

รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง
การแยกประเภทของฟอลต์ในหม้อแปลงกำลังโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบเต็มหน่วย
The Classification of fault in power transformer using discrete wavelet transform

คณะผู้วิจัย

ดร.ชัยยันต์ เจตนาแสน

หัวหน้าโครงการ

ดร.อรรถพล เสง่าพิทักษ์กุล

นักวิจัย

สนับสนุนโดย ทุนวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2554

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ ได้นำเสนอรูปแบบใหม่สำหรับระบบป้องกันหม้อแปลงโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วย อัตราส่วนระหว่างเพอร์ยูนิตกระแสผลต่าง (per unit differential current) และเพอร์ยูนิตเวลา (per unit time) เพื่อเป็นตัวแปรเปรียบเทียบในการแยกแยะฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถตรวจจับฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว



RCH
TK
2551
ช 418 ก
ด. 2

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 121400
วัน, เดือน, ปี..... 4 ก.ค. 2555

b. 12 ก.ค. 900
i.

Abstract

This research aims to presents a new transformer protection scheme with an application of the discrete wavelet transform (DWT). A ratio between per unit differential current and per unit time is calculated and performed as comparison indicator in order to discriminate between internal fault condition and external fault condition. The results show that the proposed technique is able to detect the internal fault accurately and fast responses.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

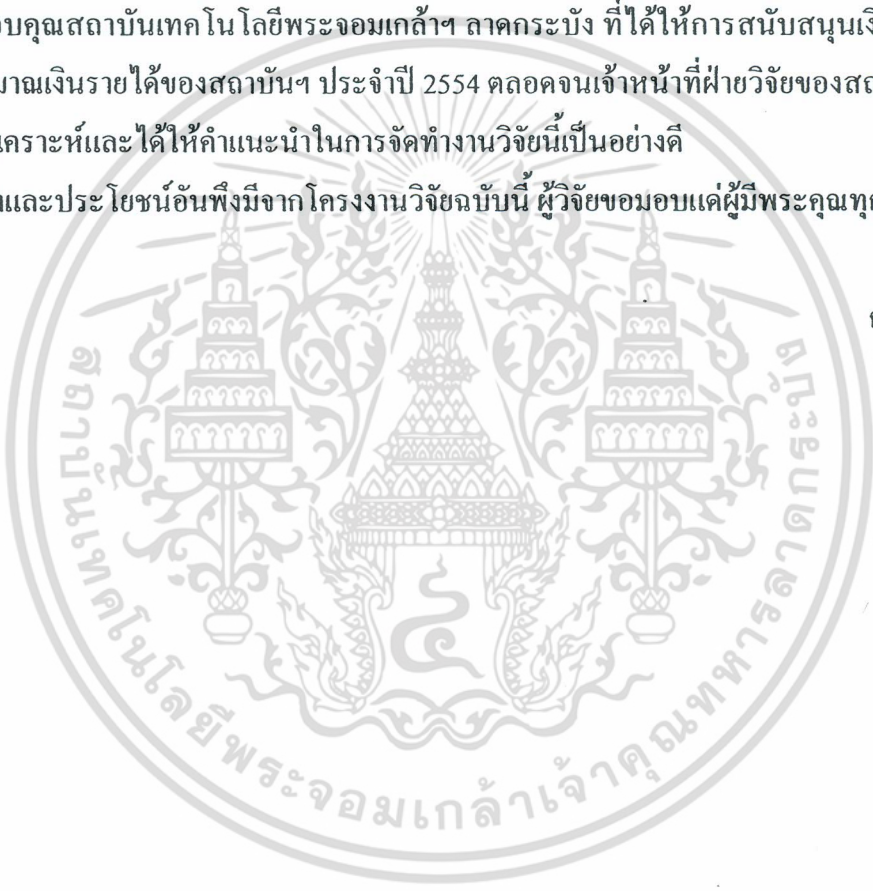
งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจากบุคคลและเจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณพุทธิจักร บุญมี, คุณสาโรจน์ รัตนสุภา จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้เอื้อเฟื้อเพื่อสำหรับข้อมูลระบบสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ของสถาบันฯ ประจำปี 2554 ตลอดจนเจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยของสถาบันที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และได้ให้คำแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้วิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	4
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การตรวจจับฟอลต์เชิงไฟฟ้า (Electrical Faults Detection)	7
2.1.1 การป้องกันแบบภาระเกิน (Overload Protection).....	7
2.1.2 การป้องกันแบบกระแสเกิน (Over current protection).....	7
2.1.3 การป้องกันแบบกระแสดิน (Ground or Earth Fault Protection).....	8
2.1.4 การป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection).....	8
2.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....	11
2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT).....	11
2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory)	11
2.2.1.2 การสเกล (Scaling)	12
2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting)	13
2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การจำลองฟอลต์	15
3.1 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	15
3.2 ระบบจำลองฟอลต์	17
3.2.1 แบบจำลอง	17
3.2.2 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	17
3.2.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์	18
บทที่ 4 การวิเคราะห์ฟอลต์	21
4.1 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต	21
4.2 การแบ่งแยกระหว่างฟอลต์ภายในกับภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า	25
บทที่ 5 บทสรุป	29
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก ก	33
ภาคผนวก ข	34
ประวัติผู้จัดทำโครงการวิจัย	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลสรุปการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดิน.....	27
4.2 ผลสรุปการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกรณีฟอลต์ลัดวงจรระหว่างขดลวด.....	28
4.3 ผลสรุปการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกรณีฟอลต์ภายนอกโซนป้องกัน.....	28
5.1 ค่าความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการแยกระหว่างฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอก	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรีเลย์ป้องกันกระแสดิน	8
2.2 แสดงวงจรของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของเปอร์เซ็นต์กระแสผลต่าง	9
2.3 แสดงเส้นคุณลักษณะของรีเลย์ที่ใช้หลักการเปอร์เซ็นต์กระแสผลต่าง ..	10
2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet	12
2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณ ไซน์	13
2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด	13
2.7 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ด	14
3.1 แสดงแบบจำลองหม้อแปลงเฟสเดียวเมื่อต่อตัวเก็บประจุ.....	17
3.2 แสดงระบบจำลองฟอลต์ภายในหม้อแปลงขนาด 50MVA	17
3.3 แสดงวงจรในการจำลองฟอลต์ด้วย โปรแกรม ATP/EMTP	19
3.4 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านแรงดันสูง	19
3.5 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านแรงดันต่ำ	20
4.1 การแปลงเวฟเล็ดของกระแสผลต่าง กรณีฟอลต์ขลวดลัดวงจรลงดิน	22
4.2 การแปลงเวฟเล็ดของกระแสผลต่าง กรณีฟอลต์ลัดวงจรระหว่างรอบ	23
4.3 การแปลงเวฟเล็ดของกระแสผลต่าง กรณีฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันความต้องการทางด้านกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างสูงในทุกภูมิภาคของประเทศไทยทำให้เกิดการเชื่อมโยงส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศเข้าด้วยกันในลักษณะเป็นโครงข่าย (Network) ทำให้มีการขยายตัวของระบบสายส่งมากขึ้นตาม เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีมากขึ้นตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นหนึ่งในการเชื่อมโยงที่สำคัญที่สุดในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามสถานีไฟฟ้าต่างๆ มีการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุที่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าถือเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เมื่อใดก็ตามที่เกิดเหตุขัดข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังทำให้เกิดความสูญเสียเป็นอย่างมาก ความเสียหายที่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นความเสียหายที่ไม่พึงปรารถนา เนื่องจากความต่อเนื่องในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าอาจจะงักรวมไปถึงทำให้ระบบขาดเสถียรภาพการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้เอง ถ้ามีระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ดีพอสามารถตรวจจับความผิดปกติ (fault) ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขณะใช้งานจะเป็นการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องจัดระบบป้องกันที่แม่นยำ, ถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งถ้าจัดระบบป้องกันที่ดีสามารถแยกแยะว่าฟอลต์ที่เกิดขึ้นเป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหรือภายนอก (Inrush Current, Over Excitation Fault) จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี รวมไปถึงอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังยาวนานขึ้น สำคัญอย่างยิ่งถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังดังกล่าวติดตั้งอยู่ในบริเวณของโหลดชนิดต่อเนื่องหรือโหลดที่สำคัญ (Critical Load) และมีความเสียหายมาก ถ้าระบบหยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากสาเหตุอื่นที่ไม่ใช่ฟอลต์จริงๆ ในตัวหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีความน่าเชื่อถือได้และมีความเร็วสูงวิธีหนึ่งก็คือ การใช้รีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection relay) เป็นตัวตรวจจับความผิดปกติฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังได้รับความเสียหายจากฟอลต์ภายในขดลวดเนื่องจากส่วนใหญ่วัดสคูที่ใช้เป็นฉนวนลัมเหลว ฟอลต์เหล่านี้ควรตรวจจับอย่างรวดเร็วและถูกต้อง นอกจากนี้ สาเหตุที่ทำให้เกิดฟอลต์ยังมีหลากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุหลักในการเกิดฟอลต์คือ การเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เกิดจากการแรงดันฟ้าผ่า เกิดจากสัตว์มาทำลาย การเสื่อมสภาพของหม้อแปลง เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นต้องมีการตรวจหารูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้น เพื่อจะได้ทำการซ่อมบำรุงบริเวณที่เกิดฟอลต์ได้รวดเร็วที่สุดจะเป็นการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ไม่ใช่ระบบเชื่อมโยงแบบโครงข่าย (Network) หรือระบบที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อกัน เพราะว่าหากเกิดฟอลต์ในระบบจะทำให้เกิดความเสียหายมากมาย เพราะไม่มีกำลังไฟฟ้าจากระบบอื่นเข้ามาจ่ายพลังงานไฟฟ้าทดแทน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการเสนอการแปลงเวฟเล็ดให้เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ (Transients) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยเหตุนี้เอง จึงได้มีนักวิจัยบางท่าน ได้ทำการวิจัยโดยนำการแปลงเวฟเล็ดมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ที่เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นที่การแยกแยะสัญญาณอินรัสถับสัญญาณฟอลต์ ในขณะที่การป้องกันฟอลต์ภายในหม้อแปลงและนอกหม้อแปลงเป็นการป้องกันที่มีส่วนสำคัญไม่น้อยกว่ากัน เนื่องจากเมื่อฟอลต์เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้หม้อแปลงเสียหายได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอพฤติกรรมของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด (two-winding transformer) เพื่อนำไปศึกษาและวิจัยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยจะทำการศึกษาดังกล่าวถึงค่าสัมประสิทธิ์การเกิดฟอลต์เพื่อเป็นตัวสั่งให้รีเลย์ทำงานตัดวงจร โครงการวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยอ้างอิงจากพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์คือ เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่างๆ เกิดขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของฟอลต์ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงจะมีค่าสูงขึ้นและยังสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อนำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) มาใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทรานเซียนต์ของสัญญาณฟอลต์ โดยทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูง (detail) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในหลายสเกลหรือหลายช่วงความถี่ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะนำมาใช้ในการแยกแยะระหว่างฟอลต์ภายในและภายนอกโซนป้องกัน ซึ่งผลสรุปที่ได้จากการแยกแยะฟอลต์นี้ จะมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาของรีเลย์ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแผนการปกป้องแบบใหม่สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง
2. เพื่อขยายขอบเขตงานวิจัยและเทคโนโลยีทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการแปลงเวฟเล็ด
3. เพื่อทำการวิเคราะห์กระแสที่เกิดฟอลต์ในตัวหม้อแปลง เพื่อใช้ในการออกแบบระบบป้องกัน
4. เพื่อระบุและรูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยจะทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ได้รวดเร็วซึ่งจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

รูปแบบเดิมในการวิเคราะห์สัญญาณของรีเลย์แบบผลต่าง (differential relay) [1] คือ การหาขนาดกระแสผลต่างทางปฐมภูมิ (primary) และทุติยภูมิ (secondary) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยกำหนดให้โวลต์แอมป์ (VA) ของหม้อแปลงทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าคงที่ อัตราส่วนกระแสทั้งสองด้านจะมีค่าขึ้นกับอัตราส่วนแรงดันทั้งสองด้าน เมื่อตอนกระแสทั้งสองด้านด้วย หม้อแปลงกระแส (CT) เข้ารีเลย์ โดยทิศทางของกระแสตรงกันข้ามกันในสภาวะจ่าย โหลดปกติ ผลต่างของกระแสทั้งสองมีค่าน้อยมาก เมื่อใดก็ตามที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลต่างกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าผลต่าง ดังกล่าวมีค่ามากกว่าที่รีเลย์กำหนด (relay set) วัรีเลย์จะทำงานทันที จากหลักการนี้นำมาใช้ในการตรวจจับฟอลต์และแยกแยะระหว่างฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) หรือฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก (External or Non-Internal Fault) ของตัวหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยที่รีเลย์จะส่งทริปในทุก ๆ กรณีของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) และจะต้องไม่ทำงาน (Block) ในกรณีที่ไม่ใช่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน อย่างไรก็ตามรีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวยังมีข้อผิดพลาดในการส่งปลดวงจร เนื่องจากว่ามีสาเหตุบางประการที่จะทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาด จึงได้มีการวิจัยหลากหลายวิธีเกี่ยวกับการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า [2-4]

ในช่วงปลายทศวรรษที่ 90 ได้พัฒนาแนวความคิดจากรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐานไปสู่การวิเคราะห์องค์ประกอบสัญญาณความถี่สูงแบบทรานเซียนต์ [5-6] เนื่องจากสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสัญญาณฟอลต์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น จึงทำให้นักวิจัยให้ความสนใจและมีการนำมาทำการศึกษาและวิจัยมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ ทำให้เทคโนโลยีของอุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50Hz) มาสู่การวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงในลักษณะการป้องกันแบบทรานเซียนต์ (Transient based protection) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การแปลงเวฟเล็ทมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น ฟอลต์ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติการปรับระดับความละเอียดและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เอง ได้มีการเสนอการแปลงเวฟเล็ทให้เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ (transients) ในระบบไฟฟ้ากำลัง [7] จึงได้มีนักวิจัยบางท่าน ได้ทำการศึกษาโดยนำการแปลงเวฟเล็ทมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทรานเซียนต์ที่เกี่ยวกับหม้อแปลง [8-12] และโดยส่วนใหญ่งานวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์กระแสอินรัช [13-14] ในขณะที่การป้องกันฟอลต์ภายในหม้อแปลงเป็นการป้องกันที่มีส่วนสำคัญไม่น้อยกว่ากัน เนื่องจากเมื่อฟอลต์เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้หม้อแปลงเสียหายได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอพฤติกรรมของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด (two-winding transformer) เพื่อนำไปศึกษาและวิจัยสำหรับการตรวจจับฟอลต์ภายในหม้อแปลง

ไฟฟ้ากำลัง โดยจะทำการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์การเกิดฟอลต์เพื่อเป็นตัวตั้งให้รีเลย์ทำงานตัด
เอกสารฉบับนี้เผยแพร่ฟรีโดยไม่คิดค่าลิขสิทธิ์หรือค่าอื่นใด ผู้ใช้สามารถนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร โดยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดฟอลต์นั้นจะพิจารณาตามความเหมาะสม เพราะในกรณีที่เกิดสัมประสิทธิ์ของฟอลต์เพียงเล็กน้อยซึ่งไม่ส่งผลอันตรายต่อระบบ จะไม่สั่งการให้รีเลย์ตัดการทำงานของระบบ แต่ถ้าในกรณีที่ฟอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์สูงและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบจะสั่งให้รีเลย์ตัดการทำงานวงจรทันที เพื่อป้องกันความเสียหายต่อตัวหม้อแปลงเนื่องจากหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูง งานวิจัยนี้ทำการจำลองรูปแบบของฟอลต์ในตัวหม้อแปลง ทั้งทางด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำโดยใช้โปรแกรม BCTAN ในการสร้างแบบจำลองหม้อแปลง ในการออกแบบจำลองรูปแบบของการเกิดฟอลต์ เช่น ภายในหม้อแปลง ภายนอกหม้อแปลง กระแสอินรัส โดยใช้หม้อแปลงที่ใช้ในการจำลองอยู่ที่ 50 MVA 115/23 KV เป็นหม้อแปลงที่มีการใช้จริงในการไฟฟ้าฝ่ายผลิต จึงกล่าวได้ว่า โครงการวิจัยนี้เป็นการช่วยอำนวยความสะดวกให้กับหน่วยงานที่ทำหน้าที่ซ่อมบำรุงรักษาหม้อแปลงทำงานได้สะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น อีกทั้งสามารถนำไปขยายใช้กับระบบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนได้และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อพัฒนาทางด้านวิเคราะห์สัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของ โครงการงานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขอบเขตโครงการวิจัยนี้

รูปแบบการเกิดฟอลต์ที่พิจารณาคือ ภายในหม้อแปลง ภายนอกหม้อแปลง กระแสอินรัส ซึ่งเป็นหม้อแปลงในระบบการ ไฟฟ้าฝ่ายผลิต (EGAT) เป็นแบบจำลองหลักการศึกษา

2) ขอบเขตของการวิเคราะห์คุณลักษณะทรานเซียนต์ของสัญญาณฟอลต์

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จะใช้ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดฟอลต์ขึ้นทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB/Wavelet Toolbox มาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงรูปแบบและพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ เช่น ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ต่างๆ ชนิดฟอลต์ต่างๆ รวมไปถึงมุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ เป็นต้น เพื่อนำไปแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟอลต์ภายในและภายนอกโซนป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้จำลองสัญญาณฟอลต์ที่แตกต่างกันในกรณีการเกิดฟอลต์ ด้วย โปรแกรม ATP/EMTP แล้วนำสัญญาณฟอลต์มาทำการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วย เพื่อทำการพิจารณาหาข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ รวมถึงช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ เพื่อนำมาสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์และตัดสินใจ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

1. สามารถเป็นแนวคิดในการออกแบบสร้างระบบป้องกันหม้อแปลง
2. เผยแพร่ความรู้ในเทคโนโลยีการตรวจจับการเกิดฟอลต์ในหม้อแปลง
3. ส่งเสริมงานวิจัยให้มีการพัฒนาโดยการตีพิมพ์ในวารสารหรือการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปในขณะที่เกิดการลัดวงจรหรือฟอลต์ขึ้น ปริมาณกระแสจะเพิ่มขึ้นและแรงดันจะมีขนาดลดลง การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันนี้ จะส่งผลให้ปริมาณอื่นเปลี่ยนแปลงตามมา เช่น มุมเฟสของกระแสและแรงดัน ส่วนประกอบฮาร์มอนิกและความถี่ของระบบ เป็นต้น การทำงานของรีเลย์ป้องกันเชิงไฟฟ้านั้น จะใช้ปริมาณไฟฟ้าเหล่านี้เป็นสัญญาณที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ระบบป้องกันด้านนี้จึงพอสรุปได้ดังนี้

2.1 การตรวจจับฟอลต์เชิงไฟฟ้า (Electrical Faults Detection) [15]

2.1.1 การป้องกันแบบภาระเกิน (Overload protection)

ระบบป้องกันชนิดนี้ อาศัยค่ากระแสที่เกินอัตราปกติ ป้อนให้แก่อุปกรณ์ เพื่อให้รีเลย์ส่งสัญญาณเตือน (ALARM) หรือปลดวงจรตัดคอนออก ข้อสำคัญจึงมีอยู่ว่า รีเลย์กระแส (Current Relay) ชนิดนี้ จะต้องสามารถแบ่งแยกสัญญาณชนิดไหนเป็นกระแสที่เกิดจากลัดวงจรหรือภาระเกินชั่วขณะออกให้ได้ มิฉะนั้นจะ ภัยอันตรายสัญญาณเตือนอยู่ตลอดเวลา โดยปกติกำหนด (Setting) ไว้ที่ 150% ของความสามารถสูงสุด (Maximum capacity) ของหม้อแปลง

2.1.2 การป้องกันแบบกระแสเกิน (Over current protection)

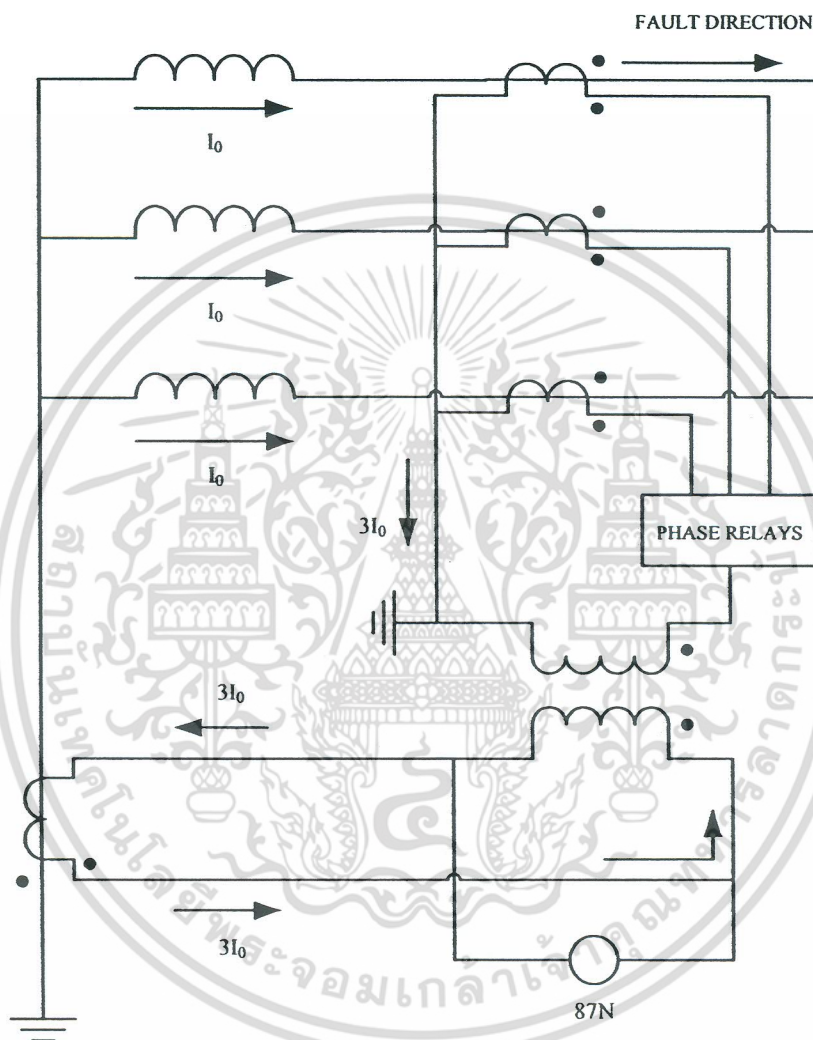
ระบบป้องกันชนิดนี้มีวิธีป้องกันอยู่ 2 วิธี กล่าวคือ

1. ระบบฟิวส์ (Fuse) เป็นระบบป้องกันที่ใช้กับหม้อแปลงขนาดเล็ก ทุกครั้งที่เลือกใช้ ควรพิจารณาถึงคุณสมบัติของฟิวส์ ระหว่างกระแสที่ผ่านฟิวส์ และเวลาเป็นสัดส่วนผกผันกับกระแสหนึ่งวินาทีจะ ต้องไม่มีผลต่อฟิวส์
2. รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) รีเลย์ชนิดนี้มีไว้เพื่อป้องกันการลัดวงจรภายนอก โดยเฉพาะ ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดเล็ก จะใช้รีเลย์ชนิดนี้ป้องกันทั้งกรณีเกิดลัดวงจรภายใน และลัดวงจรภายนอกด้วย ปกติรีเลย์ชนิดนี้ จะทำหน้าที่เป็นเพียงรีเลย์สำรอง (Back up Relay) สำหรับรีเลย์ชนิดกระแสผลต่าง (Differential relay) ในการป้องกันการลัดวงจรภายในหม้อแปลงของหม้อแปลงตัวใหญ่และเป็นรีเลย์พื้นฐานสำหรับการลัดวงจรภายนอก โดยปกติกำหนด (Setting) ไว้ที่ 150% ของความสามารถสูงสุด (Maximum capacity) ของหม้อแปลง และมีการหน่วงเวลา (Time delay) เมื่อเกิดฟอลต์ทางด้านแรงดันต่ำเท่ากับ 2 วินาที (seconds) สำหรับรีเลย์กระแสเกินทางด้านแรงดันสูง ในขณะที่รีเลย์กระแสเกินทางด้านแรงดันต่ำมีการหน่วงเวลาเท่ากับ 1.5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การป้องกันแบบกระแสดิน (Ground or Earth Fault protection)

ในกรณีหม้อแปลงมีจุดนิวตรอน (Neutral) ของขดลวดสตาร์ (Y) ต่อลงดิน ถ้าพึ่งเฉพาะรีเลย์กระแสเกินนั้นยังมีอาจป้องกันการลัดวงจรภายในหม้อแปลงอย่างมีประสิทธิภาพได้ จึงต้องมีรีเลย์ชนิดนี้เพื่อทำหน้าที่คล้ายรีเลย์กระแสผลต่าง (Differential relay) ทำงานทันทีเมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวดภายในหม้อแปลงลงดินลักษณะของวงจรได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงรีเลย์ป้องกันกระแสดิน

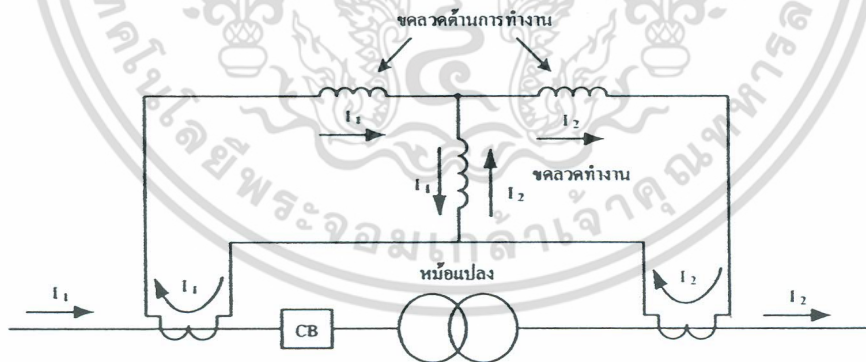
2.1.4 การป้องกันแบบผลต่าง (Differential protection)

เป็นรีเลย์ป้องกันแบบพื้นฐานที่จะต้องติดตั้งเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลง (โดยทั่วไปมีขนาดมากกว่า 5 MVA) โดยความเสียหายที่รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างต้องทำการป้องกันนั้นคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในค้วหม้อแปลง หรือในโซน (zone) เท่านั้น ดังนั้นตัวของรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างจะต้องแยกแยะระหว่างฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) และฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายนอก (External or Non-Internal Fault) ของค้วหม้อแปลงให้ออก โดยที่รีเลย์จะส่งทริปในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุก ๆ กรณีของฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Fault) และจะต้องไม่ทำงาน (Block) ในกรณีที่ไม่ใช่ฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายใน

หลักการการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้ คือ ตรวจสอบความแตกต่าง (Different) ของกระแสที่ไหลเข้าและออกจากอุปกรณ์ที่รีเลย์ป้องกันอยู่ ถ้าแตกต่างกันน้อยไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ (Setting) ซึ่งมักจะกำหนด (Set) ไว้ประมาณ 30% ของกระแสพิคก (Rated Current) ของรีเลย์ ซึ่งไม่สูงมากนัก จะถือว่าไม่มีการลัดวงจรในอุปกรณ์นั้น เมื่อนำมาใช้กับหม้อแปลง ก็คือการตรวจจับกระแสทางด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำของหม้อแปลงนั่นเอง เนื่องจากรีเลย์ชนิดนี้นำกระแสมาจากหม้อแปลงกระแส (CT) ทั้ง 2 ด้านของหม้อแปลง ดังนั้นตำแหน่งของหม้อแปลงกระแส (CT) จึงเป็นตัวกำหนดโซน (Zone) และทำงานของรีเลย์ และสิ่งนี้เป็นข้อได้เปรียบของรีเลย์ชนิดนี้คือรีเลย์ป้องกันเชิงกล เช่น บูล โสลรีเลย์ รีเลย์เปลี่ยนแปลงความดันทันที เป็นต้น เนื่องจากรีเลย์ชนิดนี้สามารถตรวจจับการลัดวงจรบริเวณกว้างกว่ารีเลย์ป้องกันเชิงกลที่จะเห็นการลัดวงจรหรือฟอลต์เฉพาะที่เกิดในหม้อแปลงเท่านั้น แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากหลักการการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้เป็นการตรวจสอบความแตกต่างของกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงทั้ง 2 ด้าน ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้รีเลย์ชนิดนี้ป้องกันการจ่ายโหลดเกิน (Overload) ของหม้อแปลงได้

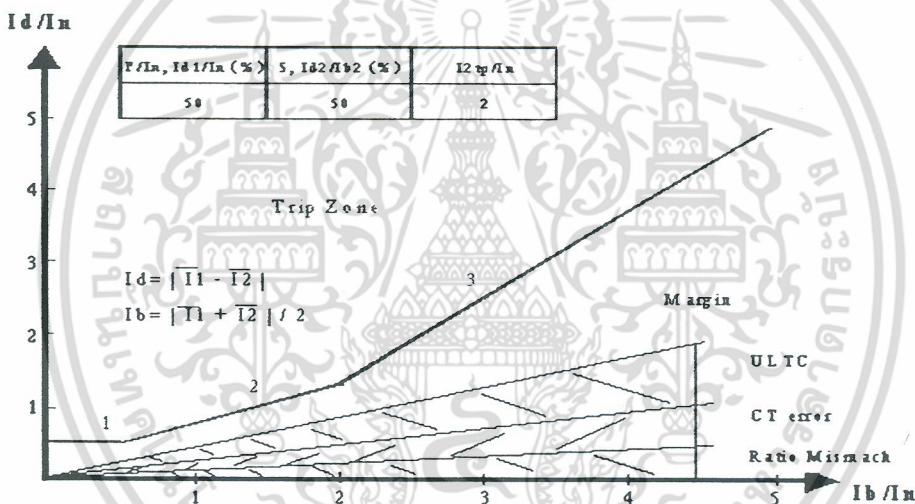
รีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นรีเลย์ของ ABB Siemens หรือ SEL จะใช้หลักการเปอร์เซ็นต์กระแสผลต่าง (Percentage Differential Current) สำหรับตรวจสอบสถานะฟอลต์ที่เกิดขึ้นว่า เป็นฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหรือภายนอกบริเวณที่ป้องกัน ซึ่งจะมีวงจรของการทำงานดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้หลักการของเปอร์เซ็นต์กระแสผลต่าง

จากรูปที่ 2.2 ในกรณีที่กระแสไหลเข้าหม้อแปลงมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลออกจากหม้อแปลงนั้น หมายความว่า กระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสที่ต่อด้านปฐมภูมิ (I_1) จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ได้จากหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิ (I_2) ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ป้องกันจะมีค่าเป็นศูนย์ หากกำหนดให้ค่ากระแสผลต่างระหว่างปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเป็น I_d นั้นหมายความว่า I_d มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในทางทฤษฎีจะหมายความว่าไม่มีฟอลต์ภายในเกิดขึ้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในทางปฏิบัติ แม้ว่าอยู่ในสถานะที่ไม่ได้เกิดฟอลต์ภายในขึ้นค่ากระแส I_d อาจมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Error) ค่าอัตราส่วนที่ต่างกันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Mismatch Ratio) และตำแหน่งของ On-Load Tap Changer ซึ่งจะมีผลให้มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านรีเลย์ป้องกัน ดังนั้น รีเลย์ป้องกันจึงต้องมีคุณสมบัติที่เรียกว่า ความชัน (Slope) ขึ้นมา โดยทั่วไปแล้วรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่ใช้กันอยู่จะมีการนำค่ากระแสไหลผ่าน (Through Current) หรือกระแสไบอัส (Bias Current) มาเป็นสัดส่วนร่วมในการตัดสินใจในการสั่งปลดวงจร แทนการพิจารณาแต่กระแสผลต่างอย่างเดียว ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 หลักการตัดสินใจสั่งปลดวงจรดังกล่าวต้องอาศัยการตั้งค่าเซตติ้ง (Setting Values) อัตราส่วนระหว่างกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัส รีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อ ค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัสจริงในขณะนั้นมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้



รูปที่ 2.3 แสดงเส้นคุณลักษณะของรีเลย์ที่ใช้หลักการเปอร์เซ็นต์ กระแสผลต่าง

จากที่กล่าวมา ได้กล่าวถึงวิธีการใช้หลักการของเปอร์เซ็นต์กระแสผลต่างในการตรวจสอบป้องกันฟอลต์ภายในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามรีเลย์ที่ใช้หลักการดังกล่าวยังมีข้อผิดพลาดในการสั่งปลดวงจรหากรูปคลื่นที่วัดเข้ามาเกิดการผิดเพี้ยน เช่น ในกรณีที่เกิดฟอลต์ภายนอกพื้นที่ป้องกัน โดยรูปคลื่นด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ทำการป้องกันเกิดการผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ไม่ว่าจะเป็นการอิ่มตัวจากผลของกระแสสลับ (AC Saturation) หรืออิ่มตัวจากผลของกระแสตรง (DC Saturation) จนทำให้เกิดค่าอัตราส่วนของกระแสผลต่างต่อกระแสไบอัสเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Setting) ไว้จนทำให้รีเลย์สั่งปลดวงจร

อีกกรณีที่สามารถทำให้เกิดการผิดพลาดในการสั่งปลดวงจรก็คือ กรณีเกิดฟอลต์ภายในพื้นที่ป้องกัน ชนิดที่ค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Internal Fault) หรือฟอลต์ขดลวดลงดินภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีอี จำกัด ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ การนำข้อความหรือรูปภาพไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

หม้อแปลง (Winding to ground fault) บริเวณช่วงปลายๆ ขดลวดหรือเกิดฟอลต์ระหว่างขดลวด ภายในหม้อแปลง (Intertum fault) ซึ่งจะมีผลต่างกระแสไม่มากนัก จนมีผลทำให้ไม่สามารถ ตรวจพบได้ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดค่าที่กำหนดไว้ (Setting) ของค่าอัตราส่วนของกระแสผลต่างต่อ กระแสไบอัส จำเป็นต้องเพื่อค่าของอัตราส่วนการแปลงที่ไม่เท่ากันระหว่างหม้อแปลงกระแสที่ต่อ อยู่ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ หรือค่าอัตราส่วนที่ต่างกันของหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Mismatch Ratio) และต้องเพื่อค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันของหม้อแปลง กระแสทั้งสองด้าน (Current Transformer Error) รวมทั้งการเปลี่ยนของกระแสด้าน ปฐมภูมิที่ อาจจะสูงขึ้นหรือต่ำลงอันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง

2.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ในทุกหนทุกแห่งรอบๆ ตัวเราประกอบไปด้วยสัญญาณต่างๆ มากมายที่มนุษย์นำมาใช้ในการ วิเคราะห์ เช่น การสั่นของแผ่นดินไหว เสียงพูดของมนุษย์ การสั่นของเครื่องยนต์ และการจัด สัญญาณรบกวน เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ เหล่านี้จะใช้ทฤษฎีเวฟเล็ตเป็นเครื่องมือ สำหรับอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณ ซึ่งมีความสำคัญต่อสาขาการประมวลผลสัญญาณมาก ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของเวฟเล็ต และนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยได้

2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT)

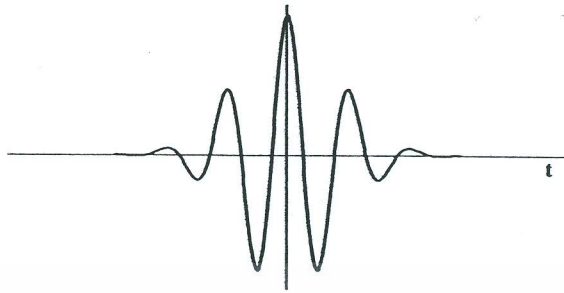
การแปลงเวฟเล็ตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วง สั้น) แต่ได้พัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ สามารถ ปรับเปลี่ยนขนาดหน้าต่าง (windows) ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้ เหมาะกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ น้อยลงในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory)

ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของ ระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณ เฉพาะนี้จะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเล็ต” ลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ความแอมพลิจูดและขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์ทั้งทางด้านบวก และด้านลบอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเล็ตคือการนำ กลุ่มของเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นคำอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตคั่น กำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเล็ตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเกล (Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ดแม่ของมันเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ดแบบ Morlet

ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ดังนี้

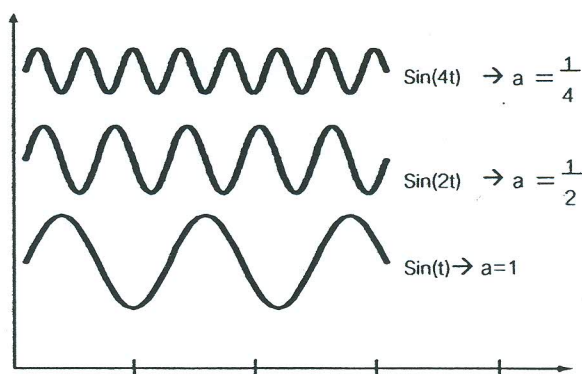
$$\psi_{a,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-k}{a}\right) \quad (2.5)$$

$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ดแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ k ตามลำดับ โดยที่เวฟเล็ดแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า a และ k แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเล็ดแม่เดิมอยู่ และเพื่อให้เวฟเล็ดที่ถูกสเกลไปมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ดแม่จึงต้องทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ เพื่อให้เห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะขออธิบายถึงเวฟเล็ดที่มีการสเกลและเลื่อนตำแหน่งดังนี้

2.2.1.2 การสเกล (Scaling : a)

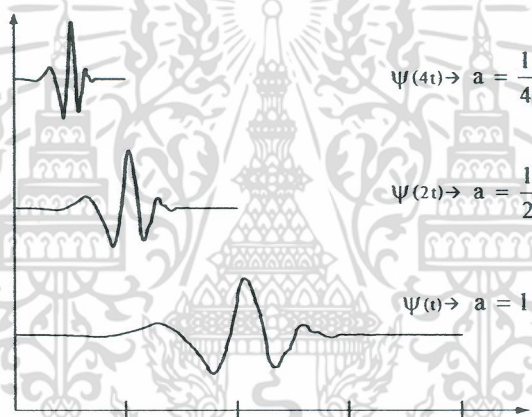
การวิเคราะห์เวฟเล็ดจะแสดงให้เห็นถึงเวลาและขนาดของสัญญาณ การสเกล (Scaling) จะหมายถึงการหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) ซึ่งเราจะให้ “a” แทนด้วยพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนความถี่ของเวฟเล็ดแม่ของมันเอง หรืออาจเรียก “a” ว่าเป็นตัวประกอบขนาด (scale factor) และถ้าพิจารณาสัญญาณไซน์ที่มีตัวประกอบขนาดแตกต่างกันจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์

ตัวประกอบขนาด (a) จะมีผลในทางเดียวกันกับเวฟเล็ด ยิ่งถ้าตัวประกอบขนาดน้อยลงเท่าใด เวฟเล็ดจะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาเวฟเล็ดที่มีตัวประกอบแตกต่างกันจะปรากฏลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6

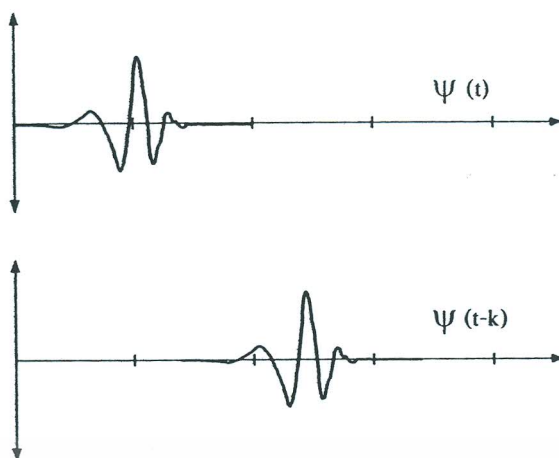


รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด

2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k)

การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ดจะมีความหมายง่ายๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน $\Psi(t)$ ด้วย k จะแสดงได้โดย $\Psi(t-k)$ การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดยพารามิเตอร์ "k" ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ดบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ดที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT)

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน และก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยจำเป็นต้องกล่าวถึง การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียด (Multi-Resolution Analysis : MRA) โดยเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถเลือกระดับความละเอียดได้ โดยการนำสัญญาณเล็กๆ ที่ระดับความละเอียด a ซึ่งมี k หลายๆ ตำแหน่งมารวมกันให้เกิดเป็นสัญญาณที่ระดับความละเอียดที่เลือกไว้ และเมื่อนำสัญญาณที่ทุกระดับความละเอียดมารวมกันก็จะได้สัญญาณอินพุตจริง ซึ่งเรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform :DWT)” โดยมีสมการที่ใช้อธิบายดังต่อไปนี้ [6]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt \quad (2.1)$$

โดยที่ a_0^m คือ การสเกล

$nb_0 a_0^m$ คือ การเลื่อนตำแหน่ง

m, n คือ เลขจำนวนเต็มบวก

และในทางปฏิบัติการนำมาใช้งานจริง สัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปของการสุ่ม (sample) ดังนั้นจากสมการที่ (2.1) จึงพัฒนามาสู่สมการที่ (2.2) [7]

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ m, n, k เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยที่
- n คือ จำนวนข้อมูล
 - m คือ เลขแสดงการเปลี่ยนแปลงของสเกล
 - k คือ เลขแสดงการเลื่อนตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของการวิเคราะห์หลายระดับความละเอียดแล้วโดยมีการเปลี่ยนแปลงสเกลในการวิเคราะห์ให้ลดลงครึ่งละ 2 เท่า ($a_0 = 2; b_0 = 1$) แล้วจะได้รูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า dyadic wavelet transform ดังสมการต่อไปนี้

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) \psi\left[\frac{n - k 2^m}{2^m}\right] \quad (2.3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การจำลองฟอลต์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แต่ฟอลต์เป็นสิ่งที่ผิดปกติในระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทดลองในระบบจริงได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าขึ้นมา ในโครงการวิจัยนี้จึงได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ โดยอาศัยโปรแกรม ATPDraw for Windows version 3.65 ที่ได้รับการพัฒนามาจากโปรแกรม ATP/EMTP [33,34] หรือ Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program ซึ่งช่วยในการสร้างแบบจำลองในระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป โปรแกรมนี้มีการใช้งานและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีความเหมาะสมในด้านการจำลองแบบดิจิทัลสำหรับปรากฏการณ์ทรานเซียนต์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และให้ผลตอบสนองเหมือนกับปรากฏการณ์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของจริงในระบบไฟฟ้า

3.1 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [16]

ในการศึกษาฟอลต์ที่เกิดภายในโซนหม้อแปลงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองฟอลต์ เนื่องจากสัญญาณฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่าความถี่พื้นฐานอยู่มาก ดังนั้นจึงต้องเลือกรูปแบบในการคำนวณให้เหมาะสมด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนั้นมีให้เลือกใช้อยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ได้แก่ BCTRAN, Saturable Transformer, X Transformer และ Ideal Transformer แต่สำหรับการศึกษาสถานะทรานเซียนต์จะใช้แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง BCTRAN เพื่อจำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนที่ 1 ใช้ผลการทดสอบของหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลอินพุต ส่วนเอาต์พุตได้จากโปรแกรม BCTRAN อยู่ในรูปของเมตริกซ์ค่าความต้านทาน $[R]$ และค่าความเหนี่ยวนำในรูปของ self-inductance และ mutual-inductance $[L]$ ขนาด 6×6 สำหรับหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวดดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ซึ่งไม่พิจารณาฟอลต์ภายในขดลวด (อยู่ในสถานะทำงานปกติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{14} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

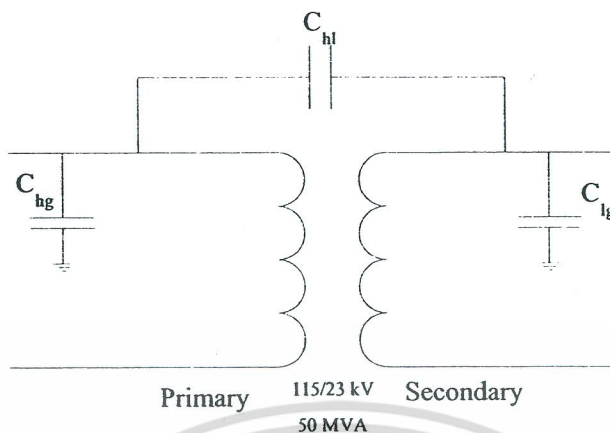
ขั้นตอนที่ 2 เปลี่ยนแปลงเมตริกซ์ข้างต้น $[R]$ และ $[L]$ ตามชนิดพอลต์ขดลวดภายใน โดยใช้ความสัมพันธ์ของหลักการความสอดคล้อง (Consistency), การรั่วไหล (Leakage) และสัดส่วน (Proportionality) มาช่วย และได้เมตริกซ์พอลต์ขดลวดภายในขึ้นมาใหม่ดังสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{a2} & M_{a3} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{ba} & L_b & M_{b2} & M_{b3} & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{2a} & M_{2b} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{3a} & M_{3b} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{4a} & M_{4b} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{5a} & M_{5b} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{6a} & M_{6b} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ขั้นตอนที่ 3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมสภาวะเกิดพอลต์ของหม้อแปลงในสภาวะเกิดพอลต์ภายใน ขดลวดหม้อแปลงในงานวิจัยนี้นำตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทางด้านแรงดันสูง, แรงดันต่ำ (earth capacitance of the HV and LV windings) และตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันต่ำ (inter-winding capacitances) มาต่อเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองหม้อแปลง BCTRAN [17]
 ดังรูปที่ 3.1

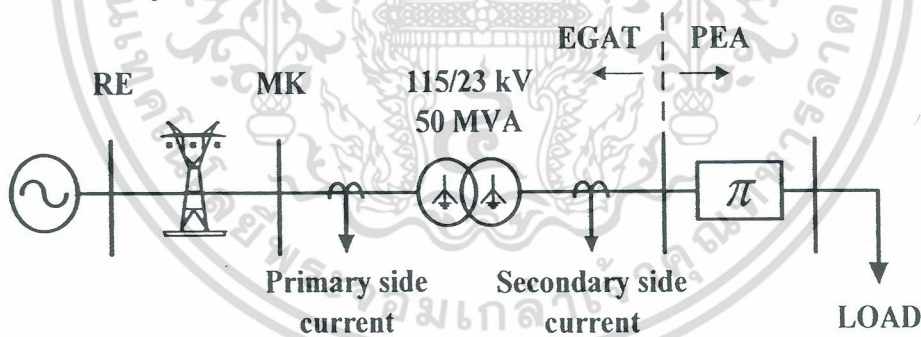


รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองหม้อแปลงเฟสเดียวเมื่อต่อตัวเก็บประจุ [18]

3.2 ระบบจำลองฟอลต์

3.2.1 แบบจำลอง

เนื่องจากในสถานะที่เกิดฟอลต์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของเหตุการณ์เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ได้ครอบคลุมในหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างระบบจำลองขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 [19]



รูปที่ 3.2 แสดงระบบจำลองฟอลต์ภายในหม้อแปลงขนาด 50 MVA [19]

3.2.2 ผลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [20]

ในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้ระบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA, 115/23 kV ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีใช้งานจริงที่สถานีไฟฟ้ามหาสารคาม (MK) โดยสามารถแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

พิกัดแรงดัน ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	115/23 kV
พิกัดกระแส ปฐมภูมิ/ทุติยภูมิ	251.02/1255.11 kA
การต่อขดลวด	Ynyn0
พิกัดกำลัง	50 MVA
ค่าสูญเสียการกระตุ้นลำดับบวก / ศูนย์ (เปิดวงจรทางด้านแรงดันสูง)	22.18/221 kW
กระแสกระตุ้นลำดับบวก / ศูนย์	0.922/200 A
แรงดันกระตุ้นลำดับบวก / ศูนย์ (จ่ายไฟที่พิกัดแรงดัน)	23/1.993 kV
ค่าสูญเสียการลัดวงจรลำดับบวก / ศูนย์ (ลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำ)	148.10/345 kW
กระแสลัดวงจรลำดับบวก / ศูนย์ (จ่ายไฟที่พิกัดกระแส)	251.07/200.2 A
แรงดันลัดวงจรลำดับบวก / ศูนย์	14.44/3.224 kV
ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทางด้านแรงดันสูง	12491.62 pF
ตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ	21795.15 pF
ตัวเก็บประจุระหว่างขดลวดแรงดันสูงกับแรงดันต่ำ	17424.32 pF

3.2.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

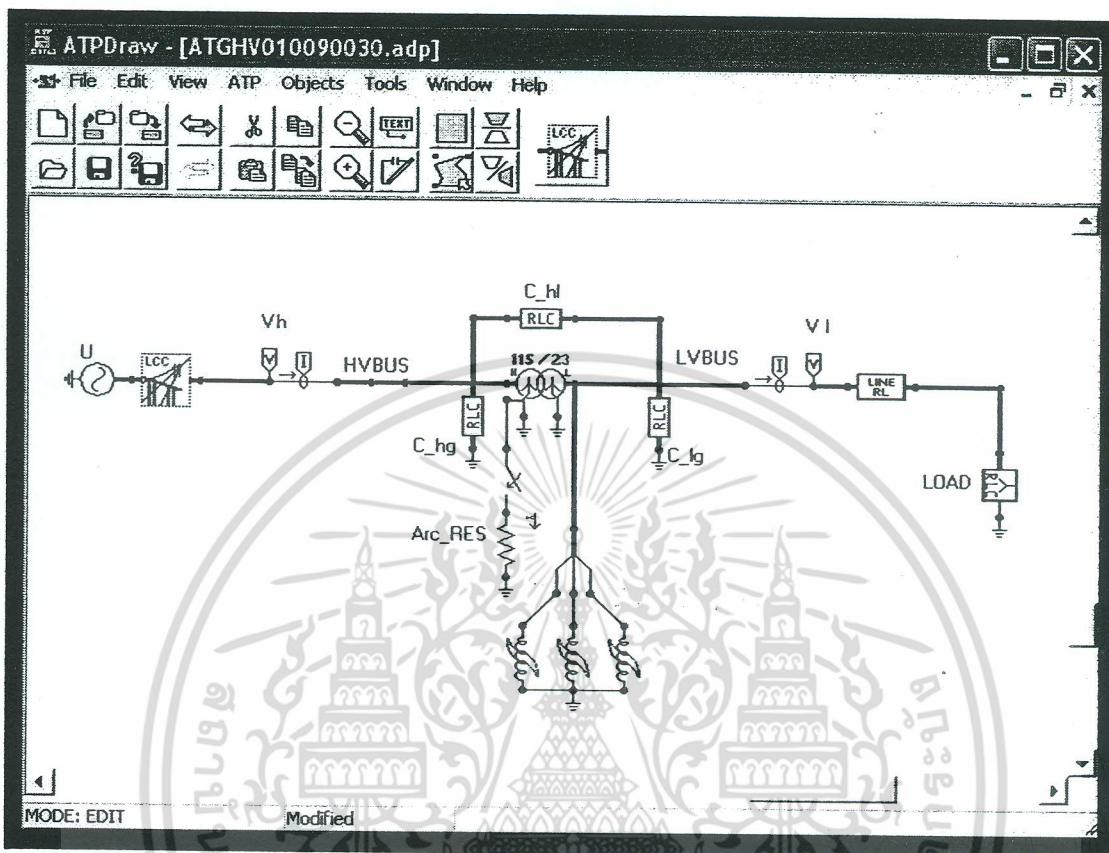
ในการจำลองฟอลต์นั้นเพื่อศึกษาฟอลต์ที่แตกต่างกันจึงทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 2 ชนิด ได้แก่ ฟอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดินและขดลวดลัดวงจรระหว่างรอบ
- ชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทางฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ 0° - 330° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันสูงที่เฟส A (ช่วงละ 30°)
- 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

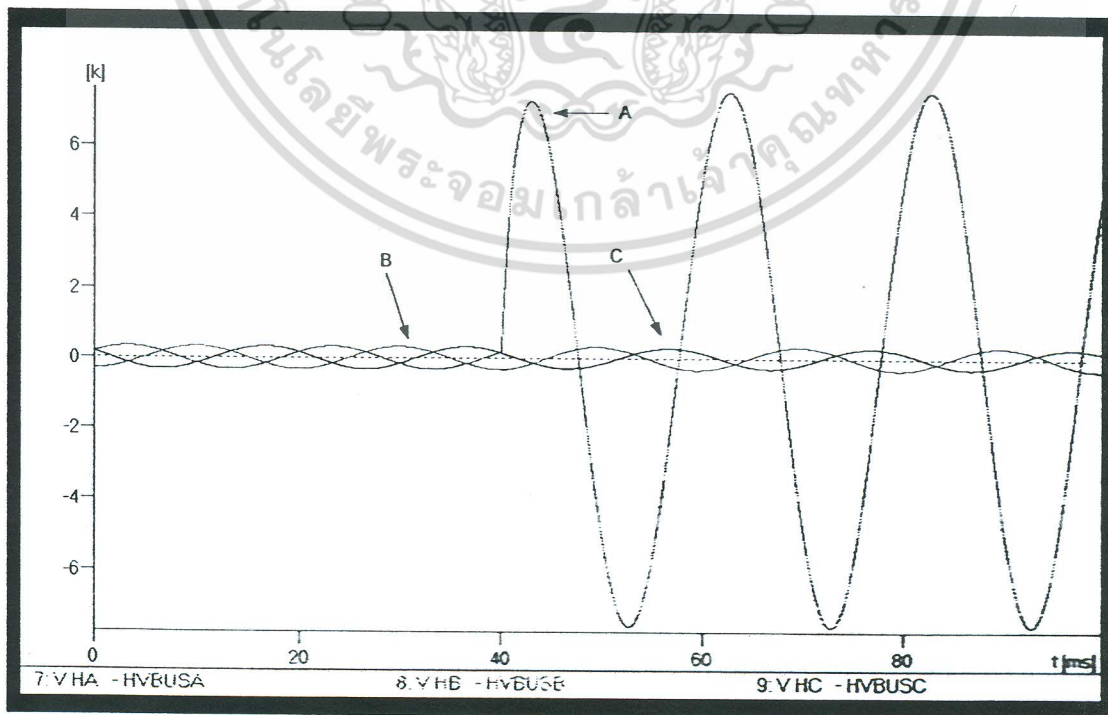
จากวงจรขณะเกิดฟอลต์ของหม้อแปลงทดสอบในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นแบบจำลองการทดสอบในโปรแกรม ATPDraw โดยใช้สวิตช์ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบและเวลาของการเกิดฟอลต์ ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เริ่มเกิดฟอลต์ที่ $t = 0.04$ วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล (0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

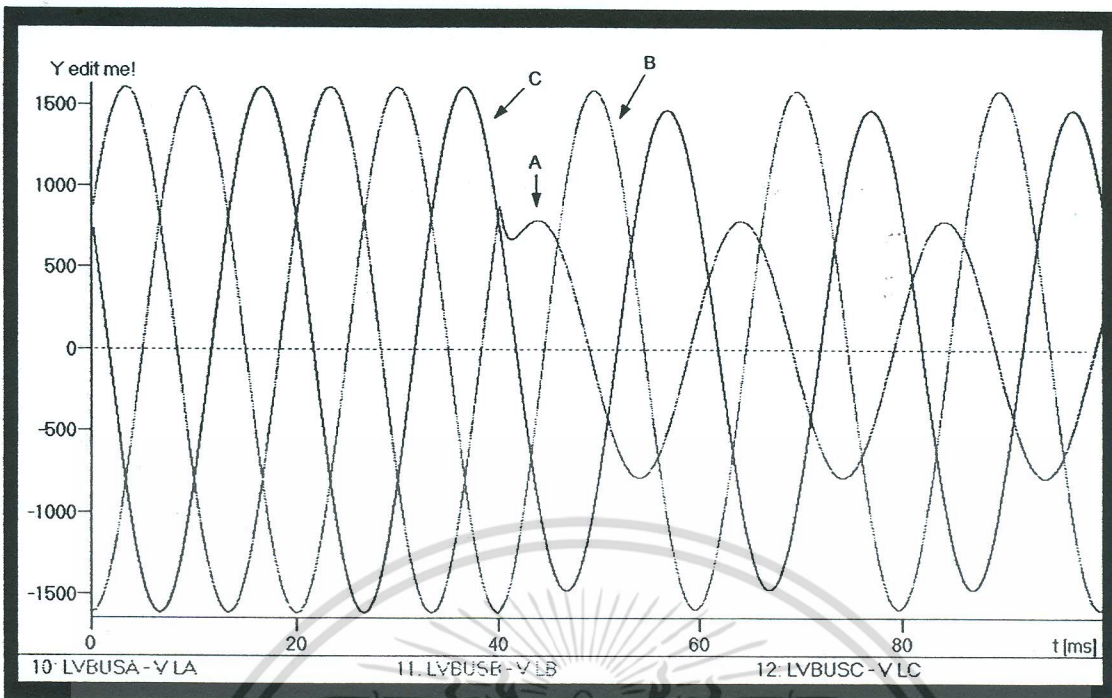
- 0.1 วินาที) โดยไม่มีการกำจัดฟลัดต์ออก ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรในการจำลองฟลัดต์ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณฟลัดต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายคานแรงดันสูง ซึ่งเป็นการคำนวณการนำไฟฟ้าของสายส่งที่สร้างขึ้นด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านแรงต่ำ

จากรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นผลการจำลองของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทดสอบ จะพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฟอลต์ทั้งสองชนิดมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน จึงยากแก่การแยกประเภทฟอลต์ ด้วยเหตุนี้เอง จึงได้นำการแปลงเวฟเล็ทมาช่วยในการแยกประเภทฟอลต์ โดยจะอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ฟอลต์

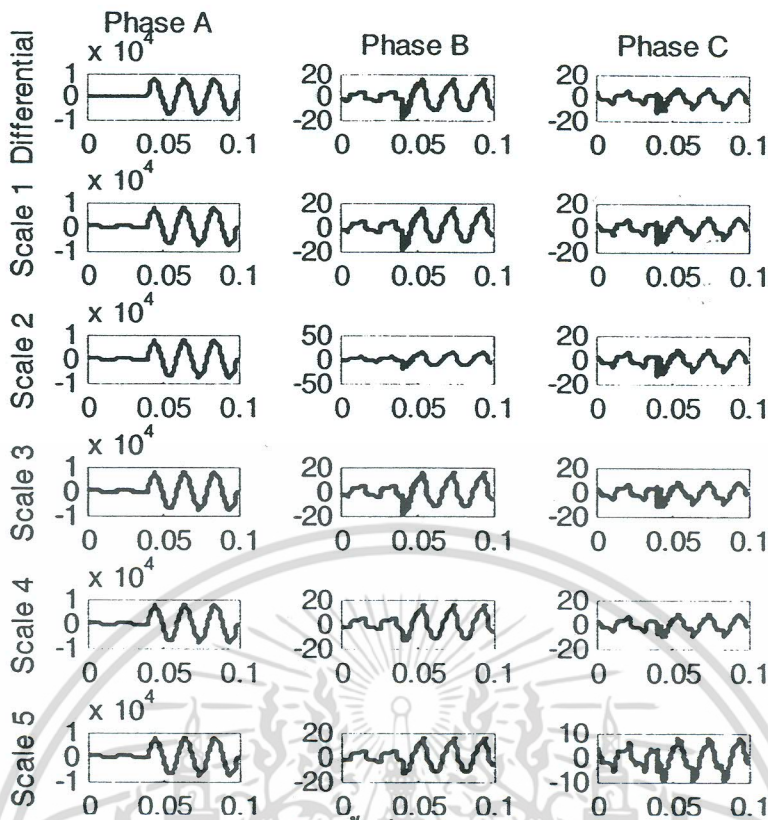
จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ดที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โครงการวิจัยนี้จึงได้นำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาเป็นตัวสั่งให้รีเลย์ทำงานตัดวงจร

4.1 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ด

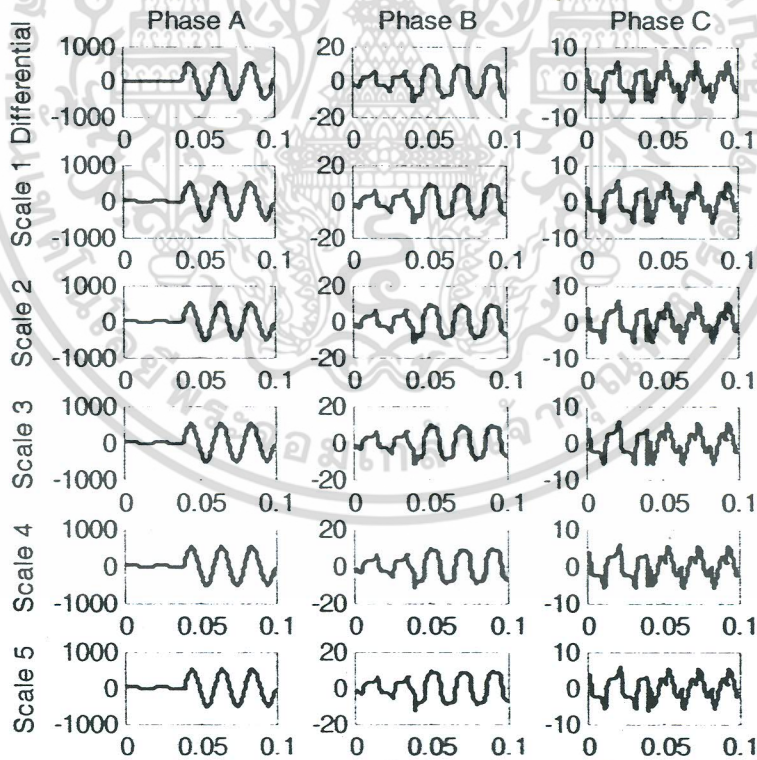
ขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเล็ดจะนำสัญญาณกระแสผลต่างที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP ในแต่ละเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยความถี่การสุ่ม (Sampling frequency) 200 kHz มาทำการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ดแม่ชนิต daubechies4 (db4) [5] เพื่อทำการแยกองค์ประกอบความถี่ค่าในสเกลที่ 1-5 ออกมา ซึ่งแต่ละสเกลจะแสดงค่าของช่วงความถี่ดังนี้

สเกลที่ 1 มีความถี่ในช่วง	50-100 kHz
สเกลที่ 2 มีความถี่ในช่วง	25-50 kHz
สเกลที่ 3 มีความถี่ในช่วง	12.5-25 kHz
สเกลที่ 4 มีความถี่ในช่วง	6.25-12.5 kHz
สเกลที่ 5 มีความถี่ในช่วง	3.125-6.25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



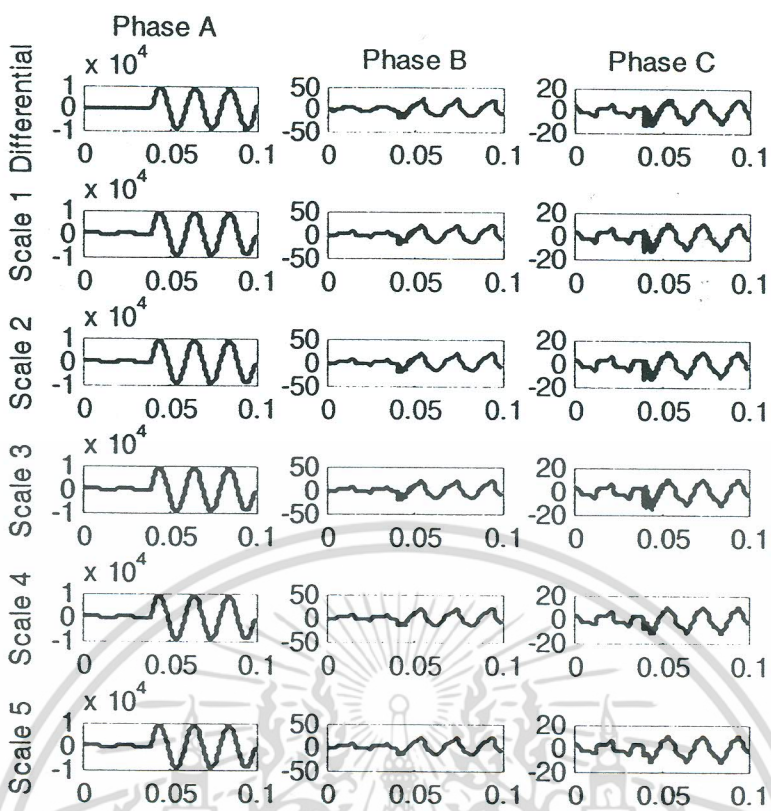
(ก) พอลต์เกิดขึ้นที่ขดลวดแรงดันสูง



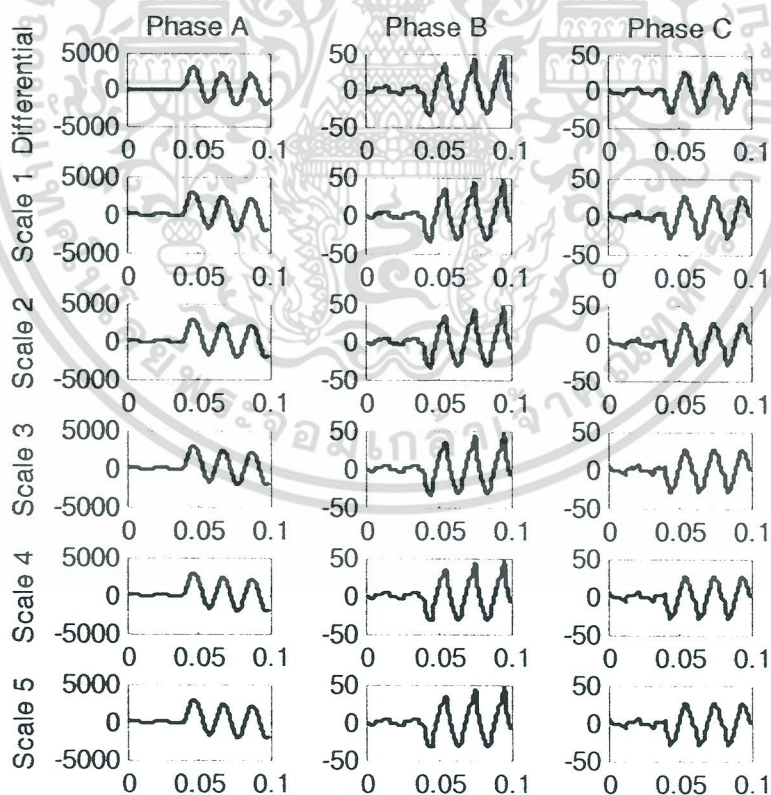
(ข) พอลต์เกิดขึ้นที่ขดลวดแรงดันต่ำ

รูปที่ 4.1 การแปลงเวฟเฟิร์มของกระแสผลต่าง กรณีพอลต์ขดลวดลัดวงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



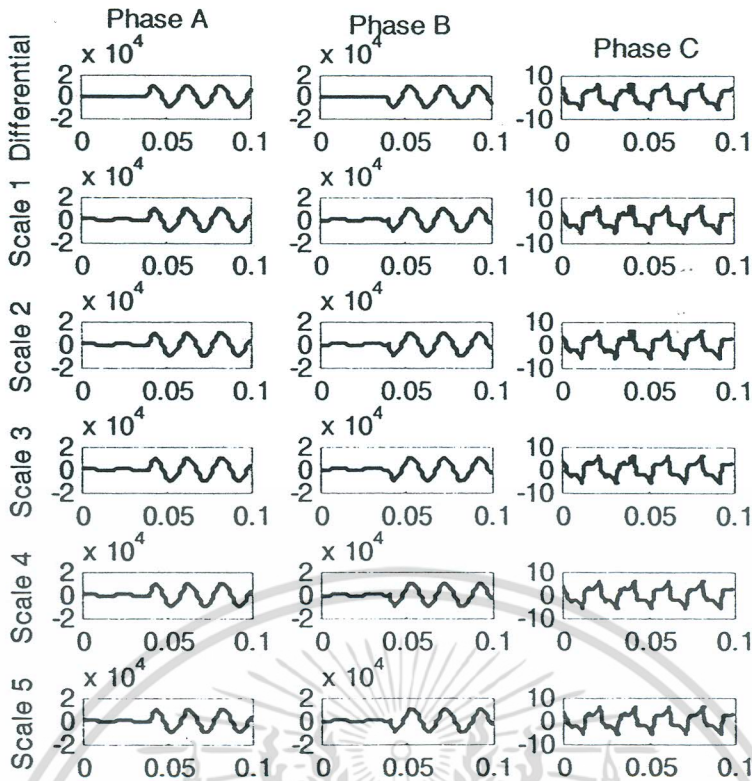
(ก) พอลต์เกิดขึ้นที่ขดลวดแรงดันสูง



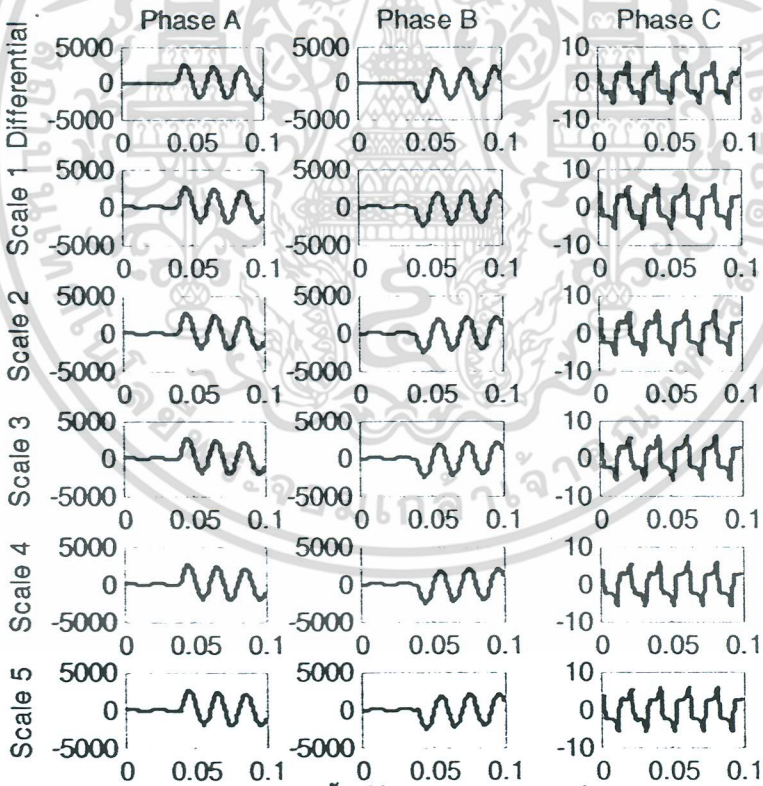
(ข) พอลต์เกิดขึ้นที่ขดลวดแรงดันต่ำ

รูปที่ 4.2 การแปลงเวฟเฟิร์มของกระแสผลต่าง กรณีพอลต์ลัดวงจรระหว่างรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ฟอลต์เกิดขึ้นที่ฝั่งขดลวดแรงดันสูง



(ข) ฟอลต์เกิดขึ้นที่ฝั่งขดลวดแรงดันต่ำ

รูปที่ 4.3 การแปลงเวฟเฟิร์มของกระแสผลต่าง กรณีฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การแบ่งแยกระหว่างฟอลต์ภายในกับภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้ จะใช้อัตราส่วนระหว่างเพอร์ยูนิตกระแสผลต่าง (per unit differential current) และเพอร์ยูนิตเวลา (per unit time) เพื่อเป็นตัวแปรเปรียบเทียบในการแยกแยะฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า โดยอัตราส่วนสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$X_{chk}^{diff} = \frac{(X_{max}^{diff} - X_{min}^{diff}) / I_{rated}}{(t_{max}^{diff-x} - t_{min}^{diff-x}) / T} \quad (4.1)$$

โดยที่

X คือ เฟส A, เฟส B, เฟส C และกระแสผลต่างลำดับศูนย์ ตามลำดับ

X_{max}^{diff} = ค่าสัมประสิทธิ์กระแสผลต่างสูงสุดในช่วง ¼ ไซเคิล

X_{min}^{diff} = ค่าสัมประสิทธิ์กระแสผลต่างต่ำสุดในช่วง ¼ ไซเคิล

t_{max}^{diff-x} = เวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเกิดขึ้นในช่วง ¼ ไซเคิล

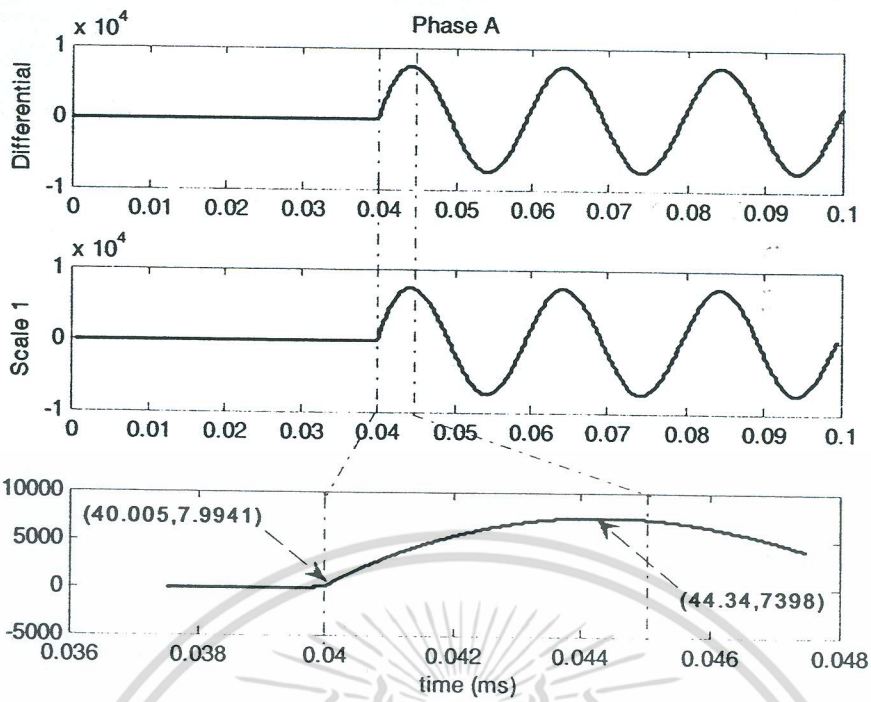
t_{min}^{diff-x} = เวลา ณ ค่าสัมประสิทธิ์ต่ำสุดเกิดขึ้นในช่วง ¼ ไซเคิล

X_{chk}^{diff} = ตัวแปรเปรียบเทียบสำหรับแยกฟอลต์ภายในและภายนอก

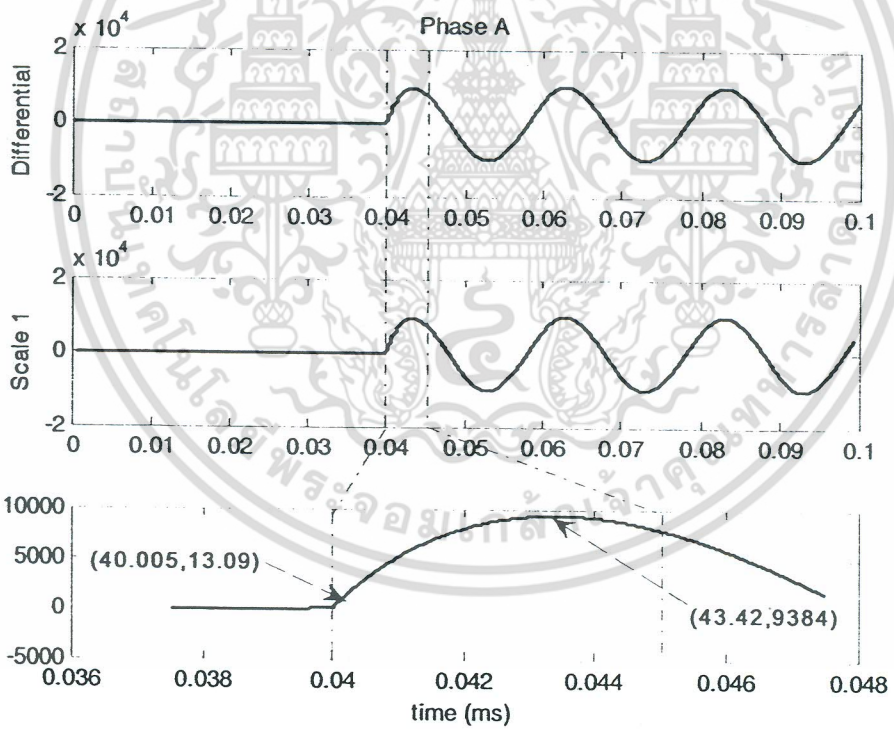
I_{rated} = พิกัดกระแสของหม้อแปลงไฟฟ้า

T = ค่าคาบเวลาการวิเคราะห์ (ในที่นี้มีค่าเท่ากับ ¼ ไซเคิล)

จากสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ต้องหาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัมประสิทธิ์กระแสผลต่างที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ดในช่วง ¼ ไซเคิลของสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation) รวมทั้งบันทึกตำแหน่งเวลา ณ ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากนั้นนำข้อมูลที่บันทึกไว้แทนลงในสมการที่ 4.1 เพื่อหาค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์กระแสผลต่างเทียบกับช่วงเวลาในแต่ละเฟส พร้อมทั้งปรับปรุงอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวให้สอดคล้องกับพิกัดของหม้อแปลงแต่ละขนาด



(ก) กรณีฟอลต์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



(ข) กรณีฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 4.4 สัญญาณกระแสผลต่างเฟส A ในช่วงข้อมูล ¼ ไซเคิล จากการแปลงเวฟได้ของสัญญาณกระแสผลต่างที่ไหลเข้าหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการแบ่งแยะระหว่างฟอลต์ภายในกับฟอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากขั้นตอนทั้งหมดเป็นลักษณะการเปรียบเทียบของค่าต่าง ๆ ดังนั้นจึงใช้ลักษณะการอธิบายด้วยลักษณะของการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในแบบสากลคือ if ... Then ...else ... end ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

```

if [( $Z_{chk}^{diff} \geq 50$ ) and ( $100 \leq A_{chk}^{diff} + B_{chk}^{diff} + C_{chk}^{diff} \leq 200$ )]
then ฟอลต์ภายในทางด้านขดลวดแรงดันสูง
else if [( $Z_{chk}^{diff} \geq 50$ ) and ( $A_{chk}^{diff} + B_{chk}^{diff} + C_{chk}^{diff} > 200$ )]
then ฟอลต์ภายนอกทางด้านขดลวดแรงดันสูง
else if [( $Z_{chk}^{diff} \leq 1$ ) and ( $A_{chk}^{diff} + B_{chk}^{diff} + C_{chk}^{diff} > 200$ )]
then ฟอลต์ภายนอกทางด้านขดลวดแรงดันสูง
else if [( $Z_{chk}^{diff} \leq 0.1$ ) and ( $50 < A_{chk}^{diff} + B_{chk}^{diff} + C_{chk}^{diff} < 100$ )]
then ฟอลต์ภายนอกทางด้านขดลวดแรงดันต่ำ
else if [( $1 \leq Z_{chk}^{diff} \leq 50$ ) and ( $5 < A_{chk}^{diff} + B_{chk}^{diff} + C_{chk}^{diff} < 50$ )]
then ฟอลต์ภายในทางด้านขดลวดแรงดันต่ำ
end

```

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนในการวิเคราะห์จึงได้ยกตัวอย่างการแยกแยะฟอลต์ภายในและภายนอก โชนป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้างแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 จากตารางทั้งสามจะเห็นได้ว่า ค่าผลรวมอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์กระแสผลต่างเป็นไปตามสมมติฐานการจำลองทั้งกรณีเกิดฟอลต์ภายในและฟอลต์ภายนอก โชนป้องกันของหม้อแปลง

ตารางที่ 4.1 ผลสรุปการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกรณีฟอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดิน

ค่าสัมประสิทธิ์	ขดลวดแรงดันสูง			ขดลวดแรงดันต่ำ		
	A	B	C	A	B	C
X_{max}^{diff}	7398	-3.4181	2.9981	517.2047	-2.9337	3.1736
X_{min}^{diff}	7.9941	-19.3668	-13.0789	1.3385	-11.7363	-5.7248
I_{max}^{diff-x}	44.34	40.32	40.32	44.52	40.005	40.005
I_{min}^{diff-x}	40.005	40.15	40.15	40.005	40.24	43.67
X_{chk}^{diff}	135.8415	7.4754	7.5355	9.1041	2.9847	0.1935
ผลรวมของอัตราส่วน	150.8524			12.2822		
ผลสรุป	Tripped			Tripped		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลสรุปการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกรณีฟอลต์ลัดวงจรระหว่างขดลวด

ค่าสัมประสิทธิ์	ขดลวดแรงดันสูง			ขดลวดแรงดันต่ำ		
	A	B	C	A	B	C
X_{max}^{diff}	9204	-3.5771	2.6769	2580.1	-2.977	3.1172
X_{min}^{diff}	8.0698	-19.4902	-14.0205	1.4192	-33.6105	-28.8653
t_{max}^{diff-x}	44.58	40.11	40.11	45.005	40.005	40.005
t_{min}^{diff-x}	40.005	40.62	44.13	40.005	44.95	44.20
X_{chk}^{diff}	160.1682	2.4862	0.331	41.0945	0.4936	0.6075
ผลรวมของอัตราส่วน	162.9854			42.1956		
ผลสรุป	Tripped			Tripped		

ตารางที่ 4.3 ผลสรุปการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกรณีฟอลต์ภายนอกโซนป้องกัน

ค่าสัมประสิทธิ์	ขดลวดแรงดันสูง			ขดลวดแรงดันต่ำ		
	A	B	C	A	B	C
X_{max}^{diff}	9384	-14.7625	5.9716	2552	-4.0516	5.6688
X_{min}^{diff}	13.0905	-9383	-2.6341	2.3804	-2548	-2.4921
t_{max}^{diff-x}	43.42	40.005	41.58	45.005	40.005	41.75
t_{min}^{diff-x}	40.005	43.41	44.97	40.005	45.005	44.98
X_{chk}^{diff}	218.6485	219.2308	0.2023	40.6345	40.5423	0.2013
ผลรวมของอัตราส่วน	438.0816			81.3782		
ผลสรุป	UnTripped			UnTripped		

เพื่อแสดงให้เห็นว่า วิธีที่ได้เสนอมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของฟอลต์ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร รวมไปถึงมุมเริ่มเกิดฟอลต์ในแต่ละชนิดฟอลต์ของหม้อแปลงทดสอบ ทั้งสองด้านตามลำดับ โดยผลสรุปทั้งหมดที่ได้รับจะแสดงในบทสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

ในโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย และนำผลที่ได้มาประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการวิเคราะห์หาค่าการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่อยู่ในสัญญาณพอลต์ โดยสัญญาณพอลต์ที่ใช้ในการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งอาศัยแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่สถานีไฟฟ้ามหาสารคาม (MK) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจำลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของพอลต์ในหลายรูปแบบที่อัตราการสุ่ม 200 kHz

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ โดยทำวิเคราะห์และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่อยู่ในสัญญาณพอลต์ และผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นถูกนำมาประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจจับพอลต์ที่เกิดขึ้นภายในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

3. รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจในการแยกประเภทพอลต์ที่เกิดขึ้นนั้นทำได้โดยจะใช้อัตราส่วนระหว่างเพอร์ยูนิตกระแสผลต่าง (per unit differential current) และเพอร์ยูนิตเวลา (per unit time) เพื่อเป็นตัวแปรเปรียบเทียบในการแยกแยะพอลต์ภายในและพอลต์ภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนในการวิเคราะห์ว่า วิธีที่ได้เสนอมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของพอลต์ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร รวมไปถึงมุมเริ่มเกิดพอลต์ในแต่ละชนิดพอลต์ของหม้อแปลงทดสอบทั้งสองด้านตามลำดับ โดยผลสรุปทั้งหมดที่ได้รับจะแสดงในตารางที่

5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการแยกระหว่างพอลต์ภายในและพอลต์ภายนอก

ประเภทพอลต์	พอลต์ขดลวดลัดวงจรลงดิน		พอลต์ระหว่างขดลวด		พอลต์ภายนอก
	ด้านแรงดันสูง	ด้านแรงดันต่ำ	ด้านแรงดันสูง	ด้านแรงดันต่ำ	
จำนวนกรณีศึกษา	324	324	1296	1296	360
ค่าเฉลี่ยความถูกต้อง	100%	94.44%	100%	83.33%	99.44%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อวิเคราะห์เปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นในสัญญาณพอลต์ โดยใช้ช่วงของข้อมูลในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิล ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบความถี่ต่ำนั้นสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับสัญญาณพอลต์ได้อย่างถูกต้องและลดจำนวนข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ ดังนั้น วิธีที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้กับระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเช่น อุปกรณ์รีเลย์ ซึ่งรูปแบบของวิธีการที่นำเสนอนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มของเทคโนโลยีที่กำลังดำเนินอยู่ในปัจจุบันได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำการแปลงเวฟเล็ตไปประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังได้อีกหลายอย่างด้วยกัน เช่น การวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ในระบบสายส่ง และวิเคราะห์และแยกความแตกต่างระหว่างสัญญาณกระแสอินรัชกับสัญญาณพอลต์ในหม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรภายใน เป็นต้น ซึ่งเป็นการขยายขอบเขตของงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้ากำลังให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.H. Horowitz and A.G. Phadke, Power system relaying, John Wiley & Sons INC, 1992.
- [2] A.G. Phadke and J.S. Thorp, "A new computer-based flux restrained current-differential relay for power transformer protection," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, pp.3624-3629, November 1983.
- [3] Y.Zhang, X.Ding, Y.Liu and P.J. Griffin, "An artificial neural network approach to transformer fault diagnosis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1836-1841, October 1996.
- [4] Patrick Bastard, Pierre Bertrand, Michel Meunier, "A transformer model for winding fault studies,," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 9, Issue 2, April 1994, pp. 690 – 699.
- [5] N. S. D. Brito, B. A. Souza and F. A. C Pires, "Daubechies wavelets in Quality of Electrical Power," *Proc. IEEE/PES ICHQP, Greece*, pp. 511-515, Oct 1998.
- [6] C. H. Kim and R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients,," *IEEE Power Engineering Journal*, pp. 193-202, 2001.
- [7] Bo Z.Q, F Jiang, Z. Chen, X. Z. Dong, G. Weller, M. A. Redfern, "Transient based protection for power transmission systems," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* , vol. 3, pp. 1832 –1837, 2000.
- [8] M.G. Morante and D.W. Nocoletti, "A wavelet-based differential transformer protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp.1352-1358, October 1999.
- [9] Zhonghao Yang, J.Z. Liu, Dong Xinzhou, Jiang, F.Jiang, Z.Q. Bo, N.F. Chin, "A new technique for power transformer protection using discrete dyadic wavelet transform,," *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE)* , 9-12 April 2001 , Pages:383 – 386.
- [10] P.L. Mao, R.K. Aggarwal, "A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network," *Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 16, Issue 4, Oct. 2001*, pp. 654 – 660.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] P. Purkait and S. Chakravorti, "Wavelet transform-based impulse fault pattern recognition in distribution transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1588-1589, October 2003.
- [12] H. Khorashadi-Zadeh, M. Sanaye-Pasand, "Power transformer differential protection scheme based on wavelet transform and artificial neural network algorithms," *Universities Power Engineering Conference*, 2004. UPEC 2004. 39th International, Volume 2, 6-8 Sept. 2004, pp. 747 – 752.
- [13] Sng Yeow Hon and Wang Qin, "A wavelet-based method to discriminate between inrush current and internal fault,." *Power System Technology*, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on , Volume: 2 , 4-7 Dec. 2000 Pages:927 - 931 vol.2
- [14] O.A.S. Youssef, "A wavelet-base technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers,." *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 170-176, January 2003.
- [15] ANSI/IEEE C37.91-1985. "IEEE Guide for Protection Relay Applications to Power Transformers" March 1985.
- [16] H. W. Dommel. *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. University of British Columbia, Vancouver Canada. August 1986.
- [17] P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier, "A transformer model for winding fault studies." *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, April 1994, pp. 690 – 699.
- [18] Report Prepared by the Switching Transients Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, "Modeling Guidelines for Switching Transients,." pp. 12-13
- [19] EGAT(1999). *Switching and Transmission Line Diagram*, EGAT Press.
- [20] ABB Thailand, Test report no. 56039.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้รับจากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สจล.

1. ผลงานวิจัย/ผลผลิตที่ได้จากการทำวิจัย และมี Impact ต่อสังคม, ประเทศชาติ

1. โครงการวิจัยนี้เป็นการรวมกันของวิทยาการด้านต่างๆ คือ กระบวนการประมวลสัญญาณ ทฤษฎีระบบป้องกัน และ วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง เข้าด้วยกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกันของนักวิจัยในสาขาดังกล่าว ทั้งในด้านการแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็น นับเป็นการพัฒนายกระดับงานวิจัยของประเทศ
2. การศึกษาวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ นับได้ว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนผู้สนใจอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป

2. การนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้

1. วิธีวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงไฟฟ้าแนวใหม่โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบความถี่ต่ำที่ได้จากสัญญาณฟอลต์แบบทรานเซียนต์ ซึ่งช่วยลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง จะส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาลดลงตามไปด้วย
2. สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตและการใช้ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ตไปประยุกต์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้โดยการนำปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ร่วมด้วย

3. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร หรือผลงานตามที่คาดไว้ในโครงการวิจัย

3.1 การนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ นำเสนอบทความในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งสิ้น 1 บทความ (ภาคผนวก ข)

1. C. Jettanasen and A. Ngaopitakkul, "The spectrum comparison technique of DWT for discriminating between external fault and internal fault in power transformer" In *Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011)*, Hongkong, July 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างบทความประชุมวิชาการระดับนานาชาติที่ได้นำเสนอในที่ ประชุมระดับนานาชาติ

1. C. Jettanasen and A. Ngaopitakkul, "The spectrum comparison technique of DWT for discriminating between external fault and internal fault in power transformer" *In Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering (ICEE2011)*, Hongkong, July 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The spectrum comparison technique of DWT for discriminating between external fault and internal fault in power transformer

C. Jettanasen

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
kjchaiya@kmitl.ac.th

A. Ngaopitakkul

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
knatthap@kmitl.ac.th

Abstract

This paper proposes a technique for detecting and identifying internal winding fault of three-phase two-winding transformer. A spectrum component obtained from DWT of differential current is analyzed. A ratio between per unit differential current and per unit time is calculated and performed as comparison indicator in order to discriminate between internal fault condition and external fault condition. Various cases based on Thailand electricity transmission and distribution systems are studied to verify the validity of the proposed algorithm. Results show that the proposed technique has good accuracy to detect fault and to identify its position in the considered system.

Keywords

Power Transformer, external fault, internal fault, discrete wavelet transform

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 [1-10]. Most of them have different solutions and techniques. An application of a finite impulse response ANN (FIRANN) as differential protection for a three-phase power transformer is proposed in [1]. In [2], the paper describes a new approach for transformer differential protection that ensures security for external faults, inrush, and over-excitation conditions and provides dependability for internal faults. A new relaying fuzzy logic algorithm to enhance the fault detection sensitivities of conventional techniques is proposed in [3]. The relaying algorithm consists of flux-differential current derivative curve, harmonic restraint, and percentage differential characteristic curve. In [4], a new algorithm based on processing differential current harmonics is proposed for digital differential protection of power transformers. This algorithm has been developed by considering different behavior of second harmonic components of the differential currents under fault and inrush current conditions. In [5], the paper describes a new approach for transformer differential protection that ensures security for external faults, inrush and over-excitation conditions and provides dependability

for internal faults. As a result, most research works are interested in only the effects from magnetizing inrush current and the discrimination between magnetizing inrush current and internal faults [1-8], and etc.

In addition, wavelet transform has been reported in the literature [6]. The idea of application of wavelet transform to fault diagnosis is not new, and there is a number of research papers related to this idea [9-11]. The advantage of the wavelet transform is that the band of analysis can be fine adjusted so that high frequency components and low frequency components are detected precisely. Results from the wavelet transform are shown both in time domain and in frequency domain. In previous research works [9], an analysis of the spectrum of the transient current signal is performed in order to determine whether the current is a fault or a magnetizing inrush current. The approximated signal of DWT is then employed in the algorithm for a decision unit in the protection scheme.

Therefore, 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 wavelet transform as an alternative or improvement to the existing protective relaying functions. The construction of the decision algorithm is detailed and implemented with various case studies based on Thailand electricity transmission and distribution systems.

2. Wavelet transform

The wavelet transform is a tool that cuts up data or functions or operators into different frequency components, and then studies each component with a resolution matched to its scale. The advantage of the transform is that the band of analysis can be fine adjusted so that high frequency components and low frequency components are detected precisely. Results from the wavelet transform are shown both in time domain and in frequency domain. The wavelet transform, which has a change in the analysis scaled by the factor of two, is called discrete wavelet transform (DWT) as shown in Equation 1.

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

where,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3. Power System Simulation using EMTP

For a computational model of a two-winding three-phase transformer, which has primary and secondary windings in each phase, BCTRAN is a well-known subroutine in ATP/EMTP. To study internal faults of the transformer, Bastard et al proposed modification of the BCTRAN subroutine.

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

- 1st step: Compute matrices [R] and [L] with a size of 6x6 to represent a power transformer from manufacture test data [12] without considering the internal faults.
- 2nd step: Modify matrix of [R] and [L] to be a size of 7x7 for winding to ground faults and of 8x8 for interturn faults.
- 3rd 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.

After transformer model had been modified, the ATP/EMTP program was employed to simulate the transients of fault signals, at a sampling rate of 200 kHz. A 50 MVA, 115/23 kV two-winding three-phase transformer was employed in simulations with all parameters and configuration provided by a manufacturer [12-13]. The scheme under investigations is a part of Thailand electricity transmission and distribution system as depicted in Figure 1 [13-14]. To implement the transformer model, simulations were performed with various changes of system parameters as follows:

- The angles on phase A voltage waveform for the instants of fault inception were 0°-330° (each step is 30°).
- Two types for internal faults at the transformer windings (both primary and secondary), winding to ground faults and interturn faults, were investigated.
- For the winding to ground faults, the fault positions were designated on any phases of the transformer windings at the length of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90%.
- For the interturn faults, the position of point a on the transformer winding, as shown in Fig. 1, was varied at the length of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% and 80%.
- Fault resistance was 5 Ω.

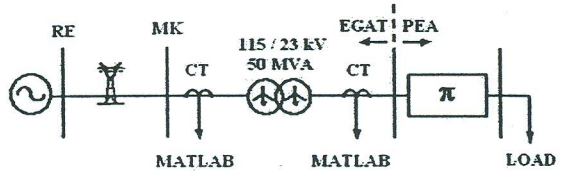


Figure 1. The system used in simulations studies [13].

For simulations of external faults 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° and 210°.
- 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 Ω.

4. Decision Algorithm and Result

From the simulated signals, DWT is applied to the quarter cycle of current waveforms after the fault inception. In addition, fault signals generated by ATP/EMTP are employed to decompose high frequency components from the simulated current signals using mother wavelet daubechies4 (db4) [14-15]. Examples of the approximated signal of the extracted waveform using DWT for the differential currents from scale1 to scale 5 are illustrated in Figures 2-4.

In case of internal fault condition, the differential current waveforms obtained for winding to ground fault are shown in Figure 2 whereas cases of interturn fault are shown in Figure 3. Figure 4(a) illustrates an example of an extraction using DWT for the differential currents current from scale1 to scale 5 for a case of external fault at high voltage side while case of external fault at low voltage side is shown in Figure 4(b). The similarity between the internal and the external fault signals waveforms as shown in Figures 2-4 can be obviously seen so that the spectrum comparison technique of DWT is considered.

A ratio between per unit differential current and per unit time is calculated and performed as comparison indicator in order to discriminate between the internal fault condition and the external fault condition. The ratio is calculated as follow:

$$X_{chk}^{diff} = \frac{(X_{max}^{diff} - X_{min}^{diff}) / I_{rated}}{(X_{max}^{diff-x} - X_{min}^{diff-x}) / T} \quad (1)$$

where,

X_{max}^{diff} = the maximum coefficient from the approximated of DWT for differential signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X_{min}^{diff} = the minimum coefficient from the approximated differential signal of DWT
 t_{max}^{diff-x} = the time at which the maximum coefficient of the approximated differential signal occurs
 t_{min}^{diff-x} = the time at which the minimum coefficient of the approximated differential signal occurs

X_{chk}^{diff} = comparison indicator for separation between internal fault condition and external fault condition
 I_{rated} = rated current of the power transformer
 T = the period of the power frequency of the system

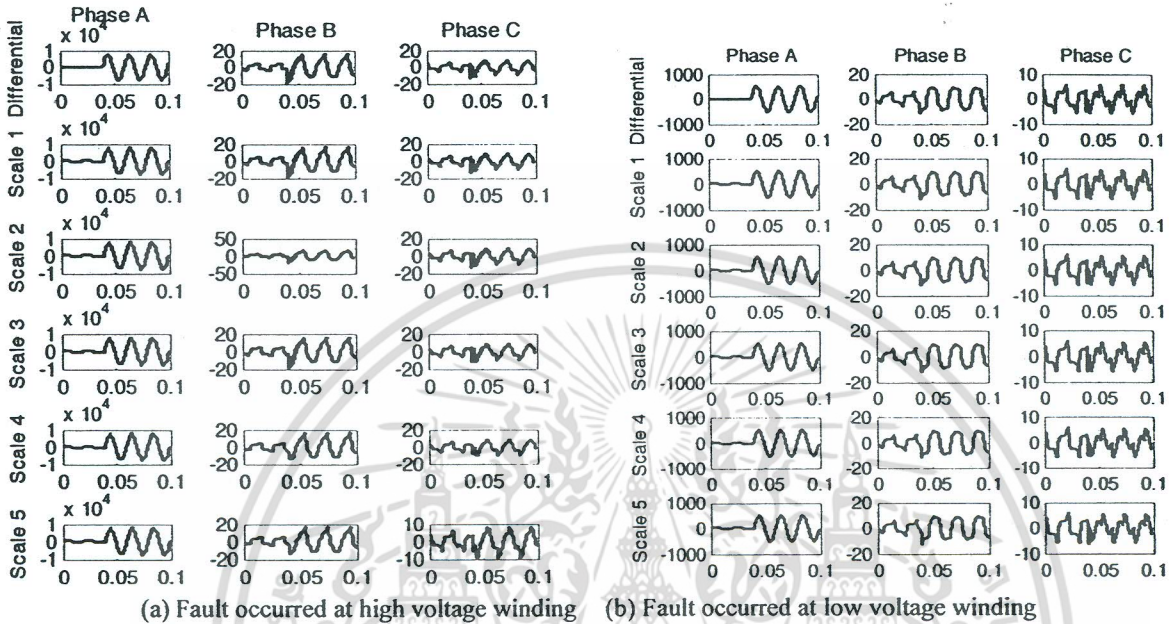


Figure 2. Wavelet transform of differential currents for internal fault case (Winding phase A to ground fault at 10% of length of the winding)

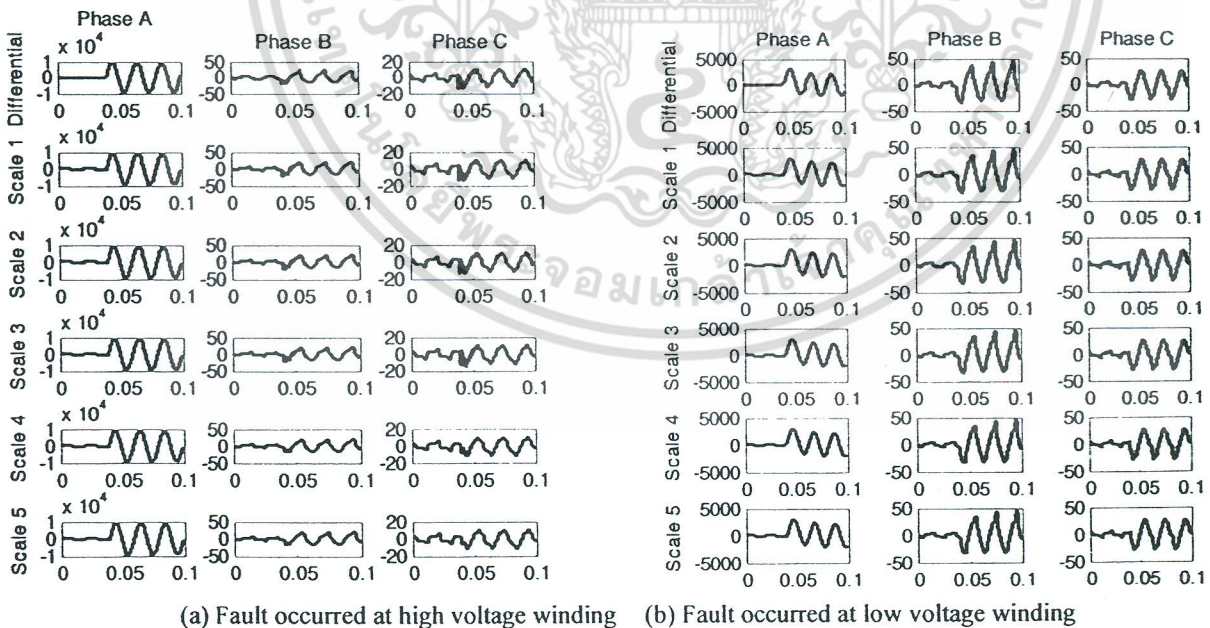


Figure 3. Wavelet transform of differential currents for internal fault case (Interturn phase A fault between 10% and 20% of length of the winding.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 Result of identifying for case of winding to ground fault

Coefficient of DWT	High voltage winding			Low voltage winding		
	A	B	C	A	B	C
X_{max}^{diff}	7398	-3.4181	2.9981	517.2047	-2.9337	3.1736
X_{min}^{diff}	7.9941	-19.3668	-13.0789	1.3385	-11.7363	-5.7248
t_{max}^{diff-x}	44.34	40.32	40.32	44.52	40.005	40.005
t_{min}^{diff-x}	40.005	40.15	40.15	40.005	40.24	43.67
X_{chk}^{diff}	135.8415	7.4754	7.5355	9.1041	2.9847	0.1935
Sum of Ratio	150.8524			12.2822		
Result	Tripped			Tripped		

Table 2 Result of identifying for case of interturn fault

Coefficient of DWT	High voltage winding			Low voltage winding		
	A	B	C	A	B	C
X_{max}^{diff}	9204	-3.5771	2.6769	2580.1	-2.977	3.1172
X_{min}^{diff}	8.0698	-19.4902	-14.0205	1.4192	-33.6105	-28.8653
t_{max}^{diff-x}	44.58	40.11	40.11	45.005	40.005	40.005
t_{min}^{diff-x}	40.005	40.62	44.13	40.005	44.95	44.20
X_{chk}^{diff}	160.1682	2.4862	0.331	41.0945	0.4936	0.6075
Sum of Ratio	162.9854			42.1956		
Result	Tripped			Tripped		

Table 3 Result of identifying for case of external fault

Coefficient of DWT	High voltage winding			Low voltage winding		
	A	B	C	A	B	C
X_{max}^{diff}	9384	-14.7625	5.9716	2552	-4.0516	5.6688
X_{min}^{diff}	13.0905	-9383	-2.6341	2.3804	-2548	-2.4921
t_{max}^{diff-x}	43.42	40.005	41.58	45.005	40.005	41.75
t_{min}^{diff-x}	40.005	43.41	44.97	40.005	45.005	44.98
X_{chk}^{diff}	218.6485	219.2308	0.2023	40.6345	40.5423	0.2013
Sum of Ratio	438.0816			81.3782		
Result	UnTripped			UnTripped		

TABLE 4 Summary of results from all simulations

Fault types	Winding to ground faults		Interturn faults		External faults
	HV side	LV side	HV side	LV side	
Number of cases studies	324	324	1296	1296	360
Detection accuracy	100%	94.44%	100%	83.33%	99.44%

The proportion of the spectral differential current signal, calculated between maximum and minimum value in a quarter cycle period of an analysis data, and the time deviation are shown in Figure 5 and Figure 6. Results illustrated from Tables 1 to 3 are obtained from one case of each type of faults as shown in Figures 2-4. When all conditions as stated in the section 4 are

applied, the total number of case studies is 628 for winding to ground faults, 2592 for interturn faults, and 360 for external faults. The accuracy of the proposed decision algorithm for all case studies is shown in Table 4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. CONCLUSION

A technique using discrete wavelet transform in order to discriminate between internal fault condition and external fault condition has been proposed. Daubechies4 (db4) is employed as mother wavelet in order to decompose low frequency components from fault signals. A ratio between per unit differential current and per unit time is calculated and performed as comparison indicator. Various case studies have been done including the variation of fault inception angles and fault types. It is shown that the proposed technique can detect and indicate the internal and external faults with the accuracy higher than 83.33% as presented in Table 4. In addition, the proposed technique uses data of the differential current with a time of a quarter cycle for the analysis, which is less than that employed in a conventional protection scheme.

Acknowledgements

This work was supported in part by a grant from the faculty of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand. The authors would like to thank then for this financial support.

References

- [1] A. L. Orille-Fernandez, N. K. I. Ghonaim, J. A. Valencia, A FIRANN as a Differential Relay for Three-Phase Power Transformer Protection, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.16, 2001:p215–218.
- [2] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, H. J. Altuve, A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection II. Relay Description and Evaluation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.17, 2002:p886–893.
- [3] Myong-Chul Shin; Chul-Won Park; Jong-Hyung Kim, Fuzzy Logic-Based Relaying for Large Power Transformer Protection, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.18, 2003:p718–724.
- [4] M. E. Hamedani Golshan, M. Saghaian-nejad, A. Saha, H. Samet, A New Method for Recognizing Internal Faults from Inrush Current Conditions in Digital Differential Protection of Power Transformers, *Electric Power Systems Research*, Vol.71, 2004:p61–71.
- [5] G. Baoming, A.T. De'Almeida, Q. Zheng, X. Wang, An Equivalent Instantaneous Inductance-based Technique for Discrimination Between Inrush Current and Internal Faults in Power Transformers, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, 2005:p2473–2482.
- [6] O. A. S. Youssef, Discrimination Between Faults and Magnetizing Inrush Currents in Transformers Based on Wavelet Transforms, *Electric Power Systems Research*, Vol.63, 2002:p87–94.
- [7] A.M. Gaouda, M.M.A. Salama, DSP Wavelet-Based Tool for Monitoring Transformer Inrush Currents and Internal Faults, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, 2010:p1258 – 1267.
- [8] A. Guzman, H. Altuve, D. Tziouvaras, Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays, *CIGRE Study Committee B5—Protection and Automation*, 2005.
- [9] 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:p871 – 874.
- [10] Yang Long, Li Donghui, Research on Differential Protection of Power Transformer Based Wavelet Transform, *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2009:p95 – 97.
- [11] V.K. Garlapati, P. Chattopadhyay, Impact of mother wavelet on the performance of Wavelet-Neural Network (WNN) based transformer protection, *India Conference (INDICON)*, 2010:p 1-4.
- [12] ABB Thailand, Test report no. 56039.
- [13] *Switching and Transmission Line Diagram* (Electricity Generation Authorisation Thailand, 2002).
- [14] 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, 2006:p365-371.
- [15] N. S. D. Brito, B. A. Souza and F. A. C. Pires, Daubechies wavelets in Quality of Electrical Power, *Proc. IEEE/PES ICHQP*, 1998:p511-515.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ ชื่อ(ภาษาไทย) ดร.ชัยยันต์ เจตนาแสน

(ภาษาอังกฤษ) Chaiyan Jettanasen, Ph.D.

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน -

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-329-8330 โทรสาร 02-329-8330 Email
kjchaiya@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาเอก Ph.D. of Electrical Engineering (Docteur en Génie Electrique), Ecole Centrale de Lyon, France ปีที่จบ พ.ศ.2551

- ปริญญาตรี-โท Master of Electrical Engineering (Master de Recherche en Génie Electrique) / Diploma of Electrical Engineering (Diplôme d'ingénieur), Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France ปีที่จบ พ.ศ. 2548

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

EMI/EMC in power electronic systems, ESD in electric/electronic system, Conversion of electrical energy, Power electronics

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

Oct 2009 – Sep 2010 Head of Research Project Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

2. ชื่อ(ภาษาไทย) ดร.อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

(ภาษาอังกฤษ) Atthapol Ngaopitakkul, Ph.D.

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 5849990003908

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-326-4550 โทรสาร 02-326-4550 Email
knatthap@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติการศึกษา

B.Eng (Electrical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology

Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2002

M.Eng (Electrical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology

Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2004

D.Eng (Electrical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology

Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2007

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

Power System Protection, Application of Wavelet Transform to power system protection,
Artificial Neural Networks

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

Dec 2009 – Present	Head of Research Project “An Application of Discrete Wavelet Transform and Artificial Intelligent Algorithm for Simultaneous Fault Diagnosis in Electrical Power Transmission Systems” {Supported by the King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Fund, Thailand}
Oct 2009 – Sep 2010	Head of Research Project “Fault Diagnosis in Underground Cable Systems using Discrete Wavelet Transform” {Supported by the Faculty of Engineering Fund, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้