเป็นเพียงลักษณะของสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์น้อยมากคือ

ประมาณ  $10E-7$  ถึง  $10E-5$  ในการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูง จะพิจารณาที่  $1/4$  ลูกคลื่น หาค่าสูงสุดที่ได้จากการแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 ภายหลังการเกิดฟอลต์เพื่อแบ่งแยกการเกิดฟอลต์โดยเป็นไปตามแผนภาพที่ 6





ภาพที่ 6 แผนผังแสดงเงื่อนไขการแบ่งแยกการเกิดฟอลต์ระหว่างภายในและภายนอกหม้อแปลง

**โดยที่**

$X$  = เฟส A, เฟส B, เฟส C และกระแสของค่าสัมประสิทธิ์ ตามลำดับ

$Ph_{sum}^{diff}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ด้านสูงของสายพหุคูณการเกิดฟอลต์รวมสายพหุคูณ (  $I_{AZ,max}^{diff(post)} \cdot I_{BZ,max}^{diff(post)} \cdot I_{CZ,max}^{diff(post)}$  )

$Ph_{max}^{diff}$  = ค่าการรวมแอมพลิจูดสูงสุดของสายพหุคูณการเกิดฟอลต์รวม (  $I_{AZ,max}^{diff(post)} \cdot I_{BZ,max}^{diff(post)} \cdot I_{CZ,max}^{diff(post)}$  )

จากภาพที่ 6 ถ้าค่าสัมประสิทธิ์รวมมากกว่า 10,000 ให้ถือว่าเกิดกระแสอินรัช หลังจากนั้นตรวจสอบด้านที่เกิดฟอลต์ค่าสัมประสิทธิ์รวมมากกว่า 20 เกิดฟอลต์ด้านแรงดันต่ำ ถ้าน้อยกว่า 20 เกิดฟอลต์ด้านแรงดันสูง

และตรวจสอบว่าเกิดฟอลต์ภายในหรือภายนอกหม้อแปลง ด้านแรงดันต่ำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดมากกว่า 500 เกิดภายนอกหม้อแปลง ด้านแรงดันสูงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดอยู่ระหว่าง 3-3.5 เกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็ตรณฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง

ตัวอย่างข้อมูล	ผลต่างกระแสจากรีเลย์					ผลลัพธ์
	ทดสอบ	$I_{AZ,max}^{diff(post)}$	$I_{BZ,max}^{diff(post)}$	$I_{CZ,max}^{diff(post)}$	$Ph_{sum}$	
1	3.33	1.14E-2	1.68E-2	3.36	3.33	ฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงด้านสูง
2	3.89	1.11E-1	8.07E-2	3.88	3.89	ฟอลต์ภายในหม้อแปลง

เมื่อนำค่าที่ได้มาผ่านเงื่อนไขการแบ่งประเภทฟอลต์ตามภาพที่ 6 ได้ตามตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ 1  $Ph_{sum} = 3.36$  มีค่าน้อยกว่า 20 อยู่ในกรณีเกิดที่แรงดันสูง และ  $Ph_{max} = 3.33$  อยู่ระหว่าง 3-3.5

อยู่ในกรณีการเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงสรุปว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ 1 คือการเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงด้านแรงดันสูง และตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ 2  $Ph_{sum} = 3.88$



มีค่าน้อยกว่า 20 อยู่ในกรณีเกิดที่แรงดันสูง และ  $Ph_{max} = 3.69$  อยู่ในกรณีการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงสรุปว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ 2 คือการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง

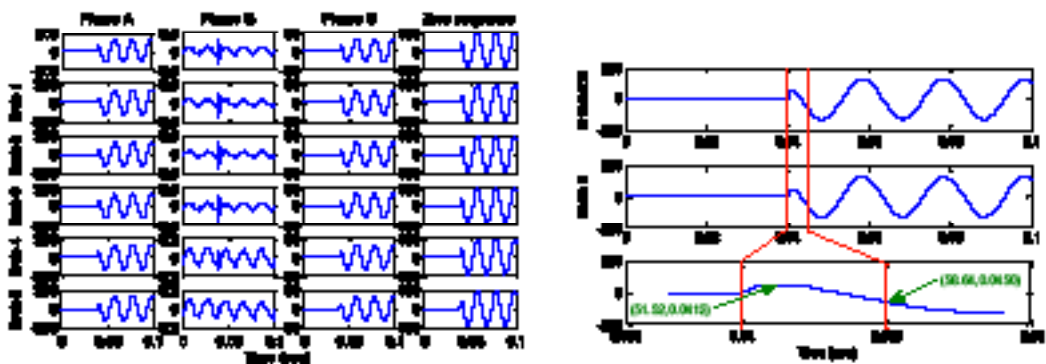
ด้านแรงดันสูง ความถูกต้องในการแยกประเภทฟอลต์ 97.48% แสดงเป็นรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการแบ่งแยกฟอลต์ด้วยการแยกองค์ประกอบความถี่สูง

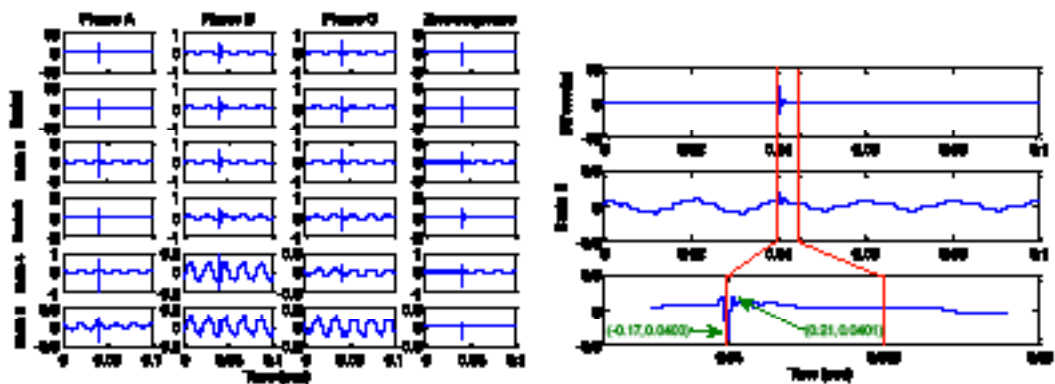
ชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้น	ฟอลต์ภายใน		ฟอลต์ภายนอก		กระแสน้ำ	ปกติ	รวม
	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ			
ข้อมูลทดสอบ	162	162	90	90	6	6	516
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	100%	98.76%	87.77%	100%	100%	100%	97.48%

### 3. การแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำ

การแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำ จากการสังเกตผลต่างกระแสของฟอลต์แต่ละประเภทที่ลักษณะถูกคลื่นค่อนข้างแตกต่างกันอย่างชัดเจนจะเห็นได้จากภาพที่ 7-8



ภาพที่ 7 การแบ่งแอมพลิจูดของฟอลต์ประเภทความถี่ต่ำประเภทที่ 1-5 กรณีเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง



ภาพที่ 8 การแบ่งแอมพลิจูดของฟอลต์ประเภทความถี่ต่ำประเภทที่ 1-5 กรณีเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง

เนื่องจากการเกิดฟอลต์แต่ละชนิดมีลักษณะของลูกคลื่นที่ต่างกันค่อนข้างชัดเจน แต่ลูกคลื่นบางเฟสเกิดความถี่สูงแทรกอยู่มากและยากในการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ จึงมาพิจารณาถึงการแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำ จากการทดสอบการแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำสเกลที่ 1-7 (สเกลที่ 7 ความถี่ในช่วง 781.25-0 Hz) พบว่าถ้าทำที่สเกลที่สูงเกินไปจะทำให้ลูกคลื่นบางเฟสผิดเพี้ยนไปจากลูกคลื่นเดิม เนื่องจากผลต่าง

กระแสของแต่ละเฟสหรือกระแสอินรีช เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในระบบ ผลต่างกระแสอาจไม่เป็น 50 Hz

จากภาพที่ 7-8 การแปลงเวฟเล็ดองค์ประกอบความถี่ต่ำ พิจารณาจากที่ 1/4 ลูกคลื่นเมื่อพบว่าเกิดฟอลต์ ทำการบันทึกค่าสูงสุดต่ำสุดและเวลาที่ได้จากการแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำสเกลที่ 5 ภายหลังการเกิดฟอลต์เพื่อแบ่งแยกการเกิดฟอลต์โดยเป็นไปตามเอกสารอ้างอิง [11]

$$X_{\text{fault}} = \frac{(X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) / I_{\text{rated}}}{(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / I} \quad [1]$$

โดยที่

$X$  = เฟส A, เฟส B, เฟส C และกระแสของค่าหาค่าตัวคูณ ตามลำดับ

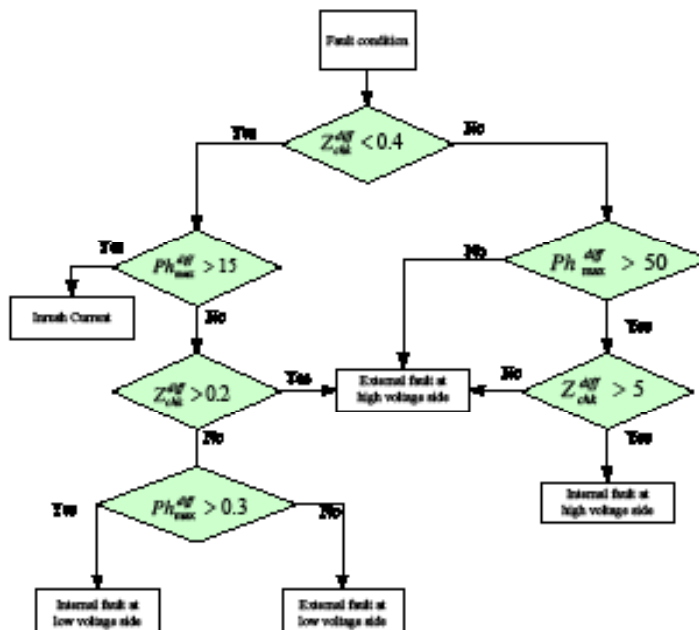
$X_{\text{max}}$ ,  $X_{\text{min}}$  = ค่าหาค่าตัวคูณกระแสของค่าสูงสุดและต่ำสุดในช่วง % ไซเคิล ตามลำดับ

$I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$  = เวลา ณ ค่าหาค่าตัวคูณสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นในช่วง % ไซเคิล ตามลำดับ

$X_{\text{fault}}$  = ตัวแปรเปรียบเทียบกับค่าตัวคูณแยกฟอลต์ภายในและภายนอก

$I_{\text{rated}}$  = ทิศกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า

$I$  = ค่าตามเวลาการวิเคราะห์ (ในที่นี้มีส่วนเท่ากับ % ไซเคิล)



ภาพที่ 9 แผนผังแสดงเงื่อนไขการแบ่งแยกการเกิดฟอลต์ระหว่างภายในและภายนอกหม้อแปลง

จากภาพที่ 9 การเกิดกระแสอินรัชคือ สัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์น้อยกว่า 0.4 และค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดมากกว่า 15 การเกิดฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันต่ำคือสัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์ต่ำกว่า 0.2 และค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดต่ำกว่า 0.3 การเกิดฟอลต์ภายในด้านแรงดันสูง

คือ สัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์มากกว่า 5 และค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดมากกว่า 50 การเกิดฟอลต์ภายในด้านแรงดันต่ำคือ ถ้าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบลำดับศูนย์น้อยกว่า 0.2 สัมประสิทธิ์สูงสุดมากกว่า 0.3 และสุดท้ายจะเป็นการเกิดฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันสูง

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็ตกรณีฟอลต์ด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง

สัมประสิทธิ์การแปลง เวฟเล็ตความถี่ต่ำ	ตัวอย่างข้อมูลทดสอบ 1				ตัวอย่างข้อมูลทดสอบ 2			
	A	B	C	Zero	A	B	C	Zero
$X_{max}^{diff}$	51.8227	0.0592	12.8956	37.3422	0.2017	0.0645	-0.012	0.0749
$X_{min}^{diff}$	-58.6477	-0.0722	-14.7771	-42.3332	-0.169	-0.0609	-0.1111	-0.1755
$t_{max}^{diff-x}$	41.29	44.97	41.29	41.29	40.17	44.49	40.33	40.33
$t_{min}^{diff-x}$	45.005	40.01	45.005	45.005	40.03	40.03	40.65	40.03
$X_{chk}^{diff}$	118.945	0.1059	29.7956	<b>85.7877</b>	10.5914	0.1124	1.2387	<b>3.3386</b>
ค่าสูงสุด		<b>118.945</b>		-		<b>10.591</b>		-
ผลลัพธ์		ฟอลต์ภายในด้านแรงดันสูง				ฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันสูง		

เมื่อนำค่าที่ได้มาผ่านเงื่อนไขการแบ่งประเภทฟอลต์ตามภาพที่ 9 ค่าตามตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 1  $Z_{chk}^{diff} = 85.78$  และ  $Ph_{sum} = 118.94$  สรุปว่าค่าที่ได้คือ การเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงด้านแรงดันสูง ตัวอย่างที่ 2  $Z_{chk}^{diff} = 3.33$

และ  $Ph_{max} = 10.591$  สรุปว่าค่าที่ได้คือ การเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงด้านแรงดันสูง ความถูกต้องในการแยกประเภทฟอลต์ 93.33% แสดงเป็นรายละเอียดได้ดังตารางที่ 6

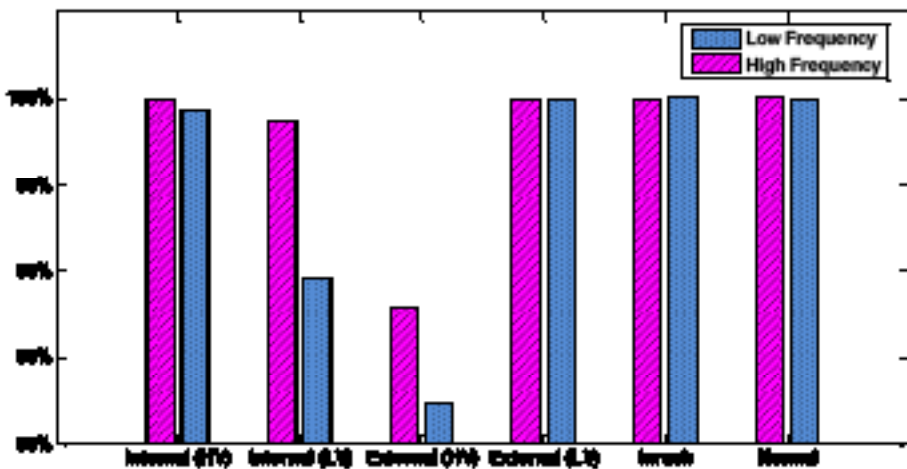
ตารางที่ 6 สรุปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการแบ่งแยกฟอลต์ด้วยการแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำ

ชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้น	ฟอลต์ภายใน		ฟอลต์ภายนอก		กระแสอินรัช	ปกติ	รวม
	แรงสูง	แรงต่ำ	แรงสูง	แรงต่ำ			
ข้อมูลทดสอบ	162	162	90	90	6	6	<b>516</b>
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	99.38%	89.50%	82.22%	100%	100%	100%	<b>93.33%</b>

**สรุป**

การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อใช้ในการระบุชนิดของฟอลต์ที่เกิด โดยใช้เวฟเล็ตแม่เป็นแบบ Daubechies 4 (db 4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่ต่ำ ในการตรวจจับสัญญาณการเกิดฟอลต์ได้ใช้การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากองค์ประกอบความถี่สูงก่อน และหลังเกิดฟอลต์เพื่อตรวจจับสัญญาณการเกิดฟอลต์ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่า 99% ในส่วนการแยกประเภทการเกิดฟอลต์ได้ทำการเปรียบเทียบด้วยกัน 2 วิธีการคือ การแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูง และการแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ

การแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูง ตรวจจับค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของแต่ละเฟสภายหลังจากการเกิดฟอลต์มาใช้ในการสร้างเงื่อนไขในการแยกประเภทการเกิดฟอลต์ซึ่งสามารถแยกประเภทฟอลต์ได้ถูกต้อง 97.48% และการแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ ตรวจจับค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดและต่ำสุดในเวลา  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล หลังจากการเกิดฟอลต์นำมาหาค่าการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาในสมการที่ [1] และใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการสร้างเงื่อนไขในการแยกประเภทการเกิดฟอลต์ซึ่งสามารถแยกประเภทฟอลต์ได้ถูกต้อง 93.33% และแสดงรายละเอียดการเปรียบเทียบความถูกต้องของทั้งสองวิธีการตามภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ผลเปรียบเทียบความถูกต้องของวิธีการแยกประเภทฟอลต์

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองวิธีการการแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูงได้ความถูกต้องแม่นยำมากกว่าการแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากองค์ประกอบความถี่สูงสามารถแยกประเภทฟอลต์ได้ง่ายกว่าการแยกประเภทฟอลต์ด้วยองค์ประกอบความถี่ต่ำ จะเห็นว่าเงื่อนไขที่สร้างจากการแยกด้วย

องค์ประกอบความถี่สูงใช้ตัวแปรน้อยและเข้าใจได้ง่าย บทความนี้ควรได้รับการพัฒนาความถูกต้องในการแยกประเภทฟอลต์ด้วยวิธีการอื่น ๆ ต่อไป เช่น วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S.R. Samantaray P.K. Dash. (2011). Decision Tree based discrimination between inrush current and internal faults in power transformer. *Electrical Power and Energy System*. (33): 1043-1048.
- [2] Adel Aktaibi and M.A.Rahman. (2011). A software design technique for differential protection of power transformers. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. 1456-1461.
- [3] S.Jazebi, B.Vahidi, S.H.Hosseinian, J.Faiz. (2011). Magnetizing inrush current identification using wavelet based Gaussian mixture models. *Simulation Modelling Practice and Theory*. (17): 991-1010.
- [4] S.Jazebi, B.Vahidi, M.Jannati. (2011). A novel application of wavelet based SVM to transient phenomena identification of power transformer. *Energy Conversion and Management*. (52): 1354-1363.
- [5] อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล. (2007). การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวินิจฉัยสภาวะผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์ วศ.ด. (ไฟฟ้า). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] A.A. Hossam Eldin, M.A. Refaey. (2011). A novel algorithm for discrimination between inrush current and internal fault in power transformer differential protection based on discrete wavelet transform. *Electric Power System Research*. (81): 19-24.
- [7] B. Vahidi, N. Ghaffarzadeh, S.H. Hosseinian. (2010). A wavelet-based method to discriminate internal fault from inrush current using correlation coefficient. *Electrical Power and Energy System*. (32): 788-793.
- [8] Simi P. Valsan, K.S. Swarup. (2008). Wavelet base transformer protection using high frequency power directional signal. *Electrical Power System Research*. (78): 547-558.
- [9] A.M. Mahmoud, M.F.EL-Naggar, E.H.Shehab\_Eldin a. (2012). A New Technique for Power Transformer Protection Based on Transient Components. *Energy Procedia*. (14): 318-324.
- [10] เซาว์วัฒน์ อภิลิทธิ์. (2011). การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (ไฟฟ้า). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] เกียรติกร กิตติวรารุณี. (2003). การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (ไฟฟ้า). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.