

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

Fault Diagnosis in Underground Cable Systems using Wavelet Transform

คณะผู้วิจัย

ดร. อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล

หัวหน้าโครงการ

อ. ชายชาญ โปธิสาร

ผู้ร่วมวิจัย

RCH

TK

1001

0359ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 114482
วัน,เดือน,ปี. 20 ส.ค. 2554

สนับสนุนโดย ทุนวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2553

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทคัดย่อ

การป้องกันสายส่งเป็นหนึ่งในงานสำคัญที่ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง ทัศนญาณฟอลต์ทรานเซียนต์ในสายส่งต้องการที่จะตรวจจับ, แบ่งประเภทและระบุตำแหน่งอย่างถูกต้องและขจัดฟอลต์อย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสำหรับวินิจฉัยฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนในสายส่งใต้ดิน การจำลองรูปแบบฟอลต์ผ่านโปรแกรม ATP/EMTP โดยใช้แบบจำลองสายส่งที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังเกิดฟอลต์ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ เวฟเล็ตแม่ชนิด daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงจากสัญญาณกระแสฟอลต์ เวลาที่ตรวจจับฟอลต์ในสเกลแรกขององค์ประกอบลำดับบวกลูกนำมาใช้สำหรับทฤษฎีคลื่นเดินทางเพื่อระบุตำแหน่งฟอลต์ การระบุชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นทำได้โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยในแต่ละเฟส วิธีที่นำเสนอเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์เนื่องจากให้ผลสรุปที่น่าพอใจ กล่าวคือ การหาตำแหน่งฟอลต์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 0.4 กิโลเมตร และการระบุชนิดฟอลต์ที่เกิดขึ้นมีความถูกต้องมากกว่า 90%

Abstract

Protecting transmission lines is one important task to safeguard electric power systems. The transient fault signal on transmission lines need to be detected, classified and located accurately and cleared as fast as possible. This research present an application of a discrete wavelet transforms (DWT) for fault diagnosis in underground cable system. Fault simulations are carried out using ATP/EMTP program, with a frequency-dependent transmission line model. Post-fault current signals are used in the analysis. The mother wavelet daubechies4 (db4) is employed to decompose, high frequency component from the current fault signals. The time of positive sequence in first scale for detecting fault was used an input for travelling wave in order to identifying fault location. The comparisons of the coefficients DWT have been performed in order to classify fault types. The coefficients detail (phase A, B, C and zero sequence of post-fault current signals) of DWT at the first peak time that positive sequence current can detect fault, are performed as comparison indicator. The results are shown that the wavelet transform is a powerful tool and gives satisfactory results. Errors in fault location obtained from proposed technique are 0.4 km. In addition, the proposed algorithm can indicate fault types with the accuracy higher than 90%.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงได้อย่างด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจากบุคคลและเจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณสิริโรจน์ ใจขาน จากการไฟฟ้านครหลวงประเทศไทย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้ในการศึกษาและวิจัยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ของสถาบันฯ ประจำปี 2553 ตลอดจนเจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัยของสถาบันที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และได้ให้คำแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บุคคลที่มีความสำคัญยิ่งได้แก่ คุณพ่อ และคุณแม่ ผู้ซึ่งเป็นบิดาและมารดาที่ได้มอบการอบรมสั่งสอนและสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนตั้งแต่อดีตจวบจนถึงปัจจุบัน รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ชีวิตและอบรมความรู้จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสดำเนินโครงการวิจัยฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา | 2 |
| 1.5 ระเบียบวิธีวิจัย..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง..... | 4 |
| 2.1.1 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)..... | 4 |
| 2.2 การวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต..... | 6 |
| 2.2.1 การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform : WT)..... | 7 |
| 2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) | 7 |
| 2.2.1.2 การสเกล (Scaling) | 8 |
| 2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting) | 9 |
| 2.2.1.4 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ต (Decomposition and reconstruction of Wavelet)..... | 9 |
| 2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) | 10 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์ | 11 |
| 3.1 การจำลองฟอลต์ | 11 |
| 3.1.1 แบบจำลองในการจำลองสัญญาณฟอลต์ | 11 |
| 3.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต | 13 |
| 3.2.1 การตรวจจับ | 14 |
| 3.3 ทฤษฎีการหาจุดกำเนิดฟอลต์..... | 16 |
| 3.4 การระบุประเภทฟอลต์..... | 18 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | 26 |
| 4.1 รูปแบบการนำเสนอ | 26 |
| 4.1.1 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง | 26 |
| 4.2 ผลการทดลอง | 26 |
| 4.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร) | 27 |
| 4.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 8 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร) | 29 |
| 4.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 17 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร) | 31 |
| 4.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 28.5 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร) | 33 |
| | |
| บทที่ 5 บทสรุป | 35 |
| | |
| เอกสารอ้างอิง | 40 |
| | |
| ภาคผนวก ก | 41 |
| | |
| ภาคผนวก ข | 48 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค50

ภาคผนวก ง63

ภาคผนวก จ69

ประวัติผู้จัดทำโครงการวิจัย75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 แสดงเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบ | 19 |
| 3.2 แสดงผลจากการจำลองที่จุดเกิดฟอลต์ต่างๆ..... | 18 |
| 3.3 แสดงผลจากการจำลองที่มุมเกิดฟอลต์ต่างๆ..... | 19 |
| 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 ที่ตำแหน่งเกิดฟอลต์ต่างๆ..... | 20 |
| 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 ที่มุมเริ่มต้นเกิดฟอลต์ต่างๆ..... | 20 |
| 3.6 ผลการตรวจจับฟอลต์ที่ได้ ด้าน Sending end..... | 24 |
| 3.7 ผลการตรวจจับฟอลต์ที่ได้ ด้าน Receiving end..... | 24 |
| 5.1 ความคลาดเคลื่อนในระบุตำแหน่งฟอลต์ | 37 |
| 5.2 สรุปความถูกต้องในการระบุชนิดฟอลต์..... | 38 |



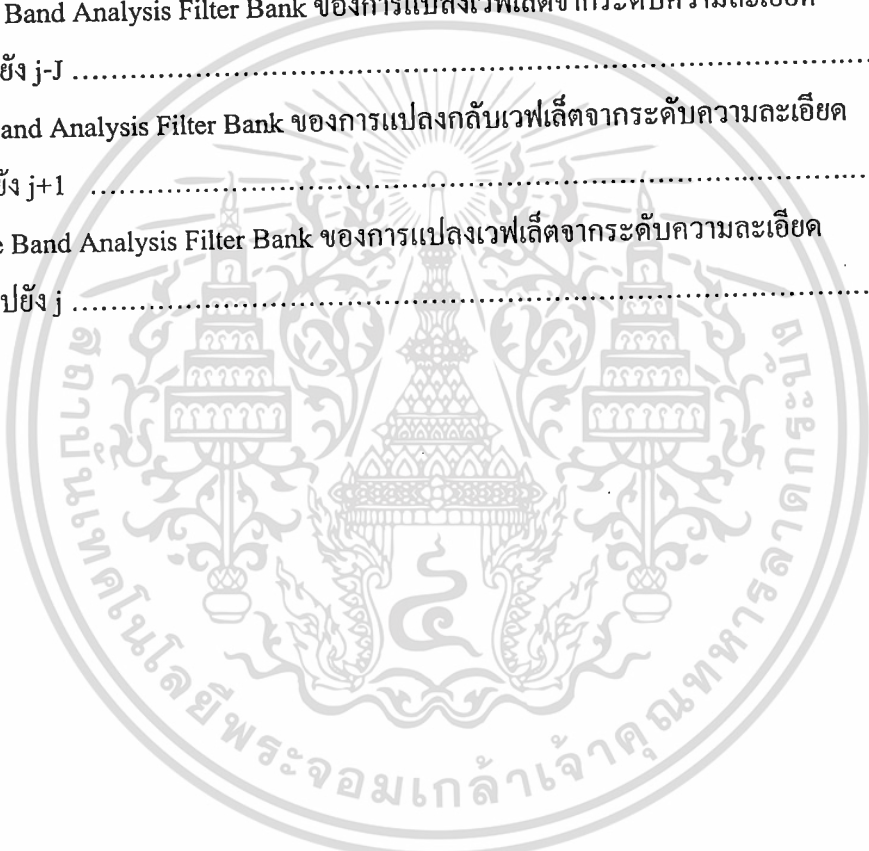
สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงการติดตั้งและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay) | 4 |
| 2.2 แสดงระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) การทำงานของรีเลย์ระยะทาง | 5 |
| 2.3 แสดงการวิเคราะห์แรงดันและกระแสด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสถานะที่เกิดฟอลต์ | 5 |
| 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเล็ทแบบ Morlet | 7 |
| 2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์ | 8 |
| 2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ท | 8 |
| 2.7 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ท | 9 |
| 2.8 แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ท | 9 |
| 2.9 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ท | 10 |
| 3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง..... | 11 |
| 3.2 ขนาดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง..... | 12 |
| 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 150° ฟัง Sending..... | 12 |
| 3.4 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 150° ฟัง Receiving..... | 13 |
| 3.5 รูปคลื่นเวฟเล็ทยกกำลังสองฟัง Sending end..... | 15 |
| 3.6 รูปคลื่นเวฟเล็ทยกกำลังสองฟัง Receiving end..... | 16 |
| 3.7 ค่าคลื่นสูงสุดด้าน A ที่เวลา Ta ค่าคลื่นสูงสุดด้าน B ที่เวลา Tb | 17 |
| 3.8 แสดงรูปคลื่นเวฟเล็ท ตั้งแต่สเกลที่ 1 – 5 ที่ได้จากแต่ละเฟส..... | 19 |
| 3.9 แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดส่วนประกอบลำดับบวกหารด้วยสัมประสิทธิ์ สูงสุดส่วนประกอบลำดับศูนย์..... | 20 |
| 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ และการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร | 27 |
| 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ และการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 8 กิโลเมตร | 29 |
| 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ และการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 17 กิโลเมตร | 31 |
| 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ และการระบุประเภทฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 28.5 กิโลเมตร | 33 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ช

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับพอลต์ในแต่ละมุมเริ่มเกิดพอลต์..... | 36 |
| 5.2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสำหรับการระบุตำแหน่งพอลต์ประเภท | 37 |
| 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุชนิดพอลต์แต่ละประเภท..... | 38 |
| ก1 Two-Band Analysis Filter Bank ของการแปลงเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด | |
| j+1 ไปยัง j | 43 |
| ก2 Octave Band Analysis Filter Bank ของการแปลงเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด | |
| j ไปยัง j-J | 43 |
| ก3 Two-Band Analysis Filter Bank ของการแปลงกลับเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด | |
| j ไปยัง j+1 | 47 |
| ก4 Octave Band Analysis Filter Bank ของการแปลงเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด | |
| j-J ไปยัง j | 47 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การตรวจสอบการเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ และมีความจำเป็นในระบบอุตสาหกรรม และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันอย่างมาก การตรวจจับฟอลต์ที่เกิดในสายส่งได้อย่างถูกต้องนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเอื้ออำนวยต่อการซ่อมบำรุงสายที่ชำรุดให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิม สายส่งไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable) เป็นรูปแบบการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าที่เป็นที่นิยม การส่งเสริมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือสูง อีกทั้งยังไม่ทำลายทรัพยากรธรรมชาติมากเท่าสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead)

รูปแบบการระบุจุดเกิดฟอลต์ในสายส่งใต้ดินนั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น รูปแบบการหาฟอลต์ในเคเบิลอายุการใช้งานสูง [1] การใช้คลื่นแม่เหล็ก [2] เป็นต้น อีกทั้งยังมีการตรวจหาฟอลต์บริเวณขั้วสายเป็นวิธีการที่แตกต่างออกไป มักใช้เป็นวงจรวัด (Bridge Technique) เป็นหลักการที่นิยมมากในการระบุการเกิดฟอลต์ที่จุดปลายสาย โดยเป็นการเชื่อมต่อกันของตัวต้านทาน [3] ยังมีหลักการอีกมากมายในการหาฟอลต์ที่ขั้วสาย เช่น เมอร์เรูปัลส์เรดาร์ (Murry Loop Pulse Radar) [4] และ คลื่นเดินทาง (Traveling Wave) [5-6] เป็นต้น โดยจะมีอุปกรณ์ตรวจจับจะทำการสะท้อนคลื่นกลับมาเพื่อระบุตำแหน่งการเกิดฟอลต์ ในลักษณะเดียวกันได้มีคิดค้นการใช้เครื่องกำเนิดคลื่นเพื่อตรวจหาฟอลต์เป็นแบบเวลาจริง (Real Time) ตามสายส่งที่จ่ายให้กับชุมชนแบบเฟสเดียว [7] ซึ่งจากผลสรุปที่ได้พบว่าเป็นที่น่าพอใจ จึงได้มีการทดสอบระบบสายส่งใต้ดินโดยกระบวนการ Single-Section [8] แต่พบว่าการทดลองดินแบบหลายตำแหน่งยังมีการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กัน จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ การแปลงเวฟเล็ตซึ่งมาความแม่นยำ และระบุฟอลต์ได้ดีกว่ามาวิเคราะห์ชนิดและตำแหน่งที่เกิดฟอลต์เพิ่มเติม ซึ่งหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นมีมากมาย จากความสำคัญดังกล่าวทางคณะผู้จัดทำ จึงได้มีแนวคิดที่จะนำรูปแบบของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal- processing) ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงในสัญญาณฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่งใต้ดินเข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นกว่าหลักการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์เวฟเล็ตเป็นวิธีแก้ปัญหาได้ดีมากในกระบวนการประมวลผลสัญญาณ ด้วยเหตุนี้เอง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการนำการแปลงเวฟเล็ตมาโดยใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทางมาวิเคราะห์หาจุดกำเนิดฟอลต์เพื่อวิเคราะห์หาจุดเกิดฟอลต์ให้ได้แม่นยำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแผนการป้องกันแบบใหม่สำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน
2. เพื่อขยายขอบเขตงานวิจัยและเทคโนโลยีทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังโดยการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ต
3. เพื่อทำการวิเคราะห์และตรวจจับสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกัน
4. เพื่อระบุตำแหน่ง และรูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยจะทำให้สามารถกำจัดฟอลต์ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ขอบเขตของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา ขอบเขตของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขอบเขตของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา

ในโครงการวิจัยนี้ ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาคือ ระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินเท่านั้น ซึ่งเป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา

2. ขอบเขตของการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์

การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จะใช้ข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดฟอลต์ขึ้นของแบบจำลอง จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB/Wavelet Toolbox มาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงรูปแบบและพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ เช่น ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ชนิดฟอลต์ รวมไปถึงมุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด พร้อมทั้งศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในทุกๆ ด้าน
2. ทำการศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP
3. ทำการจำลองสัญญาณฟอลต์ที่แตกต่างกัน จำนวน 1,080 ตัวอย่างด้วยโปรแกรม ATP/EMTP แล้วนำสัญญาณฟอลต์มาพิจารณาหาข้อมูลในการวิเคราะห์ที่จำเป็นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการศึกษารูปแบบของสัญญาณฟอลต์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เพื่อทำการพิจารณาข้อมูลที่ได้รวมถึงช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมที่ควรใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์
5. นำวิธีที่ได้นำเสนอมาเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม โดยอาศัยผลงานวิจัยที่ผ่านมาพร้อมทั้งวิเคราะห์และสรุปการเปรียบเทียบ
6. ทำรายงานสรุปผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

1. สามารถเป็นแนวคิดในการออกแบบสร้างระบบป้องกันสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน
2. เผยแพร่ความรู้ในเทคโนโลยีการตรวจจับการเกิดฟอลต์ในสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน
3. ส่งเสริมงานวิจัยให้มีการพัฒนาโดยการตีพิมพ์ การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

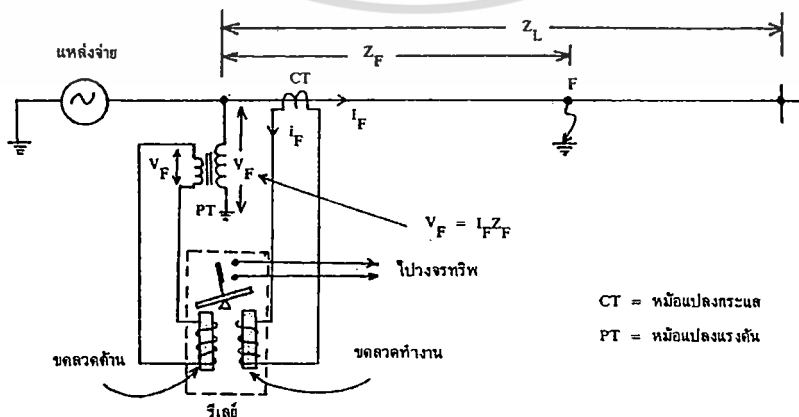
การมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยระบบการป้องกันและอุปกรณ์ที่มาสับสนุนเป็นจำนวนมาก ระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลากหลายประเภทซึ่งได้รับการออกแบบและพัฒนาอย่างเหมาะสมสำหรับการป้องกันสายส่งที่มีความซับซ้อน โดยที่รูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์แต่ละลักษณะนั้น มีหลักการและวิธีการที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การประยุกต์ผลการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์กับระบบป้องกันสายส่ง

สายส่งเป็นอุปกรณ์ที่เกิดฟอลต์ได้มากที่สุดในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งมีระยะทางที่ยาวผ่านพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดฟอลต์ได้ เช่น ภูเขา, ป่าเขา รวมไปถึงชุมชนและแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ในการป้องกันที่ดี และระบบสายส่งส่วนใหญ่เป็นสายส่งที่มีลักษณะเป็นลูป (Loop Line) คือสายส่งที่สามารถรับไฟได้ทั้งสองด้าน ทำให้ฟอลต์มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระบบการป้องกันสายส่งที่ใช้ในปัจจุบันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การป้องกันแบบระยะทาง (Distance protection)

การทำงานของรีเลย์ชนิดนี้อาศัยการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่พื้นฐาน (50 หรือ 60 Hz) จากกระแสและแรงดันด้วยการแปลงฟูเรียร์ตามหลักการของคลื่นเดินทาง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ซึ่งปกติจะอยู่ที่ปลายของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการติดตั้งและหลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง (Distance relay)

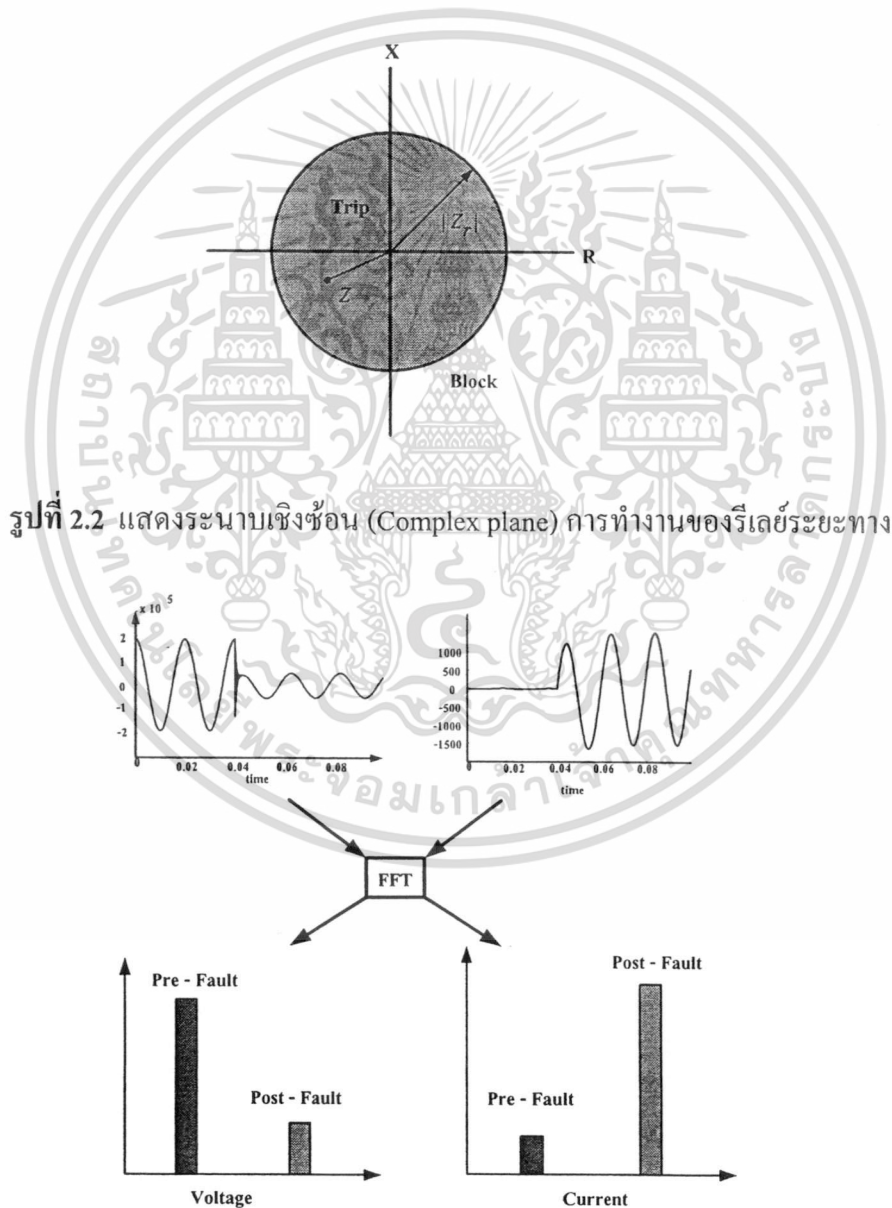
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งนั้นได้มาจากอัตราส่วนระหว่างแรงดันและกระแสดังสมการที่ 2.2

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

ขั้นตอนในการตัดสินใจของรีเลย์จะใช้การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตอบสนองเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ (Z_r) ตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\begin{aligned} |Z_r| > |Z| & \quad \text{trip} \\ |Z_r| < |Z| & \quad \text{block} \end{aligned} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 แสดงการวิเคราะห์แรงดันและกระแสด้วยการแปลงฟูเรียร์ในสถานะที่เกิดฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์นี้เองทำให้บางครั้งจะเรียกิริเลย์รูปแบบนี้ว่า อิมพีแดนซ์รีเลย์ (Impedance Relay) และถ้าพิจารณาในระนาบเชิงซ้อนทางเดินของ โลกัส (locus) จะมีลักษณะเป็นวงกลมมีรัศมี $|Z_r|$ ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของแรงดันและกระแสที่พิจารณาจากรีเลย์ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งในรูปที่ 2.1 ในสภาวะปกติรีเลย์จะมองค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งอยู่นอกวงกลมรัศมี $|Z_r|$ ดังนั้นจะไม่มีคำสั่งให้เบรกเกอร์ปลดวงจร แต่ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติขึ้นนั้นค่าของแรงดันจะลดลงในขณะที่ค่าของกระแสเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.2 พบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ตามรูปที่ 2.2 และถ้าค่าอิมพีแดนซ์ลดต่ำลงมากกว่ารัศมี $|Z_r|$ รีเลย์ก็จะเริ่มทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ (โหนดของรีเลย์ คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง) ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นหรือไม่

ผลการลดลงของอิมพีแดนซ์นี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ในสภาวะปกติ และค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวก็สามารถที่จะคำนวณหาระยะทางหรือตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ดังสมการที่ 2.4

$$Location = \frac{Z}{m} = \frac{V}{mI} \quad (2.4)$$

เมื่อ m คือค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว (ohm/km)

เนื่องจากการใช้รีเลย์ระยะทางนั้นพบปัญหาด้านการตอบสนองที่ล่าช้า โดยเฉพาะในกรณีที่สายส่งมีความยาวมากหรือจุดที่เกิดฟอลต์อยู่ไกลปลายสายส่งมากๆ ซึ่งจะส่งผลให้รีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้ากว่าเมื่อเทียบกับรีเลย์ตัวที่อยู่ใกล้จุดที่เกิดฟอลต์ ในทางปฏิบัติเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในสายส่งวงจรใดๆ ก็ตามรีเลย์ที่ปลายทั้ง 2 ด้านควรที่จะทำการตอบสนองอย่างรวดเร็วเพื่อกำจัดฟอลต์ที่เกิดขึ้นออกจากระบบ

2.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

ในทุกหนทุกแห่งรอบๆ ตัวเราประกอบไปด้วยสัญญาณต่างๆ มากมายที่มนุษย์นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การสั่นของแผ่นดินไหว เสียงพูดของมนุษย์ การสั่นของเครื่องยนต์ และการขจัดสัญญาณรบกวน เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ เหล่านี้จะใช้ทฤษฎีเวฟเล็ตเป็นเครื่องมือสำหรับอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณ ซึ่งมีความสำคัญต่อสาขาการประมวลผลสัญญาณมาก ในบทนี้เป็นการอธิบายหลักการของเวฟเล็ต และนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยได้

2.2.1 การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform : WT) [3,4]

การแปลงเวฟเลตเป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ได้มีการพัฒนามาจากการแปลงสัญญาณพื้นฐานที่มีอยู่เดิม (การแปลงฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์ช่วงสั้น) แต่ได้พัฒนารูปแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ สามารถปรับเปลี่ยนขนาดหน้าต่าง (windows) ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยที่สัญญาณความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่น้อยลง ในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำลงจะมีช่วงคาบเวลาในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น

2.2.1.1 ทฤษฎีเวฟเลต (Wavelet Theory)

ทฤษฎีเวฟเลต (Wavelet Theory) เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยกลุ่มของสัญญาณเฉพาะมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยสัญญาณเฉพาะนี้จะคลื่นเล็กๆ ที่เรียกว่า “เวฟเลต” ลักษณะของเวฟเลตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ตามแนวแกนอนและขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์ทั้งทางด้านบวกและด้านลบอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นการอธิบายสัญญาณใดๆ ด้วยการแปลงเวฟเลตคือการนำกลุ่มของเวฟเลตที่มีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเลตต้นกำเนิดที่เรียกว่า “เวฟเลตแม่” (Mother Wavelets) โดยที่คลื่นเวฟเลตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการสเกล (Scaling : a) หรือเป็นการยืดหรือหดตัวของเวฟเลตแม่ตัวเอง และการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งบนแกนเวลา



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเวฟเลตแบบ Morlet

ถ้าให้ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่จะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของพจน์ต่างๆ ดังนี้

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

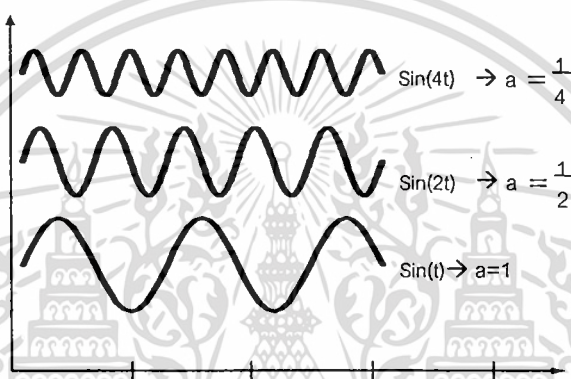
$\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเลตแม่ที่มีการปรับเปลี่ยนสเกลและตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ k ตามลำดับ โดยที่เวฟเลตแม่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่า a และ k แต่ยังคงอยู่ในเซตหรือมีความสัมพันธ์กับเวฟเลตแม่เดิมอยู่ และเพื่อให้เวฟเลตที่ถูกสเกลไปมีพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับเวฟเล็ดแม่จึงต้องทำการนอร์มไลซ์ (Normalize) ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ เพื่อให้เห็นภาพพจน์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จะขออธิบายถึงเวฟเล็ดที่มีการสเกลและเลื่อนตำแหน่งดังนี้

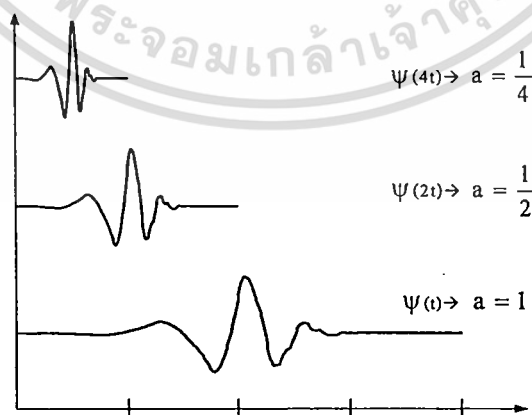
2.2.1.2 การสเกล (Scaling : a)

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



รูปที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติการสเกลของสัญญาณไซน์

ตัวประกอบขนาด (a) จะมีผลในทางเดียวกันกับเวฟเล็ด ยิ่งถ้าตัวประกอบขนาดน้อยลงเท่าใด เวฟเล็ดจะถูกบีบอัดมากขึ้นเท่านั้น เมื่อพิจารณาเวฟเล็ดที่มีตัวประกอบแตกต่างกันจะปรากฏลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6

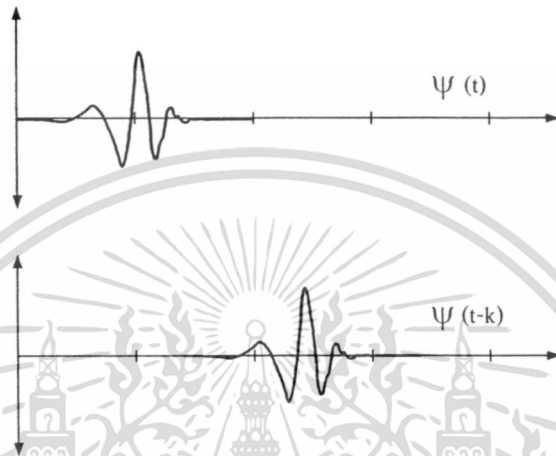


รูปที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติการสเกลของฟังก์ชันเวฟเล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 การเลื่อนตำแหน่ง (Translation or shifting : k)

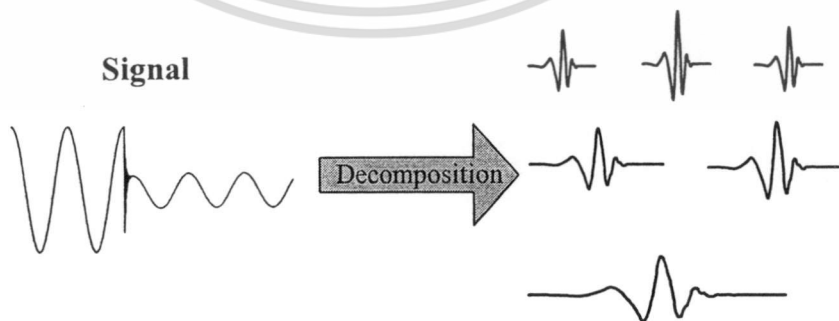
การเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ตจะมีความหมายง่ายๆ คือ การเลื่อนสัญญาณในทางคณิตศาสตร์ซึ่งการเลื่อนของฟังก์ชัน $\psi(t)$ ด้วย k จะแสดงได้โดย $\psi(t-k)$ การเลื่อนตำแหน่งจะกำหนดโดยพารามิเตอร์ “ k ” ซึ่งจะหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งการเกิดคลื่นเวฟเล็ตบนแกน เมื่อพิจารณาเวฟเล็ตที่มีการเลื่อนที่ตำแหน่งใดๆ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของฟังก์ชันเวฟเล็ต

2.2.1.4 การกระจายและรวมกลับของเวฟเล็ต (Decomposition and reconstruction of Wavelet)

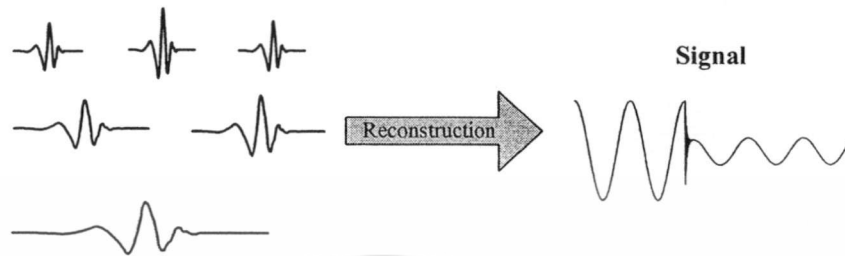
เมื่อนำสัญญาณใดๆ มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตก็เปรียบเสมือนการแตกสัญญาณนั้นออกมาอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ที่มีตำแหน่งทางเวลาและสเกลที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เวฟเล็ตแต่ละตัวจะมีค่าน้ำหนัก (Weight) อยู่นอยู่ ซึ่งรูปแบบในการแตกกระจายสัญญาณนี้เรียกว่าการกระจายเวฟเล็ต (Wavelet decomposition) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางกลับกันการรวมกลุ่มของเวฟเล็ตแต่ละตัวมาประกอบขึ้นเป็นสัญญาณเดิมเรียกว่า การรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet reconstruction) ซึ่งก็คือการแปลงกลับของเวฟเล็ต (Inverse wavelet transform) โดยจะเป็นการนำเอาส่วนประกอบย่อยๆ เหล่านี้มาเรียงต่อกันเพื่อประกอบเป็นสัญญาณเดิม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการสร้างกลับสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

2.2.2 การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform : DWT) [5]

จากข้อจำกัดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจึงมีการพัฒนารูปแบบการแปลงเวฟเล็ตมาสู่การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ที่มีลักษณะการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในลักษณะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ในโครงการงานฉบับนี้ได้้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยมาใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิล ซึ่งทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาหลายช่วงความถี่ (สเกล) แล้วพิจารณาข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสำหรับการเลือกเวฟเล็ตนั้นได้เลือกใช้เป็นแบบ daubechies 4 (db4) เนื่องจากมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์สัญญาณในลักษณะทรานเซียนต์ เช่น พอลต์ และให้ความแม่นยำทางเวลาที่ดี เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ที่น้อยเพียง 4 ตัว โดยแบ่งการนำการแปลงเวฟเล็ตมาใช้วิเคราะห์สัญญาณพอลต์ออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1) การแยกองค์ประกอบของสัญญาณ (Wavelet decomposition)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณกระแสและแรงดันออกมาในสเกลที่ 1-5 ซึ่งในที่นี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบความถี่สูง (detail) เท่านั้น

2) การรวมกลับสัญญาณ (Wavelet Reconstruction)

เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลให้มีขนาดเดียวกันหรืออยู่บนฐานเวลาเดียวกันจึงต้องทำการรวมกลับสัญญาณในแต่ละสเกลให้มีจำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับสัญญาณต้นแบบที่ทำการวิเคราะห์ และนอกจากนี้เพื่อให้การพิจารณาเห็นความแตกต่างมากขึ้นจึงยกกำลังสองสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกล ซึ่งสัมประสิทธิ์ทั้งหมดก็จะอยู่ในด้านบวก โดยที่รายละเอียดทั้งหมดจะได้กล่าวอยู่ในบทที่ 3

บทที่ 3

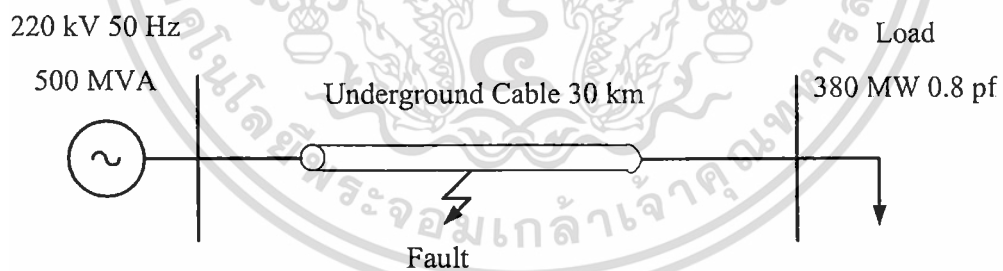
การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์

3.1 การจำลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการจำลองฟอลต์บนสายส่งด้วยโปรแกรม ATP/EMTP เนื่องจากฟอลต์เป็นสิ่งที่ผิดปกติในระบบไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทดลองในระบบจริงได้ และเพื่อใช้สำหรับการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบจำลองเปลี่ยนไป โปรแกรม ATP/EMTP มีความสามารถในการจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง และเหมาะสมสำหรับจำลองผลตอบสนองเชิงโดเมนเวลาแบบทันทีทันใดอย่างแม่นยำ (Time Domain Instantaneous Responses) พร้อมทั้งใช้โปรแกรม MATLAB / Wavelet ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ โดยมีเนื้อหาและรายละเอียดของการจำลองฟอลต์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ดังต่อไปนี้

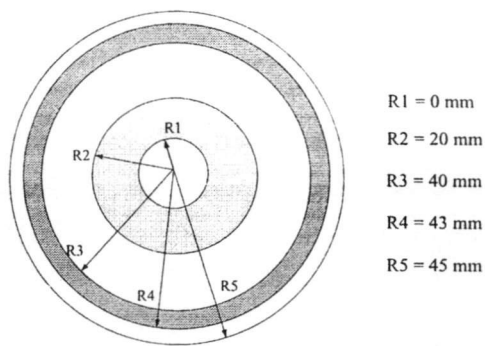
3.1.1 การจำลองระบบสายส่ง

การจำลองสายส่งเคเบิลใต้ดินจะใช้สายส่งในกรณีศึกษาเป็นเคเบิลใต้ดินที่มีความยาว 30 กิโลเมตร ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 220 kV ทำการจำลองระบบส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP



รูปที่ 3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง

ทำการจำลองระบบเมื่อเกิดฟอลต์ลัดวงจรแบบเฟส A ลงดิน (A-G) ในระยะทางที่แตกต่างกัน โดยเริ่มต้นที่ 2 กิโลเมตร มุมเฟสเริ่มต้นที่ 150° ทางด้านส่ง โดยให้เฟส A เป็นมุมอ้างอิง ชนิดของสายเคเบิลยาว 30 กิโลเมตร

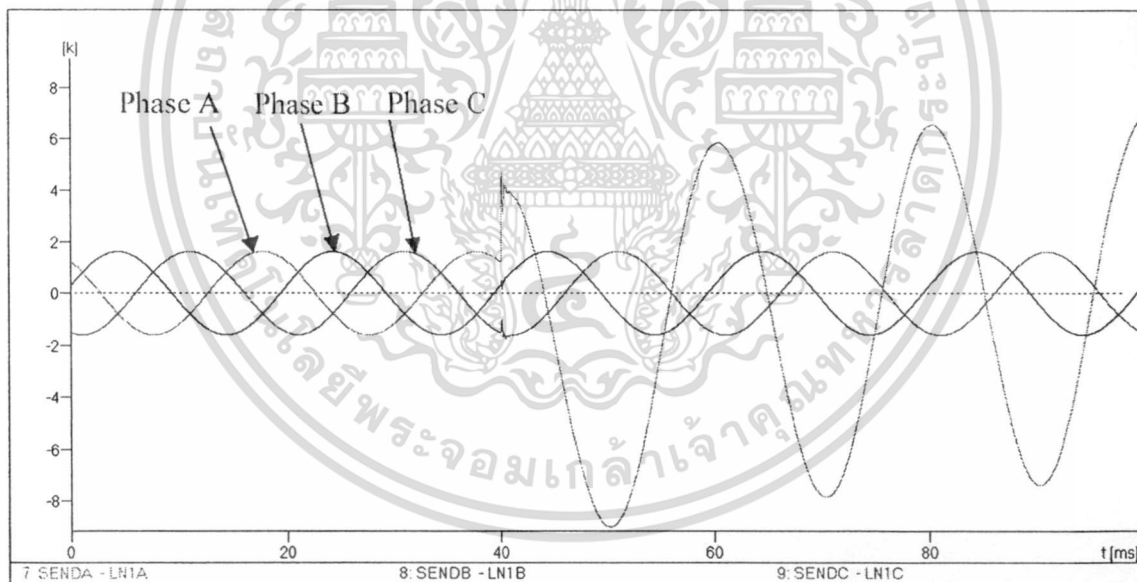


รูปที่ 3.2 ขนาดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง

ค่า ความยอมได้สัมพัทธ์ (permittivity) (ϵ_r) ของสาย มีค่า 2.7

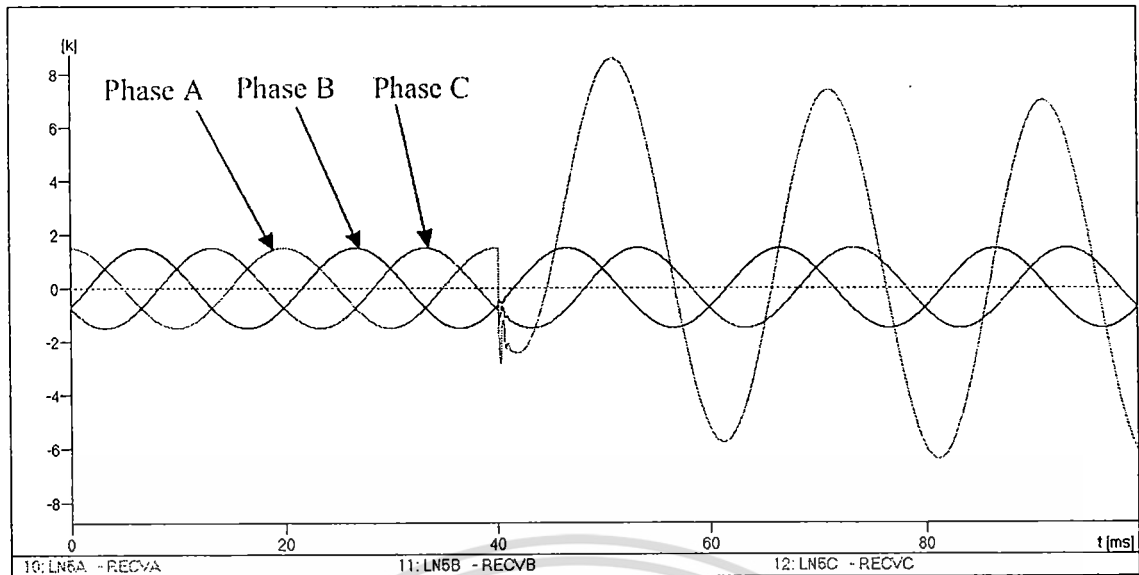
ค่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) (μ_r) ของสายมีค่า 1

นำรูปคลื่นของกระแสที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม ATP/EMTP มาแยกองค์ประกอบให้อยู่ในรูป กระแสลำดับบวก ,กระแสลำดับลบ และ กระแสลำดับศูนย์ จากนั้นนำรูปคลื่นที่ได้แปลงเวฟเลตต์โดยโปรแกรม MATLAB นำรูปคลื่นที่ได้ยกกำลังสองจะได้รูปคลื่นเวฟเลตต์ของทั้งสองปลายทางด้าน A และ B



รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 150° ฝั่งส่ง (Sending end)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 150° ฝั่งรับ (Receiving end)

3.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตในบทที่ 2 งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิลใต้ดิน โดยสมมุติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสไฟฟ้าจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน โดยนำข้อมูลสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากแบบจำลองฟอลต์ที่อัตราการสุ่ม (Sampling Rate) 200 kHz มาทำการแปลงให้อยู่ในองค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และ องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) จากนั้นนำสัญญาณองค์ประกอบกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current) มาดำเนินการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา โดยการใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละสเกล เพื่อตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสเกล หลังจากนั้นนำข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้มาวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายเคเบิล และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายเคเบิลใต้ดินต่อไป โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ต่างๆ จะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การตรวจจับ

รูปแบบของการตรวจจับฟอลต์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำสัญญาณกระแสฟอลต์มาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพื่อลดจำนวนในการวิเคราะห์และความซับซ้อนในการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเฟิร์มจะนำสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้านมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) โดยใช้เมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation Matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ (3.1) [18 ,19]

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อ I_0 หมายถึงองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)

I_1 หมายถึงองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence)

I_2 หมายถึงองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence)

T หมายถึงเมตริกซ์การแปลงของกระแส (Phase Current Transformation Matrix)

งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้เมตริกซ์การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transformation Matrix) เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายเคเบิลทั้งแบบมีการไขว้สลับสายแบบสมบรูณ์และไม่มีการไขว้สลับสายโดยเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่

3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบ

| Scale | Frequency Range (kHz) | Traveling Wave Speed(km/s) | Sequence Transformation Matrix |
|-------|--------------------------|-------------------------------|--|
| 1 | 50-100 | 294,747 | $\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$ |
| 2 | 25-50 | 296,988 | |
| 3 | 12.5-25 | 296,748 | |
| 4 | 6.25-12.5 | 296,464 | |
| 5 | 3.125-6.25 | 296,411 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับพอลต์สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณกระแสพอลต์ในแต่ละเฟส และสัญญาณกระแสพอลต์ขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ของปลายสายส่งแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ขนิด daubechies4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกันจากนั้นนำมายกกำลังสอง แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับซึ่งในแต่ละสเกลสามารถแสดงค่าของช่วงความถี่ต่างๆ ดังนี้

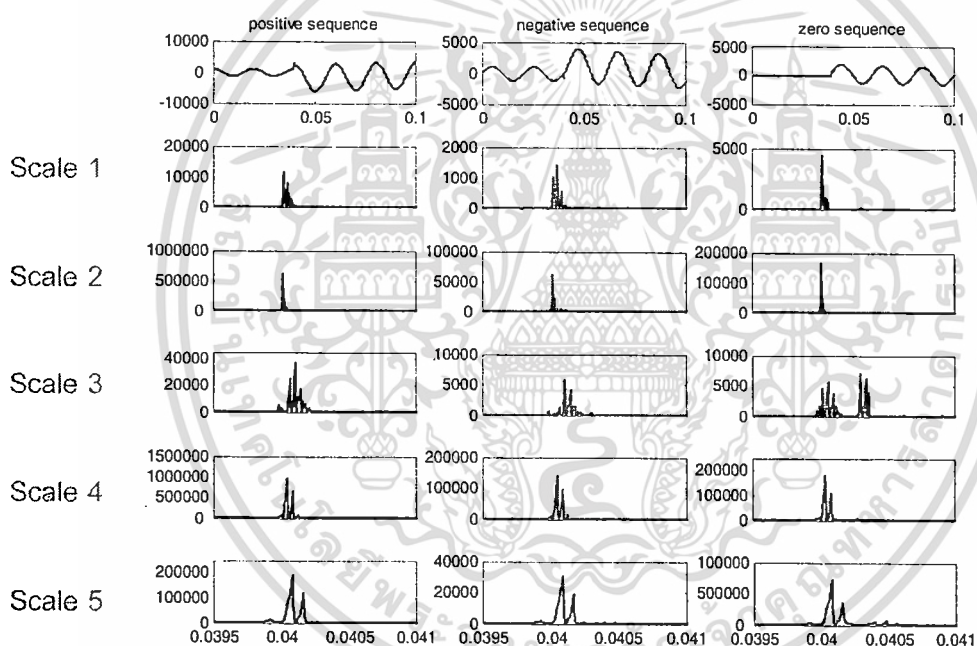
สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

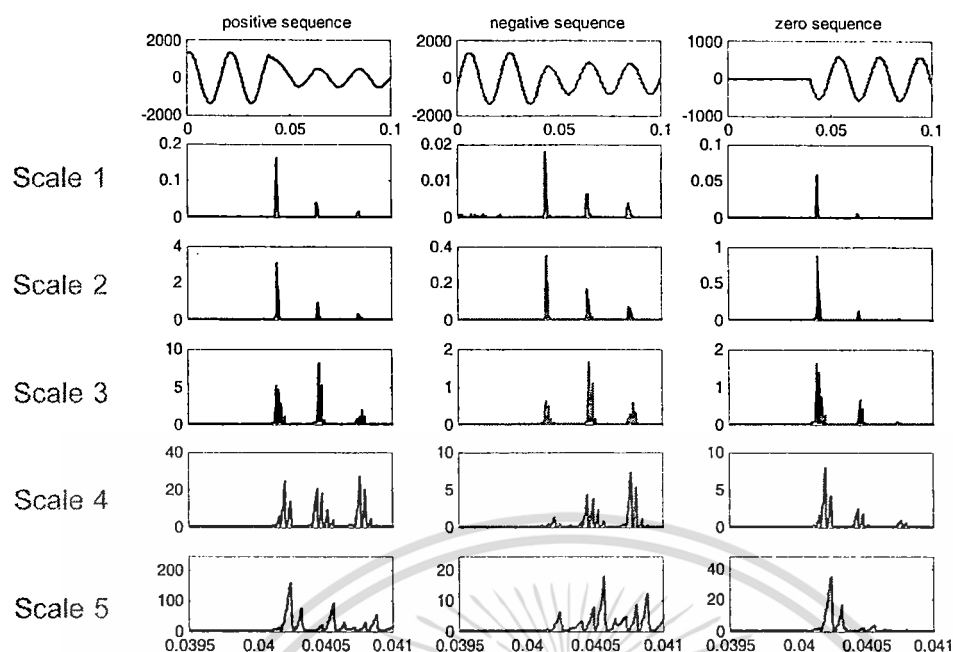
สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นเวฟเล็ตยกกำลังสองด้านส่ง (Sending end)



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นเวฟเล็ดยกกำลังสองด้านรับ (Receiving end)

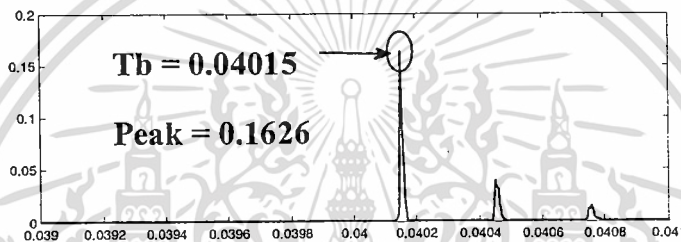
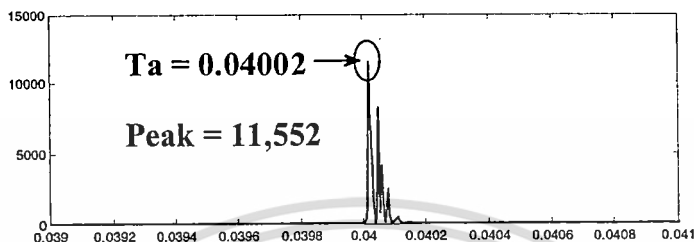
งานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์เป็นจำนวนเท่า ในแต่ละสเกลของกระแสที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน และเพื่อให้การพิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 จากผลการแปลงเวฟเล็ดยกกำลังสองได้พบว่าในสภาวะที่เริ่มมีฟอลต์ ($t \geq 0.04$ sec) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกลจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 0.04$ sec) ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า “ถ้าสัมประสิทธิ์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ของสเกลใดสเกลหนึ่งของกระแสลำดับบวกเมื่อวัดที่ปลายสายส่งแต่ละด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากช่วงสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ แสดงว่ามีความผิดปกติ เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน” เมื่อสามารถตรวจจับฟอลต์ได้แล้ว จากนั้นนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ในวงจรที่เกิดฟอลต์มาวิเคราะห์ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายเคเบิลใต้ดินต่อไป

3.3 ทฤษฎีการหาจุดกำเนิดฟอลต์

โดยปกติแล้วเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเกิดความผิดปกติขึ้นของรูปคลื่นกระแส และแรงดัน ความผิดปกติของรูปคลื่นนั้นจะเดินทางกระจายออกไปยังทั้งสองฝั่งของระบบส่งจ่าย เรียกว่าคลื่นเดินทาง ดังนั้นจึงได้มีการ

ประยุกต์นำมาใช้ในการระบุตำแหน่งของฟอลต์ เนื่องจากการใช้คลื่นเดินทางนั้นไม่ซับซ้อนมากนัก อีกทั้งสามารถตรวจหาได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

ทฤษฎีคลื่นเดินทางที่นำมาใช้ในการระบุตำแหน่งฟอลต์นั้นจะใช้รูปคลื่นที่แปลงเวฟเล็ดออกมาแล้ว จากนั้นหาค่าเวลา T_a และ T_b ของทั้งสองฝั่งโดยใช้หลักการตรวจสอบการเกิดฟอลต์จากการตรวจจับฟอลต์ โดยที่ค่าเวลาที่ได้คือเวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายสายทั้งสองฝั่ง



รูปที่ 3.7 ค่าคลื่นสูงสุดด้าน A ที่เวลา T_a ค่าคลื่นสูงสุดด้าน B ที่เวลา T_b

หลังจากสามารถตรวจจับค่าเวลาในการเกิดฟอลต์ได้แล้ว นำค่าเวลาที่ได้มาคำนวณเพื่อหาระยะทางในการเกิดฟอลต์โดยใช้สมการที่ 3.2 ในการหาจุดเกิดฟอลต์ของคลื่นเดินทาง [9]

$$x = \frac{L - (v * (T_b - T_a))}{2} \quad (3.2)$$

โดยที่

x = ระยะทางเกิดฟอลต์จากทางด้านตัวกำเนิดไฟฟ้า (เมตร)

L = ความยาวสายส่ง (เมตร)

v = ความเร็วคลื่น (เมตรต่อวินาที)

T_b = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายด้าน B (วินาที)

T_a = เวลาที่สัญญาณฟอลต์มาถึงปลายด้าน A (วินาที)

โดยจะใช้ค่าความเร็วคลื่นในการคำนวณซึ่งมีค่า

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ϵ_r คือ ค่า ความยอมได้สัมพัทธ์ (permittivity) ของสายส่ง

μ_r คือ ค่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) ของสายส่ง

C คือ ความเร็วแสง 3×10^8 m/s

จากการคำนวณ ค่า $\epsilon_r = 2.7$ $\mu_r = 1$ จะได้ค่า $v = 1.825 \times 10^8$ m/s

จากรูปที่ 3.7 เมื่อ $L = 30,000$ เมตร

$v = 1.825 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที

$T_a = 0.04002$ วินาที

$T_b = 0.04015$ วินาที

$$x = \frac{30,000 - (1.825 \times 10^8 \times (0.04015 - 0.04002))}{2}$$

$x = 3,132.7$ เมตร

ที่จุดเกิดฟอลต์จริง 3 กิโลเมตร คลาดเคลื่อน 0.1327 กิโลเมตร หรือ 132.7 เมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงผลจากการจำลองที่จุดเกิดฟอลต์ต่างๆ

| จุดเกิดฟอลต์จริง (km) | มุมเกิดฟอลต์ (degree) | เวลาในการตรวจจับ (ms) | | จุดเกิดฟอลต์ (km) | | จุดเกิดฟอลต์ (km) | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| | | Ta | Tb | วิธีที่นำเสนอ | Error | วิธีที่ [1] | Error |
| | | | | | | | |
| 3 | 120 | 40.02 | 40.15 | 3.1327 | 0.1327 | - | - |
| 5 | 120 | 40.03 | 40.14 | 4.9584 | 0.0416 | 4.6666 | 0.3340 |
| 8 | 120 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 | 0.3030 | 8.1818 | 0.1818 |
| 11.5 | 120 | 40.06 | 40.105 | 10.436 | 1.0640 | 11.591 | 0.0910 |
| 17 | 120 | 40.09 | 40.07 | 16.826 | 0.1740 | 16.786 | 0.7860 |
| 26.5 | 120 | 40.16 | 40.02 | 27.280 | 0.780 | 26.25 | 0.250 |
| 28.5 | 120 | 40.16 | 40.01 | 28.693 | 0.193 | 28.846 | 0.346 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงผลจากการจำลองที่มุมเกิดฟอลต์ต่างๆ

| มุมเกิดฟอลต์ (degree) | จุดเกิดฟอลต์จริง (km) | เวลาในการตรวจจับ (ms) | | จุดเกิดฟอลต์จาก การคำนวณ (km) |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|----------------------------------|
| | | Ta | Tb | |
| 0 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 30 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 60 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 90 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 120 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 150 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 180 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ระบุตำแหน่งฟอลต์ของ ทฤษฎีคลื่นเดินทางและทฤษฎีระบุฟอลต์บนสายส่งอายุสูง [1] โดยการเปลี่ยนแปลงจุดเกิดฟอลต์ที่แตกต่างกันออกไป ในขณะที่ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเวลา (Ta, Tb) ที่สามารถตรวจจับและจุดเกิดฟอลต์ที่สามารถระบุได้เมื่อ เปลี่ยนแปลงค่ามุมเริ่มเกิดฟอลต์ตั้งแต่ 0° ถึง 180° ผลการจำลองที่ได้พบว่า ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมมีความผิดพลาดจากค่าจริงไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำในระดับที่ดี

3.4 การจำแนกประเภทฟอลต์

ในการจำแนกประเภทฟอลต์จะใช้รูปคลื่นกระแสในแต่ละเฟส มาทำการเข้ากระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) ใช้เวฟเล็ตแม่เป็น Daubechies 4 (db 4) เนื่องจากเป็นเวฟเล็ตแม่ที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ฟอลต์ และมีความแม่นยำที่ดี เพราะมีสัมประสิทธิ์น้อยเพียง 4 ตัว จะได้รูปคลื่นเวฟเล็ตออกมา 3 ส่วนคือ เวฟเล็ตเฟส A ,เวฟเล็ตเฟส B และเวฟเล็ตเฟส C จากนั้นทำการยกกำลังสองเพื่อง่ายต่อการตรวจหาค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของรูปคลื่นเวฟเล็ตที่ค่าเวลาเกิดฟอลต์ ดังรูป 3.8

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 ที่ตำแหน่งเกิดฟอลต์ต่างๆ ชนิดฟอลต์ เฟส A ลงดิน (A-G) ที่มุมเริ่มต้น 150 องศา

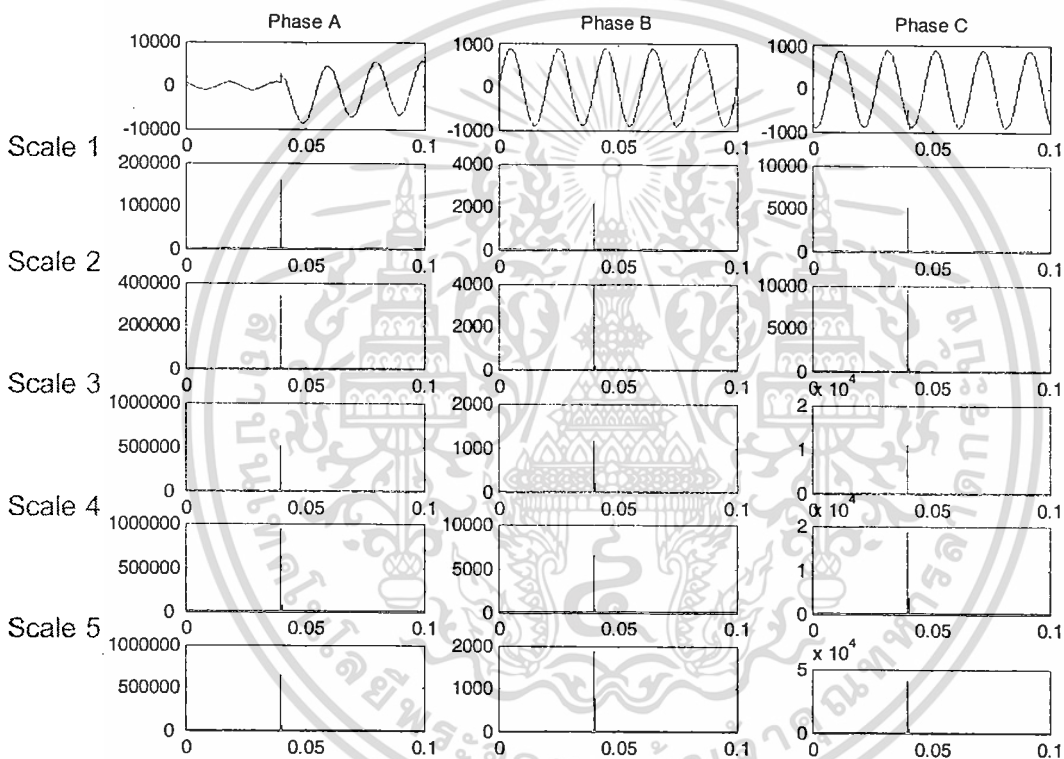
| สัมประสิทธิ์ความถี่สูงยกกำลังสองของกระแส | ตำแหน่งจุดเกิดฟอลต์ (km) | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--|--|
| | 3 | 5 | 8 | 11.5 | 17 | 26.5 | 28.5 | | | |
| กระแสลำดับบวก ด้าน Sending end | เฟส A | 56,478 | 53,137 | 161,930 | 88,547 | 76,670 | 496,109 | 8,681 | | |
| | เฟส B | 3,183 | 396 | 2,171 | 6,767 | 1,166 | 475 | 1,895 | | |
| | เฟส C | 2,609 | 993 | 5,141 | 1,232 | 2,483 | 11,103 | 30 | | |
| | Zero | 39,709 | 22,679 | 90,379 | 21,750 | 43,412 | 229,277 | 1,012 | | |
| กระแสลำดับบวก ด้าน Receiving end | เฟส A | 297,804 | 64,541 | 257,628 | 0.1690 | 295,083 | 117,513 | 0.6108 | | |
| | เฟส B | 397 | 265 | 901 | 0.0201 | 809 | 3,849 | 0.0542 | | |
| | เฟส C | 5,294 | 1,195 | 7,169 | 0.0027 | 7,668 | 4,742 | 0.0117 | | |
| | Zero | 128,998 | 25,464 | 129,072 | 0.0321 | 144,866 | 74,799 | 0.1533 | | |

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 ที่มุมเริ่มต้นเกิดฟอลต์ต่างๆ ชนิดฟอลต์ เฟส A ลงดิน (A-G) ที่จุดเกิดฟอลต์ที่ 8 กิโลเมตร

| สัมประสิทธิ์ความถี่สูงยกกำลังสองของกระแส | ตำแหน่งจุดเกิดฟอลต์ (km) | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|----------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|--|--|--|
| | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 | | | | |
| กระแสลำดับบวก ด้าน Sending end | เฟส A | 0.0050 | 9.0502 | 52.5349 | 134.1479 | 220.5525 | 261.6773 | 231.2571 | 148.6731 | 63.3054 | 13.1171 | 0.1605 | 0.9442 | | | |
| | เฟส B | 0.00004 | 0.0830 | 0.4916 | 1.2466 | 2.0618 | 2.4660 | 2.1836 | 1.4088 | 0.6053 | 0.1276 | 0.0015 | 0.0085 | | | |
| | เฟส C | 0.00004 | 0.0838 | 0.4891 | 1.2537 | 2.0695 | 2.4640 | 2.1689 | 1.4029 | 0.6084 | 0.1257 | 0.0016 | 0.0092 | | | |
| | Zero | 0.0019 | 3.5074 | 20.4051 | 52.0934 | 85.6367 | 101.5960 | 89.8435 | 57.8066 | 24.5812 | 5.1003 | 0.0672 | 0.3686 | | | |
| กระแสลำดับบวก ด้าน Receiving end | เฟส A | 0.000141 | 0.2523 | 1.4814 | 3.7736 | 6.1979 | 7.3500 | 6.4842 | 4.1740 | 1.7741 | 0.3621 | 0.0051 | 0.0270 | | | |
| | เฟส B | 0 | 0.0015 | 0.0076 | 0.0318 | 0.0418 | 0.0476 | 0.0483 | 0.0290 | 0.0100 | 0.0051 | 0.000051 | 0.000127 | | | |
| | เฟส C | 0 | 0.0013 | 0.0078 | 0.0202 | 0.0330 | 0.0396 | 0.0349 | 0.0229 | 0.0101 | 0.0063 | 0.000081 | 0.000194 | | | |

ตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของสัญญาณคลื่นเวฟเล็ดในช่วงหลังเกิดฟอลต์ว่า ค่าสูงสุดของคลื่นจะมีค่าสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าของช่วงก่อนเกิดฟอลต์อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ค่าสูงสุดในช่วงก่อนเกิดฟอลต์นั้นจะมีค่าที่ต่ำมากใกล้เคียงศูนย์

ตารางที่ 4.4 แสดงจุดเกิดฟอลต์ที่ 8 กิโลเมตร โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเริ่มต้นเกิดฟอลต์ให้มีค่าตั้งแต่ 30° ถึง 360° พบว่าค่าสูงสุดของคลื่นมีค่าที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละมุมเริ่มเกิดฟอลต์ ทั้งด้าน Sending end และ Receiving end เมื่อนำค่าสูงสุดที่ได้มาสร้างกราฟจะได้เป็นกราฟรูป ซายน์เวฟ (Sine wave)



รูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นเวฟเล็ด ตั้งแต่สเกลที่ 1 – 5 ที่ได้จากในเวฟเล็ดเฟส A ,เวฟเล็ดเฟส B และเวฟเล็ดเฟส C

เนื่องจากในฟอลต์ทุกประเภทที่เกิดขึ้น จะมีส่วนประกอบลำดับบวกรวมอยู่ด้วยเสมอจึงได้นำส่วนประกอบลำดับบวกรู้นี้มาทำการวิเคราะห์ เพื่อระบุฟอลต์ในแต่ละเฟส และในฟอลต์ลงดินทุกชนิดจะแสดงความเปลี่ยนแปลงของกระแสลงดินในส่วนประกอบลำดับศูนย์ จึงได้นำส่วนประกอบลำดับศูนย์มาทำการวิเคราะห์ เพื่อระบุฟอลต์ชนิดลงดิน

จากรูป 3.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะทำให้สัมประสิทธิ์ของสัญญาณเวฟเล็ดที่ได้ ณ เวลาที่เกิดฟอลต์ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปโดยมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ตก่อนเกิดฟอลต์ ซึ่งจะนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวมาใช้ในการระบุชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อทำการสร้างวิธีการจำแนกชนิดของฟอลต์ที่เกิดจึงนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดจากการแปลงเวฟเล็ตในเวฟเล็ตเฟส A, เวฟเล็ตเฟส B และเวฟเล็ตเฟส C ดังรูปที่ 3.9 และแสดงในสมการ

$$I_{AZ, \max(post)}^L = \frac{I_{A, \max(post)}^L}{I_{zero, \max(post)}^L} \quad (3.4)$$

$$I_{BZ, \max(post)}^L = \frac{I_{B, \max(post)}^L}{I_{zero, \max(post)}^L} \quad (3.5)$$

$$I_{CZ, \max(post)}^L = \frac{I_{C, \max(post)}^L}{I_{zero, \max(post)}^L} \quad (3.6)$$

เมื่อ L = สเกลของการแปลงเวฟเล็ต (สเกล 1)

$I_{A, \max(post)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ณ เวลาเกิดฟอลต์ ที่ส่วนประกอบลำดับบวกเฟส A

$I_{B, \max(post)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ณ เวลาเกิดฟอลต์ ที่ส่วนประกอบลำดับบวกเฟส B

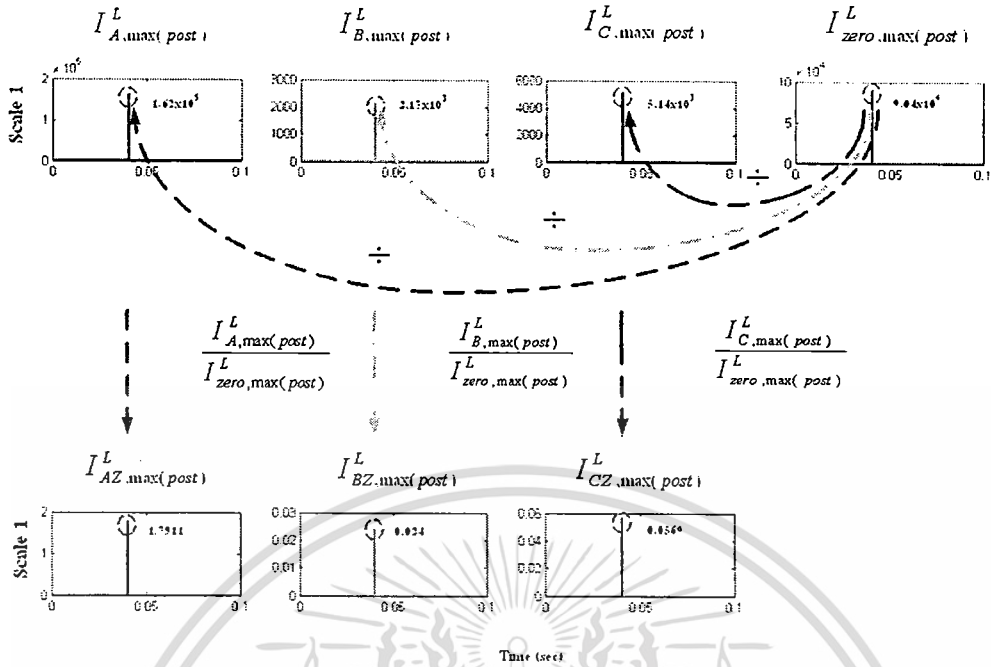
$I_{C, \max(post)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ณ เวลาเกิดฟอลต์ ที่ส่วนประกอบลำดับบวกเฟส C

$I_{zero, \max(post)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ณ เวลาเกิดฟอลต์ ที่ส่วนประกอบลำดับศูนย์

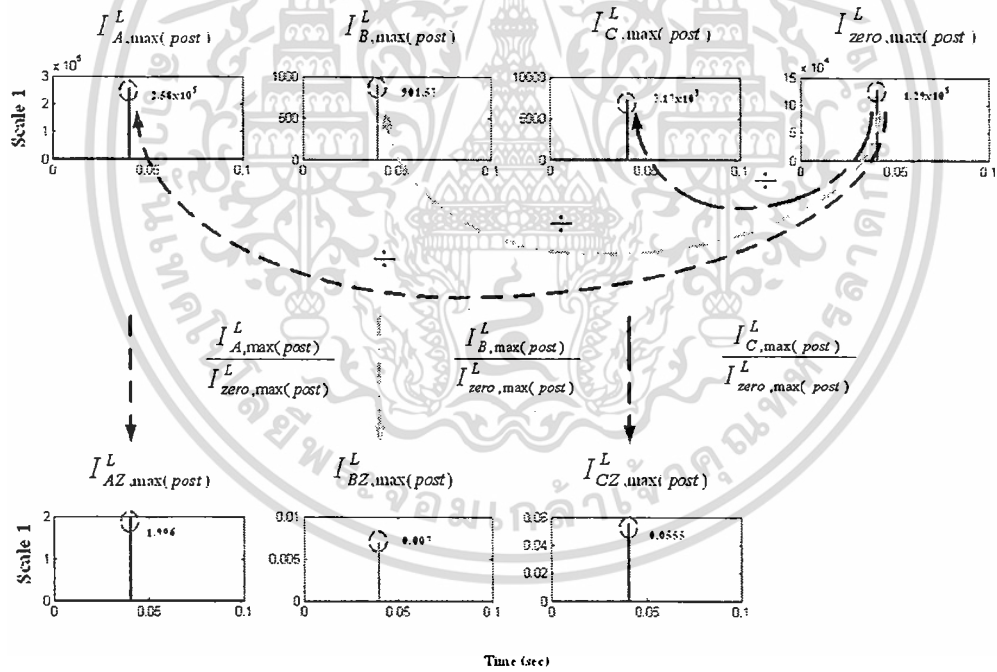
$I_{AZ, \max(post)}^L$ = อัตราส่วนระหว่าง $I_{A, \max(post)}^L$ กับ $I_{zero, \max(post)}^L$

$I_{BZ, \max(post)}^L$ = อัตราส่วนระหว่าง $I_{B, \max(post)}^L$ กับ $I_{zero, \max(post)}^L$

$I_{CZ, \max(post)}^L$ = อัตราส่วนระหว่าง $I_{C, \max(post)}^L$ กับ $I_{zero, \max(post)}^L$



(a) Sending end



(b) Receiving end

รูปที่ 3.9 แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดส่วนประกอบลำดับบวกหารด้วยสัมประสิทธิ์สูงสุดส่วนประกอบลำดับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ผลการตรวจจับฟอลต์ที่ได้ ด้าน Sending end

| Phase A | | Phase B | | Phase C | | Zero sequence | | Ph_{max}^L | Ph_{min}^L | Result |
|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|
| Max (post) | $I_{AZ,max(post)}^L$ | Max (post) | $I_{BZ,max(post)}^L$ | Max (post) | $I_{CZ,max(post)}^L$ | Max (pre) | Max (post) | | | Sending end |
| 1.62×10^5 | 1.7911 | 2.17×10^3 | 0.024 | 5.14×10^3 | 0.0569 | 3.2×10^{-5} | 9.0×10^4 | 1.7911 | 0.024 | AG |

ตารางที่ 3.7 ผลการตรวจจับฟอลต์ที่ได้ ด้าน Receiving end

| Phase A | | Phase B | | Phase C | | Zero sequence | | Ph_{max}^L | Ph_{min}^L | Result |
|--------------------|----------------------|------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-------------------|--------------|--------------|---------------|
| Max (post) | $I_{AZ,max(post)}^L$ | Max (post) | $I_{BZ,max(post)}^L$ | Max (post) | $I_{CZ,max(post)}^L$ | Max (pre) | Max (post) | | | Receiving end |
| 2.58×10^5 | 1.196 | 901.57 | 0.007 | 7.17×10^3 | 0.0555 | 8.5×10^{-4} | 1.3×10^5 | 1.196 | 0.007 | AG |

นำค่าอัตราส่วนกระแสในแต่ละเฟส $I_{AZ,max(post)}^L$, $I_{BZ,max(post)}^L$ และ $I_{CZ,max(post)}^L$ มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการพิจารณาฟอลต์ที่เกิดขึ้นดังนี้

if $[(I_{X,max(post)}^L > 1) \text{ and } (I_{X,max(post)}^L > 5 \times Ph_{min}^L)] \text{ or } (I_{X,max(post)}^L > 50) \text{ or } (I_{X,max(post)}^L > 0.4 \times Ph_{max}^L)$

then

Phase X fault

else

Phase X unfault

end

เมื่อ

$I_{X,max(post)}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ณ เวลาเกิดฟอลต์ ที่ส่วนประกอบลำดับบวกเฟสต่างๆ ($I_X^L = I_{AZ}^L, I_{BZ}^L$ and I_{CZ}^L ตามลำดับ)

Ph_{max}^L = ค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบ $I_{AZ,max(post)}^L$, $I_{BZ,max(post)}^L$ และ $I_{CZ,max(post)}^L$

Ph_{min}^L = ค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบ $I_{AZ,max(post)}^L$, $I_{BZ,max(post)}^L$ และ $I_{CZ,max(post)}^L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบุการเกิดฟอลต์ลงดิน โดยนำสัมประสิทธิ์ในส่วนประกอบลำดับศูนย์มาใช้ในการสร้าง การตัดสินใจดังนี้

$$\text{If } (I_{\text{zero, max (post)}}^L \geq 5 \times I_{\text{zero, max (pre)}}^L)$$

then

Ground fault

else

Unground fault

end

where,

$I_{\text{zero, max (pre)}}^L$ = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ณ เวลาก่อนเกิดฟอลต์ ที่ส่วนประกอบลำดับศูนย์

หลังจากนำค่าสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตมาเปรียบเทียบเมื่อใช้ระบุนิคมฟอลต์ตามเงื่อนไขข้างต้นแล้ว จะทำการบันทึกผลการจำลองที่ได้เพื่อสรุปผลต่อไป



บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์จากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ตามรูปแบบและวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการตรวจจับฟอลต์ มีรูปแบบในการนำเสนอ ดังนี้

4.1 รูปแบบการนำเสนอ

4.1.1 รูปแบบการนำเสนอของแต่ละกราฟผลการทดลอง

การแสดงผลการทดลองจะแสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองเรียงตามตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ โดยปรับตำแหน่งการเกิดฟอลต์ โดยระยะทางที่เกิดฟอลต์จะคิดจากสถานีไฟฟ้าด้านส่ง (Sending end) เป็นจุดอ้างอิงซึ่งรายละเอียดจะประกอบไปด้วย

1. การตรวจจับฟอลต์ ซึ่งผลที่ได้มาจากการคำนวณผลการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วย
2. ตำแหน่งของฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณและความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยผลการแปลงเวฟเส้นแบบเต็มหน่วยร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง
3. การเรียงลำดับจะเรียงตามประเภทของฟอลต์ คือ AG, BG, CG, ABG, ACG, BCG, AB, AC, BC, และ ABC ตามลำดับ และมีการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

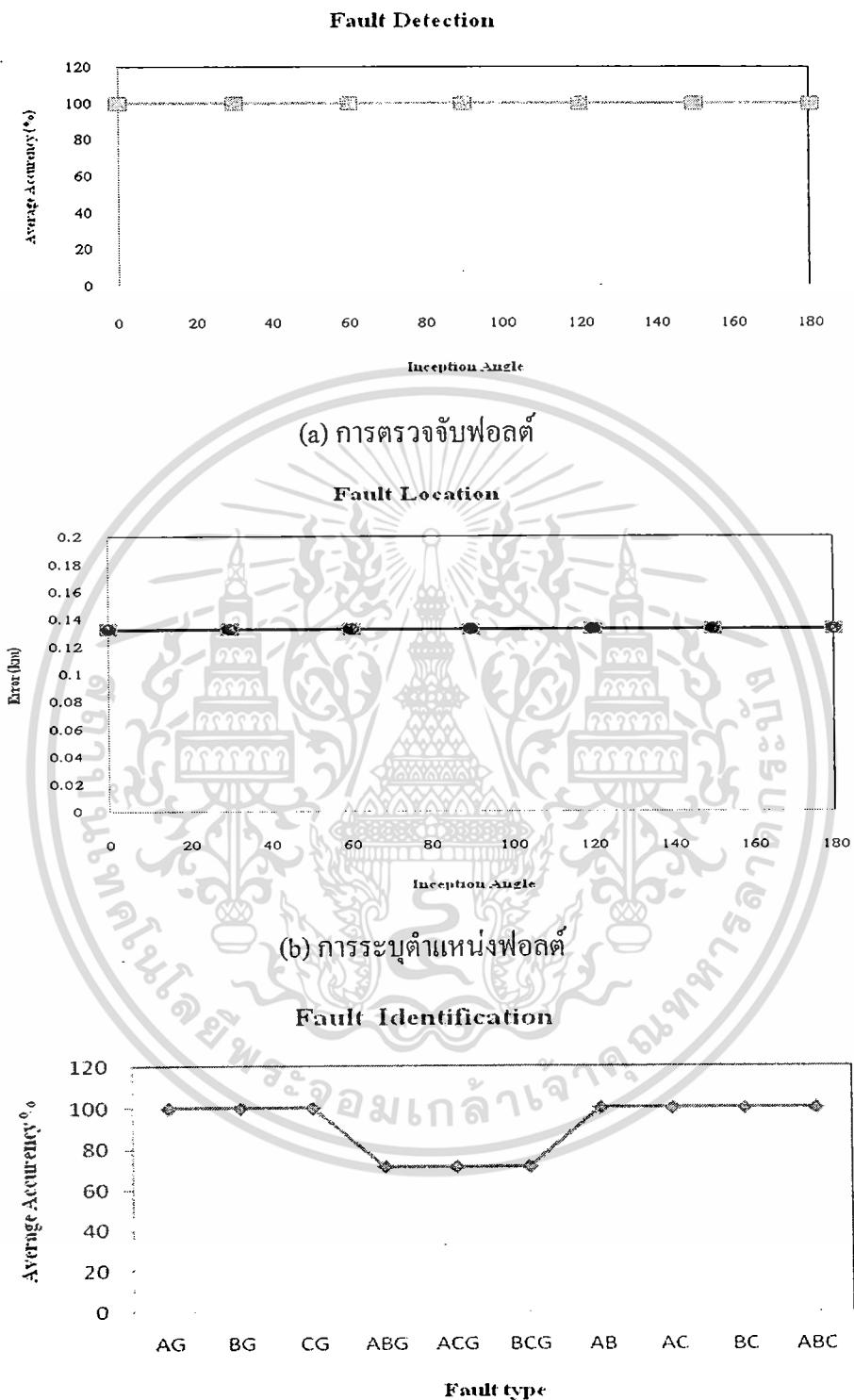
ผลการการจำลอง

จากการจำลองระบบส่งจ่ายในกรณีศึกษาได้นำแบบของสายส่งมาจาก [1] เพื่อนำค่าที่ได้จากการจำลองระบบที่ใช้ต่างทฤษฎีระหว่างทฤษฎีการใช้คลื่นเดินทาง และใช้ค่าเวลาในการหาฟอลต์ [1] มาเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียของทฤษฎีแต่ละแบบ

จากการจำลองหาค่าฟอลต์ที่เกิดในระบบส่งจ่ายในแต่ละช่วงสายส่งพบว่าในแต่ละช่วงการจำลองมีค่าความผิดพลาดที่เกิดแตกต่างกันดังแสดงต่อไปนี้

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร)



รูปที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 3 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.1 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

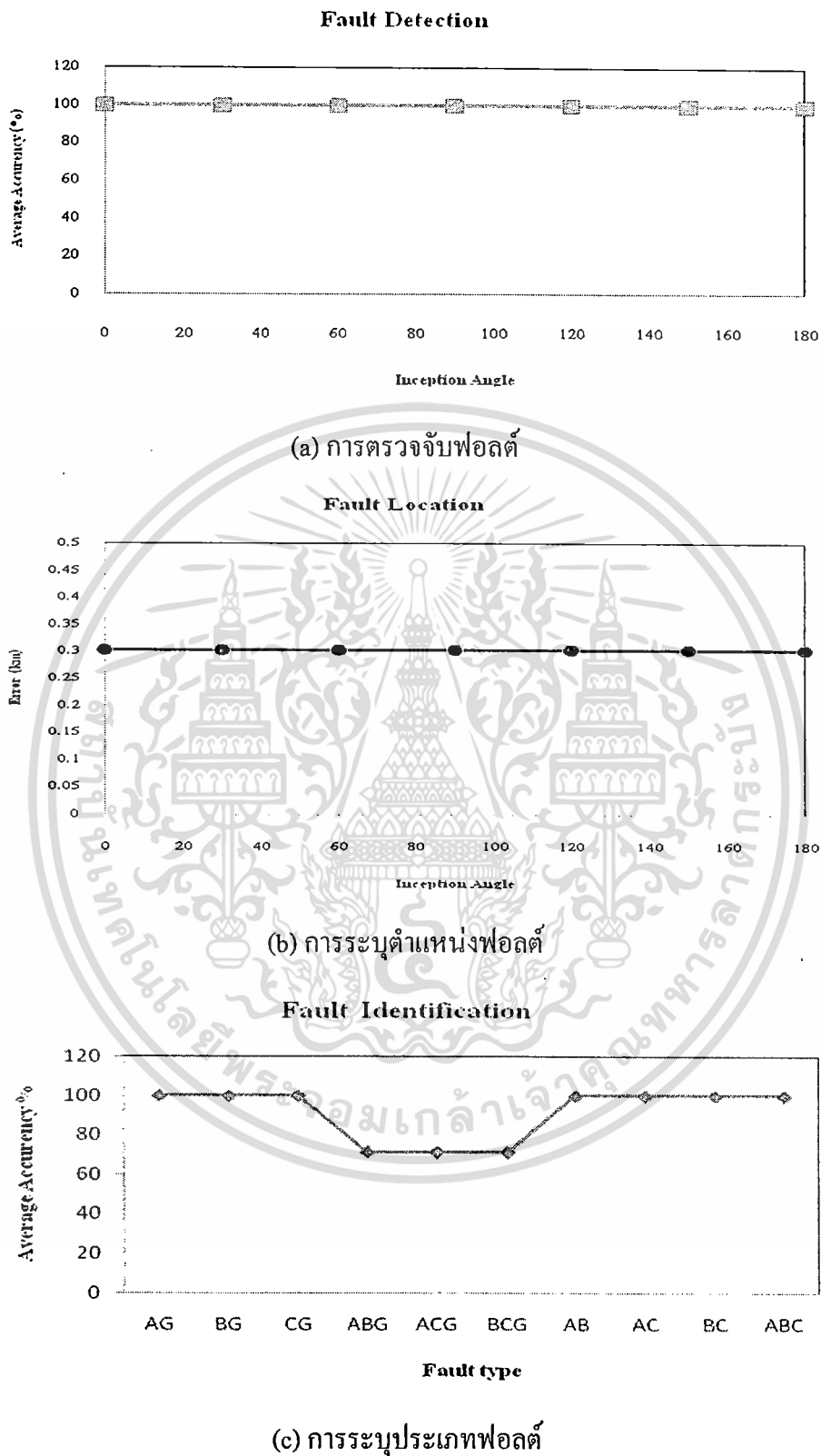
การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 3 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 4.1 (b) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 3.1327 กิโลเมตร (มีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.1327 กิโลเมตร)

การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมาใช้ในการตั้งเงื่อนไขเพื่อระบุชนิดฟอลต์สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.1 (c) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100% ที่ฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG, BG, CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB, AC, BC) และ ฟอลต์ 3 เฟส (ABC) และฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) มีความถูกต้องอยู่ที่ 71.4% โดยรวมแล้วความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 91.42%

4.2.2 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 8 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร)



รูปที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 8 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.2 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

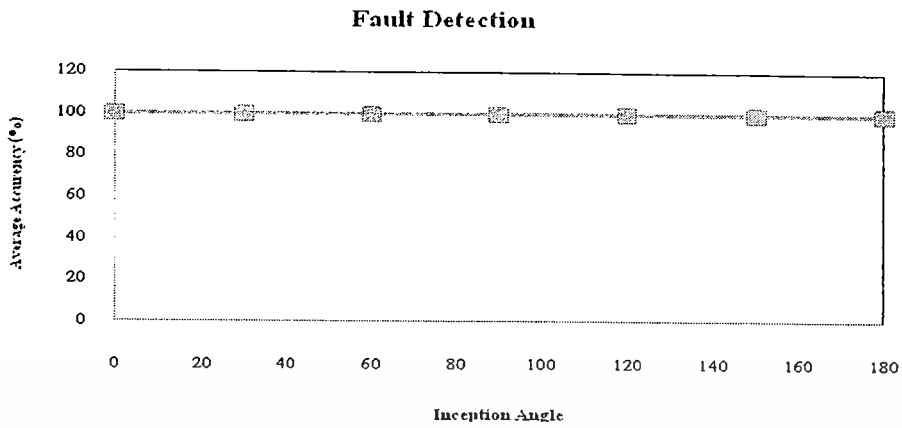
การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 8 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 4.2 (b) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 7.697 กิโลเมตร (มีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.3030 กิโลเมตร)

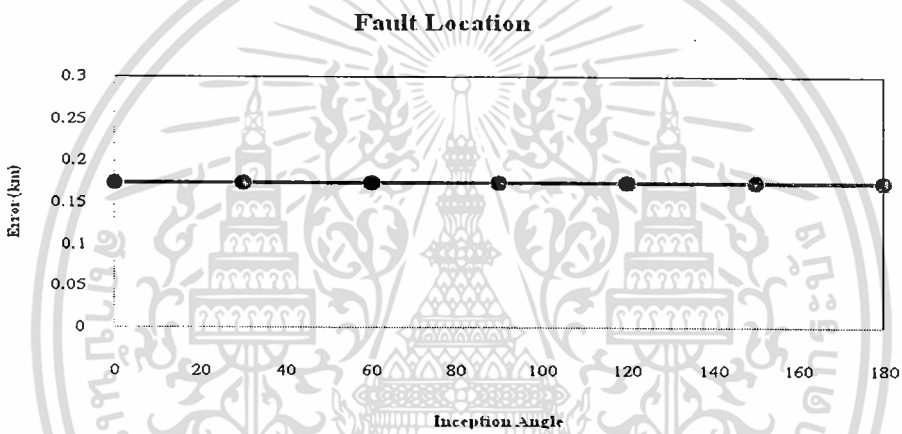
การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมาใช้ในการตั้งเงื่อนไขเพื่อระบุชนิดฟอลต์สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.2 (c) จะเห็นได้ว่าสามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100% ที่ฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG, BG, CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB, AC, BC) และ ฟอลต์ 3 เฟส (ABC) และฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) มีความถูกต้องอยู่ที่ 71.4% โดยรวมแล้วความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 91.42%

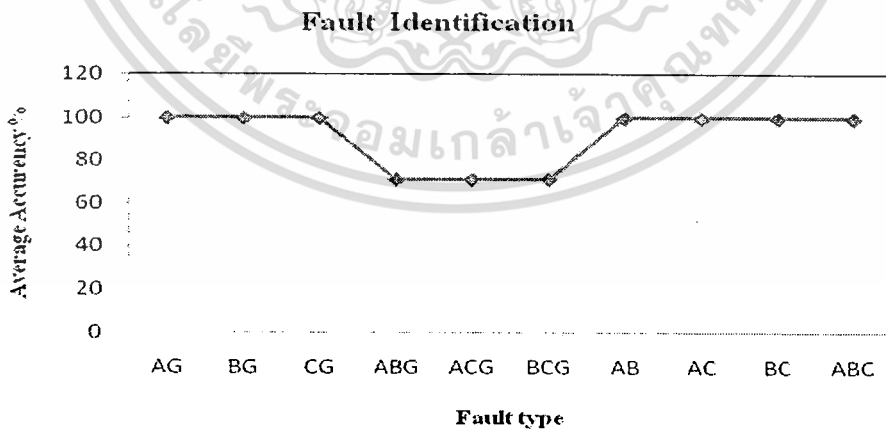
4.2.3 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 17 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร)



(a) การตรวจจับฟอลต์



(b) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(c) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 17 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบ กระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.3 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

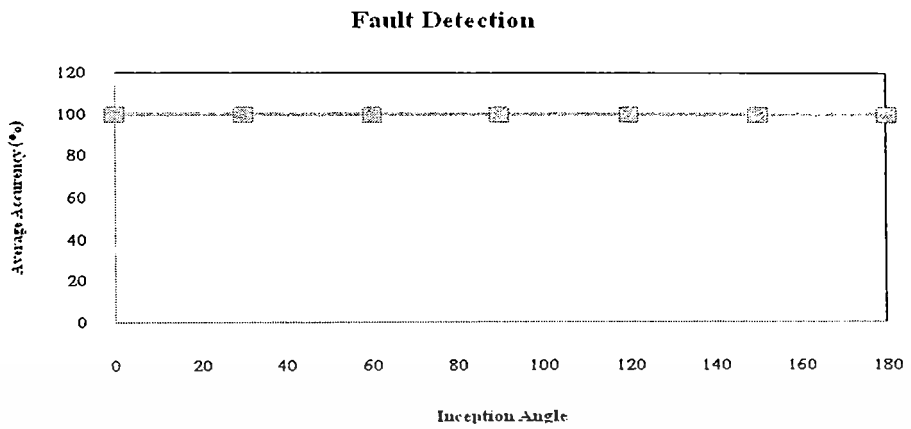
การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 17 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 4.3 (b) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 16.826 กิโลเมตร (มีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.1740 กิโลเมตร)

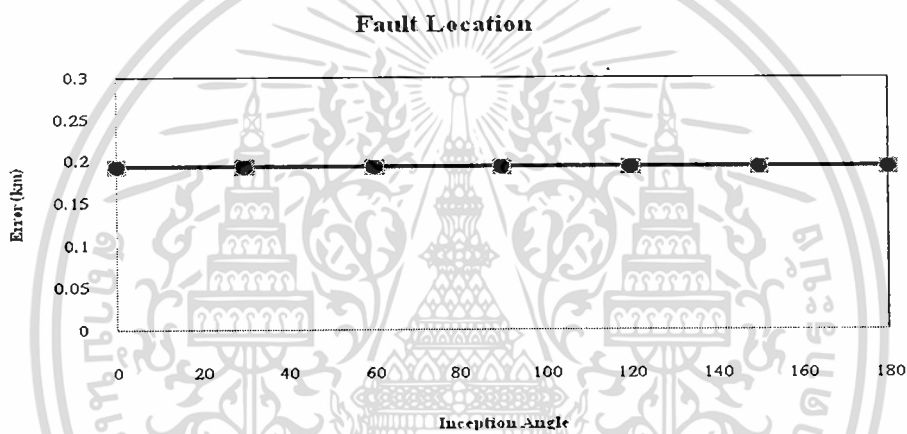
การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมาใช้ในการตั้งเงื่อนไขเพื่อระบุชนิดฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.3 (c) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100% ที่ฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG ,BG ,CG), ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB ,AC, BC) และ ฟอลต์ 3 เฟส (ABC) และฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) มีความถูกต้องอยู่ที่ 71.4% โดยรวมแล้วความถูกต้องเฉลี่ยสูงถึง 91.42%

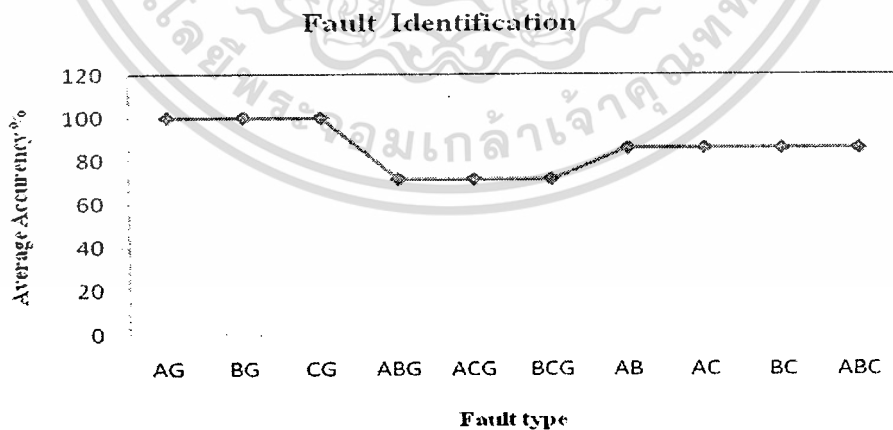
4.2.4 กรณีเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 28.5 กิโลเมตร ของความยาวสายส่ง (30 กิโลเมตร)



(a) การตรวจจับฟอลต์



(b) การระบุตำแหน่งฟอลต์



(c) การระบุประเภทฟอลต์

รูปที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฟอลต์ เมื่อเกิดฟอลต์ที่ระยะทาง 28.5 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับฟอลต์

สามารถตรวจจับฟอลต์จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบ กระแสลำดับบวกในสเกลแรก และจากรูปที่ 4.4 (a) จะมีค่าเฉลี่ยความถูกต้อง 100%

การระบุตำแหน่งฟอลต์ (ระยะทางจริง 28.5 กิโลเมตรวัดจากบัสส่ง)

การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง สามารถหาตำแหน่งฟอลต์ ทั้งหมดโดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 จากรูปที่ 4.4 (b) ระยะทางเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 28.693 กิโลเมตร (มีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.193 กิโลเมตร)

การระบุประเภทของฟอลต์

การใช้สัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ดมาใช้ในการตั้งเงื่อนไขเพื่อระบุชนิดฟอลต์ สามารถระบุประเภทของฟอลต์ โดยใช้เพียงข้อมูลในสเกลที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 4.4 (c) จะเห็นได้ว่า สามารถระบุประเภทของฟอลต์มีความถูกต้องที่ 100% ที่ฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดิน (AG ,BG ,CG) ทางด้าน ฟอลต์ระหว่างเฟส-เฟส (AB ,AC, BC) และ ฟอลต์ 3 เฟส(ABC) มีความถูกต้องที่ 85.7% และฟอลต์ชนิด 2 เฟสลงดิน (ABG, CAG, BCG) มีความถูกต้องอยู่ที่ 71.4% โดยรวมแล้วความถูกต้องเฉลี่ย 85.7%

บทที่ 5

บทสรุป

จากรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทาง และนำผลที่ได้มาประมวลผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการวิเคราะห์อาศัยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ โดยสัญญาณฟอลต์ที่ใช้สำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้ได้มาจากการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ซึ่งใช้แบบจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินที่ระดับแรงดัน 220 kV ในระบบของการจำลองกรณีศึกษา [1] ที่ใช้งานจากสถานีไฟฟ้าด้าน Sending end ไปยังโหนดด้าน Receiving end โดยสายส่งมีความยาว 30 กิโลเมตร เป็นแบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษา โดยทำการจำลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณฟอลต์ในหลากหลายรูปแบบที่อัตราการสุ่ม 200 kHz

2. การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ขนิด Daubechies 4 (db4) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ เนื่องจากเวฟเล็ตแม่ขนิดนี้มีขั้นตอนการทำงานที่รวดเร็ว (Fast algorithm) และลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) ในลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetry) ซึ่งจะสอดคล้องกันกับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน จึงส่งผลให้รูปแบบการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยจะใช้การแปลงเวฟเล็ตทำการวิเคราะห์และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงที่อยู่ในสัญญาณฟอลต์ จากนั้นทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมาในสเกลที่ 1-5 หรือช่วงความถี่ต่อไปนี้

สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz

ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นถูกนำมาประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

3. รูปแบบการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจในการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งนั้นทำได้โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยขององค์ประกอบกระแสลำดับบวก ณ ปลายสายส่งในแต่ละด้านระหว่างก่อนและหลังเกิดฟอลต์ (ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์) โดยเป็นการเปรียบเทียบในสเกลที่ 1-5 จากนั้นเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์ของ

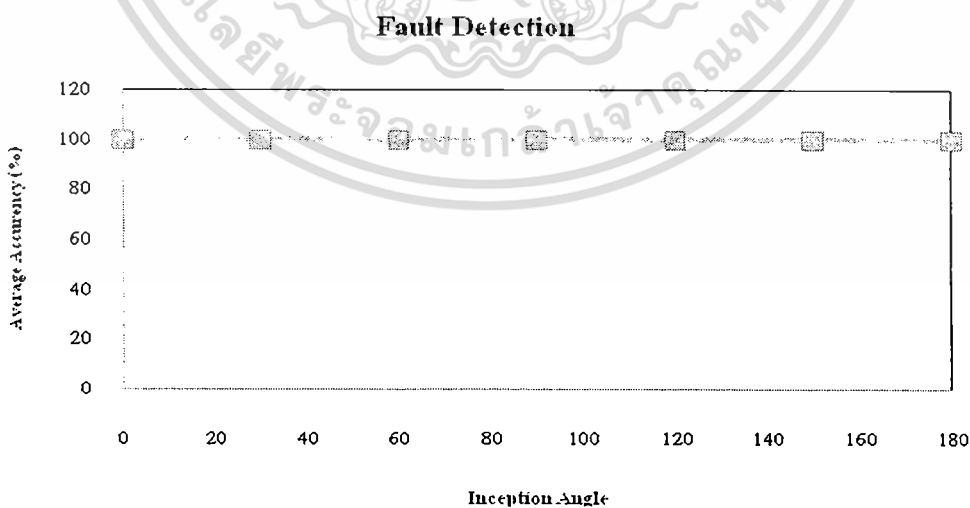
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบกระแสลำดับบวก โดยจะนำค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเพียงสองค่า ซึ่งเป็นข้อมูลขององค์ประกอบความถี่สูงในสเกลแรกที่สามารถตรวจจับพอลต์ได้ นำไปใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับทฤษฎีคลื่นเดินทางเพื่อนำไปวิเคราะห์ในการหาตำแหน่งพอลต์ต่อไป

4. การทดสอบวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองด้วยการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่ได้จากระบบจำลองสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน ทางด้าน Sending end ไปยังด้าน Receiving end โดยสายส่งมีความยาว 30 กิโลเมตร โดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการตรวจจับพอลต์และการระบุตำแหน่งและประเภทของพอลต์

4.1 การตรวจจับพอลต์

ผลการตรวจจับพอลต์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยสามารถตรวจจับพอลต์ได้ทุกประเภท และทุกตำแหน่งต่างๆ บนสายส่งโดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงสุด 100% ตามรูปที่ 5.1 ซึ่งระยะทางที่เกิดพอลต์, ประเภทของพอลต์ที่เกิดขึ้น และมุมเริ่มเกิดพอลต์ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับพอลต์ เพราะเมื่อมีพอลต์เกิดขึ้นบนสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้น เมื่อประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยวิเคราะห์จะสังเกตเห็นได้ว่าก่อนสภาวะมีพอลต์นั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมีค่าต่ำมาก แต่ในสภาวะหลังเกิดพอลต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ทั้งสองสภาวะนี้สามารถนำมาสู่ขั้นตอนของการวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ โดยใช้เพียงผลของการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกเท่านั้น นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดพอลต์บนสายส่งยังมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความถี่สูงของสัญญาณพอลต์ด้วย แต่ในรูปแบบการวิเคราะห์เวฟเล็ตที่มีหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้

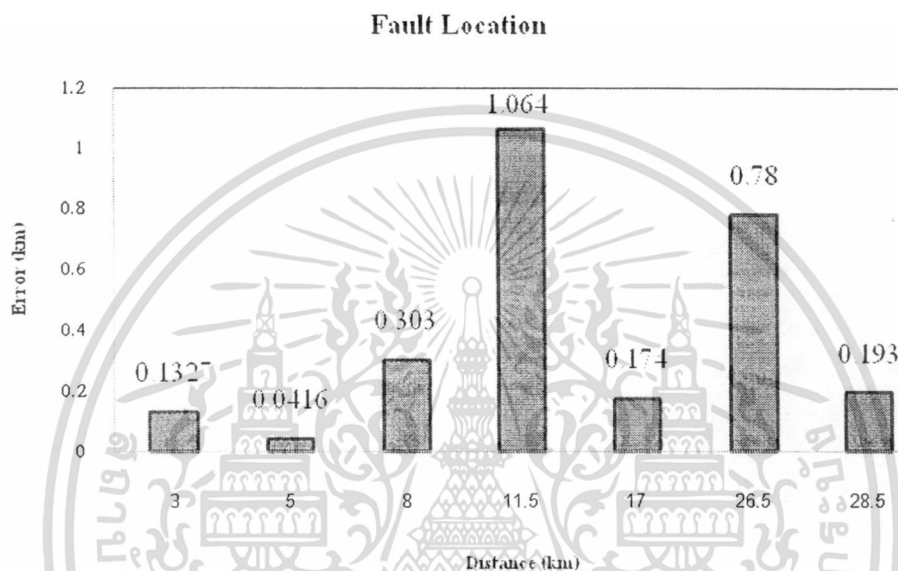


รูปที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสำหรับการตรวจจับพอลต์ในแต่ละมุมเริ่มเกิดพอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การระบุตำแหน่งฟอลต์

ในรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งฟอลต์ในแต่ละระยะทางของการเกิดฟอลต์ทางด้าน Sending end โดยจะสัมพันธ์กับ ตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งฟอลต์เช่นกัน ค่าความคลาดเคลื่อนในระยะทาง 11.5 กิโลเมตรจะมีค่าสูงสุด อยู่ที่ 1.064 กิโลเมตร และมีค่าต่ำสุดที่ ระยะทาง 5 กิโลเมตร ความคลาดเคลื่อนที่ 0.0416 กิโลเมตร



รูปที่ 5.2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสำหรับการระบุตำแหน่งฟอลต์

ตารางที่ 5.1 ความคลาดเคลื่อนในระบุตำแหน่งฟอลต์

| ระยะทางที่เกิดฟอลต์(กิโลเมตร) | ความคลาดเคลื่อนในระบุตำแหน่ง(กิโลเมตร) |
|-------------------------------|--|
| 3 | 0.1327 |
| 5 | 0.0416 |
| 8 | 0.3030 |
| 11.5 | 1.0640 |
| 17 | 0.1740 |
| 26.5 | 0.780 |
| 28.5 | 0.193 |

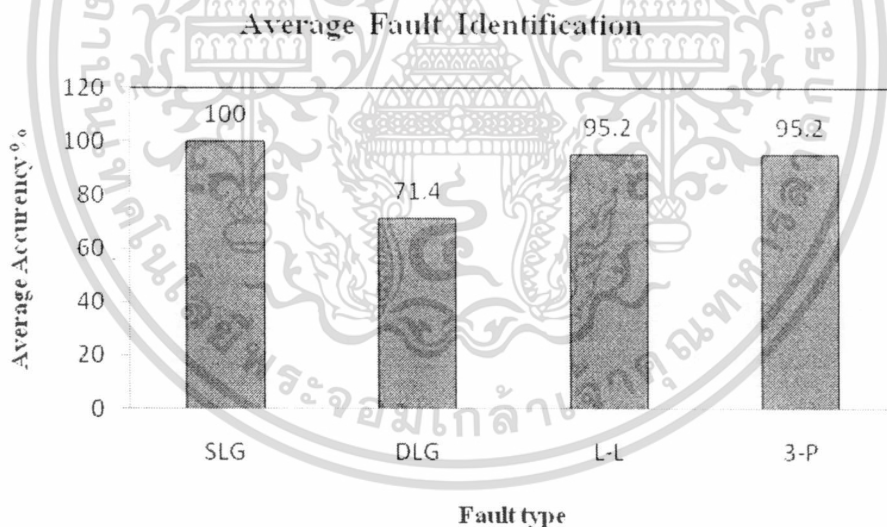
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การระบุชนิดฟอลต์

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากรูปคลื่นเวฟเล็ต สามารถสรุปผลการระบุชนิดของฟอลต์ที่เกิดได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปความถูกต้องในการระบุชนิดฟอลต์

| Fault Location (Distance measured from the sending end) | Number of case studies | Fault type | | | |
|---|---------------------------|------------|-------|-------|-------|
| | | SLG | DLG | LL | 3-P |
| 1 km | 28 | 100% | 71.4% | 85.7% | 85.7% |
| 3 km | 28 | 100% | 71.4% | 100% | 100% |
| 8 km | 28 | 100% | 71.4% | 100% | 100% |
| 17 km | 28 | 100% | 71.4% | 100% | 100% |
| 27 km | 28 | 100% | 71.4% | 100% | 100% |
| 28.5 km | 28 | 100% | 71.4% | 85.7% | 85.7% |
| Average | | 100% | 71.4% | 95.2% | 95.2% |



รูปที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยความถูกต้องในการระบุชนิดฟอลต์แต่ละประเภท

จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการระบุชนิดฟอลต์แต่ละประเภท โดยมีความสัมพันธ์ตามตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า การระบุชนิดฟอลต์ในแต่ละระยะทางนั้นมีความแม่นยำที่แตกต่างกัน ส่วนมากจะมีความแม่นยำที่สูงในช่วงกลางสายส่ง และมีความแม่นยำน้อยลงที่ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งทั้งสองฝั่งเนื่องจากระยะสายส่งที่สั้น ทำให้การตรวจจับค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดเกิดความคลาดเคลื่อน

เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) สำหรับวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดินนั้น จะทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรม ATP/EMTP และรูปคลื่นสัญญาณกระแสฟอลต์มาทำการวิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่งเกิดฟอลต์ และแยกประเภทฟอลต์ที่เกิด โดยนำรูปคลื่นกระแสฟอลต์ในแต่ละเฟส ที่ได้จากการจำลองมาทำการแยกองค์ประกอบลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ จากนั้นทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete wavelet transform) แล้วตรวจหาค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของรูปคลื่น เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาจุดกำเนิดฟอลต์ และนำมาสร้างเงื่อนไขในการแยกประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้น ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

การระบุตำแหน่งฟอลต์

- เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดิน ที่เวลาเกิดฟอลต์จะทำให้สัมประสิทธิ์คลื่นกระแสที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต มีค่าสูงขึ้น
- เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมเริ่มเกิดฟอลต์พบว่า การตรวจจับค่า T_a และ T_b นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงมุมเริ่มเกิดฟอลต์มีผลน้อยมากต่อการระบุตำแหน่งฟอลต์

การระบุชนิดฟอลต์

- เมื่อนำสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตมาใช้ในการสร้างข้อแม้ในการระบุชนิดฟอลต์พบว่าในฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงดินมีความถูกต้อง 100% ที่เวฟเล็ตสเกลที่ 1
- เมื่อใช้เวฟเล็ตสเกลที่ 1 ในการนำมาวิเคราะห์ระบุชนิดฟอลต์แล้ว ได้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่า 90%

ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบความถี่สูงนั้นสามารถให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับสัญญาณฟอลต์ได้อย่างถูกต้องและลดจำนวนข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง ซึ่งผลสรุปที่ได้จากการระบุตำแหน่งฟอลต์เป็นที่น่าพอใจ มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และผลสรุปที่ได้จากการระบุชนิดฟอลต์พบว่า ค่าเฉลี่ยความถูกต้องสูงกว่า 90% ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำค่อนข้างสูง และสามารถยอมรับได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] El Sayed Tag El Din, Mahmoud Gilany, Mohamed Mamdouh Abdel Aziz, Doaa khalil Ibrahim “A wavelet base fault location technique for aged power cables” in IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3 , pp.2485 - 2491 ,12-16 June 2005
- [2] E. C. Bascom, “Computerized underground cable fault location expertise,” in *Proc. IEEE Power Engineer. Society. General Meeting*, Apr. 10–15,1994, pp. 376–382.
- [3] E. Bungay and D. Macllister, *Electric Cable Handbook*, 2nd ed. Oxford, U.K.: BSP, 1990.
- [4] T. Tanaka and A. Greenwood, *Advanced Power Cable Technology*. Boca Raton, FL: CRC, vol. 1.
- [5] J.-H. Sun, “Fault location of underground cables using travelling wave” *KIEE Transaction.*, pp. 1972–1974, Jul. 2000.
- [6] S. Potivejkul, P. Kerdonfag, S. Jammian, and V. Kinnares, “Design of lowvoltage cable fault detector,” in *Proc. IEEE Power Engineer. Society. Winter Meeting*, Jan. 2000, vol. 1, pp. 724–729.
- [7] C. M. Wiggins, D. E. Thomas, T. M. Salas, F. S. Nickel, and H.-W. Ng, “A novel concept for underground cable fault location,” *IEEE Transaction. Power Delivery.*, vol. 9, no. 1, pp. 591–597, Jan. 1994.
- [8] M.-S. Choi, D.-S. Lee, and X. Yang, “A line to ground fault location algorithm for underground cable system” *KIEE Transaction. Power Engineer.*, vol. 54 ,pp. 267–273, Jun. 2005.
- [9] Pongsak Markming, “Fault analysis in transmission line use wavelet transform” Thesis of master engineering electrical engineering. King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2002, Thailand

ภาคผนวก ก.

The Fast Daubechies Wavelet Transform

ในโครงการวิจัยนี้ได้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย โดยมีเวฟเล็ตแม่ชนิด daubechies 4 (db4) มาใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณพอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ภาคผนวกนี้แสดงขั้นตอนวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

จากกฎข้อที่ 5 ของการวิเคราะห์สัญญาณที่ระดับความละเอียดต่างๆ สเกลลิ่งฟังก์ชันที่ระดับความละเอียด $j+1$ จะมีความถี่เป็นสองเท่าของสเกลลิ่งฟังก์ชันที่ระดับความละเอียด j ดังนั้นจะสามารถนิยามสเกลลิ่งฟังก์ชัน $\varphi(t)$ ที่อยู่ใน V^0 ในรูปแบบของการรวมเชิงเส้น (linear combination) ของ $\varphi(2t)$ ที่ถูกเลื่อนใน V^1 ได้ดังนี้

$$\varphi(t) = \sum_n h_0(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n) \quad (ก1)$$

โดยที่ $h_0(n)$ เป็นสัมประสิทธิ์ตัวกรองความถี่บางครั้งจะเรียกว่า ตัวกรองการสเกลลิ่ง (scaling filter) และ $\sqrt{2}$ เป็นตัวบรรทัดฐาน (normalize) เพื่อให้สเกลลิ่งฟังก์ชันที่ถูกสเกลด้วย 2 ยังคงเป็นฟังก์ชันค่าประจำ (norm function) สมการนี้เรียกว่า สมการการเปลี่ยนขนาด (dilation equation) เนื่องจาก $\{\varphi_{jk}(t)\}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจายเวฟเล็ตที่ระดับสเกลต่ำในเทอมของระดับการสเกลสูง ถ้าสเกลและเลื่อนตัวแปรเวลา (t) ด้วย k จะได้

$$\begin{aligned} \varphi(2^j t - k) &= \sum_n h_0(n) \sqrt{2} \varphi(2(2^j t - k) - n) \\ &= \sum_n h_0(n) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} t - 2k - n) \end{aligned} \quad (ก2)$$

เมื่อเปลี่ยนตัวแปร โดยให้ $m = 2k + n$ จะได้

$$\varphi(2^j t - k) = \sum_m h_0(m - 2k) \sqrt{2} \varphi(2^{j+1} t - m) \quad (ก3)$$

ดังนั้นปริภูมิ V^j จะกลายเป็น

$$V_j = \overline{\text{Span}_k \left\{ 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \right\}} \quad (ก4)$$

แล้วสัญญาณ $f(t) \in V^{j+1}$

$$f(t) = \sum_k c_{j+1}(k) 2^{(j+1)/2} \varphi(2^{j+1} t - k) \quad (ก5)$$

ที่ระดับความละเอียดต่ำกว่า 1 ระดับ และใช้เวฟเล็ตฟังก์ชันแทนรายละเอียดหรือ $V^{j+1} = V^j \oplus W^j$ จะได้

$$f(t) = \sum_k c_j(k) 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) + \sum_k d_j(k) 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (ก6)$$

ที่ซึ่ง $2^{j/2}$ เป็นตัวบรรทัดฐาน (normalize) เพื่อให้สเกลถึงฟังก์ชันที่ถูกสเกลด้วย 2^j ยังคงเป็นฟังก์ชันค่าประจำที่สเกลต่างๆ ถ้า $\varphi_{j,k}(t)$ และ $\psi_{j,k}(t)$ เป็นสัมประสิทธิ์เชิงตั้งฉากของการสเกลถึงที่ระดับ j หาได้โดยผลคูณภายใน

$$c_j(k) = \langle f(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) dt \quad (ก7)$$

แทนสมการที่ (ก3) ลงในสมการที่ (ก7) จะได้

$$c_j(k) = \sum_m h_0(m - 2k) \int f(t) 2^{(j+1)/2} \varphi(2^{j+1} t - m) dt \quad (ก8)$$

เมื่อพิจารณาในเทอมที่อินทิเกรตในสมการที่ (ก8) ซึ่งเป็นผลคูณภายในของ $f(t)$ กับสเกลถึงฟังก์ชันที่ระดับการสเกล $j+1$ นั่นคือ

$$c_{j+1}(m) = \int f(t) 2^{(j+1)/2} \varphi(2^{j+1} t - m) dt \quad (ก9)$$

ดังนั้นจะได้

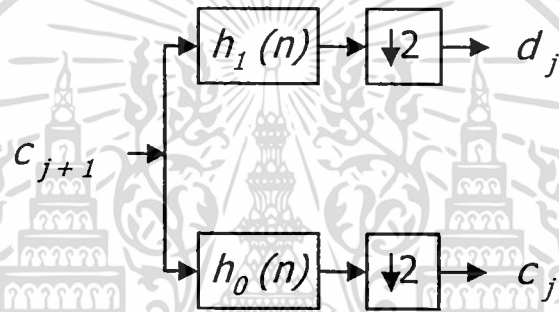
$$c_j(k) = \sum_m h_0(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (ก10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

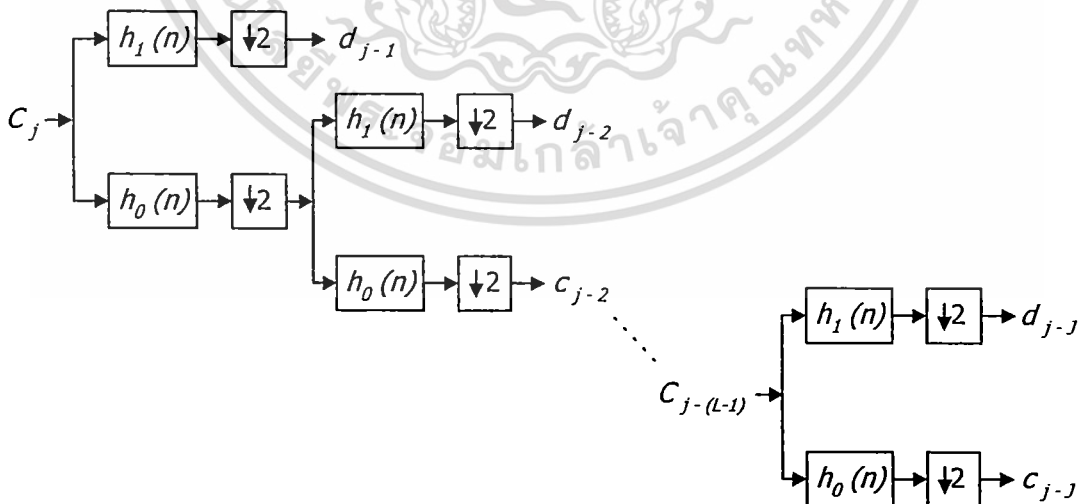
และสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต $d_j(k)$ หาได้ในลักษณะเดียวกันกับ $c_j(k)$ จะได้

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m - 2k) c_{j+1}(m) \tag{ก11}$$

โดยที่ $c_j(k)$ ในสมการที่ (ก10) คือสัมประสิทธิ์สเกลลิงและ $d_j(k)$ ในสมการที่ (ก11) คือสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต และการคำนวณหาค่า $c_j(k)$ และ $d_j(k)$ เรียกว่า การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย ซึ่ง h_0 และ h_1 ในสมการที่ (ก10) และ (ก11) เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ ดังนั้นในการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยจากระดับความละเอียด $j+1$ ไปยังระดับความละเอียด j จะสามารถอธิบายด้วย Two-Band Analysis Filter Bank ได้ดังรูปที่ (ก1) และการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยจากระดับความละเอียด j ไปยังระดับความละเอียด $j-1$ จะแสดงในรูปของ Octave Band Analysis Filter Bank ได้ดังรูปที่ (ก2)



รูป (ก1) แสดง Two-Band Analysis Filter Bank ของการแปลงเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด $j+1$ ไปยัง j



รูป (ก2) แสดง Octave Band Analysis Filter Bank ของการแปลงเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด j ไปยัง $j-1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะใช้สัญลักษณ์ดังสมการที่ (ก14) แทนสมการที่ (ก13)

$$\begin{bmatrix} c_j(k) \\ d_j(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0(N) \\ H_1(N) \end{bmatrix} [c_{j+1}(m)] \quad (\text{ก14})$$

และเพราะว่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของเวฟเล็ตทำให้

$$\begin{bmatrix} H_0(N) \\ H_1(N) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} H_0(N) \\ H_1(N) \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{ก15})$$

ดังนั้นจึงสามารถทำการแปลงเวฟเล็ตกลับเวฟเล็ตได้ดังสมการที่ (ก16)

$$[c_{j+1}(m)] = \begin{bmatrix} H_0(N) \\ H_1(N) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_j(k) \\ d_j(k) \end{bmatrix} \quad (\text{ก16})$$

แต่ในการแปลงเวฟเล็ตไปที่ระดับความละเอียดใดๆ นั้นต้องใช้การแปลงเวฟเล็ตดังรูปที่ (ก2) และเนื่องจากในการแปลงเวฟเล็ตแต่ละครั้ง จะต้องทำการ Down sampling ด้วย 2 และสัมประสิทธิ์ $c(k)$ จะเป็นสัญญาณอินพุตในการแปลงเวฟเล็ตที่ระดับความละเอียดถัดไป ทำให้การคำนวณในการแปลงเวฟเล็ตลดลงครึ่งหนึ่ง ทำให้สามารถแปลงเวฟเล็ตได้ค่อนข้างเร็ว ดังนั้นถ้ามีสัญญาณอินพุต $\text{length} = L$ และผลตอบสนองอิมพัลส์ $\text{length} = N$ จะมีจำนวนการคำนวณการแปลงเวฟเล็ตดังนี้

$$LN \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots \right) < 2LN \quad (\text{ก17})$$

การแปลงเวฟเล็ตแบบเร็วดังสมการที่ (ก10) และ (ก11) เรียกว่า Pyramid Algorithm

ในทางกลับกันสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตเต็มหน่วยในรูปที่ (ก1) คือ $\{d_{j-1}(k)\}, \{d_{j-2}(k)\}$ ไปจนถึง $\{d_{j-J}(k)\}$ และ $\{c_{j-J}(k)\}$ สามารถนำมาสร้างกลับได้อย่างสมบูรณ์ (Perfect reconstruction) ซึ่งการสร้างสัญญาณกลับคืนสามารถทำได้โดยการรวมกันของสัมประสิทธิ์สเกลลิงและสัมประสิทธิ์ที่ระดับความละเอียดต่ำไปยังที่ระดับความละเอียดสูง ซึ่งถ้าพิจารณาสัญญาณที่ถูกแทนในระดับความละเอียด $j+1$ สัญญาณสามารถเขียนในเทอมของสเกลลิงฟังก์ชันได้ดังนี้

$$f(t) = \sum c_{j+1}(m) 2^{(j+1)t/2} \varphi(2^{j+1}t - m) \quad (\text{ก18})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามองจากระดับความละเอียดต่ำกว่า 1 ระดับแล้วจะเหมือนกับได้รวมรายละเอียดโดยใช้เวฟเล็ตฟังก์ชันหรือ $V^{j+1} = V^j \oplus W^j$ จะได้

$$f(t) = \sum_k c_j(k) 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) + \sum_k d_j(k) 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (ก19)$$

เพราะว่าทุกฟังก์ชันเป็นเชิงตั้งฉากปกติ ดังนั้นถ้าคูณสมการที่ (ก19) ด้วย $\varphi(2^{j+1}t - m)$ แล้วอินทิเกรตจะได้

$$\begin{aligned} \int f(t) 2^{(j+1)/2} \varphi(2^{j+1}t - m) dt &= \sum_k c_j(k) 2^{(j+1)/2} 2^{j/2} \int \varphi(2^{j+1}t - m) \varphi(2^j t - k) dt \\ &\quad + \sum_k d_j(k) 2^{(j+1)/2} 2^{j/2} \int \varphi(2^{j+1}t - m) \psi(2^j t - k) dt \end{aligned} \quad (ก20)$$

เปลี่ยนตัวแปรโดยให้ $u = 2^{j+1}t - k$ จะได้

$$\begin{aligned} \int f(t) 2^{(j+1)/2} \varphi(2^{j+1}t - m) dt &= \sum_k c_j(k) \sqrt{2} \int \varphi(2u - (m - 2k)) \varphi(u) du \\ &\quad + \sum_k d_j(k) \sqrt{2} \int \varphi(2u - (m - 2k)) \psi(u) du \end{aligned} \quad (ก21)$$

ถ้าคุณสมบัติของสเกลลิงฟังก์ชันและเวฟเล็ตฟังก์ชันจะได้

$$h_0(n) = \langle \varphi_{1n}, \varphi \rangle = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \varphi(2t - n) dt \quad (ก22)$$

$$h_1(n) = \langle \varphi_{1n}, \psi \rangle = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \psi(2t - n) dt \quad (ก23)$$

ดังนั้นเทอมขวามือของสมการที่ (ก21) จะกลายเป็น

$$\sqrt{2} \int \varphi(2u - (m - 2k)) \varphi(u) du = h_0(m - 2k)$$

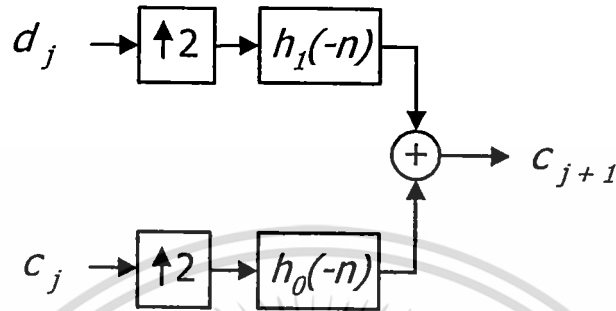
$$\sqrt{2} \int \varphi(2u - (m - 2k)) \psi(u) du = h_1(m - 2k)$$

และแทนสมการที่ (ก9) ลงในสมการที่ (ก21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

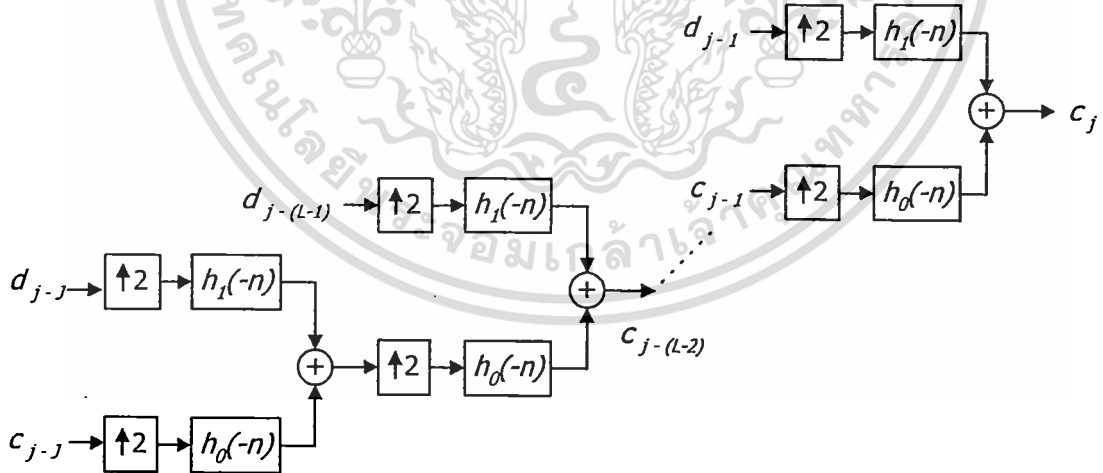
$$c_{j+1}(m) = \sum_k c_j(k)h_0(m-2k) + \sum_k d_j(k)h_1(m-2k) \quad (ก24)$$

จากสมการที่ (ก24) สามารถแสดงในรูปของ Two-Band Synthesis Filter Bank ได้ดังรูปที่ (ก3)



รูป (ก3) แสดง Two-Band Analysis Filter Bank ของการแปลงกลับเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด j ไปยัง $j+1$

โดยที่ $\uparrow 2$ แทนการเพิ่มอัตราสุ่มขึ้น (Up sampling) เป็น 2 เท่า และการแปลงกลับเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด j ไปยังระดับความละเอียด สามารถแสดงเป็น Octave Band Analysis Filter Bank ได้ดังรูปที่ (ก4)



รูป (ก4) แสดง Octave Band Analysis Filter Bank ของการแปลงเวฟเล็ตจากระดับความละเอียด $j-j$ ไปยัง j

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานที่ได้รับจากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สจล.

1. ผลงานวิจัย/ผลผลิตที่ได้จากการทำวิจัย และมี Impact ต่อสังคม, ประเทศชาติ

1. โครงการวิจัยนี้เป็นการรวมกันของวิทยาการด้านต่างๆ คือ กระบวนการประมวลสัญญาณ ทฤษฎีระบบป้องกัน และ วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง เข้าด้วยกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกันของนักวิจัยในสาขาดังกล่าว ทั้งในด้านการแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็น นับเป็นการพัฒนาระดับงานวิจัยของประเทศ
2. การศึกษาวิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่งที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้กับหลักการของระบบป้องกันแบบต่างๆ นับได้ว่าเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย นักศึกษา ตลอดจนผู้สนใจอื่นๆ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป
3. ได้องค์ความรู้ของเทคโนโลยีที่เป็นของประเทศเราเอง โดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

2. การนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้

1. วิเคราะห์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแนวใหม่ โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบความถี่สูงที่ได้จากสัญญาณฟอลต์แบบทรานเซียนต์ ซึ่งช่วยลดช่วงของสัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ให้สั้นลง จะส่งผลให้ระบบการวิเคราะห์และตัดสินใจใช้เวลาลดลงตามไปด้วย
2. หาค่าแห่งและสาเหตุที่แท้จริงของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง เพื่อนำมาวางแผนป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังและซ่อมแซมบำรุงรักษาสายส่งต่อไป
3. สามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตและการใช้ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ตไปประยุกต์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้โดยการนำปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ร่วมด้วย

3. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร หรือผลงานตามที่คาดไว้ในโครงการวิจัย

3.1 หนังสือ ได้รับเชิญให้ตีพิมพ์ในหนังสือ IAENG Transactions on Engineering

Technologies Volume 5 - Special Edition of the International MultiConference of Engineers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญเตเห็นาเบเซบระเษชันต่านการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and Computer Scientists 2010 ตีพิมพ์โดยสำนักพิมพ์ American Institute of Physics (AIP) จำนวน 1 บท (ภาคผนวก ก)

- A. A. Ngaopitakkul, and C. Apisit, “Discrete Wavelet Transform for Fault Types in Underground Distribution System” , IAENG Transactions on Engineering Technologies Volume 5 - Special Edition of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010, an edited book published by American Institute of Physics (AIP), 2011 (Invited and Accepted)

3.2 การนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ นำเสนอบทความในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งสิ้น 1 บทความ (ภาคผนวก ง)

1. A. Ngaopitakkul, C. Apisit, C. Pothisarn, C. Jettanasen and S. Jaikhan, “Identification of Fault Location in Underground Distribution System using Discrete Wavelet transform” *In Proceedings of 2010 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2010(IMECS2010)*, Hong Kong, March 2009.

3.3 การนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ นำเสนอบทความในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ รวมทั้งสิ้น 1 บทความ (ภาคผนวก จ)

1. เซาว์วัฒน์ อภิสัทธ์ และ อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, “การระบุตำแหน่งฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ดินด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย.”, ได้รับการตอบรับให้นำเสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON33), 1-3 ธันวาคม 2553.

ภาคผนวก ก.

หนังสือที่ได้รับเชิญให้ตีพิมพ์.

1. A. Ngaopitakkul, and C. Apisit, "Discrete Wavelet Transform for Fault Types in Underground Distribution System" , IAENG Transactions on Engineering Technologies Volume 5 - Special Edition of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010, an edited book published by American Institute of Physics (AIP), 2011 (Invited and Accepted)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"IAENG - Ivy Xu" <ivyxu@mail.iaeng.org>

Invitation for IMECS 2010 edited book published by American Institute of Physics
Mon, May 3, 2010 5:52 pm
knatthap@kmitl.ac.th

51

ATTHAPOL Ngaopitakkul ,

Thank you for your participation in our International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010 (IMECS 2010). With the efforts of the conference committee, we are organizing the edited books for conference participants.

We are happy to inform you that American Institute of Physics (AIP) has invited us to publish the edited book "Transactions on Engineering Technologies Volume 5 - Special Edition of International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010] Conference Proceedings series for our IMECS 2010. AIP is one of the most and most respected publishers of scientific and technical books, and conference proceedings.

We are now inviting our IMECS 2010 conference participants of selected papers to submit their extended and revised work for publication as book chapters in this edited book.

You are invited to submit the extended and revised work of the following conference paper for the edited book published by AIP:

Number: ICEE_115

Identification of Fault Types for Underground Cable using Discrete Wavelet Transform

The selection process has been based on the review results of the conference and the evaluation scores by our conference committee members during the conference period. The new edited volume will give you the opportunity to present and discuss your results in more details.

All authors of each book chapter are required to purchase two copies of the volume at the reduced price of US\$110 in total. For non credit card payment, an additional US\$ 20 is required as a bank handling fee. This fee has included postage and packing charges. The authors need to place their orders for the books at the following website and settle the fee by 15 July 2010

www1.iaeng.com/publication/order_Edit_IMECS2010_ITET.php

The books will be delivered to the address in the order form after the confirmation (tentatively in the first half of 2011).

If you are interested in it, please perform the following steps.

1. Reply this email to show your interest.

2. Study the following website carefully and follow it strictly.

3. Go to the Preparation of the Book Chapters of the AIP Title
www.iaeng.org/IMECS2010/edited_book/AIP_ITET/

4. Send the required items by 15 July 2010. ๕. รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

๖. Please submit the items once they are ready and at least one week before 15 July 2010 so to have time to return any revised items if any. ๗. โปรดส่งมอบชิ้นงานเมื่อพร้อมแล้ว และต้องนำส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๘. send the required items (see the website in step 2) with email subject

Article with all required items in correct format will be considered.
Submission will not be handled.

Please send an acknowledgement email after getting your items to inform
whether the items are valid. If you have not received any acknowledgement
within three working days after your submission, please contact us.

Thank you for your attention and we are looking forward to your participation in our
IMECS 2011. If you have any enquiry, please inform us immediately.

Regards,

Assistant Secretary
yxyxu@mail.iaeng.org
www.iaeng.org/IMECS2010/
www.iaeng.org/IMECS2011/

Conferences:

World Congress on Engineering and Computer Science 2010
San Francisco, USA, 20-22 Oct 2010
www.iaeng.org/WCECS2010/index.html

International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2011
Hong Kong, 16-18 March, 2011
www.iaeng.org/IMECS2011



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Discrete Wavelet Transform for Fault Types in Underground Distribution System

A. Ngaopitakkul^a and C. Apisit^b

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

^b*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand E-mail : a_conan1412@hotmail.com*

Abstract. In this paper, a technique for identifying the phase with fault appearance in underground cable is presented. The Wavelet transform has been employed to extract high frequency components superimposed on fault signals simulated using ATP/EMTP. The coefficients obtained from the Wavelet transform are used in constructing a decision algorithm. Various cases have been investigated so that the algorithm can be implemented. It is found that the proposed method can indicate the fault types with satisfactory accuracy.

Keywords: Wavelet Transform, Fault Types, Underground Cable, ATP/EMTP

PACS: 89

INTRODUCTION

When faults occur in the transmission and distribution systems, it is important to clear fault from the power system as soon as possible in order that transmission line can reconnect with power system. In previous decade, the development in the algorithm for detecting the faults on the transmission lines has been progressed and results in transient based techniques. In order that the transient based protection can be accurately successful in operation, the application of wavelet transform is employed. In several research papers, the fault classification or the phase with fault appearance can be obtained from employing trial and error method [1-3] or from the artificial intelligent decision algorithms [4-7]. However, most research works have only considered in the fault diagnosis for overhead transmission and distribution systems while research work rarely mention about the fault diagnosis in underground distribution system. In the literature for underground cable [8-13], several algorithms used in fault detection have been developed for the protective relays. The techniques to detect and determine the fault location in underground distribution system are discussed in several research papers [8-9] but the types of fault and the phase with fault appearance are as important as fault location. As a result, it is useful if the fault types in the underground distribution system can be identified using wavelet transform.

Hence, the objective of this paper is to present an application of Wavelet transform and a decision algorithm in order to identify the types of fault in underground cable.

The simulations, analysis and diagnosis are performed using ATP/EMTP and MATLAB. It is noted that the discrete wavelet transform is employed in extracting the high frequency component contained in the fault currents and the coefficients of the first scale from the Wavelet transformer are investigated. The comparison of the coefficients is investigated and used in the construction of the decision algorithm. In addition, the construction of the decision algorithm is detailed and implemented with various case studies based on Thailand electricity transmission systems.

WAVELET TRANSFORM

Wavelet transform is a mathematical technique used in signal analysis. The advantage of the transform is that the band of analysis can be fine adjusted so that high frequency components and low frequency components can be detected precisely. Results obtained from the wavelet transform are shown on both the time domain and the frequency domain. The wavelet transform which has a change in the analysis scale by the factor of two is called discrete wavelet transform (DWT) as in Eq. 1 [5].

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

Where, $\psi \left[\frac{n - k 2^m}{2^m} \right]$ is mother wavelet.

POWER SYSTEM SIMULATION USING EMTP

The ATP/EMTP [5-7, 13] is employed to simulate fault signals, at a sampling rate 200 kHz. The system employed in case studies is chosen based on the underground distribution system as illustrated in Figure 1. In addition, a cross-sectional view of a cable is shown in Figure 2. To avoid complexity the fault resistance is assumed to be 10Ω . Fault patterns in the simulations are performed with various changes of system parameters as follows :

- Fault types are under consideration, namely: single phase to ground (SLG), double-line to ground (DLG), line to line (L-L) and three-phase fault (3-P).
- Fault locations on the underground distribution system are the distance of 1, 8, 27 km measured from the sending end.
- Inception angle on a voltage waveform is varied between 0° - 180° , with the increasing step of 30° . Phase A is used as a reference.

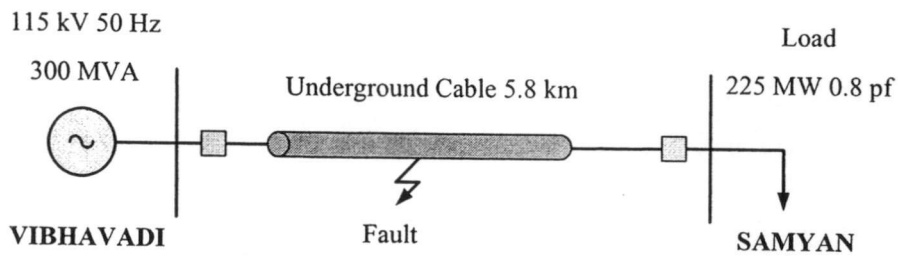


FIGURE 1. The system used in simulation studies.

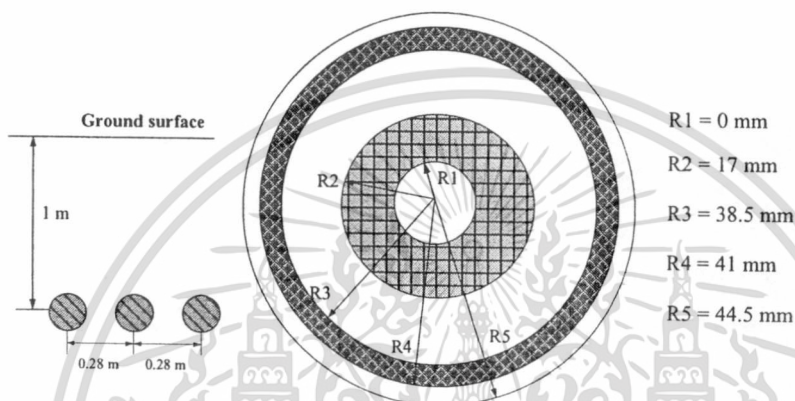


FIGURE 2. The configuration of cable in simulation studies

The example of ATP/EMTP simulated fault signals is illustrated in Figure 3. This is a fault occurring with phase A to ground fault at 8 km measured from the sending bus as depicted in Figure 1. The fault signals generated using ATP/EMTP are interfaced to the MATLAB for the fault detection algorithm.

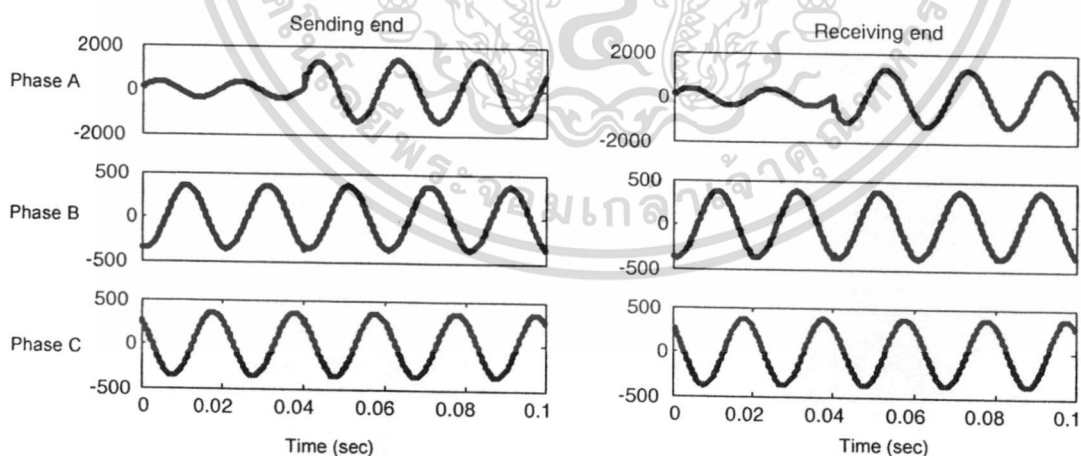


FIGURE 3. Example of ATP/EMTP simulated fault signals for AG fault at sending.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DECISION ALGORITHM

Fault detection decision algorithm [13] is processed using positive sequence current signal. Fault signals generated using PSCAD/EMTDC are imported to the MATLAB/Simulink in order to analyse the high frequency transient components, which are superimposed in the fault current signals, by DWT using the wavelet toolbox. The Clark's transformation matrix is employed for calculating the positive sequence and zero sequence of currents. With several trial and error processes, the fault detection decision algorithm on the basis of computer programming technique is constructed as shown in Figure 4. The mother wavelet daubechies4 (db4) [3, 5-7] is employed to decompose high frequency components from the positive sequence current signals.

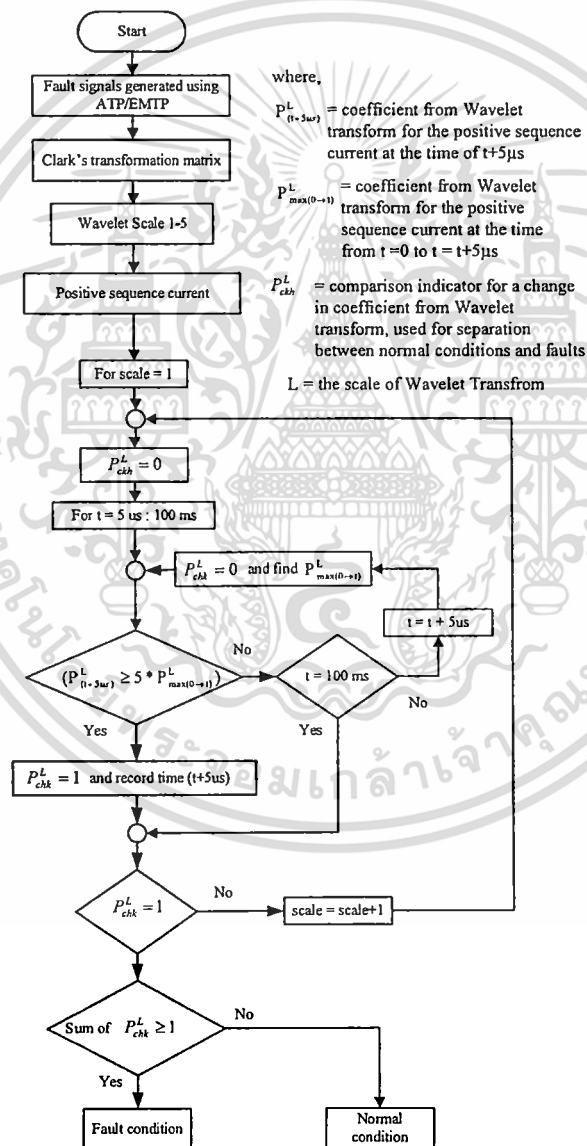


FIGURE 4. Flowchart for fault detection.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

After applying the Wavelet transform to the positive sequence currents, the comparison of the coefficients from each scale is under investigation. Coefficients obtained using DWT of signals are squared so that the abrupt change in the spectra can be clearly found, and it is clearly seen that the coefficients of high frequency components, when fault occurs, have a sudden change compared with those before an occurrence of the faults as illustrated in Figure 5. This sudden change is used as an index for the occurrence of faults. The fault detection decision algorithm has been proposed that if coefficients of any scales are change around five times before an occurrence of the faults, there are faults occurring in underground cables.

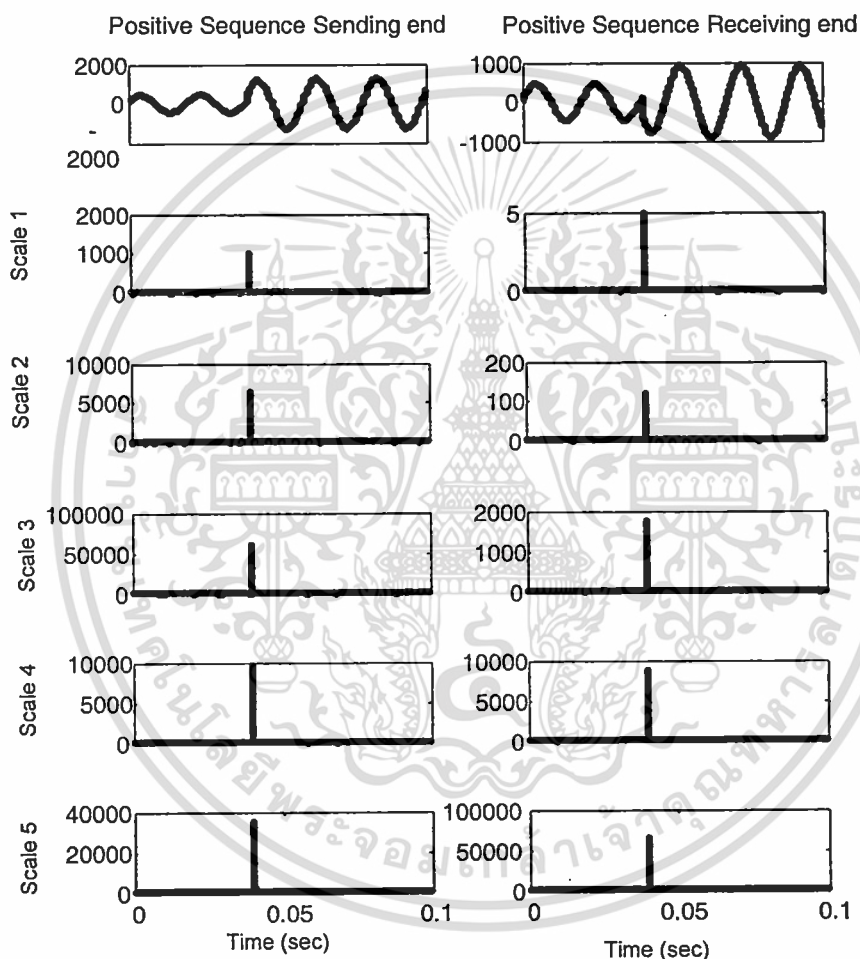


FIGURE 5. Wavelet transform from scale 1 to 5 for the positive sequence of current signal shown in Figure 3.

From Figure 5, the coefficients in all scale of the wavelet transform are clearly changed then it presumes that these signals are fault condition. After the fault detection process, the comparison of the coefficients from first scale that can detect fault is considered so that the types of fault can be analysed. The most appropriate algorithm for the decision algorithm can be concluded as follows :

The division algorithm between the maximum coefficients of DWT at $\frac{1}{4}$ cycle of phase A, B, C are performed as shown in Eq. 2-4.

$$I_{AZ,\max(post)}^L = \frac{I_{A,\max(post)}^L}{I_{zero,\max(post)}^L} \quad (2)$$

$$I_{BZ,\max(post)}^L = \frac{I_{B,\max(post)}^L}{I_{zero,\max(post)}^L} \quad (3)$$

$$I_{CZ,\max(post)}^L = \frac{I_{C,\max(post)}^L}{I_{zero,\max(post)}^L} \quad (4)$$

where, L = the scale of wavelet transform that can detect fault.

$I_{A,\max(post)}^L$ = maximum coefficient from Wavelet transform at $\frac{1}{4}$ cycles of phase A for post-fault current

$I_{B,\max(post)}^L$ = maximum coefficient from Wavelet transform at $\frac{1}{4}$ cycles of phase B for post-fault current

$I_{C,\max(post)}^L$ = maximum coefficient from Wavelet transform at $\frac{1}{4}$ cycles of phase C for post-fault current

$I_{zero,\max(post)}^L$ = maximum coefficient from Wavelet transform of zero sequence current at the time of $\frac{1}{4}$ cycles after detecting faults

$I_{A,\max(post)}^L$ and $I_{zero,\max(post)}^L$ = maximum ratio obtained from division algorithm between $I_{A,\max(post)}^L$ and $I_{zero,\max(post)}^L$

$I_{B,\max(post)}^L$ and $I_{zero,\max(post)}^L$ = maximum ratio obtained from division algorithm between $I_{B,\max(post)}^L$ and $I_{zero,\max(post)}^L$

$I_{C,\max(post)}^L$ and $I_{zero,\max(post)}^L$ = maximum ratio obtained from division algorithm between $I_{C,\max(post)}^L$ and $I_{zero,\max(post)}^L$

From Figure 6, it is shown that maximum ratio obtained from division algorithm is calculated. For identifying the phase with fault appearance, the comparisons of the maximum ratio obtained from division algorithm have been performed as follows:

For detecting the phase with a fault condition

if $[(I_{X,\max}^L(\text{post}) > 1) \text{ and } (I_{X,\max}^L(\text{post}) > 5 \times Ph_{\min}^L)] \text{ or } (I_{X,\max}^L(\text{post}) > 1000) \text{ or } (I_{X,\max}^L(\text{post}) > 0.4 \times Ph_{\max}^L)$

then

Phase X fault

else

Phase X unfault

end

where,

$I_{X,\max}^L(\text{post})$ = maximum value obtained from division algorithm ($I_k^L = I_{AZ}^L, I_{BZ}^L$ and I_{CZ}^L respectively)

Ph_{\max}^L = the maximum value obtained from comparing among $I_{AZ,\max}^L(\text{post})$, $I_{BZ,\max}^L(\text{post})$ and $I_{CZ,\max}^L(\text{post})$

Ph_{\min}^L = the minimum value obtained from comparing among $I_{AZ,\max}^L(\text{post})$, $I_{BZ,\max}^L(\text{post})$ and $I_{CZ,\max}^L(\text{post})$

In addition, for detecting the zero sequence current with a fault condition

If $(I_{\text{zero},\max}^L(\text{post}) \geq 5 \times I_{\text{zero},\max}^L(\text{pre}))$

then

Ground fault

else

Unground fault

end

where,

$I_{\text{zero},\max}^L(\text{pre})$ = maximum coefficient from Wavelet transform of zero sequence current at the time of $\frac{1}{4}$ cycles before the inception of faults

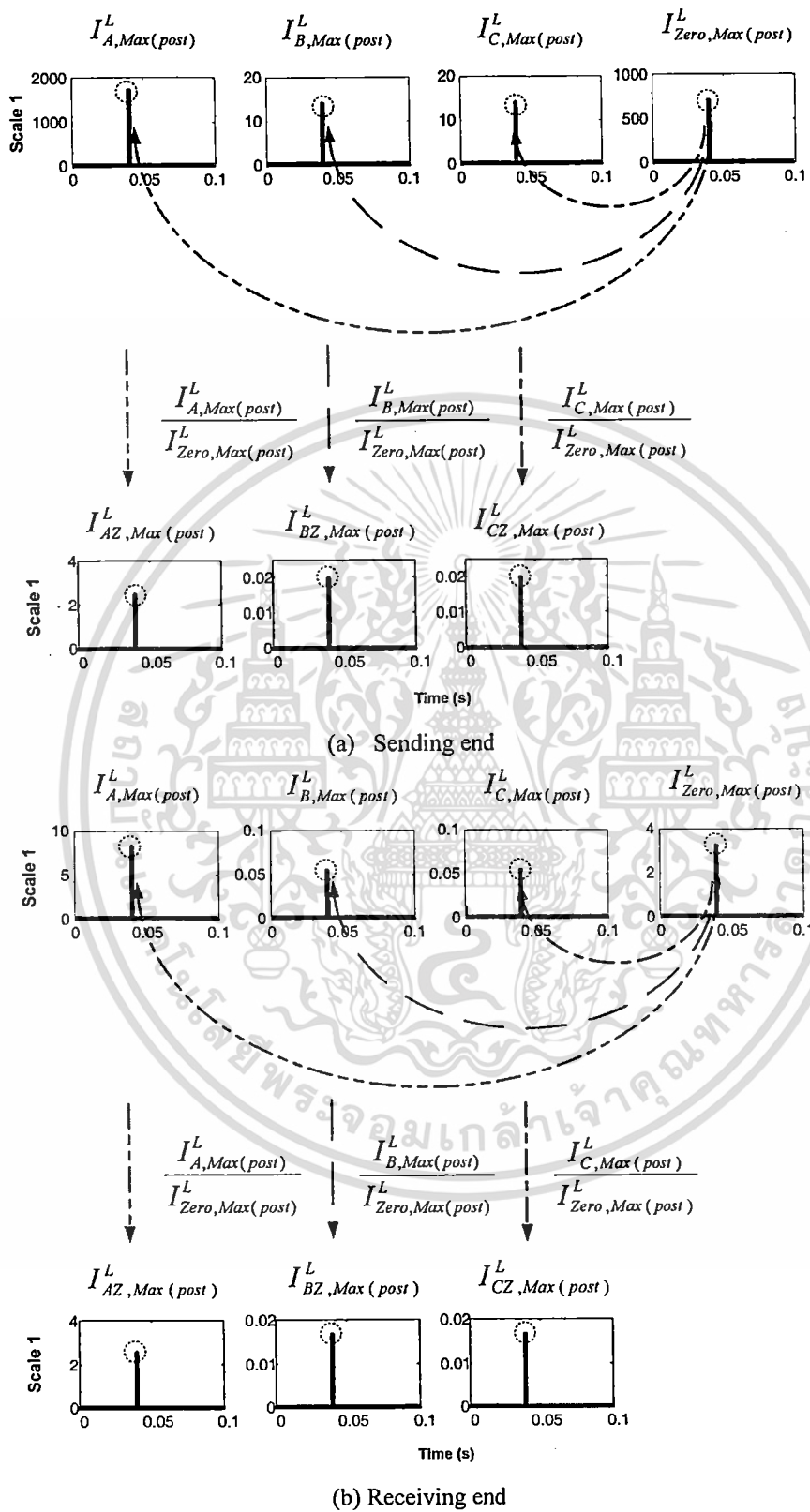


FIGURE 6. Result of maximum ratio from the division algorithm proposed in this paper.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Results illustrated from Tables 1 are obtained from one case of phase A to ground fault. Case studies are varied so that the decision algorithm capability can be verified. Various case studies are performed with various types of faults at each location in the underground cable including the variation of fault inception angles. The results are shown that the average accuracy of fault type from the decision algorithm proposed in this paper is highly satisfactory as shown in Table 2.

TABLE 1. Result for detecting types of faults at sending end and receiving end

| Coefficient of DWT | | Sending end | Receiving end |
|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Phase A | Max (post) | 1.71×10^3 | 8.16 |
| | $I_{AZ,max}^L(post)$ | 2.4303 | 2.5339 |
| Phase B | Max (post) | 13.74 | 0.0534 |
| | $I_{BZ,max}^L(post)$ | 0.0195 | 0.0166 |
| Phase C | Max (post) | 13.75 | 0.0536 |
| | $I_{CZ,max}^L(post)$ | 0.0195 | 0.0166 |
| Zero sequence | Max (pre) | 3.39×10^{-3} | 2.57×10^{-3} |
| | Max (post) | 705.98 | 3.2214 |
| Ph_{max}^L | | 2.4303 | 2.5339 |
| Ph_{min}^L | | 0.0195 | 0.0166 |
| Result | | AG | AG |

TABLE 2. Result for detecting types of faults at receiving end.

| Fault Location (Distance measured from the sending end) | Number of case studies | Fault type | | | |
|---|---------------------------|------------|------|------|------|
| | | SLG | DLG | LL | 3-P |
| 1 | 130 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 2 | 130 | 100% | 82% | 100% | 100% |
| 3 | 130 | 82% | 82% | 100% | 100% |
| 4 | 130 | 82% | 85% | 100% | 100% |
| 5 | 130 | 82% | 100% | 100% | 100% |
| Average | | 89% | 90% | 100% | 100% |

CONCLUSION

The applications of the discrete wavelet transform (DWT) for identifying the phase with fault appearance along the underground cable distribution system have been investigated in this paper. Daubechies4 (db4) is employed as mother wavelet in order to decompose high frequency components from fault signals. Coefficients of positive sequence current signals are calculated and employed in fault detection decision algorithm. By performing many simulations, the result is found that the fault detection decision algorithm can detect fault with the accuracy of 100% using scale 1 only. The maximum coefficients details (cD1) in scale 1 at $\frac{1}{4}$ cycle of phase A, B, C and zero sequence for post-fault currents waveforms are used in constructing a decision

algorithm. Various case studies have been studied including the variation of fault inception angles, different locations in cable and various types of faults. The results are shown that the proposed algorithm can indicate fault types with the accuracy higher than 89%.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to gratefully acknowledge financial support for this research by the faculty of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand.

REFERENCES

1. P. M. Silveira, R. Seara and H. H. Zurn, "An Approach Using Wavelet transforms for Fault Type Identification in Digital Relaying" IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1999, Vol. 2, July 1999, pp. 937-942.
2. Omar A.S. Youssef "Fault Classification Based On Wavelet Transforms" IEEE IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, October 2001, Vol. 1, pp. 531-538.
3. P. Makming, S. Bunjongjit, A. Kunakorn, S. Jiriwibhakorn and M. Kando 'Fault diagnosis in transmission lines using wavelet transforms' IEEE Transmission and Distribution Conference, Yokohama, Japan, October 2002, pp. 2246-2250.
4. A. Ferrero, S. Sangiovanni and E. Zappitelli, "A Fuzzy-set approach to fault-type identification in digital relaying,," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 169-175.
5. P. Chiradeja and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet Transforms and Artificial Neural Networks," The International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists 2009 (IMECS2009), Hongkong, China, 18-20March 2009, pp. 1520 – 1525,.
6. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation Neural Networks Algorithm for Fault Classification on Transmission Line" In Proceedings of IEEE International Conference on Transmission and Distribution (T&D Asia 2009), Korea, October 2009.
7. Pathomthat Chiradeja and Chaichan Pothisarn "Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic Algorithm for Identification of Fault Types on Transmission Line" International Conference (APSCOM2009), November 2009.
8. El Sayed Tag El Din, Mahmoud Gilany, Mohamed Mamdouh Abdel Aziz, Doaa khalil Ibrahim "A wavelet base fault location technique for aged power cables" in IEEE Power Engineering Society, Vol.3, 12-16 June 2005, pp.2485-2491.
9. M.S. Choi, D.S. Lee, and X. Yang, "A line to ground fault location algorithm for underground cable system," KIEE International Transactions on Power Engineering, Vol. 54, Jun. 2005, pp. 267-273.
10. B. Kasztenny, I. Voloh and J.G. Hubertus "Applying Distance Protection to Cable Circuit" 57th Annual Texas A&M Conference for Protective Relay Engineers, April 2004.
11. S. Lopez, J.L. Martinez, J.M. Roca, A. Montoya and I. Zamora, "Protection of Combined Cable and Overhead Lines," CIGRE Study Committee B5 Colloquium, 2007.
12. D. Tziouvaras and S. Chano, "Advancements in Transmission Cable Protection, Control, and Monitoring," CIGRE Study Committee B5 Colloquium, 2007.
13. C. Apisit and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Underground Cable using Discrete Wavelet transform" Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010, IMECS 2010, 17-19 March, 2010, Hong Kong, pp.1262-1266.

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างบทความประชุมวิชาการระดับนานาชาติที่ได้นำเสนอในที่ ประชุมระดับนานาชาติ

1. A. Ngaopitakkul, C. Apisit, C. Pothisarn, C. Jettanasen and S. Jaikhan, "Identification of Fault Location in Underground Distribution System using Discrete Wavelet transform" *In Proceedings of 2010 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2010(IMECS2010)*, pp.1188-1192, Hong Kong, March 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Identification of Fault Locations in Underground Distribution System using Discrete Wavelet Transform

A. Ngaopitakkul, C. Apsit, C. Pothisarn, C. Jettanasen and S. Jaikhan

Abstract—In this paper, a technique for detecting faults in underground distribution system is presented. Discrete Wavelet Transform (DWT) based on traveling wave is employed in order to detect the high frequency components and to identify fault locations in the underground distribution system. The first peak time obtained from the faulty bus is employed for calculating the distance of fault from sending end. The validity of the proposed technique is tested with various fault inception angles, fault locations and faulty phases. The result is found that the proposed technique provides satisfactory result and will be very useful in the development of power systems protection scheme.

Index Terms—Wavelet Transform, Travelling wave, Fault Location, Underground Cable, ATP/EMTP.

I. INTRODUCTION

The main function of the electrical transmission and distribution systems is to transport electrical energy from the generation unit to the customers. Generally, when fault occurs on transmission lines, detecting fault is necessary for power system in order to clear fault before it increases the damage to the power system. Although the underground cable system provides higher reliability than the overhead line system, it is hard to seek out the fault location. The demand for reliable service has led to the development of technique of locating faults. During the course of recent years, the development of the fault diagnosis has been progressed with the applications of signal processing techniques and results in transient based techniques. It has been found that the wavelet transform is capable of investigating the transient signals generated in power system. The location of fault using wavelet transform was initially proposed by F. H. Magnago et al [1]. Recently, several techniques have been employed to determine the fault location in underground cable such as age cable [2], bridge technique [3], Murry loop pulse radar [3] and traveling wave [4-6] but each technique has different solutions. In addition, a technique selection is available for fault locating; it depends on several factors such as length of circuit (or cable) and type of fault (sustained or temporary), etc.

Manuscript received January 12, 2010. This work was supported in part by the faculty of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

A. Ngaopitakkul, C. Apsit, C. Pothisarn and C. Jettanasen are with Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand (e-mail: knattthap@kmitl.ac.th).

S. Jaikhan is with Designs and Supervision Department, Metropolitan Electricity Authority, Bangkok 10900, Thailand (e-mail: sirarote-ong@hotmail.com).

This paper is aimed to present a technique based on a combination of Discrete Wavelet Transform and traveling wave in order to determine the fault location in the underground distribution systems. The fault conditions are simulated using ATP/EMTP and the current waveforms obtained from the simulation are extracted using the wavelet transform. The coefficients of the first scale from the wavelet transform that can detect fault are investigated. The travelling wave theory is applied to calculate the distance of fault from sending end.

II. SIMULATION

The ATP/EMTP [7] is employed to simulate fault signals, at a sampling rate 200 kHz. The system employed in case studies is chosen based on the underground distribution system as illustrated in Figure 1. In addition, a cross-sectional view of a cable is shown in Figure 2. To avoid complexity, the fault resistance is assumed to be 10Ω . Fault patterns in the simulations are performed with various changes of system parameters as follows:

- Fault types are under consideration, namely: single phase to ground (SLG), double-line to ground (DLG), line to line (L-L) and three-phase fault (3-P).
- Fault locations on the underground distribution system are the distance of 1, 8, 27 km measured from the sending end.
- Inception angle on a voltage waveform is varied between 0° - 180° , with the increasing step of 30° . Phase A is used as a reference.

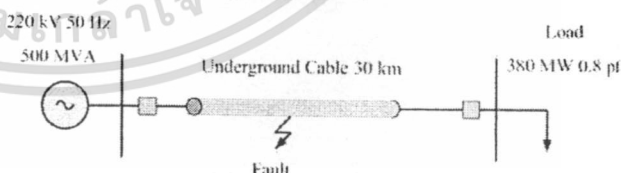


Figure 1. The system used in simulation studies

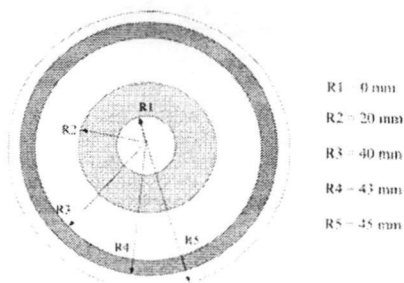
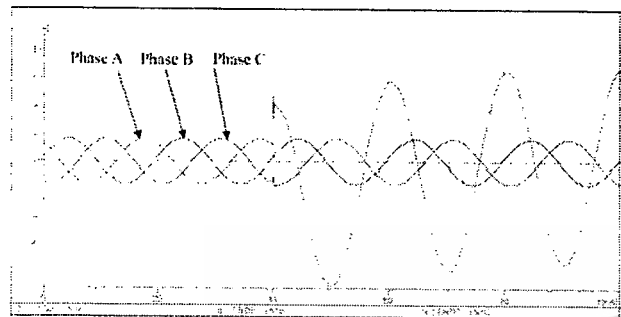
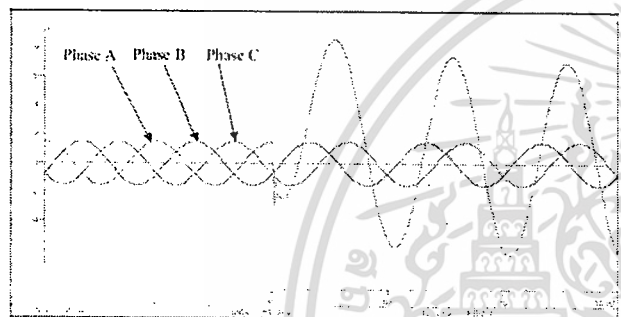


Figure 2. The configuration of cable in simulation studies

The example of ATP/EMTP simulated fault signals is illustrated in Figure 3. This is a fault occurring with phase A to ground fault at 8 km measured from the sending bus as depicted in Figure 1. The fault signals generated using ATP/EMTP are interfaced to the MATLAB for the fault detection algorithm.



(a) Sending end



(b) Receiving end

Figure 3. Example of ATP/EMTP simulated fault signals for AG fault

III. FAULT DETECTION

With several trial and error processes, the fault detection decision algorithm [7] on the basis of computer programming technique is constructed as shown in Figure 4. Fault detection using positive sequence current signal is employed. The Clark's transformation matrix is employed for calculating the positive sequence and zero sequence currents. The mother wavelet, daubechies4 (db4) [7-8], is employed to decompose high frequency components from the signals. After applying the Wavelet transform to the positive sequence currents, coefficients obtained using DWT of signals are squared. The comparison of the coefficients from each scale is under investigation. The result is clearly seen that when fault occurs, the coefficients of high frequency components have a sudden change with those before an occurrence of the faults as illustrated in Table 1 and Figure 5. This sudden change is used as an index for the occurrence of faults.

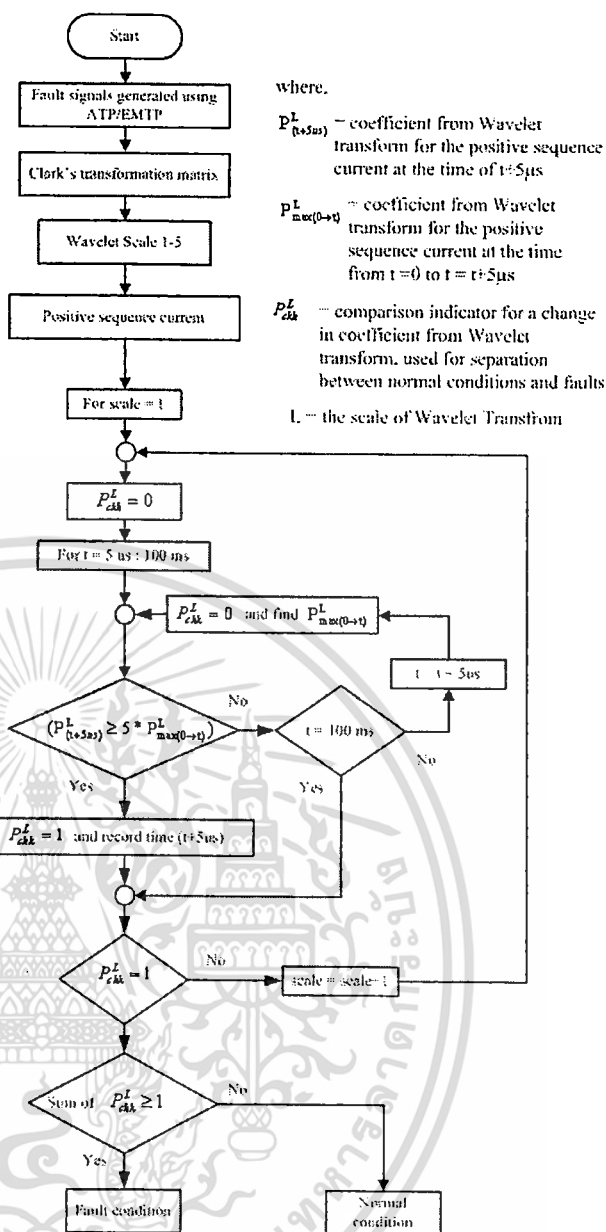


Figure 4. Flowchart for fault detection.

TABLE 1 RESULT FOR FAULT DETECTION FROM SIGNAL SHOWN IN FIGURE 3

| Wavelet scale | Sending End | | Receiving End | | Result |
|---------------|-------------|------------|---------------|------------|--------|
| | Max (pre) | Max (post) | Max (pre) | Max (post) | |
| 1 | 0.00004 | 78,548 | 0.001403 | 135,134 | Fault |
| 2 | 0.01662 | 169,715 | 0.005627 | 160,559 | Fault |
| 3 | 0.44905 | 293,555 | 0.179792 | 185,927 | Fault |
| 4 | 2.89337 | 592,877 | 1.005606 | 322,468 | Fault |
| 5 | 15.1703 | 352,046 | 4.019407 | 660,034 | Fault |

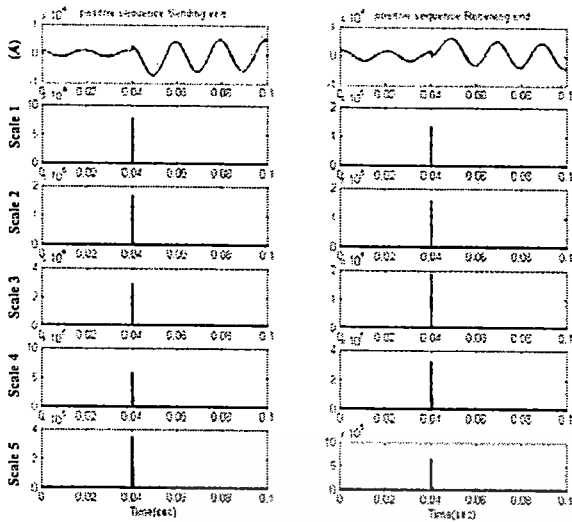


Figure 5 Wavelet transform from scale 1 to 5 for the positive sequence of current signal shown in Figure 3.

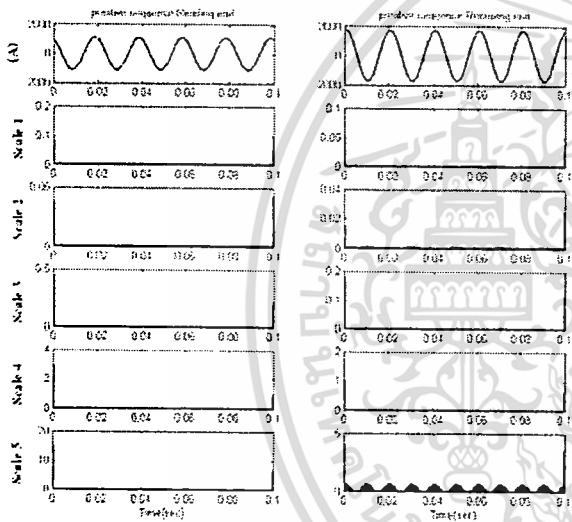


Figure 6 Wavelet transform from scale 1 to 5 for the positive sequence of current signal in normal condition.

From Figure 5, it can be seen that coefficient detail (cD1) of positive sequence current in previous fault condition has value less than coefficient detail (cD1) in post fault condition. Then it presumes that these signals are fault condition whereas the coefficient detail (cD1) in each scale of the wavelet transform does not clearly change as illustrated in Figure 6 so that the result obtained from fault

detection algorithm can presume the normal condition of these signals.

As a result, fault detection algorithm is assumed that “if coefficients of any scale are changed around five times before an occurrence of the faults, there are faults occurring in underground cable and the coefficients in first scale that can detect fault is investigated as illustrated in Figure 7.

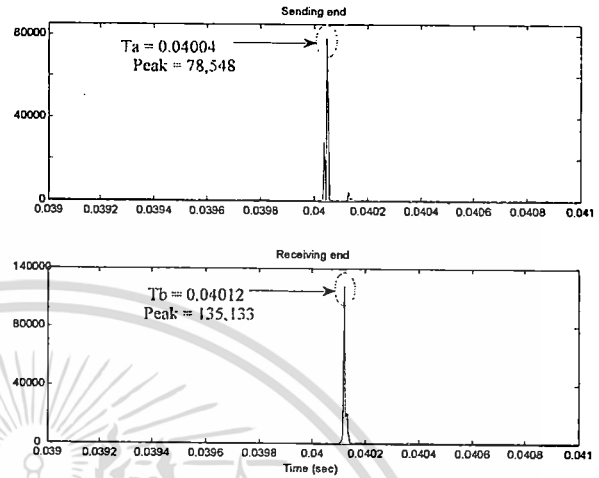


Figure 7 First peaks in the scale 1 at both ends of underground cable for the positive sequence of current signal shown in Figure 5.

IV. DECISION ALGORITHM

Fault can occur along the length of cable. Therefore, before doing performance decision algorithm with traveling wave technique in order to locate the distance of fault, decision algorithm is necessary to understand fault behavior and the variation of coefficient detail (cD1) obtained from DWT.

Table 2 illustrates an example of phase A to ground fault when distance of fault in underground cable is varied and inception angles do not change. The result is seen that coefficients obtained from the positive sequence current decreases with increasing distance between the line end of the cable and the fault point as illustrated in Table 2. On the other hand, it is noticed that the first peak time that can detect fault obtained from the positive sequence current increases with increasing distance between the line end of the cable and the fault point as illustrate in Table 2.

Table 2 Comparison variations of coefficient detail in scale 1 for a case of phase A to ground fault at various fault location of underground cable. (Inception angle 60° and Fault occur at 40 msec)

| Coefficients of high frequency components of positive sequence current | | Fault location (Inception angle)(km) | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 15 | 17 | 19 | 21 | 25 | 28 |
| Sending end | post-fault | 795,263 | 457,476 | 223,968 | 224,534 | 227,191 | 243,048 | 106,021 | 94,928 | 50,987 | 40,964 | 38,385 |
| | first peak time | 40.01 | 40.02 | 40.03 | 40.04 | 40.06 | 40.08 | 40.09 | 40.10 | 40.12 | 40.14 | 40.15 |
| Receiving end | post-fault | 38,227 | 101,149 | 218,044 | 387,876 | 524,722 | 243,216 | 451,725 | 740,296 | 573,795 | 34,464 | 795,050 |
| | first peak time | 40.15 | 40.14 | 40.13 | 40.12 | 40.11 | 40.08 | 40.07 | 40.06 | 40.05 | 40.03 | 40.01 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Table 3 Comparison variations of coefficient detail in scale 1 at various inception angles for a case of phase A to ground fault at 8 km from the sending end.
(Fault occur at 40 msec)

| Coefficients of high frequency components of positive sequence current | | Fault location (Inception angle) | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 |
| Sending end | post-fault | 210,317 | 266,169 | 291,729 | 275,334 | 224,535 | 160,940 | 106,340 | 72,240 | 59,817 | 67,573 | 96,610 | 147,106 |
| | first peak time | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 | 40.04 |
| Receiving end | post-fault | 364,245 | 460,796 | 504,740 | 476,010 | 387,876 | 277,750 | 183,390 | 124,585 | 103,243 | 116,846 | 167,264 | 254,809 |
| | first peak time | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 | 40.12 |

Table 4 Results of single line to ground fault at different location of underground cable (Inception angle 120° and Fault occur at 40 msec)

| Real location (km) | Inception angle | First peak time (msec) | | Proposed Technique | |
|--------------------|-----------------|------------------------|--------|--------------------|------------|
| | | Ta | Tb | Calculation (km) | Error (km) |
| 3 | 120 | 40.02 | 40.15 | 3.1327 | 0.1327 |
| 5 | 120 | 40.03 | 40.14 | 4.9584 | 0.0416 |
| 8 | 120 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 | 0.3030 |
| 11.5 | 120 | 40.06 | 40.105 | 10.436 | 1.0640 |
| 17 | 120 | 40.09 | 40.07 | 16.826 | 0.1740 |
| 26.5 | 120 | 40.16 | 40.02 | 27.280 | 0.780 |
| 28.5 | 120 | 40.16 | 40.01 | 28.693 | 0.193 |

Table 5 Results of single line to ground fault at different inception angle (Fault at 8 km of underground system and Fault occur at 40 msec)

| Inception angle | Real location (km) | First peak time (msec) | | Calculation |
|-----------------|--------------------|------------------------|-------|-------------|
| | | Ta | Tb | |
| 0 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 30 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 60 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 90 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 120 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 150 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |
| 180 | 8 | 40.04 | 40.12 | 7.6970 |

Furthermore, when inception angles of fault is varied and fault point does not change as illustrated in Table 3. The result is seen that coefficient detail (cD1) obtained from positive sequence current has variation just the same as sine wave. On the other hand, the first peak time that can detect fault obtained from the positive sequence current do not change with increasing distance between the line end of the cable and the fault point as illustrated in Table 3.

After the fault detection process, the first peak time in first scale that can detect fault is considered so that the distance of fault can be calculated with traveling wave equation. From Figure 7, first peak time 0.04002 and 0.04015 from the faulty buses are employed as input data for traveling wave equation as shown in Equation 1.

$$d = \frac{[LT - v \times (t_B - t_A)]}{2} \quad (1)$$

where,
 d = the fault location measured from the sending end
 LT = the length of the cable in which the fault is detected
 t_A = the time where the fault at the sending end is detected
 t_B = the time where the fault at the receiving end is detected
 v = velocity of the travelling wave as calculated in Equation 2

$$v = \frac{3.8 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \text{ m/s} \quad (2)$$

Where, μ_r is relative permeability of cable ($\mu_r = 1$)
 ϵ_r is relative dielectric coefficient ($\epsilon_r = 2.7$)

After the traveling wave has been processed, the algorithm was employed in order to calculate the distance of fault in the underground distribution system. Case studies are varied so that the algorithm capability can be verified. The system under consideration has been shown in Figure 1. Case studies are performed with various types of fault at each location on the underground cable including the variation of fault inception angles and locations at each underground cable. The comparison of the average error from the results due to the algorithm proposed in this paper is shown in Table 4-5. It can be seen that the accuracy of fault locations from the prediction of the algorithm is highly satisfactory.

V. CONCLUSION

This paper proposes a technique for locating the distance of fault occurring in underground cable using combination of discrete wavelet transform and traveling wave. Positive sequence current signals are used in fault detection algorithm. It is found that this algorithm can detect fault with the accuracy of 100% using scale 1 only. Various case studies have been carried out including the variation of fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่

ไม่ว่ากรสิทธิโดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

inception angles and fault types. The results are shown that the proposed algorithm can identify the fault location with the average error of 0.385 km as shown in Table 4. As a result, the application of the discrete wavelet transform (DWT) based on traveling wave is a good choice in power system. The further work will be focused on the development of such a technique for using in loop circuits.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to gratefully acknowledge financial support for this research by the faculty of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand.

REFERENCES

- [1] H Fernando, Magnago and Ali Abur, "Fault Location Using Wavelets", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1475-1480, October 1998.
- [2] El Sayed Tag El Din, Mahmoud Gilany, Mohamed Mamdouh Abdel Aziz and Doaa khalil Ibrahim "A wavelet base fault location technique for aged power cables" in IEEE Power Engineering Society, Vol.3, pp.2485-2491, 12-16 June 2005.
- [3] E.C. Bascom and D.W. Von Dollen, "Computerized underground cable fault location expertise," in IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, pp. 376-382, 10-15 April 1994.
- [4] S. Potivejkul, P. Kerdonfag, S. Jamnian, and V. Kinnares, "Design of lowvoltage cable fault detector," in Proc. IEEE Power Engineer. Society. Winter Meeting, Jan. 2000, vol. 1, pp. 724-729.
- [5] C. M. Wiggins, D. E. Thomas, T. M. Salas, F. S. Nickel, and H.-W. Ng, "A novel concept for underground cable fault location," IEEE Transaction. Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 591-597, Jan. 1994.
- [6] M.-S. Choi, D.-S. Lee, and X. Yang, "A line to ground fault location algorithm for underground cable system," KIEE International Transactions on Power Engineering, Vol. 54, pp. 267-273, Jun. 2005.
- [7] A. Ngaopitakkul and C. Pothisarn, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation Neural Networks algorithm for fault location on Single-circuit transmission line," In Proceedings of 2004 International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008), Thailand, February 2009, pp. 365-371.
- [8] P. Chiradeja and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet Transforms and Artificial Neural Networks," The International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists 2009 (IMECS2009), Hongkong, China, pp. 1520 - 1525, 18-20 March 2009.

BIOGRAPHIES



Atthapol Ngaopitakkul is currently a lecture at the school of electrical engineering, King Mongkut's Institute of Technology Laddrabang, Bangkok, Thailand. His research interests are on transmission systems and Protection Relay.



Choawat Apsit graduated with B.Eng in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Laddrabang, Bangkok, Thailand in 2009. He is currently a M.Eng. candidate at the school of electrical engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests are in power system analysis.



Chaichan Pothisarn graduated with B.Eng in electrical engineering from Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand in 1994 and M.Eng in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 2003. He is currently a lecturer in Electrical Engineering Department at KMITL. His research interests are in power systems analysis and renewable energy.



Chaiyan Jettanasen received his B.Eng. and M.Eng. from Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon in 2005 and Ph.D. from Ecole Centrale de Lyon, France in 2008. His research interest is EMC in power electronic systems. He is currently a lecturer in Electrical Engineering Department at KMITL.



Sirarote Jaikhan graduated with B.Eng and M.Eng in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 2004 and 2009 respectively. He is currently an electrical engineering level 4 of Designs and Supervision Department, Metropolitan Electricity Authority (MEA), Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ตัวอย่างบทความประชุมวิชาการระดับชาติที่ได้นำเสนอในที่ ประชุมระดับชาติ

1. เซาว์วัฒน์ อภิสิตธี และ อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล, “การระบุตำแหน่งพอลดีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย.”, ได้รับการตอบรับให้นำเสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON33), 1-3 ธันวาคม 2553.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Atthapol Ngaopitakkul,

ulations !

ber code 0271 entitled

ication of Fault Locations in Underground Distribution System using Discrete
Transform

n accepted for presentation at the 33rd Electrical Engineering
nce (EECON-33), which will be held at at Centara Duangtawan Hotel, Chiang
ailand, on December 1-3, 2010.

s letter, we cordially invite you to attend EECON-33 to present
per.

rs' comments are listed at the end of this message.

de your paper in the conference proceedings, you MUST strictly adhere to the
g requirements:

st one of the authors must register to attend the conference by
ember 24, 2010, which is the deadline for camera-ready submission.

nce Registration Rate:

ar registration 3,500 Baht

nt registration 2,000 Baht

te Registration Rate:

ar registration 4,000 Baht

nt registration 2,500 Baht

an perform online conference registration at

www.publish-paper.com/eecon33/conferenceRegistration/register

perform the online conference registration, you will given a

ation- Code" which will be used to check your registration payment

resenter's biography must be uploaded to the

erence web by September 24, 2010. The presenter's biography form

be downloaded from the conference website at <http://www.kmitl.ac.th/eecon33>

paper may have been accepted with a condition that the paper must

vised according to the reviewer comments. Failing to do so may

ude your paper from the program and proceeding.

al camera-ready copy of your revised paper in PDF format (NO MORE

N 4 PAGES) must be resubmitted electronically (uploaded) for

ication NO LATER THAN September 24, 2010.

[://www.publish-paper.com/eecon33/](http://www.publish-paper.com/eecon33/)

accept our thanks for submitting your paper to the conference.

nk forward to seeing you at EECON-33 on December 1-3, 2010.

Best regards,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-33 TPC

i Chompoo-inwai, KMITL (Electrical Eng. Department)

ccchompooinwai@yahoo.com, kcchai@kmitl.ac.th, Phone: 081-9143844

การระบุตำแหน่งฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วย

Identification of Fault Locations in Underground Distribution System using

Discrete Wavelet Transform

เชาว์วัฒน์ อภิสิทธิ์ อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์/โทรสาร 0-2326-4550 E-mail : a_conan1412@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอวิธีการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทสำหรับการระบุตำแหน่งของการเกิดฟอลต์ในสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดิน โดยการจำลองระบบสายส่งใต้ดินด้วยโปรแกรม ATP/EMTP จากนั้นทำการแยกองค์ประกอบลำดับบวก, ลำดับลบ และลำดับศูนย์ แล้วนำองค์ประกอบลำดับบวกมาแปลงเวฟเล็ท เพื่อนำรูปคลื่นเวฟเล็ทที่ได้มาตรวจจับเวลาที่เกิดฟอลต์ วิธีการที่นำเสนอสามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความเร็วของคลื่นเดินทางได้ โดยการไม่คิดค่าความเร็วของคลื่นเดินทาง ซึ่งพบว่าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: ระบุตำแหน่งฟอลต์, การแปลงเวฟเล็ท, สายส่งเคเบิลใต้ดิน

Abstract

This paper proposes an application of discrete wavelet transform for fault location in underground cable systems. The fault current signals from the ATP/EMTP simulation have been extracted to Positive sequence, Negative sequence and Zero sequence. The time of positive sequence in first scale was used an input for detecting fault location. This proposes technique can neglect the effect of the change in the propagating velocity of travelling wave. The results are show that the technique give a satisfactory accuracy.

Keyword: Fault location, Wavelet Transform, Underground Cable.

1. บทนำ

การตรวจสอบการเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ และมีความจำเป็นในระบบอุตสาหกรรม และการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน การตรวจจับฟอลต์ที่เกิดในสายส่งได้อย่างถูกต้องนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเอื้ออำนวยต่อการซ่อมบำรุงสายที่ชำรุดให้กลับมาใช้งานได้ตามเดิม รูปแบบการระบุจุดเกิดฟอลต์ในสายส่งใต้ดินนั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน [1-12] ในช่วงเริ่มแรกเป็นการนำอุปกรณ์เครื่องมือ [1] เข้ามาใช้ในการตรวจหาฟอลต์ โดยมีหลักการที่สำคัญอยู่สองหลักการคือ Terminal method และ Tracing method [1-2] ต่อมาวิธี

การพัฒนาโดยใช้หลักการเวฟเล็ทเข้ามาร่วมด้วยเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนของรูปคลื่นคล้ายกับ Tracing method เป็นหลักการที่ประยุกต์มาจากหลักการ Pulse reflection time method [3] โดยใช้วิธีการยิงคลื่นพัลส์เข้าไปในระบบเพื่อดูลักษณะรูปแบบการสะท้อน ซึ่งหลักการนี้ [4] มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสมการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของฟอลต์ เพื่อเห็นถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ จากนั้นยังมีการพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งเกิดฟอลต์อย่างต่อเนื่อง โดยใช้หลักการคลื่นเดินทาง เช่นเดิม [5-6] โดยมีการใช้โปรแกรมเพื่อการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เป็นรูปเป็นร่างมากขึ้น ซึ่งมีการใช้สมการในการระบุตำแหน่งฟอลต์ที่แตกต่างกันออกไป ยังคงมีการพัฒนาวิธีการตรวจหาฟอลต์อย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการประยุกต์ใช้กับพีซีแอลจิก [7]

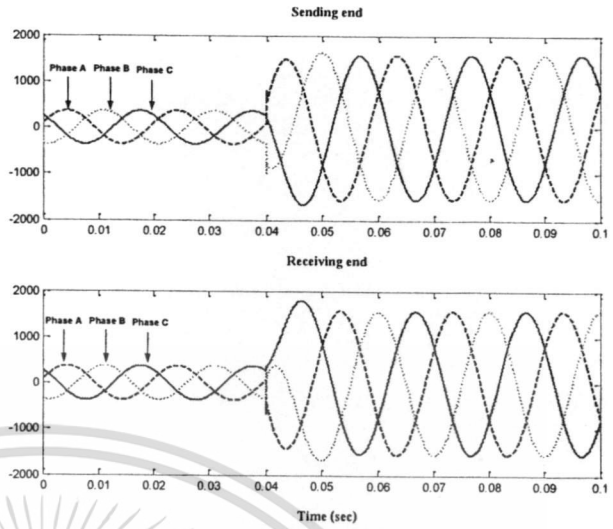
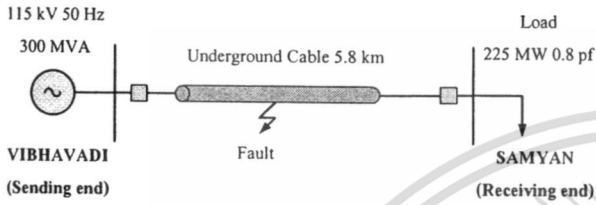
อย่างไรก็ดี ในบทความที่กล่าวมาข้างต้นส่วนใหญ่มักใช้การวิเคราะห์หาจุดกำเนิดฟอลต์โดยใช้ความเร็วคลื่นเดินทาง (Travelling wave velocity) เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งอาจก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สูงได้เนื่องจากค่าความเร็วของคลื่นเดินทางในสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า ความยอมได้สัมพัทธ์ (Permittivity) และ ความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) [8] ของสายส่งโดยค่าเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความผิดปกติภายในสายส่ง, อายุการใช้งานของสายส่ง และ วัสดุที่ใช้ในการผลิตสาย เป็นต้น อีกทั้งค่าความเร็วคลื่นเดินทางเป็นค่าที่มีปริมาณมากส่งผลให้เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณแล้วสามารถส่งผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดที่มาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในสมการเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังที่ได้กล่าวมา บทความฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการตรวจหาตำแหน่งเกิดฟอลต์โดยขจัดผลกระทบที่เกิดจากความเร็วคลื่นเดินทาง เพื่อเป็นการลดค่าความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งข้อดีของการไม่นำความเร็วคลื่นเดินทางเข้ามามีใช้ในการคำนวณคือ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความยอมได้สัมพัทธ์ (Permittivity) และ ความสามารถในการซึมผ่านได้ (Permeability) ภายในสายส่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการระบุจุดกำเนิดฟอลต์ วิธีการนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งฟอลต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน

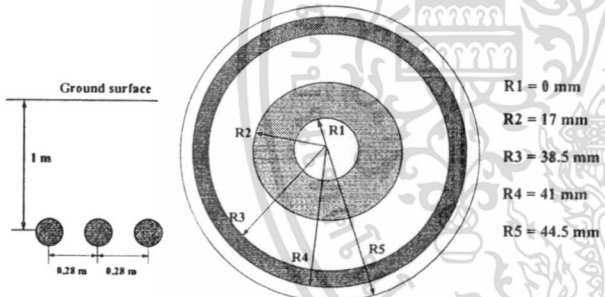
การจำลองสายส่งเคเบิลใต้ดินจะใช้โปรแกรม ATP/EMTP และสายส่งในกรณีศึกษาเป็นเคเบิลใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง (MEA) ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV ระยะทาง 5.8 km จากวิภาวดี (Sending end) ไปยัง สามย่าน (Receiving end) ดังแสดงในรูปที่ 1 และขนาดของสายเคเบิลในกรณีศึกษาจะแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3 รูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 0° ด้านส่ง และด้านรับ

รูปที่ 1. ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง

ทำการจำลองระบบเมื่อเกิดฟอลต์ลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล (3-P) ในระยะทางที่แตกต่างกัน โดยเริ่มต้นที่ 1 กิโลเมตร มุมเฟสเริ่มต้นที่ 0° ทางด้านส่ง กำหนดให้เฟส A เป็นมุมอ้างอิง



- R1 = 0 mm
- R2 = 17 mm
- R3 = 38.5 mm
- R4 = 41 mm
- R5 = 44.5 mm

รูปที่ 2 ขนาดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง

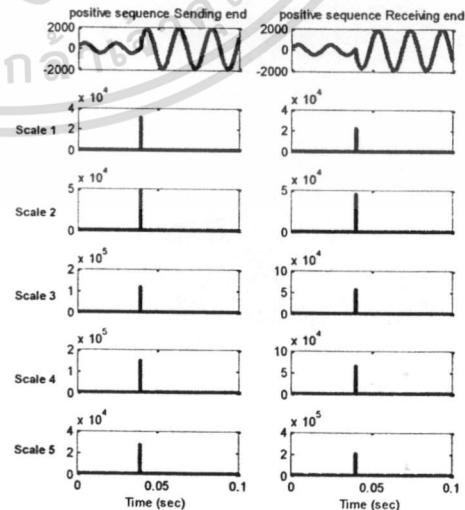
จากผลการจำลองในรูปที่ 3 พบว่าเมื่อเกิดฟอลต์ในสายส่งกำลังไฟฟ้าใต้ดินจะส่งผลให้กระแสที่ไหลในระบบมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะใช้พฤติกรรมดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับค่าเวลาเกิดฟอลต์

นำรูปคลื่นของกระแสฟอลต์ที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม ATP/EMTP ดังแสดงในรูปที่ 3 มาแยกองค์ประกอบให้อยู่ในรูปกระแสลำดับบวก จากนั้นแปลงเวฟเล็ตรูปคลื่นที่ได้โดยโปรแกรม MATLAB จากนั้นยกกำลังสองจะได้รูปคลื่นเวฟเล็ทของทั้งปลายทางด้านส่ง และ ด้านรับ เพื่อง่ายต่อการตรวจจับค่าเวลาที่เกิดฟอลต์

3. พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดฟอลต์

รูปแบบการตรวจจับฟอลต์ในบทความนี้จะใช้กระแสในแต่ละเฟสมาทำการแยกองค์ประกอบออกเป็น 3 ส่วนคือ กระแสลำดับบวก, กระแสลำดับลบ และ กระแสลำดับศูนย์ เมื่อนำกระแสในแต่ละเฟสมาแปลงแยกส่วนเป็นส่วนต่างๆ แล้วนั้น ค่อยมาทำการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยแบบ Daubechies 4 ให้แยกความถี่ออกมาอีก 5 สเตลในช่วงความถี่ที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4

ผลจากการแปลงเวฟเล็ทพบว่า ในช่วงก่อนเกิดฟอลต์ สัมประสิทธิ์ค่าสูงสุดจะมีค่าต่ำมาก ใกล้กับศูนย์ แต่เมื่อเกิดฟอลต์พบว่า สัมประสิทธิ์จะมีค่าสูงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยตั้งสมมุติฐานว่า หากสัมประสิทธิ์ค่าสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่า 5 เท่าของสัมประสิทธิ์สูงสุดก่อนเกิดฟอลต์ ให้ถือว่าเป็นสัญญาณที่เกิดความผิดปกติขึ้นหรือเกิดฟอลต์ขึ้น ค่อยจากนั้นจะตรวจจับค่าเวลาเกิดฟอลต์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อ

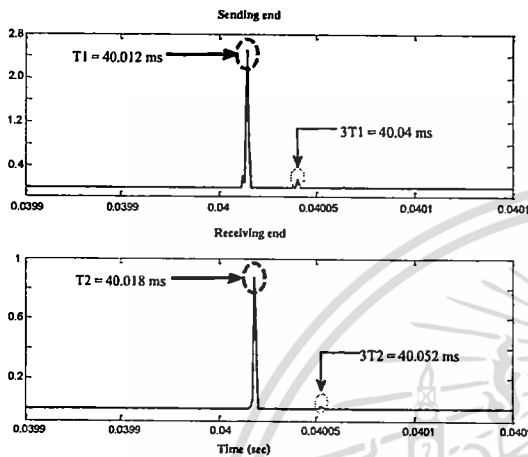


รูปที่ 4 รูปคลื่นเวฟเล็ทยกกำลัง 2 ด้านส่ง และด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทฤษฎีการหาจุดกำเนิดฟอลต์

ทฤษฎีคลื่นเดินทางที่นำมาใช้ในการระบุตำแหน่งฟอลต์นั้นจะใช้รูปคลื่นที่แปลงเวฟเล็ดออกมาแล้วมาหาค่าสูงสุดของรูปคลื่นที่มีค่ามากกว่า 5 เท่าของค่าสูงสุดก่อนเกิดฟอลต์ จากนั้นบันทึกค่าเวลาที่ T_1 , $3T_1$, T_2 และ $3T_2$ เพื่อนำมาหาค่าเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางไปยังด้านส่ง และ ด้านรับ



รูปที่ 5 ค่าเวลา T_1 และ $3T_1$ ที่ตรวจจับได้ด้านส่ง และค่าเวลา T_2 และ $3T_2$ ที่ตรวจจับได้ด้านรับ

นำมาวิเคราะห์โดยใช้สมการการหาจุดเกิดฟอลต์

$$x = \frac{L * Ta}{(Ta + Tb)} \tag{1}$$

โดยที่

x = ระยะทางเกิดฟอลต์จากทางด้านส่ง (เมตร)

L = ความยาวสายส่ง (เมตร)

$$Ta = \frac{|T_1 - 3T_1|}{2} \text{ (วินาที)}$$

$$Tb = \frac{|T_2 - 3T_2|}{2} \text{ (วินาที)}$$

$T_1, 3T_1$ = เวลาที่ค่ายอดที่หนึ่งและ สอง ทางด้านส่ง (วินาที)

$T_2, 3T_2$ = เวลาที่ค่ายอดที่หนึ่งและ สอง ทางด้านรับ (วินาที)

เพื่อให้เกิดความชัดเจนจึงยกตัวอย่างรูปที่ 5 เมื่อ $L = 5,800$ เมตร

$$T_1 = 0.040012 \text{ วินาที} \quad 3T_1 = 0.040040 \text{ วินาที}$$

$$T_2 = 0.040018 \text{ วินาที} \quad 3T_2 = 0.040052 \text{ วินาที}$$

$$Ta = \frac{|0.040012 - 0.040040|}{2} = 0.014 \text{ วินาที}$$

$$Tb = \frac{|0.040018 - 0.040052|}{2} = 0.017 \text{ วินาที}$$

$$x = \frac{5800 * 0.014}{(0.014 + 0.017)} = 2,619.4 \text{ เมตร}$$

ที่จุดเกิดฟอลต์จริง 2.5 กิโลเมตร คลาดเคลื่อน 0.11935 กิโลเมตร หรือ 119.35 เมตร

5. ผลการการจำลอง

จากการจำลองระบบส่งจ่ายในกรณีศึกษานี้ได้รูปแบบของสายส่งมาจากการไฟฟ้านครหลวง (MEA) เพื่อนำค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับระหว่างวิธีการใช้ความเร็วคลื่นเดินทาง และวิธีที่นำเสนอ โดยมีการปรับเปลี่ยนระยะทางเกิดฟอลต์ และ มุมเริ่มเกิดฟอลต์ให้มีค่าที่หลากหลาย

จากการจำลองหาค่าฟอลต์ที่เกิดในระบบส่งจ่ายในแต่ละช่วงสายส่งพบว่าในแต่ละช่วงการจำลองมีค่าความผิดพลาดที่เกิดแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 แสดงผลจากการจำลองที่จุดเกิดฟอลต์ต่างๆ มุมเกิดฟอลต์ 0°

| จุดเกิดฟอลต์จริง (km) | เวลาที่คลื่นเดินทาง (ms) | | จุดเกิดฟอลต์ (m) | | จุดเกิดฟอลต์ (m) | |
|-----------------------|--------------------------|-------|------------------|--------|-------------------------|--------|
| | Ta | Tb | วิธีที่นำเสนอ | Error | ใช้ความเร็วคลื่นเดินทาง | Error |
| 1 | 0.006 | 0.025 | 1122.6 | 112.58 | 1775.778 | 158.36 |
| 1.5 | 0.008 | 0.022 | 1546.7 | 46.67 | 2025.605 | 45.39 |
| 2 | 0.010 | 0.019 | 2000.0 | 0 | 2275.432 | 67.57 |
| 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2619.4 | 119.35 | 2525.259 | 180.54 |
| 2.9 | 0.015 | 0.015 | 2900.0 | 0 | 2900 | 0 |
| 3.5 | 0.018 | 0.012 | 3480.0 | 20 | 3274.741 | 19.45 |
| 4 | 0.020 | 0.009 | 4000.0 | 0 | 3649.481 | 61.09 |
| 4.5 | 0.023 | 0.006 | 4600.0 | 100 | 3899.308 | 51.87 |
| 4.8 | 0.024 | 0.006 | 4640.0 | 160 | 4149.135 | 35.15 |

ตารางที่ 2 แสดงผลจากการจำลองที่มุมเกิดฟอลต์ต่างๆ

| มุมเกิดฟอลต์ (degree) | จุดเกิดฟอลต์จริง (km) | เวลาในการตรวจจับ (ms) | | ผลการคำนวณ (km) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-----------------|
| | | Ta | Tb | |
| 30 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 60 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 90 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 120 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 150 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 180 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 210 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 240 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 270 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 300 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 330 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |
| 360 | 2.5 | 0.014 | 0.017 | 2.6194 |

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ระบุตำแหน่งฟอลต์ของ ทฤษฎีที่นำเสนอ และทฤษฎีความเร็วคลื่นเดินทาง โดยการเปลี่ยนแปลงจุดเกิดฟอลต์ที่แตกต่างกันออกไป ผลการจำลองที่ได้พบว่าค่าที่คำนวณได้จากวิธีที่นำเสนอมีความผิดพลาดจากค่าจริงไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำในระดับที่ดี ในขณะที่ตารางที่ 2 แสดงค่าเวลา (T_a, T_b) ที่ได้จากการคำนวณ และจุดเกิดฟอลต์ที่สามารถระบุได้เมื่อ เปลี่ยนแปลงค่ามุมเริ่มเกิดฟอลต์ตั้งแต่ 30° ถึง 360° จากผลการจำลองพบว่าค่าเวลาที่สามารถตรวจจับได้มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามมุมเริ่มเกิดฟอลต์ เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมจะเห็นว่า การตรวจหาตำแหน่งฟอลต์ด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ และเกิดค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

6. บทสรุป

จากวิธีการที่นำเสนอการวิเคราะห์ฟอลต์โดยไม่ใช้ความเร็วคลื่นเดินทางเข้ามาช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งฟอลต์ โดยนำสัญญาณกระแสจากการจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม ATP/EMTP มาแยกองค์ประกอบ ลำดับบวก จากนั้นแปลงเวฟเลต เพื่อตรวจจับค่าเวลา $T_1, 3T_1, T_2$ และ $3T_2$ แล้วนำมาวิเคราะห์โดยตัดผลกระทบที่เกิดจากความเร็วคลื่นทางออกไป จากการทดลองในกรณีที่แตกต่างกันพบว่า วิธีที่นำเสนอจะมีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยเพียง 63.18 เมตร ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวิธีที่นำเสนอเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งฟอลต์

- พฤติกรรมของคลื่นเดินทางจะมีการสะท้อน และหักเห ไปตกยังปลายทางและต้นทางดังรูปที่ 1 จึงสามารถตรวจจับค่าเวลา $T_1, 3T_1, T_2$ และ $3T_2$ ได้
- เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ามุมที่เริ่มเกิดฟอลต์พบว่าค่าเวลา T_a และ T_b ที่สามารถคำนวณได้มีค่าคงที่แสดงว่า มุมเริ่มเกิดฟอลต์มีผลน้อยมากต่อระบุตำแหน่งฟอลต์

กิตติกรรมประกาศ

งานนำเสนอในบทความฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนทางการเงินจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Taylor, Curtis E. "Fault Location on Rural Underground Power Lines" IEEE Transactions on Industry Applications, IA-8, Issue: 2, Page(s): 214 – 217, 1972.
- [2] Charles A. Maloney, "Locating Cable Faults" in IEEE transaction on Industry Applications, Vol.IA-9, No.4, July/August 1973

- [3] E. C. Bascom, "Computerized underground cable fault location expertise," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, pp. 376–382, 10–15 April 1994.
- [4] Chul-Hwan Kim, Woo-Gon Chung, Myong-Chul Shin, Sung-Wan Park, Myong-Hee Lee, Yong-Pil Seo, Hae-Sul Choi, "A study on the Expert System for Fault Location Estimation in Underground Cable" IEEE Energy Management and Power Delivery, Page(s): 67 – 72 vol.1, 1995.
- [5] J.-H. Sun, "Fault location of underground cables using travelling wave" *KIEE Transaction.*, pp. 1972–1974, Jul. 2000.
- [6] Pongsak Markming, "Fault analysis in transmission line use wavelet transform" Thesis of master engineering electrical engineering. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2002, Thailand
- [7] Moshtagh, J.; Aggarwal, R.K. "A new approach to fault location in a single core underground cable system using combined fuzzy logic and wavelet analysis" Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, Page(s): 228 – 231, Vol.1, 2004.
- [8] El Sayed Tag El Din, Mahmoud Gilany, Mohamed Mamdouh Abdel Aziz, Doaa khalil Ibrahim "A wavelet base fault location technique for aged power cables" in IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, pp.2485 - 2491, 12-16 June 2005
- [9] Chae-kyun Jung; Jong-beom Lee. "Fault location algorithm on underground power cable systems using noise cancellation technique" Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES Transmission and Distribution, Page(s): 1 – 7, 2008.
- [10] Xia Yang; Myeon-Song Choi; Seung-Jae Lee; Chee-Wooi Ten; Seong-II Lim. "Fault Location for Underground Power Cable Using Distributed Parameter Approach" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, Issue: 4, Page(s): 1809 – 1816, 2008.
- [11] Zhang Liguo; Han Xu; Jia Jian; Gao Tianye; Ma Yongsheng, "Power Systems Faults Location with Traveling Wave Based on Hilbert-Huang Transform" International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET '09. Vol. 2, Page(s): 197 – 200, 2009.
- [12] Borghetti, A.; Bosetti, M.; Nucci, C. A.; Paolone, M.; Abur, A. "Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: Theory and Experimental Validation" IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: PP, Issue: 99, Page(s): 1 – 1, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.อรรถพล เ่งพิทักษ์กุล
(ภาษาอังกฤษ) Atthapol Ngaopitakkul, Ph.D.

รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ (ถ้ามี)

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520 โทร 02-326-4550 โทรสาร 02-688-4954

เบอร์มือถือ 0817324318 Email knatthap@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ปริญญาตรีสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (B.Eng) | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง |
| ปีที่สำเร็จ 2545 | |
| ปริญญาโทสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (M.Eng) | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง |
| ปีที่สำเร็จ 2547 | |
| ปริญญาเอกสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (D.Eng) | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง |
| ปีที่สำเร็จ 2550 | |

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

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

ผลงานวิจัยย้อนหลัง 5 ปีและผลงานวิจัยอื่นๆ (เช่น Proceedings หนึ่งถึง ฯลฯ)

(a) Journals

1. A. Ngaopitakkul and A. Kunakorn, "Selection of Proper Activation Function in Back-propagation neural networks algorithm for Transformer Internal Fault Locations," *International Journal of Computer and Network Security*, Vol. 1, No. 2, pp. 47-55. (Impact factor 2009 = 0.00)

(b) International Conference Papers

1. A. Ngaopitakkul, C. Apisit, C. Pothisarn, C. Jettanasen and S. Jaikhan, "Identification of Fault Location in Underground Distribution System using Discrete Wavelet transform" In *Proceedings of 2010 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2010 (IMECS2010)*, Hong Kong, March 2009.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. C. Apisit, and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Underground Cable using Discrete Wavelet transform" In *Proceedings of 2010 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2010(IMECS2010)*, Hong Kong, March 2009.
3. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, "Application of Discrete Wavelet Transform for fault location on Transmission Network Systems" In *Proceedings of the 8th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM2009)*, Paper No. APSCOM2009-47, Hong Kong, November 2009.
4. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation Neural Networks Algorithm for Fault Classification on Transmission Line" In *Proceedings of IEEE International Conference on Transmission and Distribution (T&D Asia 2009)*, Korea, October 2009.
5. P. Chiradeja, and A. Ngaopitakkul, "Identification of Fault Types for Single Circuit Transmission Line using Discrete Wavelet transform and Artificial Neural Networks" In *Proceedings of 2009 International MultiConference on Engineering and Computer Scientists 2009 (IMECS2009)*, Hong Kong, March 2009.
6. A. Ngaopitakkul and C. Pothisarn, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation neural networks algorithm for fault location on Single-circuit transmission line" In *Proceedings of 2004 International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008)*, Thailand, February 2009.
7. A. Ngaopitakkul, W. Pongchaisrikul, and A.Kunakorn, "Analysis of Characteristics of Simultaneous Faults in Electrical Power Systems using Wavelet Transform," In *Proceedings of the 1st International Conference Sustainable Energy Technologies (ICSET2008)*, Singapore, November 2008.
8. T. Patcharoen, A. Ngaopitakkul and A.Kunakorn, "Identification of fault types for a three-bus transmission network using Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks," In *Proceedings of the 8th International Power Engineering Conference (IPEC2007)*, Paper No. conf122a641, Singapore, December 2007.

(c) National Conference Papers

1. A. Ngaopitakkul, S. Jonpermpoonpol and C. Pothisarn, "Studies of Turn to turn Fault in Power Transformer Using Discrete Wavelet Transform," In *Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, pp.391-394, 28-30 October 2009.
2. S. Jonpermpoonpol, A. Ngaopitakkul, "Studies of Winding to ground Fault in Power Transformer Using Discrete Wavelet Transform," In *Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, pp.383-386, 28-30 October 2009.
3. S. Surisunthon, A. Ngaopitakkul, "Miscalculation Fault location due to behavior of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Discrete Wavelet Transform," In *Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, pp.239-242, 28-30 October 2009.
4. W. Pongchaisrikul, A. Ngaopitakkul, and A.Kunakorn, "Studies of Characteristics of Simultaneous Faults in Electrical Power Transmission Systems Using Discrete Wavelet Transform," In *Proceedings of the 31st Electrical Engineering Conference (EECON31)*, Vol. 1, 25-26 October 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. A. Ngaopitakkul, T. Patcharoen, A. Kunakorn, and S. Bunjongjit, "Application of Discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks for Detecting Fault Location in Electrical Transmission Systems," In *Proceedings of the 30th Electrical Engineering Conference (EECON30)*, Vol. 1, Paper PW074, 25-26 October 2007.

(d) Book

1. Atthapol Ngaopitakkul, "Electrical Transmission Systems," Ladkrabang Book, 2009, ISBN 978-974-8308-98-2.

ประวัติการทำงานที่สำคัญ และ Professional Activities

Reviewer : The 11th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2010), Nagaoka, Japan.

Reviewer : ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, Communication.

Reviewer : IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008), Bangkok, Thailand, 2008.

Committee : IEEJ-EIT Joint Symposium : Advanced Technology in Power Systems (2008-2009)

Committee : Illuminating Engineering Association of Thailand (TIEA) (Jan 2008 – Present)

Committee : Thai Mechanical and Electrical Design and Consulting Engineer Association (MECT) (Oct 2008 – Present)

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}
- Oct 2008 – Sep 2009 Researcher of Project "Fault Analysis on Single Circuit Transmission line Using Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic" {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}
- Oct 2007 – Sep 2008 Researcher of Project "An Application of Discrete Wavelet Transform and Neural Network for Fault Diagnosis in Transmission Systems" {Supported by the Faculty of Engineering Fund, Srinakarinwirot, Thailand}

2. ชื่อ (ภาษาไทย) อาจารย์ชายชาญ โพธิสาร

(ภาษาอังกฤษ) Lecturer Chaichan Pothisarn

รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ (ถ้ามี)

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้ พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 Email kpchaich@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติการศึกษา

- 1993 B.Eng.(EE) Prince of Songkla University
- 2003 M.Eng.(EE) King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Power System, Electrical System Design, Grounding, Lightning Protection
ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
ผู้ช่วยวิจัยในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความและสิ่งตีพิมพ์

1. P. Chiradeja, and C. Pothisarn, "Discrete Wavelet Transform and Fuzzy Logic Algorithm for Identification of Fault Types on Transmission Line" In *Proceedings of the 8th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM2009)* , Paper No. APSCOM2009-48, Hong Kong, November 2009.
2. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, "Application of Discrete Wavelet Transform for fault location on Transmission Network Systems" In *Proceedings of the 8th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM2009)* , Paper No. APSCOM2009-47, Hong Kong, November 2009.
3. A. Ngaopitakkul, S. Jonpermpoonpol and C. Pothisarn, "Studies of Turn to turn Fault in Power Transformer Using Discrete Wavelet Transform," In *Proceedings of the 32th Electrical Engineering Conference (EECON32)*, Vol. 1, 28-30 October 2009. (in Thai)
4. C. Pothisarn, and A. Ngaopitakkul, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation Neural Networks Algorithm for Fault Classification on Transmission Line" In *Proceedings of IEEE International Conference on Transmission and Distribution (T&D Asia 2009)*, Korea, October 2009.
5. P. Chiradeja, and C. Pothisarn, "Identification of the Fault Location for Three-Terminal Transmission Lines using Discrete Wavelet Transform" In *Proceedings of IEEE International Conference on Transmission and Distribution (T&D Asia 2009)*, Korea, October 2009.
6. A. Ngaopitakkul and C. Pothisarn, "Discrete Wavelet Transform and Back-propagation neural networks algorithm for fault location on Single-circuit transmission line" In *Proceedings of 2004 International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2008)*, Thailand, February 2009.
7. C. Pothisarn , C. Chompoo-inwai , A. Kunakorn, N. Krisnachinda and S. Bunjongjit, "Computer Usage to Indicate the Light Distribution Characteristics of Street Light Based on IES File", *Ladkrabang Engineering Journal* 18th Year 2nd June 2001. (in Thai)
8. C. Pothisarn , S. Jiriwibhakorn and S. Bunjongjit , "Critical Clearing Time Determination of Large Power System Using Artificial Neural Network", *Ladkrabang Engineering Journal* 19th Year 1st March 2002, Page 59-64. (in Thai)
9. S. Jiriwibhakorn and C. Pothisarn , "Application of Nearest Neighbor Algorithm for Critical Clearing Time (CCT) Approximation", *IEEE/PES T&D 2002 Asia Pacific* 6-10 October 2002, Yokohama, Japan.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. C. Pothisarn and S. Jiriwibhakorn, "Critical Clearing Time Determination of EGAT System Using Artificial Neural Networks", ICEE 2004 , 4-8 July 2004, Sapporo, Japan.

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

Oct 2009 – Sep 2010 Researcher of 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
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้