

การประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อแบ่งประเภทความผิดปกติของ  
ขดลวดภายในหม้อแปลง

APPLICATION OF SUPPORT VECTOR MACHINES ALGORITHM FOR  
CLASSIFICATION OF INTERNAL WINDING FAULT IN POWER TRANSFORMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-020-194

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อแบ่งประเภทความผิดปกติของ  
ขดลวดภายในหม้อแปลง

APPLICATION OF SUPPORT VECTOR MACHINES ALGORITHM FOR  
CLASSIFICATION OF INTERNAL WINDING FAULT IN POWER TRANSFORMER



จิตติพงษ์ กล่อมจิตต์

JITTIPHONG KLOMJIT

๑๔๒  
๑๔๒๓  
๒๕๕๗

เลขหมู่ 138507  
เลขทะเบียน EB ต.ล. 2558  
วันเดือนปี



12714690

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2557  
KMITL-2014-EN-M-020-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF SUPPORT VECTOR MACHINES ALGORITHM FOR  
CLASSIFICATION OF INTERNAL WINDING FAULT IN POWER 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  
2014  
KMITL-2014-EN-M-020-194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อแบ่งประเภทความผิดปกติของขดลวด  
ภายในหม้อแปลง

Thesis Title Application of Support Vector Machines Algorithm for Classification  
of Internal Winding Fault in Power Transformer

นักศึกษา นายจิตติพงษ์ กล่อมจิตต์

รหัสประจำตัว 54610614

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อรรถพล เจริญพิทักษ์กุล

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-020-194

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	
ผศ.ดร.อรรถพล	เจริญพิทักษ์กุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์เมชชีนเพื่อแบ่งประเภท ความผิดปกติของขดลวดภายในหม้อแปลง
นักศึกษา	นายจิตติพงษ์ กล่อมจิตต์
รหัสประจำตัว	54610614
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศศ.ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอเทคนิคการป้องกันแบบใหม่โดยการใช้วิธีการแปลงเวฟ  
เล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อแยกแยะความผิดปกติภายในหรือภายนอกหม้อแปลง การจำลองความผิดปกติ  
ภายในหม้อแปลงใช้โปรแกรม (ATP/EMTP) และนำสัญญาณของกระแสตรงที่ได้มาผ่านการแปลงเวฟ  
เล็ตแบบเต็มหน่วย ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างเงื่อนไขในการคัด  
แยกประเภทความผิดปกติ นอกจากนี้ยังใช้วิธีการซอฟต์แวร์เมชชีนในการคัดแยกประเภท  
ความผิดปกติและนำผลความถูกต้องที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีการคัดแยกประเภทความผิดปกติด้วยการ  
สร้างเงื่อนไข ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถคัดแยกประเภทความผิดปกติได้ผลความถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ  
โดยที่วิธีการของซอฟต์แวร์เมชชีนจะได้รับความถูกต้องสูงที่สุด

Thesis Title	Application of Support Vector Machines Algorithm for Classification of Internal Winding Fault in Power Transformer
Student	Mr. Jittiphong Klomjit
Student ID.	54610614
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Atthapol Ngaopitakkul

## ABSTRACT

This research aims to present a new technique using discrete wavelet transform (DWT) to classify between external fault and internal winding fault in power transformer. Fault conditions of the transformer are simulated using alternative transient program/electromagnetic transients program (ATP/EMTP) in order to obtain current signal. The DWT is used to decomposition fault signal of different current. The coefficient from DWT is used to analysis and decision algorithm for discrimination external fault or internal winding fault. In addition, that use support vector machine (SVM) to classify fault of power transformer. Accuracy acquire from simulation are compared with decision algorithm. The results show that the proposed technique is able to discriminate fault of power transformer and gives satisfactory accuracy which SVM gives the most accuracy.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก ผศ.ดร. อรรถพล เง่าพิภักษ์กุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆที่นักศึกษาในห้อง Lab ทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆที่มอบแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวสำหรับการสนับสนุนและกำลังใจที่ดีกับผมเสมอ มาจนสำเร็จการศึกษา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิตติพงษ์ กล่อมจิตต์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวโน้มงานวิจัยที่ผ่านมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	5
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ระบบการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	8
2.1.1 การตรวจจับฟอลต์เชิงกล.....	8
2.1.2 การตรวจจับฟอลต์เชิงไฟฟ้า.....	10
2.2 การแปลงเวฟเล็ต.....	12
2.3 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน.....	16
2.3.1 ซัพพอร์ตเวกเตอร์สำหรับการแบ่งกลุ่ม.....	16
2.3.2 การจำแนกข้อมูลโดยระนาบไม่เป็นเชิงเส้น.....	21
2.3.3 ผลกระทบของพารามิเตอร์เคเนลกับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน.....	23
2.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค.....	25
บทที่ 3 การจำลองฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง.....	27
3.1 แบบจำลองการเกิดฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	27
3.1.1 แบบจำลอง BCTTRANS ในสภาวะปกติ.....	27
3.1.2 แบบจำลอง BCTTRANS ในสภาวะฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง.....	31
3.2 ระบบจำลองฟอลต์.....	37
3.2.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์.....	37
3.2.2 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	37
3.2.3 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์.....	38
3.2.4 สัญญาณที่ได้จากการจำลองฟอลต์.....	38
บทที่ 4 การวิเคราะห์ฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	43
4.1 การตรวจจับการเกิดฟอลต์.....	43
4.2 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 พอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน.....	49
4.2.2 พอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ.....	53
4.2.3 พอลต์ภายนอกหม้อแปลง.....	59
4.3 อัลกอริทึมการสร้างเงื่อนไขของค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทพอลต์.....	63
4.4 แนวทางการนำข้อมูลจริงมาประยุกต์ใช้งาน.....	67
บทที่ 5 การวิเคราะห์พอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังร่วมกับซอฟต์แวร์เวกเตอร์แมชชีน.....	69
5.1 การเตรียมข้อมูล.....	69
5.2 โครงสร้างกระบวนการระบุชนิดพอลต์.....	69
5.3 ค่าพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์เวกเตอร์แมชชีน.....	72
5.3.1 เคอร์เนล.....	72
5.3.2 ซอฟต์แวร์จิ้น.....	74
5.3.3 ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น.....	75
5.3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	75
บทที่ 6 ผลการจำลอง.....	78
6.1 ผลความถูกต้องในการตรวจจับพอลต์.....	78
6.2 ผลความถูกต้องในการแยกระหว่างพอลต์ภายในและพอลต์ภายนอกหม้อแปลง.....	79
6.3 ผลความถูกต้องในการระบุประเภทพอลต์ภายในหม้อแปลง.....	80
6.3.1 ผลแสดงรายละเอียดความถูกต้องในการระบุพอลต์ภายในหม้อแปลงภายในหม้อแปลงที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	81
บทที่ 7 สรุปผล.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก ก.....	94
ภาคผนวก ข.....	98
ภาคผนวก ค.....	136
ประวัติผู้จัดทำโครงการวิจัย.....	158

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ช่วงความถี่ของการแปลงเวฟเลิตแต่ละสเกล.....	44
4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเลิตในการตรวจจับพอลต์.....	46
4.3 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน ด้านแรงสูงที่ระยะต่าง ๆ.....	49
4.4 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน ด้านแรงสูงที่มุมต่าง ๆ.....	50
4.5 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน ด้านแรงต่ำที่ระยะต่าง ๆ.....	51
4.6 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน ด้านแรงต่ำที่มุมต่าง ๆ.....	52
4.7 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงสูงที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b.....	53
4.8 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงสูงที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a.....	54
4.9 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงสูงที่มุมต่าง ๆ.....	55
4.10 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงต่ำที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b.....	56
4.11 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงต่ำที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a.....	57
4.12 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงต่ำที่มุมต่าง ๆ.....	58
4.13 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบสายส่งลัดวงจรลงดิน ด้านแรงสูงที่ระยะต่าง ๆ ของสายส่ง.....	59
4.14 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบสายส่งลัดวงจรลงดิน ด้านแรงสูงที่มุมต่าง ๆ ของสายส่ง.....	60
4.15 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบสายส่งลัดวงจรลงดิน ด้านแรงต่ำที่ระยะต่าง ๆ ของสายส่ง.....	61
4.16 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของพอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบสายส่งลัดวงจรลงดิน ด้านแรงต่ำที่มุมต่าง ๆ ของสายส่ง.....	62
4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเลิตกรณีพอลต์ภายในหม้อแปลง.....	64
4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเลิตกรณีพอลต์ภายนอกหม้อแปลง.....	64
4.19 สรุปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการแบ่งแยกพอลต์ด้วยอัลกอริทึม.....	66
5.1 เอาท์พุทโมเดลของซอฟต์แวร์เวกเตอร์แมชชีนสำหรับ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารการแบ่งพอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต 71 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ VI

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.2	เอาร์ทพุทโมเดลของซีพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการระบุชนิดพอลต์..... 72
5.3	สรุปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการแบ่งแยกพอลต์ด้วยซีพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีน..... 77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	รีเลย์ป้องกันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่.....	2
2.1	รูปแบบเริ่มต้นการติดตั้งบุคโฮลซ์รีเลย์.....	9
2.2	บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchhol relay).....	9
2.3	หลักการทํางานของรีเลย์แบบผลต่าง (Differential relay).....	11
2.4	คุณลักษณะการทํางานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ.....	11
2.5	วงจรป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของเปอร์เซ็นต์ผลต่างกระแส.....	12
2.6	แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet.....	12
2.7	แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด.....	13
2.8	แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ด.....	14
2.9	แสดงการกระจายสัญญาณสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด.....	14
2.10	แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ด.....	14
2.11	แสดงลักษณะการแปลงเวฟเล็ดโดยใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ.....	16
2.12	แสดงการจำแนกด้วยเส้นเส้นตรง (a) ตัวจำแนกแบบที่ 1 (b) ตัวจำแนกแบบที่ 2.....	17
2.13	แสดงมาร์จิ้นกับซัพพอร์ตเวกเตอร์ สำหรับการแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงของข้อมูลตัวอย่าง.....	17
2.14	แสดงตัวอย่างการจำแนกกลุ่มข้อมูลหลายกลุ่ม.....	21
2.15	ประโยชน์การแปลงข้อมูลจากปริภูมิอินพุตไปยังปริภูมิมิติสูง.....	22
2.16	แสดงถึงผลกระทบของค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้นกับเส้นแบ่งคลาส.....	23
2.17	ผลกระทบของดีกรีของ โพลีโนเมียลเคอร์เนล.....	24
2.18	ผลของตัวแปรความกว้างของเกาส์เซียนเคอร์เนลสำหรับค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น.....	24
2.19	แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	26
2.20	ตัวอย่างการหาค่าตอบของกลุ่มอนุภาค.....	26
3.1	แสดงหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด.....	28
3.2	แสดงขดลวดของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร.....	31
3.3	แสดงแบบจำลองหม้อแปลงเฟสเดียวเมื่อต่อตัวเก็บประจุ.....	37
3.4	แสดงระบบจำลองฟอลต์ภายในหม้อแปลงขนาด 50 MVA.....	37
3.5	แสดงวงจรการจำลองฟอลต์ของขดลวด AC ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20%.....	39
3.6	รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20% ด้านแรงดันสูง.....	39
3.7	รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20% ด้านแรงดันต่ำ.....	40
3.8	แสดงวงจรการจำลองฟอลต์ของขดลวด AC ลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะขดลวด 10% และ 20%.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ลัดวงจรระหว่างรอบ ที่ระยะขดลวด 10% และ 20% ด้านแรงดันสูง..... 41
3.10	รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ลัดวงจรระหว่างรอบ ที่ระยะขดลวด 10% และ 20% ด้านแรงดันต่ำ..... 42
4.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์ฟอลต์โดยรวม..... 44
4.2	เงื่อนไขการตรวจจับการเกิดฟอลต์..... 45
4.3	แสดงการตรวจจับการเกิดฟอลต์..... 46
4.4	การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 กรณีหม้อแปลงปกติ (Normal)..... 47
4.5	การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5กรณีเกิดฟอลต์ ภายนอกหม้อแปลงด้านแรงดันสูง (External fault at high voltage side)..... 47
4.6	การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5กรณีเกิดฟอลต์ ภายในหม้อแปลงด้านแรงดันสูงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault at high voltage side)..... 48
4.7	การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5กรณีเกิดฟอลต์ ภายในหม้อแปลงด้านแรงดันสูงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Turn to turn fault)..... 48
4.8	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ..... 49
4.9	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ..... 50
4.10	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ..... 51
4.11	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ..... 52
4.12	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบ ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b..... 53
4.13	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบ ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a..... 54
4.14	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบที่มุมต่าง ๆ..... 55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบ ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b.....56
4.16	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบ ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a.....57
4.17	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบที่มุมต่าง ๆ.....58
4.18	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ.....59
4.19	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ.....60
4.20	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ.....61
4.21	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดพอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ.....62
4.22	แผนผังแสดงเงื่อนไขแสดงการแบ่งแยกประเภทพอลต์.....63
4.23	ตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแบ่งประเภทการเกิดพอลต์.....65
4.24	ขั้นตอนแนวทางการวิเคราะห์สัญญาณด้วยข้อมูลจริง.....67
5.1	แสดงโครงสร้างของซอฟต์แวร์วิเคราะห์แมชชีน ที่ใช้ในการแบ่งแยกประเภทการเกิดพอลต์.....70
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้อง ในการระบุประเภทพอลต์ของเกาส์เซียนเคอร์เนล.....73
5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้อง ในการระบุประเภทพอลต์ของโพลีโนเมียลเคอร์เนล.....74
5.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซอฟต์แวร์จิ้นกับความถูกต้องในการระบุประเภทพอลต์.....74
5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเงื่อนไขเริ่มต้นกับความถูกต้อง ในการระบุประเภทพอลต์.....75
5.6	แสดงแผนผังกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ของซอฟต์แวร์วิเคราะห์แมชชีน.....76
6.1	กราฟแสดงความถูกต้องในการตรวจจับพอลต์.....78
6.2	กราฟแสดงความถูกต้องในการแยกพอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลง.....79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.3	กราฟแสดงความถูกต้องในการระบุประเภทพอลต์ภายใน.....	80
6.4	กราฟแสดงความถูกต้องของพอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูง.....	81
6.5	กราฟแสดงความถูกต้องของพอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำ.....	82
6.6	กราฟแสดงความถูกต้องของพอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงดันสูงเมื่อปรับขดลวดย่อย a .....	83
6.7	กราฟแสดงความถูกต้องของพอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงดันสูงเมื่อปรับขดลวดย่อย b .....	83
6.8	กราฟแสดงความถูกต้องของพอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงดันต่ำเมื่อปรับขดลวดย่อย a .....	84
6.9	กราฟแสดงความถูกต้องของพอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงดันต่ำเมื่อปรับขดลวดย่อย b .....	85
7.1	กราฟแสดงความถูกต้องในการแยกพอลต์ทั้งสองวิธีการ.....	87



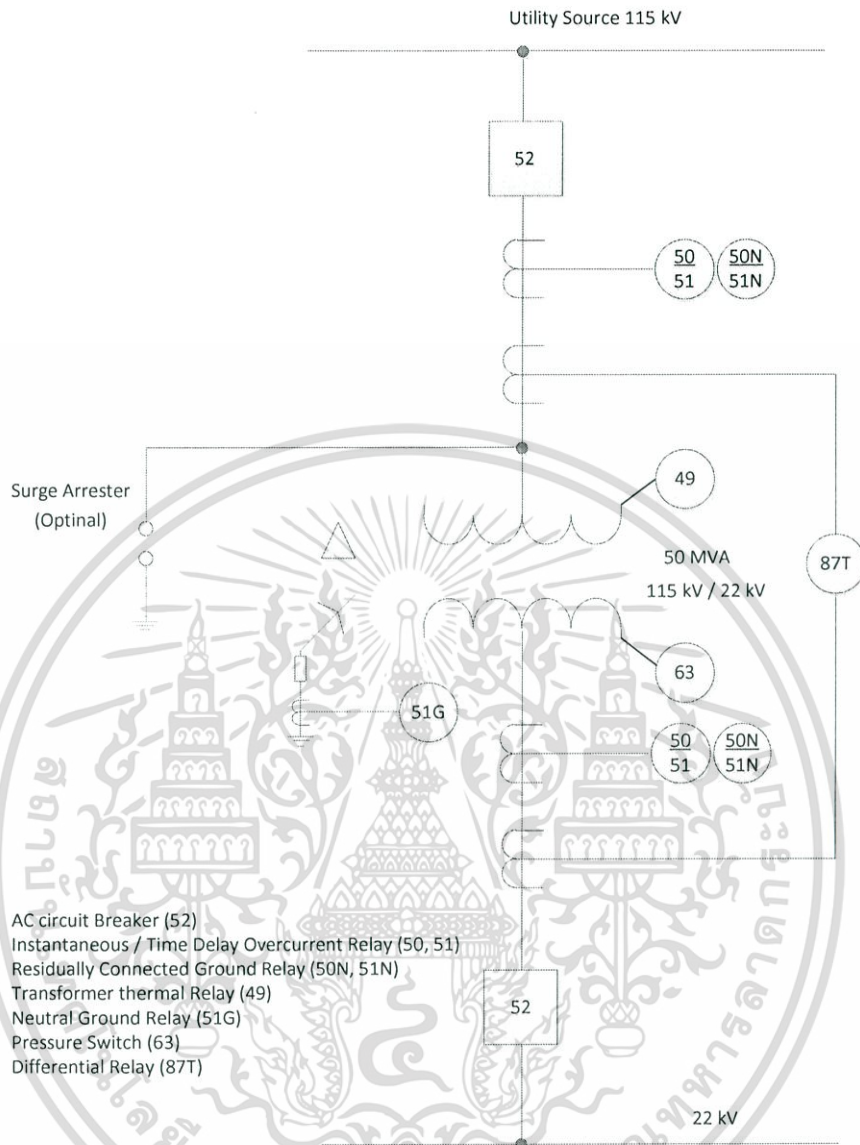
# บทที่ 1

## บทนำ

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้เชื่อมระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจึงต้องมีระบบป้องกันที่เชื่อถือได้ ด้วยเหตุที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อย่างอื่นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าหรือฟอลต์ (Fault) จะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบการผลิตทางอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะเมื่อเกิดกับระบบใหญ่ ๆ ก็อาจเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาไฟฟาดับในบริเวณกว้าง (Blackout) ได้อีกด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง การเลือกระบบป้องกันที่เหมาะสมสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องพิจารณาหลักเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์เนื่องจากหม้อแปลงมีขนาดแตกต่างกันมากในระบบส่งและระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นกรณีหม้อแปลงขนาดเล็กจึงควรป้องกันในลักษณะที่ง่ายและมีราคาถูกเช่น การใช้ฟิวส์ สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ก็จำเป็นต้องออกแบบระบบป้องกันให้เหมาะสมตามความสำคัญของหม้อแปลงนั้นดังแสดงในรูปที่ 1.1

### 1.1 แนวโน้มงานวิจัยที่ผ่านมา

ปัจจุบันอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือตรวจสอบข้อมูลจากแก๊สเช่น รีเลย์ความดัน (Pressure relay), รีเลย์ตรวจจับแก๊ส (Gas-detector relay) ฯลฯ ส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน (Dissolved Gas Analysis: DGA) โดยมีวิธีการทดสอบหลายรูปแบบด้วยกันเช่น การทดสอบวิธีตรวจสอบแก๊สที่สำคัญ (Key gas), การทดสอบวิธีหาอัตราส่วนของโรเจอร์ (Rogers Ratio), การทดสอบวิธีสามเหลี่ยมดูวัล (Duval Triangle) ซึ่งแต่ละวิธีเป็นที่ยอมรับและนิยมกันอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการตรวจจับก๊าซที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (DGA) [1]-[10] เพื่อแยกประเภทของความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเพราะหากเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีฉนวนภายในเป็นแบบน้ำมันจะเกิดก๊าซเนื่องจากมีความร้อนหรือการเบรกดาว์นทำให้ให้น้ำมันเดือดและแตกตัวเป็นก๊าซ ก๊าซที่ตรวจจับได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และทำการตรวจสอบว่าหม้อแปลงนี้มีปัญหาผิดปกติอย่างไร เพื่อนำมาหาวิธีป้องกันหรือแก้ไขต่อไป ซึ่งการวิเคราะห์อาจจะไม่ใช่วิเคราะห์หรือทดสอบด้วยวิธีการเดียวแต่ทดสอบหลาย ๆ วิธีการ เพราะจะทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น วิธีการวิเคราะห์ก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงเป็นการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ตั้งแต่การเกิดความร้อนสูงเกินภายในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดดิสชาร์จบางส่วน หรือแม้กระทั่งการเกิดเบรกดาว์น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่หม้อแปลงไฟฟ้าต้องเป็นแบบฉนวนน้ำมันเท่านั้นหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ระดับน้ำมัน ซึ่งวิธีการนี้มีการตรวจสอบที่ค่อนข้างจะยุ่งยากเพราะต้องเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงมาตรวจสอบหากก๊าซที่เกิดขึ้นภายในแล้วนำมาวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้น กลุ่มที่สองคือตรวจสอบขนาดของกระแสลัดวงจรโดยตรง [11]-[27] สำหรับอุปกรณ์วัดกระแสได้แก่ รีเลย์กระแสเกิน (Over-current relay) รีเลย์แบบผลต่าง (Differential relay) และรีเลย์ป้องกันกระแสผิดปกติลงดิน (Ground fault relay) เป็นต้น



รูป 1.1 รีเลย์ป้องกันสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ [46]

ระบบการป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่มีความน่าเชื่อถือสูงและมีความรวดเร็วในการทำงานคือ การใช้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection relay) เป็นวิธีป้องกันที่กำหนดขอบเขตการป้องกันจากเครื่องวัดกระแสด้านปฐมภูมิ (Primary) ถึงเครื่องวัดกระแสด้านทุติยภูมิ (Secondary) จะตัวตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะ รีเลย์จะต้องทำงานอย่างถูกต้องและรวดเร็วเพื่อตรวจจับฟอลต์ในขอบเขตที่กำหนดไว้ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบต้องมีการตรวจหารูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นเพื่อแยกแยะระหว่างฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) หรือฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก (External Fault) ของตัวหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยที่รีเลย์จะสั่งทริปในทุก ๆ กรณีของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) และจะต้องไม่ทำงาน (Block) ในกรณีที่ไม่ใช่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหรือเกิดกระแสอินรัช (Inrush Current) ซึ่งกระแสอินรัชจะมีค่าสูง 6-8 เท่าของกระแสปกติซึ่งอาจทำให้รีเลย์แบบผลต่างกระแสทำงานเพราะ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีสงวนลิขสิทธิ์ไว้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มองว่าเกิดฟอลต์ขึ้น งานวิจัยโดยทั่วไปส่วนมากจะทำการแยกฟอลต์ภายในกับกระแสอินรัช ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งการแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบการพัฒนาจากการแปลงฟูเรียร์ คือสามารถเลื่อนตำแหน่งและกำหนดคาบเวลาในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับช่วงเวลาที่วิเคราะห์ได้ ทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วมากขึ้น เช่น [14]-[16] ใช้เวฟเล็ตในการวิเคราะห์เพื่อแบ่งแยกกระแสอินรัชและฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า [14] ใช้การจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าจากโปรแกรม EMTP และใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตเพื่อวิเคราะห์สัญญาณกระแสผลต่างที่ได้จากการจำลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์สัญญาณทุก ๆ ½ ไซเคิล หรือ 10 ms และนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของการแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตในแต่ละครั้งมาหาอัตราส่วนระหว่างค่าก่อนหน้ากับค่าปัจจุบัน ถ้าค่าอัตราส่วนของเฟสไดเฟสหนึ่งมีค่าสูงกว่าเฟสอื่น 2.5 เท่า แสดงว่าเกิดกระแสอินรัชขึ้น แต่ถ้ามีค่าอัตราส่วนของทุกเฟสแสดงขึ้นที่ค่าใกล้เคียงกันและไม่เกินกว่า 2.5 เท่า แสดงว่าเกิดฟอลต์ขึ้นภายในหม้อแปลง ในส่วนของ [15] นั้นจะใช้อัตราส่วนของค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์มีฐาน (Median Absolute Deviation : MAD) จากการแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 4 ต่อค่าการแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกล 3 ถ้ามีค่าสูงสุดมากกว่า 1 ค่าแสดงว่าเกิดกระแสอินรัช แต่ถ้ามีค่าสูงสุดเพียง 1 ค่าแสดงว่าเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง และ [16] ใช้ค่าพลังงานรวมของการแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 5 ถ้าค่าพลังงานรวมมีค่าสูงขึ้นและลักษณะคงที่ในเวลาต่อมาแสดงว่าเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง แต่ถ้าพลังงานรวมมีลักษณะสูงขึ้นและลดลงในหลาย ๆ ครั้งแสดงว่าเกิดกระแสอินรัชขึ้น จากการศึกษาในหลาย ๆ งานวิจัย โดยทั่วไปการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตจะทำการแยกองค์ประกอบความถี่ออกเป็นช่วงสเกลที่ 1-5 เพราะถ้ามากกว่านี้สัญญาณที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนเนื่องจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตเป็นการกรองข้อมูลด้วยการนำฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณมาเรียงต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนความถี่ต่ำมาทำการแยกความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง หากเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะส่งผลแบบลูกโซ่ต่อเนื่องกันไป เทคนิคในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมีหลากหลายรูปแบบด้วยกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบและกระบวนการวิเคราะห์ของแต่ละบทความ ภายหลังจากได้มีการนำเทคนิคของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) มาวิเคราะห์ร่วมกับวิธีการพื้นฐานต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อนเริ่มตั้งแต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีด้วยตรวจสอบแก้ส่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ [4]-[10] หรือวิธีตรวจวัดขนาดของกระแสไฟฟ้าวร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ [22]-[27],[29]-[34]

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้หลายรูปแบบด้วยกัน วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network : NN) เป็นวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เพราะมีระบบความคิดที่มึการทำงานในลักษณะคล้ายกับมนุษย์ นักวิจัยด้านไฟฟ้ากำลังจึงมีแนวคิดที่ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาแก้ปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลังหลายปัญหาด้วยกัน เช่น ปัญหาโหลดไหล (Load flow) [28], การพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load forecasting) [29], ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างมีประสิทธิภาพ (Economics load dispatch) [30] และการแบ่งแยกประเภทข้อมูล (Classification) การแบ่งแยกข้อมูลนั้นเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ มาให้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้และทำการแบ่งแยกประเภทให้ ซึ่งได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า [6]-[8], [22]-[27] โดยที่ [6]-[8] เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบแก๊สที่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (DGA) โดยจะใช้ความเข้มข้นของแก๊สแต่ละตัว เป็นข้อมูลอินพุทให้กับวิธีโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการเรียนรู้และแบ่งแยกประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ยังไม่ผ่านการแก้ไข อาจมีข้อผิดพลาดในการพิมพ์ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของข้อมูลต่อไป ซึ่งจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ [22]-[27] แต่จะเปลี่ยนข้อมูลอินพุตเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต โดยที่วิธีโครงข่ายประสาทเทียมก็ยังมีวิธีการย่อยในการวิเคราะห์อีก เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น (Probabilistic Neural Network : PNN) และ วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Probabilistic Neural Network : BPNN) ทั้งสองมีข้อเสียที่แตกต่างกัน วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบความน่าจะเป็น เป็นการวิเคราะห์แบบป้อนค่าไปข้างหน้าจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลได้รวดเร็ว แต่ถ้าข้อมูลมีความซับซ้อนมากอาจเกิดความผิดพลาดได้ แต่ถ้าเป็นวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับจะนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากการวิเคราะห์ในตอนแรกมาปรับแก้ไขและป้อนค่ากลับเข้าไปใหม่ จะทำให้ค่าความผิดพลาดลดน้อยลงซึ่งทำให้ระยะเวลาวิเคราะห์นานขึ้น และนอกจากวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแล้วยังมี วิธีการซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine :SVM) [22],[31]-[34] เป็นอัลกอริทึมหนึ่ง ที่ใช้ในการแบ่งประเภทของข้อมูลเป็นหลัก เพราะมีพื้นฐานมาจากการแบ่งข้อมูลเชิงเส้น (linear classification) ร่วมกับการเรียนรู้ที่อาศัยหลักทฤษฎีการเรียนรู้ทางสถิติ (Statistical Learning Theory) พร้อมกับทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Theory) ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนถือเป็นโมเดลเชิงเส้น แต่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหามีความซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยการแปลงข้อมูลไปยังอีกปริภูมิหนึ่งที่มีจำนวนมิติมากกว่าเดิมโดยอาศัยเคอร์เนลฟังก์ชัน (Kernel Function) ทำให้แก้ไขปัญหได้ง่ายยิ่งขึ้น [32],[33] เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบแก๊สในน้ำมัน (DGA) เข้ามาเป็นอินพุตให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อทำการแบ่งแยกข้อมูลการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง หรือ [34] เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมาใช้เป็นอินพุตให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อใช้การตัดสินใจของรีเลย์หากเป็นฟอลต์ภายในหม้อแปลงให้รีเลย์สั่งปลดวงจร หากไม่ใช้รีเลย์ไม่ต้องทำงาน เนื่องจากความสามารถที่กล่าวมาของทั้งสองวิธีการในกระบวนการแบ่งแยกข้อมูลนั้น จึงมีการศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องในการแบ่งแยกข้อมูลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยมากแล้วซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจะให้ความถูกต้องแม่นยำสูงกว่าโครงข่ายประสาทเทียม เช่นในด้านคณิตศาสตร์ [35]-[36] การเงิน [37] หรือด้านของวิศวกรรม [38]

ทั้งนี้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนยังมีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องปรับค่าได้เพื่อให้ซัพพอร์ตเวกเตอร์มีรูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด จึงมี [39],[40] ได้นำวิธาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เพื่อให้พารามิเตอร์ที่ได้มีความเหมาะสมไม่เกิดการแบ่งข้อมูลฝักฝืนที่ดีเกินไป (Over-fitting) เพราะจะทำให้เมื่อป้อนค่าของข้อมูลทดสอบหรือข้อมูลกรณีตัวอย่างแล้วจะเกิดความผิดพลาดมาก ซึ่งก็ยังมีอีกหนึ่งวิธีที่จะช่วยในการปรับค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์ให้มีค่าที่เหมาะสมคือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [41],[42] ทั้งสองวิธีเป็นเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์อีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในการค้นหา เพิ่มประสิทธิภาพ และเรียนรู้ (Search, Optimization, and Learning) ด้วยการเลียนแบบทฤษฎีการวิวัฒนาการทางธรรมชาติ การทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ใช้การจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปแบบเหมือนสิ่งมีชีวิตที่ประกอบด้วยโครโมโซม (Chromosome) และยีน (Gene) การค้นหาผลลัพธ์ของปัญหาใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์ประกอบด้วย การสืบพันธุ์ (Reproduction) การกลายพันธุ์ (Mutation) การแลกเปลี่ยนยีน (Reproduction) และการคัดเลือกประชากร (Selection) วิธีการทางพันธุศาสตร์เหล่านี้ทำหน้าที่ปรับปรุงประชากรจากรุ่นหนึ่งสู่อีกรุ่นหนึ่งเพื่อให้อยู่รอดต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนวิธาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ใช้หลักพฤติกรรมทางสังคม การเคลื่อนย้ายของฝูงนกหรือ

ปลาเพื่อค้นหาอาหาร วิธีหาค่าที่ดีที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคใช้หลักของการแทนปัญหาในรูปประชากรคล้ายวิธีเชิงพันธุกรรมแต่วิธีหาค่าที่ดีที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคมีสิ่งที่เด่นกว่าที่การแบ่งปันข้อมูลระหว่างประชากร เป็นข้อมูลที่ใช้ร่วมกันเพื่อช่วยให้ประชากรค้นหาผลลัพธ์และแก้ปัญหาที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วขึ้น แตกต่างจากวิธีเชิงพันธุกรรมที่ประชากรต้องแข่งขันกันเพื่อค้นหาผลลัพธ์และไม่มี การแบ่งปันข้อมูลของทิศทางการค้นหาผลลัพธ์ของปัญหา จึงมีงานวิจัย [43],[44] ที่ศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ของความถูกต้องแม่นยำในการหาค่าตอบโดยการใช้ วิธีเชิงพันธุกรรมและวิธีหาค่าที่ดีที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค นำมาแก้ปัญหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Numerical Optimization) เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องและความรวดเร็วในการหาค่าตอบ ผลสรุปว่าวิธีหาค่าที่ดีที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคมีความถูกต้องและรวดเร็วกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ไขปัญหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์

จากที่กล่าวมางานวิจัยเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าจะเน้นที่การแบ่งแยกฟอลต์ภายในหม้อแปลงกับกระแสอินรัชของหม้อแปลง ซึ่งเมื่อก้าวถึงฟอลต์ภายในหม้อแปลงแล้วยังไม่ได้มีการวิเคราะห์ต่อไปว่าเป็นฟอลต์ภายในเป็นชนิดใดหรือเกิดที่ขดลวดไหนของหม้อแปลง วิธีการตรวจสอบแก๊สในน้ำมันหม้อแปลง (DGA) สามารถแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงได้ แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดที่ขดลวดใดของหม้อแปลง และด้วยการตรวจสอบแก๊สในน้ำมันหม้อแปลงเป็นไปด้วยความยุ่งยาก และจะต้องมีเครื่องมือในการแยกแก๊สดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ด้วยวิธีการตรวจวัดกระแสโดยใช้เทคนิคของการแปลงเวฟเล็ต (DWT) วิเคราะห์การตรวจจับและแบ่งแยกประเภทของฟอลต์ นอกจากนี้ยังได้นำวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเข้ามาช่วยในการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนด้วยวิธีหาค่าที่ดีที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO)

## 1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการศึกษา

- 1) เพื่อทำการวิเคราะห์และตรวจจับสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะมีประโยชน์อย่างมากทางด้านการออกแบบระบบป้องกัน
- 2) เพื่อระบุประเภท และรูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยจะทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้น
- 3) เพื่อระบุประเภทที่เกิดฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีประโยชน์ใน ส่วนของการซ่อมบำรุง

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์คือเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ แทรกอยู่ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของฟอลต์ โดยข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูง (Detail) และองค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของในหลายสเกลหรือหลายช่วงความถี่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมาวิเคราะห์เพื่อหาวิธีการตรวจจับฟอลต์และสร้างเงื่อนไขแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์ ต่อมานำข้อมูลจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงเวฟเล็ดมาทำการประมวลผลโดยใช้หลักการปัญญาประดิษฐ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองรูปแบบนี้จะนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำในการจำแนกประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า งานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการนำเทคนิคการแปลงเวฟเล็ดและปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ได้แนวความคิดรูปแบบใหม่ในการป้องกันหรือตรวจสอบความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

#### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ภายในแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ และภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม ATP/EMTP เพื่อศึกษารูปแบบของสัญญาณของกระแสฟอลต์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 3600 กรณี ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA ชนิด DY1
- 2) ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย(DWT) ของโปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในการตรวจจับฟอลต์
- 3) ทำการศึกษารูปแบบการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ด้วยการสร้างเงื่อนไขโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ด
- 4) ทำการศึกษารูปแบบการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ด้วยวิธีการปัญญาประดิษฐ์ด้วยข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดโดยอาศัยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM) ของโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในฝึกสอนและวิเคราะห์เพื่อระบุประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

#### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1) การศึกษารูปแบบของการแปลงเวฟเล็ดที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติ
- 2) ทำการจำลองสัญญาณความผิดปกติที่แตกต่างกัน 3600 ตัวอย่างโดยโปรแกรม EMTP/ATPDraw สำหรับความผิดปกติทั้งภายในและภายนอกหม้อแปลงขนาด 50 MVA แล้วนำสัญญาณความผิดปกติมาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการวิเคราะห์และระบุประเภทความผิดปกติ
- 3) ศึกษาการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์โดยการสร้างเงื่อนไขด้วยข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดโดยจะแบ่งข้อมูลดังนี้คือ ชุดข้อมูลสร้างเงื่อนไขจำนวน 1800 ชุดข้อมูลชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบจำนวน 1800 ชุดข้อมูล
- 4) ศึกษาการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์โดยวิธีการซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน และนำมาใช้เพื่อหาเกณฑ์การระบุประเภทความผิดปกติของแต่ละระบบโดยจะแบ่งข้อมูลดังนี้คือ ชุดข้อมูลฝึกหัดจำนวน 1800 ชุดข้อมูลชุดข้อมูลที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทดสอบเกณฑ์การระบุประเภทความผิดพลาดจำนวน 900 ข้อมูล และชุดข้อมูล  
กรณีศึกษา 900 ข้อมูล
- 5) นำผลที่ได้จากการระบุประเภทความผิดพลาดทั้งสองวิธีการ มาเปรียบเทียบ  
ความถูกต้องแม่นยำ
  - 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การจำแนกประเภทความผิดพลาดในระบบ  
กำลังไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตและซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน
- 2) สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตและซัพพอร์ต  
เวกเตอร์แมชชีนไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ ได้
- 3) สามารถวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้ ซึ่ง  
จะเป็นประโยชน์สำหรับนักวิจัย และผู้ที่สนใจอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและ  
พัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้าลูกแรกถูกผลิตขึ้นปี ค.ศ. 1885 เป็นหม้อแปลงกระแสสลับขนาดเล็กแบบแกนเหล็กล้อมขดลวด (shell-form transformer) ทำปีต่อจากนั้นได้พัฒนาเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งเป็นจุดเริ่มพัฒนาโครงข่ายของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ความต้องการกำลังไฟฟ้าพุ่งสูงขึ้นมาจากการพัฒนาในช่วงทศวรรษ 1920 โครงข่ายส่งจ่ายขนาดใหญ่ถูกเชื่อมต่อทำให้ขนาดของกระแสลัดวงจรมีความสำคัญกับขดลวดของหม้อแปลงเนื่องจากผลกระทบทางไดนามิก (dynamic impact) ของกระแสลัดวงจรเริ่มต้นทำให้อาร์เรสเตอร์และบุชชิ่งเสียหาย ถ้าขาดอุปกรณ์ป้องกันอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้หรือกระแสไฟฟ้าดับได้ อุปกรณ์ชิ้นแรกในระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าคือ ฟิวส์ ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1890 โดยชาวเยอรมัน ใช้ในการขัดขวางกระแสลัดวงจรได้อย่างรวดเร็ว ฟิวส์จะทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าในพื้นที่มีค่าสูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ตั้งไว้ ฟิวส์มีช่วงการทำงานที่น้อยของกระแสที่ตั้งไว้ ถ้ามีการเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากจะไม่เหมาะสม จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ตัดวงจรและรีเลย์

### 2.1 ระบบการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า [45]-[47]

รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) คือ อุปกรณ์หลักในระบบป้องกันเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและตัดสินใจว่าจะสั่งปลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดปัญหาออกจากระบบไฟฟ้าโดยเร็วเพื่อไม่ให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย รีเลย์ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนามาให้เหมาะสมกับการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่ละแบบจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสำคัญและขนาดของหม้อแปลง

รีเลย์อาจแยกออกได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับประเภทของการแยก หากแบ่งตามประเภทของการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นหรืออินพุทของรีเลย์สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ รีเลย์ป้องกันเชิงกล (Mechanical Faults Detection Relay) และรีเลย์ป้องกันเชิงไฟฟ้า (Electrical Faults Detection Relay) โดยที่รูปแบบการตรวจจับความผิดปกติแต่ละชนิดนั้นจะมีหลักการและวิธีการที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน

#### 2.1.1 การตรวจจับฟอลต์เชิงกล (Mechanical Faults Detection)

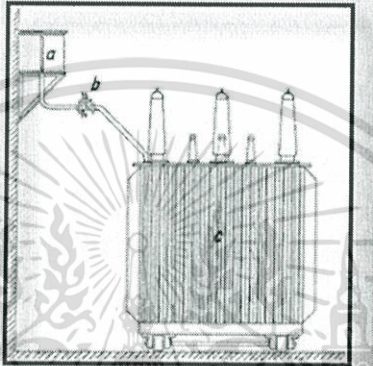
เป็นระบบป้องกันที่อาศัยสัญญาณทางเชิงกล เช่น อาศัยแก๊สลอยตัวภายในหม้อแปลงหรืออาศัยความร้อน รีเลย์ป้องกันเชิงกลออกแบบไว้สำหรับป้องกันปัญหาที่เกิดในตัวหม้อแปลง

1) รีเลย์ความร้อน (Thermal relay) การตรวจจับความร้อนของหม้อแปลงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า รูปแบบความร้อนสามารถนำมาใช้เพื่อป้องกันการเกิดกระแสเกิน เนื่องจากการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องยอมให้มีการจ่ายโหลดเกินน้อยที่สุด

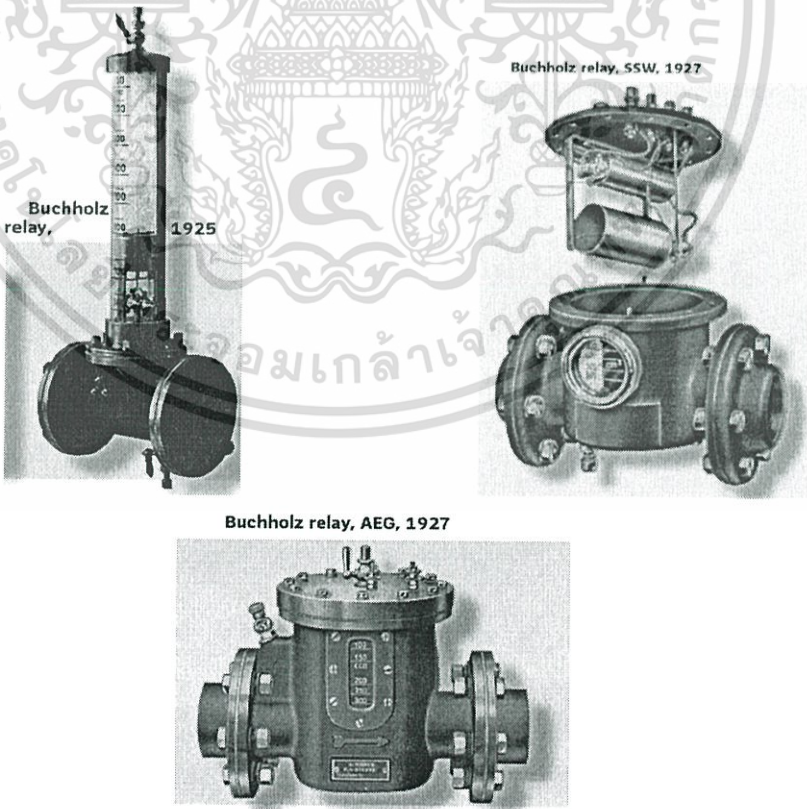
2) บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchholz relay) เป็นอุปกรณ์ตัวแรกที่ไม่ตรวจจับผลต่างกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจากระดับที่แน่นอน อุปกรณ์นี้ใช้การทำงานทางกลในการตรวจจับแก๊สที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดในน้ำมันหม้อแปลง หลักการทำงานก็คือ เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในหม้อแปลงบางครั้งส่งผลให้เกิดการอาร์ค จนเกิดความร้อนสะสมขึ้น ความร้อนดังกล่าวอาจสูงถึง 350°C จึงทำให้วัสดุฉนวน (Insulation material) ทั้งแข็งและเหลว เช่น น้ำมันหรือฉนวนกระดาษ เริ่มแตกตัวออกและเกิดเป็นแก๊สติดไฟออกมาได้ แก๊สดังกล่าวนี้อาจลอยผ่านน้ำมันหม้อแปลงขึ้นไปสะสมอยู่ตอนบนของหม้อแปลง ในลักษณะนี้จึงใช้บุคโฮลซ์รีเลย์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแก๊สที่เกิดขึ้นดังกล่าว แล้วจึงส่งสัญญาณให้แก่สวิตช์ตัดตอน (Breaker)

**A Buchholz relays in a separated expansion tank**



รูปที่ 2.1 รูปแบบเริ่มต้นการติดตั้งติดตั้งบุคโฮลซ์รีเลย์ [45]



รูปที่ 2.2 บุคโฮลซ์รีเลย์ (Buchhol relay) [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 การตรวจจับฟอลต์เชิงไฟฟ้า (Electrical Faults Detection)

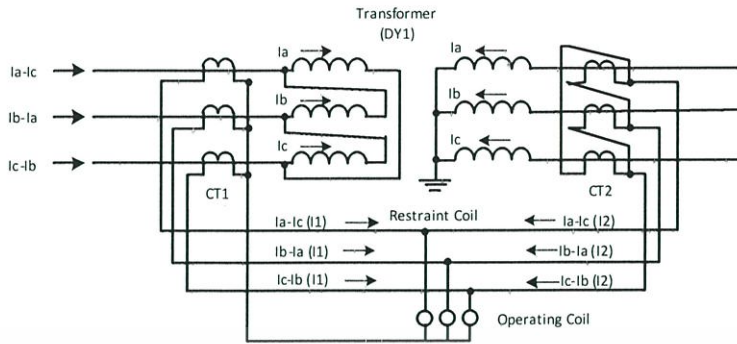
การลัดวงจรหรือฟอลต์คือการที่ปริมาณกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นและแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลงการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันนี้ จะส่งผลให้ปริมาณอื่นเปลี่ยนแปลงตามมา เช่น มุมเฟสของกระแสและแรงดัน ส่วนประกอบฮาร์โมนิกและความถี่ของระบบ เป็นต้น การทำงานของรีเลย์ป้องกันเชิงไฟฟ้านั้น จะใช้ปริมาณไฟฟ้าเหล่านี้เป็นสัญญาณที่ป้อนให้แก่รีเลย์

1. การป้องกันภาระเกิน (Overload protection) ระบบป้องกันชนิดนี้ อาศัยค่ากระแสที่เกินอัตราปกติ ป้อนให้แก่รีเลย์ เพื่อให้รีเลย์ส่งสัญญาณเตือน (ALARM) หรือปลดวงจรตัดตอนออก ข้อสำคัญจึงมีอยู่ว่า รีเลย์กระแส (Current Relay) ชนิดนี้ จะต้องสามารถแบ่งแยกสัญญาณชนิดไหนเป็นกระแสที่เกิดจากลัดวงจรหรือภาระเกินชั่วคราวออกให้ได้ มิฉะนั้นจะได้ยินเสียงสัญญาณเตือนอยู่ตลอดเวลา โดยปกติกำหนด (Setting) ไว้ที่ 150% ของความสามารถสูงสุด (Maximum capacity) ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2. การป้องกันกระแสเกิน (Over current protection) มีไว้เพื่อป้องกันการลัดวงจรภายนอกโดยเฉพาะ ถ้าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก จะใช้รีเลย์ชนิดนี้ป้องกันทั้งกรณีเกิดลัดวงจรภายในและลัดวงจรภายนอกด้วย ปกติรีเลย์ชนิดนี้ จะทำหน้าที่เป็นเพียงรีเลย์สำรอง (Back up Relay) สำหรับรีเลย์ชนิดกระแสผลต่าง (Differential relay) ในการป้องกันการลัดวงจรภายในหม้อแปลงของหม้อแปลงตัวใหญ่และเป็นรีเลย์พื้นฐานสำหรับการลัดวงจรภายนอก

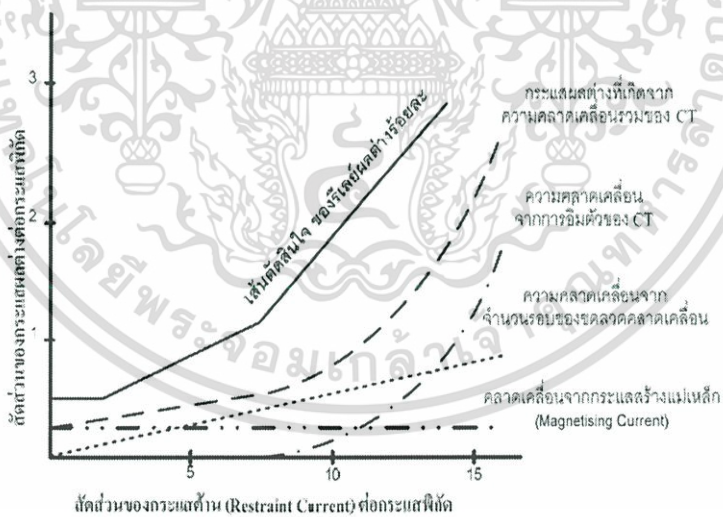
3. การป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection) เป็นรีเลย์ป้องกันที่มีความไวสูง (Selectivity) (โดยทั่วไปจะติดตั้งกับหม้อแปลงที่มีขนาดมากกว่า 5 MVA) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายในเขตป้องกันคือความเสียหายที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงเท่านั้น ดังนั้นตัวของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างจะต้องแยกแยะระหว่างฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) และฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก (External or Non-Internal Fault) ของตัวหม้อแปลงให้ออกโดยที่รีเลย์จะส่งรีพในททุก ๆ กรณีของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) และจะต้องไม่ทำงาน (Block) ในกรณีที่ไม่ใช่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน หลักการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้ คือ ตรวจสอบความแตกต่าง (Different) ของกระแสที่ไหลเข้าและออกจากอุปกรณ์ที่รีเลย์ป้องกันอยู่ แต่เนื่องจากกระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีขนาดและมุมเฟสที่ต่างกันเพราะการต่อกันของขดลวดหม้อแปลงหรือกลุ่มเวกเตอร์ (Vector Group) ดังนั้นต้องต่อหม้อแปลงกระแสให้สัญญาณที่ออกมาสามารถหักกลับกันได้ เช่นหม้อแปลงมีขดลวดต่อกันแบบ (DY1) จะต้องต่อหม้อแปลงกระแสแบบ (YD11) เพื่อให้สัญญาณที่ออกมาสามารถหักกลับกันได้ปกติ กระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจะหักกลับกันเป็นศูนย์ หากเกิดความผิดปกติภายในกระแสผลต่างจะไม่เป็นศูนย์ถ้าถึงค่าที่รีเลย์กำหนดไว้ รีเลย์จะทำหน้าที่ตัดวงจรออกซึ่งมักจะกำหนด (Set) ไว้ประมาณ 30% ของกระแสพิภัก (Rated Current) ของรีเลย์ เป็นค่าไม่สูงมากนัก จะถือว่าไม่มีการลัดวงจรในอุปกรณ์นั้น เมื่อนำมาใช้กับหม้อแปลงก็คือการตรวจจับกระแสทางด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำของหม้อแปลงนั่นเอง เนื่องจากรีเลย์ชนิดนี้นำกระแสมาจากหม้อแปลงกระแส (CT) ทั้ง 2 ด้านของหม้อแปลง ดังนั้นตำแหน่งของหม้อแปลงกระแส (CT) จึงเป็นตัวกำหนดโซน (Zone) และทำงานของรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของรีเลย์แบบผลต่าง (Differential relay)

ทางทฤษฎีในสภาวะปกติหากไม่เกิดความผิดพลาดกับหม้อแปลงแล้วค่ากระแสที่ผ่านขดลวดทำงาน ( $I_1 - I_2$ ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแม้ว่าอยู่ในสภาวะปกติค่ากระแส ( $I_1 - I_2$ ) อาจมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากผลของค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Error) และตำแหน่งของแท็ปขดลวดหม้อแปลง (On-Load Tap Changer) จะมีผลให้มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านรีเลย์ป้องกัน ดังนั้นจึงได้มีการใช้ขดลวดต้าน (Restraint Coil) มาเป็นสัดส่วนร่วมในการตัดสินใจในการสั่งปลดวงจร แทนการพิจารณาแต่กระแสผลต่างอย่างเดียว ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

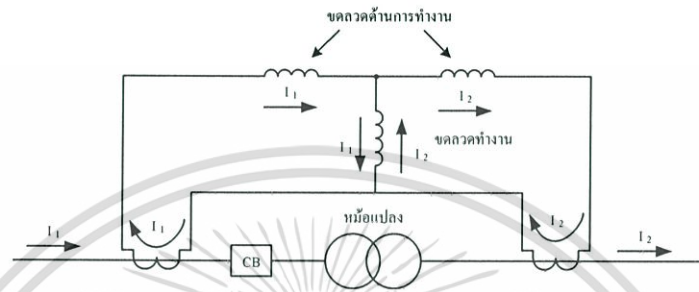


รูปที่ 2.4 คุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ผลต่างร้อยละ

ในการเปรียบเทียบผลต่างกระแสจะใช้หลักการตามกฎของเคิร์ชฮอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) ที่กล่าวไว้ว่าผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากโหนด (Node) จะต้องเป็นศูนย์ คือกระแสที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากเขตป้องกันจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ หม้อแปลงกระแสทางด้านปฐมภูมิ (CT1) และทุติยภูมิ (CT2) ตรวจวัดกระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจากอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน ในสภาวะปกติสัญญาณกระแส  $I_1$  จะต้องมีความเท่ากันกับ  $I_2$  สัญญาณกระแสทั้งสองนี้จะถูกใช้เป็นสัญญาณขาเข้าให้กับรีเลย์แบบผลต่างผ่านขดลวดทำงาน (Operating Coil) ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นแปรผันตามค่าผลต่างของกระแสทั้งสอง ( $I_1 - I_2$ ) หลังจากนั้นกระแสทั้งสองจะไหลผ่านขดลวดต้าน (Restraint Coil) จะเกิดแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของขดลวดต้าน (Restraint Coil) จะแปรผันตามค่าผลรวมของกระแสทั้งสอง ( $I_1 + I_2$ ) หากแรงที่เกิดจากขดลวดทำงานสามารถเอาชนะแรงร่วมระหว่างขดลวดต้าน รีเลย์จะสั่งงานให้ปลดวงจรออก ซึ่งคุณสมบัติการทำงานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของเปอร์เซ็นต์ผลต่างกระแส

## 2.2 การแปลงเวฟเลต [20],[ 26]

การแปลงเวฟเลตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น) แต่ได้พัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้นคือสามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่วิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์น้อยลงในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

ทฤษฎีเวฟเลต (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็ก ๆ ที่เรียกว่า “เวฟเลต” ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ตามแนวแกนนอนและขนาดของคลื่นลดลงสู่ศูนย์ทั้งทางด้านบวกและด้านลบอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใด ๆ ด้วยการแปลงเวฟเลตคือการนำกลุ่มของเวฟเลตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้เป็นเวฟเลตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเลตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเลตแต่ละอันในกลุ่มเกิดจากการสเกล (Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเลตแม่ตัวเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเลตแบบ Morlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้  $\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ดังนี้

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

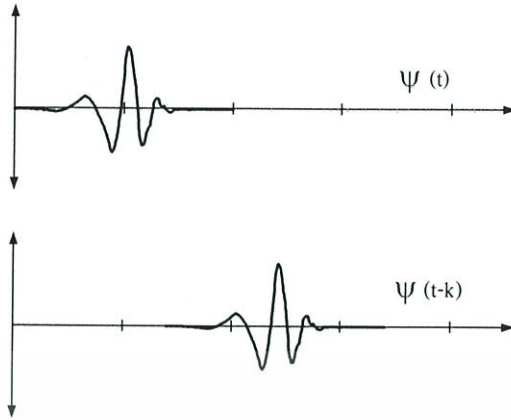
$\psi(t)$  เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์  $a$  และ  $k$  ตามลำดับ โดยที่เวฟเล็ดแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า  $a$  และ  $k$

การสเกล (Scaling :  $a$ ) การวิเคราะห์เวฟเล็ดจะแสดงให้เห็นถึงเวลาและขนาดของสัญญาณการสเกล (Scaling) จะหมายถึงการหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) ซึ่งจะให้ “ $a$ ” แทนด้วยพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ดแม่นั้นเอง หรืออาจเรียก “ $a$ ” ว่าเป็นตัวประกอบขนาด (scale factor) ยิ่งถ้าตัวประกอบขนาดน้อยลงเท่าใด เวฟเล็ดจะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาเวฟเล็ดที่มีตัวประกอบแตกต่างกันจะปรากฏลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7



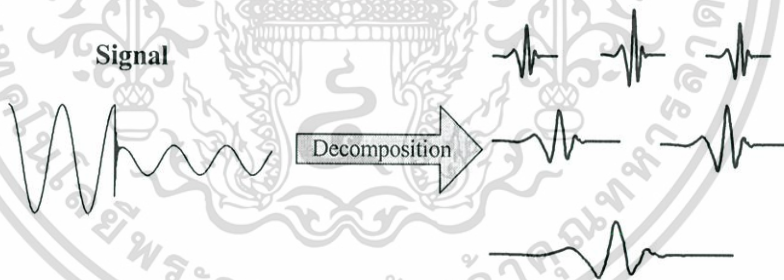
รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด

การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting :  $k$ ) การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ดจะมีความหมายง่ายๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน  $\psi(t)$  ด้วย  $k$  จะแสดงได้โดย  $\psi(t-k)$  การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดยพารามิเตอร์ “ $k$ ” ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ดบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ดที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.8

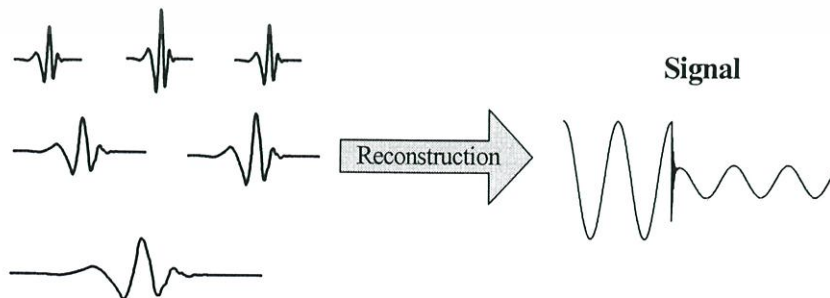


รูปที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

และเมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้น ออกมาอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยที่ เวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่าน้ำหนัก(Weight) ควบอยู่ ซึ่งรูปแบบในการแตกกระจายสัญญาณนี้เรียกว่า การ กระจายเวฟเล็ต (Wavelet decomposition) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.9 ในทางกลับกันการรวมกลุ่ม ของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิมนั้นเรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet reconstruction) ซึ่งก็คือการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse wavelet transform) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายสัญญาณสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต



รูปที่ 2.10 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วง ๆ ไม่ต่อเนื่องกัน โดยเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็ก ๆ ที่ระดับความละเอียด  $a$  ซึ่งมี  $k$  หลาย ๆ ตำแหน่งมารวมกันให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุทจริง

ในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ( $a_0 = 2; b_0 = 1$ ) แล้วได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า dyadic wavelet transform โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้

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

$m, n, k$  เป็นเลขจำนวนเต็มโดยที่

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

$n$  คือ จำนวนข้อมูล

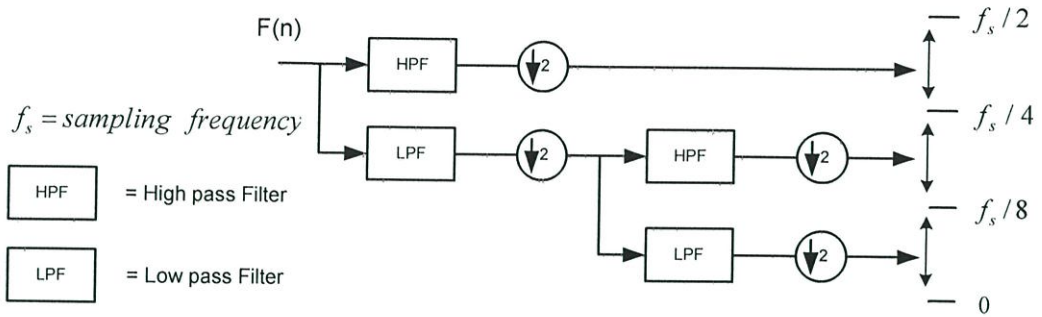
$m$  คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล

$k$  คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

การวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ (Filter Bank Analysis) เมื่อนำสัญญาณอินพุทมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสัญญาณถูกแยกองค์ประกอบ (Decomposition) โดยตัวกรองแบบ 2 ช่อง (Two channel filter banks) ซึ่งแยกความถี่ในแบนด์ที่ต้องการ ออกเป็น 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 เป็นการนำฟิลเตอร์แบบ 2 ช่องสัญญาณมาเรียงต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้ โดยใช้สัญญาณเอาท์พุทในส่วนความถี่ต่ำมาทำการแยกความถี่ออกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์แบบออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave analysis filter banks) โดยที่แต่ละขั้นตอนมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละ 2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการแปลงเวฟเลตโดยใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ

### 2.3 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine) [31], [48],

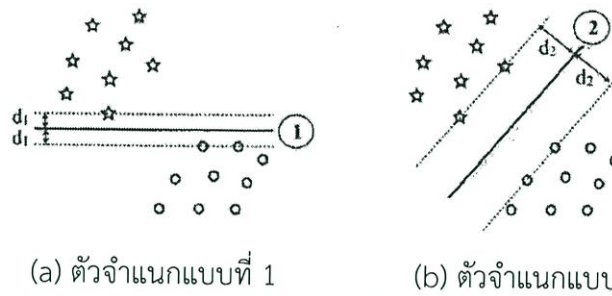
[49] ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการแบ่งประเภทซึ่งได้รับการเสนอโดย Vapnik ในปี ค.ศ.1992 เป็นระบบการเรียนรู้ที่อาศัยหลักทฤษฎีการเรียนรู้ทางสถิติ (Statistical Learning Theory) พร้อมกับทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Theory) ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนถือเป็นโมเดลเชิงเส้น แต่สามารถนำมาใช้แก้ไขปัญหามีความซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยการแปลงข้อมูลไปยังอีกปริภูมิหนึ่งที่มีจำนวนมิติมากกว่าเดิมโดยอาศัยเคอร์เนลฟังก์ชัน (Kernel Function) ทำให้แก้ไขปัญหได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งในการใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงการทำงานของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เช่น การเตรียมข้อมูล การเลือกใช้เคอร์เนล (Kernel) และสุดท้ายการเลือกค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและเคอร์เนล หากไม่เข้าใจถึงกระบวนการเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนลดลง

ในงานวิจัยนี้จะใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในการระบุประเภทพอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงโดยใช้ความสามารถในการเรียนรู้ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในการแบ่งคลาสข้อมูล กระบวนการเรียนรู้ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้น จะต้องมียุทธศาสตร์ข้อมูลตัวอย่าง (Input) พร้อมกับระบุประเภทของตัวอย่างแต่ละตัว (Output) เพื่อให้เครื่องมือการเรียนรู้ได้เรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเองอัตโนมัติ โดยไม่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบาย ซึ่งเหมาะกับการนำมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อน

**2.3.1 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการแบ่งกลุ่ม (Support Vector Classification: SVC)** ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการแบ่งกลุ่ม ใช้งานทางด้านการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วน  $\{x_i, d_i\}_{i=1}^m$  โดยที่  $x_i \in R^n$  และ  $d_i \in \{-1, +1\}$  สมการที่ใช้ในการจำแนกข้อมูลคือ

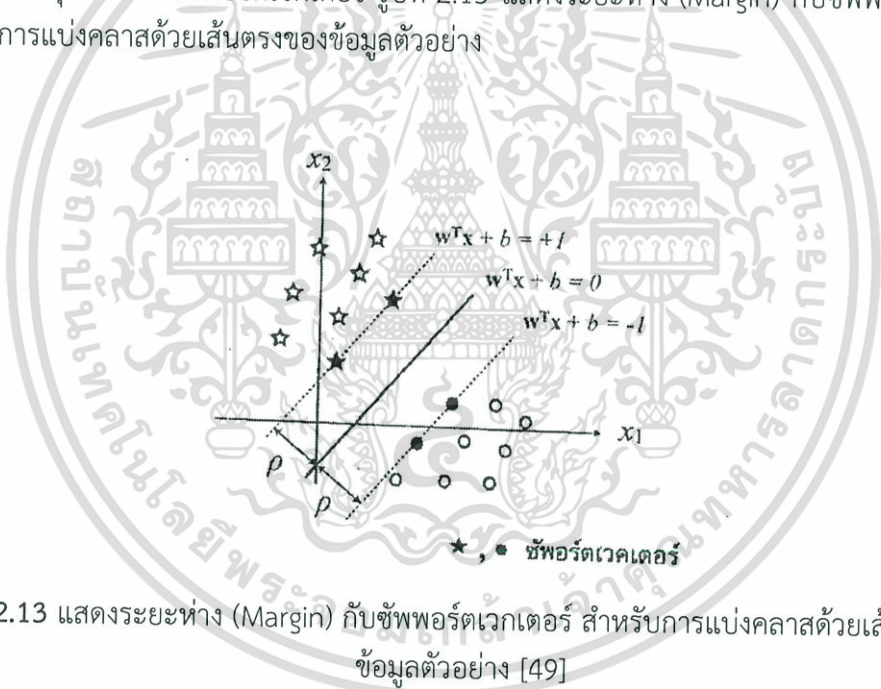
$$w^T x + b = 0 \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการจำแนกด้วยเส้นเส้นตรง (a) ตัวจำแนกแบบที่ 1 (b) ตัวจำแนกแบบที่ 2 [49]

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าการจำแนกแบบที่สองที่เส้นแบ่งที่ดีกว่าเส้นที่หนึ่งเนื่องจากเส้นดังกล่าวมีระยะห่างระหว่างกับเส้นแบ่งกับข้อมูล (d) มากกว่า ซึ่งระยะดังกล่าวเรียกว่าระยะห่าง (margin) เส้นแบ่งข้อมูลที่ดีต้องรักษาระยะห่างมากที่สุดระหว่างข้อมูล 2 กลุ่ม ข้อมูลที่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากที่สุดเรียกว่าซัพพอร์ตเวกเตอร์ รูปที่ 2.13 แสดงระยะห่าง (Margin) กับซัพพอร์ตเวกเตอร์ สำหรับการแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงของข้อมูลตัวอย่าง



รูปที่ 2.13 แสดงระยะห่าง (Margin) กับซัพพอร์ตเวกเตอร์ สำหรับการแบ่งคลาสด้วยเส้นตรงของข้อมูลตัวอย่าง [49]

การสร้างเส้นแบ่งหรือระนาบเชิงเส้น (สมการที่ 2.3) สำหรับการจำแนกข้อมูลจะกำหนดข้อมูลเป็นสองกลุ่มคือ

$$w^T x + b \geq 0 \tag{2.4}$$

$$w^T x + b < 0 \tag{2.5}$$

ในการหาระนาบเชิงเส้นที่เหมาะสมที่สุดของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้น จะทำการหาตำแหน่งซัพพอร์ตเวกเตอร์ (Support Vector) เพื่อใช้เป็นตัวแทนกลุ่มในการแบ่งข้อมูลคือจะใช้ระนาบที่ระยะห่างมากที่สุดระหว่างข้อมูลสองกลุ่ม

สมมติให้  $w_0$  และ  $b_0$  คือพารามิเตอร์ที่ทำให้ระนาบเชิงเส้นดีที่สุด ดังนั้นระนาบเชิงเส้นสามารถกำหนดได้จาก  $w_0^T x + b_0 = 0$  และถ้าให้

$$g(x) = w_0^T x + b_0 \quad (2.6)$$

ฟังก์ชัน  $g(x)$  จะทำหน้าที่วัดระยะทางระหว่างเวกเตอร์  $x$  กับระนาบเชิงเส้นที่ดีที่สุดแนวตั้งฉากซึ่งกันและกันหรือระยะห่าง พิสูจน์จากการให้  $x = x_p + \rho \frac{w_0}{\|w_0\|}$  แทนในสมการที่ 2.6

จะได้ 
$$\rho = \frac{g(x)}{\|w_0\|} \quad (2.7)$$

และสามารถคำนวณหาระยะห่างจากจุดกำเนิดไปยังระนาบเชิงเส้นได้ โดยค่าที่คำนวณได้เป็นทั้งบวกและลบขึ้นกับตำแหน่งที่อยู่ของข้อมูล กรณีที่  $b_0 = 0$  แสดงว่าเส้นระนาบเชิงเส้นลากผ่านจุดกำเนิด ซึ่ง  $w_0$  และ  $b_0$  จะสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$w_0^T x + b_0 \geq +\rho \frac{w_0}{\|w_0\|} \quad \text{สำหรับ } d_i = +1 \quad (2.8)$$

$$w_0^T x + b_0 < -\rho \frac{w_0}{\|w_0\|} \quad \text{สำหรับ } d_i = -1 \quad (2.9)$$

ค่าระยะห่าง (Margin) รวมจะมีค่าเท่ากับ

$$2\rho = \frac{2}{\|w_0\|} \quad (2.10)$$

ในการเลือกค่า  $w_0$  ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการ 2.8 และ 2.9 ด้วย จะสามารถเขียนรวมเป็นสมการเดียวกันคือ

$$d_i(w^T x_i + b) \geq 1 \quad \text{โดยที่ } i = 1, \dots, m \quad (2.11)$$

ค่าที่เหมาะสม  $w$  และ  $b$  ที่เป็นตามเงื่อนไขสมการที่ 2.11 และต้องค่าเวกเตอร์น้ำหนัก  $w$  จะต้องทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าน้อยที่สุด

$$J = \frac{1}{2} w^T w = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นในการสร้างระนาบเชิงเส้นที่ดีที่สุดต้องเป็นไปตามสมการที่ 2.12 โดยที่มีเงื่อนไขตามสมการที่ 2.11 โดยค่า  $\|w\|$  จะต้องมีค่าน้อยที่สุด ในการหาค่าที่เหมาะสมจะใช้การสร้างฟังก์ชันลากรานจ์ (Lagrange Function)

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^m \alpha_i [d_i (w^T x_i + b) - 1] \quad (2.12)$$

โดยที่  $L$  คือ ฟังก์ชันลากรานจ์ (Lagrange Function)

$\alpha_i$  คือ ตัวคูณลากรานจ์ (Lagrange Multipliers)

ในการหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันลากรานจ์คือพิจารณาค่า  $w, b$  มีค่าน้อยที่สุดและเทอมของตัวคูณลากรานจ์มีค่ามากที่สุด ดังนั้นถ้าชุดข้อมูล  $\{x_i, d_i\}_{i=1}^m$  ทำการคำนวณหาตัวคูณลากรานจ์  $\{\alpha_i\}_{i=1}^m$  จะได้

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_i \alpha_j d_i d_j x_i^T x_j \quad (2.13)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขคือ

1.  $\sum_{i=1}^m \alpha_i d_i = 0$
2.  $\alpha_i \geq 0$  for  $i = 1, \dots, m$

การจำแนกข้อมูลด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้นไม่ได้จำกัดแต่การจำแนกข้อมูลเชิงเส้นเท่านั้น แต่ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้เช่นกัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วข้อมูลส่วนใหญ่ไม่สามารถถูกแบ่งคลาสได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นและถึงแม้จะเป็นอย่างนั้นการทำให้ระยะห่าง (margin) มีค่ามากขึ้นสามารถทำได้โดยยอมให้เกิดการแบ่งคลาสของข้อมูลบางตัวมีโอกาสผิดพลาดมากขึ้นแน่นอนการยอมให้เกิดการแบ่งข้อมูลบางตัวมีความผิดพลาดมากขึ้นนั้นจำเป็นจะต้องกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมเข้าไปในสมการผลเฉลยข้างต้นโดยใช้ตัวแปร  $\xi$  (margin slack variable) เข้ามาเป็นตัวกำหนดโอกาสความผิดพลาดในการแบ่งคลาสของฟังก์ชันการแบ่งคลาส

$$d_i (w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.14)$$

ดังนั้นจะสามารถนิยามตัวแปร  $\xi$  คือ

$$w^T x + b \geq 1 - \xi_i, \quad \text{สำหรับ } d_i = +1 \quad (2.15)$$

$$w^T x + b < 1 - \xi_i, \quad \text{สำหรับ } d_i = -1 \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า

- $\xi < 0$  จะทำให้ระยะห่างมีขนาดเพิ่มขึ้น มีผลให้การเลือกตำแหน่งของซัพพอร์ตเวกเตอร์ จากข้อมูลที่อยู่ห่างไกลไปจากเดิม แต่สำหรับกรณีที่มีข้อมูลในการจำแนกไม่เป็นเชิงเส้น การเพิ่มระยะห่างจะไม่มีประโยชน์
- $0 \leq \xi \leq 1$  จะทำให้ข้อมูลคงอยู่ในด้านที่ถูกต้องสำหรับการจำแนกข้อมูล
- $\xi > 1$  จะทำให้ข้อมูลตกอยู่ในด้านที่ผิดพลาดสำหรับการจำแนกข้อมูล

ดังนั้น  $\sum \xi_i$  จะขึ้นกับจำนวนการแบ่งคลาสผิดของข้อมูลชุดนั้น ดังนั้นเงื่อนไขที่ว่าต้องทำให้ค่าระยะห่าง (margin) มีค่ามากที่สุดนั้นก็คือน่า  $\frac{1}{2} \|w\|^2$  มีค่าน้อยที่สุดจะต้องรวมเอาพจน์  $C \sum \xi_i$  เพื่อที่จะปรับการแบ่งคลาสมิตพลาดกับค่าโอกาสความผิดพลาดในการแบ่งคลาส (margin slack variable) ดังนั้นสมการผลเฉลยและเงื่อนไขจะกลายเป็นดังนี้

$$J(w, \xi) = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (2.17)$$

โดยที่ค่าคงที่  $C$  เป็นตัวกำหนดความสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างการทำให้ระยะห่าง (margin) มีค่ามากที่สุด กับการทำให้มีจำนวนข้อมูลที่มีโอกาสเกิดการแบ่งคลาสมิตพลาด (margin slack variable) น้อยที่สุด ซึ่งสมการข้างบนนี้เรียกว่า ซอฟต์มาร์จิ้น (Soft-margin SVM) เมื่อใช้วิธีการของลากรางจ์มัลติพลายเออร์ (Lagrange multiplier) กับชุดข้อมูล  $\{x_i, d_i\}_{i=1}^m$  ทำการคำนวณหาตัวคูณลากรางจ์  $\{\alpha_i\}_{i=1}^m$  ที่จะทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่ามากที่สุด

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_i \alpha_j d_i d_j x_i^T x_j \quad (2.18)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขคือ

1.  $\sum_{i=1}^m \alpha_i d_i = 0$
2.  $0 \leq \alpha_i \leq C$  for  $i = 1, \dots, m$  ( $C$  คือค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยผู้ใช้ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์)

หรือ

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \alpha_i \alpha_j d_i d_j x_i^T x_j \\ & \text{subject to:} \sum_{i=1}^m d_i \alpha_i = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \end{aligned} \quad (2.19)$$

นอกจากนี้พอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสามารถจำแนกข้อมูลได้มากกว่า 2 กลุ่ม โดยสมมติกำหนดให้จำนวนข้อมูลทั้งหมด  $m$  ชุด สามารถแบ่งออกเป็น  $M$  กลุ่ม ( $C_1, \dots, C_M$ )

$$\{x_i, d_i\}_{i=1}^m \quad d_i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะทำการจำแนกข้อมูลแบบไบนารีระหว่างข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งกับข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มอื่น ๆ ทั้งหมด ซึ่งจะทำการสร้างตัวจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับระนาบการจำแนกแบบเชิงเส้นทั้งหมด  $M$  ชุด โดยที่ตัวจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนลำดับที่  $j$  ก็จะถูกสร้างขึ้นโดยนำข้อมูลที่มาจากกลุ่มที่  $j$  กำหนดให้มีค่าเออร์ทพุตเท่ากับ  $+1$  ในขณะที่ข้อมูลที่มาจากกลุ่มอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กลุ่ม  $j$  จะถูกกำหนดให้เออร์ทพุตมีค่าเท่ากับ  $-1$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นโจทย์เงื่อนไขได้ดังนี้ ฟังก์ชันในการจำแนกข้อมูล

$$f_j(x) = w_j^T \varphi(x) + b_j \quad (2.21)$$

$$\min \phi(w, \xi^j) = \frac{1}{2} \|w_j\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i^j \quad (2.22)$$

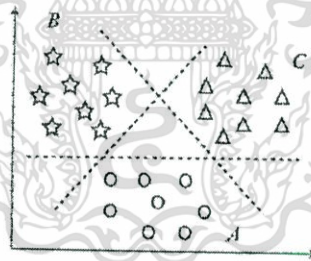
โดยมีเงื่อนไขคือ

$$\tilde{d}_i^j (w_j^T \varphi(x) + b_j) \geq 1 - \xi_i^j$$

$$\xi_i^j \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad \text{และ} \quad j = 1, \dots, M$$

$$\text{และ} \quad \tilde{d}_i^j = \begin{cases} +1 & (d_i \in C_j) \\ -1 & (d_i \in C_f) \end{cases}$$

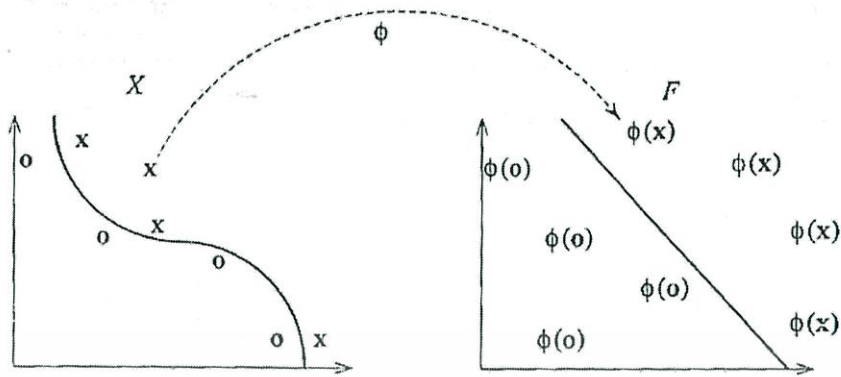
ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการสร้างตัวจำแนกซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ครบทั้งหมด  $M$  ชุด เรียบร้อยแล้ว แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างการจำแนกกลุ่มข้อมูลหลายกลุ่ม [49]

2.3.2 การจำแนกข้อมูลโดยระนาบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นการแปลงข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นจากปริภูมิอินพุท (Input space) ไปยังอีกปริภูมิหนึ่งเรียกว่าปริภูมิมิติสูง (Feature space) ที่มีมิติเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถใช้ระนาบเชิงเส้นในการจำแนกข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ประโยชน์การแปลงข้อมูลจากปริภูมิอินพุตไปยังปริภูมิมิติสูง [49]

การแปลงข้อมูลปริภูมิอินพุตจาก(สองมิติ) ไปยังปริภูมิมิติสูง(สามมิติ) สามารถดำเนินการได้ดังนี้

กำหนดให้  $\varphi(x): R^2 \rightarrow R^3$

โดย

$$x = [x_1 \ x_2]^T \rightarrow [\varphi_1(x) \ \varphi_2(x) \ \varphi_3(x)]^T$$

เลือก

$$\varphi(x) = [x_1^2 \ \sqrt{2}x_1x_2 \ x_2^2]^T$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \langle \varphi(x), \varphi(y) \rangle &= \varphi(x)^T \cdot \varphi(y) \\ &= [x_1^2 \ \sqrt{2}x_1x_2 \ x_2^2]^T [y_1^2 \ \sqrt{2}y_1y_2 \ y_2^2] \\ &= [(x_1x_2) \ (y_1y_2)]^T \\ &= (x \cdot y)^2 \quad := K(x, y) \end{aligned}$$

จากตัวอย่างจะเห็นว่าผลคูณภายในของเวกเตอร์  $\langle \varphi(x), \varphi(y) \rangle$  ซึ่งอยู่ในปริภูมิมิติสูงสามารถคำนวณได้จากเวกเตอร์ที่อยู่ในปริภูมิอินพุต โดยที่ไม่จำเป็นต้องแปลงอินพุตเวกเตอร์ใด ๆ เลย ซึ่ง  $\langle \varphi(x), \varphi(y) \rangle$  ที่มีคุณสมบัติดังกล่าว เรียกว่า เคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function)  $K(x, y)$  เคอร์เนลฟังก์ชันที่นิยมใช้ได้แก่

$$\text{Linear kernel: } K(x, y) = x^T y \quad (2.23)$$

$$\text{Gaussian kernel: } K(x, y) = \exp(-\gamma \|x^T - y\|^2) \quad (2.24)$$

$$\text{Polynomial kernel: } K(x, y) = (1 + (x^T y))^p \quad \text{โดย } p \geq 2 \quad (2.25)$$

จากที่กล่าวมาซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้นเป็นทฤษฎีการเรียนรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งคลาสข้อมูลได้โดยสามารถหาฟังก์ชัน การแบ่งคลาสที่สามารถแบ่งข้อมูลได้โดยให้ระยะห่างที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งการจะหาค่าฟังก์ชันการแบ่งคลาสนี้ได้นั้นทฤษฎีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้นได้อาศัยทฤษฎีวิธีโปรแกรมกำลังสอง (Quadratic programming) เข้ามาช่วยหาผลเฉลย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

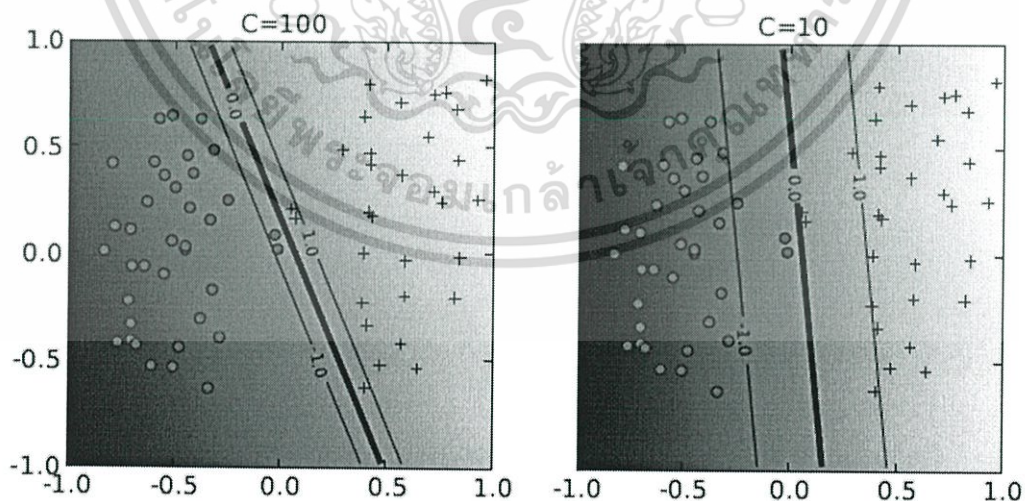
สมการเงื่อนไข (2.18) ให้แก่ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งตัวแปรที่ต้องการคือตัวแปร  $\alpha$  ซึ่งจะนำมาทำการสร้างฟังก์ชันการแบ่งคลาสโดยแทนลงในสมการข้างล่างนี้จะได้ฟังก์ชันการแบ่งคลาออกมาเป็นผลลัพธ์

$$f(x) = \sum_{i=1}^l \alpha_i d_i K(x_i, x) + b \quad (2.26)$$

### 2.3.3 ผลกระทบของพารามิเตอร์เคอร์เนลกับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่ค่านั้นจะมีระยะห่าง (Margin) ที่มากที่สุด กำหนดได้จากค่าตัวแปร  $\alpha$ , และ  $b$  ซึ่งซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้นยังมีกลุ่มของตัวแปรซึ่งเรียกว่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) อยู่ เช่น ซอฟต์มาร์จิ้น (Soft margin Variable  $C$ ) และตัวแปรต่างๆของเคอร์เนลฟังก์ชัน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับประสิทธิภาพในการแบ่งคลาสของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ในส่วนนี้จะทำการแสดงถึงผลกระทบของไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) กับประสิทธิภาพในการแบ่งคลาสของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

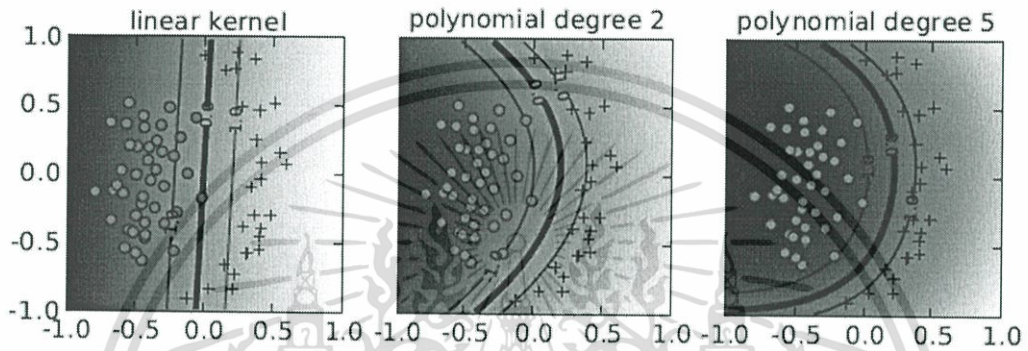
โดยจะเริ่มการวิเคราะห์ตัวแปรไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameters) โดยเริ่มจากซอฟต์แวร์มาร์จิ้น (Soft margin Variable  $C$ ) ซึ่งแสดงในรูป 2.16 สำหรับค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น ที่มีค่ามากนั้นจะยิ่งให้ระยะห่างนั้นมีค่าน้อยลง ซึ่งแสดงในรูป 2.16 ด้านซ้าย ซึ่งมีข้อมูลสองตัวอยู่ใกล้เส้นแบ่งคลาสมากส่งกับการวางตัวของเส้นแบ่งคลาทำให้ระนาบของเส้นแบ่งข้อมูล (Hyperplane) ที่ได้ั้นใกล้กับข้อมูลตัวอื่นๆ อีกด้วย เมื่อค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น (Soft margin Variable  $C$ ) มีค่าลดลง (ตามรูป 2.16 ด้านขวา) จุดเหล่านั้นจะกลายเป็นจุดผิดพลาด (margin error) การวางตัวของระนาบเส้นแบ่งข้อมูล (Hyperplane) ก็จะเปลี่ยนไป ทำให้ได้ค่าระยะห่างที่มีค่ามากยิ่งขึ้นสำหรับข้อมูลตัวที่เหลืออยู่



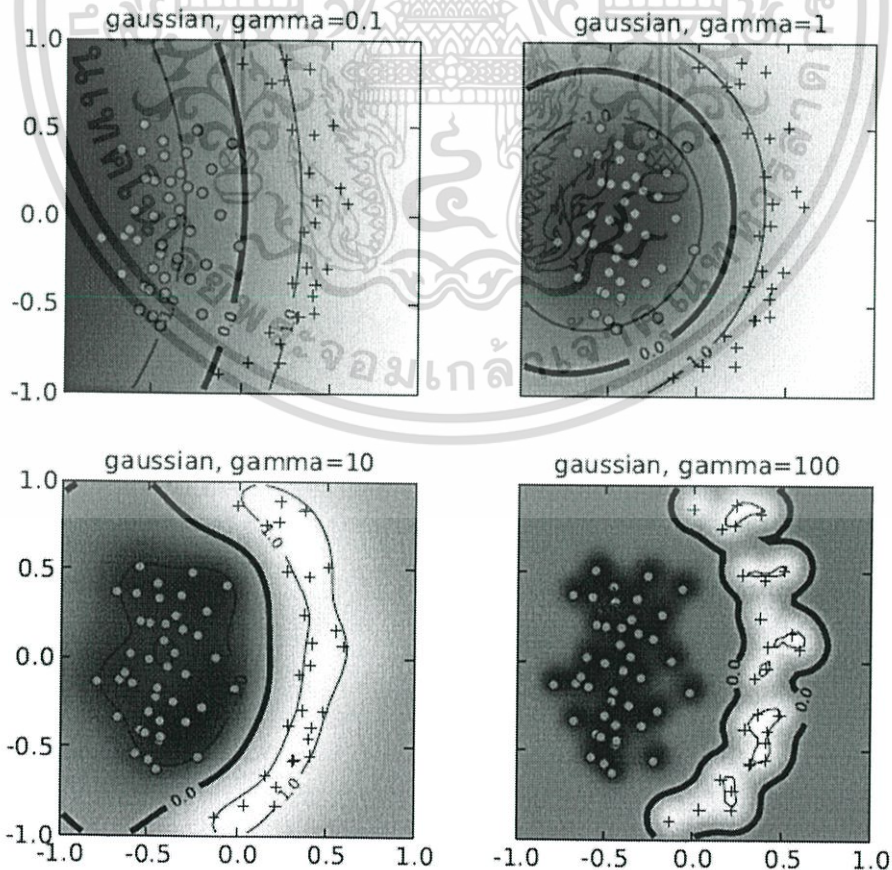
รูป 2.16 แสดงถึงผลกระทบของค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้นกับเส้นแบ่งคลา [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรของเคอร์เนล นั้นก็มีผลกับเส้นแบ่งคลาสอย่างมากตึกิริของโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial kernel) และตัวแปรความกว้างของเกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian kernel) เป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นของเส้นแบ่งคลาสที่ได้ (ดูรูป 2.17 และ 2.18) ตึกิริต่ำที่สุดของโพลีโนเมียลเคอร์เนลก็คือ เคอร์เนลเชิงเส้น ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เมื่อข้อมูลเป็นลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับข้อมูลในรูปที่ 2.17 นั้น แค่เพียงใช้โพลีโนเมียลเคอร์เนลตึกิริ 2 เท่านั้นก็มีความยืดหยุ่นเพียงพอในการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองคลาสด้วยระยะห่าง (Margin) ที่มีขนาดใหญ่มาก หากใช้โพลีโนเมียลเคอร์เนลตึกิริ 5 ก็จะได้เส้นแบ่งคลาสเหมือนกันเพียงแต่มีความโค้งมากกว่าเท่านั้นเอง



รูป 2.17 ผลกระทบของตึกิริของ โพลีโนเมียลเคอร์เนล [48]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูป 2.18 ผลของตัวแปรความกว้างของเกาส์เซียนเคอร์เนลสำหรับค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น [48]

เกาส์เซียนเคอร์เนล *Gaussian kernel*:  $K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2)$  โดยสมการนี้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ถ้าหากระยะระหว่าง  $x$  กับ  $y$  มีค่ามากกว่า  $1/\sqrt{\gamma}$  มากๆ ถ้ากำหนดให้ค่า  $\gamma$  มีค่าคงที่ตัวข้อมูลอื่นๆ จะถูกจำกัดวงให้อยู่รอบๆ ค่า  $y$  และเมื่อค่า  $\gamma$  มีค่าน้อย (ตามรูปที่ 2.18 ด้านบนซ้าย) ทำให้จุดข้อมูล  $x$  มีค่าของเคอร์เนลที่ไม่เป็นศูนย์ซึ่งสัมพันธ์กับข้อมูลตัวอื่นๆ ในกลุ่มของซัพพอร์ตเวกเตอร์ ดังนั้นกลุ่มของซัพพอร์ตเวกเตอร์ทั้งหมดจะส่งผลกระทบต่อค่าของฟังก์ชัน การแบ่งคลาสที่  $x$  ทำให้เกิดเส้นแบ่งคลาสที่มีความราบเรียบมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันถ้าค่า  $\gamma$  มีค่ามากขึ้นการกระจายของตำแหน่งซัพพอร์ตเวกเตอร์จะมีมากขึ้นทำให้ได้เส้นการแบ่งคลาสที่มีความโค้งมากขึ้น เมื่อค่า  $\gamma$  มีค่ามาก ค่าของฟังก์ชันการแบ่งคลาสจะมีค่าเกือบจะคงที่ในบริเวณที่ไม่มีข้อมูลไปรวมตัวอย่างหนาแน่น (ดูตามรูปที่ 2.18 ด้านล่างขวา) ในรูปจะเห็นว่าค่าตัวแปร  $\gamma$  นี้ทำให้เกิดเส้นแบ่งคลาสที่ค่อนข้างจะเกินความเหมาะสมในการแบ่งคลาสข้อมูลชุดนี้

จากรูปจะเห็นว่าข้อมูลในรูปที่ 2.17 และ 2.18 นั้น ค่าตัวแปร  $\gamma$  ของเกาส์เซียนเคอร์เนลและดีกรีของโพลีโนเมียลเคอร์เนล นั้นเป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นที่ทำให้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้นมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูล

### 2.4 วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [44,50,51]

วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกราดำรงชีวิตที่อยู่รวมกันเป็นฝูงร่วมกับเทคนิคการหาค่าตอบแบบสุ่ม ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart ในปี ค.ศ. 1995 การทำงานของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกราดำรงกันเป็นกลุ่มเช่น การเคลื่อนที่ของฝูงนก นกแต่ละตัวจะทำหน้าที่หาอาหารโดยนกแต่ละตัวนั้นสามารถปรับตัวได้ด้วย 2 ตัวแปรคือ ความเร็ว (Velocity) ตำแหน่ง (Position) นกในฝูงสามารถสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้ เมื่อนกหาอาหารได้จะสื่อสารบอกถึงตำแหน่งที่มีอาหารเพื่อนนกตัวอื่นปรับความเร็วและตำแหน่งใหม่ ซึ่งนกแต่ละตัวในฝูงจะต้องจำตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง และตำแหน่งที่ดีที่สุดของเพื่อนร่วมฝูง แล้วเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่เพื่อให้เข้าใกล้ตำแหน่งที่ดีที่สุดมากยิ่งขึ้น ซึ่งความเร็วและการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$V_{id} = w \times V_{id} + c_1 \times \text{Rand}() \times (p_{id} - x_{id}) + c_2 \times \text{Rand}() \times (g_d - x_{id}) \quad (2.23)$$

$$x_{id} = x_{id} + V'_{id} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$V_{id}$	คือความเร็วอนุภาค
$i$	คืออนุภาค
$d$	คือมิติ
$x_{id}$	คือตำแหน่งอนุภาคก่อนหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

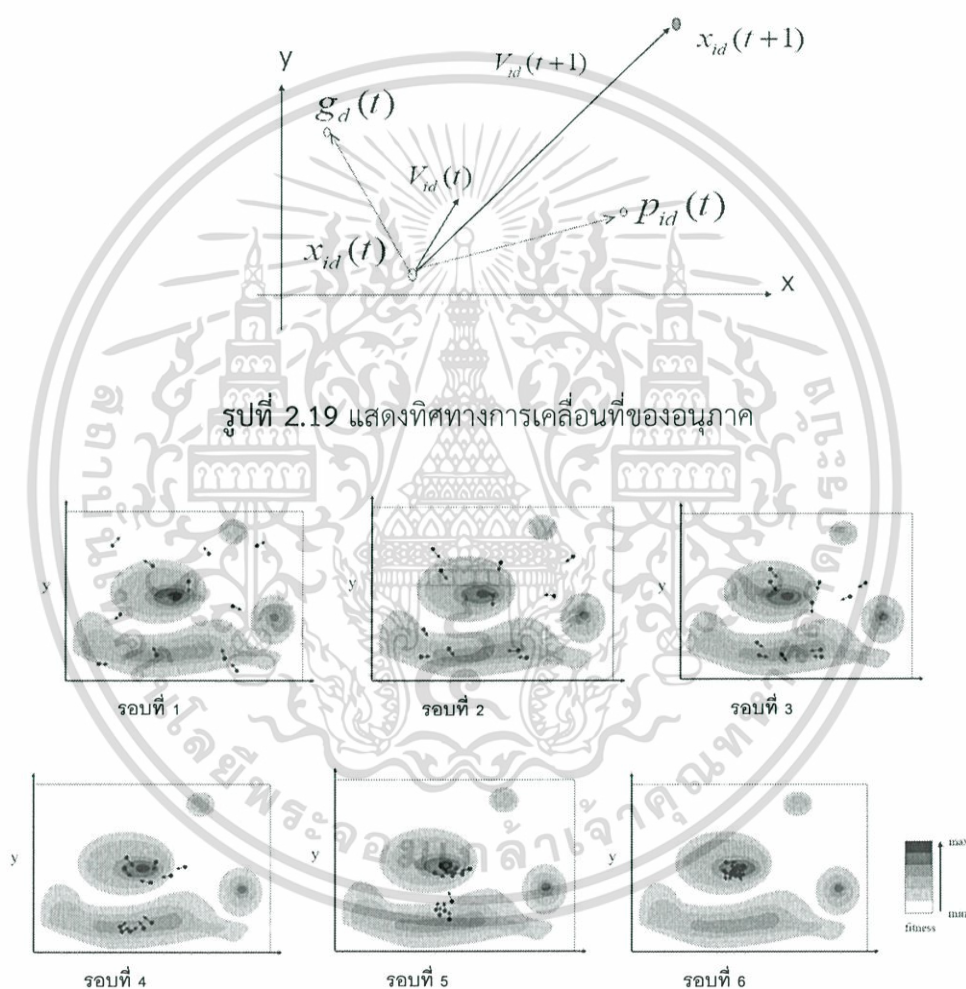
$w$  คือค่าการถ่วงน้ำหนักเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมผลกระทบของความเร็วที่การวนซ้ำก่อนหน้า ที่มีผลต่อความเร็วในการวนซ้ำปัจจุบันของอนุภาค

$c_1, c_2$  คือค่าคงที่อัตราเร่งในการค้นหา

$Rand()$  คือค่าตัวเลขสุ่ม

$p_{id}$  คือค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในกลุ่มอนุภาครุ่นปัจจุบัน

$g_d$  คือค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในกลุ่มอนุภาคทั้งหมด



รูป 2.20 ตัวอย่างการหาค่าตอบของกลุ่มอนุภาค

จากรูปที่ 2.19 และ 2.20 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปหาตำแหน่งที่ได้คำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้าอนุภาคตัวอื่นหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบเดิม อนุภาคทั้งหมดก็จะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ใหม่เพื่อเคลื่อนที่ไปหาคำตอบที่ดีที่สุดชุดใหม่ ในงานวิจัยนี้จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์เวกเตอร์แมชชีนเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การจำลองฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง โดยอาศัยโปรแกรม ATPDraw for Windows version 3.65 ที่ได้รับการพัฒนามาจากโปรแกรม ATP/EMTP Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program ซึ่งช่วยในการสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB / Wavelet ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยมีเนื้อหาและรายละเอียดของการจำลองฟอลต์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ดังต่อไปนี้

#### 3.1 แบบจำลองการเกิดฟอลต์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [26],[ 52]

ในการศึกษาฟอลต์ที่เกิดภายในขดลวดหม้อแปลงมีความจำเป็นที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองฟอลต์ การคำนวณพารามิเตอร์ของ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม ATP/EMTP นั้นมีให้เลือกใช้ด้วยกันหลายรูปแบบ ได้แก่ BCTRAN [18, 27], Saturable Transformer, X Transformer และ Ideal Transformer แต่สำหรับการศึกษาสถานะ ทรานเซียนต์จะใช้แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง BCTRAN เพื่อจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในงานวิจัยนี้

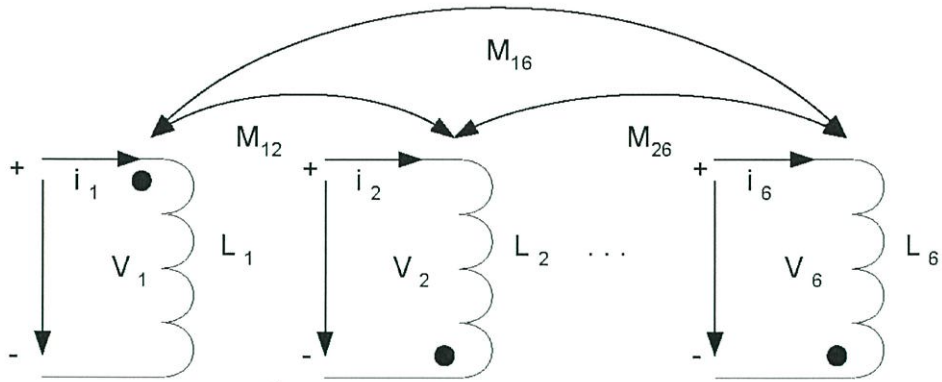
##### 3.1.1 แบบจำลอง BCTRAN ในสถานะปกติ

แบบจำลอง BCTRAN ใช้สำหรับหวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทั้งแบบที่มีแกนเหล็กเป็นชนิด Core และ Shell ทั้ง 2 ขดลวดและ 3 ขดลวด โดยใช้ผลการทดสอบของหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลอินพุต ส่วนเอาต์พุตได้จากแบบจำลอง BCTRAN จะอยู่ในรูปของการต่อร่วมกันของค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำชนิดเชิงเส้น (Coupled Linear RL) มาแสดงเป็นวงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงในรูปของเวลา (Time domain) โดยแบบจำลองหม้อแปลงถูกสร้างจากความคิดทางฟิสิกส์ของขดลวดที่แสดงเหมือนขดลวดคู่ร่วม (mutually coupled coils) ซึ่งวิธีนี้หม้อแปลงหลายขดลวดใดๆ ประกอบด้วย ขดลวดคู่จำนวน  $n$  คู่ สามารถจำลองทางไฟฟ้าในเทอมของแรงดันและกระแสที่ปลาย ( $V_i$  และ  $i_i$ ) รวมทั้งฟลักซ์เกี่ยวค้ำยทั้งหมด ( $\lambda_i$ ) ของขดลวด  $i$  ด้วยดังนี้

$$V_i = R_i i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด

เมื่อแม่เหล็กอิมตัวถูกนำเข้าสู่การพิจารณา  $\lambda_i$  กลายเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของกระแสขดลวด  $n$  นั่นคือ

$$\lambda_i = \lambda_i(i_1, i_2, i_3, \dots, i_n)$$

สำหรับ ขดลวด  $i$  สมการที่ 3.1 สามารถขยายโดยใช้กฎลูกโซ่ ดังนี้

$$V_i = R_i i_i + \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_2} \frac{di_2}{dt} + \dots + \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_n} \frac{di_n}{dt} \quad (3.2)$$

อนุพันธ์บางส่วนของฟลักซ์เกี่ยวคัลล์อง  $\lambda_i$  ในเรื่องกระแสขดลวด  $(k = 1, 2, \dots, n)$  เป็นตัวเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น  $L_i$  และ  $M_{ik}$  นั่นคือ

$$L_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_i} \quad (3.3)$$

$$M_{ik} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial i_k} \quad (i \neq k) \quad (3.4)$$

ดังนั้น ถ้าหม้อแปลงเป็นหม้อแปลงสามเฟส 2 ขดลวด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับหม้อแปลงสามารถแสดง ด้วยความสัมพันธ์เมตริกซ์ดังนี้

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3.5)$$

หรือ

$$\frac{di}{dt} = [L^{-1}][V] - [L^{-1}][Ri] \quad (3.6)$$

ในหม้อแปลงเฟสเดียว จำนวนขดลวด  $N$  ขด ในช่วงสภาวะคงตัว (Steady State) คือ

$$V = [Z][I] \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ  $[Z]$  ในแนวทแยงมุม (Diagonal Element) จะสามารถหาได้จากผลการทดสอบแบบจ่ายกระแส กระตุ้น จากความสัมพันธ์ของ

$$Z_{jj} = f(I_{exetj}, P_{fej}) \quad (3.8)$$

โดยที่

$I_{exetj}$  คือ ค่ากระแสกระตุ้นที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ ขณะทำการทดสอบแบบจ่ายกระแสกระตุ้น  $j$

$P_{fej}$  คือ ค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่วัดได้จากการที่จ่ายกระแสให้กับหม้อแปลง ณ ขดลวดที่ ขณะทำการทดสอบแบบจ่ายการแสดกระตุ้น  $j$

ส่วนค่าของ  $[Z]$  แนวที่ไม่ใช่แนวทแยงมุม (Off Diagonal Element) สามารถหาได้จากผลการทดสอบ แบบลัดวงจร

$$Z_{jk} = f(P_{cu,jk}, V_{jk}^{short}) \quad (3.9)$$

โดยที่  $(j, k)$  คือคู่ของขดลวดที่ทำการทดสอบแบบลัดวงจร

$P_{cu,jk}$  คือ ค่าสูญเสียในขดลวดที่วัดได้ (Copper Loss)

$V_{jk}^{short}$  คือ ค่าแรงดันขณะลัดวงจร (Short Circuit pu Voltage)

ถ้าให้ค่าอิมพีแดนซ์ขณะลัดวงจรเป็น  $Z_{jk}$  ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมสามารถหาได้จาก

$$Z_{jk} = Z_{kj} = \sqrt{(Z_{jj} - Z_{jk}^{short})Z_{kk}} \quad (3.10)$$

ซึ่งค่าเมตริกซ์  $[R]$  และ  $[L]$  ในสมการที่ 3.5 สามารถหาได้จากค่าจริง (Real part) และ ค่าจินตภาพ (Imaginary part) ของเมตริกซ์  $[Z]$  ในสมการที่ 3.10

ในส่วนของค่า  $[Z]$  ของหม้อแปลงสามเฟสจำนวนขดลวด  $N$  ขด ในช่วงสภาวะคงตัว (Steady State) นั้น ยังคงให้สมการที่ใช้กับหม้อแปลงเฟสเดียวที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ แต่จะต้องมีการเปลี่ยน ค่ากระแส แรงดันและอิมพีแดนซ์ จากค่าที่เป็นสเกลาร์ (Scalar) มาเป็นเมตริกซ์ (Matrices) ดังนี้

$$i_k \rightarrow [i_{ka}, i_{kb}, i_{kc}]^T \quad (3.11)$$

$$v_k \rightarrow [v_{ka}, v_{kb}, v_{kc}]^T \quad (3.12)$$

$$Z_{kj} \rightarrow \begin{bmatrix} Z_{kjs} & Z_{kjm} & Z_{kjm} \\ Z_{kjm} & Z_{kjs} & Z_{kjm} \\ Z_{kjm} & Z_{kjm} & Z_{kjs} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $A, B, C$  คือ การบ่งบอกถึงเฟส

$Z_{jks}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองระหว่างขดลวด  $k$  และขดลวด  $j$  ซึ่งก็คือค่า อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างขดลวด 2 ขดในเฟสเดียวกัน

$Z_{jks}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างขดลวด  $k$  และขดลวด  $j$  ซึ่งก็คือค่า อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างขดลวด 2 ขดที่ต่างเฟสกัน

ในสมการที่ 3.13 ใช้สำหรับหาค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้ผลการทดสอบของหม้อแปลงจากนั้นทำการแปลงให้เป็นค่าอิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self) และ อิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual) โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Z_s = \frac{1}{3}(Z_0 + 2Z_1), Z_m = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \quad (3.14)$$

ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้จากโปรแกรมย่อย BCTRAN จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ของ  $R$  และ  $L$  ดังสมการที่ 3.15 และ 3.16 โดยมีขนาด  $6 \times 6$  สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด ซึ่งสามารถนำเมตริกซ์ที่ได้ดังกล่าวส่งไปให้โปรแกรม ATP/EMTP ในการจำลองระบบไฟฟ้าต่อไป

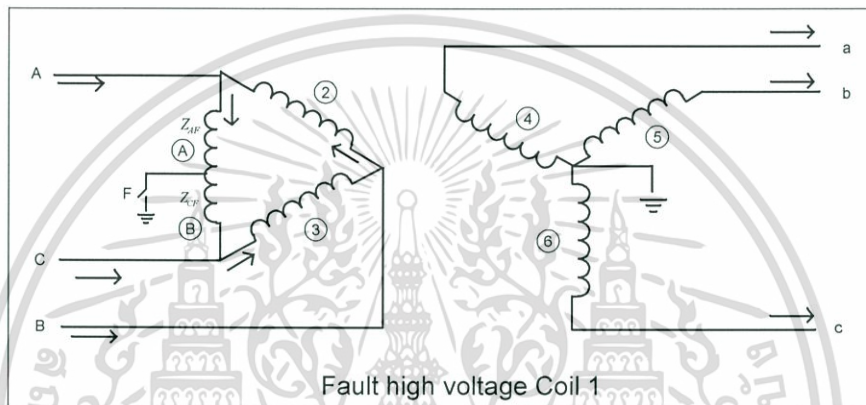
$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

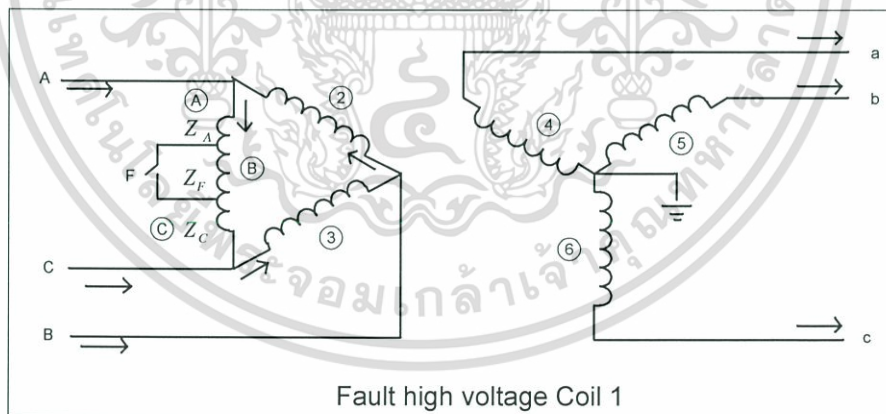
จากสมการที่ 3.1-3.16 จะเห็นได้ว่า มีการคำนวณด้วยข้อมูลจากผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งในหัวข้อต่อไปจะอธิบายสมการสำหรับคำนวณสภาวะพอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบ BCTRAN ในการสร้างแบบจำลอง

### 3.1.2 แบบจำลอง BCTRANS ในสภาวะฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง

หัวข้อที่ผ่านมาเป็นการคำนวณค่าเมตริกซ์ของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในรูปของค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมโดยมีขนาด  $6 \times 6$  สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวดในสภาวะปกติ แต่ในการจำลองฟอลต์ที่เกิดขึ้นในขดลวดหม้อแปลงสามารถทำได้โดยแบ่งขดลวดที่เกิดการลัดวงจรออกเป็นขดลวดย่อย (sub-coil) สำหรับกรณีขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault) จะทำการแบ่งขดลวดที่ลัดวงจรเป็น 2 ขดลวดย่อย a และ b ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) โดยแก้ไขเมตริกซ์จาก  $6 \times 6$  เป็น  $7 \times 7$  สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด และสำหรับกรณีขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Interturn fault) จะทำการแบ่งขดลวดที่ลัดวงจรเป็น 2 ขดลวดย่อย a, b และ c ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) โดยแก้ไขเมตริกซ์จาก  $6 \times 6$  เป็น  $8 \times 8$  สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด



(ก) ขดลวดลัดวงจรลงดิน (winding to ground fault)



(ข) ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Interturn fault)

รูปที่ 3.2 แสดงขดลวดของหม้อแปลงขณะเกิดการลัดวงจร

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{a2} & M_{a3} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{ba} & L_b & M_{b2} & M_{b3} & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{2a} & M_{2b} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{3a} & M_{3b} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{4a} & M_{4b} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{5a} & M_{5b} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{6a} & M_{6b} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

สำหรับการคำนวณค่าความเหนียวนำตัวเองและค่าความเหนียวนำร่วมระหว่างขดลวดย่อย a และ b จะต้องคำนึงถึงหลักการ 3 ข้อดังนี้

1. ความสอดคล้อง (Consistency) : เมื่อใช้เมตริกซ์ขนาด 7x7 ขดลวดย่อย a และ b ถูกจัดให้อนุกรมปราศจากฟลัดใดๆ ผลสรุปเดียวกับที่พบในเมตริกซ์ขนาด 6x6 ถ้าตั้งสมมุติฐานว่า ขดลวดย่อย a และ b ถูกจัดในอนุกรมและกระแสไหลผ่านขดลวดเหล่านี้ ขดลวดอื่นๆ ทั้งหมดไม่มีไหลคดตั้งนั้น

$$\varphi_a = (L_a + M_{ab})i \quad (3.19)$$

$$\varphi_b = (L_b + M_{ba})i \quad (3.19)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\varphi_a + \varphi_b = (L_a + 2M_{ba} + L_b)i \quad (3.20)$$

$$\varphi_1 = (L_1)i$$

ความสัมพันธ์เหล่านี้นำไปสู่สมการของ  $L_1$

$$L_1 = L_a + 2M_{ba} + L_b \quad (3.21)$$

$L_a$ ,  $L_b$  และ  $M_{ab}$  เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ขนาด 7x7 ส่วน  $L_1$  เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ขนาด 6x6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การรั่วไหล (Leakage) : คำนึงถึงตัวประกอบการรั่วไหลระหว่างขดลวดย่อย a และ b เป็นจุดสำคัญ ด้วยเหตุที่ กระแสฟลด์ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับ การรั่วไหล ตัวประกอบการรั่วไหลก่อให้เกิด

$$\sigma_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b} \quad (3.22)$$

ดังนั้นค่า  $M_{ab}$  ซึ่งเป็นค่าการรั่วซึมของสนามแม่เหล็ก (Leakage Factor) สามารถหาได้จากลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลง (Winding Geometry data) แต่ในงานวิจัยนี้จะถือว่าตัวประกอบการรั่วไหลจะพิจารณาเหมือนตัวแปรที่ทราบค่าหรือเป็นค่าที่กำหนดขึ้นมา

3. สัดส่วน (Proportionality) : เพื่อคำนวณสามตัวแปรที่ไม่ทราบค่า  $L_a$ ,  $L_b$  และ  $M_{ab}$

$$\frac{L_a}{L_b} = k^2 \quad (3.23)$$

เมื่อ  $k = \frac{n_a}{n_b}$

ความสัมพันธ์สมการที่ 3.23 เป็นการประมาณ แสดงให้เห็นว่า เป็นอัตราส่วนแรงดันระหว่าง ขดลวดย่อย a และ b ซึ่งความเป็นจริง ค่าเหล่านี้ไม่มีการรั่วไหล  $\sigma_{ab} = 0$  อย่างไรก็ดี เมื่อ  $\sigma_{ab}$  เข้าใกล้ศูนย์ การแก้สมการทั้งสาม สำหรับตัวแปรทั้งสามที่ไม่ทราบค่า  $L_a$ ,  $L_b$  และ  $M_{ab}$  จะให้ผลดังนี้

$$L_a = \frac{L_1}{\frac{1}{k^2} + 2\sqrt{1-\sigma_{ab}} + 1} \quad (3.24)$$

$$L_b = \frac{L_1}{k^2 + 2k\sqrt{1-\sigma_{ab}} + 1} \quad (3.25)$$

$$M_{ab} = \frac{L_1 \sqrt{1-\sigma_{ab}}}{k + \frac{1}{k} + 2\sqrt{1-\sigma_{ab}}} \quad (3.26)$$

และในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดย่อย a และขดลวดอื่นๆ j ยกเว้นขดลวดย่อย b (เช่นเดียวกัน ระหว่างขดลวดย่อย b และขดลวดใดๆ j ยกเว้นขดลวดย่อย a) ทฤษฎีความสอดคล้องนำไปสู่

$$M_{1j} = M_{aj} + M_{bj} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ 3.27 จำเป็นต้องแยกเป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาขดลวด  $j$  ที่พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกับขดลวดย่อย  $a$  และ  $b$

$$M_{aj} = M_{1j} \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{L_a}{L_1}} \sqrt{1 + \frac{1 - \varepsilon L_1 L_j}{\varepsilon M_{1j}^2}} \quad (3.28)$$

$$\text{โดยที่ } \varepsilon = \frac{\sigma_{aj}}{\sigma_{1j}} \quad (3.29)$$

กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาขดลวด  $j$  ที่ไม่ได้พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกับขดลวดย่อย  $a$  และ  $b$  ความสัมพันธ์สัดส่วน นำไปสู่ :

$$\frac{M_{aj}}{M_{bj}} = \frac{n_a}{n_b} = k \quad (3.30)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (3.27) และ (3.30) นำไปสู่ :

$$M_{aj} = M_{ja} = \frac{k}{1+k} M_{1j}, M_{bj} = M_{jb} = \frac{k}{1+k} M_{1j} \quad (3.31)$$

เมื่อ ถูกพิจารณาเหมือนข้อมูลที่ทราบค่า  $M_{aj}$  ในส่วนของค่าความต้านทานนั้นสามารถใช้หลักของสัดส่วน (Proportionality) มาหาค่าความต้านทานของขดลวดย่อยที่ได้สร้างขึ้นได้ดังนี้

$$R_a = \frac{n_a}{n_1} R_1, R_b = \frac{n_b}{n_1} R_1 \quad (3.32)$$

โดยที่  $n_a, n_b$  คือจำนวนรอบของขดลวดในขดลวดย่อย  $a$  และ  $b$  ตามลำดับ และ  $n_a + n_b = n_1$

ส่วนกรณีขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Intertum fault) สามารถทำได้ลักษณะเดียวกับการหาเมตริกซ์เทียบเคียงในกรณีที่เกิดขดลวดลัดวงจรลงดิน ต่างกันตรงที่ว่าจะต้องแยกขดลวดลัดวงจรออกเป็น 3 ขดลวดย่อยดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) พร้อมทั้งแก้ไขเมตริกซ์จาก  $6 \times 6$  เป็น  $8 \times 8$  สำหรับ หม้อแปลงชนิด 2 ขดลวดตั้งสมการที่ 3.33 และ 3.34

$$\begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{a2} & M_{a3} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} & M_{b2} & M_{b3} & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c & M_{c2} & M_{c3} & M_{c4} & M_{c5} & M_{c6} \\ M_{2a} & M_{2b} & M_{2c} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{3a} & M_{3b} & M_{3c} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{4a} & M_{4b} & M_{4c} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{5a} & M_{5b} & M_{5c} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{6a} & M_{6b} & M_{6c} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

สำหรับการคำนวณค่าความเหนียวนำตัวเองและค่าความเหนียวนำร่วมระหว่างขดลวดย่อย a และ b จะต้องใช้ความสัมพันธ์ของหลักการทั้ง 3 หลักการมาช่วยดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Consistency :} \quad L_a + L_b + L_c + 2(M_{ab} + M_{ac} + M_{bc}) = L_1 \quad (3.35)$$

$$\text{Leakage :} \quad \sigma_{ab} = 1 - \frac{M_{ab}^2}{L_a L_b} \quad (3.36)$$

$$\sigma_{ac} = 1 - \frac{M_{ac}^2}{L_a L_c} \quad (3.37)$$

$$\sigma_{bc} = 1 - \frac{M_{bc}^2}{L_b L_c} \quad (3.38)$$

$$\text{Proportionality :} \quad \frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b}\right)^2 = k^2 \quad (3.39)$$

$$\frac{L_a}{L_c} = \left(\frac{n_a}{n_c}\right)^2 = k'^2 \quad (3.40)$$

ดังนั้น

$$L_a = L_1 \left(\frac{n_a}{n_1}\right)^2, L_b = L_1 \left(\frac{n_b}{n_1}\right)^2, L_c = L_1 \left(\frac{n_c}{n_1}\right)^2 \quad (3.41)$$

$$M_{ab} = L_1 \left(\frac{n_a n_b}{n_1}\right), M_{ac} = L_1 \left(\frac{n_a n_c}{n_1}\right), M_{bc} = L_1 \left(\frac{n_b n_c}{n_1}\right) \quad (3.42)$$

และในการคำนวณค่าความเหนียวนำร่วมระหว่างขดลวดย่อย a , b และ c กับขดลวดอื่นๆ จำเป็นต้องแยกเป็น 2 กรณีคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที 1 เมื่อพิจารณาขดลวด  $j$  ที่พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกับขดลวดย่อย  $a$ ,  $b$  และ  $c$

$$M_{aj} = M_{1j} \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{L_a}{L_1}} \sqrt{1 + \frac{1 - \varepsilon L_1 L_j}{\varepsilon M_{1j}^2}} \quad (3.43)$$

$$M_{bj} = M_{1j} \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{L_b}{L_1}} \sqrt{1 + \frac{1 - \varepsilon L_1 L_j}{\varepsilon M_{1j}^2}} \quad (3.44)$$

$$M_{cj} = M_{1j} - M_{aj} - M_{bj} \quad (3.45)$$

โดยที่  $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_{aj}}{\sigma_{1j}}$ ,  $\varepsilon_2 = \frac{\sigma_{bj}}{\sigma_{1j}}$

กรณีที 2 เมื่อพิจารณาขดลวด  $j$  ที่ไม่ได้พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกับขดลวดย่อย  $a$ ,  $b$  และ  $c$

$$M_{aj} = M_{ja} = \frac{M_{1j}}{1 + \frac{1}{k} + \frac{1}{k'}} \quad (3.46)$$

$$M_{bj} = M_{jb} = \frac{M_{1j}}{1 + \frac{1}{k} + \frac{1}{k'}} \quad (3.47)$$

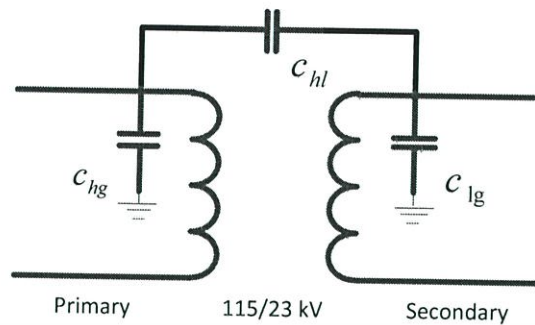
$$M_{cj} = M_{jc} = \frac{M_{1j}}{1 + \frac{1}{k} + \frac{1}{k'}} \quad (3.48)$$

ในส่วนของค่าความต้านทานนั้นสามารถใช้หลักของสัดส่วน (Proportionality) มาหาค่าความต้านทานของขดลวดย่อยที่ได้สร้างขึ้นได้ดังนี้

$$R_a = \frac{n_a}{n_1} R_1, R_b = \frac{n_b}{n_1} R_1, R_c = \frac{n_c}{n_1} R_1 \quad (3.49)$$

โดยที่ คือจำนวนรอบของขดลวดในขดลวดย่อย  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ตามลำดับ และ  $n_a + n_b + n_c = n_1$

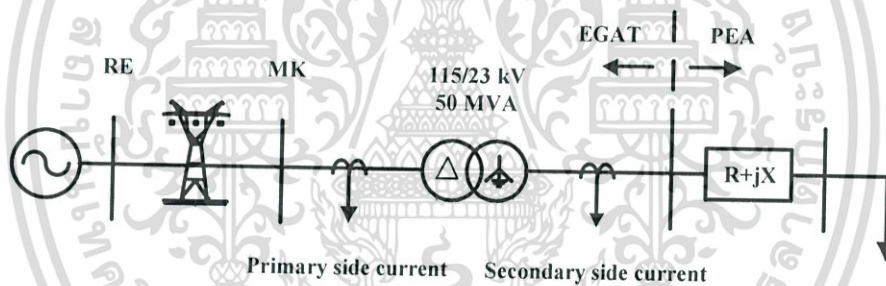
นอกจากนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสภาวะเกิดฟลด์ภายในขดลวดหม้อแปลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามุ่งเน้นทางด้านความถี่สูงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง จึงจำเป็นต้องนำตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทางด้านแรงดันสูง, แรงดันต่ำ (earth capacitance of the HV and LV windings) และตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำ (inter-winding capacitances) มาต่อเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองหม้อแปลง BCTRAN ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองหม้อแปลงเฟสเดียวเมื่อต่อตัวเก็บประจุ

### 3.2 ระบบจำลองฟอลต์

3.2.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์ เนื่องจากในสถานะที่เกิดฟอลต์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของเหตุการณ์เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ได้ครอบคลุมในหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างระบบจำลองขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 [26]



รูปที่ 3.4 แสดงระบบจำลองฟอลต์ภายในหม้อแปลงขนาด 50 MVA

ระบบที่นำมาทำการทดลองเป็นสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) ที่จังหวัดมหาสารคามโดยที่หม้อแปลงมีขนาด 50MVA ชนิด DY1 รับไฟจากสายส่งไฟฟ้าระดับแรงดันไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์จากจังหวัดร้อยเอ็ดและส่งจ่ายให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่จังหวัดมหาสารคาม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในหัวข้อต่อไป

3.2.2 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [53] ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ระบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA, 115/23 kV สามารถแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

พิกัดแรงดัน ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	115/23.1 kV
พิกัดกระแส ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	251/1250 kA
การต่อขดลวด	DY1
พิกัดกำลัง	50 MVA

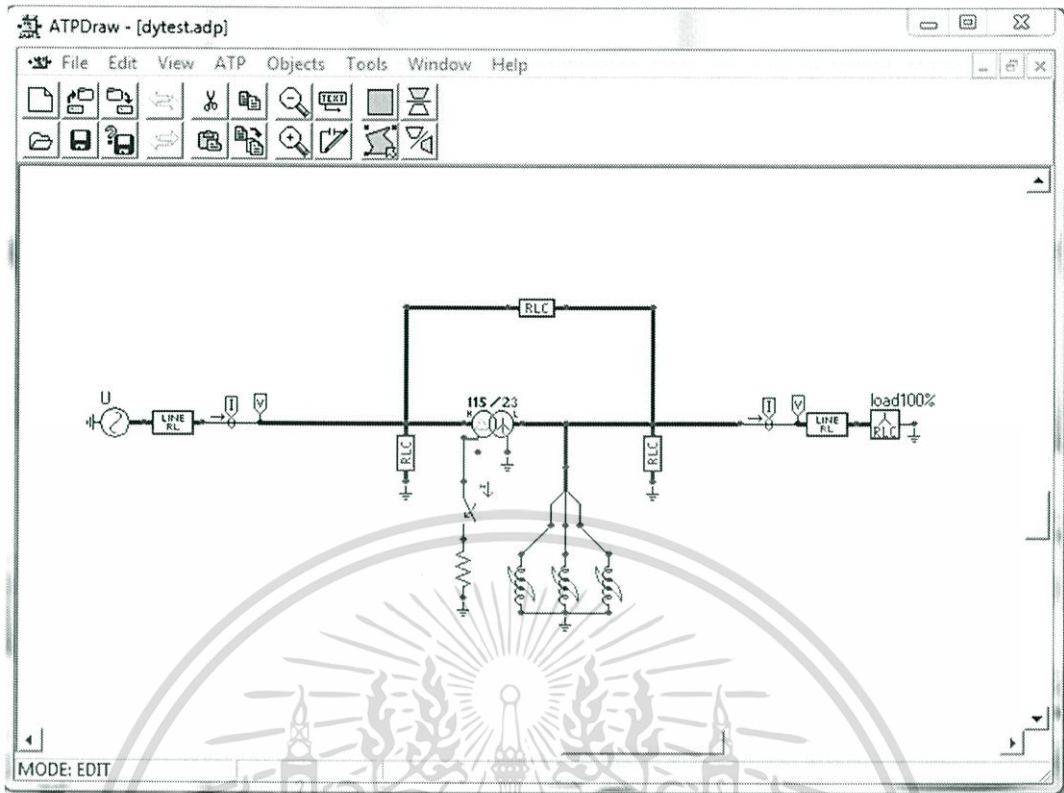
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสูญเสียการกระตุ้นลำดับบวก	23.1 kW
กระแสกระตุ้นลำดับบวก	1.84 A
แรงดันกระตุ้นลำดับบวก	23 kV
ค่าสูญเสียการลัดวงจรลำดับบวก	118.20 kW
กระแสลัดวงจรลำดับบวก	251 A
แรงดันลัดวงจรลำดับบวก	17.44 kV
อิมพีแดนซ์วงจรลำดับศูนย์	15.41%
ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทางด้านแรงดันสูง	22900 pF
ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ	12400 pF
ตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำ	19000 pF

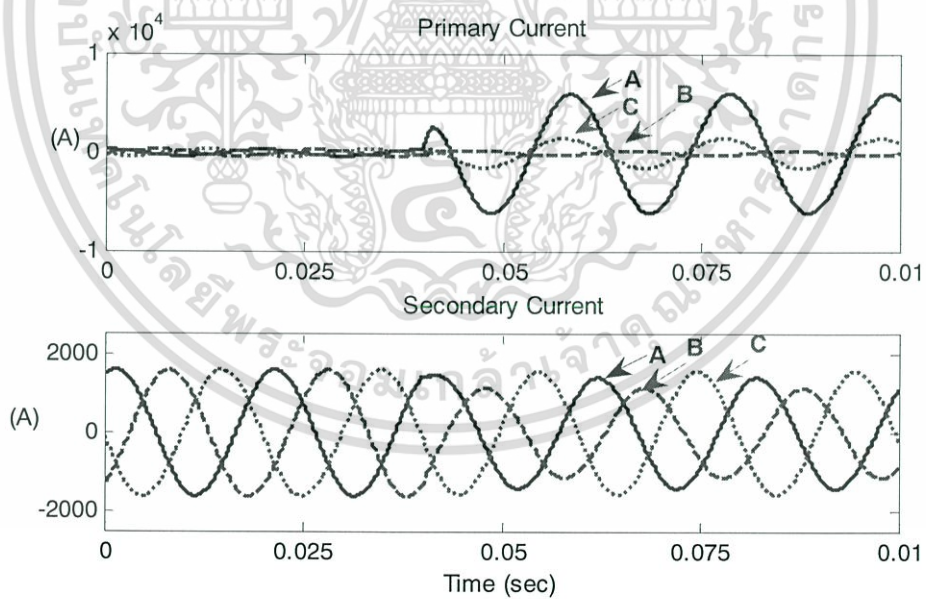
3.2.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ในการจำลองฟอลต์นั้นเพื่อศึกษาฟอลต์ที่แตกต่างกันจึงทำการการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มี ผลเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 2 ชนิดได้แก่ ฟอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดินและขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ
- ชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทางฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์  $0^{\circ}$  -  $330^{\circ}$  เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันสูงที่เฟส A (ช่วงละ  $30^{\circ}$ )
- สำหรับกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดิน ตำแหน่งที่ลัดวงจร 10%-90% ของขดลวด (ขดลวดย่อย a เปลี่ยนแปลงช่วงละ 10%)
- สำหรับกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ตำแหน่งที่ลัดวงจร 10%-80% ของขดลวด (ขดลวดย่อย a เปลี่ยนแปลงช่วงละ 10%)
- สำหรับกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ตำแหน่งที่ลัดวงจร 10%-80% ของขดลวด (ขดลวดย่อย b เปลี่ยนแปลงช่วงละ 10%)
- ความต้านทานของฟอลต์ 5 โอห์ม

3.2.4 สัญญาณที่ได้จากการจำลองการเกิดฟอลต์ จากวงจรขณะเกิดฟอลต์ของหม้อแปลงทดสอบในรูปที่ 3.2 (ก) และ 3.2 (ข) เมื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองการทดสอบในโปรแกรม ATPDraw ได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.8 ตามลำดับ โดยใช้อัตราสุ่ม (Sampling rate) 200 kHz และให้สวิทช์ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบและเวลาของการเกิดฟอลต์ ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เริ่มเกิดฟอลต์ที่  $t = 0.04$  วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล ( $0 \sim 0.1$  วินาที) โดยไม่มีการกำจัดฟอลต์ออก ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการจำลองในกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดินดังแสดงในรูปที่ 3.6-3.7 และกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบแสดงในรูปที่ 3.9-3.10

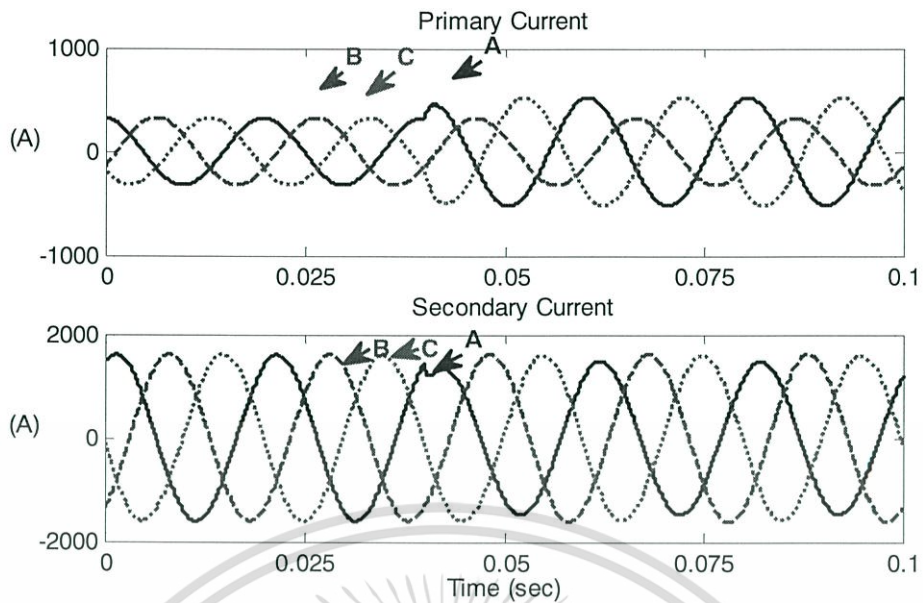


รูปที่ 3.5 แสดงวงจรการจำลองพลต์ของขดลวด AC ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20%



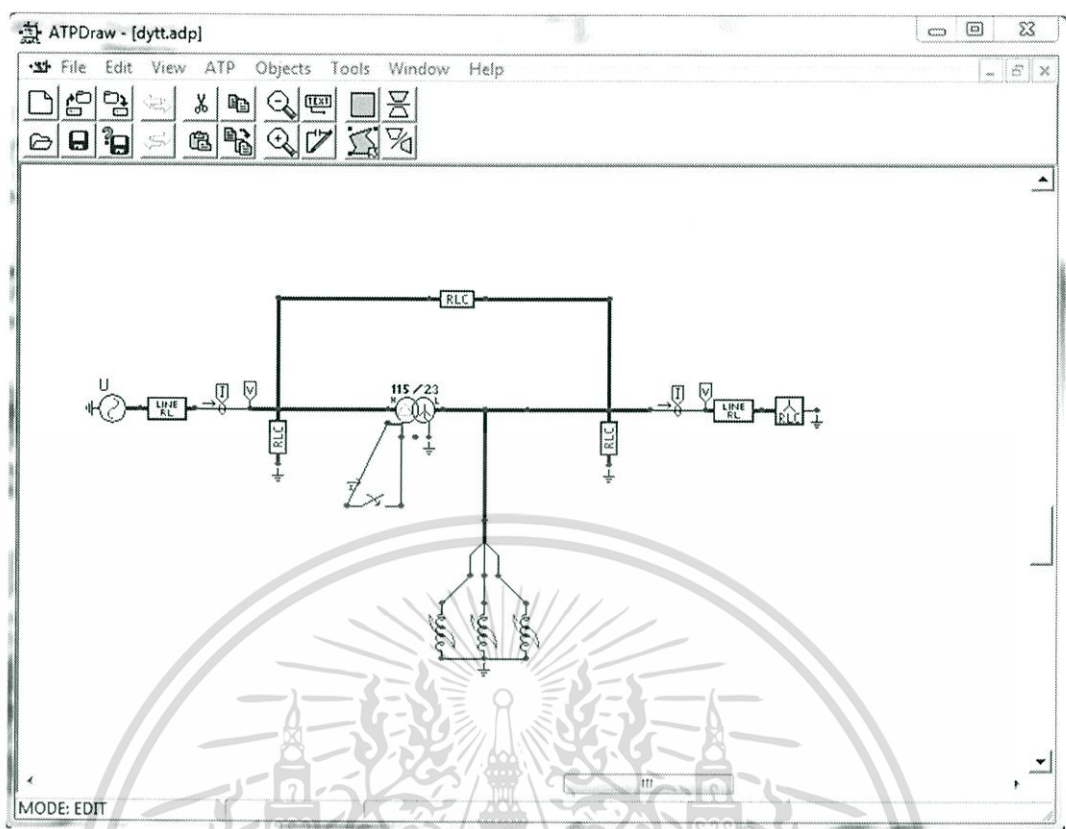
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นการเกิดพลต์ที่ขดลวด AC ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20% ด้านแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

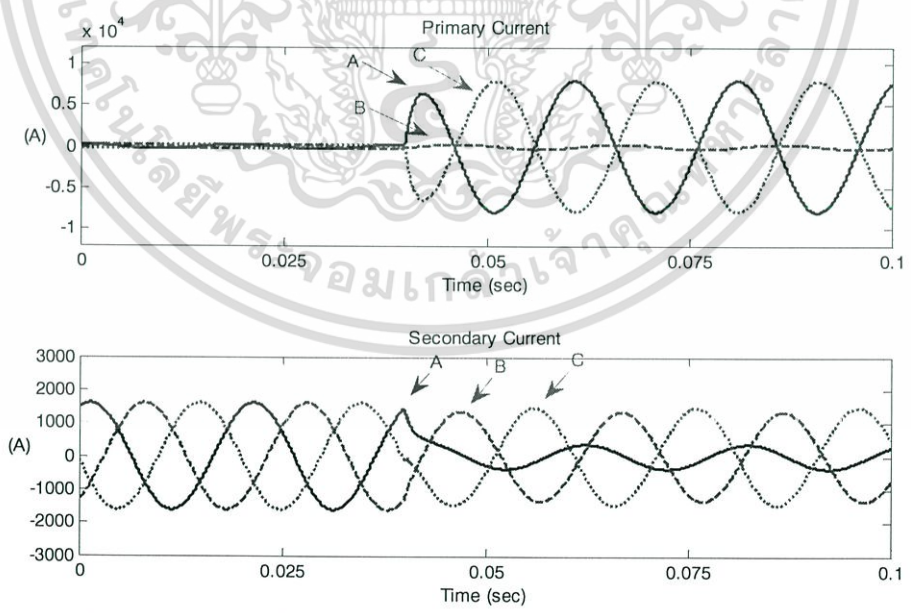


รูปที่ 3.7 รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20% ด้านแรงดันต่ำ

เมื่อทำการจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงด้วยโปรแกรม ATP/EMTP แบบขดลวด AC ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20% ด้านแรงดันสูง กระแสขาเข้าของเฟส A มีค่าสูงขึ้นแต่กระแสขาออกของเฟส A และ B มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดฟอลต์ด้านแรงดันสูงซึ่งมีการต่อขดลวดแบบเดลต่ำ ขดลวด AC เหนี่ยวนำ ขดลวด A และขดลวด BA เหนี่ยวนำ ขดลวด B เมื่อเกิดฟอลต์ด้านแรงสูงใกล้กับเฟส A ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลลงดิน เฟส A และ B ด้านแรงต่ำ จึงทำให้กระแสขาออกมีค่าลดลงถึงสองเฟส แต่เมื่อเกิดขดลวด A ลัดวงจรลงดินที่ระยะขดลวด 20% ด้านแรงดันต่ำ กระแสขาเข้าของเฟส A และ C มีค่าสูงขึ้น และกระแสขาออกของเฟส A มีค่าลดลงเพราะเฟส A ด้านแรงดันต่ำถูกเหนี่ยวนำกระแสด้วยขดลวด AC

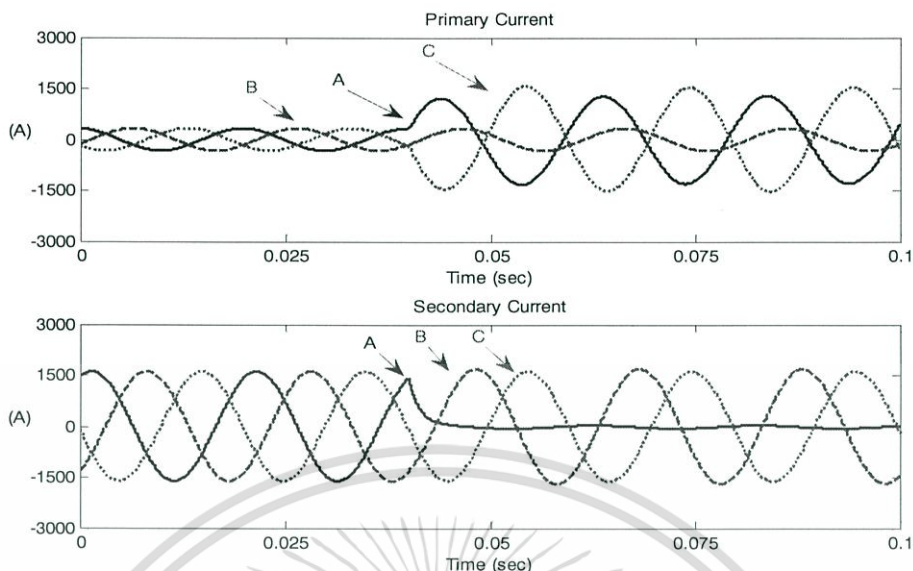


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรการจำลองฟอลต์ของขดลวด AC ลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะขดลวด 10% และ 20%



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะขดลวด 10% และ 20% ด้านแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นการเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะขดลวด 10% และ 20% ด้านแรงดันต่ำ

เมื่อทำการจำลองการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงด้วยโปรแกรม ATP/EMTP แบบขดลวด AC ลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะขดลวด 10% และ 20% ด้านแรงดันสูง กระแสขาเข้าของเฟส A และ C มีค่าสูงขึ้นแต่กระแสขาออกของเฟส A, B และ C มีค่าลดลงแต่เฟส A มีค่าลดลงมากที่สุดเนื่องจากเกิดฟอลต์ด้านแรงดันสูงซึ่งมีการต่อขดลวดแบบเดลต้าและขดลวด AC เหนี่ยวนำกระแสเฟส A ด้านแรงดันต่ำจึงทำให้กระแสขาออกของเฟส A มีค่าลดลง แต่เมื่อเกิดขดลวด A ลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะขดลวด 10% และ 20% ด้านแรงดันต่ำ กระแสขาเข้าของเฟส A และ C มีค่าสูงขึ้น และกระแสขาออกของเฟส A มีค่าลดลงเพราะเฟส A ด้านแรงดันต่ำถูกเหนี่ยวนำกระแสด้วยขดลวด AC

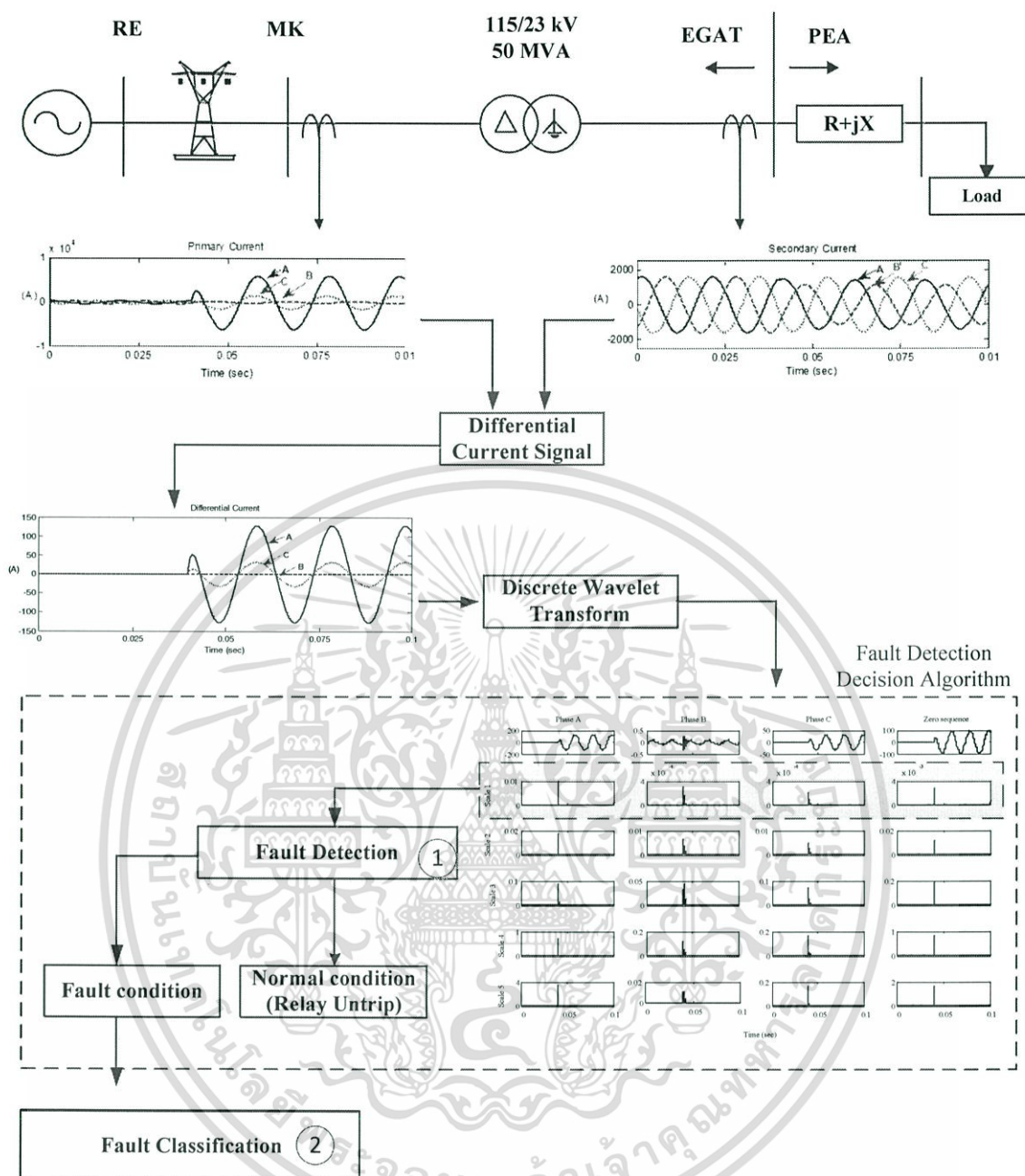
เมื่อได้ทำการจำลองระบบไฟฟ้าจนกระทั่งได้สัญญาณกระแสฟอลต์ของระบบไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าทั้งด้านปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง) และด้านทุติยภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าต่ำ) จากโปรแกรม EMTP/ATPDraw แล้ว หลังจากนั้นจะนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้มาหาค่ากระแสผลต่าง (Differential Current) และนำค่ากระแสผลต่างมาผ่านวิธีการแปลงเวฟเล็ดด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาวิเคราะห์การตรวจจับการเกิดฟอลต์ และแบ่งแยกประเภทฟอลต์ ซึ่งแสดงในบทต่อไป

## การวิเคราะห์ฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงวัดกระแสไฟฟ้า (Current Transformer : CT) ที่ติดตั้งอยู่ทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง นำสัญญาณทั้งสองที่ได้มาคำนวณในรูปแบบผลต่างกระแส (Different current) และวิเคราะห์สัญญาณตามสมมติฐานคือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะไม่มียอดประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่เกิดขึ้น ซึ่งจะใช้สมมติฐานนี้ในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทฟอลต์ที่เกิดขึ้นโดยอาศัยวิธีการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform, DWT) จากทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 เข้ามาวิเคราะห์ความถี่ที่แทรกเข้ามาในระบบ การแปลงเวฟเลตเป็นเทคนิคสำหรับการกรองสัญญาณออกเป็นช่วงความถี่ต่าง ๆ ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมาศึกษาพฤติกรรมของฟอลต์แต่ละรูปแบบเพื่อทำการตรวจจับการเกิดฟอลต์และแบ่งแยกฟอลต์แต่ละประเภท ขั้นตอนในการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 4.1 โดยทำการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/Draw ใส่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามบทที่ 3 เพื่อให้ได้สัญญาณกระแสไฟฟ้าออกมาโดยทำการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าทั้งด้านปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง) และด้านทุติยภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าต่ำ) หลังจากนั้นนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าทั้งสองฝั่งที่ได้มาคำนวณให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างกระแส (Different current) และนำสัญญาณที่ได้มาทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตจะนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจจับในขั้นตอน (Fault Detection ①) โดยที่รายละเอียดในการตรวจจับการเกิดฟอลต์จะแสดงในหัวข้อ 4.1 ในส่วนของแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์ (Fault Classification ②) รายละเอียดการแบ่งแยกการเกิดฟอลต์จะแสดงในหัวข้อที่ 4.2

### 4.1 การตรวจจับการเกิดฟอลต์

การตรวจจับฟอลต์สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณกระแสฟอลต์ในแต่ละเฟส และสัญญาณกระแสฟอลต์ขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ของสัญญาณกระแสผลต่าง (Different current) มาผ่านการแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วยเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกันจากนั้นนำมาแยกกำลังสอง สังเกตค่าจากองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 (ซึ่งมีความถี่สูงสุดจากตารางที่ 4.1) ทำการตรวจสอบค่าทุก  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล หรือ 5 มิลลิวินาที จนครบเวลาที่ทำการทดลอง (0.1 วินาที) โดยบันทึกค่าของกระแสผลต่างแต่ละเฟส ( $I_A^{diff}$ ,  $I_B^{diff}$ ,  $I_C^{diff}$ ) และกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ ( $I_{Zero}^{diff}$ ) รวม 4 เฟส ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ภายหลังการเกิดฟอลต์มีมากกว่า 5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ก่อนการเกิดฟอลต์ให้ตรวจจับและบันทึกค่าของแต่ละเฟสไว้ [24] ถ้าบันทึกค่าได้มากกว่า 1 เฟส ให้ถือว่าเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าบันทึกค่าได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เฟส ถือว่าไม่มีการเกิดฟอลต์ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการตรวจจับได้ดังรูปที่ 4.2

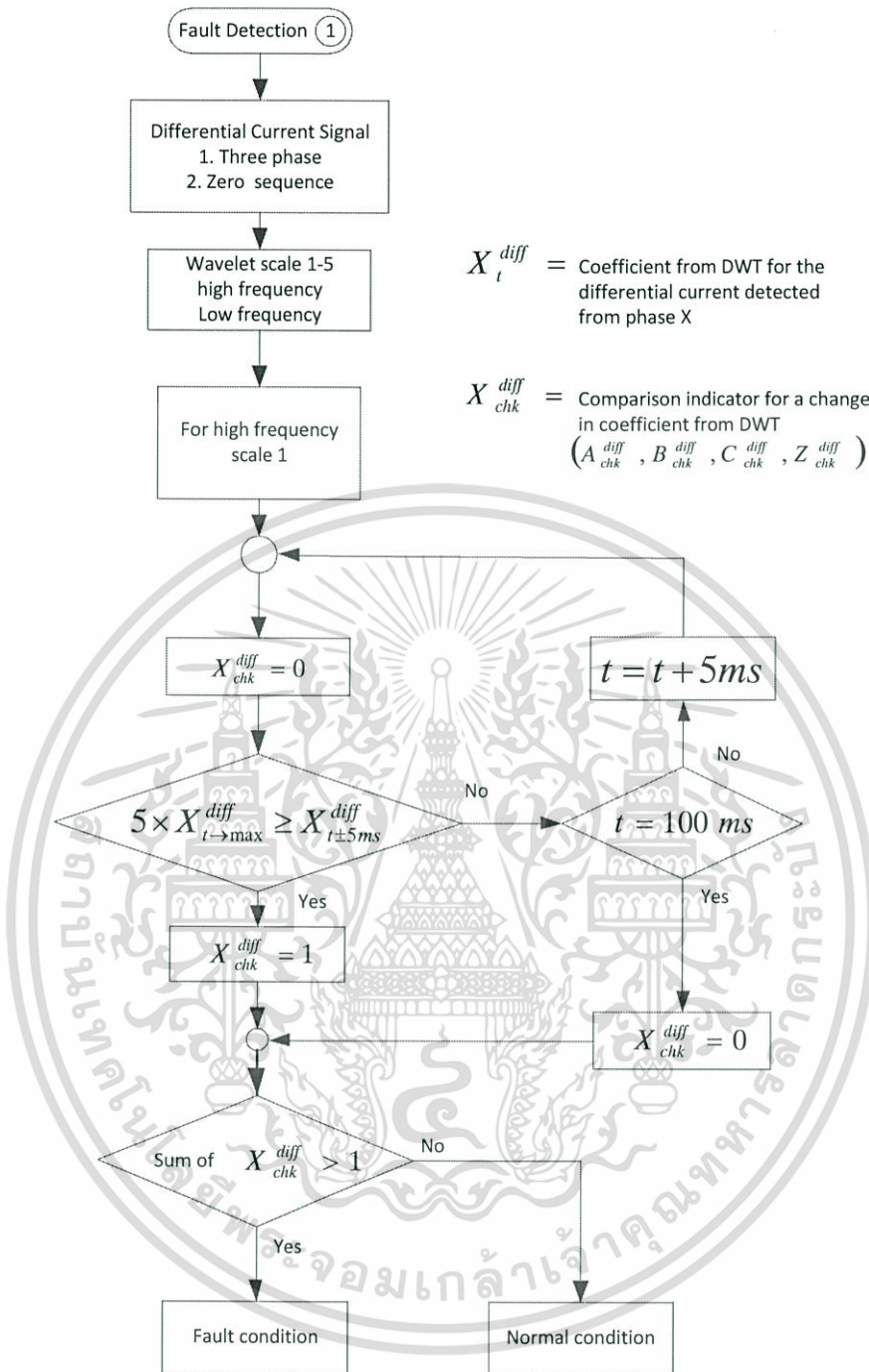


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฟอลต์โดยรวม

ตารางที่ 4.1 ช่วงความถี่ของการแปลงเวฟเลตแต่ละสเกล

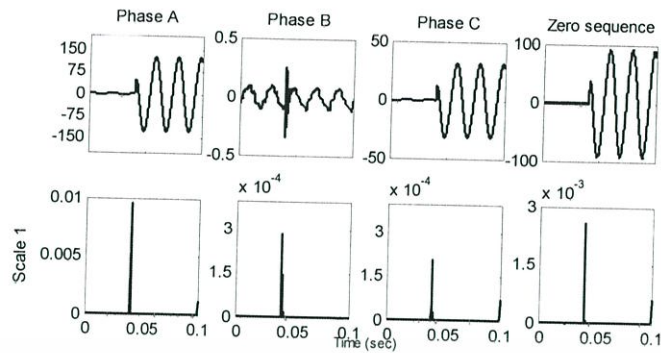
Scale	Detail 1	Detail 2	Detail 3	Detail 4	Detail 5	Approximation 5
Frequency Range (kHz)	50-100	25-50	25-12.5	12.5-6.25	6.25-3.125	3.125-0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เงื่อนไขการตรวจจับการเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการตรวจจับการเกิดฟอลต์

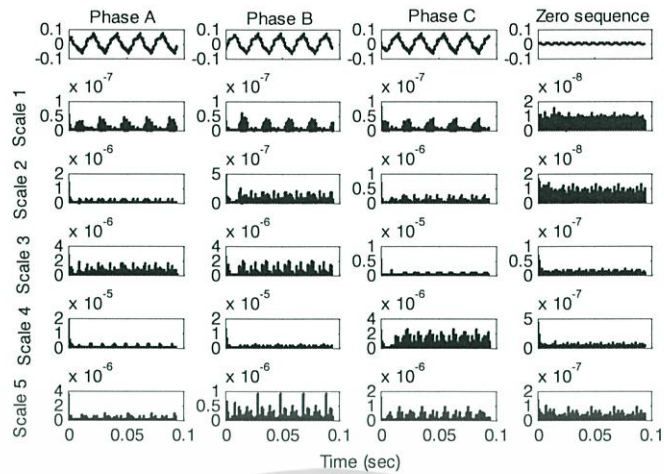
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็ทในการตรวจจับฟอลต์

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

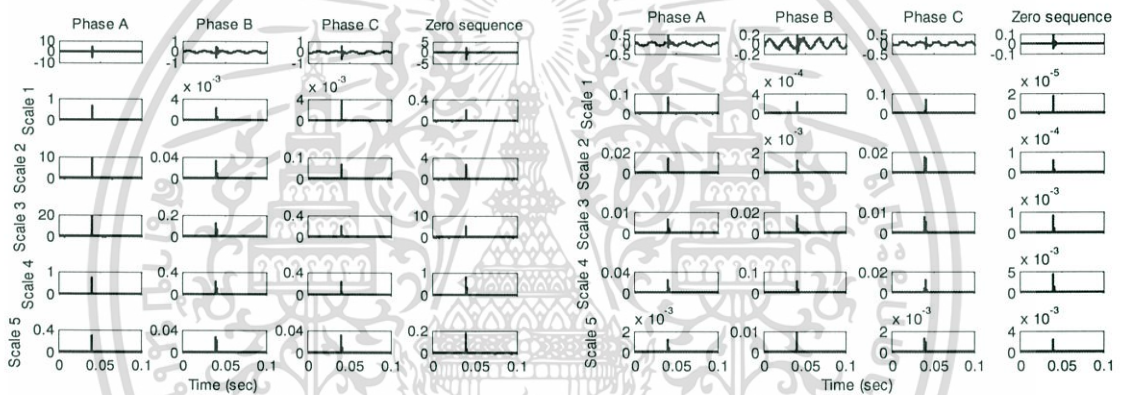
จากรูปที่ 4.3 แสดงการแปลงเวฟเล็ทสเกลที่ 1 กรณีการฟอลต์ภายในหม้อแปลงด้านแรงดันสูงสังเกตเมื่อเกิดฟอลต์ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ทมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อนำมาผ่านเงื่อนไขการตรวจจับฟอลต์จะได้ตามตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้หลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าก่อนเกิดฟอลต์ทั้ง 4 เฟสทำให้ผลรวมมีค่ามากกว่า 1 เฟสคือ ตรวจจับได้ว่าเกิดฟอลต์ หลังจากการตรวจจับฟอลต์ถ้าพบว่าเกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งแยกการเกิดฟอลต์โดยการสร้างอัลกอริทึมเพื่อแบ่งแยกประเภทฟอลต์ เพราะระบบป้องกันที่ดีควรมีการแยกแยะประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นเพื่อประโยชน์ในการบำรุงรักษาต่อไป โดยการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์จะศึกษาจากพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท โดยการแบ่งข้อมูลเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้างเงื่อนไข 50% และข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 50%

#### 4.2 พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ท

การสร้างอัลกอริทึมเพื่อแบ่งแยกประเภทฟอลต์จำเป็นที่จะต้องทราบถึงพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทเมื่อเกิดฟอลต์ในแต่ละรูปแบบเพื่อนำมาวิเคราะห์และสร้างเงื่อนไขให้กับอัลกอริทึม ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทจะแสดงดังรูปที่ 4.4-4.7



รูปที่ 4.4 การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 กรณีหม้อแปลงปกติ (Normal)

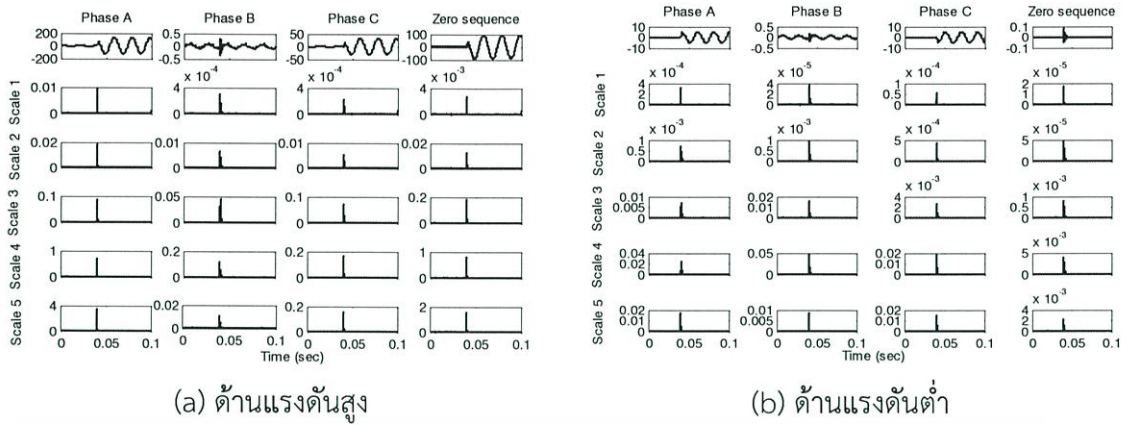


(a) ด้านแรงดันสูง

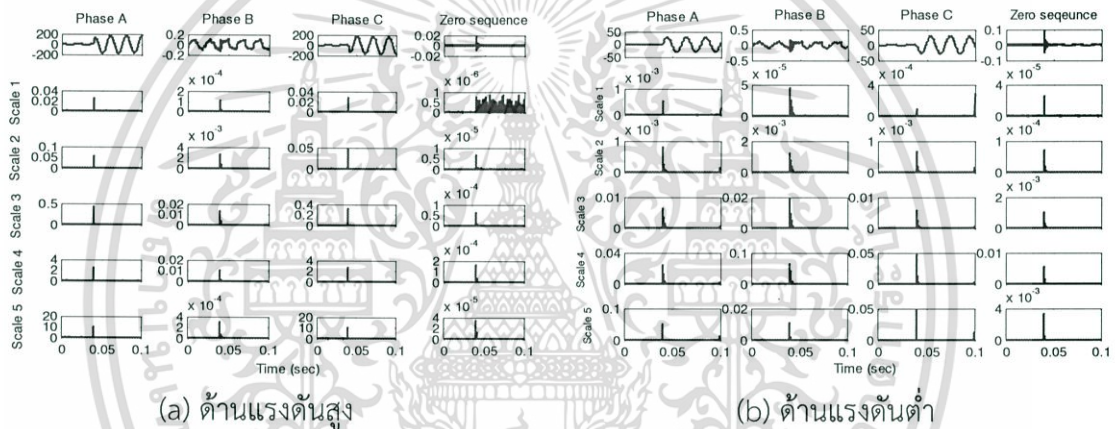
(b) ด้านแรงดันต่ำ

รูปที่ 4.5 การแปลงเวฟเลิตแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 กรณีเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง (External fault)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การแปลงเวฟเล็ดแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 กรณีการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault)



รูปที่ 4.7 การแปลงเวฟเล็ดแยกองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1-5 กรณีการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Turn to turn fault)

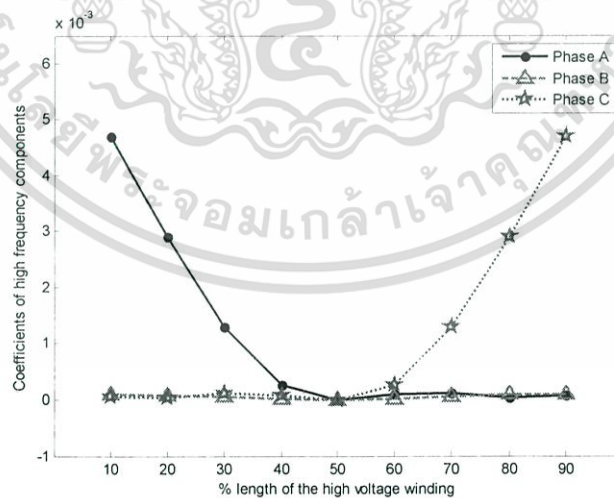
จากภาพที่ 4.4 – 4.7 การแปลงเวฟเล็ดองค์ประกอบความถี่สูง จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนสำหรับสัญญาณที่เกิดฟอลต์มีลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดที่สเกล 1-5 ฟุ้งขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับสัญญาณปกติจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของกราฟเป็นเพียงลักษณะของสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์น้อยคือประมาณ  $10E-7$  ถึง  $10E-6$  ในการศึกษาพฤติกรรมจะทำการวิเคราะห์ที่องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 (ซึ่งมีความถี่สูงสุด) โดยทำการปรับเปลี่ยนประเภทฟอลต์ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงและภายนอกหม้อแปลง โดยฟอลต์ภายในหม้อแปลงได้จำลองฟอลต์ 2 แบบคือ 1. แบบขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault) 2. แบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Interturn fault) โดยมีพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ดังนี้

#### 4.2.1 ฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault)

ด้านแรงดันสูง ขดลวดต่อกันแบบเดลต้าเมื่อเกิดฟอลต์ที่ 10%-40% ของระยะขดลวดที่ 1 (AC) ค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A จะมีค่ามากกว่าเฟสอื่น ที่ 60%-90% ค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส C จะมีค่ามากกว่าในเฟสอื่น เนื่องจากขดลวดที่ 1 เป็นการต่อเชื่อมกันระหว่างเฟส A และเฟส C ทำให้เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะ 10%-40% ซึ่งเกิดใกล้กับเฟส A จึงส่งผลกับเฟส A มากที่สุด กลับกันถ้าเกิดฟอลต์ที่ระยะ 60%-90% จะเกิดใกล้กับเฟส C และส่งผลกับเฟส C มากที่สุด แต่ถ้าเกิดที่ระยะ 50% เป็นจุดสะเทิน จึงส่งผลกระทบต่อระบบน้อยทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์น้อยลงด้วย สามารถแสดงตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูงที่ระยะต่าง ๆ

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง ของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดิน (มุม 120 องศา)				
		20%	40%	50%	60%	80%
Phase A	Pre-fault	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	9.60E-03	8.97E-04	2.40E-06	3.25E-04	1.62E-04
Phase B	Pre-fault	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	2.88E-04	7.42E-05	7.89E-08	8.66E-05	4.57E-04
Phase C	Pre-fault	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	2.10E-04	2.57E-04	2.42E-06	8.59E-04	9.40E-03
Zero sequence	Pre-fault	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	2.60E-03	4.85E-04	1.60E-06	4.97E-04	2.60E-03

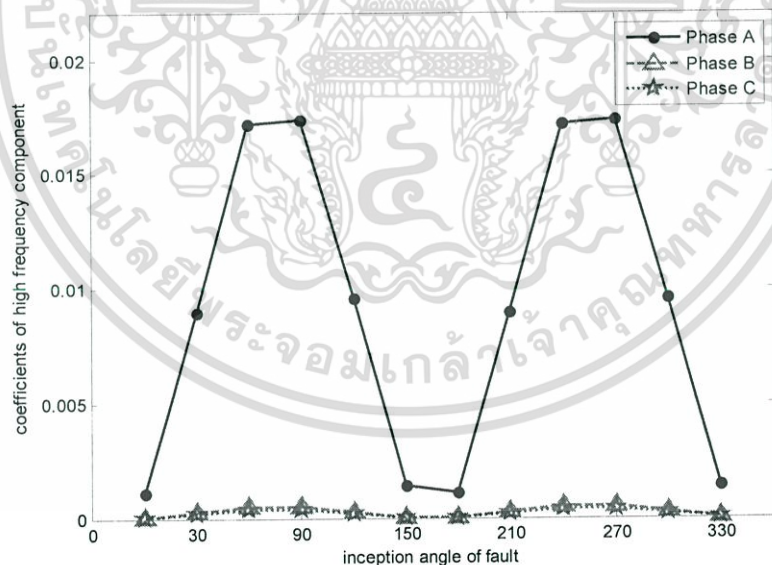


รูปที่ 4.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเกิดฟอลต์ โดยเกิดฟอลต์ที่ 20% ของระยะขดลวดที่ 1 (AC) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเฟส A และเฟส C ที่เกิดฟอลต์ มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ และมีค่าสูงสุดที่มุม 90 องศา น้อยสุดที่ 0 องศา และที่มุม 180 - 330 องศา มีลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะเดียวกับมุมที่ 0-150 องศา เนื่องจากได้ยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์ จึงได้ค่าที่เป็นค่าบวก แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูงที่มุมต่าง ๆ

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดิน ( ระยะขดลวด 20% )					
		0	30	60	90	120	150
Phase A	Pre-fault	7.15E-08	7.77E-08	1.24E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.19E-07
	Post-fault	1.10E-03	9.00E-03	1.72E-02	1.74E-02	9.60E-03	1.40E-03
Phase B	Pre-fault	1.35E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.59E-07	1.06E-07	6.34E-08
	Post-fault	3.37E-05	2.68E-04	5.18E-04	5.26E-04	2.88E-04	4.28E-05
Phase C	Pre-fault	2.01E-07	1.59E-07	1.06E-07	7.77E-08	1.24E-07	8.24E-08
	Post-fault	2.45E-05	1.98E-04	4.06E-04	3.90E-04	2.10E-04	3.57E-05
Zero sequence	Pre-fault	2.23E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.53E-08
	Post-fault	2.96E-04	2.40E-03	4.60E-03	4.70E-03	2.60E-03	3.81E-04



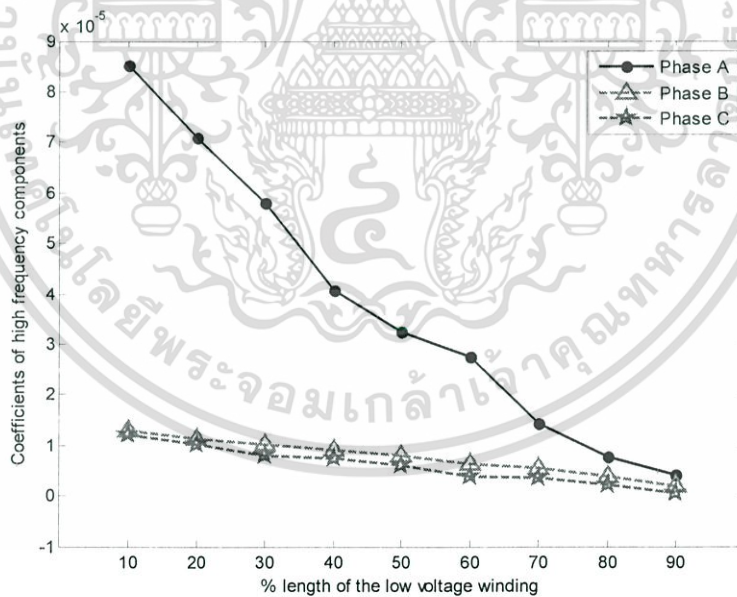
รูปที่ 4.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านแรงดันต่ำ ขดลวดต่อกันแบบสตาร์เมื่อเกิดฟอลต์ที่ 10% ของระยะขดลวดที่ 4 (A) ค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A จะมีค่ามากที่สุด และค่อย ๆ ลดลงตามระยะขดลวด ที่ 90% ค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A จะมีค่าน้อยลงแต่ยังมากกว่าเฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ เนื่องจากขดลวดที่ 4 (A) เป็นการต่อขดลวดแบบสตาร์เมื่อเกิดฟอลต์กับขดลวดที่ 4 (A) จึงไม่ส่งผลกับขดลวดอื่นมาก สามารถแสดงตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำที่ระยะต่าง ๆ

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง ของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดิน (มุม 120 องศา)				
		20%	40%	50%	60%	80%
Phase A	Pre-fault	2.18E-07	2.00E-07	1.52E-07	1.53E-07	1.67E-07
	Post-fault	3.23E-04	1.88E-04	1.48E-04	1.28E-04	3.54E-05
Phase B	Pre-fault	1.17E-07	1.18E-07	1.09E-07	8.63E-08	1.24E-07
	Post-fault	5.29E-05	4.00E-05	3.44E-05	2.50E-05	1.79E-05
Phase C	Pre-fault	1.35E-07	1.78E-07	2.33E-07	1.77E-07	1.67E-07
	Post-fault	3.54E-05	2.88E-05	2.34E-05	1.99E-05	1.28E-05
Zero sequence	Pre-fault	1.57E-08	1.46E-08	1.37E-08	1.15E-08	1.90E-08
	Post-fault	1.63E-05	1.10E-05	8.52E-06	6.90E-06	1.62E-06



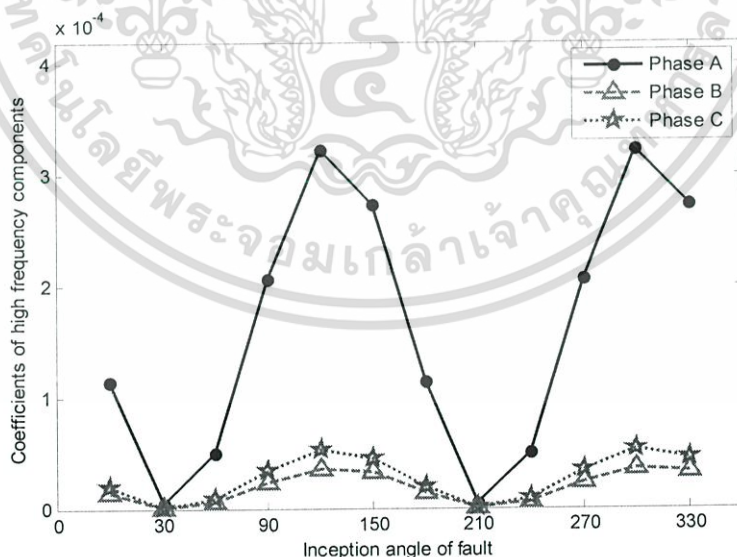
รูปที่ 4.10 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเกิดฟอลต์ โดยเกิดฟอลต์ที่ 20% ของระยะขดลวดที่ 4 (A) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเฟส A ที่เกิดฟอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B และเฟส C ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ และมีค่าสูงสุดที่มุม 120 องศา น้อยสุดที่ 30 องศา และที่มุม 180 - 330 องศา มีลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะเดียวกับมุมที่ 0-150 องศา เนื่องจากได้ยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์ และค่าที่ได้จะมีมุมล้าหลังกับด้านแรงดันสูงอยู่ 30 องศาเพราะการต่อขดลวดแบบ DY1 แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำ ที่มุมต่าง ๆ

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง ของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดิน ( ระยะขดลวด 20% )					
		0	30	60	90	120	150
Phase A	Pre-fault	8.72E-08	8.27E-08	1.30E-07	8.28E-08	2.18E-07	1.17E-07
	Post-fault	1.15E-04	4.64E-06	4.96E-05	2.06E-04	3.23E-04	2.74E-04
Phase B	Pre-fault	1.38E-07	8.12E-08	1.60E-07	1.46E-07	1.35E-07	1.05E-07
	Post-fault	1.37E-05	6.87E-07	5.45E-06	2.37E-05	3.54E-05	3.34E-05
Phase C	Pre-fault	2.45E-07	1.57E-07	1.05E-07	8.10E-08	1.17E-07	1.13E-07
	Post-fault	1.90E-05	8.35E-07	8.57E-06	3.41E-05	5.29E-05	4.44E-05
Zero sequence	Pre-fault	1.30E-08	1.46E-08	1.35E-08	1.71E-08	1.57E-08	1.61E-08
	Post-fault	5.85E-06	2.14E-07	2.52E-06	1.06E-05	1.63E-05	1.36E-05



รูปที่ 4.11 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ

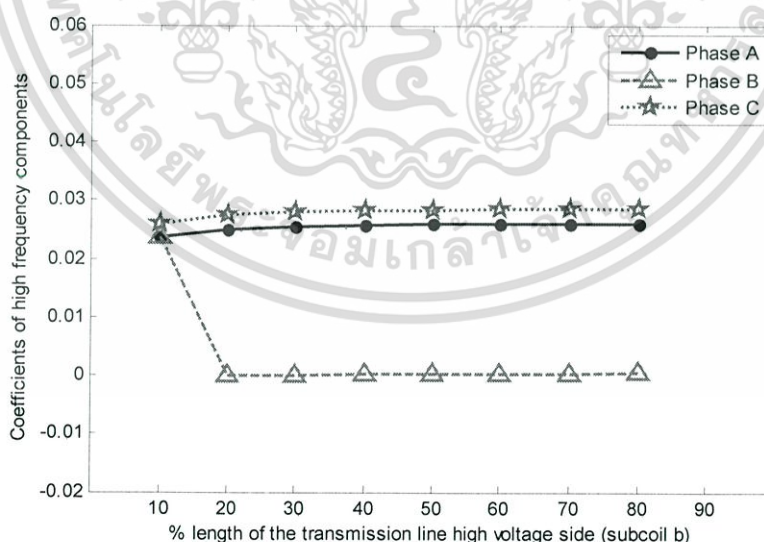
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Turn to turn fault)

ด้านแรงดันสูง เมื่อเกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่ 1 (AC) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของขดลวดย่อย b (ให้ขดลวดย่อย a คงที่) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A เฟส B และเฟส C จะมีค่าค่อย ๆ สูงขึ้นตามระยะของขดลวดย่อย b โดยเฟส A และเฟส C มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B เพราะเกิดฟอลต์ที่ขดลวดที่ 1 (AC) แต่ที่ระยะ 10% ค่าสัมประสิทธิ์ของเฟส B มีค่าสูงใกล้เคียงกับเฟส A ที่เกิดฟอลต์ แสดงตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูงที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง ของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด a-b (มุม 120 องศา)				
		10-20%	10-40%	10-50%	10-60%	10-80%
Phase A	Pre-fault	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	2.50E-02	2.57E-02	2.59E-02	2.60E-02	2.61E-02
Phase B	Pre-fault	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	1.03E-04	1.48E-04	1.61E-04	1.64E-04	4.42E-04
Phase C	Pre-fault	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	2.74E-02	2.82E-02	2.84E-02	2.85E-02	2.86E-02
Zero sequence	Pre-fault	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	8.30E-07	1.80E-06	1.83E-06	2.18E-06	1.10E-05

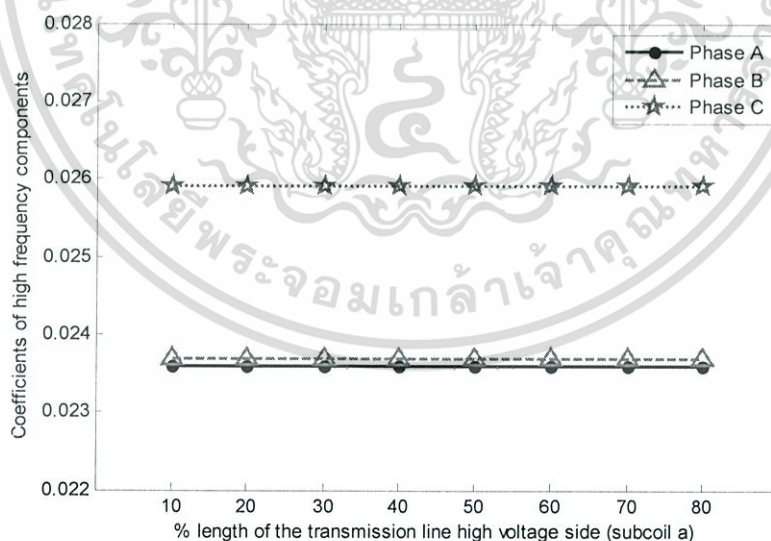


รูปที่ 4.12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b

เมื่อเกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่ 1 (AC) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของขดลวดย่อย a (ให้ขดลวดย่อย b คงที่) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A เฟส B และเฟส C จะมีค่าคงที่ตามระยะของขดลวดย่อย a โดยเฟส C มีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด และเฟส A กับเฟส B มีค่าสัมประสิทธิ์น้อยลง แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของทั้งสามเฟสมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ  $2E-02$  แสดงตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูงที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด a-b (มุม 120 องศา)				
		20-10%	40-10%	50-10%	60-10%	80-10%
Phase A	Pre-fault	1.51E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	2.36E-02	2.36E-02	2.36E-02	2.36E-02	2.36E-02
Phase B	Pre-fault	1.08E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02	2.37E-02
Phase C	Pre-fault	1.83E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	2.59E-02	2.59E-02	2.59E-02	2.59E-02	2.59E-02
Zero sequence	Pre-fault	1.42E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	7.73E-04	7.69E-04	7.69E-04	7.71E-04	7.69E-04

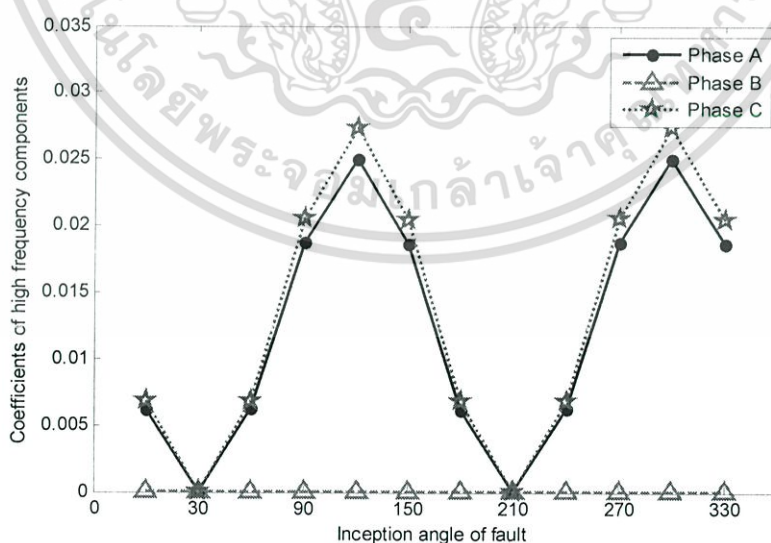


รูปที่ 4.13 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเกิดฟอลต์ โดยเกิดฟอลต์ระหว่างรอบที่ 10% ของระยะขดลวดย่อย a ถึง 20% ของขดลวดย่อย b ของขดลวด 1 (A-C) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเฟส A และเฟส C ที่เกิดฟอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ และมีค่าสูงสุดที่มุม 120 องศา น้อยสุดที่ 30 องศา และที่มุม 180 - 330 องศา มีลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะเดียวกับมุมที่ 0-150 องศา เนื่องจากได้ยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์จึงได้ค่าที่เป็นค่าบวก แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูงที่มุมต่าง ๆ

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด a-b (ระยะขดลวด 10% - 20%)					
		0	30	60	90	120	150
Phase A	Pre-fault	7.15E-08	8.08E-08	1.24E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.19E-07
	Post-fault	6.20E-03	3.49E-05	6.30E-03	1.88E-02	2.50E-02	1.87E-02
Phase B	Pre-fault	1.35E-07	1.21E-07	1.52E-07	1.59E-07	1.06E-07	6.34E-08
	Post-fault	1.76E-05	3.89E-06	3.73E-05	4.53E-05	1.03E-04	3.82E-05
Phase C	Pre-fault	2.01E-07	1.38E-07	1.06E-07	7.77E-08	1.24E-07	8.24E-08
	Post-fault	6.80E-03	3.82E-05	6.90E-03	2.06E-02	2.74E-02	2.04E-02
Zero sequence	Pre-fault	2.23E-08	2.14E-08	1.85E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.53E-08
	Post-fault	7.98E-07	8.51E-07	7.44E-07	7.20E-07	8.30E-07	7.74E-07



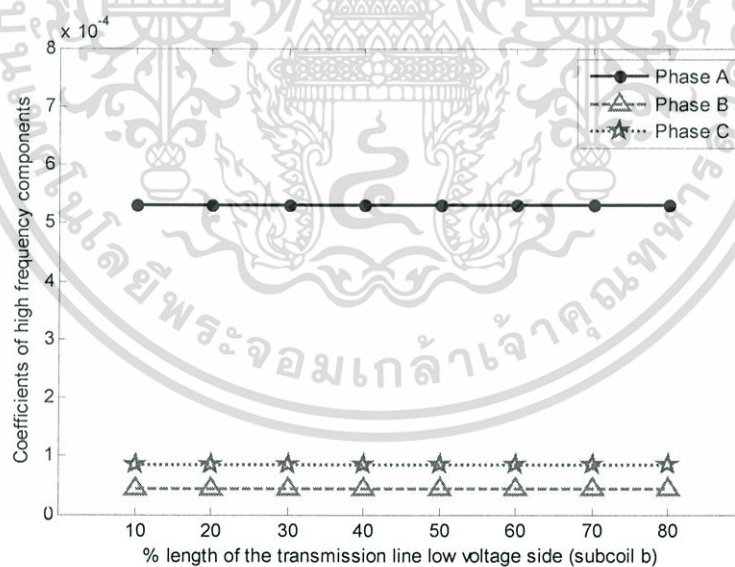
รูปที่ 4.14 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด AC ด้านแรงดันสูงลัดวงจรระหว่างรอบที่มุมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านแรงดันต่ำ เมื่อเกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่ 4 (A) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของขดลวดย่อย b (ให้ขดลวดย่อย a คงที่) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A เฟส B และเฟส C จะมีค่าคงที่เมื่อเปลี่ยนระยะของขดลวดย่อย b โดยเฟส A มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B และเฟส C แสดงตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง ของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด a-b (มุม 120 องศา)				
		10-20%	10-40%	10-50%	10-60%	10-80%
Phase A	Pre-fault	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	5.32E-04	5.32E-04	5.32E-04	5.32E-04	5.32E-04
Phase B	Pre-fault	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	4.38E-05	4.36E-05	4.36E-05	4.36E-05	4.36E-05
Phase C	Pre-fault	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	8.46E-05	8.46E-05	8.46E-05	8.46E-05	8.46E-05
Zero sequence	Pre-fault	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	2.49E-05	2.49E-05	2.49E-05	2.49E-05	2.50E-05



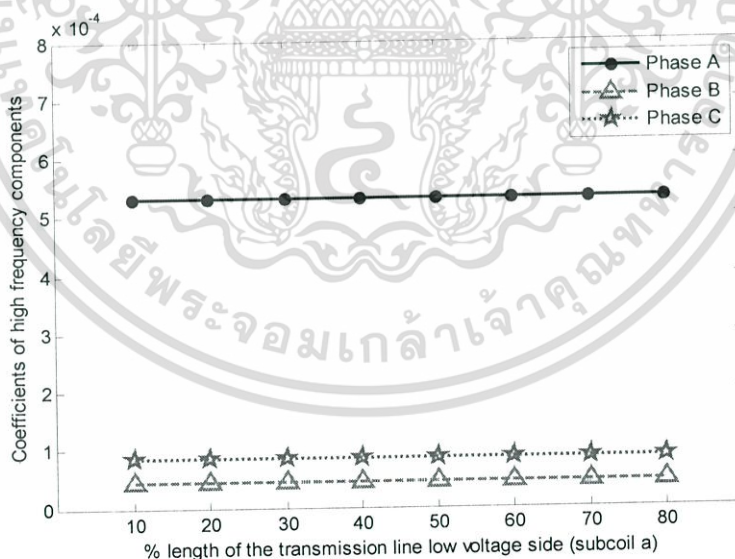
รูปที่ 4.15 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดที่ 4 (A) และทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของขดลวดย่อย a (ให้ขดลวดย่อย b คงที่) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A เฟส B และเฟส C จะมีค่าคงที่ตามระยะของขดลวดย่อย a โดยเฟส A มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าที่สุด เฟส B และเฟส C มี แสดงตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด a-b (มุม 60 องศา)				
		20-10%	40-10%	50-10%	60-10%	80-10%
Phase A	Pre-fault	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	5.30E-04	5.30E-04	5.30E-04	5.30E-04	5.30E-04
Phase B	Pre-fault	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	4.41E-05	4.41E-05	4.41E-05	4.41E-05	4.41E-05
Phase C	Pre-fault	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	8.46E-05	8.47E-05	8.47E-05	8.47E-05	8.46E-05
Zero sequence	Pre-fault	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	2.51E-05	2.51E-05	2.51E-05	2.51E-05	2.51E-05



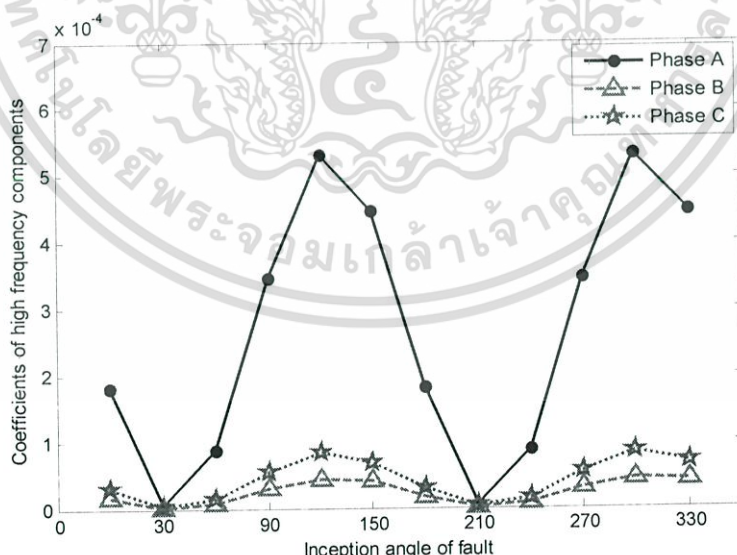
รูปที่ 4.16 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบที่ระยะต่าง ๆ ของขดลวดย่อย a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเกิดฟอลต์ โดยเกิดฟอลต์ระหว่างรอบที่ 10% ของระยะขดลวดย่อย a ถึง 20% ของขดลวดย่อย b ของขดลวด 4 (A) ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเฟส A ที่เกิดฟอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B และเฟส C ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ และมีค่าสูงสุดที่มุม 120 องศา น้อยสุดที่ 30 องศา และที่มุม 180 - 330 องศา มีลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะเดียวกับมุมที่ 0-150 องศา เนื่องจากได้ยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์จึงได้ค่าที่เป็นค่าบวก แสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำที่มุมต่าง ๆ

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด a-b (ระยะขดลวด 10% - 20%)					
		0	30	60	90	120	150
Phase A	Pre-fault	7.15E-08	7.77E-08	1.24E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.19E-07
	Post-fault	1.82E-04	5.86E-06	8.84E-05	3.46E-04	5.32E-04	4.48E-04
Phase B	Pre-fault	1.35E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.59E-07	1.06E-07	6.34E-08
	Post-fault	1.68E-05	7.20E-07	7.17E-06	3.00E-05	4.38E-05	4.04E-05
Phase C	Pre-fault	2.01E-07	1.59E-07	1.06E-07	7.77E-08	1.24E-07	8.24E-08
	Post-fault	2.94E-05	2.28E-06	1.44E-05	5.51E-05	8.46E-05	6.91E-05
Zero sequence	Pre-fault	2.23E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.53E-08
	Post-fault	8.38E-06	8.87E-07	4.11E-06	1.65E-05	2.49E-05	2.13E-05



รูปที่ 4.17 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ขดลวด A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรระหว่างรอบที่มุมต่าง ๆ

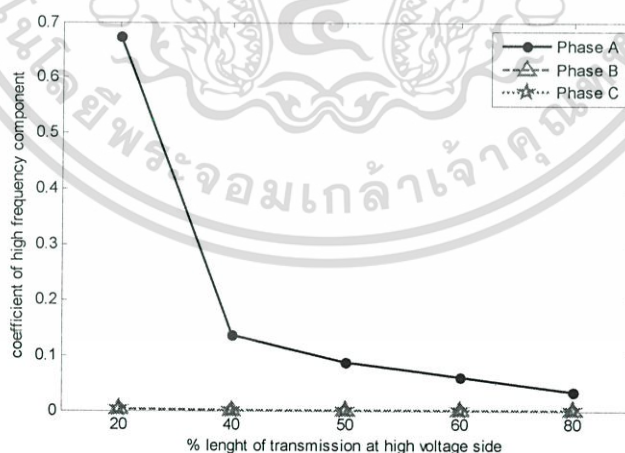
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง (Transmission line fault) การเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงจะกำหนดให้หม้อแปลงเป็นจุดศูนย์กลางและให้ระยะของสายส่งแปรผันตามระยะความห่างของหม้อแปลงทั้งด้านปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง) และด้านทุติยภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าต่ำ)

ด้านแรงดันสูง เมื่อเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงที่เฟส A ด้านแรงดันสูงและทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของระยะสายส่ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A จะมีค่ามากกว่าเฟส B และเฟส C ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ ค่าสัมประสิทธิ์ของเฟส A จะมีค่าลดลงตามระยะที่ทางที่เพิ่มขึ้น เพราะว่าเปอร์เซ็นต์ของระยะทางที่มากขึ้นแสดงว่าเกิดฟอลต์ไกลจากหม้อแปลงมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์มีลดลง แสดงตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.13 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบสายส่งลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูงที่ระยะต่าง ๆ ของสายส่ง

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์เฟส A ด้านแรงดันสูงของสายส่งลัดวงจรลงดิน (มุม 120 องศา)				
		20%	40%	50%	60%	80%
Phase A	Pre-fault	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	6.74E-01	1.37E-01	8.71E-02	6.03E-02	3.39E-02
Phase B	Pre-fault	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	2.30E-03	1.10E-03	9.90E-04	1.40E-03	1.80E-03
Phase C	Pre-fault	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	3.80E-03	1.70E-03	1.30E-03	1.60E-03	2.00E-03
Zero sequence	Pre-fault	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	2.02E-01	4.51E-02	2.86E-02	1.98E-02	1.11E-02

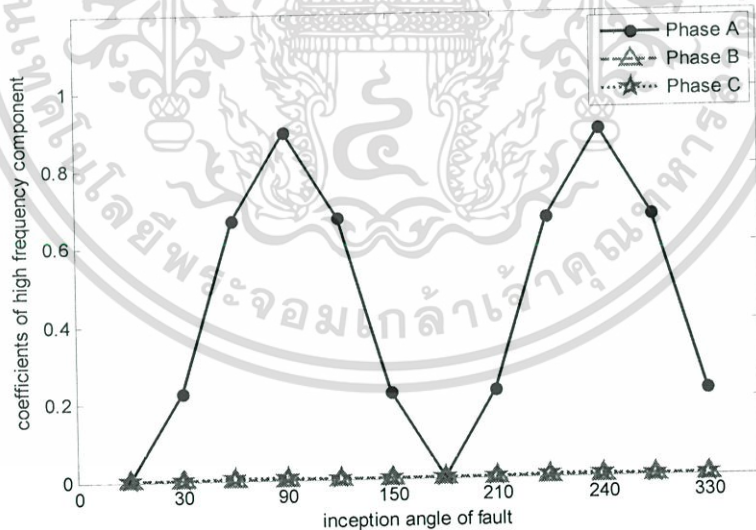


รูปที่ 4.18 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเกิดฟอลต์ โดยเกิดฟอลต์ที่ระยะ 20% ของสายส่งเฟส A ด้านแรงดันสูง ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเฟส A ที่เกิดฟอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B และเฟส C ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ และมีค่าสูงสุดที่มุม 90 องศา น้อยสุดที่ 0 องศา และที่มุม 180 - 330 องศา มีลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะเดียวกับมุมที่ 0-150 องศา เนื่องจากได้ยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์จึงได้ค่าที่เป็นค่าบวก แสดงดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.14 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูงที่มุมต่าง ๆ ของสายส่ง

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์เฟส A ด้านแรงดันสูงของสายส่งลัดวงจรลงดิน ( ระยะสายส่ง 20% )					
		0	30	60	90	120	150
Phase A	Pre-fault	7.15E-08	7.77E-08	1.24E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.19E-07
	Post-fault	5.80E-06	2.28E-01	6.72E-01	8.98E-01	6.74E-01	2.24E-01
Phase B	Pre-fault	1.35E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.59E-07	1.06E-07	6.34E-08
	Post-fault	7.35E-08	7.54E-04	2.10E-03	2.90E-03	2.30E-03	7.46E-04
Phase C	Pre-fault	2.01E-07	1.59E-07	1.06E-07	7.77E-08	1.24E-07	8.24E-08
	Post-fault	9.55E-08	1.40E-03	4.00E-03	5.00E-03	3.80E-03	1.30E-03
Zero sequence	Pre-fault	2.23E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.53E-08
	Post-fault	1.55E-06	6.84E-02	2.02E-01	2.70E-01	2.02E-01	6.72E-02

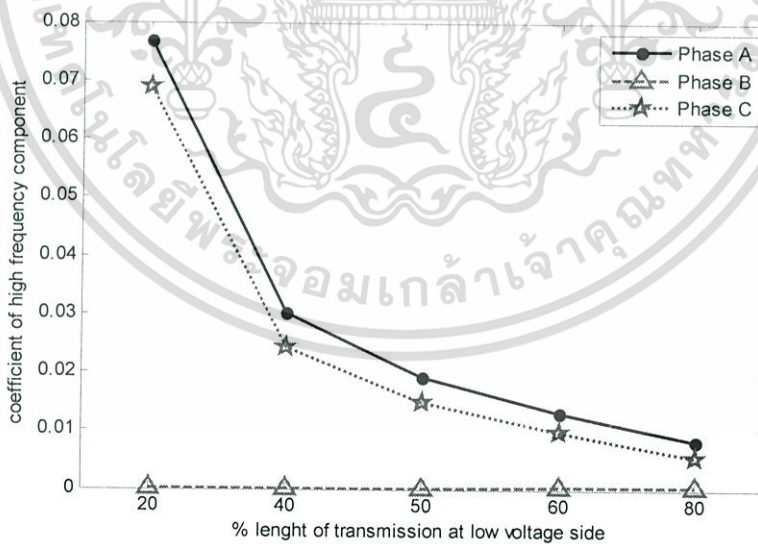


รูปที่ 4.19 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันสูงลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ

ด้านแรงดันต่ำ เมื่อเกิดฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงที่เฟส A ด้านแรงดันต่ำและทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของระยะสายส่ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในเฟส A และเฟส C จะมีค่ามากกว่าเฟส B ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ ค่าสัมประสิทธิ์ของเฟส A และเฟส C จะมีค่าลดลงตามระยะที่ทางที่เพิ่มขึ้น เพราะว่าเปอร์เซ็นต์ของระยะทางที่มากขึ้นแสดงว่าเกิดฟอลต์ไกลจากหม้อแปลงมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์มีลดลง และเนื่องจากเฟส A ด้านแรงดันต่ำถูกเหนี่ยวนำด้วยขดลวดที่ 1 (AC) จึงเกิดค่ามากในเฟส A และเฟส C แสดงตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.15 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำที่ระยะต่าง ๆ ของสายส่ง

สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์เฟส A ด้านแรงดันต่ำของสายส่งลัดวงจรลงดิน (มุม 120 องศา)				
		20%	40%	50%	60%	80%
Phase A	Pre-fault	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07	1.52E-07
	Post-fault	7.68E-02	3.01E-02	1.93E-02	1.30E-02	8.40E-03
Phase B	Pre-fault	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07	1.06E-07
	Post-fault	2.29E-04	1.57E-04	2.34E-04	2.84E-04	2.93E-04
Phase C	Pre-fault	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07	1.24E-07
	Post-fault	6.89E-02	2.44E-02	1.50E-02	9.70E-03	5.60E-03
Zero sequence	Pre-fault	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08	1.85E-08
	Post-fault	1.76E-05	2.01E-05	1.85E-05	1.48E-05	7.75E-06

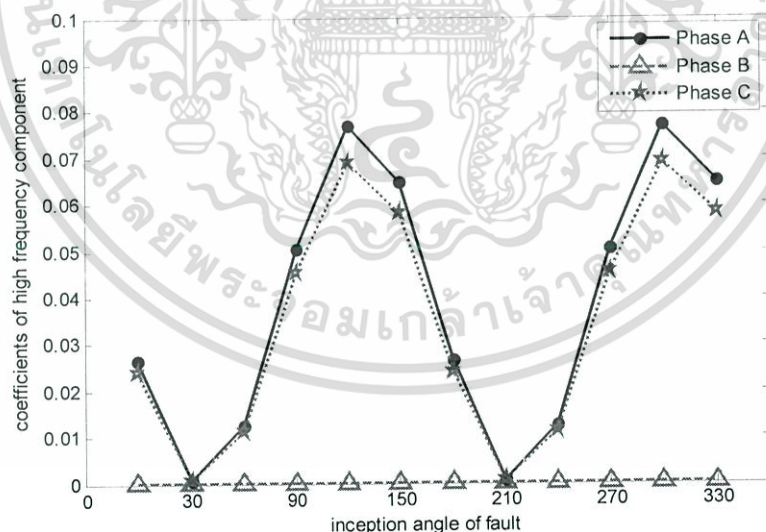


รูปที่ 4.20 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่ระยะต่าง ๆ

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมเกิดฟอลต์ โดยเกิดฟอลต์ที่ระยะ 20% ของสายส่งเฟส A ด้านแรงดันต่ำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมที่เกิดฟอลต์ ซึ่ง A และเฟส C ที่เกิดฟอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าเฟส B ที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ และมีค่าสูงสุดที่มุม 120 องศา น้อยสุดที่ 30 องศา และที่มุม 180 - 330 องศา มีลักษณะค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะเดียวกับมุมที่ 0-150 องศา เนื่องจากได้ยกกำลังสองค่าสัมประสิทธิ์จึงได้ค่าที่เป็นค่าบวก แสดงดังตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์สเกลที่ 1 ของฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำที่มุมต่าง ๆ ของสายส่ง

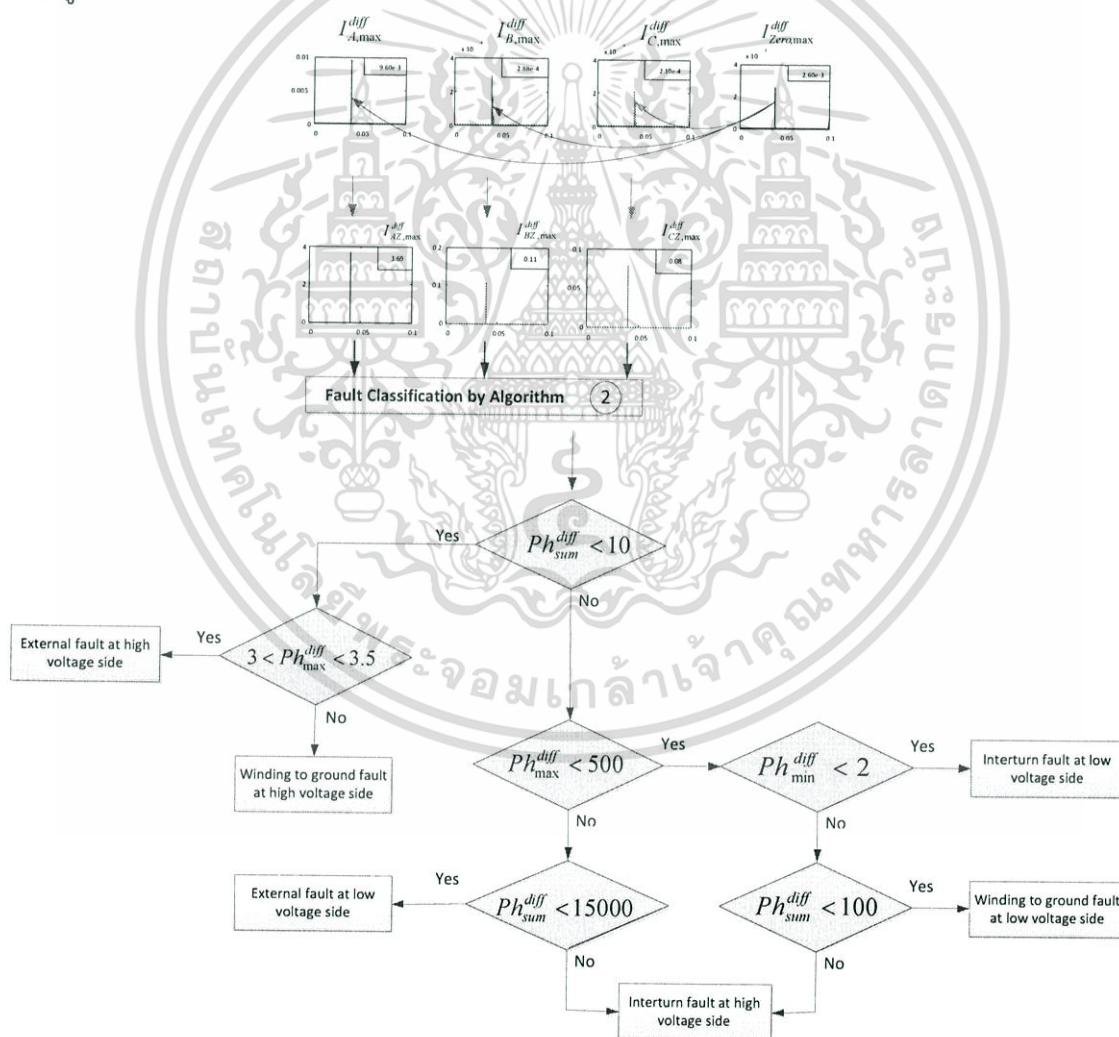
สัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูง ของกระแสผลต่าง		เกิดฟอลต์เฟส A ด้านแรงดันต่ำของสายส่งลัดวงจรลงดิน ( ระยะสายส่ง 20% )					
		0	30	60	90	120	150
Phase A	Pre-fault	7.15E-08	7.77E-08	1.24E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.19E-07
	Post-fault	2.66E-02	8.41E-04	1.26E-02	5.06E-02	7.68E-02	6.49E-02
Phase B	Pre-fault	1.35E-07	8.07E-08	1.52E-07	1.59E-07	1.06E-07	6.34E-08
	Post-fault	7.99E-05	2.64E-06	3.82E-05	1.54E-04	2.29E-04	2.06E-04
Phase C	Pre-fault	2.01E-07	1.59E-07	1.06E-07	7.77E-08	1.24E-07	8.24E-08
	Post-fault	2.39E-02	7.54E-04	1.13E-02	4.54E-02	6.89E-02	5.82E-02
Zero sequence	Pre-fault	2.23E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.49E-08	1.85E-08	1.53E-08
	Post-fault	6.11E-06	2.31E-07	2.75E-06	1.10E-05	1.76E-05	1.49E-05



รูปที่ 4.21 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์องค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 กรณีเกิดฟอลต์ที่สายส่งเฟส A ด้านแรงดันต่ำลัดวงจรลงดินที่มุมต่าง ๆ

#### 4.3 อัลกอริทึมการสร้างเงื่อนไขของค่าสัมประสิทธิ์ในการแบ่งแยกประเภทฟอลต์

จากพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทพบว่าค่าที่ได้ของฟอลต์แต่ละประเภทมีความแตกต่างกันซึ่งสามารถสร้างเงื่อนไขเพื่อแบ่งแยกประเภทฟอลต์ได้ โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ข้อมูลสำหรับใช้ในการสร้างเงื่อนไข 50% และข้อมูลสำหรับทดสอบ 50% เนื่องจากในการทดลองได้มีการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทมายกกำลังสองทำให้พฤติกรรมที่ได้มีค่าในลักษณะเดียวกันกับค่าที่ได้จากมุม 180-270 โดยในการสร้างเงื่อนไขจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสผลต่างทั้งสามเฟสและกระแสผลต่างลำดับศูนย์ (Zero sequence) เพราะค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทมีค่าน้อยมากทางผู้วิจัยจึงนำค่ากระแสผลต่างลำดับศูนย์มาหารค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสทั้งสามเฟส ซึ่งจะได้ตัวเลขเป็นจำนวนเต็มเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เพื่อสร้างเงื่อนไข โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ผลรวมของกระแสทั้งสามเฟส ( $Ph_{sum}^{diff}$ ) ค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด ( $Ph_{max}^{diff}$ ) ค่าสัมประสิทธิ์น้อยที่สุด ( $Ph_{min}^{diff}$ ) แสดงได้ตามรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แผนผังแสดงเงื่อนไขแสดงการแบ่งแยกประเภทฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

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

$Ph_{max}^{diff}$  = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดภายหลังจากเกิดฟอลต์  
ของการเปรียบเทียบ ( $I_{AZ,max(post)}^{diff}, I_{BZ,max(post)}^{diff}, I_{CZ,max(post)}^{diff}$ )

$Ph_{min}^{diff}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ต่ำสุดภายหลังจากเกิดฟอลต์  
ของการเปรียบเทียบ ( $I_{AZ,max(post)}^{diff}, I_{BZ,max(post)}^{diff}, I_{CZ,max(post)}^{diff}$ )

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

ในส่วนของการระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงจะแบ่งฟอลต์ออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือฟอลต์ด้านแรงสูง (High voltage side) และฟอลต์ด้านแรงต่ำ (Low voltage side) เนื่องจากหม้อแปลงที่ได้ทำการทดลองนั้นเป็นหม้อแปลงแบบ DY1

การระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์ทางด้านแรงสูงมีเงื่อนไขคือ  $Ph_{min}^{diff}$  คือเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์และให้ชื่อเฟสที่เหลือระบุเป็นขดลวดที่เกิดฟอลต์

การระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์ทางด้านแรงต่ำมีเงื่อนไขคือ  $Ph_{max}^{diff}$  คือเฟสที่เกิดฟอลต์และชื่อเดียวกับขดลวดที่เกิดฟอลต์

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็กรณฟอลต์ภายในหม้อแปลง

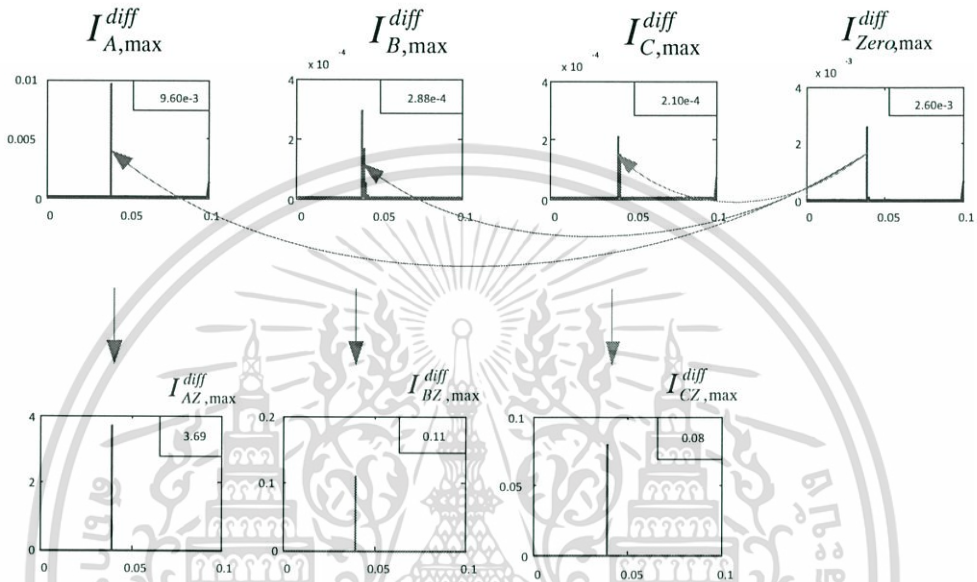
ข้อมูล ตัวอย่าง	ผลต่างกระแสจากรีเลย์						ผลลัพธ์ การเกิดฟอลต์
	$I_{AZ,max(post)}^{diff}$	$I_{BZ,max(post)}^{diff}$	$I_{CZ,max(post)}^{diff}$	$Ph_{sum}^{diff}$	$Ph_{max}^{diff}$	$Ph_{min}^{diff}$	
ตัวอย่าง 1	3.69	0.11	0.08	3.88	3.69	0.11	ขดลวดที่ 2 (BA) ลัดวงจรลงดิน
ตัวอย่าง 2	19.81	2.16	3.24	25.23	19.81	2.16	ขดลวดที่ 4 (A) ลัดวงจรลงดิน
ตัวอย่าง 3	30105	124	32995	63225	32995	124	ขดลวดที่ 1 (AC) ลัดวงจรระหว่างรอบ
ตัวอย่าง 4	21.35	1.76	3.40	26.53	21.35	1.76	ขดลวดที่ 4 (A) ลัดวงจรระหว่างรอบ

ตารางที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็กรณฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง

ข้อมูล ตัวอย่าง	ผลต่างกระแสจากรีเลย์						ผลลัพธ์ การเกิดฟอลต์
	$I_{AZ,max(post)}^{diff}$	$I_{BZ,max(post)}^{diff}$	$I_{CZ,max(post)}^{diff}$	$Ph_{sum}^{diff}$	$Ph_{max}^{diff}$	$Ph_{min}^{diff}$	
ตัวอย่าง 1	3.33	0.011	0.018	3.36	3.33	0.011	ฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันสูง
ตัวอย่าง 2	4359	13.03	3911	8283	4359	13.03	ฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีตัวอย่างตามตารางที่ 4.17 – 4.18 เมื่อนำค่าที่ได้มาผ่านเงื่อนไขการแบ่งประเภทฟอลต์ตามรูปที่ 4.21 เพื่อระบุประเภทการเกิดฟอลต์ เช่น ค่าจากตารางที่ 4.17 ตัวอย่างที่ 1  $PH_{sum}^{diff} = 3.88$  และ  $PH_{max}^{diff} = 3.69$  อยู่ในกรณีการเกิดขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูง ค่าสัมประสิทธิ์เฟส C มีค่าน้อยที่สุดจะได้ขดลวดที่เกิดฟอลต์คือ ขดลวด BA สรุปว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 ตัวอย่างที่ 1 คือเกิดฟอลต์ขดลวดที่ 2 (BA) ลัดวงจรลงดิน แสดงในรูปที่ 4.23 เป็นต้น



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแบ่งประเภทการเกิดฟอลต์

ตัวอย่างที่ 2  $PH_{sum}^{diff} = 25.23$ ,  $PH_{max}^{diff} = 19.81$  และ  $PH_{min}^{diff} = 2.16$  อยู่ในกรณีการเกิดขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์เฟส A มีค่ามากที่สุดจะได้ขดลวดที่เกิดฟอลต์คือ ขดลวด A สรุปว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 ตัวอย่างที่ 1 คือเกิดฟอลต์ขดลวดที่ 4 (A) ลัดวงจรลงดิน

ตัวอย่างที่ 3  $PH_{sum}^{diff} = 63225$  และ  $PH_{max}^{diff} = 32995$  อยู่ในกรณีการเกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูง ค่าสัมประสิทธิ์เฟส B มีค่าน้อยที่สุดจะได้ขดลวดที่เกิดฟอลต์คือ ขดลวด AC สรุปว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 ตัวอย่างที่ 3 คือเกิดฟอลต์ขดลวดที่ 1 (AC) ลัดวงจรระหว่างรอบ

ตัวอย่างที่ 4  $PH_{sum}^{diff} = 26.53$ ,  $PH_{max}^{diff} = 21.35$  และ  $PH_{min}^{diff} = 1.76$  อยู่ในกรณีการเกิดขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์เฟส A มีค่ามากที่สุดจะได้ขดลวดที่เกิดฟอลต์คือ ขดลวด A สรุปว่าค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 ตัวอย่างที่ 4 คือเกิดฟอลต์ขดลวดที่ 4 (A) ลัดวงจรระหว่างรอบ

ตารางที่ 4.18 ตัวอย่างที่ 1  $PH_{sum}^{diff} = 3.36$ ,  $PH_{max}^{diff} = 3.33$  อยู่ในกรณีการเกิดฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันสูง  
ตัวอย่างที่ 2  $PH_{sum}^{diff} = 8283$ ,  $PH_{max}^{diff} = 4359$  อยู่ในกรณีการเกิดฟอลต์ภายนอกด้านแรงดันต่ำ เป็นต้น จาก  
ข้อมูลทั้งหมด 3600 ข้อมูล การสร้างอัลกอริทึมสามารถแบ่งแยกประเภทฟอลต์ได้มีความถูกต้องโดยรวม  
ประมาณ 91.5% แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.19

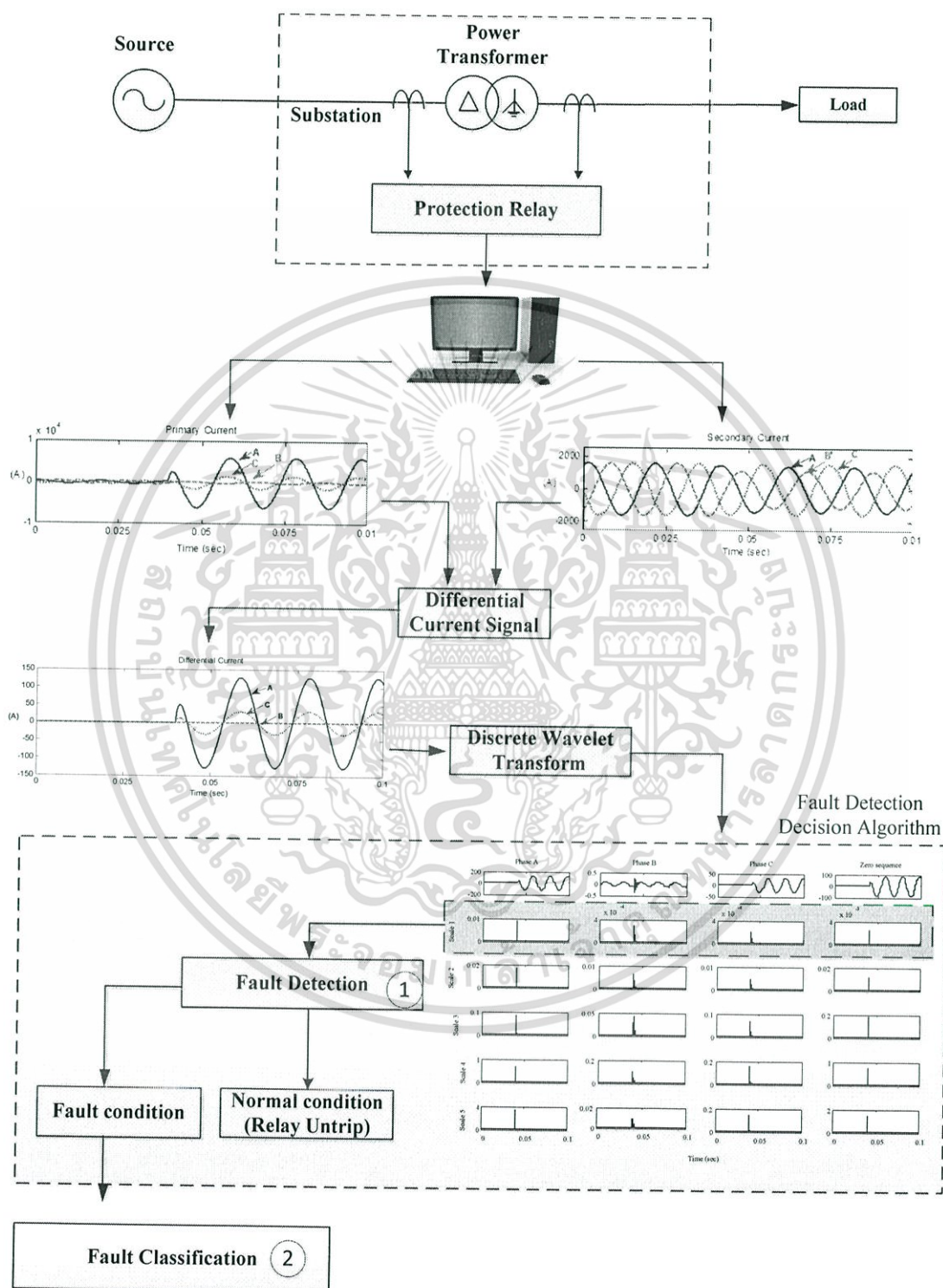
ตารางที่ 4.19 สรุปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการแบ่งแยกฟอลต์ด้วยอัลกอริทึม

ชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้น	ขดลวดลัดวงจรลงดิน		ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ		ภายนอกหม้อแปลง		เปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง
	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	
ข้อมูลสร้างเงื่อนไข	162	162	648	648	90	90	91.5%
ข้อมูลทดสอบ	162	162	648	648	90	90	91.5%
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	65.43%	83.33%	92.90%	97.99%	87.77%	100%	91.5%

การแบ่งแยกประเภทฟอลต์โดยศึกษาจากพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟ  
เล็ต โดยการใช้ข้อมูลในการสร้างเงื่อนไข 50% และข้อมูลทดสอบ 50% ความถูกต้องโดยรวมของข้อมูล  
ทดสอบ ซึ่งการเกิดฟอลต์แต่ละประเภทอยู่ที่มากกว่า 80% ยกเว้นการเกิดขดลวดลัดวงจรลงดินด้าน  
แรงดันสูง จากเงื่อนไขตามรูปที่ 4.21 สามารถแบ่งแยกประเภทการเกิดขดลวดลัดวงจรลงดินได้  
ความถูกต้องอยู่ที่ 98.76% แต่มีความผิดพลาดในการระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์ เพราะว่าเงื่อนไขในการระบุ  
เฟสการเกิดฟอลต์คือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตที่น้อยที่สุดถือว่าไม่เกิดฟอลต์ ที่เหลืออีก  
2 เฟสให้ถือว่าเป็นชื่อขดลวดที่เกิดฟอลต์ แต่ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตจะมีค่าน้อยที่สุดผิด  
ไป เช่น ฟอลต์ที่ 20% ของขดลวด AC ค่าสัมประสิทธิ์ที่เฟส A จะมีค่ามากที่สุดเพราะอยู่ใกล้เฟส A มาก  
ที่สุด และเฟส B และ C จะมีค่าน้อยใกล้เคียงกัน แต่ถ้าเฟส C มีค่าน้อยที่สุด ทำให้กรณีนี้จะระบุขดลวดที่  
เกิดฟอลต์คือ ขดลวด BA เป็นต้น ซึ่งสังเกตได้จากพฤติกรรมหัวข้อที่ 4.2.1 ฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบ  
ขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault) ด้านแรงดันสูง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดลองสร้างเงื่อนไขต่าง  
ๆ แต่ก็ไม่สามารถทำให้ความถูกต้องเป็นที่น่าพอใจได้ เนื่องจากการต่อการของขดลวดแบบเดลต้าทาง  
ด้านปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง) ทำให้ค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันทั้งหมด

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวความคิดที่นำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI)  
เข้ามาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ในบทต่อไป

#### 4.4 แนวทางการนำข้อมูลจริงมาประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 4.24 ขั้นตอนแนวทางการวิเคราะห์สัญญาณด้วยข้อมูลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTP/ATPDraw เพื่อให้ได้สัญญาณของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าออกมา จากนั้นจะนำสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ได้มาหาค่าผลต่างกระแส (Differential Current) และนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลตต่อไป ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งาน ผู้วิจัยมีแนวทางปฏิบัติในการนำข้อมูลจริงมาประยุกต์ใช้งานคือ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าแล้วเราจะต้องตรวจจับและนำสัญญาณที่ได้จากรีเลย์มาหาค่าผลต่างของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสรวมถึงการหาค่าของกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ในการจำลองระบบการตรวจจับสัญญาณนั้นผู้วิจัยได้ใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer: CT) ขนาด 400/5 ด้านปฐมภูมิ และ 2000/5 ด้านทุติยภูมิ ในกรณีของหม้อแปลงขนาด 50MVA, 115/23 kV นำสัญญาณมาหาผลต่างกระแสของทั้งสามเฟสและกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเลตนั้นเราใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการกรองข้อมูลออกเป็น 5 สเกลผ่านเวฟเลตแม่ (Mother Wavelet) ชนิด (Daubechies: db2) หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ผ่านการแปลงเวฟเลตมาแยกกำลังสองและวิเคราะห์ตามหัวข้อ 4.1, 4.3 ต่อไปคือ

ในหัวข้อที่ 4.1 คือการตรวจจับการเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า โดยจะใช้ค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเลตองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 ที่ได้ยกกำลังสองแล้ว มาหาค่าการเปลี่ยนแปลง ถ้าสัญญาณที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 5 เท่าให้เก็บค่าไว้ ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบทั้งหมด 4 เฟสด้วยกันคือ เฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) หากมีการตรวจจับค่าได้มากกว่า 1 เฟสให้ถือว่าสัญญาณที่นำมานั้นเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และเมื่อตรวจจับได้แล้วว่าเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าขั้นตอนต่อไปคือการแบ่งแยกประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นโดยมีวิธีการตามหัวข้อที่ 4.3

ในหัวข้อที่ 4.3 คือการแบ่งแยกประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยจะใช้ค่าสูงสุดที่ได้จากการแปลงเวฟเลตองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 ที่ได้ยกกำลังสองแล้วของกระแสทั้งสามเฟสรวมทั้งองค์ประกอบลำดับศูนย์ด้วยมาดำเนินการตามรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการนำค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบลำดับศูนย์มาหาค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสทั้งสามเฟสแล้วนำมาหาผลรวม ( $Ph_{sum}^{diff}$ ) ค่าสูงสุด ( $Ph_{max}^{diff}$ ) และค่าต่ำสุด ( $Ph_{min}^{diff}$ ) เพื่อนำค่าที่ได้มาผ่านเงื่อนไขต่าง ๆ ก็จะสามารถระบุประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้

## การวิเคราะห์ฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังร่วมกับ ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

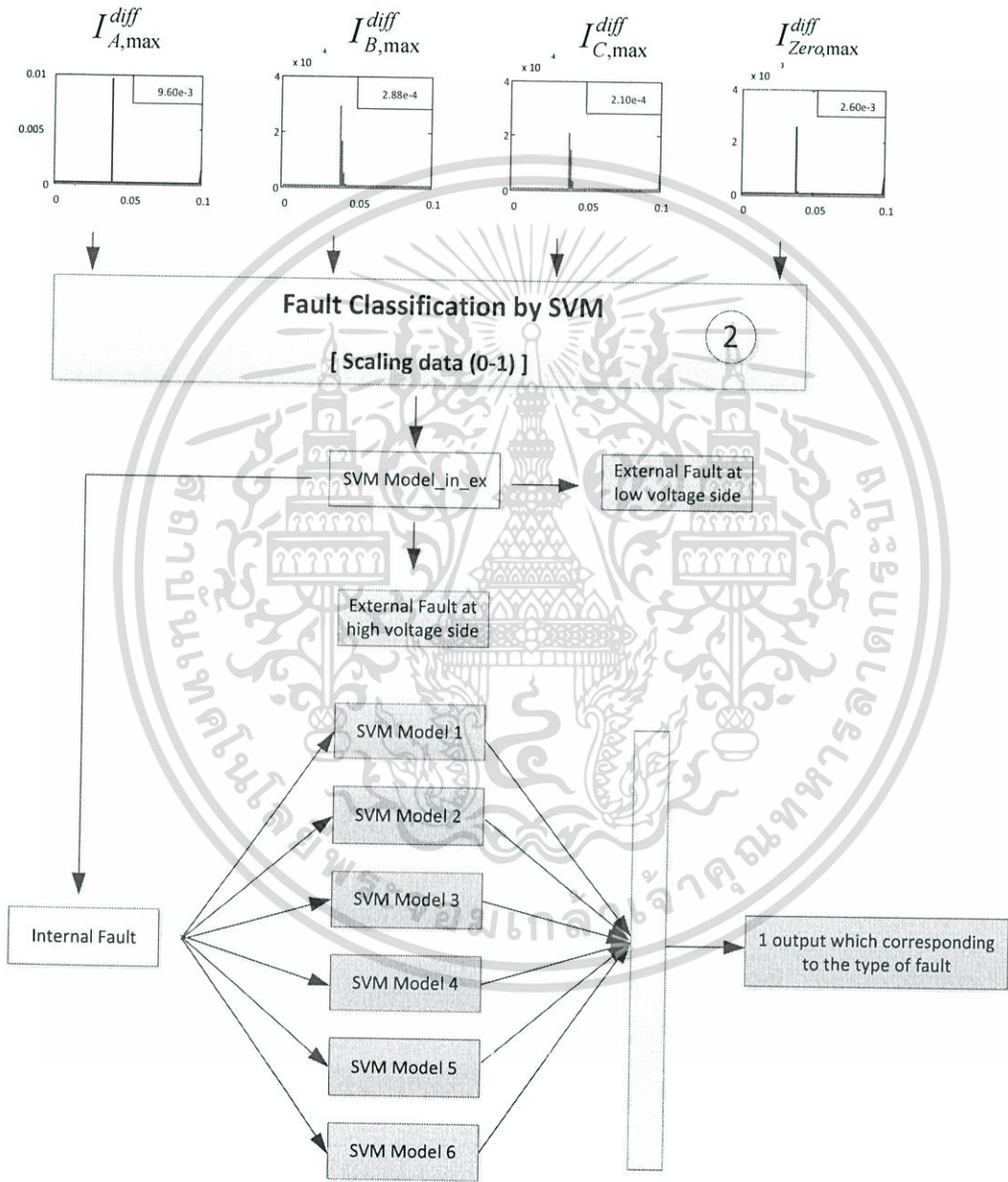
จากบทที่ 4 การแบ่งแยกประเภทฟอลต์ด้วยการสร้างเงื่อนไขยังมีความถูกต้องน้อยเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทมีความซับซ้อนมากทำให้การแบ่งข้อมูลแบบเชิงเส้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ ปัจจุบันมีวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อน ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่ใช้ในการแบ่งประเภทซึ่งได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เพราะมีพื้นฐานมาจากการแบ่งข้อมูลเชิงเส้น (linear classification) ร่วมกับการเรียนรู้ที่อาศัยหลักทฤษฎีการเรียนรู้ทางสถิติ (Statistical Learning Theory) พร้อมกับทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Theory) และยังสามารถแบ่งแยกข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยวิธีการเคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) ทำให้วิเคราะห์ข้อมูลได้หลากหลายมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนกับโครงข่ายประสาทเทียมในการแบ่งแยกข้อมูลด้านต่าง ๆ [35-38] พบว่าโดยมากแล้ว ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจะให้ความถูกต้องแม่นยำสูงกว่า ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเข้ามาช่วยวิเคราะห์การแบ่งแยกประเภทฟอลต์ของหม้อแปลงซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 5.1 การเตรียมข้อมูล

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเป็นวิธีการแบ่งข้อมูลด้วยเส้น ข้อมูลแต่ละตัวนั้นแสดงอยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์จำนวนจริง ดังนั้นจึงต้องแปลงเอาต์พุตให้แสดงค่าตอบในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลข โดยใช้ตัวเลข  $1, 2, \dots, m$  แทนลักษณะการเกิดฟอลต์แต่ละชนิดของข้อมูลแต่ละตัว เช่น ขดลวดที่ 1 (AC) ลัดวงจรลงดิน สามารถแทนคุณลักษณะคือ  $(1, 0, 0, 0, 0, 1)$  ลำดับที่ 1 ถึง 6 แทนขดลวดที่เกิดฟอลต์ และลำดับสุดท้ายแทนลักษณะฟอลต์ เป็นต้น งานวิจัยนี้จะนำข้อมูลที่ได้หลังจากการแปลงเวฟเล็ทของกระแสเฟส A, B, C และกระแสลำดับศูนย์มาเป็นอินพุตซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาคำนวณได้ แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทของฟอลต์แต่ละประเภทมีค่าที่กระจุกกระจาย ดังนั้นจึงใช้การสเกลค่าให้อยู่ระหว่าง  $[0, 1]$  และใช้เป็นค่าอินพุตให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งประโยชน์ของการสเกลค่าข้อมูลคือหลีกเลี่ยงช่วงของค่าคุณลักษณะในเชิงตัวเลขที่มีค่ามากๆ และหลีกเลี่ยงการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากซับซ้อน เพราะค่าของเคอร์เนลจะขึ้นกับผลเชิงสเกลาร์ของเวกเตอร์ในปริภูมิสูง ถ้าหากค่าคุณลักษณะที่ถูกแปลงมาให้อยู่ในรูปเชิงตัวเลขนั้นมีค่าอยู่ในช่วงที่กว้างมากจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณ

### 5.2 โครงสร้างกระบวนการระบุชนิดฟอลต์

โครงสร้างของซอฟต์แวร์วิเคราะห์แอมพลิจูดของสัญญาณ 4 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ภายหลังจากการเกิดฟอลต์ของเฟส A, B, C และกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero sequence) โดยนำมาผ่านโมเดลของซอฟต์แวร์วิเคราะห์แอมพลิจูดซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของซอฟต์แวร์วิเคราะห์แอมพลิจูดที่ใช้ในการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) ใช้ระบุพอลต์ภายในหรือภายนอกหม้อแปลงผ่านโมเดลของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน 1 โมเดลเพื่อระบุชนิดความผิดปกติประเภทพอลต์ภายในหม้อแปลงและพอลต์ภายนอกหม้อแปลง โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตมาเป็นอินพุตให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยผ่านการสเกลค่าให้มีค่าอยู่ระหว่าง (0-1) แล้วนำมาเข้ากระบวนการของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยจะแบ่งแยกพอลต์ออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันตามตารางที่ 5.1

ตาราง 5.1 เอาท์พุทโมเดลของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการแบ่งแยกพอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

Models of SVM	Output of SVM	Classification of fault type	Types of fault
in_ex	1	External fault at high voltage side	EX_HV
	2	External fault at low voltage side	EX_LV
	3	Internal fault	Internal

2.) ใช้ในการระบุประเภทและเฟสที่เกิดพอลต์ภายในหม้อแปลงผ่านโมเดลของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนทั้งหมด 6 โมเดล แต่ละโมเดลจะสามารถระบุประเภทพอลต์ต่างกันไปคือ

โมเดลที่ 1 จะสามารถระบุชนิดความผิดปกติประเภท WG-1 และ WG-4

โมเดลที่ 2 จะสามารถระบุชนิดความผิดปกติประเภท WG-2 และ WG-5

โมเดลที่ 3 จะสามารถระบุชนิดความผิดปกติประเภท WG-3 และ WG-6

โมเดลที่ 4 จะสามารถระบุชนิดความผิดปกติประเภท TT-1 และ TT-4

โมเดลที่ 5 จะสามารถระบุชนิดความผิดปกติประเภท TT-2 และ TT-5

โมเดลที่ 6 จะสามารถระบุชนิดความผิดปกติประเภท TT-3 และ TT-6

ซึ่งเมื่อระบุพอลต์ภายในหม้อแปลงขั้นตอนต่อมาคือ การระบุประเภทและชนิดพอลต์ที่เกิดพอลต์โดยใช้ข้อมูล 6 ชุดเป็นอินพุตให้กับทั้ง 6 โมเดล โดยแต่ละโมเดลจะทำงานขนานกันไป เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของความผิดพลาดแบบลูกโซ่เพราะว่าที่ผ่าน ๆ มากระบวนการแบ่งแยกประเภทพอลต์จะใช้เอาค่าอินพุตผ่านเข้ากระบวนการซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนทีละโมเดล โดยเอาท์พุทของโมเดลแรกจะเป็นอินพุทของโมเดลถัดไปซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการระบุชนิดความผิดปกติประเภทซึ่งส่งผลแบบลูกโซ่ต่อเนื่องกันไป และเนื่องจากข้อมูลที่มีจำนวนมากกับความซับซ้อนของข้อมูลจึงไม่สามารถใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์เพียงหนึ่งโมเดลเพื่อระบุพอลต์ทั้ง 12 ชนิดได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการโดยให้อินพุตเข้าผ่านกระบวนการซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนพร้อมกันทั้ง 6 โมเดลซึ่งแต่ละโมเดลจะรับอินพุตเหมือนกัน และได้เอาท์พุทออกมาซึ่งแต่ละโมเดลจะให้ค่าเอาท์พุทตามความสามารถของแต่ละโมเดลตามตารางที่ 5.2 แล้วค่อยนำผลลัพธ์มารวมกัน ดังรูปที่ 5.1

ตาราง 5.2 เอาท์พุทโมเดลของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการระบุชนิดฟอลต์

Models of SVM	Output of SVM	Classification of fault type	Types of fault
1	1	Winding to ground fault at coil 1 (AC)	WG-1
	2	Winding to ground fault at coil 4 (A)	WG-4
	3	Other fault	N/A
2	4	Winding to ground fault at coil 2 (BA)	WG-2
	5	Winding to ground fault at coil 5 (B)	WG-5
	6	Other fault	N/A
3	7	Winding to ground fault at coil 3 (CB)	WG-3
	8	Winding to ground fault at coil 6 (C)	WG-6
	9	Other fault	N/A
4	10	Interturn fault at coil 1 (AC)	TT-1
	11	Interturn fault at coil 4 (A)	TT-4
	12	Other fault	N/A
5	13	Interturn fault at coil 2 (BA)	TT-2
	14	Interturn fault at coil 5 (B)	TT-5
	15	Other fault	N/A
6	16	Interturn fault at coil 3 (CB)	TT-3
	17	Interturn fault at coil 6 (C)	TT-6
	18	Other fault	N/A

### 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

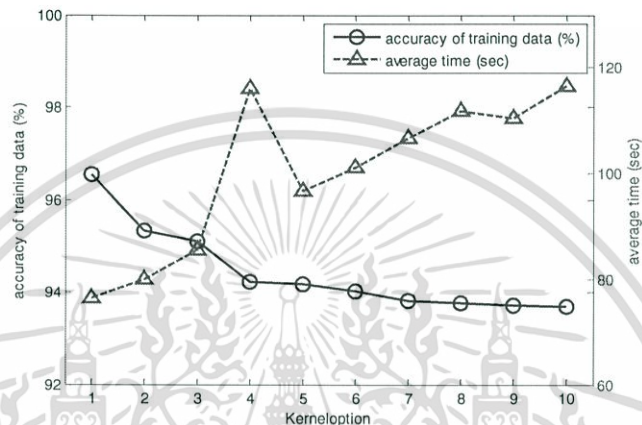
5.3.1 เคอร์เนล (Kernel) เปรียบเทียบได้กับลักษณะของเส้นแบ่งข้อมูลซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกันแต่ที่นิยมใช้กันหลายแพร่หลายคือ เกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian Kernel) และโพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial Kernel) ทั้งสองแบบเป็นเคอร์เนลไม่เป็นเชิงเส้นทั้งคู่ ลักษณะของเส้นแบ่งข้อมูลมีรายละเอียดตามบทที่ 2

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงทดลองนำข้อมูลป้อนให้กับเคอร์เนลทั้งสองชนิด โดยคงค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ไว้และปรับค่าเฉพาะพารามิเตอร์เคอร์เนลเท่านั้น

เกาส์เซียนเคอร์เนล (Gaussian Kernel)

$$\text{Gaussian kernel: } K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad (5.1)$$

ตามสมการที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ของเกาส์เซียนเคอร์เนลคือค่า  $\gamma$  เมื่อปรับค่าจะทำให้ลักษณะของเส้นแบ่งข้อมูลเปลี่ยนแปลงส่งผลกับผลคำตอบที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



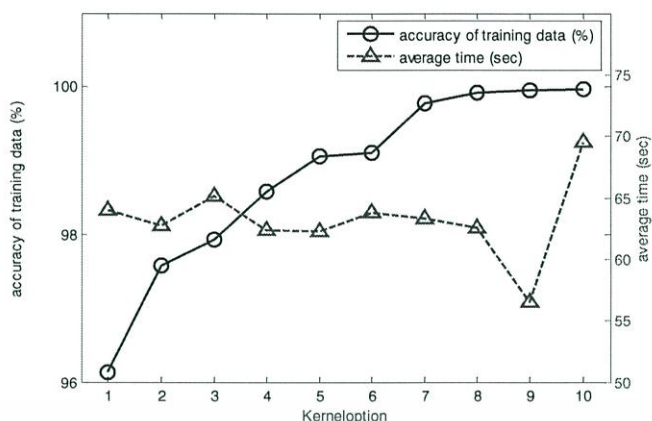
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ของเกาส์เซียนเคอร์เนล

พบว่าถ้าเพิ่มเคอร์เนลพารามิเตอร์ทำให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการฝึกสอนลดลง และถ้าเคอร์เนลพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีกก็ความเป็นไปได้ที่เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจะลดลงตามทิศทางของรูปที่ 5.3

โพลีโนเมียลเคอร์เนล (Polynomial Kernel)

$$\text{Polynomial kernel: } K(x, y) = (1 + (x^T y))^p \quad \text{โดย } p \geq 2 \quad (5.2)$$

ตามสมการที่ 5.2 พารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ของโพลีโนเมียลเคอร์เนล คือค่า  $p$  เมื่อปรับค่าจะทำให้ลักษณะของเส้นแบ่งข้อมูลเปลี่ยนแปลงส่งผลกับผลคำตอบที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

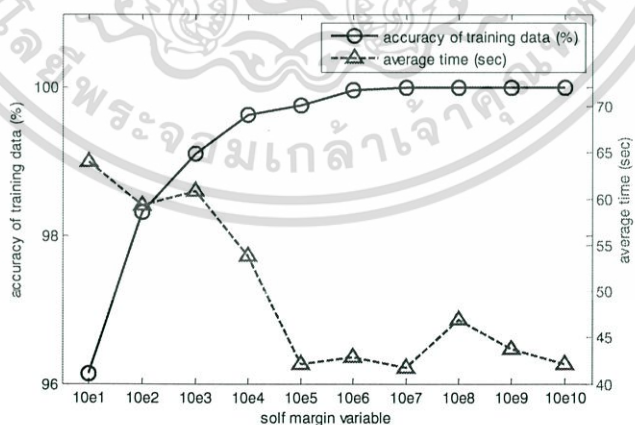


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคอร์เนลพารามิเตอร์กับความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ของโพลีโนเมียลคอร์เนล

พบว่าถ้าเพิ่มคอร์เนลพารามิเตอร์ทำให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการฝึกสอนเพิ่มขึ้น คอร์เนลพารามิเตอร์ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปสามารถให้ความถูกต้องมากกว่าเกาส์เซียนคอร์เนล แต่คอร์เนลพารามิเตอร์ 1 ให้ความถูกต้องน้อยกว่าเพราะ คอร์เนลพารามิเตอร์ 1 คือคอร์เนลเชิงเส้น

จากผลการทดลองโพลีโนเมียลคอร์เนลให้ความถูกต้องโดยรวมมากกว่าเกาส์เซียนคอร์เนล และยังใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โพลีโนเมียลคอร์เนลในการระบุประเภทฟอลต์

5.3.2 ซอฟต์มาร์จิ้น (Soft-Margin Variable  $C$ ) ใช้ในการกำหนดความยืดหยุ่นเพื่อให้ได้เกณฑ์การแบ่งคลาสที่มีระยะมาร์จิ้นที่กว้างมากขึ้นถ้าค่า  $C$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้ระยะมาร์จิ้นลดลง ซึ่งค่า  $C$  จะส่งผลกับค่าตอบดังแสดงได้ดังรูป 5.4

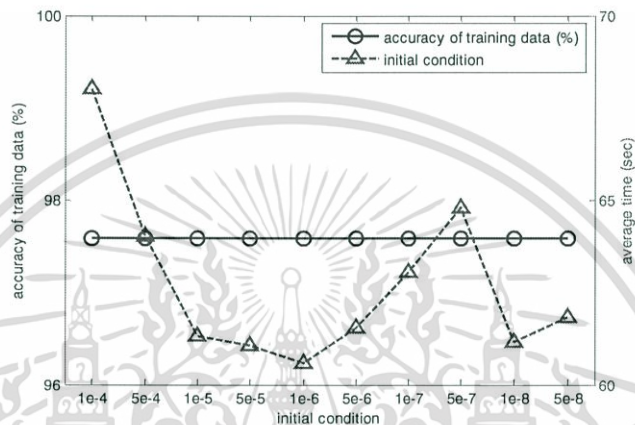


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซอฟต์มาร์จิ้นกับความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามาร์จิ้นของเส้นแบ่งคลาสยิ่งถ้าเพิ่มค่าทำให้มาร์จิ้นลดลงจึงมีผลให้ค่าความถูกต้องในการฝึกสอนเพิ่มขึ้น และความถูกต้องเริ่มคงที่บริเวณค่า  $10^6$  ซึ่งมีความถูกต้องใกล้เคียง 100% และเวลาในการหาคำตอบเริ่มคงที่โดยอยู่ที่ประมาณ 45 วินาที

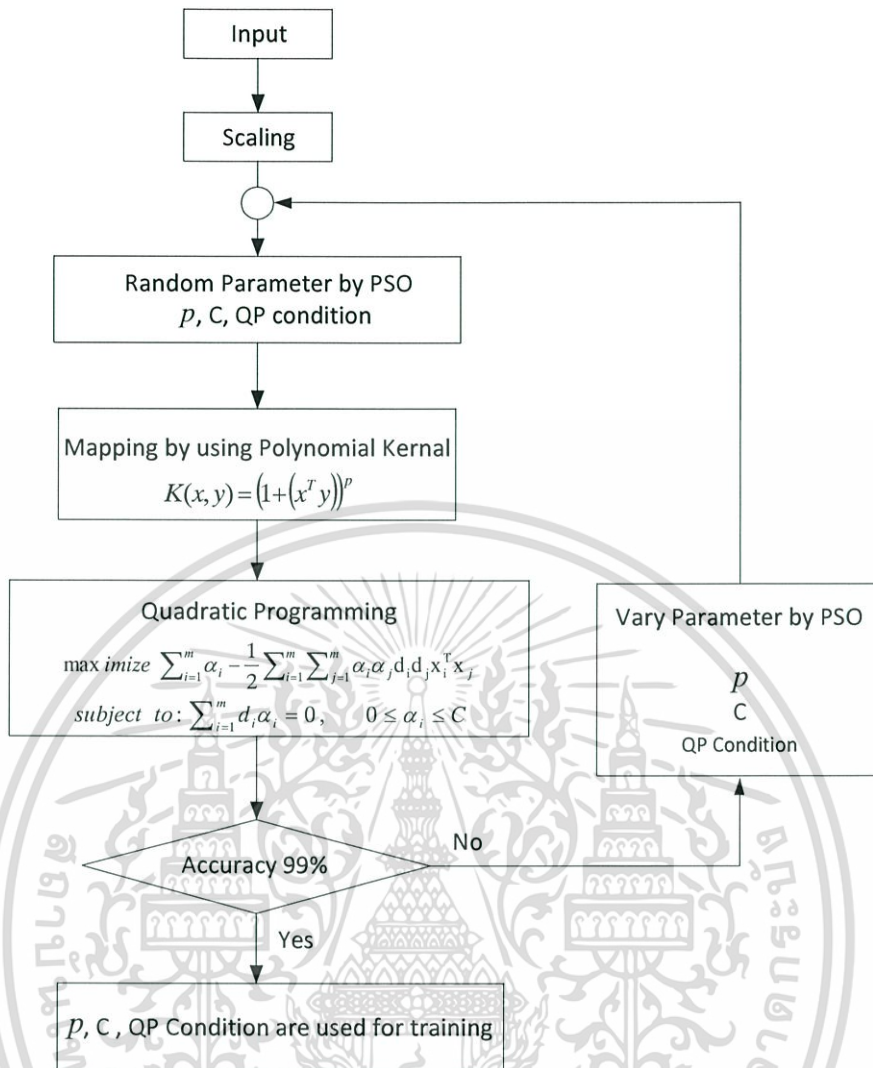
5.3.3 ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) สำหรับกระบวนการแก้ปัญหาสมการผลเฉลยสำหรับสมการซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งค่าเงื่อนไขเริ่มต้นจะส่งผลกับคำตอบ ดังแสดงได้ดังรูป 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเงื่อนไขเริ่มต้นกับความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์

จากรูป 5.5 การเพิ่มหรือลดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นไม่มีผลต่อค่าความถูกต้องในการฝึกสอน

5.3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม หลังจากที่ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนทำให้ทราบถึงผลของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ส่งผลต่อค่าความถูกต้องในการแบ่งแยกข้อมูล ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายเนื่องจากความแม่นยำในการหาคำตอบและพารามิเตอร์ของวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ที่มีน้อยทำให้ปรับค่าได้ง่าย ซึ่งวิธีการของกระบวนการทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงแผนผังกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ในงานวิจัยนี้ต้องการผลต่อความถูกต้องของข้อมูลฝึกฝนที่มากกว่า 99% โดยการใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) หาค่าพารามิเตอร์ของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่เหมาะสม โดยมีข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด 3600 ข้อมูลโดยแบ่งเป็นชุดข้อมูลดังนี้คือ ชุดข้อมูลฝึกหัดจำนวน 1800 ข้อมูล (50%) ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบเกณฑ์การระบุประเภทความผิดปกติจำนวน 900 ข้อมูล (25%) และชุดข้อมูลกรณีศึกษา 900 ข้อมูล (25%) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วจะนำมาใช้กับชุดข้อมูลทดสอบเกณฑ์และชุดข้อมูลกรณีศึกษา ซึ่งจะได้ค่าความถูกต้องแสดงในตารางที่ 5.3 โดยความถูกต้องโดยรวมของข้อมูลทดสอบและกรณีศึกษามีความถูกต้อง 100%

ตารางที่ 5.3 สรุปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจากการแบ่งแยกพอลต์ด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ชนิดพอลต์ที่เกิดขึ้น	ขดลวดลัดวงจรลงดิน		ขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ		ภายนอกหม้อแปลง		เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	แรงดันสูง	แรงดันต่ำ	
ข้อมูลฝึกฝน	162	162	648	648	90	90	100%
ข้อมูลทดสอบ	81	81	324	324	45	45	100%
กรณีศึกษา	81	81	324	324	45	45	100%
เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) มีหลายค่าเพราะจากพฤติกรรมหัวข้อที่ 5.3 ถ้าเพิ่มค่าเคอร์เนลพารามิเตอร์พร้อม ๆ กับค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น (Soft-Margin Variable) จะทำให้ได้ความถูกต้อง 100% เท่ากันหลาย ๆ ตัวทำให้ PSO เปรียบเทียบหาข้อมูลที่ดีที่สุดไม่ได้ ซึ่งตามทฤษฎีหัวข้อที่ 2.3 นั้นค่าที่ตีความจะมีค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น (Soft-Margin Variable) น้อยที่สุดเพื่อที่จะให้ได้ค่าระยะห่าง (Margin) มาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เพิ่มเงื่อนไขในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยให้ค่าซอฟต์แวร์มาร์จิ้น (Soft-Margin Variable) และค่าเคอร์เนลพารามิเตอร์ (Kernel option) มีน้อยสุดซึ่งจะมีค่าประมาณ

Soft-Margin Variable =  $2.5 \times 10^{-4}$

Kernel option = 4

Initial Condition = ขึ้นอยู่กับการสุ่มค่า (เนื่องจากไม่มีผลต่อความถูกต้อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

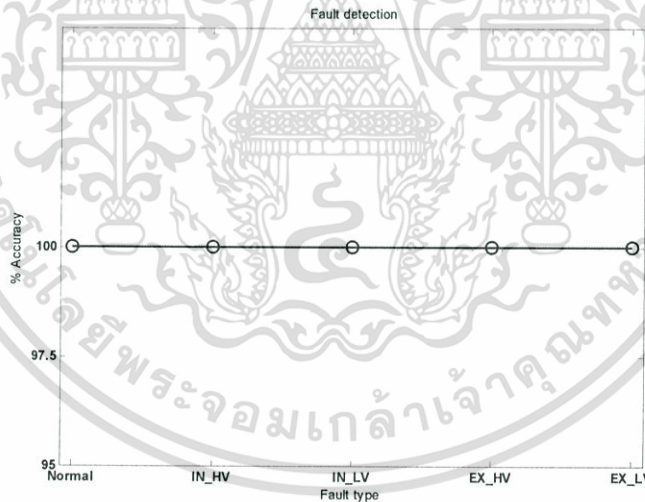
### ผลการจำลอง

บทที่ 6 นี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 4 และบทที่ 5 ซึ่งการแสดงผลการทดลองจะแสดงผลการระบุชนิดการเกิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยปรับตำแหน่งการเกิดฟอลต์ ระยะทางที่เกิดฟอลต์ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1. แสดงความถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์
2. แสดงความถูกต้องในการแยกระหว่างฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง
3. แสดงความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลง

#### 6.1 ผลความถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์

การตรวจจับฟอลต์ตามหัวข้อ 4.1 ตรวจจับฟอลต์ด้วยวิธีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตองค์ประกอบความถี่สูงของผลต่างกระแสสามเฟสและผลต่างกระแสขององค์ประกอบลำดับศูนย์ซึ่งสามารถตรวจจับได้ความถูกต้องแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงความถูกต้องในการตรวจจับฟอลต์

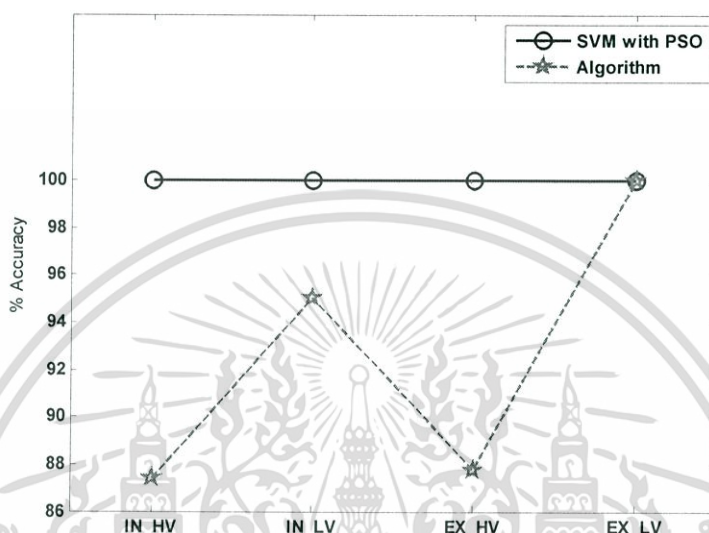
รูปที่ 6.1 แสดงการตรวจจับฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตองค์ประกอบความถี่สูงโดยแบ่งเป็น 5 กรณีตัวอย่าง

1. สภาวะปกติ (Normal)
2. สภาวะลัดวงจรภายในหม้อแปลงด้านแรงดันสูง (IN\_HV)
3. สภาวะลัดวงจรภายในหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำ (IN\_LV)
4. สภาวะลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงด้านแรงดันสูง (EX\_HV)
5. สภาวะลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำ (EX\_LV)

เอกสารซึ่งทุกสภาวะสามารถตรวจจับได้ความถูกต้อง 100% ภายใต้นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ผลความถูกต้องในการแยกระหว่างฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอกหม้อแปลง

การแยกฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงเป็นการเปรียบเทียบผลความถูกต้องในการแยกฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)

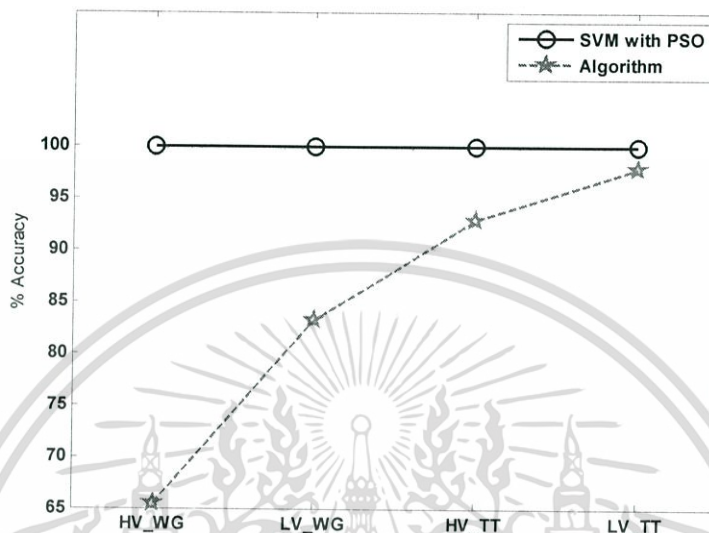


รูปที่ 6.2 กราฟแสดงผลความถูกต้องในการแยกฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลง

จากรูปเห็นว่าวิธีการแยกฟอลต์ด้วยวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมีความถูกต้องมากกว่าวิธีการสร้างอัลกอริทึมโดยซัพพอร์ตเวกเตอร์ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% แต่วิธีการสร้างอัลกอริทึมให้ความถูกต้องเฉลี่ย 91.50% ซึ่งการแยกประเภทฟอลต์ด้วยการสร้างอัลกอริทึมมีความถูกต้องน้อยเพราะความซับซ้อนของข้อมูลและค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตของฟอลต์แต่ละประเภทมีและค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำมาสร้างเงื่อนไขจึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการแบ่งแยกได้โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในด้านปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง) เพราะการต่อขดลวดแบบเดลต้าทำให้ข้อมูลที่ออกมามีความสัมพันธ์กันจึงสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกการเกิดฟอลต์ได้ยาก

### 6.3 ผลความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลง

การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงเป็นการเปรียบเทียบผลความถูกต้องในการแยกฟอลต์ภายในและภายนอกหม้อแปลงด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)

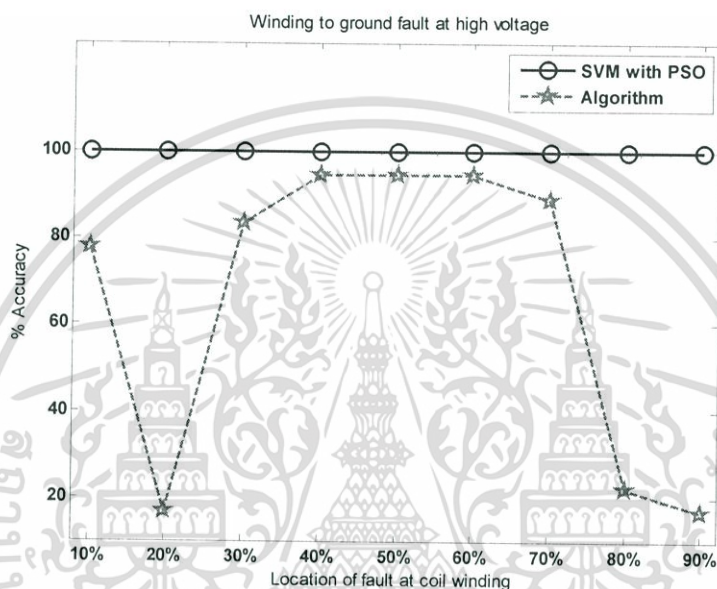


รูปที่ 6.3 กราฟแสดงผลความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ภายใน

การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงพบว่าวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนให้ความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์มากกว่าวิธีการสร้างอัลกอริทึมโดยซัพพอร์ตเวกเตอร์ให้ความถูกต้องเฉลี่ย 100% แต่การสร้างอัลกอริทึมให้ความถูกต้องเฉลี่ย 91.23% เนื่องจากความซับซ้อนของข้อมูลจึงทำให้การระบุประเภทฟอลต์ของวิธีการสร้างอัลกอริทึมมีความผิดพลาดมากกว่า ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 6.3.1 ผลแสดงรายละเอียดความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงที่ตำแหน่งต่าง ๆ

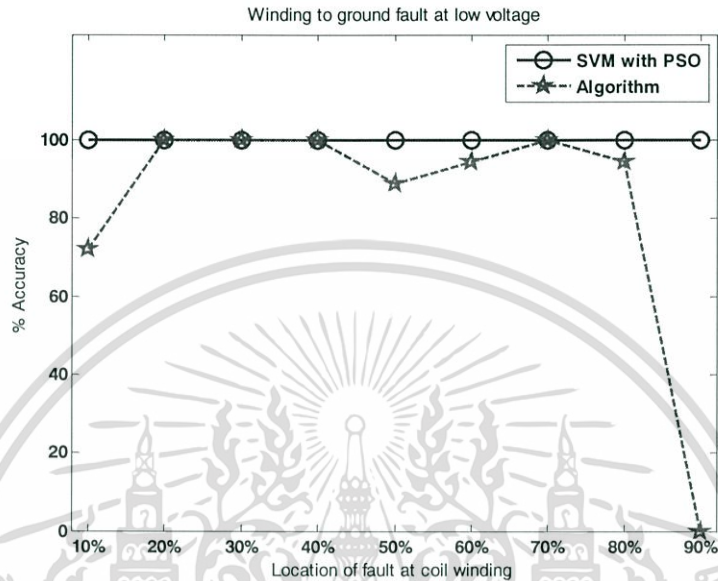
การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูง (Winding to ground fault at high voltage) ซึ่งทำการปรับระยะเกิดฟอลต์ขดลวดย่อย a จาก (รูปที่ 3.2 (ก.)) 10% ถึง 90% ของความยาวขดลวด แล้วเปรียบเทียบผลความถูกต้องด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความถูกต้องของฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันสูง

วิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนให้ผลถูกต้อง 100% แต่วิธีการสร้างอัลกอริทึมให้ผลความถูกต้องเฉลี่ย 65.43% โดยเฉพาะฟอลต์ที่ 20% 80% และ 90% ของความยาวขดลวดมีความถูกต้องน้อยเกิดจากเงื่อนไขในการระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์ เพราะว่าเงื่อนไขในการระบุเฟสการเกิดฟอลต์คือ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดที่น้อยที่สุดถือว่าไม่เกิดฟอลต์ ที่เหลืออีก 2 เฟสให้ถือว่าเป็นชื่อขดลวดที่เกิดฟอลต์ แต่ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดจะมีค่าน้อยที่สุดผิดไป เช่น ฟอลต์ที่ 20% ของขดลวด AC ค่าสัมประสิทธิ์ที่เฟส A จะมีค่ามากที่สุดเพราะอยู่ใกล้เฟส A มากที่สุด และเฟส B และ C จะมีค่าน้อยใกล้เคียงกัน แต่ถ้าเฟส C มีค่าน้อยที่สุด ทำให้กรณีนี้จะระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์คือ ขดลวด BA เป็นต้น จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุขดลวดที่เกิดฟอลต์ ซึ่งสังเกตได้จากพฤติกรรมหัวข้อที่ 4.2.1 ฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรลงดิน (Winding to ground fault) ด้านปฐมภูมิ (ฝั่งแรงดันไฟฟ้าสูง)

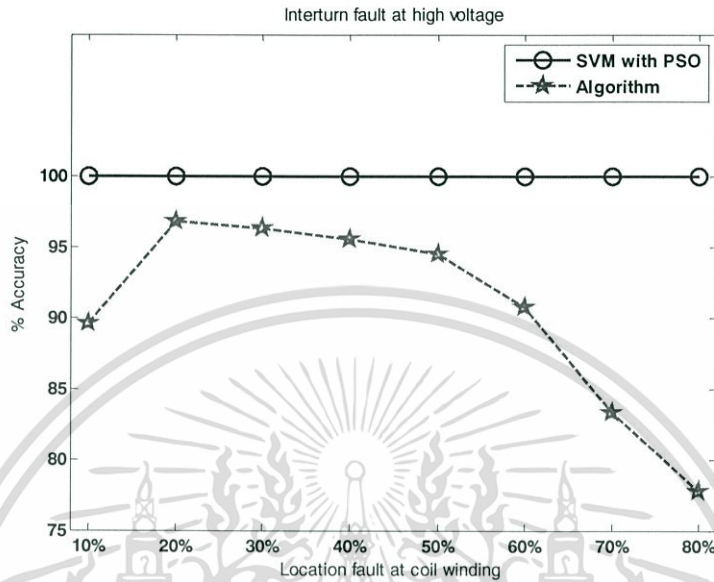
การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำ (Winding to ground fault at low voltage) ซึ่งทำการปรับระยะเกิดฟอลต์เช่นเดียวกับด้านแรงดันสูงคือจาก 10% ถึง 90% ของความยาวขดลวด แล้วเปรียบเทียบผลความถูกต้องด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความถูกต้องของฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำ

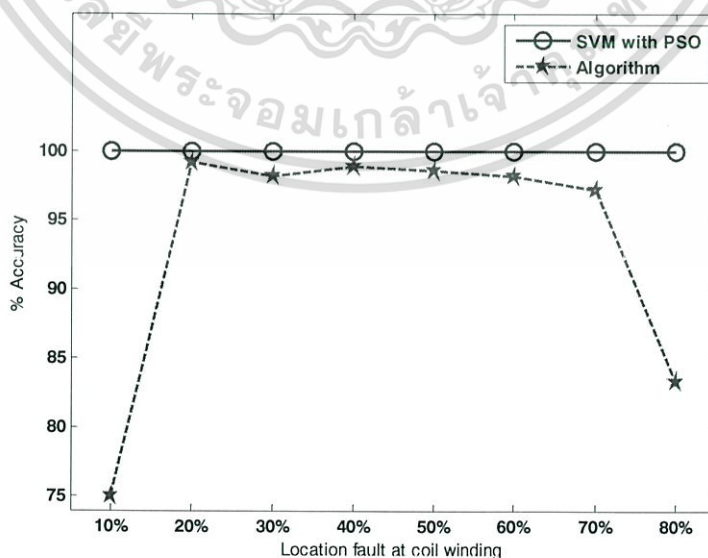
วิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนให้ผลถูกต้อง 100% แต่วิธีการสร้างอัลกอริทึมให้ผลความถูกต้องเฉลี่ย 83.33% จากรูปพบว่าวิธีการสร้างอัลกอริทึมมีความถูกต้องน้อยเมื่อฟอลต์ที่เกิดที่ 90% ของขดลวด เพราะว่าฟอลต์เกิดใกล้กับจุดต่อนิวตรอน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทมีค่าน้อยซึ่งมีลักษณะคล้ายกับข้อมูลของฟอลต์แบบประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ ด้านแรงดันสูงที่เกิดที่มุม 30 องศา จึงทำให้การแบ่งแยกข้อมูลผิดพลาดในเงื่อนไข  $PR_{sum}^{diff} < 100$

การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูง (Interturn fault at high voltage) ซึ่งทำการปรับระยะเกิดฟอลต์ขดลวดย่อย a จาก (รูปที่ 3.2 (ข.)) 10% ถึง 80% แล้วเปรียบเทียบผลความถูกต้องด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความถูกต้องของฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูงเมื่อปรับขดลวดย่อย a

การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูง (Interturn fault at high voltage) ซึ่งทำการปรับระยะเกิดฟอลต์ขดลวดย่อย b จาก (รูปที่ 3.2 (ข.)) 10% ถึง 80% แล้วเปรียบเทียบผลความถูกต้องด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)

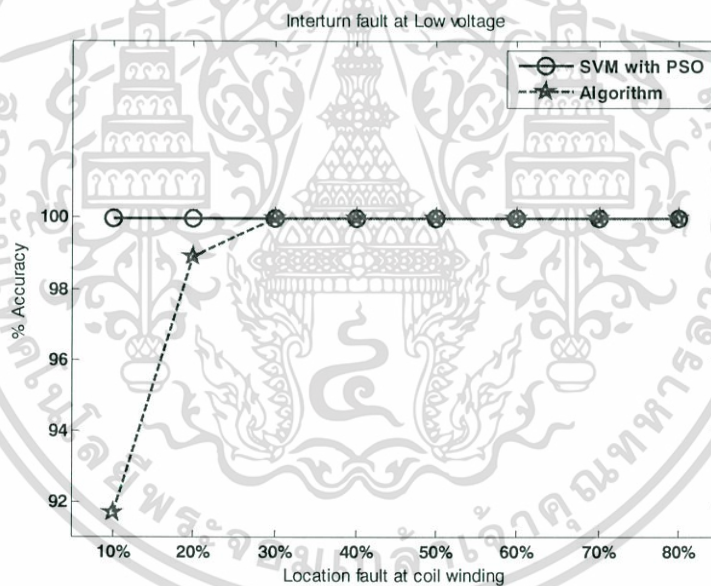


รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความถูกต้องของฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันสูงเมื่อปรับขดลวดย่อย b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

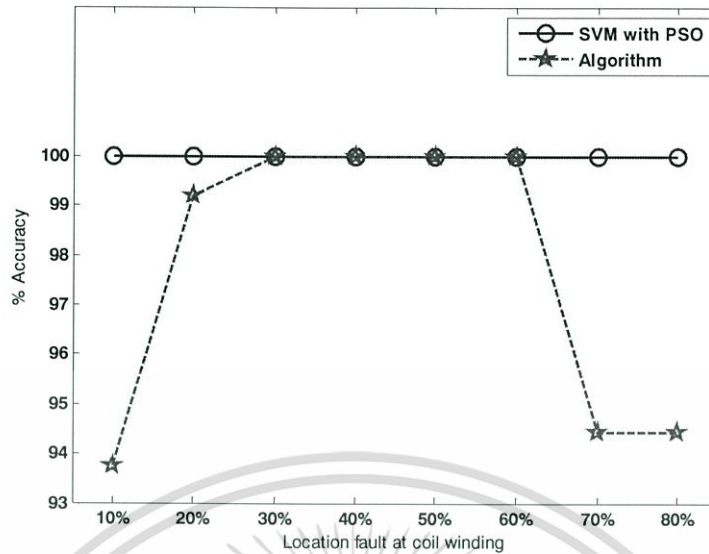
จากรูปที่ 6.6-6.7 วิธีการทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนได้ความถูกต้อง 100% แต่วิธีการสร้างอัลกอริทึมได้มีความถูกต้องเฉลี่ย 92.90% ซึ่งวิธีการสร้างอัลกอริทึมมีความถูกต้องน้อยเพราะเมื่อดูจากพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตในหัวข้อที่ 4.2.2 ฟอลต์ภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ (Turn to turn fault) ค่าสัมประสิทธิ์เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฟอลต์ของขดลวดย่อย a หรือ b จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย แต่เมื่อทำการเปลี่ยนมุมที่เกิดฟอลต์นั้น การเกิดฟอลต์ที่มุม 30 องศา นั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่ามุมอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัดทำให้ข้อมูลแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม การสร้างเงื่อนไขในการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์จึงเป็นไปได้ยากเพราะฉะนั้นการแบ่งแยกฟอลต์ชนิดนี้จะต้องอยู่ในลำดับสุดท้ายและข้อมูลบางตัวจึงถูกมองเป็นฟอลต์ชนิดอื่นแทน

การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำ (Interturn fault at low voltage) ซึ่งทำการปรับระยะเกิดฟอลต์ที่ขดลวดย่อย a เช่นเดียวกับด้านแรงดันสูงคือจาก 10% ถึง 80% ของความยาวขดลวด แล้วเปรียบเทียบผลความถูกต้องด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความถูกต้องของฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำเมื่อปรับขดลวดย่อย a

การระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลงประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำ (Interturn fault at low voltage) ซึ่งทำการปรับระยะเกิดฟอลต์ที่ขดลวด b เช่นเดียวกับด้านแรงดันสูงคือจาก 10% ถึง 80% ของความยาวขดลวด แล้วเปรียบเทียบผลความถูกต้องด้วยวิธีการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) และวิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM)



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความถูกต้องของฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบด้านแรงดันต่ำเมื่อปรับขดลวดย่อย b

จากรูปที่ 6.8-6.9 วิธีการทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนได้ความถูกต้อง 100% แต่วิธีการสร้างอัลกอริทึมได้มีความถูกต้องเฉลี่ย 97.99% ฟอลต์ประเภทนี้มีความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์สูงกว่า 90% ในทุกวิธีการวิเคราะห์ เพราะค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าที่เกาะกลุ่มกันและมีค่าต่างจากฟอลต์ประเภทอื่นซึ่งจะส่งผลต่อความถูกต้องในการระบุประเภทฟอลต์ แต่ข้อมูลที่ผิดพลาดจะเกิดในเงื่อนไข  $PI_{min}^{diff} < 2$  เนื่องจากข้อมูลของฟอลต์ประเภทนี้มีค่าใกล้เคียงกับฟอลต์ประเภทขดลวดลัดวงจรลงดินด้านแรงดันต่ำ จึงทำให้ข้อมูลบางตัวเกิดความผิดพลาดได้

## สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการลัดวงจรภายในหม้อแปลงและวิเคราะห์สัญญาณความผิดปกติด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อระบุประเภทความผิดปกติภายในหม้อแปลงสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

การวิเคราะห์ที่ใช้สัญญาณผลต่างกระแสที่ได้จากรีเลย์ผลต่าง (Differential Relay) ผลต่างกระแสที่ได้จากรีเลย์คือค่าของกระแสทั้งสามเฟสและนำค่ากระแสทั้งสามเฟสมาคำนวณค่ากระแสลำดับศูนย์ (Zero sequence) เพื่อศึกษาลักษณะของลูกคลื่นกระแสลำดับศูนย์ในการเกิดฟอลต์แต่ละประเภท

จากการศึกษาพบว่า การเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ในการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีค่าที่สูงแทรกเข้าสู่ระบบเนื่องจากการเกิดอาร์คของกระแส การสับสวิตช์ เป็นต้น ทำให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป จึงใช้เป็นสมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ในกระบวนการวิเคราะห์ได้เลือกใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ข้อดีคือสามารถลดช่วงของข้อมูลในการวิเคราะห์ได้จากการสเกลเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelets) ได้โดยไม่ต้องรอสัญญาณที่ต้องการแปลงให้ครบ 1 ไซเคิล ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงในการวิเคราะห์ 1/4 ไซเคิล จะช่วยลดข้อมูลในการวิเคราะห์และยังเพิ่มความเร็วในการตรวจจับความผิดปกติ ในการตรวจจับความผิดปกติจะตรวจสอบสัญญาณทุก ๆ 1/4 ไซเคิลหรือ 5 ms โดยบันทึกค่าของกระแสผลต่างแต่ละเฟส ( $I_A^{diff}$ ,  $I_B^{diff}$ ,  $I_C^{diff}$ ) และกระแสองค์ประกอบลำดับศูนย์ ( $I_{Zero}^{diff}$ ) รวม 4 เฟส นำสัญญาณมาผ่านการแปลงเวฟเล็ต และตรวจสอบค่าองค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 ถ้าค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณมากกว่า 5 เท่าให้ตรวจจับและบันทึกค่าของแต่ละเฟสไว้ ถ้าบันทึกค่าได้มากกว่า 1 เฟส ให้ถือว่าเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าบันทึกค่าได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เฟส ถือว่าไม่มีการเกิดฟอลต์ (ตามรูปที่ 4.1)

เมื่อตรวจพบว่าระบบมีความผิดปกติแล้วต่อไปคือการแบ่งประเภทการเกิดฟอลต์ ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบการแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์ 2 วิธีการ

1.) วิเคราะห์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูงที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งใช้ข้อมูลเดียวกับการตรวจจับฟอลต์ คือวิเคราะห์สัญญาณทุก ๆ 1/4 ไซเคิล และนำค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่สูงสเกลที่ 1 ภายหลังการเกิดฟอลต์มาศึกษาพฤติกรรมและสร้างอัลกอริทึมเพื่อแบ่งแยกประเภทฟอลต์ โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 3600 ข้อมูล แบ่งเป็นข้อมูลในการสร้างเงื่อนไข 1800 ข้อมูลและข้อมูลทดสอบ 1800 ข้อมูล ได้ความถูกต้องดังแสดงในบทที่ 6

2.) วิเคราะห์ด้วยองค์ประกอบความถี่สูงที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเช่นเดียวกับวิธีการแรกและใช้วิธีทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในการแบ่งแยกประเภทฟอลต์ ซึ่งโครงสร้างของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนประกอบด้วยอินพุต 4 ตัวคือ ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดภายหลังการเกิดฟอลต์ของเฟส

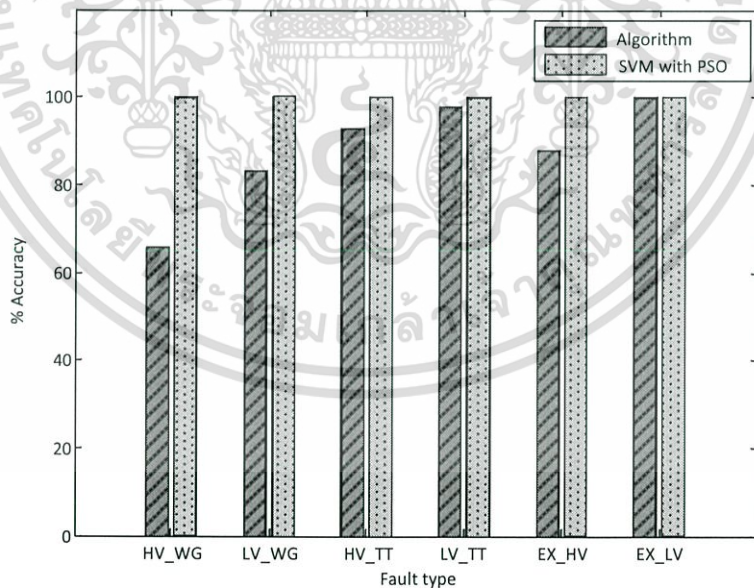
A,B,C และกระแสดวงประกอบลำดับศูนย์ (Zero sequence) นำมาสเกลข้อมูลเพื่อเข้าสู่โมเดลของ ซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีนซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 แบ่งแยกฟอลต์ภายในหรือภายนอกหม้อแปลง

ขั้นตอนที่ 2 ระบุประเภทฟอลต์ภายในหม้อแปลง

โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 3600 ข้อมูล แบ่งเป็นข้อมูลในการฝึกฝน 1800 ข้อมูล ข้อมูลทดสอบ 900 ข้อมูล และกรณีศึกษา 900 ข้อมูล ได้รับความถูกต้องดังแสดงในบทที่ 6

เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) ในการวิเคราะห์สัญญาณการเกิดฟอลต์เพื่อตรวจจับและแบ่งแยกประเภทการเกิดฟอลต์ พบว่าสามารถตรวจจับการเกิดฟอลต์ได้ 100% ส่วนการแบ่งแยกประเภทฟอลต์นั้นเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดมีความซับซ้อนมากทำให้การสร้างอัลกอริทึมเพื่อแบ่งแยกประเภทฟอลต์นั้นไม่สามารถแบ่งแยกฟอลต์ได้ดีเท่าที่ควร ดังรูปที่ 7.1 จึงได้ใช้วิธีการทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพราะวิธีการทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนั้นสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากได้แต่กระบวนการทางซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนก็มีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องศึกษาเพื่อให้ได้ความถูกต้องที่มากที่สุด งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) นำมาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนหาค่าตอบได้ผลดีที่สุด ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้กับระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังได้อีกหลายอย่างด้วยกัน



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความถูกต้องในการแยกฟอลต์ทั้งสองวิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali Saeed Alghamdi, Nor Asiah Muhamad and Abubakar A. Suleiman. "DGA Interpretation of Oil Filled Transformer Condition Diagnosis". **TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS**, Vol. 13, No. 5, October 25, 2012, pp. 229-232.
- [2] 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, No. 6, November/December, 2010, pp. 41-46.
- [3] Z. Yang, W. H. Tang, A. Shintemirov, and Q. H. Wu. "Association Rule Mining-Based Dissolved Gas Analysis for Fault Diagnosis of Power Transformers". **IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS**, VOL. 39, NO. 6, NOVEMBER, 2009, pp. 597-610.
- [4] A. Shintemirov, W. Tang, and Q. H. Wu. "Power Transformer Fault Classification Based on Dissolved Gas Analysis by Implementing Bootstrap and Genetic Programming". **IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS**, VOL. 39, NO. 1, JANUARY, 2009, pp. 69-79.
- [5] V. Duraisamy, N. Devarajan , D. Somasundareswari. "A. Antony Maria Vasanth S.N. Sivanandam, Neuro fuzzy schemes for fault detection in power transformer". **Applied Soft Computing**, Volume 7, Issue 2, March, 2007, pp. 534-539.
- [6] K.lyswarya Annapoorani, DR.B.Umamaheswari. "Fault prediction based on dissolved gas concentration from insulating oil in power transformer using Neural Network". **International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials**, Bangalore, India, July, 2012, pp. 24-28
- [7] YONG-CHUN LIANG, XIAO-YUN SUN, DONG-HUI LIU, HUI-QIN SUN. "APPLICATION OF COMBINATORIAL PROBABILISTIC NEURAL NETWORK IN FAULT DIAGNOSIS OF POWER TRANSFORMER". **Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, Hong Kong, 19-22 August 2007, pp 1115-1119.
- [8] Jianli Yu, Xiaojuan Niu, Yang Han, and Shuai Yu. "The Fault Diagnosis of Transformer Based on BP Neural Network". **International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering**, 2012, pp. 487-489.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] L.V. Ganyun , Cheng Haozhong, Zhai Haibao, Dong Lixin. “Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier”. *Electric Power Systems Research*, Vol.74, No.1, Apr 2005, pp. 1-7.
- [10] Khmais Bacha, Seifeddine Souahlia, Moncef Gossa. “Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis by support vector machine”. *Electric Power Systems Research*, Vol.83, 2012, pp. 73– 79.
- [11] Su-Hwan Kim, Sang-Hee Kang. “Setting Method of a Percentage Current Differential Relay For Transformer Protection”. *16th International Conference on Electrical Engineering, Busan Korea ,July 11-14, 2010*.
- [12] Adel Aktaibi, M. A. Rahman. “A Software Design Technique for Differential Protection of Power Transformers”. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011, pp. 1456-1461.
- [13] อภิสิตธี เอกชีวานนท์. 2545. “วิธีลดการทำงานผิดพลาดของ DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่โดยใช้ NEURAL-FUZZY SYSTEM,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [14] A.A. Hossam Eldin, M.A. Refaey. “A novel algorithm for discrimination between inrush current and internal faults in power transformer differential protection based on discrete wavelet transform”. *Electric Power Systems Research*, Vol 81, 2011, pp. 19–24.
- [15] P.L. Mao<sup>1</sup>, R.K. Aggarwal. “A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers”. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol 22, 2000, pp. 389–395.
- [16] B. Vahidi, N. Ghaffarzadeh, S.H. Hosseinian. “A wavelet-based method to discriminate internal faults from inrush currents using correlation coefficient”. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol 32, 2010, pp. 788–793.
- [17] N.Y.Abed and O.A.Mohammed. “Modeling and Characterization of Transformers Internal Faults Using Finite Element and Discrete Wavelet Transforms”. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 43, NO. 4, APRIL 2007, pp.14258-1428.
- [18] Omar A.S. Youssef. “Discrimination between faults and magnetising inrush currents in transformers based on wavelet transforms”. *Electric Power Systems Research*, Vol. 63, 2002, pp.87-94.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] Karen L. Butler-Purry, and Mustafa Bagriyanik. "Characterization of Transients in Transformers Using Discrete Wavelet Transforms". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 18, NO. 2, MAY 2003, pp.648-656.
- [20] เขาว์วัฒน์ อภิสิทธิ์. 2554. "การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน," *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] เกรียงไกร กิตติวารุจ. 2546. "การศึกษาและวิเคราะห์กระแสอินรัชของหม้อแปลงโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ต," *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] M. Bigdeli, M. Vakilian, E. Rahimpour, "Transformer winding faults classification based on transfer function analysis by support vector machine". *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 6, Iss. 5, 2012, pp. 268–276.
- [23] H. Khorashadi-Zadeh, M. Sanaye-Pasand. "Power Transformer Differential Protection Scheme Based On Wavelet Transform And Artificial Neural Network Algorithms". *39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2004, pp.747-752.
- [24] *M.Geethanjali, S.Mary Raja Slochanal and R.Bhavani*. "A Novel Approach for Power Transformer Protection based upon combined Wavelet Transform and Neural Networks (WNN)". *The 7th International Power Engineering Conference (IPEC)*, 2005, pp. 1-6.
- [25] SRParaskar, M.A.Beg, G.M.Dhole. "Discrimination between Inrush and Fault in Transformer: ANN Approach". *International Journal of Advancements in Technology*, Vol 2, No 2, April 2011, pp.306-318.
- [26] อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล. 2550. "การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวินิจฉัยสถานะผิดปกติในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] VijayKumar Garlapati, Dr. Parmita Chattopadhyay. "Impact of Mother Wavelet on the performance of Wavelet-Neural Network (WNN) based Transformer protection". *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2010
- [28] Xiao Li. "Intelligent Learning Control of Hydraulic Flow Regulating Pump with Neural Network Load Flow Identifier". *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, 2009, pp.539-543
- [29] James W. Taylor and Roberto Buizza. "Neural Network Load Forecasting With Weather Ensemble Predictions". *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 17, NO. 3, AUGUST 2002, pp.626-63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Amir Mohammadi, Mohammad Hadi Varahram. "Using neural network for solving of on-line economic dispatch problem". *International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation on Intelligent Agents*, 2006.
- [31] กษิภัท คุณาดำรงรัฐ. 2555. "การประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตกับซัพพอร์ทเวคเตอร์แมชชีนเพื่อระบุชนิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนระบบไฟฟ้าเหนือดินและใต้ดิน," *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [32] Xiaodong Yu, Li Zhang. "Transformer Fault Diagnosis Based on Improved SVM Model". *Fifth International Conference on Natural Computation*, 2009, pp. 578-581
- [33] Yan Zhang, Bide Zhang, Yuchun Yuan, Zichun Pei, Yan Wang. "Transformer Fault Diagnosis Based on Support Vector Machine". *International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, 2010, pp. 405-408
- [34] S. Jazebi, B. Vahidi, M. Jannati." A novel application of wavelet based SVM to transient phenomena identification of power transformers". *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, 2011, pp.1354–1363
- [35] Evgeny Byvatov, Uli Fechner, Jens Sadowski and Gisbert Schneider. "Comparison of Support Vector Machine and Artificial Neural Network Systems for Drug/Nondrug Classification". *J. Chem. Inf. Comput. Sci.*, Vol. 43, No. 6, 2003, pp. 1882-1889
- [36] ภรณ์ยา อามฤครัตน์, เดช ธรรมศิริ, วาทีน น้อยเพียร, ภัทรารุณี แสงศิริ, ณรงค์ โปธิ และพยุ่ง มีสีจ. "การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดเลือกและจำแนกข้อมูลด้วยวิธีการทางเครือข่ายประสาทเทียม". *The 5th National Conference on Computing and Information Technology*, 2009, หน้า 131-138
- [37] Ming-Chang Lee and Chang To. "Comparison of Support Vector Machine and Back Propagation Neural Network in Evaluating the Enterprise Financial Distress". *International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAIA)*, Vol.1, No.3, July 2010, pp.31-43
- [38] DONG-XIAO NIU, QIANG WANG, JIN-CHAO LI. "SHORT TERM LOAD FORECASTING MODEL USING SUPPORT VECTOR MACHINE BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK". *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou*, 18-21 August 2005, pp.4260-4265

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] Shengwei Fei, Chengliang Liu, Qingbing Zeng, Yubin Miao. "Application of Particle Swarm Optimization-based Support Vector Machine in Fault Diagnosis of Turbo-generator". *Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 2008, pp. 1040-1044.
- [40] Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang. "Fault Diagnosis of Steam Turbine-Generator Sets Using Evolutionary Based Support Vector Machine". *International Symposium on Computer, Consumer and Control*, 2012, pp. 797-800
- [41] Hua Li, Yongxin Zhang. "An Algorithm of Soft Fault Diagnosis for Analog Circuit Based on The Optimized SVM by GA". *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2009, pp. 1023-1027.
- [42] QIU Daohong, LI Shucui, ZHANG Lewen, XUE Yiguo. "Application of GA-SVM in classification of surrounding rock based on model reliability examination". *Mining Science and Technology* 20, 2010, pp. 0428-0433
- [43] Rania Hassan, Babak Cohanim, Olivier de Weck. "A COPMARISON OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND THE GENETIC ALGORITHM". *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2004 pp.1-13
- [44] สุกกิจ นุตยะสกุล. "การคำนวณเชิงวิวัฒนาการระหว่าง เจเนติกอัลกอริทึม กับ พาดิคอลล สวอมออปติมายเซชัน". *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, VOL 2, ISSUE 2, JUL-DEC, 2011. pp.13-22.
- [45] Walter Schossig. "PACWorld (Protection History Transformer Protection). PAC.WINTER.2009, pp.71-76.
- [46] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. 2551. การป้องกันระบบไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จี.บี.พี. เซ็นเตอร์จำกัด.
- [47] ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช. 2538. การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง. กรุงเทพฯ : ซีเอ็นยูเคชั่น.
- [48] A. Ben-Hur and J. Weston. "A User's guide to Support Vector Machines". In *Biological Data Mining*. Oliviero Carugo and Frank Eisenhaber (eds.) Springer Protocols, 2009.
- [49] ผศ.ดร. เอกชัย ไพศาลกิตติสกุล. เอกสารประกอบการสอนราชาวิชา หลักการเรียนรู้ของ เครื่องจักรและการทำเหมืองข้อมูล. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [50] พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์. "การพัฒนาวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดแบบพาร์ทิเคิลสวอมออฟทีไมเซชัน ด้วยการเลียนแบบโครงสร้างการเรียนรู้ทางสังคมแบบหลากหลาย". *วารสารมหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 5, 2012, หน้า 14-22.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [51] อนุชาติ ศรีศิริวัฒน์ สุรพันธ์ ต้นศรีวงษ์ และพุลศักดิ์ โกษียาภรณ์. “การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคสำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์”. *Pathumwan Academic Journal*, Vol. 4, May-August, 2012.
- [52] H. W. Dommel. 1986. *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. University of British Columbia, Vancouver Canada. August.
- [53] DAIHEN ELECTRIC, Test report no. Q02-22601.
- [54] เบญจวรรณ จิตรแจ่ม, ปณิธาน พงษ์ศรีธาสิน, ภาณุ วิจิตรเอกฉันท, ภาณุพงศ์ คัมภีรานนท์. 2555. “ชุดการทดลองการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส”. *ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



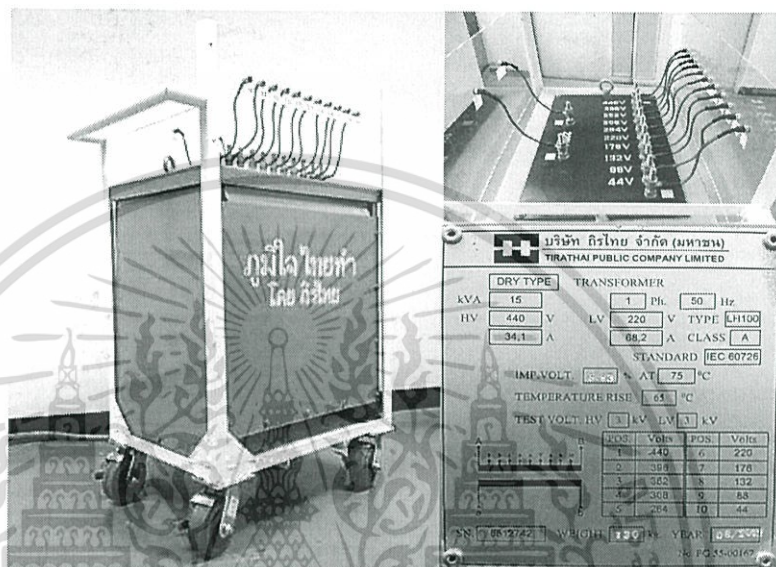
ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

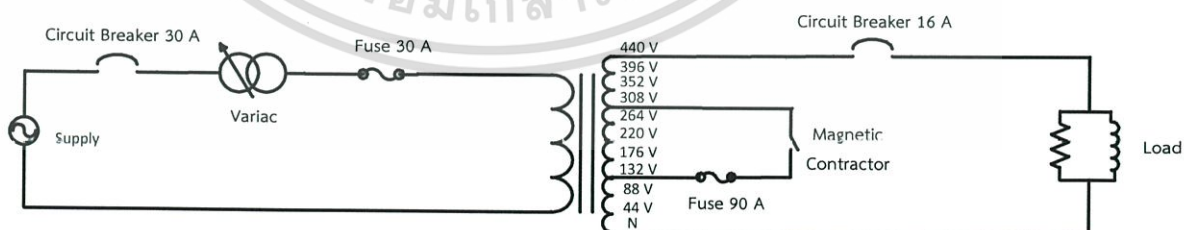
ข้อมูลที่ได้จากชุดทดลอง [54]

ศึกษาการเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ใช้ทดสอบมีพิกัด 15 kVA แรงดันไฟฟ้า 220/440 โวลต์ มีการแทบขดลวดด้านแรงสูงทุก ๆ 10 เฟอร์เซ็นต์ เป็นจำนวน 10 แทบ ดังนี้คือ 44, 88, 132, 176, 220, 264, 308, 352, 396 และ 440 โวลต์



รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้า 15 kVA

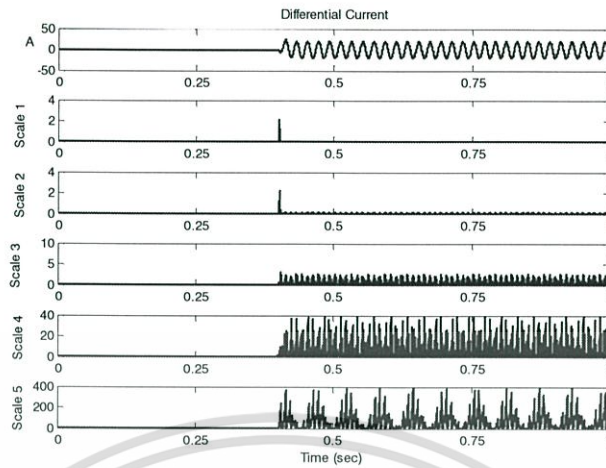
โดยทำการทดลองการลัดวงจรภายในหม้อแปลงแบบขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา สำหรับการตรวจจับฟอลต์ โดยให้ขดลวดลัดวงจรที่ตำแหน่ง 88-176 จ่ายโหลด 156 วัตต์ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 27.5 โวลต์ จะได้แรงดันขาออกที่ 55 โวลต์ จะได้วงจรในการทดลองดังรูปที่ 2



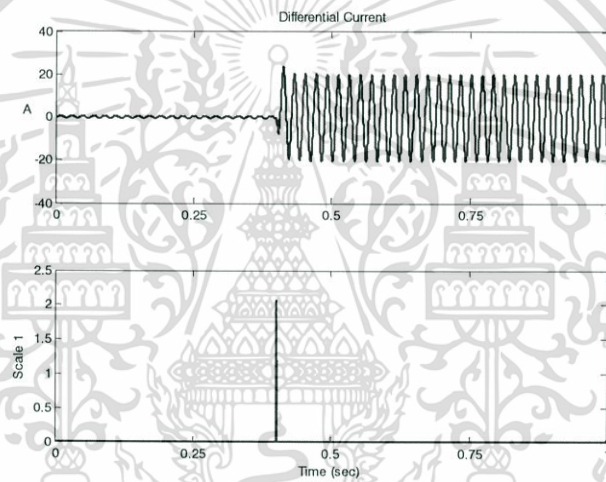
รูปที่ 2 วงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดการลัดวงจรสามารถตรวจจับกระแสผลต่างขณะเกิดฟอลต์ได้ดังรูปที่ 3



(ก. การแยกองค์ประกอบความถี่สูงเกสที่ 1-5)



(ข. การแยกองค์ประกอบความถี่สูงเกสที่ 1)

รูปที่ 3 การแปลงเวฟเล็ดแยกองค์ประกอบความถี่สูงกรณีเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลง

จากรูปพบว่าเมื่อเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงกระแสผลต่างจะมีค่าสูงขึ้น และค่าที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดจะมีลักษณะพุ่งสูงขึ้นขณะเกิดฟอลต์ซึ่งมีความชัดเจนในสเกลที่ 1 และ 2 แต่สเกลที่ 3 ถึง 5 จะมีลักษณะพุ่งสูงขึ้นตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่าขณะเกิดฟอลต์จะมีความถี่สูงแทรกอยู่ในระบบไฟฟ้าแต่เมื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงถึงสเกลที่ 3 จะมีความถี่สูงแทรกอยู่ตลอดเวลาเมื่อเกิดฟอลต์

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแปลงเวฟเล็ตในการตรวจจับฟอลต์

ค่าสัมประสิทธิ์	ผลต่างกระแสจากรีเลย์	
	Pre-fault	Post-fault
สเกลที่ 1	1.34E-4	2.06

ผลการทดลองในชุดทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ตแยกองค์ประกอบความถี่สูง สามารถตรวจจับสัญญาณความถี่สูงได้ และค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดฟอลต์มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์หลังเกิดฟอลต์เกินกว่า 5 เท่า ซึ่งการทดลองนี้เป็นวิธีการที่สนับสนุนแนวคิดการใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตเพื่อตรวจจับการเกิดฟอลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TEST REPORT

## OF

### POWER TRANSFORMER

CUSTOMER : SIEMENS LIMITED  
 PROJECT : PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY  
 TEST PRODUCT : OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMER WITH  
 ON-LOAD TAP-CHANGER  
 3 Ø 50 Hz 30000 / 40000 / 50000 kVA ONAN / ONAF / ONAF  
 HV : (115000 ±8 x 1.25 %) V 17 TAPS  
 LV : 23100 V  
 CONNECTION SYMBOL : Dyn1  
 SERIAL NO. : EDP022601  
 STANDARD : IEC 60076-2000

#### CERTIFICATION

THIS IS TO CERTIFY THAT THIS PRODUCT HAD BEEN TESTED ACCORDING TO THE CUSTOMER'S SPECIFICATIONS AND THE PRODUCT MET THE SPECIFICATIONS.

APPROVED BY : \_\_\_\_\_

H. JAROON

GENERAL MANAGER

QUALITY CONTROL DEPARTMENT

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.



บริษัท ไตเฮ็น อิเล็กทริก จำกัด

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CONTENTS

	PAGE
1. RATING PLATE.....	1
2. SUMMARY OF CHARACTERISTICS AND GUARANTEES.....	2
3. MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO.....	3
4. CHECK OF PHASE DISPLACEMENT.....	4
5. MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE.....	5
6. MEASUREMENT OF NO-LOAD LOSS AND CURRENT.....	6
7. MEASUREMENT OF SHORT-CIRCUIT IMPEDANCE AND LOAD LOSS.....	7 - 9
8. MEASUREMENT OF INSULATION RESISTANCE.....	10
9. MEASUREMENT OF DIELECTRIC DISSIPATION FACTOR AND CAPACITANCE.....	10
10. SEPARATE SOURCE AC WITHSTAND VOLTAGE TEST .....	11
11. SHORT-DURATION INDUCED AC WITHSTAND VOLTAGE TEST ( ACSD ).....	12 - 19
12. LIGHTNING IMPULSE TEST.....	20 - 33
13. TEMPERATURE-RISE TEST.....	34 - 48
14. DETERMINATION OF SOUND PRESSURE LEVEL .....	49 - 52
15. OPERATION TEST OF ON-LOAD TAP-CHANGER.....	53
16. MEASUREMENT OF ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE .....	53
17. MEASUREMENT OF AUXILIARY LOSS.....	54
18. OIL TIGHTNESS TEST.....	54
19. TEST REPORT OF BUSHING-TYPE CURRENT TRANSFORMER.....	55 - 77
20. TEST REPORT OF BUSHING.....	78 - 81
21. TEST REPORT OF ON-LOAD TAP-CHANGER.....	82
22. TEST REPORT OF THERMOMETER, TEMPERATURE RELAY.....	83
23. TEST REPORT OF BUCHHOLZ RELAY.....	84
24. TEST REPORT OF OIL LEVEL GAUGE.....	85
25. TEST REPORT OF TRAFU GUARD.....	86
26. TEST REPORT OF PRESSURE RELIEF DEVICE.....	87
27. TEST REPORT OF VOLTAGE TRANSFORMER.....	88
28. TEST REPORT OF HOT LINE OIL PURIFIER.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUMMARY OF CHARACTERISTICS AND GUARANTEES  
AT 50000 kVA BASE

No.	Test items	Test results	Guaranteed values
1	No-load current at rated tap of HV side.....	0.370 A	↔ 0.7 A
2	No-load loss.....	23.0 kW	↔ 23.5 kW
3	Load loss at 75 °C on :		
	- 126500 V tap.....	136.0 kW	- kW
	- 115000 V tap (rated tap).....	130.7 kW	↔ 132.0 kW
	- 103500 V tap.....	157.2 kW	- kW
4	Total losses at 75 °C on rated tap.....	153.7 kW	↔ 155.5 kW
5	Short-circuit impedance on :		
	- 126500 V tap.....	15.98 %	- %
	- 115000 V tap (rated tap).....	15.17 %	14.17-15.83 %
	- 103500 V tap.....	14.62 %	- %
6	Efficiency at 1.0 p.f. on :		
	- 126500 V tap.....	99.68 %	- %
	- 115000 V tap (rated tap).....	99.69 %	- %
	- 103500 V tap.....	99.64 %	- %
7	Voltage regulation at 1.0 p.f. on :		
	- 126500 V tap.....	1.55 %	- %
	- 115000 V tap (rated tap).....	1.41 %	1.26-1.52 %
	- 103500 V tap.....	1.38 %	- %
8	Zero-sequence impedance on :		
	- 126500 V tap.....	16.21 %	- %
	- 115000 V tap (rated tap).....	15.41 %	- %
	- 103500 V tap.....	14.87 %	- %
9	Sound pressure level at :		
	- 30000 kVA (ONAN).....	64 dB(A)	- dB(A)
	- 40000 kVA (ONAF).....	68 dB(A)	- dB(A)
	- 50000 kVA (ONAF).....	69 dB(A)	↔ 77.0 dB(A)
10	Auxiliary loss.....	2.30 kW	↔ 3.0 kW
11	Temperature rise at :		
	- 30000 kVA of :		
	top oil temp.....	40.5 K	↔ 50.0 K
	average temp. of HV winding.....	44.2 K	↔ 55.0 K
	average temp. of LV winding.....	44.7 K	↔ 55.0 K
	- 40000 kVA of :		
	top oil temp.....	41.5 K	↔ 50.0 K
	average temp. of HV winding.....	45.1 K	↔ 55.0 K
	average temp. of LV winding.....	45.6 K	↔ 55.0 K
	- 50000 kVA of :		
	top oil temp.....	45.5 K	↔ 50.0 K
	average temp. of HV winding.....	50.4 K	↔ 55.0 K
	average temp. of LV winding.....	49.6 K	↔ 55.0 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางจำหน่ายโดยผู้ขายเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งถ้ามีเพื่อนำไป

## MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO

Date of test : July 9, 2002

Connection symbol : Dyn1

Tap pos.	HV / LV		H1 - H3 / X1 - X0		H2 - H1 / X2 - X0		H3 - H2 / X3 - X0	
	Voltage ( V )	Calculation value	Meas. value	Ratio error ( % )	Meas. value	Ratio error ( % )	Meas. value	Ratio error ( % )
1	$126500/(23100/\sqrt{3})$	9.4850	9.4990	+ 0.15	9.4990	+ 0.15	9.4990	+ 0.15
2	$125060/(23100/\sqrt{3})$	9.3771	9.3900	+ 0.14	9.3900	+ 0.14	9.3900	+ 0.14
3	$123630/(23100/\sqrt{3})$	9.2698	9.2830	+ 0.14	9.2820	+ 0.13	9.2820	+ 0.13
4	$122190/(23100/\sqrt{3})$	9.1619	9.1750	+ 0.14	9.1740	+ 0.13	9.1750	+ 0.14
5	$120750/(23100/\sqrt{3})$	9.0539	9.0660	+ 0.13	9.0660	+ 0.13	9.0660	+ 0.13
6	$119310/(23100/\sqrt{3})$	8.9459	8.9590	+ 0.15	8.9590	+ 0.15	8.9590	+ 0.15
7	$117880/(23100/\sqrt{3})$	8.8387	8.8510	+ 0.14	8.8510	+ 0.14	8.8510	+ 0.14
8	$116440/(23100/\sqrt{3})$	8.7307	8.7430	+ 0.14	8.7430	+ 0.14	8.7430	+ 0.14
9	$115000/(23100/\sqrt{3})$	8.6228	8.6350	+ 0.14	8.6350	+ 0.14	8.6350	+ 0.14
10	$113560/(23100/\sqrt{3})$	8.5148	8.5286	+ 0.16	8.5286	+ 0.16	8.5286	+ 0.16
11	$112130/(23100/\sqrt{3})$	8.4076	8.4215	+ 0.17	8.4215	+ 0.17	8.4215	+ 0.17
12	$110690/(23100/\sqrt{3})$	8.2996	8.3135	+ 0.17	8.3135	+ 0.17	8.3135	+ 0.17
13	$109250/(23100/\sqrt{3})$	8.1916	8.2063	+ 0.18	8.2063	+ 0.18	8.2063	+ 0.18
14	$107810/(23100/\sqrt{3})$	8.0837	8.0973	+ 0.17	8.0973	+ 0.17	8.0973	+ 0.17
15	$106380/(23100/\sqrt{3})$	7.9764	7.9899	+ 0.17	7.9899	+ 0.17	7.9899	+ 0.17
16	$104940/(23100/\sqrt{3})$	7.8685	7.8816	+ 0.17	7.8816	+ 0.17	7.8816	+ 0.17
17	$103500/(23100/\sqrt{3})$	7.7605	7.7750	+ 0.19	7.7750	+ 0.19	7.7750	+ 0.19

Criteria : Tolerance shall be within  $\pm 0.5$  % of declared value

Instrument : Transformer turn ratio test set

Biddle Instruments

Decision : Good

Cat. No. 550100

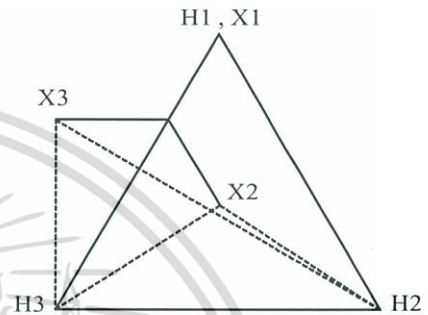
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CHECK OF PHASE DISPLACEMENT

Date of test : July 9, 2002Connection symbol : Dyn1

Test tap : 115000 / 23100 V

Test terminal	Cal. value ( V )	Meas. value ( V )
H2 - X2	83.2	83.3
H2 - X3	102.0	102.0
H3 - X2	83.2	83.3
H3 - X3	83.2	83.3
H1 - H2 - H3	100.0	100.0

Criteria :  $H2 - X2 = H3 - X2 = H3 - X3 < H2 - X3$ Decision : Good

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE

Date of test : July 9, 2002HV WINDING

Tap pos.	At 34.0 °C			Average / ↙	
	H1 - H3 (Ω)	H2 - H1 (Ω)	H3 - H2 (Ω)	(Ω)	
				At 34.0 °C	At 75.0 °C
1	0.66460	0.66366	0.66358	0.99592	1.1473
2	0.64768	0.64790	0.64695	0.97127	1.1189
3	0.63103	0.63044	0.63010	0.94579	1.0896
4	0.61437	0.61360	0.61265	0.92031	1.0602
5	0.59797	0.59731	0.59639	0.89584	1.0320
6	0.58106	0.58034	0.58011	0.87076	1.0031
7	0.56470	0.56387	0.56317	0.84587	0.97444
8	0.54805	0.54736	0.54713	0.82127	0.94610
9	0.52798	0.52734	0.52755	0.79144	0.91174
10	0.54795	0.54702	0.54681	0.82089	0.94567
11	0.56467	0.56405	0.56341	0.84607	0.97467
12	0.58142	0.58086	0.58005	0.87117	1.0036
13	0.59795	0.59705	0.59652	0.89576	1.0319
14	0.61469	0.61387	0.61260	0.92058	1.0605
15	0.63089	0.63128	0.63094	0.94656	1.0904
16	0.64806	0.64772	0.64644	0.97111	1.1187
17	0.66471	0.66407	0.66369	0.99624	1.1477

LV WINDING

Tap pos.	At 34.0 °C			Average / ↙	
	X1 - X3 (mΩ)	X2 - X1 (mΩ)	X3 - X2 (mΩ)	(mΩ)	
				At 34.0 °C	At 75.0 °C
-	20.606	20.583	20.598	10.298	11.863

Note : Temperature correction factor (K) at 75.0 °C

$$K = \frac{235.0 + 75.0}{235.0 + 34.0} = \frac{310.0}{269.0} = 1.152$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MEASUREMENT OF NO-LOAD LOSS AND CURRENT

Date of test : July 10, 2002

Excitation voltage	%	90	95	100	105	110	Rated voltage 23100 V 50 Hz
No-load current (Io) (50000 kVA base)	A	0.944	1.28	1.84	2.78	4.35	
	%	0.0755	0.102	0.147	0.222	0.348	
No-load loss (Wi)	kW	18.0	20.3	23.0	26.2	30.1	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Criteria : No-load loss shall not exceed guaranteed value

Decision : Good

## MEASUREMENT OF SHORT-CIRCUIT IMPEDANCE AND LOAD LOSS

Date of test : July 10, 2002

3 phase 30000 kVA base 50 Hz ONAN class								
Characteristic of no load								
Excitation voltage	%	90	95	100	105	110	Rated voltage 23100 V 50 Hz	
No-load current ( I <sub>o</sub> )	A	0.944	1.28	1.84	2.78	4.35		
	%	0.126	0.171	0.245	0.371	0.580		
No-load loss ( W <sub>i</sub> )	kW	18.0	20.3	23.0	26.2	30.1		
Characteristic of loading								
Tap pos.	-	1	9	17				
HV voltage	V	126500	115000	103500			Supply side	
HV current	A	137	151	167				
LV voltage	V	23100	23100	23100			Load side	
LV current	A	750	750	750				
Load loss ( W <sub>ct</sub> )	kW	44.5	42.6	50.3			t = 33.5 °C	
Impedance voltage ( IZ <sub>t</sub> )	V	12130	10460	9078				
	%	9.59	9.10	8.77				
HV resistance	Ω/↙	0.99333	0.78939	0.99368				
LV resistance	mΩ/↙	10.271	10.271	10.271				
I <sup>2</sup> R loss	kW	36.0	35.3	45.0				
Stray loss	kW	8.50	7.30	5.30				
HV resistance	Ω/↙	1.1473	0.91174	1.1477				at 75.0 °C  K = $\frac{310}{235 + t}$ = 1.155
LV resistance	mΩ/↙	11.863	11.863	11.863				
I <sup>2</sup> R loss	kW	41.6	40.8	52.0				
Stray loss	kW	7.36	6.32	4.59				
Load loss ( W <sub>c75</sub> )	kW	49.0	47.1	56.6				
Reactance drop ( IX <sub>t</sub> )	%	9.59	9.10	8.77				
Impedance voltage ( IZ <sub>75</sub> )	V	12130	10460	9078				
	%	9.59	9.10	8.77				
Voltage regulation	%	0.623	0.571	0.573			p.f. = 1.0	
Total losses ( W <sub>i</sub> +W <sub>c75</sub> )	kW	72.0	70.1	79.6				
Efficiency	%	99.76	99.77	99.74				
Remarks :								
$\% \text{ Volt. reg.} = (\% \text{IR}_{75} * \cos\theta + \% \text{IXt} * \sin\theta) * a + (\% \text{IXt} * \cos\theta - \% \text{IR}_{75} * \sin\theta)^2 * a^2 / 200$ $\% \text{IRt} = (W_{ct} / \text{kVA}) * 100$ $\theta = \text{Load angle ( leading } = -\theta, \text{ lagging } = +\theta )$ $\% \text{IR}_{75} = (W_{c75} / \text{kVA}) * 100$ $\% \text{IXt} = \sqrt{(\% \text{IZt})^2 - (\% \text{IRt})^2}$ a = Per-unit load								

Criteria : Load loss shall not exceed guaranteed value

เอกสารนี้: Impedance shall be within guaranteed value ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก Decision: Good

## MEASUREMENT OF SHORT-CIRCUIT IMPEDANCE AND LOAD LOSS

Date of test : July 10, 2002

3 phase 40000 kVA base 50 Hz ONAF class							
Characteristic of no load							
Excitation voltage	%	90	95	100	105	110	Rated voltage 23100 V 50 Hz
No-load current ( I <sub>o</sub> )	A	0.944	1.28	1.84	2.78	4.35	
	%	0.0944	0.128	0.184	0.278	0.435	
No-load loss ( W <sub>i</sub> )	kW	18.0	20.3	23.0	26.2	30.1	
Characteristic of loading							
Tap pos.	-	1	9	17			
HV voltage	V	126500	115000	103500			Supply side
HV current	A	183	201	223			
LV voltage	V	23100	23100	23100			Load side
LV current	A	1000	1000	1000			
Load loss ( W <sub>ct</sub> )	kW	79.2	75.6	89.3			t = 33.5 °C
Impedance voltage ( IZ <sub>t</sub> )	V	16170	13950	12100			
	%	12.78	12.13	11.69			
HV resistance	Ω/↙	0.99333	0.78939	0.99368			
LV resistance	mΩ/↙	10.271	10.271	10.271			
I <sup>2</sup> R loss	kW	64.1	62.7	80.2			
Stray loss	kW	15.1	12.9	9.10			at 75.0 °C  K = $\frac{310}{235 + t}$ = 1.155
HV resistance	Ω/↙	1.1473	0.91174	1.1477			
LV resistance	mΩ/↙	11.863	11.863	11.863			
I <sup>2</sup> R loss	kW	74.0	72.4	92.6			
Stray loss	kW	13.1	11.2	7.88			
Load loss ( W <sub>c75</sub> )	kW	87.1	83.6	100.5			
Reactance drop ( IX <sub>t</sub> )	%	12.78	12.13	11.69			
Impedance voltage ( IZ <sub>75</sub> )	V	16170	13950	12100			
	%	12.78	12.13	11.69			
Voltage regulation	%	1.03	0.945	0.935			
Total losses ( W <sub>i</sub> +W <sub>c75</sub> )	kW	110.1	106.6	123.5			
Efficiency	%	99.73	99.73	99.69			
Remarks :							
$\% \text{Volt. reg.} = (\%IR_{75} * \cos\theta + \%IX_t * \sin\theta) * a + (\%IX_t * \cos\theta - \%IR_{75} * \sin\theta)^2 * a^2 / 200$ $\%IR_t = (W_{ct} / kVA) * 100 \quad \theta = \text{Load angle ( leading = } -\theta, \text{ lagging = } +\theta )$ $\%IR_{75} = (W_{c75} / kVA) * 100 \quad \%IX_t = \sqrt{(\%IZ_t)^2 - (\%IR_t)^2} \quad a = \text{Per-unit load}$							

Criteria : Load loss shall not exceed guaranteed value

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ Daihen Electric Co., Ltd. ห้ามเผยแพร่หรือใช้ในงานเพื่อการอื่นนอกเหนือจากที่ได้อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง Decision : Good

## MEASUREMENT OF SHORT-CIRCUIT IMPEDANCE AND LOAD LOSS

Date of test : July 10, 2002

3 phase 50000 kVA base 50 Hz ONAF class								
Characteristic of no load								
Excitation voltage	%	90	95	100	105	110	Rated voltage 23100 V 50 Hz	
No-load current ( I <sub>o</sub> )	A	0.944	1.28	1.84	2.78	4.35		
	%	0.0755	0.102	0.147	0.222	0.348		
No-load loss ( W <sub>i</sub> )	kW	18.0	20.3	23.0	26.2	30.1		
Characteristic of loading								
Tap pos.	-	1	9	17				
HV voltage	V	126500	115000	103500			Supply side	
HV current	A	228	251	279				
LV voltage	V	23100	23100	23100			Load side	
LV current	A	1250	1250	1250				
Load loss ( W <sub>ct</sub> )	kW	123.7	118.2	139.6			t = 33.5 °C	
Impedance voltage ( IZ <sub>t</sub> )	V	20210	17440	15130				
	%	15.98	15.17	14.62				
HV resistance	Ω/↙	0.99333	0.78939	0.99368				
LV resistance	mΩ/↙	10.271	10.271	10.271				
I <sup>2</sup> R loss	kW	99.8	97.9	125.5				
Stray loss	kW	23.9	20.3	14.1				
HV resistance	Ω/↙	1.1473	0.91174	1.1477				at 75.0 °C  K = $\frac{310}{235 + t}$ = 1.155
LV resistance	mΩ/↙	11.863	11.863	11.863				
I <sup>2</sup> R loss	kW	115.3	113.1	145.0				
Stray loss	kW	20.7	17.6	12.2				
Load loss ( W <sub>c75</sub> )	kW	136.0	130.7	157.2				
Reactance drop ( IX <sub>t</sub> )	%	15.98	15.17	14.62				
Impedance voltage ( IZ <sub>75</sub> )	V	20210	17440	15130				
	%	15.98	15.17	14.62				
Voltage regulation	%	1.55	1.41	1.38			p.f. = 1.0	
Total losses ( W <sub>i</sub> +W <sub>c75</sub> )	kW	159.0	153.7	180.2				
Efficiency	%	99.68	99.69	99.64				
Remarks :								
$\% \text{ Volt. reg.} = (\% \text{IR}_{75} * \cos\theta + \% \text{IXt} * \sin\theta) * a + (\% \text{IXt} * \cos\theta - \% \text{IR}_{75} * \sin\theta)^2 * a^2 / 200$ $\% \text{IRt} = (W_{ct} / \text{kVA}) * 100 \quad \theta = \text{Load angle ( leading = } -\theta, \text{ lagging = } +\theta)$ $\% \text{IR}_{75} = (W_{c75} / \text{kVA}) * 100 \quad \% \text{IXt} = \sqrt{(\% \text{IZt})^2 - (\% \text{IRt})^2} \quad a = \text{Per-unit load}$								

Criteria : Load loss shall not exceed guaranteed value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการซื้อขายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก Decision : นำไป Good

## MEASUREMENT OF INSULATION RESISTANCE

Date of test : August 14, 2002 (Cold temp.): August 28, 2002 (Hot temp.)

Condition of measurements		HV - LV	HV - (LV•E)	LV - (HV•E)	(HV•LV) - E	Ave. oil temp. (°C)	Amb. humidity (%)
Cold temp.	1 min.	2120 MΩ	2160 MΩ	1170 MΩ	1160 MΩ	32.0	54
	10 min.	11900 MΩ	10200 MΩ	4840 MΩ	4140 MΩ		
	PI $\left(\frac{10 \text{ min.}}{1 \text{ min.}}\right)$	5.6	4.7	4.1	3.6		
Hot temp.	1 min.	1150 MΩ	1180 MΩ	705 MΩ	585 MΩ	57.0	57

Criteria : 1. Insulation resistance shall be more than 560 MΩ at 32.0 °C at 1 min.

2. PI shall be more than 2.0

Instrument : Insulation resistance tester 2500 V

Decision : Good

AVO International Ltd.

model BM25

## MEASUREMENT OF DIELECTRIC DISSIPATION FACTOR AND CAPACITANCE

Date of test : August 14, 2002 (Cold temp.): August 28, 2002 (Hot temp.)

Test voltage : 6000 V 50 Hz

Condition of measurements		(HV•LV) - E	HV - (LV•E)	LV - (HV•E)	Ave. oil temp. (°C)	Amb. humidity (%)
Cold temp.	Capacitance	19000 pF	12400 pF	22900 pF	32.0	54
	D.F.	0.26 %	0.19 %	0.25 %		
	D.F.	0.20 %	0.15 %	0.19 %		
Hot temp.	D.F.	0.40 %	0.28 %	0.37 %	55.0	56
	D.F.	0.18 %	0.13 %	0.17 %	20.0	-

Note : Correction factor at 32.0 °C = 1.30

: Correction factor at 55.0 °C = 2.18

Criteria : D.F. shall not exceed 1.39 % at 20.0 °C

Decision : Good

Instrument : Automatic schering bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้ใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ผู้รับมอบหมายมีหน้าที่ต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEPARATE SOURCE AC WITHSTAND VOLTAGE TEST

Date of test : July 9, 2002

Test tap : 115000 / 23100 V

Test frequency : 50 Hz

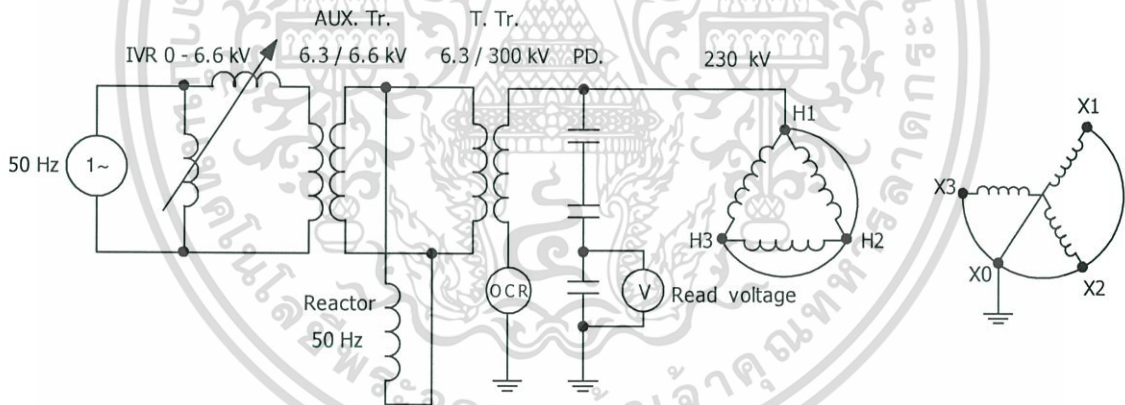
Test winding	Test voltage (kV)	Ratio of PD.	Read voltage (V)	Duration (min.)
HV - (LV • E)	230	3000	76.7	1
LV - (HV • E)	50	1000	50.0	1

Criteria : No collapse of the test voltage

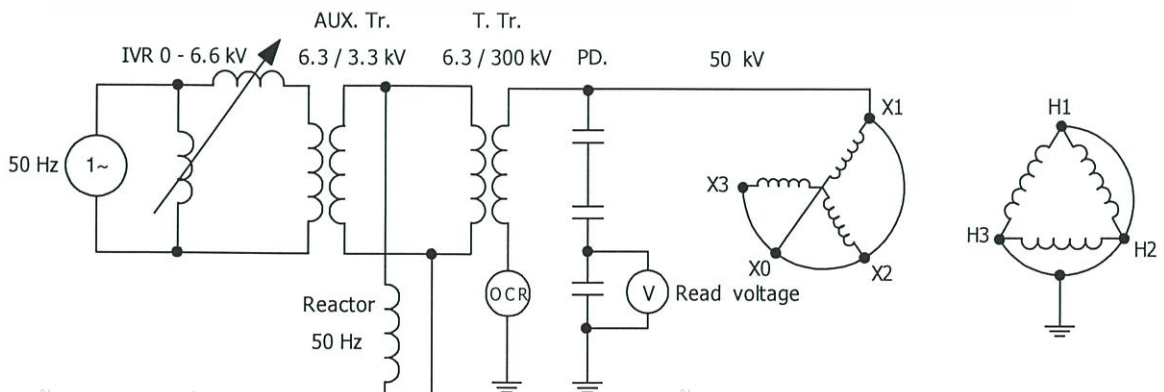
Decision : Withstood

Note : Read voltage =  $\frac{\text{Test voltage}}{\text{Ratio of PD.}}$

HV winding



LV winding



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test circuit

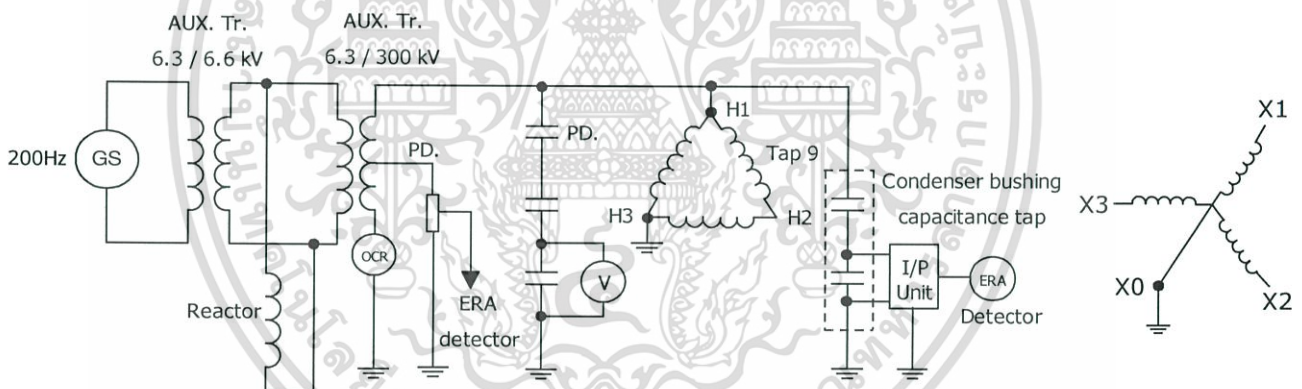
SHORT-DURATION INDUCED AC WITHSTAND VOLTAGE TEST (ACSD)

Date of test : July 9, 2002

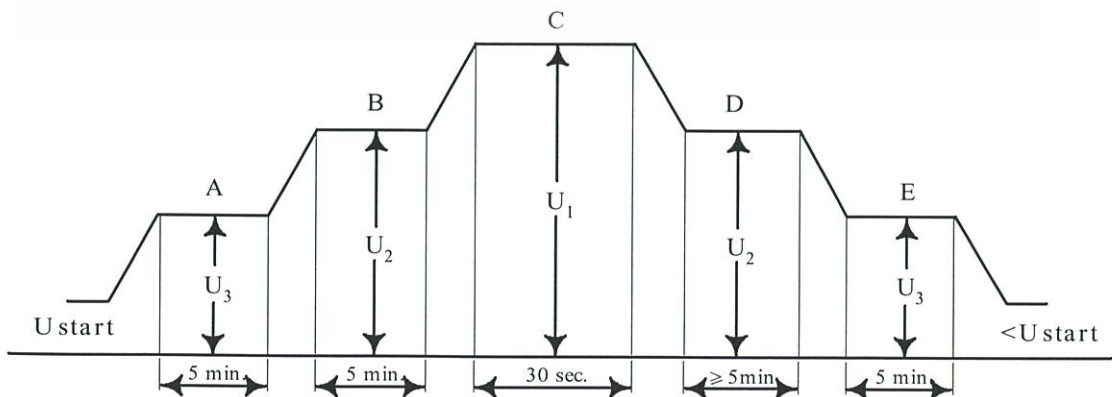
Test tap : 115000 / 23100 V

Test frequency : 200 Hz

Supplied phase	Test voltage (kV)		
	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>
H1 - H3	230	160	135
6			
H2 - H1	230	160	135
6			
H3 - H2	230	160	135



Test circuit ( Supplied phase : H1 - H3 )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม Time sequence for the application of test voltage รั้งที่มีการนำไปใช้

## Measurement of partial discharge

Time ( min. )	Supplied voltage ( kV )	Partial discharge ( pC )			Photo. No.	Note
		Phase H1	Phase H2	Phase H3		
0	135	30	50	40	-	U <sub>3</sub> voltage level test ( A )
5	135	30	50	40	1	
5	160	100	130	170	2	U <sub>2</sub> voltage level test ( B )
30 sec.	230	-	-	-	-	Induced AC withstand voltage test ( C )
0	160	100	130	200	-	U <sub>3</sub> voltage level test ( D )
5	160	100	130	200	3	
0	135	30	40	40	-	U <sub>3</sub> voltage level test ( E )
5	135	34	40	40	4	

Criteria : - No collapse of the test voltages

- The continuous level of apparent charge at U<sub>2</sub> during the second 5 min (D) shall not exceed 300 pC on all measuring terminals
- The partial discharge behaviour does not show a continuing rising tendency
- The continuous level of apparent charge shall not exceed 100 pC at U<sub>3</sub>

Frequency band : 40 - 300 kHz

Instrument : Discharge detector

model 5 type 700

Robinson Instruments Ltd.

Decision : Good

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LIGHTNING IMPULSE TEST

Date of test : July 10, 2002

Test tap : HV winding (min. tap) = 103500 V

BIL of windings

Terminal	HV winding	LV winding
Line	550 kV	150 kV
Neutral	- kV	- kV

Test item &amp; Voltage

Terminal		HV winding		LV winding	
		50 %	100 %	50 %	100 %
Line terminal	Full wave	275 kV	550 kV	75 kV	150 kV
	Chopped-wave	302.5 kV	605 kV	85 kV	170 kV
Neutral terminal	Full wave	- kV	- kV	- kV	- kV

Parameters of circuit

Winding	C (µF)	Ro1 (Ω)	Ro2 (Ω)	Rs1 (Ω)	Rs2 (Ω)	L (mH)
HV line terminal	0.1	800	-	225	-	-
LV line terminal	1.1	9150	-	25.5	90	0.05

Ambient condition

Barometric pressure : 0.101 MPa

Amb. temperature : 31.5 °C

Relative humidity : 67 %

C : Imp. generator capacitor

G : Imp. generator spark gap

Ro1 : Discharging resistor

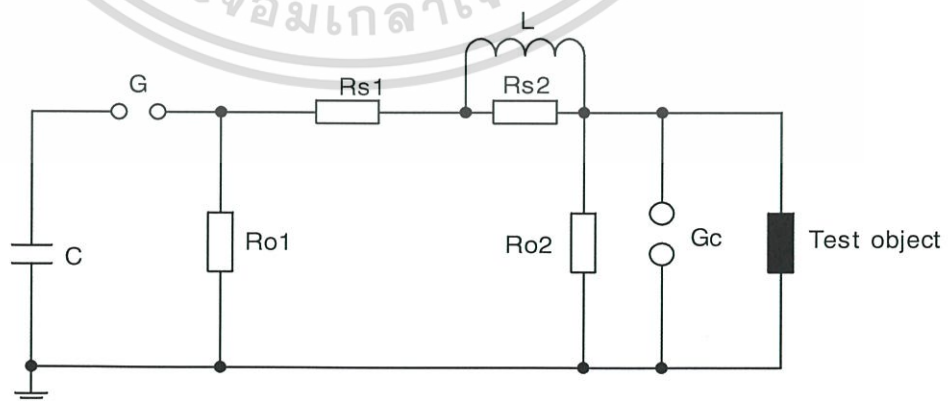
Ro2 : Discharging resistor

Rs1 : Damping resistor

Rs2 : Damping resistor

Gc : Chopping gap

L : Inductor

Impulse generator circuit

Criteria : No collapse of the test voltage and no significant difference of voltage and current recorded at reduced and full test voltages

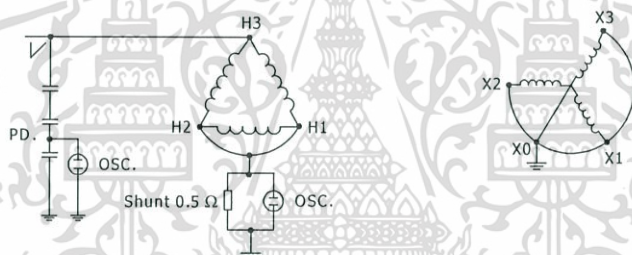
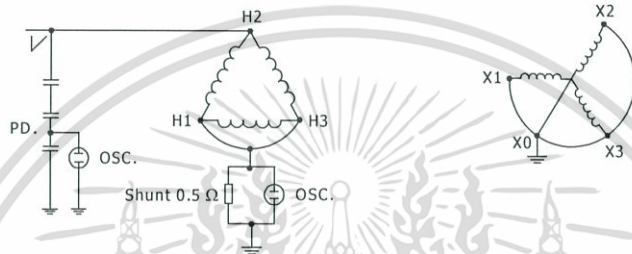
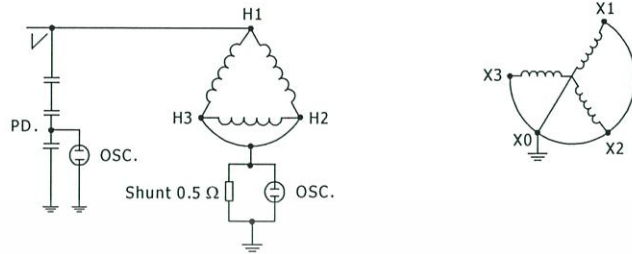
ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decision : Withstood

TEST CONNECTION

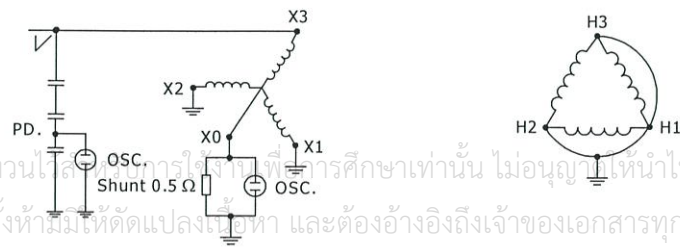
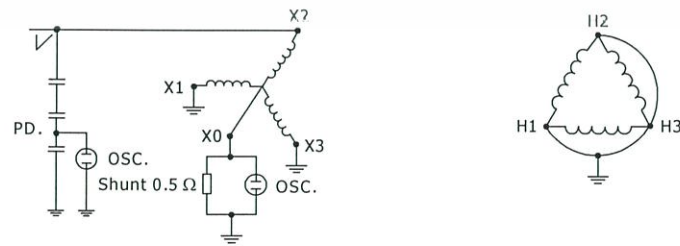
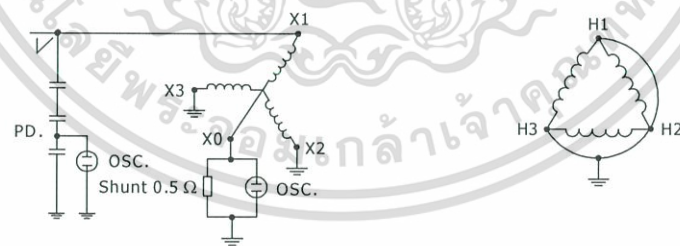
HV WINDING

Line terminal



LV WINDING

Line terminal



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## OSCILLOGRAMS OF HV WINDING

Date of test : July 10, 2002

Decision : Withstood

Current wave-shape

**H1**

Voltage wave-shape

Chopped wave

100 %

605 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 1  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-08

Full wave

100 %

550 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-09

Full wave

100 %

550 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601 10

Test wave-shape

T1 = 1.34  $\mu$ S ( scale : 1  $\mu$ S/div.)T2 = 43  $\mu$ S ( scale : 10  $\mu$ S/div.)

Photo. No. : 22601-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## OSCILLOGRAMS OF HV WINDING

Date of test : July 10, 2002Decision : Withstood

Current wave-shape

**H3**

Voltage wave-shape

Full wave

50 %

275 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-18

Full wave

100 %

550 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-19

Chopped wave

50 %

302.5 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 1  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-20

Chopped wave

100 %

605 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 1  $\mu$ S/div. นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ V: 1  $\mu$ S/div. นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photo. No. :

22601-21

## OSCILLOGRAMS OF LV WINDING

Date of test : July 10, 2002Decision : Withstood

Current wave-shape

X1

Voltage wave-shape

Full wave

50 %

75 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-28

Full wave

100 %

150 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-29

Chopped wave

50 %

85 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 1  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-30

Chopped wave

100 %

170 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 1  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## OSCILLOGRAMS OF LV WINDING

Date of test : July 10, 2002Decision : Withstood

Current wave-shape

**X1**

Voltage wave-shape

Chopped wave

100 %

170 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 1  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-32

Full wave

100 %

150 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-33

Full wave

100 %

150 kV

I : 20  $\mu$ S/div.V : 10  $\mu$ S/div.

Photo. No. :

22601-34

Test wave-shape

T<sub>1</sub> = 1.00  $\mu$ S ( scale : 1  $\mu$ S/div.)T<sub>2</sub> = 47  $\mu$ S ( scale : 10  $\mu$ S/div.)

Photo. No. : 22601-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TEMPERATURE-RISE TEST ( 1 )

Date of test : July 10-11, 2002

## 1. Test condition

Capacity	:	30000	kVA	ONAN	class
HV winding	:	103500	V	167	A
LV winding	:	23100	V	750	A

## 2. Supplied losses

No-load loss	:	23.0	kW
Load loss ( at 75.0 °C )	:	56.6	kW
Total losses ( at 75.0 °C )	:	79.6	kW

## 3. Test results

## a. Top oil temperature rise at total losses

$$72.5 - 32.0 = 40.5 \text{ K}$$

## b. Average oil temperature rise at total losses

$$72.5 - 1/2 * ( 67.3 - 54.6 ) - 32.0 = 34.2 \text{ K}$$

## c. Average oil temperature rise at rated current

$$72.0 - 1/2 * ( 66.5 - 54.5 ) - 32.5 = 33.5 \text{ K}$$

## d. Average winding temperature rise at total losses

Measured winding	Cold state		Average winding temp. rise at the instant of shutdown ( K )
	Resistance	Amb. temp. ( °C )	
H2 - H1	0.66407 Ω	34.0	43.5
X2 - X1	20.583 mΩ	34.0	44.0

The average winding temperature rise at total losses at rated current, frequency and voltage is sum of the average oil temperature rise at total losses and average winding temperature rise at the instant of shutdown above average oil temperature rise at rated current.

$$\text{HV winding} = 34.2 + ( 43.5 - 33.5 ) = 44.2 \text{ K}$$

$$\text{LV winding} = 34.2 + ( 44.0 - 33.5 ) = 44.7 \text{ K}$$

Criteria : Temperature rise of top oil and winding shall not exceed guaranteed value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 Decision : Good

## TEMPERATURE-RISE TEST ( 1 )

Test tap				Voltage	Rated current	Output	Test freq. : 50 Hz	
		HV side		103500 V	167 A	30000 kVA	Switched on : 20:00	
		LV side		23100 V	750 A	30000 kVA	Switched off : 11:00	
Time	Short-circuit method		Amb. temp. (°C)	Oil temp.				
	Loss (kW)	Current (A)		Top oil (°C)	Temp. rise (K)	Top rad. (°C)	Bott. rad. (°C)	
20:00	79.6	-	32.0	39.0	7.0	-	-	
21:00	79.6	-	31.5	45.0	13.5	-	-	
22:00	79.6	-	31.5	51.5	20.0	-	-	
23:00	79.6	-	31.5	56.5	25.0	-	-	
24:00	79.6	-	32.0	60.5	28.5	-	-	
1:00	79.6	-	31.5	64.0	32.5	-	-	
2:00	79.6	-	31.5	66.0	34.5	-	-	
3:00	79.6	-	31.5	68.0	36.5	-	-	
4:00	79.6	-	31.5	69.0	37.5	-	-	
5:00	79.6	-	31.5	70.0	38.5	-	-	
6:00	79.6	-	31.5	71.0	39.5	-	-	
7:00	79.6	-	31.0	71.5	40.5	-	-	
8:00	79.6	-	31.5	72.0	40.5	-	-	
9:00	79.6	-	32.0	72.5	40.5	-	-	
10:00	79.6	→ 167	32.0	72.5	40.5	67.3	54.6	
11:00	-	167	32.5	72.0	39.5	66.5	54.5	
Ave. winding temp. rise determined from temperature-rise curve / time								
Measured winding	Cold state		Hot state		Temp. rise at instant of shutdown (K)			
	Resistance	Amb. temp. (°C)	Resistance (Ω)	Amb. temp. (°C)				
H2 - H1	0.66407 Ω	34.0	-	32.5	43.5			
X2 - X1	20.583 mΩ	34.0	-	32.5	44.0			
Remark :								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TEMPERATURE-RISE TEST ( 2 )

Date of test : August 27-28, 2002

## 1. Test condition

Capacity	:	40000	kVA	ONAF	class
HV winding	:	103500	V	223	A
LV winding	:	23100	V	1000	A

## 2. Supplied losses

No-load loss	:	23.0	kW
Load loss ( at 75.0 °C )	:	100.5	kW
Total losses ( at 75.0 °C )	:	123.5	kW

## 3. Test results

## a. Top oil temperature rise at total losses

$$72.0 - 30.5 = 41.5 \text{ K}$$

## b. Average oil temperature rise at total losses

$$72.0 - 1/2 * ( 70.0 - 50.7 ) - 30.5 = 31.9 \text{ K}$$

## c. Average oil temperature rise at rated current

$$71.5 - 1/2 * ( 68.8 - 50.4 ) - 31.0 = 31.3 \text{ K}$$

## d. Average winding temperature rise at total losses

Measured winding	Cold state		Average winding temp. rise at the instant of shutdown (K)
	Resistance	Amb. temp. (°C)	
H2 - H1	0.66407 Ω	34.0	44.5
X2 - X1	20.583 mΩ	34.0	45.0

The average winding temperature rise at total losses at rated current, frequency and voltage is sum of the average oil temperature rise at total losses and average winding temperature rise at the instant of shutdown above average oil temperature rise at rated current.

$$\text{HV winding} = 31.9 + ( 44.5 - 31.3 ) = 45.1 \text{ K}$$

$$\text{LV winding} = 31.9 + ( 45.0 - 31.3 ) = 45.6 \text{ K}$$

Criteria : Temperature rise of top oil and winding shall not exceed guaranteed value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้  
 Decision : Good

## TEMPERATURE-RISE TEST ( 2 )

Test tap				Voltage	Rated current	Output	Test freq. : 50 Hz	
		HV side		103500 V	223 A	40000 kVA	Switched on : 23:00	
		LV side		23100 V	1000 A	40000 kVA	Switched off : 10:00	
Time	Short-circuit method		Amb. temp. (°C)	Oil temp.				
	Loss (kW)	Current (A)		Top oil (°C)	Temp. rise (K)	Top rad. (°C)	Bott. rad. (°C)	
23:00	123.5	-	31.0	46.0	15.0	-	-	
24:00	123.5	-	30.5	53.0	22.5	-	-	
1:00	123.5	-	30.5	62.0	31.5	-	-	
2:00	123.5	-	30.5	68.0	37.5	-	-	
3:00	123.5	-	30.5	70.0	39.5	-	-	
4:00	123.5	-	30.5	71.0	40.5	-	-	
5:00	123.5	-	30.5	71.5	41.0	-	-	
6:00	123.5	-	30.5	72.0	41.5	-	-	
7:00	123.5	-	30.5	72.0	41.5	-	-	
8:00	123.5	-	30.5	72.0	41.5	-	-	
9:00	123.5	→ 223	30.5	72.0	41.5	70.0	50.7	
10:00	-	223	31.0	71.5	40.5	68.8	50.4	
Ave. winding temp. rise determined from temperature-rise curve / time								
Measured winding	Cold state		Hot state		Temp. rise at instant of shutdown (K)			
	Resistance	Amb. temp. (°C)	Resistance (Ω)	Amb. temp. (°C)				
H2 - H1	0.66407 Ω	34.0	-	31.0	44.5			
X2 - X1	20.583 mΩ	34.0	-	31.0	45.0			
Remark :								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TEMPERATURE-RISE TEST (3)

Date of test : August 26-27, 2002

## 1. Test condition

Capacity	:	50000	kVA	ONAF	class
HV winding	:	103500	V	279	A
LV winding	:	23100	V	1250	A

## 2. Supplied losses

No-load loss	:	23.0	kW
Load loss ( at 75.0 °C )	:	157.2	kW
Total losses ( at 75.0 °C )	:	180.2	kW

## 3. Test results

## a. Top oil temperature rise at total losses

$$77.0 - 31.5 = 45.5 \text{ K}$$

## b. Average oil temperature rise at total losses

$$77.0 - 1/2 * ( 74.3 - 50.8 ) - 31.5 = 33.8 \text{ K}$$

## c. Average oil temperature rise at rated current ( to determine HV wdg. temp. rise )

$$76.5 - 1/2 * ( 74.0 - 51.3 ) - 32.0 = 33.2 \text{ K}$$

## d. Average oil temperature rise at rated current ( to determine LV wdg. temp. rise )

$$76.0 - 1/2 * ( 73.1 - 51.2 ) - 34.5 = 30.6 \text{ K}$$

## e. Average winding temperature rise at total losses

Measured winding	Cold state		Average winding temp. rise at the instant of shutdown ( K )
	Resistance	Amb. temp. ( °C )	
H2 - H1	0.66407 Ω	34.0	49.8
X2 - X1	20.583 mΩ	34.0	46.4

The average winding temperature rise at total losses at rated current, frequency and voltage is sum of the average oil temperature rise at total losses and average winding temperature rise at the instant of shutdown above average oil temperature rise at rated current.

$$\text{HV winding} = 33.8 + ( 49.8 - 33.2 ) = 50.4 \text{ K}$$

$$\text{LV winding} = 33.8 + ( 46.4 - 30.6 ) = 49.6 \text{ K}$$

Criteria : Temperature rise of top oil and winding shall not exceed guaranteed value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีเผยแพร่

Decision : Good

## TEMPERATURE-RISE TEST ( 3 )

Test tap				Voltage	Rated current	Output	Test freq. : 50. Hz	
		HV side		103500 V	279 A	50000 kVA	Switched on : 23:00	
		LV side		23100 V	1250 A	50000 kVA	Switched off : 15:00	
Time	Short-circuit method		Amb. temp. ( °C )	Oil temp.				
	Loss ( kW )	Current ( A )		Top oil ( °C )	Temp. rise ( K )	Top rad. ( °C )	Bott. rad. ( °C )	
23:00	180.2	-	30.0	32.5	2.5	-	-	
24:00	180.2	-	29.5	48.0	18.5	-	-	
1:00	180.2	-	29.5	61.5	32.0	-	-	
2:00	180.2	-	29.5	71.5	42.0	-	-	
3:00	180.2	-	30.0	75.0	45.0	-	-	
4:00	180.2	-	30.0	75.5	45.5	-	-	
5:00	180.2	-	30.0	75.5	45.5	-	-	
6:00	180.2	-	30.0	75.5	45.5	-	-	
7:00	180.2	-	30.0	75.5	45.5	-	-	
8:00	180.2	-	30.0	75.5	45.5	-	-	
9:00	180.2	-	30.5	76.0	45.5	-	-	
10:00	180.2 →	279	31.5	77.0	45.5	74.3	50.8	
11:00	-	279	32.0	76.5	44.5	74.0	51.3	
11:30	-	279	32.5	76.0	43.5	-	-	
12:00	-	279	32.5	75.0	42.5	-	-	
13:00	-	279	33.5	73.0	39.5	-	-	
14:00	-	279	34.5	75.0	40.5	-	-	
15:00	-	279	34.5	76.0	41.5	73.1	51.2	
Ave. winding temp. rise determined from temperature-rise curve / time								
Measured winding	Cold state		Hot state		Temp. rise at instant of shutdown ( K )			
	Resistance	Amb. temp. ( °C )	Resistance ( Ω )	Amb. temp. ( °C )				
H2 - H1	0.66407 Ω	34.0	-	32.0	49.8			
X2 - X1	20.583 mΩ	34.0	-	34.5	46.4			
Remark :								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DETERMINATION OF SOUND PRESSURE LEVEL

Date of test : July 17, 2002: August 28, 2002

## 1. Microphone locations



X = 0.3 m when the cooling fans are out of service

X = 2.0 m when the cooling fans are in service

2. Applicable standard : IEC 70076-10 ( 2001 )
3. Test results : page 50-52
4. Supplied voltage : 3 Ø 23100 V 50 Hz at LV side
5. Measurement place : Daihen Electric Co., Ltd.
6. Instrument : A-weighted sound level meter type 3604 Yokogawa

Criteria : Sound pressure level shall not exceed guaranteed value

Decision : Good

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test results of transformer sound pressure level at 30000 kVA base (performed on Jul. 17, 2002)

Microphone locations	background noise (dB(A))				Transformer sound pressure level	
	Before measurement		After measurement		Measured value (dB(A))	
	1/3 h <sup>*1</sup>	2/3 h <sup>*1</sup>	1/3 h <sup>*2</sup>	2/3 h <sup>*2</sup>	1/3 h	2/3 h
1	54.0	54.0	53.0	53.0	66.0	65.5
2	54.0	53.0	53.5	53.0	64.0	63.5
3	53.0	52.0	53.0	52.0	65.0	62.0
4	52.0	51.0	51.0	51.0	66.0	66.5
5	52.0	51.0	52.0	51.0	64.0	62.0
6	52.0	51.5	52.0	51.0	64.5	61.0
7	52.0	51.0	52.0	51.0	61.0	61.0
8	52.0	51.5	51.0	51.0	61.0	65.0
9	52.0	51.0	51.0	51.0	64.0	63.0
10	51.0	51.0	52.0	51.5	66.5	63.0
11	52.0	51.0	51.5	51.0	66.5	64.5
12	51.5	51.0	52.0	52.0	64.0	62.0
13	51.0	51.0	51.0	51.0	65.5	62.0
14	52.0	52.0	51.0	51.5	62.0	65.0
15	52.0	52.0	52.0	52.0	64.0	63.0
16	52.0	52.5	52.0	52.0	64.0	62.0
17	53.0	53.0	53.0	53.0	66.0	64.0
18	53.0	53.5	53.5	53.0	67.0	67.5
19	53.5	53.0	54.0	53.0	68.5	65.0
Average	52.4	52.0	52.2	51.9	65.1	63.9
	52.2		52.1		64.5	
Environmental correction = 0 dB(A)						
Corrected average A-weighted sound pressure level = 64 dB(A)						

Note :

Distance (X) : 0.3 m

Transformer tank height(h) : 3.16 m

Ave. background noise : [back. noise \*1 + back. noise \*2] / 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test results of transformer sound pressure level at 40000 kVA base (performed on Aug. 28, 2002)

Microphone locations	background noise (dB(A))				Transformer sound pressure level	
	Before measurement		After measurement		Measured value (dB(A))	
	1/3 h <sup>*1</sup>	2/3 h <sup>*1</sup>	1/3 h <sup>*2</sup>	2/3 h <sup>*2</sup>	1/3 h	2/3 h
1	53.0	52.5	52.5	53.0	65.0	65.0
2	53.0	53.0	53.0	52.5	65.0	65.0
3	52.5	52.5	52.5	52.5	65.0	66.0
4	52.5	53.0	53.0	53.0	66.0	65.0
5	53.0	52.5	52.5	53.0	67.0	67.0
6	51.0	51.0	51.5	51.0	67.0	67.0
7	51.5	51.5	52.0	52.0	68.0	68.0
8	51.0	51.0	51.0	51.0	68.0	67.0
9	51.5	51.0	51.5	51.5	69.0	70.0
10	51.5	51.5	51.5	51.5	70.0	69.0
11	51.0	51.0	51.5	51.0	71.0	69.0
12	49.0	50.0	49.5	50.0	68.0	69.0
13	49.5	51.0	49.0	50.5	70.0	69.0
14	51.5	51.0	51.5	51.5	69.0	68.0
15	51.0	51.5	51.5	51.0	69.0	67.0
16	52.0	51.5	52.0	51.5	68.0	67.0
17	52.5	51.5	52.0	51.5	67.0	67.0
18	51.0	51.5	51.0	51.5	69.0	69.0
19	51.0	51.0	51.0	51.5	69.0	70.0
20	51.5	52.0	51.0	51.5	69.0	70.0
21	52.0	51.5	52.0	52.5	69.0	70.0
22	52.0	53.0	52.0	53.0	68.0	68.0
23	52.5	52.5	52.0	52.0	65.0	65.0
24	52.0	53.0	52.0	53.0	64.0	65.0
25	52.5	53.0	52.5	53.5	67.0	65.0
26	53.0	53.0	53.5	53.5	64.0	64.0
27	53.5	53.0	53.0	52.5	67.0	67.0
28	53.5	53.5	53.0	53.5	66.0	65.0
29	52.5	53.0	53.5	53.5	66.0	66.0
Average	52.0	52.1	52.0	52.2	67.8	67.6
	52.1		52.1		67.7	

Environmental correction = 0 dB(A)  
Corrected average A-weighted sound pressure level = 68 dB(A)

Note :

เอกสารนี้เป็น Distance (X) : 0.3 m การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Transformer tank height(h) : 3.16 m ไม่ว่าการณีใด ๆ ก็ตาม ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
Ave. background noise : [back. noise \*1 + back. noise \*2] / 2

Test results of transformer sound pressure level at 50000 kVA base (performed on Aug. 28, 2002)

Microphone locations	background noise (dB(A))				Transformer sound pressure level	
	Before measurement		After measurement		Measured value (dB(A))	
	1/3 h <sup>*1</sup>	2/3 h <sup>*1</sup>	1/3 h <sup>*2</sup>	2/3 h <sup>*2</sup>	1/3 h	2/3 h
1	53.0	52.5	52.5	53.0	67.0	65.0
2	53.0	53.0	53.0	52.5	67.0	65.0
3	52.5	52.5	52.5	52.5	66.0	66.5
4	52.5	53.0	53.0	53.0	66.0	66.5
5	53.0	52.5	52.5	53.0	70.0	69.0
6	51.0	51.0	51.5	51.0	70.0	70.0
7	51.5	51.5	52.0	52.0	70.0	70.0
8	51.0	51.0	51.0	51.0	71.0	72.0
9	51.5	51.0	51.5	51.5	71.0	71.0
10	51.5	51.5	51.5	51.5	72.0	71.0
11	51.0	51.0	51.5	51.0	70.0	70.0
12	49.0	50.0	49.5	50.0	71.0	71.0
13	49.5	51.0	49.0	50.5	70.0	70.0
14	51.5	51.0	51.5	51.5	70.0	69.0
15	51.0	51.5	51.5	51.0	70.0	70.0
16	52.0	51.5	52.0	51.5	70.0	69.5
17	52.5	51.5	52.0	51.5	70.5	71.0
18	51.0	51.5	51.0	51.5	71.0	71.0
19	51.0	51.0	51.0	51.5	72.0	70.0
20	51.5	52.0	51.0	51.5	70.0	71.0
21	52.0	51.5	52.0	52.5	70.0	68.0
22	52.0	53.0	52.0	53.0	68.0	66.0
23	52.5	52.5	52.0	52.0	65.0	65.0
24	52.0	53.0	52.0	53.0	68.0	66.0
25	52.5	53.0	52.5	53.5	65.0	66.0
26	53.0	53.0	53.5	53.5	64.0	64.0
27	53.5	53.0	53.0	52.5	67.0	67.0
28	53.5	53.5	53.0	53.5	67.0	66.0
29	52.5	53.0	53.5	53.5	68.0	67.0
Average	52.0	52.1	52.0	52.2	69.3	69.0
	52.1		52.1		69.2	

Environmental correction = 0 dB(A)  
Corrected average A-weighted sound pressure level = 69 dB(A)

Note :

เอกสารนี้ (Distance (X)) : 0.3 m  
Transformer tank height(h) : 3.16 m  
Ave. background noise : [back. noise \*1 + back. noise \*2] / 2

## OPERATION TEST OF ON-LOAD TAP-CHANGER

Date of test : July 9-10, 2002

The following tests were performed with 100 % of the rated auxiliary supply voltage ( with the exception of b ) :

- a) 8 complete operating cycles with the transformer not energized ;
- b) 1 complete operating cycle with the transformer not energized with 85 % of the rated auxiliary supply voltage ;
- c) 1 complete operating cycle with the transformer energized at rated voltage and frequency at no-load ;
- d) with LV winding short-circuited and, as far as practicable, rated current in the tapped winding, 10 tap-change operations across the range of two steps on each side from where a coarse or reversing changeover selector operated.

Criteria : No failure of operation

Decision : Good

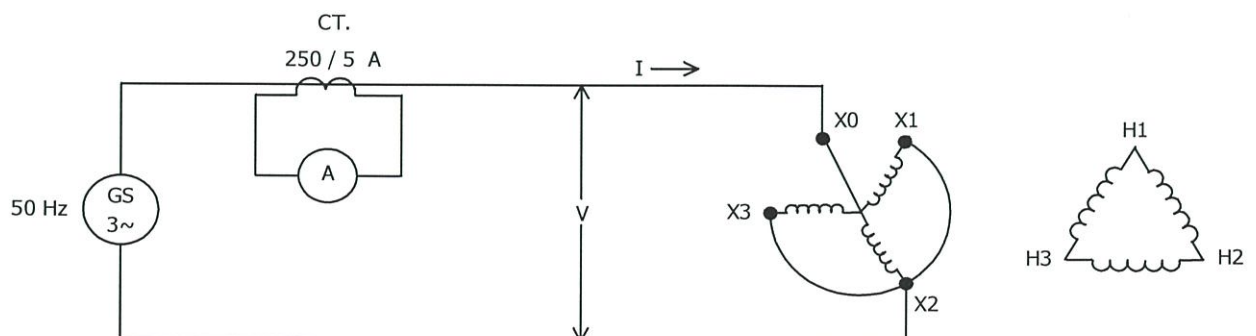
## MEASUREMENT OF ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE

Date of test : July 10, 2002

At 50000 kVA base

HV tap pos.	Meas. value		Cal. value ( per phase )	
	V ( V )	I ( A )	$Z_0$ ( % )	$Z_0$ ( $\Omega$ )
1 ( 126500 V )	78.35	135.85	16.21	1.73
9 ( 115000 V )	76.82	140.10	15.41	1.64
17 ( 103500 V )	74.46	140.75	14.87	1.59

Criteria : - ( For reference )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test circuit



## TEST REPORT OF BUSHING-TYPE CURRENT TRANSFORMER

Product No. : EDP022601

Standard : IEC 44-1(1996)

Current ratio : 500-200-100/1 A

Accuracy class : 5P20

Rated burden : 70 VA (p.f. = 0.8 lagging)

Rated frequency : 50 Hz

1. Current error and phase displacement..... Good

Phase	BCT marking	Terminal marking	Current ratio (A)	Primary current	100 % Rated burden		Composite error (%)
					Current error (%)	Phase displacement (min.)	
H1	H11	1x1H1 - 1x4H1	500/1	1.0In	- 0.056	+ 1.0	-
				20.0In	-	-	0.210
		1x1H1 - 1x3H1	200/1	1.0In	+ 0.040	+ 6.7	-
				20.0In	-	-	-
		1x1H1 - 1x2H1	100/1	1.0In	- 0.222	+ 4.0	-
				20.0In	-	-	-
H2	H21	1x1H2 - 1x4H2	500/1	1.0In	- 0.049	+ 0.8	-
				20.0In	-	-	0.190
		1x1H2 - 1x3H2	200/1	1.0In	+ 0.071	+ 6.4	-
				20.0In	-	-	-
		1x1H2 - 1x2H2	100/1	1.0In	- 0.140	+ 4.3	-
				20.0In	-	-	-
H3	H31	1x1H3 - 1x4H3	500/1	1.0In	- 0.049	+ 0.9	-
				20.0In	-	-	0.190
		1x1H3 - 1x3H3	200/1	1.0In	+ 0.076	+ 6.7	-
				20.0In	-	-	-
		1x1H3 - 1x2H3	100/1	1.0In	- 0.119	+ 5.5	-
				20.0In	-	-	-

2. Inter-turn overvoltage test..... Withstood

3. Power-frequency withstand test..... Withstood

4. Insulation resistance (2500 V megger)..... Good (&gt;2000 MΩ)

5. Polarity..... Subtractive

6. Verification of terminal markings..... Good

7. Construction inspection..... Good

8. Excitation curves (page 56-58)..... Good

Date of test : June 14, 2002

Tested by : \_\_\_\_\_

Approved by : \_\_\_\_\_

H. Jaroon

General Manager

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEST REPORT OF BUSHING-TYPE CURRENT TRANSFORMER

Product No. : EDP022601

Standard : IEEE std C57.13-1993

Current ratio : 500/200/100:1 A

Accuracy class : 1.2

Rated burden : 70 VA ( p.f. = 0.8 lagging )

Rated frequency : 50 Hz

1. Current error and phase displacement..... Good

Phase	BCT marking	Terminal marking	Current ratio ( A )	Primary current ( A )	RCF	Phase displacement ( min. )	Sec. winding resistance ( Ω ) at 75 °C
H1	H12	2X1H1 - 2X4H1	500:1	1.0In	1.0008	+ 1.1	2.006
				0.1In	1.0028	+ 4.7	
		2X1H1 - 2X3H1	200:1	1.0In	1.0009	+ 6.7	0.792
				0.1In	1.0075	+ 23.8	
		2X1H1 - 2X2H1	100:1	1.0In	1.0068	- 0.3	0.386
				0.1In	1.0314	+ 82.0	
H2	H22	2X1H2 - 2X4H2	500:1	1.0In	1.0007	+ 1.7	2.007
				0.1In	1.0029	+ 4.6	
		2X1H2 - 2X3H2	200:1	1.0In	1.0005	+ 7.2	0.790
				0.1In	1.0080	+ 22.2	
		2X1H2 - 2X2H2	100:1	1.0In	1.0047	+ 3.4	0.384
				0.1In	1.0308	+ 79.0	
H3	H32	2X1H3 - 2X4H3	500:1	1.0In	1.0009	+ 2.2	2.007
				0.1In	1.0033	+ 5.6	
		2X1H3 - 2X3H3	200:1	1.0In	1.0013	+ 8.0	0.792
				0.1In	1.0093	+ 27.6	
		2X1H3 - 2X2H3	100:1	1.0In	1.0070	+ 1.7	0.386
				0.1In	1.0373	+ 96.0	

- 2. Induced voltage test..... Withstood
- 3. Applied voltage test..... Withstood
- 4. Insulation resistance ( 2500 V megger )..... Good ( >2000 MΩ )
- 5. Polarity..... Subtractive
- 6. Verification of terminal markings..... Good
- 7. Construction inspection..... Good
- 8. Excitation curves ( page 60-62 )..... Good

Date of test : June 19, 2002

Tested by : \_\_\_\_\_

Approved by : \_\_\_\_\_

H. Jaroon  
General Manager

Quality Control Department  
DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TEST REPORT OF BUSHING-TYPE CURRENT TRANSFORMER

Product No. : EDP022601

Standard : IEC 44-1(1996)

Current ratio : 1800-1500-900/1 A

Accuracy class : 5P20

Rated burden : 120 VA (p.f. = 0.8 lagging)

Rated frequency : 50 Hz

1. Current error and phase displacement..... Good

Phase	BCT marking	Terminal marking	Current ratio (A)	Primary current	100 % Rated burden		Composite error (%)
					Current error (%)	Phase displacement (min.)	
X1	X11	1x1X1 - 1x4X1	1800/1	1.0In	- 0.084	+ 0.1	-
				20.0In	-	-	0.077
		1x1X1 - 1x3X1	1500/1	1.0In	- 0.134	+ 0.4	-
				20.0In	-	-	-
		1x1X1 - 1x2X1	900/1	1.0In	- 0.331	+ 2.1	-
				20.0In	-	-	-
X2	X21	1x1X2 - 1x4X2	1800/1	1.0In	- 0.080	- 0.3	-
				20.0In	-	-	0.071
		1x1X2 - 1x3X2	1500/1	1.0In	- 0.128	+ 0.2	-
				20.0In	-	-	-
		1x1X2 - 1x2X2	900/1	1.0In	- 0.325	+ 1.6	-
				20.0In	-	-	-
X3	X31	1x1X3 - 1x4X3	1800/1	1.0In	- 0.089	- 0.1	-
				20.0In	-	-	0.068
		1x1X3 - 1x3X3	1500/1	1.0In	- 0.138	+ 0.3	-
				20.0In	-	-	-
		1x1X3 - 1x2X3	900/1	1.0In	- 0.337	+ 1.8	-
				20.0In	-	-	-

2. Inter-turn overvoltage test..... Withstood

3. Power-frequency withstand test..... Withstood

4. Insulation resistance (2500 V megger)..... Good (&gt;2000 MΩ)

5. Polarity..... Subtractive

6. Verification of terminal markings..... Good

7. Construction inspection..... Good

8. Excitation curves (page 64-66)..... Good

Date of test : June 19, 2002

Tested by : \_\_\_\_\_

Approved by : \_\_\_\_\_

H. Jaroon

General Manager

Quality Control Department

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEST REPORT OF BUSHING-TYPE CURRENT TRANSFORMER

Product No. : EDP022601

Standard : IEEE std C57.13-1993

Current ratio : 1800/1500/900:1 A

Accuracy class : 1.2

Rated burden : 120 VA ( p.f. = 0.8 lagging )

Rated frequency : 50 Hz

1. Current error and phase displacement..... Good

Phase	BCT marking	Terminal marking	Current ratio ( A )	Primary current ( A )	RCF	Phase displacement ( min. )	Sec. winding resistance ( Ω ) at 75 °C	
X1	X12	2X1X1 - 2X4X1	1800:1	1.0In	1.0009	- 0.6	5.825	
				0.1In	1.0018	+ 0.4		
		2X1X1 - 2X3X1	1500:1	1.0In	1.0014	+ 0.2		4.803
				0.1In	1.0024	+ 1.5		
		2X1X1 - 2X2X1	900:1	1.0In	1.0034	+ 1.2		2.828
				0.1In	1.0053	+ 6.4		
X2	X22	2X1X2 - 2X4X2	1800:1	1.0In	1.0009	- 0.6	5.824	
				0.1In	1.0012	- 0.3		
		2X1X2 - 2X3X2	1500:1	1.0In	1.0014	- 0.2		4.809
				0.1In	1.0017	+ 0.8		
		2X1X2 - 2X2X2	900:1	1.0In	1.0034	+ 1.2		2.831
				0.1In	1.0041	+ 4.6		
X3	X32	2X1X3 - 2X4X3	1800:1	1.0In	1.0008	- 0.4	5.841	
				0.1In	1.0012	- 0.2		
		2X1X3 - 2X3X3	1500:1	1.0In	1.0013	- 0.1		4.821
				0.1In	1.0017	+ 0.9		
		2X1X3 - 2X2X3	900:1	1.0In	1.0033	+ 1.3		2.839
				0.1In	1.0040	+ 5.2		

- 2. Induced voltage test..... Withstood
- 3. Applied voltage test..... Withstood
- 4. Insulation resistance ( 2500 V megger )..... Good ( >2000 MΩ )
- 5. Polarity..... Subtractive
- 6. Verification of terminal markings..... Good
- 7. Construction inspection..... Good
- 8. Excitation curves ( page 68-70 )..... Good

Date of test : June 13, 2002

Tested by : \_\_\_\_\_

Approved by : \_\_\_\_\_

H. Jaroon

General Manager

Quality Control Department

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปยังที่ระเอียดด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEST REPORT OF BUSHING-TYPE CURRENT TRANSFORMER

Product No. : EDP022601

Standard : IEC 44-1(1996)

Current ratio : 3400/5 A

Accuracy class : 3

Rated burden : 20 VA (p.f. = 0.8 lagging)

Rated frequency : 50 Hz

1. Current error and phase displacement..... Good

Phase	BCT marking	Terminal marking	Current ratio (A)	Primary current	100 % Rated burden		50 % Rated burden	
					Current error (%)	Phase displacement (min.)	Current error (%)	Phase displacement (min.)
X1	X13	kX1 - 1X1	3400/5	1.2In	- 0.059	+ 1.1	- 0.036	+ 1.1
				0.5In	- 0.069	+ 1.6	- 0.044	+ 1.5
X2	X23	kX2 - 1X2	3400/5	1.2In	- 0.037	+ 0.6	- 0.020	+ 0.6
				0.5In	- 0.045	+ 0.9	- 0.025	+ 0.8
X3	X33	kX3 - 1X3	3400/5	1.2In	- 0.079	+ 0.4	- 0.056	+ 0.5
				0.5In	- 0.097	+ 1.0	- 0.064	+ 1.1

- 2. Inter-turn overvoltage test..... Withstood
- 3. Power-frequency withstand test..... Withstood
- 4. Insulation resistance (2500 V megger)..... Good (>2000 MΩ)
- 5. Polarity..... Subtractive
- 6. Verification of terminal markings..... Good
- 7. Construction inspection..... Good
- 8. Excitation curves (page 72-74)..... Good

Date of test : June 5, 2002

Tested by : \_\_\_\_\_

Approved by : \_\_\_\_\_

H. Jaroon

General Manager

Quality Control Department

DAIHEN ELECTRIC CO., LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

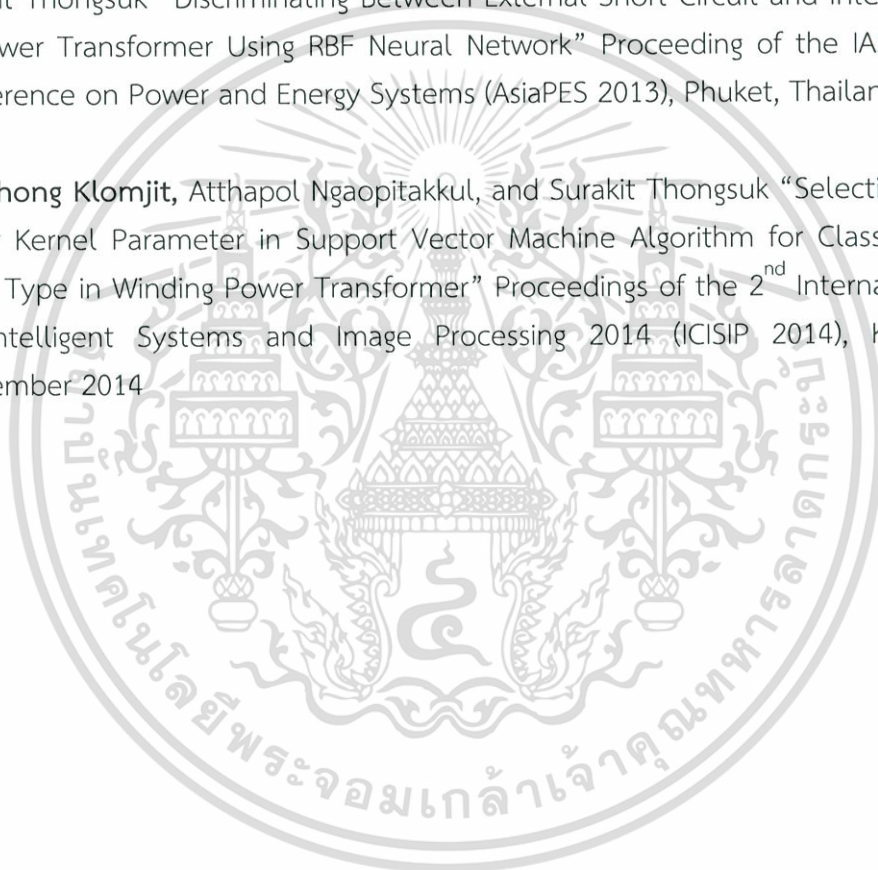
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค**  
**บทความทางวิชาการระดับนานาชาติ**

**Jittiphong Klomjit, Atthapol Ngaopitakkul.** “Behaviour of Interturn Fault in PowerTransformer Winding using High Frequency Components of Discrete Wavelet Transform”. 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), Sapporo, Japan, October 2012.

**Jittiphong Klomjit, Atthapol Ngaopitakkul, Chaiyan Jettanasen, Chaichan Pothisarn, and Surakit Thongsuk** “Discriminating Between External Short Circuit and Internal Winding Fault in Power Transformer Using RBF Neural Network” Proceeding of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems (AsiaPES 2013), Phuket, Thailand, April 2013

**Jittiphong Klomjit, Atthapol Ngaopitakkul, and Surakit Thongsuk** “Selection of Proper Non-linear Kernel Parameter in Support Vector Machine Algorithm for Classifying the Internal Fault Type in Winding Power Transformer” Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014 (ICISIP 2014), Kitakyushu, Japan, September 2014

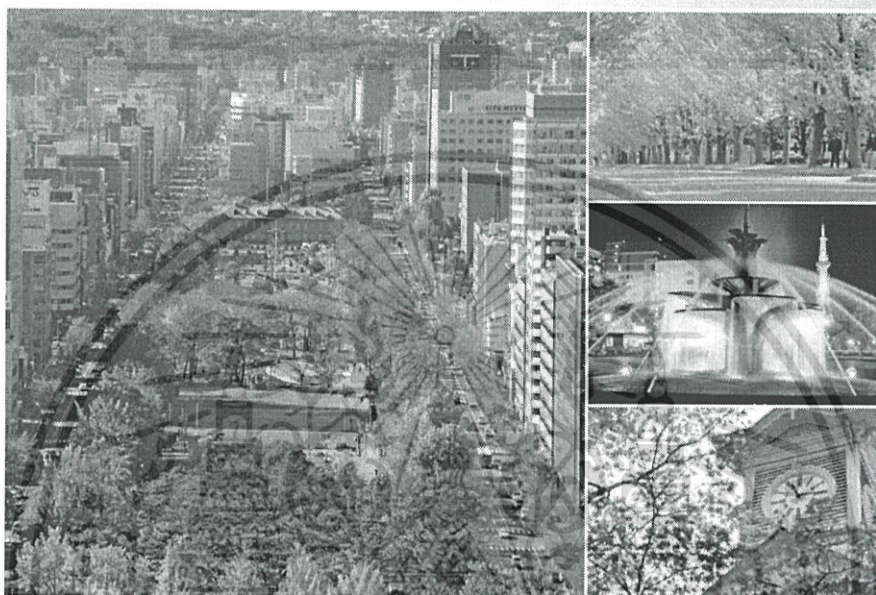




# ICEMS 2012

Proceedings

The 15th International Conference  
on Electrical Machines and Systems



October 21-24, 2012 · Hokkaido Citizens Actives Center, Sapporo, Japan

ISBN 978-4-88686-077-4

IEEE Catalog Number CFP12801-CDR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Behaviour of Interturn Fault in Power Transformer Winding using High Frequency Components of Discrete Wavelet Transform

Jittiphong Klomjit <sup>1\*</sup>, Atthapol Ngaopitakkul <sup>1\*</sup>

\* Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand E-mail: knatthap@kmitl.ac.th

**Abstract**— Behaviour of interturn winding fault signals in a three-phase two-winding transformer with delta connected primary and wye connected secondary, using high frequency components of DWT is proposed in this paper. The mother wavelet daubechies4 (db4) is employed to decompose high frequency components from signals. Various case studies have been done including the variation of fault inception angles, fault types, and fault locations. The result will be useful in the development of a fault detecting scheme for power transformer in the future.

**Index Terms**—Discrete Wavelet Transform, EMTP, Interturn Fault, Power Transformer.

## I. INTRODUCTION

To guarantee safety and stability of power grid operating, a precise protection scheme is required. The differential relaying principle is used for protection of medium and large power transformers. In the past decade, the advance of signal processing technologies and the development of fault diagnosis for the power transformer have been progressed as well as several transformer models and decision algorithms have been proposed. However, the transformer models on EMTP, proposed by Bastard et al [3], are employed in several research works. In previous research works [5], in order to discriminate between external fault and internal fault in power transformer with wye-wye connection, fault behavior and variation of coefficient detail obtained from DWT have been proposed before performing decision algorithm so the comparisons of the coefficients of DWT decision algorithm can give more satisfactory results for separation between internal fault and external fault but case studies were verified with power transformer which is connected with wye-wye.

In fact, power transformer which is connected with delta-wye is widely employed more than power transformer which is connected with wye-wye in power system due that the delta-wye connections have fewer objectionable features than any other connections. In general, these combine most of the advantages of the wye-wye and delta-delta connections. Since interturn fault is internal fault that occurs at transformer both in

delta connected and in wye connected, it is necessary to understand fault behaviour and variation of coefficient detail obtained from DWT before performing decision algorithm. As a result, this paper focuses on behaviour of interturn fault in a three-phase two-winding transformer, with delta connected primary and wye connected secondary. High frequency component obtained from discrete wavelet transform (DWT) is investigated. The scheme under investigations is a part of Thailand electricity transmission and distribution system. In addition, the transformer model with the stray capacitances is used.

## II. POWER SYSTEM SIMULATION USING EMTP

To study internal faults of the transformer, Bastard et al [13] proposed modification of the BCTRAN subroutine. Normally, the BCTRAN uses a matrix of inductances with a size of 6x6 to represent a transformer, but with the internal fault conditions, the matrix is adjusted to be a size of 8x8 for interturn faults. However, the effects of high frequency components which may occur during the faults are not included in such a model. In this paper, the combination between the transformer models proposed by Bastard et al [13] and the high frequency model including capacitances of the transformer recommended by IEEE working group [14] is used for simulations of internal faults occurred on the transformer windings.

The process for simulating internal faults based on the BCTRAN routine of EMTP can be summarized as follows:

1<sup>st</sup> step: Compute matrices  $[R]$  and  $[L]$  of the power transformer from manufacture test data [12] without considering the winding to ground faults [13].

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & R_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & \cdots & L_{16} \\ L_{21} & L_2 & \cdots & L_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{61} & L_{62} & \cdots & L_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

This work is partially supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund. The authors would like to thank for this financial support.

2<sup>nd</sup> step: Modify Equations 1 and 2 to obtain the new internal winding fault matrices  $[R]^*$  and  $[L]^*$  as illustrated in Equations 3-4 [13].

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{a2} & M_{a3} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} & M_{b2} & M_{b3} & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c & M_{c2} & M_{c3} & M_{c4} & M_{c5} & M_{c6} \\ M_{2a} & M_{2b} & M_{2c} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{3a} & M_{3b} & M_{3c} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{4a} & M_{4b} & M_{4c} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{5a} & M_{5b} & M_{5c} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{6a} & M_{6b} & M_{6c} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3<sup>rd</sup> step: The inter-winding capacitances and earth capacitances of the HV and LV windings can be simulated by adding lumped capacitances connected to the terminals of the transformer.

The scheme under investigations is a part of Thailand electricity transmission and distribution system as depicted in Figure 1 and Figure 2. A 50 MVA, 115/23 kV three-phase two-winding transformer was employed in simulations with all parameters and configuration provided by a manufacturer [15].

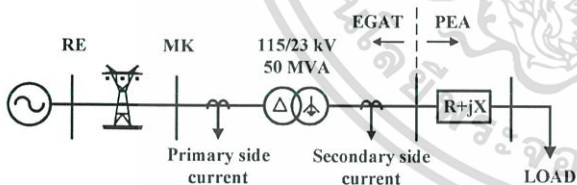


Figure 1. The system used in simulations studies [16].

It can be seen that the transformer which is a step down transformer is connected between two subtransmission sections. To implement the transformer model, simulations were performed with various changes in system parameters as follows:

- The angles on phase A voltage waveform for the instants of fault inception were  $0^\circ$ - $330^\circ$  (each step is  $30^\circ$ ).
- For the interturn faults, the position of point  $Z_{AF}$  on the transformer winding, as shown in Figure 3, is varied at the length of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, and 80% measured from the line end of the windings.
- For the interturn faults, the position of point  $Z_{INF}$  on the transformer winding, as shown in Figure 3, is varied at the length of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%,

and 80% measured from the line end of the windings.

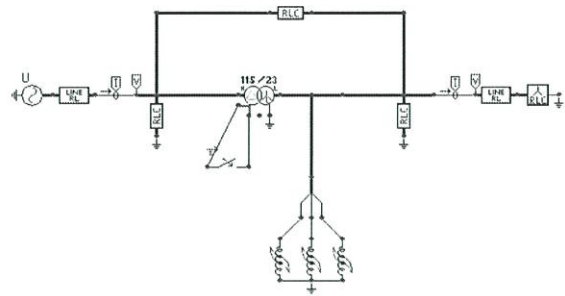


Figure 2. Internal fault model implemented in ATP/EMTP

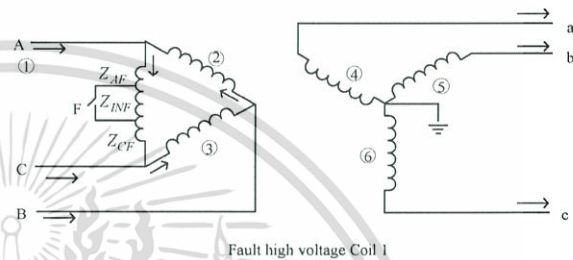


Figure 3. The modification on ATP/EMTP model for a three-phase transformer with winding to ground faults.

The primary and secondary current waveforms, then, can be simulated using ATP/EMTP, and these waveforms are interfaced to MATLAB/Simulink for a construction of fault diagnosis process. The fault signal in each phase is obtained from primary and secondary current of transformer as illustrated in Figure 4. The primary and secondary current waveforms obtained when interturn phase A fault between 10% and 20% of high voltage winding length are shown in Figure 4(a) whereas case of interturn phase A fault between 10% and 20% of low voltage winding length is shown in Figure 4(b).

### III. FAULT BEHAVIOR OF COEFFICIENT DETAIL

As a mention, the differential protection is aimed at detecting internal faults in power transformer but internal fault is fault that occurs at transformer both in high voltage winding and in low voltage winding. Therefore, it is necessary to understand fault behaviour and variation of coefficient detail obtained from DWT before doing decision algorithm.

With fault signals obtained from the simulations, the differential currents, which are a deduction between the primary current and the secondary current in all three phases as well as the zero sequence, are calculated, and the resulted current signals are extracted using the DWT. The mother wavelet daubechies4 (db4) [12] is employed to decompose high frequency components from signals. The coefficients of the signals obtained from the DWT are squared for a more explicit comparison.

After applying the DWT, an example of an extraction using DWT for the differential currents and zero sequence current from scale1 to scale 5 for a case of

interturn fault is illustrated in Figure 5. A case of interturn phase A fault between 10% and 20% in length of the high voltage winding is illustrated in Figure 5(a)

while an example of a case of interturn phase A fault between 10% and 20% in length of the low voltage winding is illustrated in Figure 5(b).

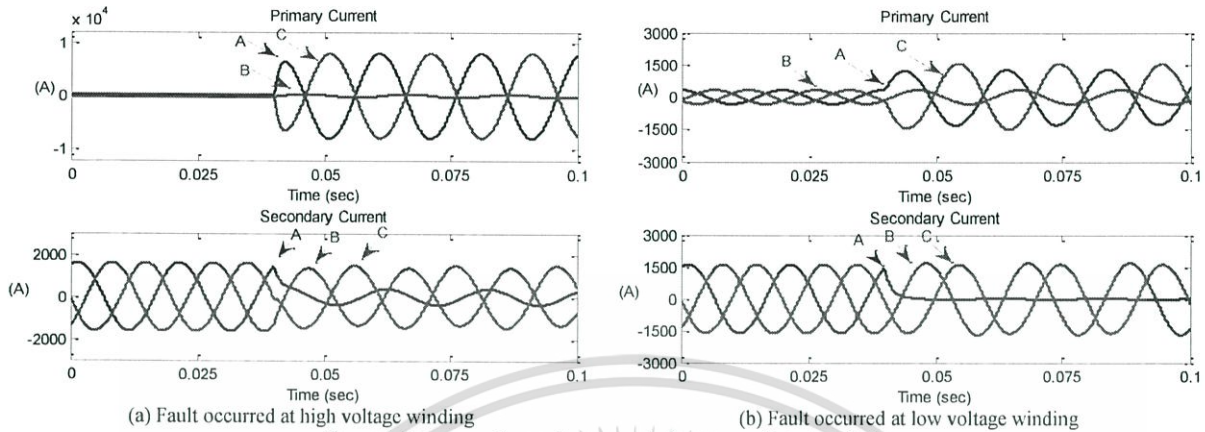


Figure 4. Primary and secondary currents for a case of interturn fault

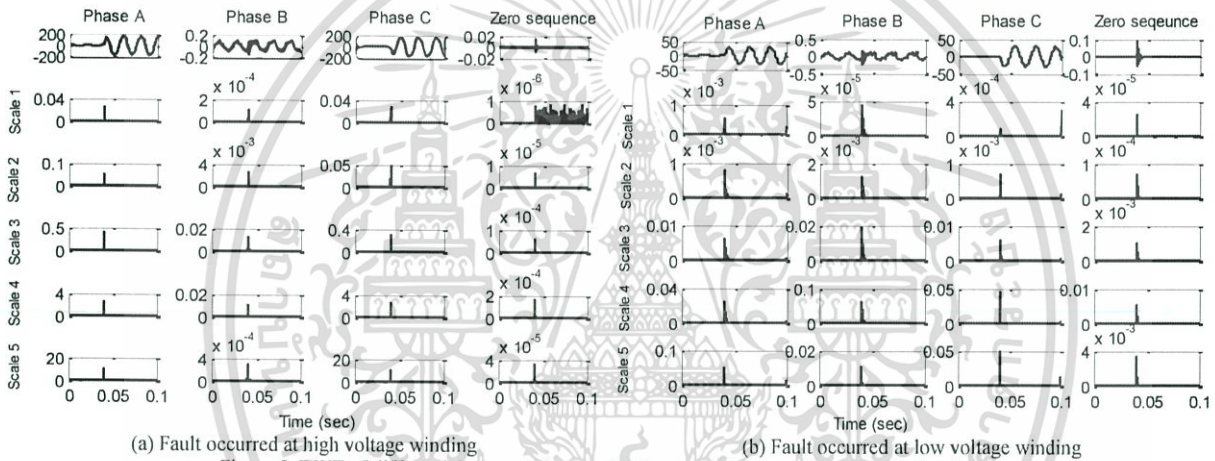


Figure 5. DWT of differential currents from scale 1 to scale 5 in case of internal winding fault.

Table 1. Comparison of variations of coefficient detail in scale 1 for a case of interturn phase A fault at various fault positions of the subcoil  $Z_{INF}$  winding.

coefficients of high frequency components of differential current		Interturn fault at Inception angle of 120 degree							
		high voltage winding (Coil 1)				low voltage winding (Coil 4)			
		10-20	10-40	10-60	10-80	10-20	10-40	10-60	10-80
Phase A	previous-fault	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07
	post-fault	2.5000E-02	2.5700E-02	2.6000E-02	2.6100E-02	5.3151E-04	5.3184E-04	5.3201E-04	5.3238E-04
Phase B	previous-fault	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07
	post-fault	1.0305E-04	1.4820E-04	1.6409E-04	4.4197E-04	4.3778E-05	4.3600E-05	4.3641E-05	4.3600E-05
Phase C	previous-fault	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07
	post-fault	2.7400E-02	2.8200E-02	2.8500E-02	2.8600E-02	8.4595E-05	8.4583E-05	8.4635E-05	8.4635E-05
Zero Sequence	previous-fault	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08
	post-fault	8.3041E-07	1.8011E-06	2.1829E-06	1.1022E-05	2.4871E-05	2.4921E-05	2.4927E-05	2.4973E-05

From Table 1 and Figure 5(a), it can be concluded as follows:

1. After applying the DWT, when considering the coil that fault occurs, it can be seen that the coefficient detail of phase A has similar value with phase C due to the fact that fault occurs at coil 1 which was connected as delta. In addition, in previous fault condition, coefficient detail of all-phase has value less than  $10^{-06}$  while coefficient detail in post fault condition is more

significant when comparison with coefficient detail in previous fault condition as illustrated in Table 1.

2. When considering the coil that fault does not occur, coefficient detail of phase B in previous fault condition has value less than  $10^{-06}$ ; this is the same as coil that fault occurs. Similarly, coefficient detail in post fault condition increases when fault occurs. However, coefficient of coil that fault does not occur has value less than

around 100 times when comparison with coefficient of coil that fault occurs as illustrated in Table 1.

- When considering the zero sequence differential current, it is found that the coefficient detail of zero sequence differential current is very small, and can be treated as zero, as illustrated in Table 1. It is noted that the zero sequence has the same behavior as coil that fault does not occurs but coefficient of zero sequence has value less than around 10 times.

From Table 1 and Figure 5(b), it can be concluded as follows:

- When considering the coil that fault occurs, it can be seen that coefficient detail of phase A, in previous fault condition, has value less than  $10^{-06}$  while coefficient detail, in post fault condition, is more significant in comparison to coefficient detail in previous fault condition and has value more than other phase. It is noticed that coefficient of coil that fault occurs at low voltage winding has value less than coefficient of coil that fault occurs at high voltage winding.
- When considering the coil that fault does not occur, it can be seen that coefficient detail of phase B and

C, in previous fault condition and post fault condition, has the same variations as high voltage winding. In addition, coefficient of coil that fault does not occur has value less than around 10 times when comparison with coefficient of coil that fault occurs as illustrated in Table 1.

- When considering the zero sequence difference current, it is noted that coefficient detail of zero sequence different current has the same behavior as coil that fault occurs due that low voltage winding is a wye connected. In addition, coefficient of zero sequence has value less than around 10 times.

When position of fault in subcoil  $Z_{INF}$  winding transformer was varied and inception angles did not change, it was found that coefficient detail of coil that fault occurred increased with increasing distance fault between two turns when the position of the second defective turn moved on winding as illustrated in Figure 6. On the other hand, when position of fault in winding transformer of subcoil  $Z_{AF}$  was varied and inception angles including subcoil  $Z_{INF}$  did not change. It was found that coefficient detail of coil that fault occurred has nearby value when the position of the first defective turn moved on winding as illustrated in Figure 7.

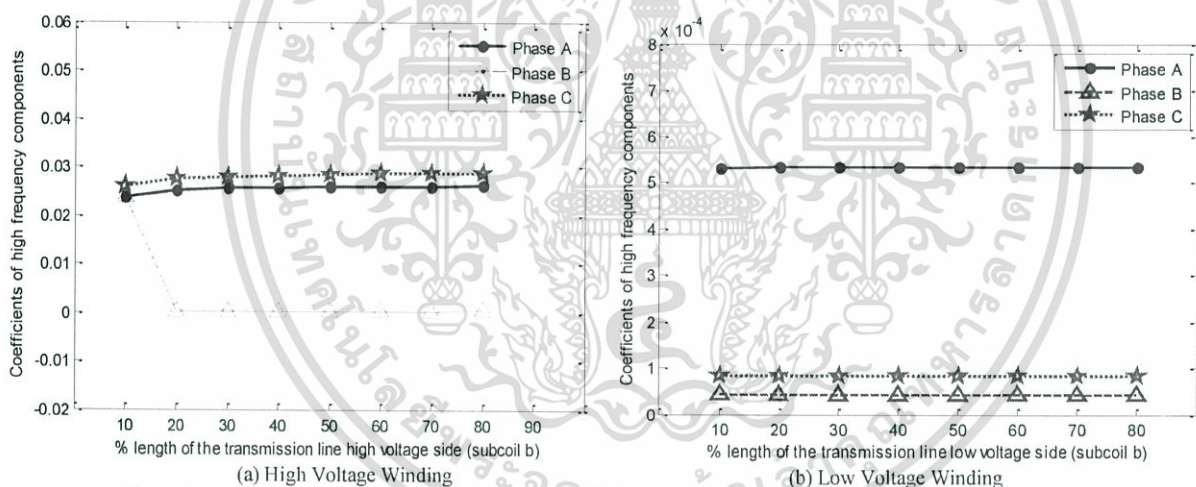


Figure 6. The variations of coefficients detail of differential currents phase A at various lengths of the subcoil b winding.

Table 2. Comparison of variations of coefficient detail in scale I for a case of interturn phase A fault at various fault positions of the winding of subcoil  $Z_{AF}$ .

coefficients of high frequency components of different current		Internal winding fault at Inception angle of 120 degree							
		high voltage winding (Coil 1)				low voltage winding (Coil 4)			
		20-10	40-10	60-10	80-10	20-10	40-10	60-10	80-10
Phase A	previous-fault	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07	1.5243E-07
	post-fault	2.3600E-02	2.3600E-02	2.3600E-02	2.3600E-02	5.2978E-04	5.2990E-04	5.2990E-04	5.2978E-04
Phase B	previous-fault	1.0790E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07	1.0624E-07
	post-fault	2.3700E-02	2.3700E-02	2.3700E-02	2.3700E-02	4.4145E-05	4.4145E-05	4.4145E-05	4.4145E-05
Phase C	previous-fault	1.8283E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07	1.2434E-07
	post-fault	2.5900E-02	2.5900E-02	2.5900E-02	2.5900E-02	8.4632E-05	8.4682E-05	8.4682E-05	8.4632E-05
Zero Sequence	previous-fault	1.4190E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8475E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08	1.8547E-08
	post-fault	7.7306E-04	7.6927E-04	7.7112E-04	7.6927E-04	2.5105E-05	2.5105E-05	2.5105E-05	2.5105E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

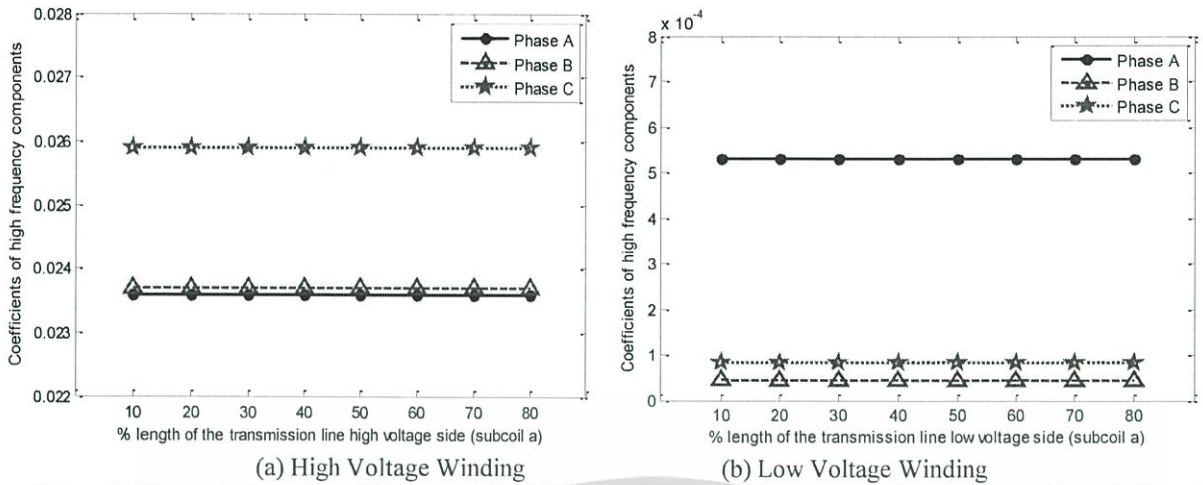


Figure 7. The variations of coefficients detail of differential currents phase A at various lengths of the winding of subcoil a.

Table 3. Comparison of variations of coefficient detail in scale 1 at various inception angles for a case of interturn phase A fault between 10% and 20% in length of the winding.

coefficients of high frequency components of different current		Internal winding fault at Inception angle of 120 degree							
		high voltage winding (Coil 1)				low voltage winding (Coil 4)			
		90	120	150	180	90	120	150	180
Phase A	previous-fault	8.0740E-08	1.5243E-07	1.1854E-07	7.1461E-08	8.0740E-08	1.5243E-07	1.1854E-07	7.1461E-08
	post-fault	1.8800E-02	2.5000E-02	1.8700E-02	6.2000E-03	3.4628E-04	5.3151E-04	4.4832E-04	1.8237E-04
Phase B	previous-fault	1.5948E-07	1.0624E-07	6.3366E-08	1.3539E-07	1.5948E-07	1.0624E-07	6.3366E-08	1.3470E-07
	post-fault	4.5335E-05	1.0305E-04	3.8179E-05	1.7551E-05	3.0042E-05	4.3778E-05	4.0420E-05	1.6783E-05
Phase C	previous-fault	7.7707E-08	1.2434E-07	8.2381E-08	2.0084E-07	7.7707E-08	1.2434E-07	8.2381E-08	2.0084E-07
	post-fault	2.0600E-02	2.7400E-02	2.0400E-02	6.8000E-03	5.5097E-05	8.4595E-05	6.9088E-05	2.9403E-05
Zero Sequence	previous-fault	1.4903E-08	1.8547E-08	1.5252E-08	2.2309E-08	1.4903E-08	1.8547E-08	1.5252E-08	2.2309E-08
	post-fault	7.2047E-07	8.3041E-07	7.7446E-07	7.9845E-07	1.6529E-05	2.4871E-05	2.1343E-05	8.3784E-06

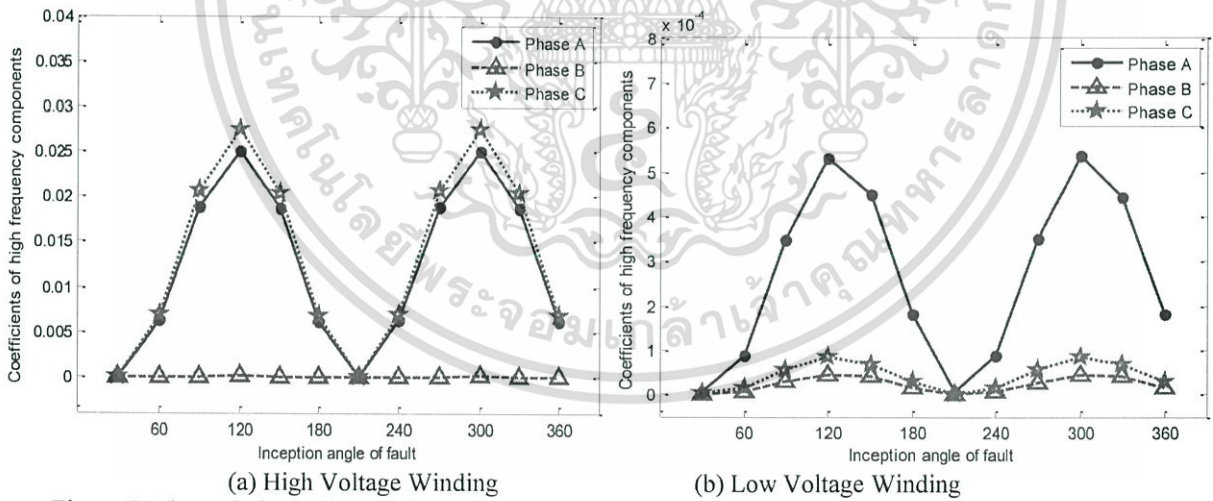


Figure 8. The variations of coefficients detail of differential currents phase A at various inception angles.

In addition, when inception angles of fault in winding transformer was varied and fault point did not change, it was found that coefficient detail of all phases as well as zero sequence different current had variation just as sine waveform, as illustrated in Table 3 and Figure 8. It was noticed that when inception angles increased more than 180 degrees but coefficient detail obtained from DWT is positive value due to it was squared.

IV. CONCLUSIONS

This paper presented behaviour of interturn fault signals in a three-phase two-winding transformer, with delta connected primary and wye connected secondary, using high frequency components of DWT. In addition, the transformer model with the stray capacitances is used so that internal fault signals with high frequency components can be obtained. The current waveforms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

obtained from simulation are extracted to several scales with the DWT. Various case studies have been carried out including the variation of fault inception angles, fault types, and fault locations. The result can be concluded as follows:

- In case of fault occurring at delta connected, coefficient detail of only two phases is fairly large, but in terms of zero sequence, the coefficient detail of the zero sequence is treated as zero.
- In case of fault occurring at wye connected, coefficient detail of only one phase is fairly large, and has value more than other phase. When considering the zero sequence, the coefficient detail of the zero sequence can be detected with the higher amplitude.

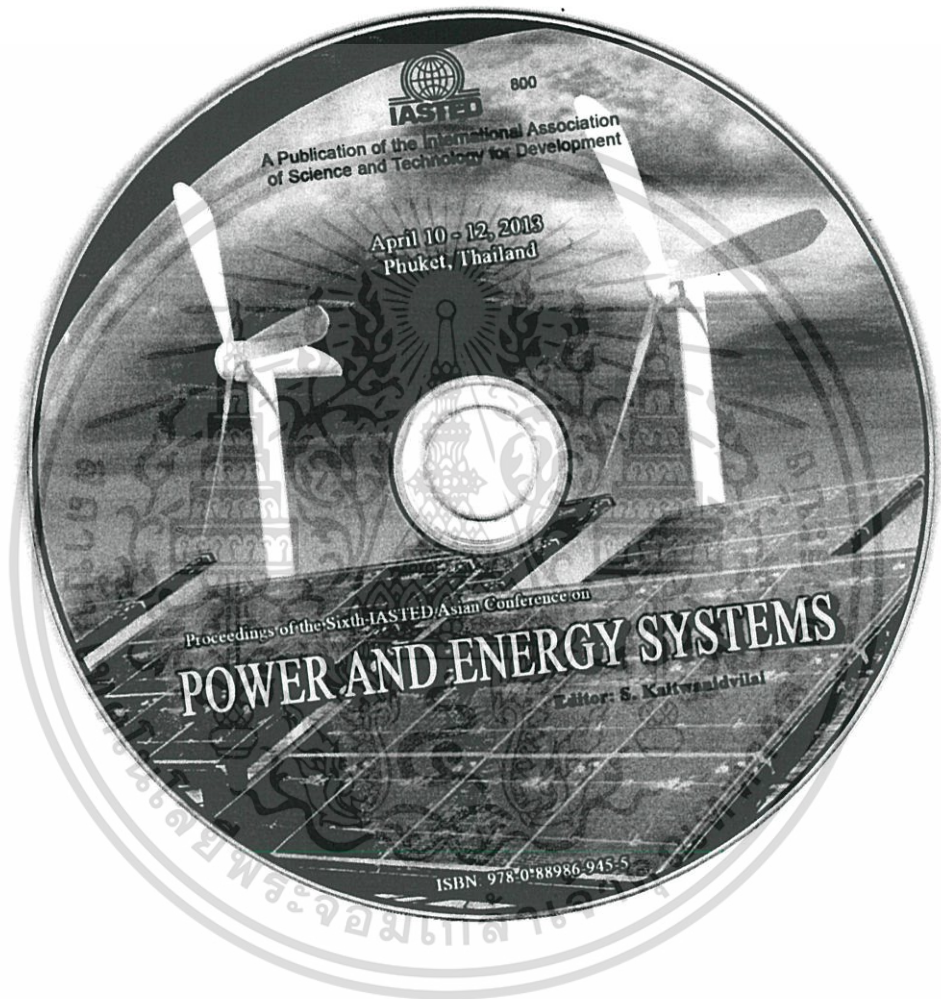
The results obtained from the analysis will be useful in the development of a fault detection scheme for power transformer in the future.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work is partially supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund. The authors would like to thank for this financial support. The authors would like also to gratefully acknowledge the helpful comments and suggestions of the reviewers, which have improved the presentation.

#### REFERENCES

- [1] Sy-Ruen Huang, Hong-Tai Chen, Chueh-Cheng Wu, Chau-Yu Guan, and Chiang Cheng, "Distinguishing Internal Winding Faults From Inrush Current in Power Transformers Using Jiles-Atherton Model Parameters Based on Correlation Coefficient", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.27, No.2, pp. 548-553, April 2012.
- [2] Y. C. Kang, B. E. Lee, T. Y. Zheng, Y. H. Kim, and P. A. Crossley, "Protection, faulted phase and winding identification for the three-winding transformer using the increments of flux linkages", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol.4, No.9, pp. 1060-1068, 2010.
- [3] Z. Lu, W. H. Tang, T. Y. Ji, and Q. H. Wu, "A Morphological Scheme for Inrush Identification in Transformer Protection", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.24, No.2, pp. 560-568, April 2009.
- [4] Jing Ma, Zengping Wang, Qixun Yang, and Yilu Liu, "Identifying Transformer Inrush Current Based on Normalized Grille Curve", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.26, No.2, pp. 588-595, April 2011.
- [5] Lin, Jingguang Huang, Linjun Zeng and Z.Q. Bo, Analysis of Electromagnetic Transient and Adaptability of Second-Harmonic Restraint Based Differential Protection of UHV Power Transformer, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, pp. 2299-2307, 2010.
- [6] Saleh A. Saleh, Benjamin Scaplen, and M. Azizur Rahman, "A New Implementation Method of Wavelet Packet Transform Differential Protection for Power Transformers", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.47, No.2, pp. 1003-1012, 2011.
- [7] G. Mokryani, M. R. Haghifam, H. Latafat, P. Aliparast, and A. Abdollahy, "Detection of inrush current based on wavelet transform and LVQ neural network", *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2010*, pp. 1-5, 2010.
- [8] A. Kunakorn, Applications of discrete wavelet transform for transformer inrush current detection in protective control scheme, IEEE International Symposium on Communications and Information Technology, Vol.2, 2004, pp871-874.
- [9] A. Ngaopitakkul, A. Kunakorn and I. Ngamroo, Discrimination between External Short Circuits and Internal Faults in Transformer Windings using Discrete Wavelet Transforms, IEEE Industries Application Society Annual Conference 40<sup>th</sup>, Hongkong, 2005, pp. 448-452.
- [10] C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, The spectrum comparison technique of DWT for discrimination between external fault and internal faults in Power Transformer, 17<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011), Hongkong, July 2011, pp. 1-4.
- [11] P. Bastard, P. Bertrand and M. Meunier, "A transformer model for winding fault studies," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, pp. 690-699, 1994.
- [12] IEEE working group 15.08.09, *Modeling and analysis of system transients using digital programs*, (IEEE PES special publication)
- [13] ABB Thailand, Test report no. 56039.
- [14] *Switching and Transmission Line Diagram* Electricity Generation Authorisation Thailand, 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DISCRIMINATING BETWEEN EXTERNAL SHORT CIRCUIT AND INTERNAL WINDING FAULT IN POWER TRANSFORMER USING RBF NEURAL NETWORKS

Jittiphong Klomjit<sup>1</sup>, Atthapol Ngaopitakkul<sup>1</sup>, Chaiyan Jettanasen<sup>1</sup>, Chaichan Pothisarn<sup>1</sup>, and Surakit Thongsuk<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. (e-mail: [knatthap@kmitl.ac.th](mailto:knatthap@kmitl.ac.th))  
<sup>2</sup> Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanarindra University, Chachengsao 24000, Thailand. (e-mail: [t\\_surakit@hotmail.com](mailto:t_surakit@hotmail.com))

### ABSTRACT

In the literature for fault detection, several decision algorithms have been developed to be employed in the protective relay. In previous research works, the behaviour analysis of signals is performed using DWT. The results obtained from the analysis will be useful in the development of a detected fault scheme for power transformer in this paper. This paper proposes an algorithm based on a combination of discrete wavelet transform (DWT) and radial basis function neural network (RBFNN) for discriminating between external fault and internal winding fault of three-phase two-winding transformer. The DWT is employed for extracting the high frequency component contained in the post-fault differential current waveforms, and the coefficients of the first scale from the DWT that can detect fault are investigated as an input for the training pattern. Various cases studies based on Thailand electricity transmission and distribution systems have been investigated so that the algorithm can be implemented. Results show that the proposed technique is highly satisfactory.

### KEY WORDS

Transformer, RBF Neural Network, Winding Fault, Short Circuit

### 1. Introduction

To guarantee safety and stability of power grid operating, a precise protection scheme is required. In the literature for fault detection, several decision algorithms have been developed to be employed in the protective relay for preventing maloperation of the protective equipment under different nonfault conditions, including magnetizing inrush current, ratio mismatch, through-fault current line, etc. Most of them have different solutions and techniques [1-10].

This paper is interested in the decision algorithm for detecting and discriminating between internal fault and external fault for power transformer. A decision algorithm is based on discrete wavelet transform (DWT) and radial basis function (RBF) neural networks as an alternative or improvement to the existing protective relaying functions. The DWT is employed in extracting the high frequency component contained in the fault currents. In previous research works [10], the behaviour analysis of signals is performed using DWT. The variation of high frequency components of differential current signals is presented in [10]. The result can be concluded that coefficient detail in post fault condition is more important when comparison with coefficient detail in previous fault condition. A case of internal fault has behaviour similar to a case of external fault but coefficient values are explicitly distinguished. The results obtained from the analysis will be useful in the development of a detected fault scheme for power transformer in this paper, and the coefficients of the first scale from the DWT that can detect fault are investigated. In recent years, there are many types of artificial neural networks, only a few of these neuron-based structures, are being used commercially. Back-propagation neural network is the most well known and widely applied of the neural networks today. However, back-propagation neural network is limited partly by the slow training performance. It should be improved this drawback of back-propagation neural network, or the other types of neural networks should be developed instead. Radial basis function (RBF) neural network is the most commonly-used types of feed-forward network as well as the back-propagation neural network. The simulations, analysis, and diagnosis are performed using ATP/EMTP and MATLAB on a PC Pentium IV 2.2 GHz 3GB. The construction of the decision algorithm is detailed and implemented with various case studies based on Thailand electricity transmission and distribution systems.

## 2. Power System Simulation

The ATP/EMTP program was employed to simulate the transients of fault signals, at a sampling rate of 200 kHz. For a computational model of a two-winding three-phase transformer having primary and secondary windings in each phase, BCTRAN is a well-known subroutine on ATP/EMTP. A 50 MVA, 115/23 kV two-winding three-phase transformer was employed in simulations with all parameters and configuration provided by a manufacturer [11]. The scheme under investigations is a part of Thailand electricity transmission and distribution system as depicted in Fig. 1. It can be seen that the transformer as a step down transformer is connected between two subtransmission sections. To implement the transformer model, simulations were performed with various changes in system parameters as follows:

- The angles on phase A voltage waveform for the instants of fault inception were  $0^{\circ}$ - $330^{\circ}$  (each step is  $30^{\circ}$ ).
- Internal faults type at the transformer windings (both primary and secondary) which is winding to ground faults was investigated.
- The fault position designated on any phases of the transformer windings (both primary and secondary) was varied at the length of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, and 90% measured from the line end of the windings.
- Fault resistance was  $5 \Omega$ .

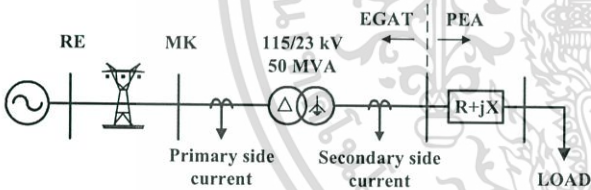


Fig. 1. The system used in simulations studies [12].

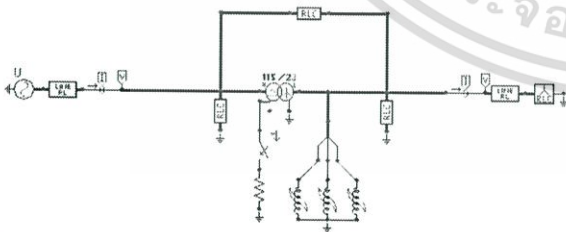


Fig. 2. Internal fault model implemented in ATP/EMTP

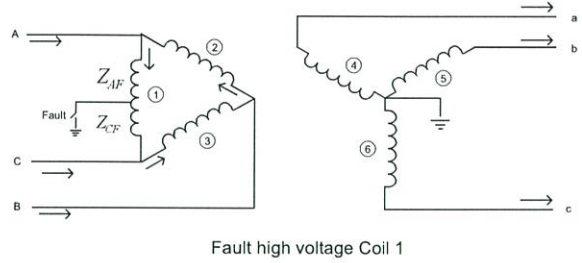


Fig. 3. The modification on ATP/EMTP model for a three-phase transformer with winding to ground faults.

For simulations of external short circuit occurring at the transmission lines at both sides of the transformer, case studies were varied as follows:

- The angles on phase A voltage waveform for the faults were  $30^{\circ}$  and  $210^{\circ}$ .
- Types of faults were single line to ground, double lines to ground, line to line and three-phase faults (AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA, ABC).
- The fault locations on the transmission lines were at the length of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90%.
- Fault resistance was  $5 \Omega$ .

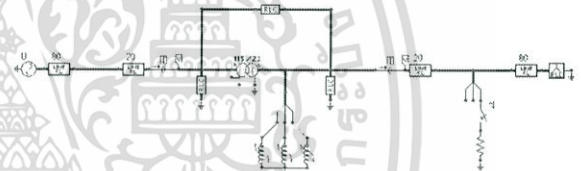


Fig. 4. Components of a proposed simulation model in case of external short circuit.

The primary and secondary current waveforms, then, can be simulated using ATP/EMTP, and these waveforms are interfaced to MATLAB/Simulink for a construction of fault diagnosis process. The fault signal in each phase is obtained from primary and secondary current of transformer as illustrated in Fig. 5 and Fig. 6. These obtained figures correspond to two zones protection. Fig. 5 is obtained when internal winding fault occurred at high voltage winding while Fig. 6 is obtained when external fault occurred at high voltage winding.

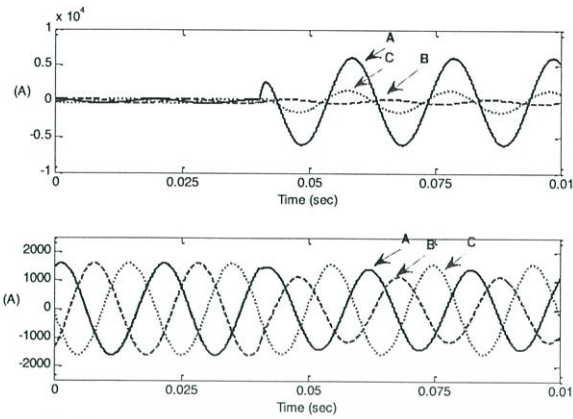


Fig. 5. Primary and secondary currents for a case of internal fault at 20% of length of the high voltage winding.

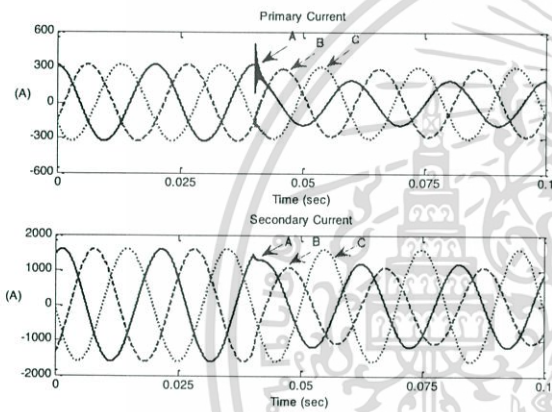


Fig. 6. Primary and secondary currents for a case of external fault at 20% of length of the transmission line high voltage side.

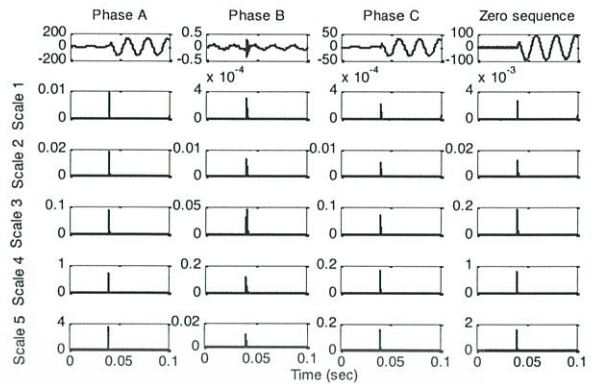


Fig. 7. DWT of differential currents (Winding to ground fault at 20% in length of the high voltage winding)

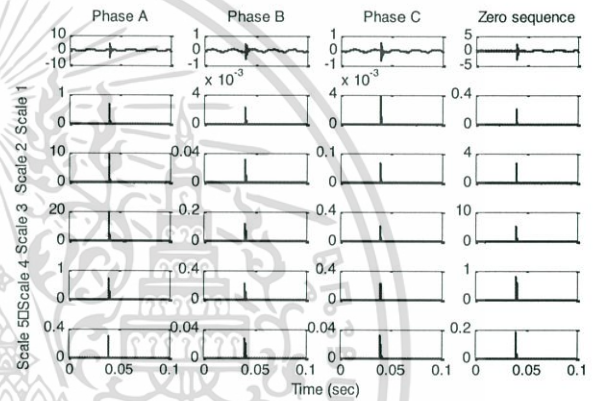


Fig. 8. DWT of differential currents (Phase A to ground fault at 20% in length of the high voltage side)

### 3. Neural Network Decision Algorithm

With fault signals obtained from the simulations, the differential currents, which are a deduction between the primary current and the secondary current in all three phases as well as the zero sequence, are calculated, and the resultant current signals are extracted using the Discrete Wavelet Transform (DWT). The coefficients of the signals obtained from the DWT are squared for a more explicit comparison. Fig. 7. illustrates an example of an extraction using DWT for the differential currents and zero sequence current from scale 1 to scale 5 for a case of winding phase A to ground fault at 20% in length of the high voltage winding while case of phase A to ground fault is at 20% in length of the high voltage side as shown in Fig. 8.

From the simulated signals, DWT is applied to the quarter cycle of differential current waveforms after the fault inception. The comparison of the coefficients from each scale is considered. By performing many simulations, it has been found that when applying the previously detailed algorithm for detecting internal faults at the transformer winding, the coefficient in scale 1 (50-100 kHz) from DWT seems enough to indicate the internal fault inception of the transformer. As a result, it is unnecessary to use other coefficients from higher scales in this algorithm, and the coefficients of scale 1 obtained using the DWT are used for training and test processes of the radial basis function neural network (RBFNN).

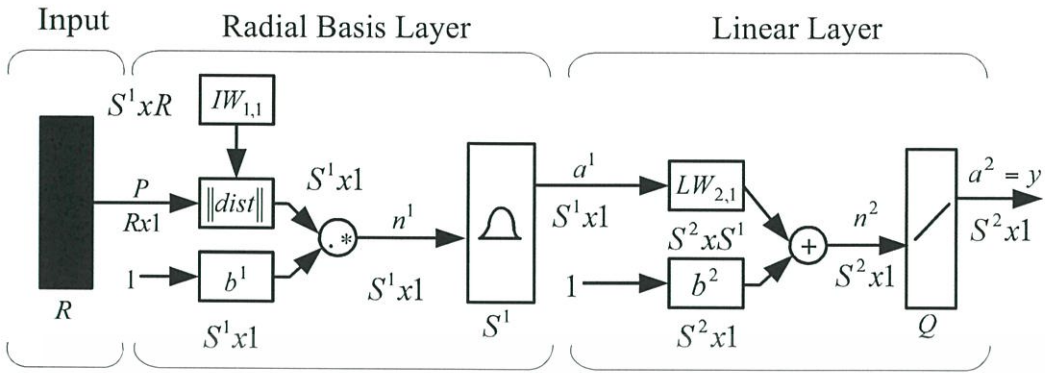


Fig. 9. Radial Basis Function Neural Networks. [13]

A structure of a RBF neural network consists of three layers, which are an input layer, a hidden radial basis layer, and an output linear layer as illustrated in Fig. 9. Each layer is connected with weight and bias while radial basis function and linear function are activation function in hidden radial basis layer and output linear layer respectively. Generally, RBF neural network has only hidden radial basis layer for which the combination function is based on the Euclidean distance between the input vector and the weight vector. The only fundamental difference is the way in which hidden units combine value coming from preceding layers in the network—BP neural network uses inner products, whereas RBF neural network uses Euclidean distance.

Before carrying out the training process, input data sets are normalized and divided into 252 sets for training and 168 sets for validation as shown in Table 1. A structure of the RBF neural network consists of 3 neurons inputs, hidden radial basis layer, and 1 neuron output. In addition, the number of neurons in radial basis layer is always equal to the number of training sets. The inputs patterns are maximum ratio obtained from division algorithm between coefficient from DWT of differential current and zero sequence for post-fault differential current waveforms as shown in Fig. 10. The output variables of the neural networks are designated as either 0 or 1, corresponding to external fault and internal fault. If output value of RBFNN is less than 0.5, external fault does occur; conversely, if this output value of RBFNN is more than 0.5, internal fault does occur.

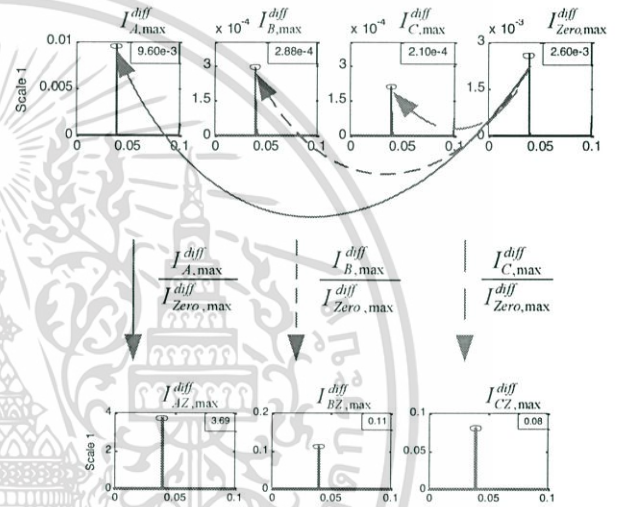


Fig. 10 Result of maximum ratio from the division algorithm proposed in the scale 1.

During training process [31, 35], RBF neural network begins with the random initial weight and bias in all layers. The number of neurons in hidden radial basis layer is equal to the number of iterations. RMS error goal is determined as 0.01 in each iteration while increasing spread in hidden radial basis layer, which corresponds to bias value ( $b = \frac{0.8326}{Spread}$ ) from 0.0001 to 0.004. The

appropriate step of increasing spread is 0.001 in order to compute the minimum value of MAPE. This procedure is repeated until the number of spread is reached, or the MAPE of test set is less than 0.5% then stop training process. The training process can be summarized as a flowchart illustrated in Fig. 11.

Table 1. The number of data for the PNN.

	Number of set	Internal fault		External fault	
		HV	LV	HV	LV
Training	252	81	81	45	45
Validation	168	54	54	30	30
Case Studies	84	27	27	15	15

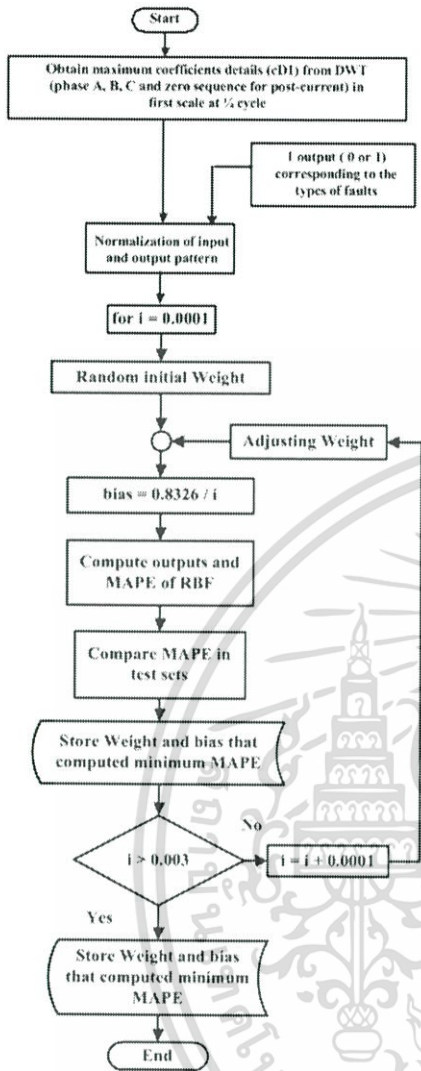


Fig. 11. Flowchart for the training process.

After the training process, the results obtained from the proposed decision algorithm are shown in Table 2 and Table 3. Case studies are varied so that the decision algorithm capability can be verified. The total numbers of the case studies are 54 as shown in Table 1. The results show that the average accuracy of fault detection from the proposed decision algorithm is highly satisfactory.

#### 4. Conclusion

In this paper, a decision algorithm based on discrete wavelet transform (DWT) and radial basis function neural network (RBFNN) for discriminating between external fault and internal fault of the power transformer has been discussed. The fault conditions are simulated using ATP/EMTP. The current waveforms obtained from the simulation, then, are extracted using the DWT. Daubechies4 (db4) was selected as mother wavelet in order to decompose high frequency components from fault signals. The inputs patterns are the maximum ratios obtained from the division algorithm between the coefficients from the DWT of the differential current and the zero sequence for post-fault differential current waveforms. The result is shown that an average accuracy obtained from maximum coefficients details (cD1) from DWT in first scale is more satisfactory with an accuracy of higher than 80% as shown in Table 2 and Table 3. Although the proposed algorithm gives satisfactory results, the overall accuracy indicates that this algorithm requires further improvement so that greater precision can be achieved. However, this technique would be useful in a differential protection scheme for transformers. Future work will be directed towards improving of the algorithm so that a magnetising inrush current in the transformer can be identified.

Table 2. Percentage of average accuracy in case of internal winding fault

coil	Validation Set						Case Studies Set					
	High Voltage Winding			Low Voltage Winding			High Voltage Winding			Low Voltage Winding		
	AC	BA	CB	A	B	C	AC	BA	CB	A	B	C
10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
20%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
30%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
40%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
70%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Average	100%			100%			100%			100%		

Table 3. Percentage of average accuracy in case of external short circuit

distance	Validation Set						Case Studies Set					
	High Voltage Side			Low Voltage Side			High Voltage Side			Low Voltage Side		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
20%	100%	100%	50%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	0%	0%	0%
40%	100%	100%	50%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	0%	0%	0%
50%	100%	100%	50%	0%	0%	0%	100%	0%	100%	0%	0%	0%
60%	100%	100%	50%	0%	0%	0%	100%	0%	100%	0%	0%	0%
80%	100%	100%	50%	0%	0%	0%	100%	0%	100%	0%	0%	0%
Average	83.33%			0%			80%			0%		

## Acknowledgements

This work is partially supported by the National Research Council of Thailand and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund. The authors would like to thank for this financial support. The authors would like also to gratefully acknowledge the helpful comments and suggestions of the reviewers, which have improved the presentation.

## References

- [1] J. F. Chen, T. J. Liang, C. K. Cheng, S. D. Chen, R. L. Lin, and W. H. Yang, "Asymmetrical winding configuration to reduce inrush current with appropriate short circuit current in transformer", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 3, pp. 605–611, May 2005.
- [2] Y. C. Kang, B. E. Lee, T. Y. Zheng, Y. H. Kim, and P. A. Crossley, "Protection, faulted phase and winding identification for the three-winding transformer using the increments of flux linkages", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.4, No.9, pp. 1060-1068, 2010.
- [3] S. A. Saleh and M. A. Rahman, "A New Transient Model for Three-Phase Power Transformers Using a Wavelet Filter Bank," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1409–1414, Apr. 2005.
- [4] Saleh A. Saleh, Benjamin Scaplen, and M. Azizur Rahman, "A New Implementation Method of Wavelet Packet Transform Differential Protection for Power Transformers", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.47, No.2, pp. 1003-1012, 2011.
- [5] A. Ngaopitakkul, A. Kunakorn and I. Ngamroo, "Discrimination between External Short Circuits and Internal Faults in Transformer Windings using Discrete Wavelet Transforms", IEEE Industries Application Society Annual Conference 40<sup>th</sup>, pp. 448-452, 2005.
- [6] C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "The spectrum comparison technique of DWT for discrimination between external fault and internal faults in Power Transformer", 17<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011), pp. 1-4, July 2011.
- [7] Jing Ma, Zengping Wang, Qixum Yang, and Yilu Liu, "A Two Terminal Network-Based Method for Discrimination Between Internal Faults and Inrush Currents," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1599–1605, 2010.
- [8] A. Abu-Siada and Syed Islam, "A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp. 849–857, 2012.
- [9] C. Pothisarn, C. Jettanasen, J. Klomjit and A. Ngaopitakkul, Coefficient Comparison Technique of Discrete Wavelet Transform for Discriminating between External Short Circuit and Internal Winding Fault in Power Transformer, Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012, pp. 1129-1134, 2012.
- [10] C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, Behaviour of Internal Fault and External Fault in Power Transformer using Discrete Wavelet Transform, The 5<sup>th</sup> IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems (AsiaPES2012).
- [11] ABB Thailand, Test report no. 56039.
- [12] Switching and Transmission Line Diagram Electricity Generation Authorisation Thailand, 2002.
- [13] H. Demuth and M. Beale, Neural Network Toolbox User's Guide, The Math Work, Inc., March 2001.

Menu

- Committee
- Keynote Speech
- Time Table
- Program



Proceedings of ICISIP2014 Publisher

Published by



Sponsored by



Supported by



Copyright(c) ICISIP2014 All Rights Reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Selection of Proper Non-linear Kernel Parameter in Support Vector Machine Algorithm for Classifying the Internal Fault Type in Winding Power Transformer

J. Klomjit <sup>a</sup>, S. Thongsuk <sup>b,\*</sup>, and A. Ngaopitakkul <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

<sup>b</sup> Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Chachoengsao, 24000, Thailand

\*Corresponding Author: [t\\_surakit@yahoo.co.th](mailto:t_surakit@yahoo.co.th)

## Abstract

This paper proposes the proper kernel function in a support vector machine (SVM), which is used to classify the internal fault type in power transformer. The Gaussian kernel and polynomial kernel that are two types of non-linear kernel parameter are compared in terms of the average accuracy and time of training process. The results are shown that the polynomial kernel parameter of SVM algorithm is able to classify the internal fault type with satisfactory accuracy, and it takes the average time less than the other. The benefit of using polynomial kernel can be applied for fault diagnosis in future.

**Keywords:** Power Transformer, Support vector machine, Kernel, Discrete Wavelet Transform, Fault.

## 1. Introduction

In recent year, artificial intelligent process has been applied for analyzing complex data. Many literatures have been reviewed for research proposed. Algorithm for fault diagnosis such as neural network <sup>(1-2)</sup>, fuzzy logic <sup>(3-4)</sup>, support vector machine <sup>(5-8)</sup>, and etc. has been used in many researches. These techniques are for achieving high accuracy of fault diagnosis. However, each technique has its own advantage and disadvantage on different types of system <sup>(9-11)</sup>. The feasibility study to apply fault diagnosis technique in practical system must be done to ensure satisfactory performance <sup>(12)</sup>.

One of the algorithms that is widely used for fault classification is support vector machine algorithm. This algorithm can classify non-linear data by using kernel function capable of accommodating complicated data, so

variety of data can be analyzed.

The purpose of this paper is to evaluate effect of kernel function on SVM by comparing two functions between Gaussian and polynomial kernel parameters, which are used to classify the internal fault type in power transformer. The fault conditions are simulated using ATP/EMTP program. The current waveforms obtained from the simulation are extracted using the Discrete Wavelet Transform (DWT). The DWT is usually employed to extract the high frequency component contained in the fault currents, and the DWT coefficients of the first scale that can detect fault are then investigated. The validity of the proposed algorithm is tested against various fault inception angles, fault locations, and faulty phases. The construction of the decision algorithm is detailed and implemented in various case studies that are based on Thailand's electricity transmission and distribution systems.

## 2. Simulation on Power Transformer Winding

For the simulation, the three-phase two-winding transformer 50 MVA, 115/23 kV is employed in simulations with all parameters and configuration provided by a manufacturer. The BCTRAN model based on the test data can be obtained from the transformer manufacturers. The simulations are performed with various changes in system parameters as follows:

- The angles on phase A voltage waveform for the instant of fault inception are 30°.
- Internal fault types at the transformer windings (both primary and secondary) which are winding to ground fault and interturn fault are investigated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ © 2014 The Institute of Industrial Applications Engineers, Japan.

- The fault position designated on any phases of the transformer windings (both primary and secondary), is varied at the length of 10%, 30%, 50%, 70%, and 90% measured from the line end of the windings.
- Fault resistance is  $5 \Omega$ .

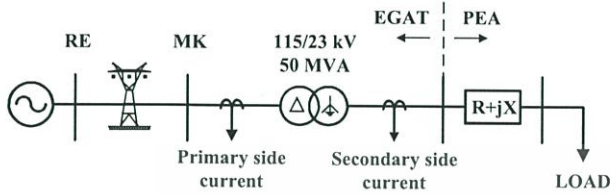


Fig. 1. Scheme under investigation.

### 3. Decision algorithm

The fault signals generated using ATP/EMTP are interfaced to MATLAB for the internal fault classification decision algorithm. The mother wavelet daubechies4 (db4) is employed to decompose the high frequency transient components, which are superimposed in the fault current signals, by DWT using the wavelet toolbox. After applying the DWT, coefficients obtained using DWT of signals are squared so that the abrupt change in the spectra can be clearly found. In previous paper<sup>(13)</sup>, this sudden change is

used as an index for the occurrence of faults.

The internal fault classification decision algorithm is then constructed based on the support vector machine toolboxes in MATLAB. Before the decision algorithm process, support vector machine structure consists of 4 input as shown in Fig. 2. These inputs are the maximum coefficient of DWT at  $\frac{1}{4}$  cycle of phase A, B, C and zero sequence provided to support vector machine model. The obtained values from DWT are normalized to between 0 and 1 for support vector machine process. For the next stage, we identify fault type and phase of internal fault in transformer by 6 models of support vector machine. Each model can identify different faults as show in Table 1. Data mapping is an important part of support vector machine process as shown by flowchart in Fig. 3.

As previously mentioned, the objective of this paper is to evaluate effect of kernel function for the SVM. Non-linear kernel parameter in support vector machine commonly uses the Gaussian kernel or polynomial kernel. Finally, the decision algorithm can be verified with various case studies. There are 108 sets for winding to ground fault and 432 sets for interturn fault. The obtained results from decision algorithm that is employed to classify the internal fault are illustrated in Fig. 4.

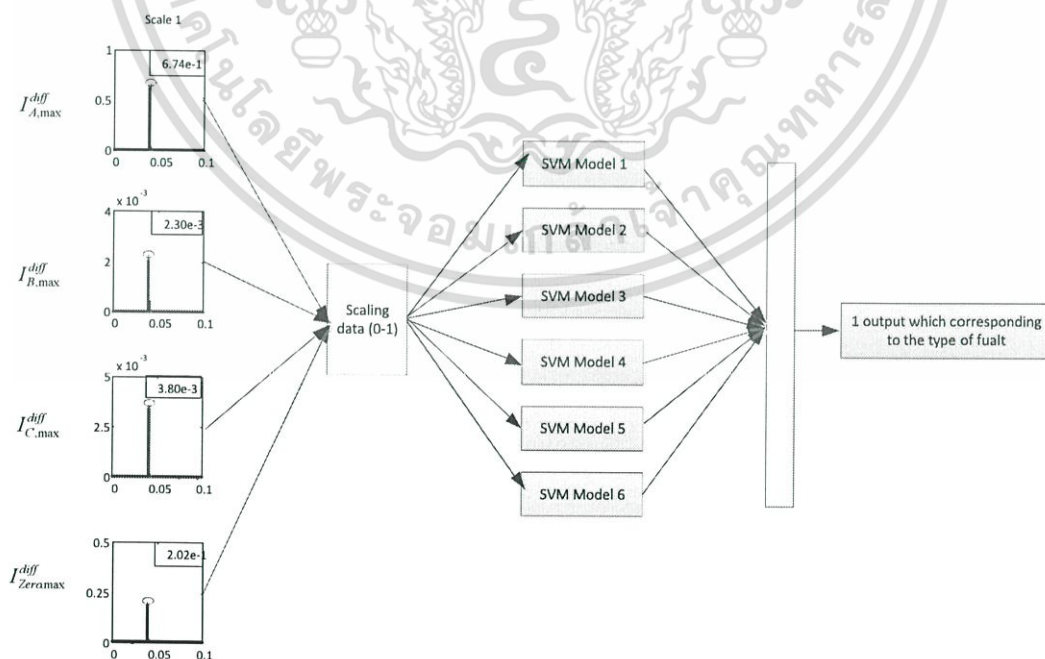


Fig. 2. Support vector machine structure for classifying the internal fault type.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
-ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Output model of support vector machine for fault type identifier.

Models of SVM	Output of SVM	Classification of fault type	Types of fault
1	1	Winding to ground fault at coil 1 (A-C)	WG-1
	2	Winding to ground fault at coil 4 (A)	WG-4
	3	Other fault	N/A
2	4	Winding to ground fault at coil 2 (B-A)	WG-2
	5	Winding to ground fault at coil 5 (B)	WG-5
	6	Other fault	N/A
3	7	Winding to ground fault at coil 3 (C-B)	WG-3
	8	Winding to ground fault at coil 6 (C)	WG-6
	9	Other fault	N/A
4	10	Interturn fault at coil 1 (A-C)	TT-1
	11	Interturn fault at coil 4 (A)	TT-4
	12	Other fault	N/A
5	13	Interturn fault at coil 2 (B-A)	TT-2
	14	Interturn fault at coil 5 (B)	TT-5
	15	Other fault	N/A
6	16	Interturn fault at coil 3 (C-B)	TT-3
	17	Interturn fault at coil 6 (C)	TT-6
	18	Other fault	N/A

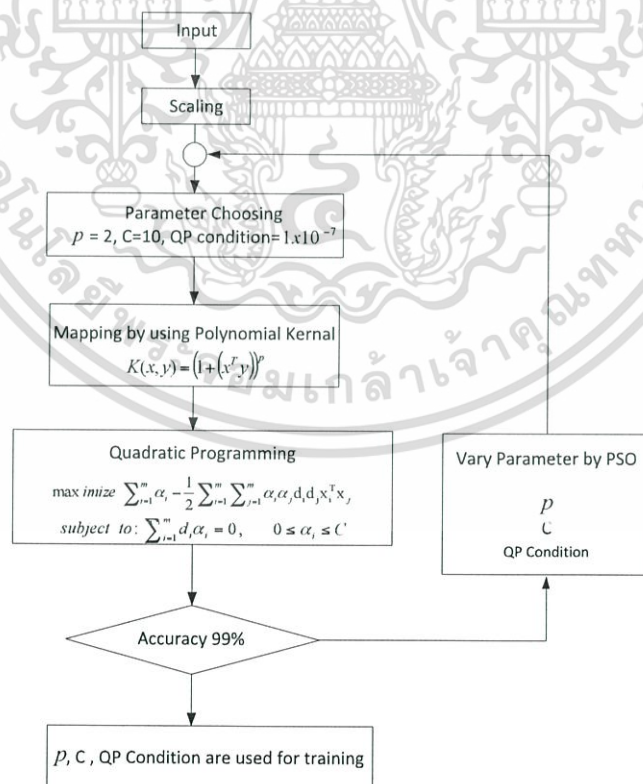
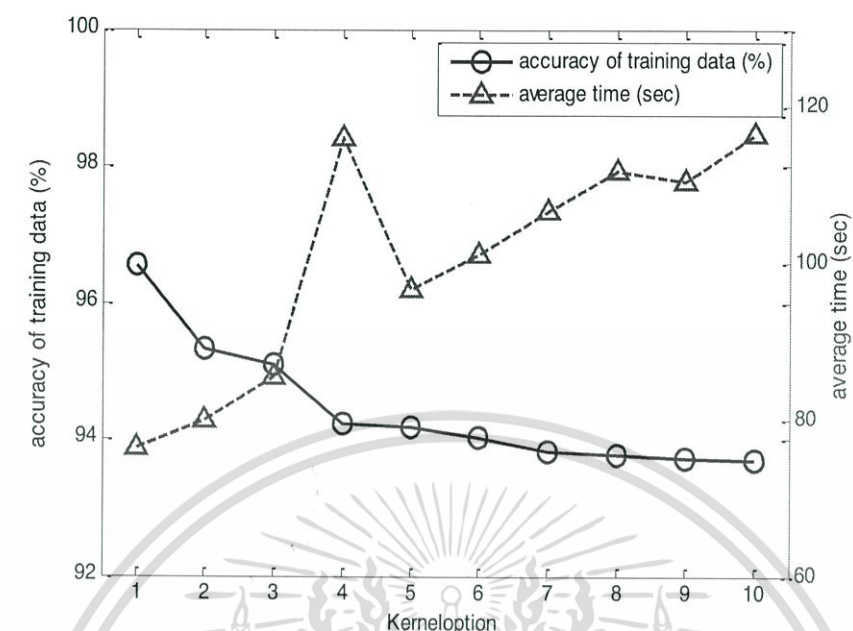
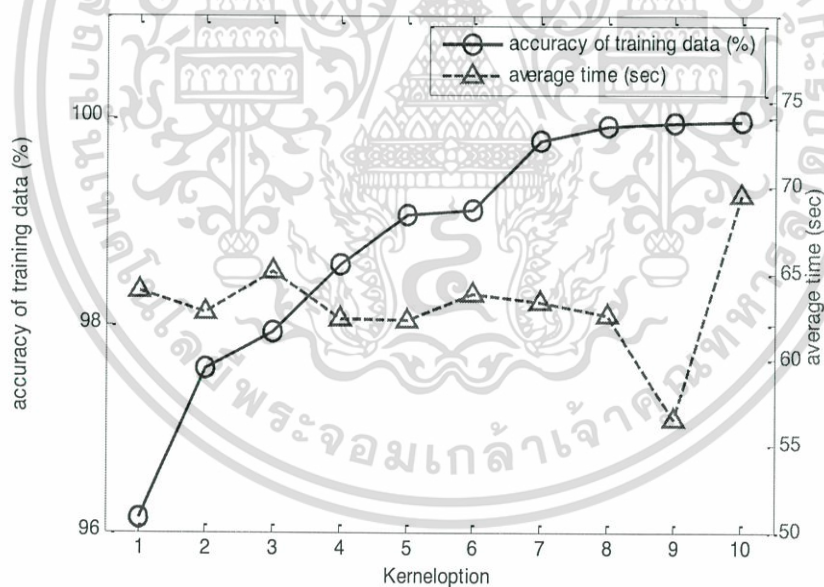


Fig. 3. Flow chart of support vector machine algorithm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Accuracy of Gaussian kernel



(a) Accuracy of polynomial kernel

Fig. 4. Relationship between kernel parameter and Accuracy of training data in fault identifier.

According to the Gaussian kernel parameter used in training process, relation between average accuracy of case studies and training time is shown in Fig. 4(a), it can be observed that, when the Gaussian kernel parameter increases, the average accuracy tends to decrease while the average training time tends to increase.

After the polynomial kernel parameter is used in training process, relation between average accuracy of case studies and training time can be also carried out and shown in Fig. 4(b), it can be observed that, when the polynomial kernel parameter increases, the average accuracy tends to increase while the average training time is slightly changed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. Conclusion

One of parameter that has an effect on accuracy of SVM is kernel parameter. This paper investigated on effect of kernel parameter on performance of support vector machine algorithm by comparing Gaussian and polynomial kernel parameters. The algorithm is provided to set of training data to support vector machine model that can be compared in terms of time and accuracy. The obtained result reveals that polynomial kernel parameter is able to classify the internal fault type with high accuracy and requires less time for processing in comparison to Gaussian kernel parameter. From this result, support vector machine with polynomial kernel parameter can contribute satisfaction accuracy for fault diagnosis in power transformer.

#### Acknowledgment

The authors wish to gratefully acknowledge financial support for this research from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research fund, Thailand. This work is also partially supported by Rajabhat Rajanagarindra University Research fund.

#### References

- (1) Zhenyuan Wang, Yilu Liu, and P.J. Griffin : "Neural net and expert system diagnose transformer faults", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 13, No. 1, pp. 50-55, 2000.
- (2) Ke Meng, Zhao-Yang Dong, Dian-Hui Wang, and Kit-Po Wong : "A Self-Adaptive RBF Neural Network Classifier for Transformer Fault Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 3, pp. 1350-1360, 2010.
- (3) R. Naresh, V. Sharma, and M. Vashisth : "An Integrated Neural Fuzzy Approach for Fault Diagnosis of Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 2017-2024, 2008.
- (4) R.A. Hooshmand, M. Parastegari, and Z. Forghani : "Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 28, No. 5, pp.32-42, 2012.
- (5) A.M. Shah, and B.R. Bhalja : "Discrimination Between Internal Faults and Other Disturbances in Transformer Using the Support Vector Machine-Based Protection Scheme", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 3, pp. 1508-1515, 2013.
- (6) H.B. Zheng, R.J. Liao, S. Grzybowski, and L.J. Yang : "Fault diagnosis of power transformers using multi-class least square support vector machines classifiers with particle swarm optimization", IET Electric Power Applications, Vol. 5, No. 9, pp. 691-696, 2011.
- (7) C. Koley, P. Purkait, and S. Chakravorti : "Wavelet-aided SVM tool for impulse fault identification in transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1283-1290, 2006.
- (8) M. Bigdeli, M. Vakilian, and E. Rahimpour : "Transformer winding faults classification based on transfer function analysis by support vector machine", IET Electric Power Applications, Vol.6, No.5, pp. 268-276, 2012.
- (9) N.G. Chothani, B.R. Bhalja, and U.B. Parikh : "New fault zone identification scheme for busbar using support vector machine", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 5, No. 10, pp. 1073-1079, 2011.
- (10) D. Thukaram, H.P. Khincha, and H.P. Vijaynarasimha : "Artificial neural network and support vector Machine approach for locating faults in radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 710-721, 2005.
- (11) F.R. Gomez, A.D. Rajapakse, U.D. Annakkage, and I.T. Fernando : "Support Vector Machine-Based Algorithm for Post-Fault Transient Stability Status Prediction Using Synchronized Measurements", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1474-1483, 2011.
- (12) R.A. Ghunem, R. El-Shatshat, and O. Ozgonenel : "A Novel Selection Algorithm of a Wavelet-Based Transformer Differential Current Features", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 3, pp. 1120-1126, 2014.
- (13) A. Ngaopitakkul and A. Kunakorn : "Internal Fault Classification in Transformer Windings using Combination of Discrete Wavelet Transforms and Back-propagation Neural Networks", International Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS), Vol. 4, No. 2, pp. 365-371, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจิตติพงษ์ กล่อมจิตต์
วัน เดือน ปี เกิด	20 มกราคม 2532
สถานที่เกิด	พิจิตร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2554
ประวัติการทำงาน	ปี พ.ศ. 2555-ปัจจุบัน กองออกแบบสายส่ง (ภาคเหนือ, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ภาคใต้) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ผลงานทางวิชาการ	“Behaviour of Interturn Fault in PowerTransformer Winding using High Frequency Components of Discrete Wavelet Transform”. 15 <sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2012), Sapporo, Japan, October 2012. “Discriminating Between External Short Circuit and Internal Winding Fault in Power Transformer Using RBF Neural Network” Proceeding of the IASTED International Conference on Power and Energy Systems (AsiaPES 2013), Phuket, Thailand, April 2013 “Selection of Proper Non-linear Kernel Parameter in Support Vector Machine Algorithm for Classifying the Internal Fault Type in Winding Power Transformer” Proceedings of the 2 <sup>nd</sup> International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014 (ICISIP 2014), Kitakyushu, Japan, September 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้