

บทที่ 3

การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์

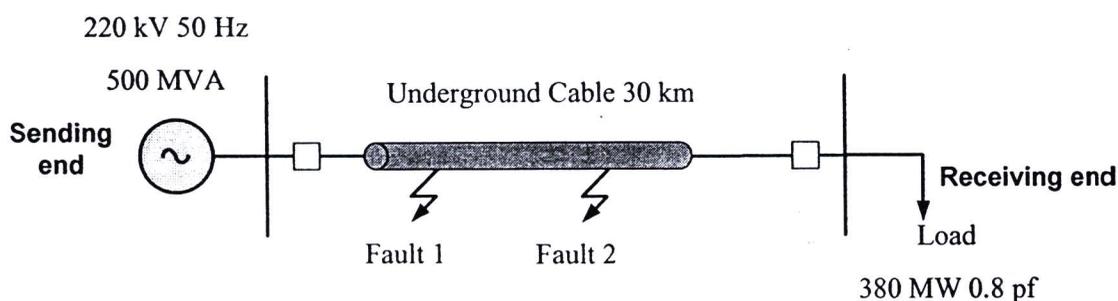


3.1 การจำลอง

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

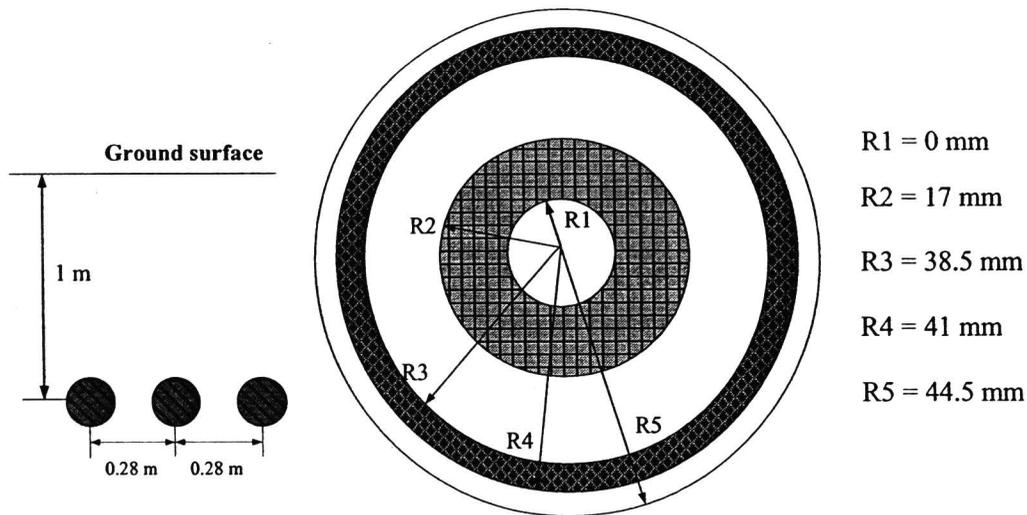
3.1.1 การจำลองระบบสายส่ง

การจำลองสายส่งเคเบิลใต้ดินจะใช้โปรแกรม ATP/EMTP และสายส่งในกรณีศึกษาเป็นเคเบิลใต้ดิน ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 220 kV ระยะทาง 30 กิโลเมตร จากปลายด้านส่ง (Sending end) ไปยังด้านรับ (Receiving end) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และขนาดของสายเคเบิลในกรณีศึกษาจะแสดงในรูปที่ 3.2



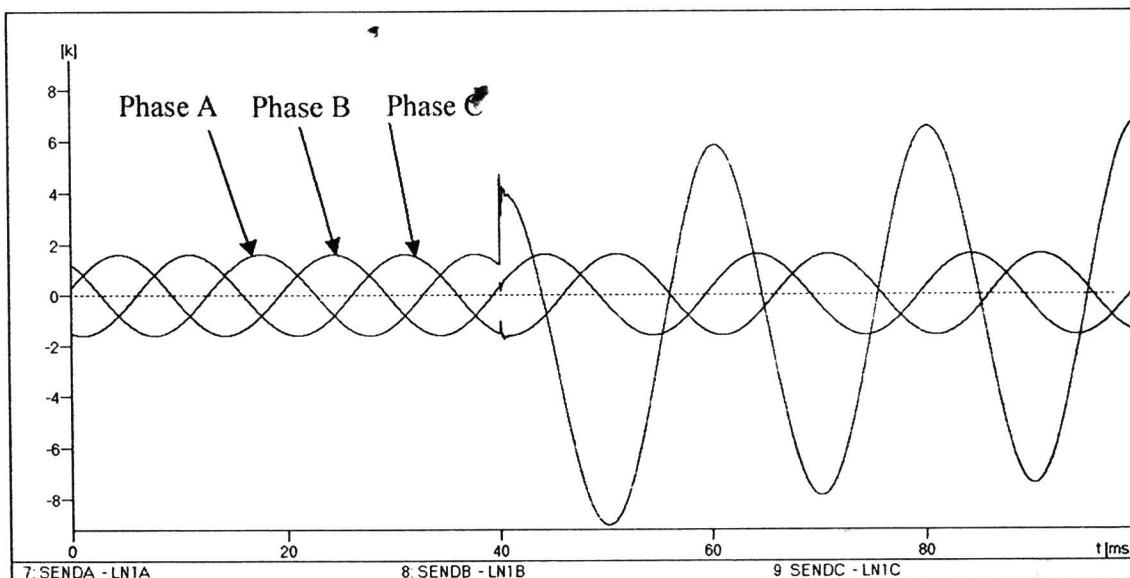
รูปที่ 3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจำลอง



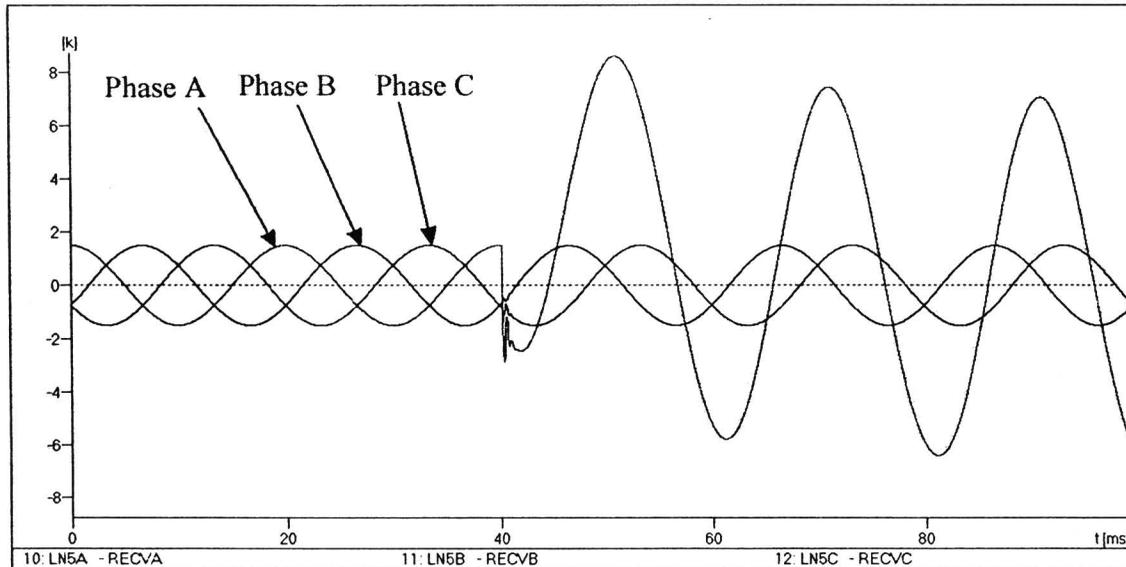


รูปที่ 3.2 ขนาดของสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการจำลอง

นำรูปคลื่นของกระแสที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม ATP/EMTP มาแยกองค์ประกอบให้อยู่ในรูป กระแสลำดับบวก , กระแสลำดับลบ และ กระแสลำดับศูนย์ จากนั้นนำรูปคลื่นที่ได้แปลงเวฟเลตต์โดยโปรแกรม MATLAB นำรูปคลื่นที่ได้ยกกำลังสองจะได้รูปคลื่นเวฟเลตต์ของทั้งสองปลายทางด้าน Sending และ Receiving



รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 150° ฝั่ง Sending



รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นกระแสทั้ง 3 เฟสที่มุมเกิดฟอลต์ 150° ฟัง Receiving

3.2 การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตในบทที่ 3 งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยสมมุติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้น และควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิดหรือเฟสที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ปลายสายส่งในแต่ละด้าน โดยนำข้อมูลสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากแบบจำลองฟอลต์ที่อัตราการสุ่ม (Sampling Rate) 200 kHz มาทำการแปลงให้อยู่ในองค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) คือ องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence) จากนั้นนำสัญญาณองค์ประกอบกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current) มาดำเนินการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา โดยการใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละสเกล เพื่อตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสเกล หลังจากนั้นนำข้อมูลในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้มาวิเคราะห์ประเภทของฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง และตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายส่งต่อไป โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ต่างๆ จะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การตรวจจับ

รูปแบบของการตรวจจับฟอลต์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำสัญญาณกระแสฟอลต์มาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพื่อลดจำนวนในการวิเคราะห์และความซับซ้อนในการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์เวฟเฟิร์ตจะนำสัญญาณกระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม ATP/EMTP ในแต่ละเฟสจากปลายสายส่งแต่ละด้านมาทำการแปลงให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่างๆ (Network Sequence) โดยใช้เมตริกซ์ของการแปลง (Sequence Transformation Matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ (3.1)

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

เมื่อ I_0 หมายถึงองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)

I_1 หมายถึงองค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence)

I_2 หมายถึงองค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence)

T หมายถึงเมตริกการแปลงของกระแส (Phase Current Transformation Matrix)

งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้เมตริกซ์การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transformation Matrix) เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายส่งทั้งแบบมีการไขว้สลับสายแบบสมบรูณ์และไม่มีการไขว้สลับสาย โดยเมตริกซ์การแปลงและความเร็วคลื่นเดินทางบนสายส่งของระบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 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	

การตรวจจับฟอลต์สามารถทำได้โดยการนำสัญญาณกระแสฟอลต์ในแต่ละเฟส และสัญญาณกระแสฟอลต์ขององค์ประกอบลำดับต่างๆ ของปลายสายส่งแต่ละด้านมาผ่านการแปลงเวฟเฟิร์ตแบบ

เต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ดแม่ซนิก daubechies4 (db4) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเกลด้วยกันจากนั้นนำมายกกำลังสอง แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับซึ่งในแต่ละสเกลสามารถแสดงค่าของช่วงความถี่ต่างๆ ดังนี้

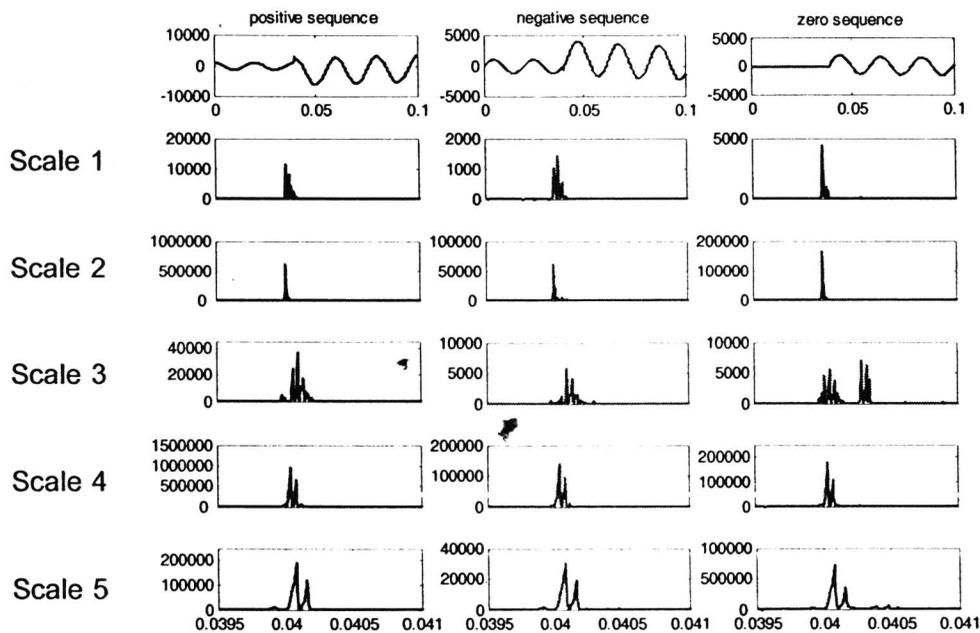
สเกลที่ 1 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 50-100 kHz

สเกลที่ 2 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 25-50 kHz

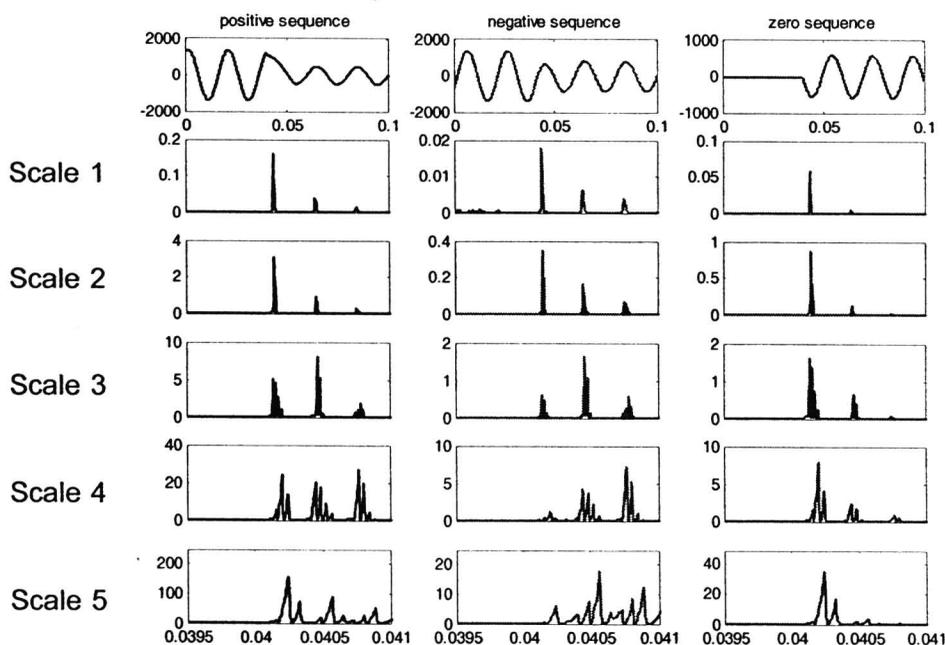
สเกลที่ 3 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 12.5-25 kHz

สเกลที่ 4 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 6.25-12.5 kHz

สเกลที่ 5 แสดงสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 3.125-6.25 kHz



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นเวฟเล็ดยกกำลัง 2 ฟัง Sending end



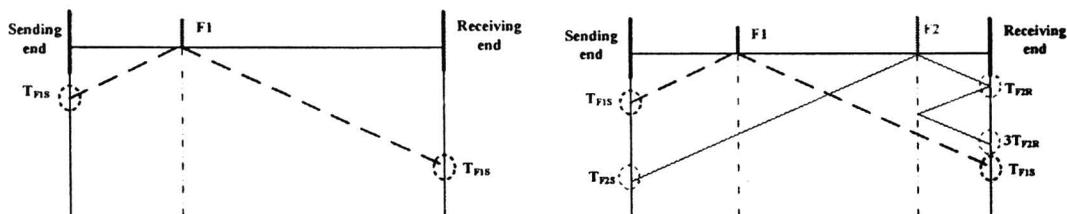
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นเวฟเลตยกกำลัง 2 ฝั่ง Receiving end

งานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์เป็นจำนวนเท่า ในแต่ละสเกลของกระแสที่ปลายสายส่งแต่ละด้าน และเพื่อให้การพิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 จากผลการแปลงเวฟเลตสามารถสังเกตได้ว่าในสภาวะที่เริ่มมีฟอลต์ ($t \geq 0.04$ sec) พบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในแต่ละสเกลจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ ($t < 0.04$ sec) ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า “ถ้าสัมประสิทธิ์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิลหลังจากเกิดฟอลต์ของสเกลใดสเกลหนึ่งของกระแสดำดับบวกเมื่อวัดที่ปลายสายส่งแต่ละด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่า 5 เท่าจากช่วงสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ แสดงว่ามีความผิดปกติ เกิดขึ้นในสายส่ง” เมื่อสามารถตรวจจับฟอลต์ได้แล้ว จากนั้นนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ในวงจรที่เกิดฟอลต์มาวิเคราะห์ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์บนสายส่งต่อไป

3.3 ทฤษฎีการหาจุดกำเนิดฟอลต์

สำหรับการระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์นั้น โดยส่วนใหญ่จะใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทางเพื่อคำนวณตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น โดยได้ตั้งสมมุติฐานที่ว่า เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ณ จุดใดๆบนสายเคเบิลจะเกิดสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังสายเคเบิลทั้ง 2 ด้าน ซึ่งถ้าสามารถจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมาที่ปลายแต่ละด้านได้ ก็สามารถนำเวลามาคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ดี ทฤษฎีคลื่นเดินทางที่กล่าวมานั้นจะใช้ในการคำนวณสำหรับกรณีฟอลต์ชนิดเดียวเท่านั้น แต่เมื่อเกิดฟอลต์สองชนิดพร้อมกันจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น เมื่อพิจารณาแสดงในรูปที่ 3.7(ก) ในกรณีฟอลต์ชนิดเดียว ค่าเวลาที่ตำแหน่ง T_{FIS} และ T_{FIR} ถูกนำไปใช้ในการคำนวณด้วยทฤษฎีคลื่นเดินทางเพื่อคำนวณตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในกรณีฟอลต์สองชนิดพร้อมกันดังรูปที่ 3.7(ข) จะพบว่า ค่าเวลาที่ตำแหน่ง T_{FIS} และ T_{F2R} ถูกนำไปใช้ในการคำนวณด้วยทฤษฎีคลื่นเดินทางเช่นกัน แต่จะเกิดความผิดพลาด เนื่องจากเวลาที่สามารถตรวจจับฟอลต์ทางด้านรับ (Receiving end) จะตรวจจับฟอลต์ได้เร็วกว่าเนื่องจากฟอลต์ที่อยู่ใกล้ับส้านรับ

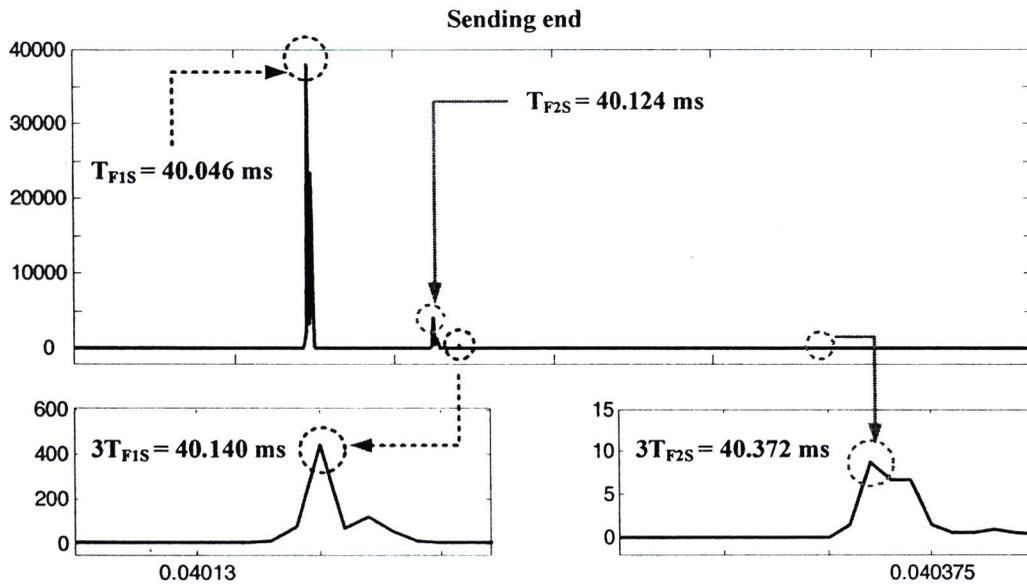
งานวิจัยนี้จึงได้นำการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์สองชนิดที่เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยนำสัญญาณองค์ประกอบกระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current) มาดำเนินการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย (DWT) เพื่อแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1-5 ออกมา โดยการใช้เวฟเล็ดแม่ซันด์ Daubechies 4 (db4) แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละสเกล



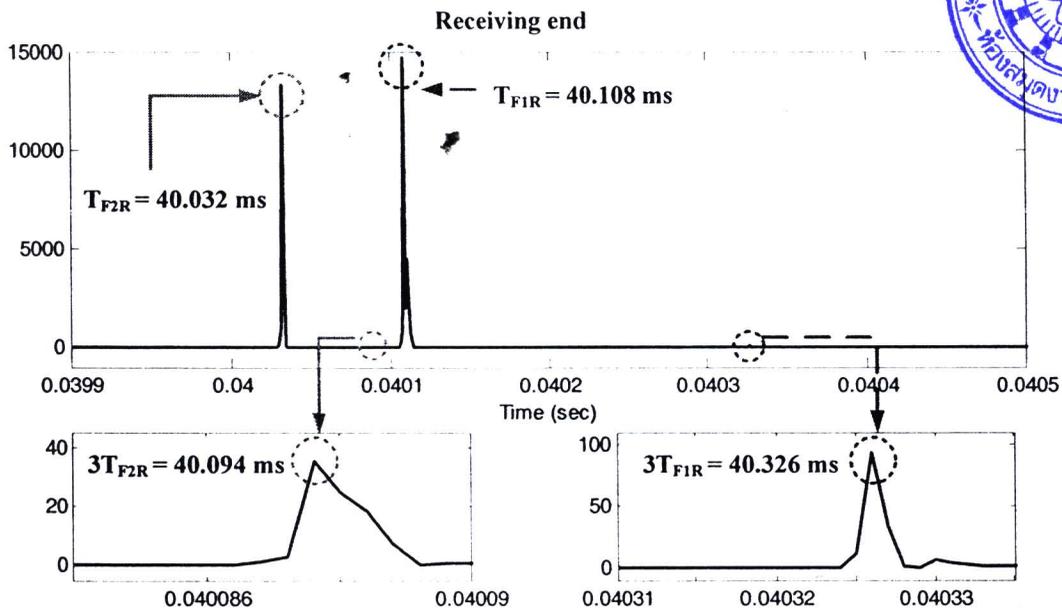
(ก) กรณีฟอลต์ชนิดเดียว

(ข) กรณีฟอลต์สองชนิดพร้อมกัน

รูปที่ 3.7 ค่าเวลาสูงสุดที่มาถึงปลายแต่ละด้านของสายเคเบิล



รูปที่ 3.8 ค่าคลื่นสูงสุดฝั่ง Sending ที่เวลา T_{FIS} $3T_{FIS}$ T_{F2S} $3T_{F2S}$ ณ จุดเกิดฟอลต์จริงที่ 9 และ 24 กิโลเมตร



รูปที่ 3.9 ค่าคลื่นสูงสุดฝั่ง Sending ที่เวลา T_{F1R} $3T_{F1R}$ T_{F2R} $3T_{F2R}$ ณ จุดเกิดฟอลต์จริงที่ 9 และ 24 กิโลเมตร

หลังจากสามารถตรวจจับค่าเวลาในการเกิดฟอลต์ได้แล้ว นำค่าเวลาที่ได้นำมาคำนวณเพื่อหาระยะทางในการเกิดฟอลต์โดยใช้สมการที่ 3.2 ในการหาจุดเกิดฟอลต์ของคลื่นเดินทาง

$$d = LT \times \frac{t_{diff_FS}}{t_{diff_FS} + t_{diff_FR}} \quad (3.2)$$

เมื่อ

d = ระยะทางเกิดฟอลต์จากทางด้านตัวกำเนิดไฟฟ้า (เมตร)

LT = ความยาวสายส่ง (เมตร)

T_{FXS} = ค่าเวลาที่ตรวจจับได้ ที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดค่าแรก ณ จุดเกิดฟอลต์ X ด้านส่ง

$3T_{FXS}$ = ค่าเวลาที่ตรวจจับได้ ที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดค่าสอง ณ จุดเกิดฟอลต์ X ด้านส่ง

T_{FXR} = ค่าเวลาที่ตรวจจับได้ ที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดค่าแรก ณ จุดเกิดฟอลต์ X ด้านรับ

$3T_{FXR}$ = ค่าเวลาที่ตรวจจับได้ ที่ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดค่าที่สอง ณ จุดเกิดฟอลต์ X ด้านรับ

t_{diff_FS} = ค่าเวลาจากการคำนวณค่าสูงสุดด้านส่ง ณ จุดเกิดฟอลต์ X

$$t_{diff_FS} = \left| \frac{T_{FXS} - 3T_{FXS}}{2} \right| \quad (3.3)$$

t_{diff_FR} = ค่าเวลาจากการคำนวณค่าสูงสุดด้านรับ ณ จุดเกิดฟอลต์ X

$$t_{diff_FR} = \left| \frac{T_{FXR} - 3T_{FXR}}{2} \right| \quad (3.4)$$

จากการคำนวณจุดเกิดฟอลต์ 1

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 เมื่อ $L = 30,000$ เมตร

$$T_{F1S} = 0.040046 \text{ วินาที}$$

$$3T_{F1S} = 0.040140 \text{ วินาที}$$

$$T_{F1R} = 0.040108 \text{ วินาที}$$

$$3T_{F1R} = 0.040326 \text{ วินาที}$$

$$t_{diff_FS} = \left| \frac{0.040046 - 0.040140}{2} \right| = 0.047 \text{ วินาที}$$

$$t_{diff_FR} = \left| \frac{0.040108 - 0.040326}{2} \right| = 0.109 \text{ วินาที}$$

$$d = 30,000 \times \frac{0.047}{0.047 + 0.109} = 9,038.46 \text{ เมตร}$$

ที่จุดเกิดฟอลต์จริง 9 กิโลเมตร คลาดเคลื่อน 38.46 เมตร

จากการคำนวณจุดเกิดฟอลต์ 2

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 เมื่อ $L = 30,000$ เมตร

$$T_{F2S} = 0.040124 \text{ วินาที}$$

$$3T_{F2S} = 0.040372 \text{ วินาที}$$

$$T_{F2R} = 0.040124 \text{ วินาที}$$

$$3T_{F2R} = 0.040094 \text{ วินาที}$$

$$t_{diff_FS} = \left| \frac{0.040124 - 0.040372}{2} \right| = 0.124 \text{ วินาที}$$

$$t_{diff_FS} = \left| \frac{0.040124 - 0.040094}{2} \right| = 0.031 \text{ วินาที}$$

$$d = 30,000 \times \frac{0.124}{0.124 + 0.031} = 24,000.00 \text{ เมตร}$$

ที่จุดเกิดฟอลต์จริง 24 กิโลเมตร คลาดเคลื่อน 0.00 เมตร