

บทที่ 5

การจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์

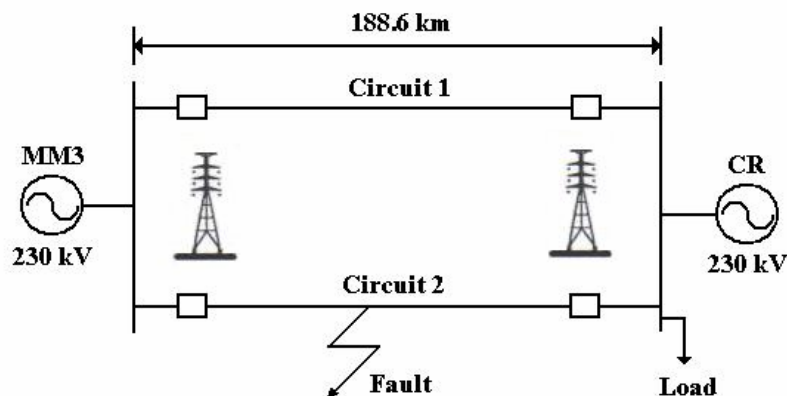
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบโดยทำการจำลองฟอลต์บนสายส่งวงจรคู่ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP [17] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงสัญญาณฟอลต์ด้วย พร้อมทั้งนำข้อมูลสัญญาณฟอลต์ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับโปรแกรม MATLAB ด้วย Wavelet and Neural Network Toolbox ในการวิเคราะห์ฟอลต์โดยมีรายละเอียดในการจำลองและวิเคราะห์ฟอลต์ดังต่อไปนี้

5.1 การจำลองฟอลต์

ในการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในสายส่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นเรื่องที่ยากมากเนื่องจากไม่สามารถทดลองได้ในระบบจริง จึงมีความจำเป็นที่ต้องสร้างแบบจำลองทางระบบไฟฟ้าขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการและเรียนรู้เกี่ยวกับสิ่งที่เกิดขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้จำลองปรากฏการณ์การเกิดฟอลต์ในสายส่ง โดยอาศัยโปรแกรม ATPDraw for Windows version 1.4 ที่ได้รับการพัฒนามาจากโปรแกรม ATP/EMTP หรือ Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program ซึ่งช่วยในการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางด้านทรานเซียนต์เมื่อคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนไป โปรแกรมนี้มีการใช้งานและได้รับการยอมรับแบบกว้างขวางว่ามีความเหมาะสมในด้านการจำลองแบบดิจิทัลและให้ผลตอบสนองเหมือนจริงสำหรับปรากฏการณ์ทรานเซียนต์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

5.1.1 แบบจำลองในการสัญญาณฟอลต์

เนื่องจากในสถานะที่เกิดฟอลต์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของเหตุการณ์เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ได้ครอบคลุมในหลายรูปแบบมากที่สุด จึงทำการสร้างระบบจำลองแบบ 2 บัส โดยใช้สายส่งวงจรคู่ (Double circuit) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการจำลองระบบสายส่งวงจรคู่

5.1.2 แบบจำลองสายส่ง [18]

ในการศึกษาฟอลต์ที่เกิดขึ้นบนสายส่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่งให้ถูกต้องเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองฟอลต์ ดังนั้นจึงต้องเลือกรูปแบบในการคำนวณให้เหมาะสมด้วย การคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งนั้นมีให้เลือกใช้ด้วยกันหลายรูปแบบเช่น แบบวงจรพาย (Pi – mode) แต่ก็มีข้อจำกัดและความยุ่งยากในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการนำรูปแบบการคำนวณพารามิเตอร์ของสายส่งในรูปแบบของพารามิเตอร์ขึ้นอยู่ความถี่ (Frequency – dependent parameter) หรือนิยมเรียกกันว่า J.marti ซึ่งจะมีการคำนวณอย่างละเอียดโดยพารามิเตอร์ในการคำนวณจะเปลี่ยนไปตามความถี่ที่ใช้คำนวณโดยคำนวณด้วยโปรแกรม ATP – LCC รูปแบบของ J.marti นี้จะเหมาะสมกับการศึกษาผลของคลื่นเดินทางและสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสภาวะทรานเซียนต์ต่าง ๆ รวมไปถึงการจำลองฟอลต์บนสายส่ง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้รูปแบบของ J.marti ในการสร้างแบบจำลองสายส่ง

สำหรับการคำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองสายส่งนั้นเนื่องจากในทางปฏิบัติระยะห่างของเสา (Span) และระยะหย่อน (Sag) นั้นจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non – uniform) ขึ้นอยู่กับสถานที่ในการติดตั้ง แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ระยะห่างของเสาและระยะหย่อนของสายตัวนำและสายล่อฟ้ามีค่าสม่ำเสมอตลอดช่วงระยะทางทั้งหมด

5.1.2.1 โครงสร้างของสายส่ง 230 kV [19]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบจำลองสายส่งระบบ 230 kV แบบวงจรคู่ (Double circuit) ซึ่งเป็นสายส่งที่มีใช้งานจริง จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะถึงสถานีไฟฟ้าเชิงรับ (MM3 - CR) โดยสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างของเสา (Tower) ที่ได้ใช้ดังรูปที่ 5.2

โดยมีข้อมูลจำเพาะของสายส่งดังนี้

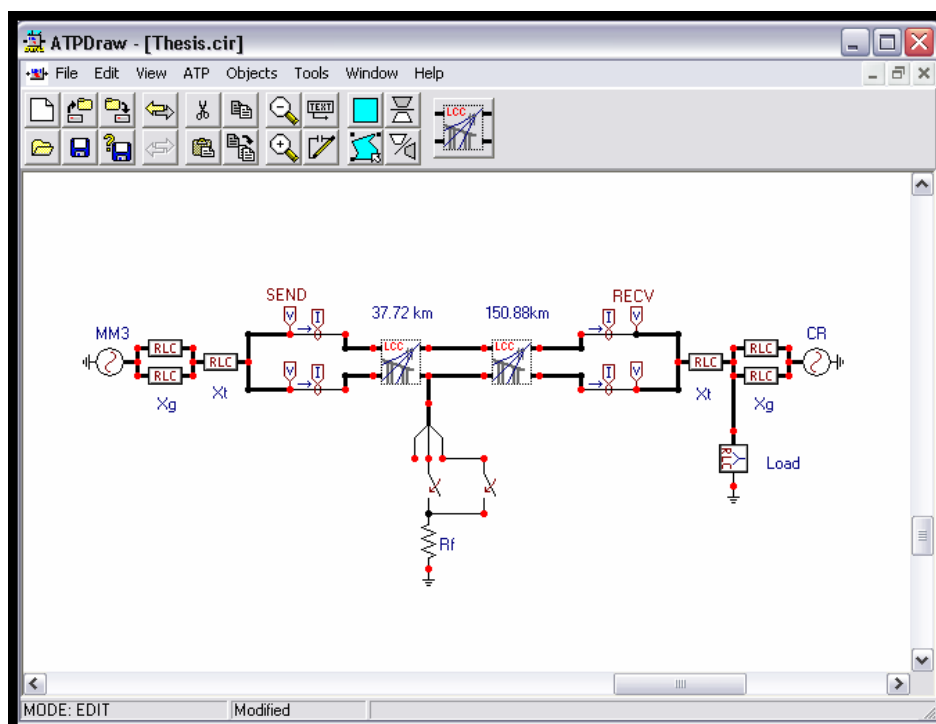
- โครงสร้างเสา (Tower) แบบ DAV1
- จำนวนตัวนำต่อเฟส 4 ตัวนำ (4 bundle)
- ประเภทสาย ACSR 795 cmil (Al42/St7)
- ประเภทของสายล่อฟ้า (Over head ground wire) 3/8 inch , EHS GALV (St7)
- ความต้านทานของสายตัวนำ 0.0449 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ความต้านทานของสายล่อฟ้า 4.194 โอห์มต่อกิโลเมตร
- ระยะห่างของตัวนำเฟส A (วัดจากกึ่งกลางเสา) 5 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำเฟส B (วัดจากกึ่งกลางเสา) 5.2 เมตร
- ระยะห่างของตัวนำเฟส C (วัดจากกึ่งกลางเสา) 5.4 เมตร
- ระยะห่างของสายล่อฟ้า (วัดจากกึ่งกลางเสา) 3 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส A ที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 47 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส B ที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 41 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส C ที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 35 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่เสาส่ง (วัดจากพื้น) 53.68 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส A ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 35.2 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส B ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 29.2 เมตร
- ความสูงของตัวนำเฟส C ที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 23.2 เมตร
- ความสูงของสายล่อฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างเสา (Sag) (วัดจากพื้น) 41.88 เมตร
- ระยะห่างของเสาส่งระหว่างต้น (Span) 430 เมตร
- ความต้านทานของดิน 100 โอห์ม.เมตร

5.1.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

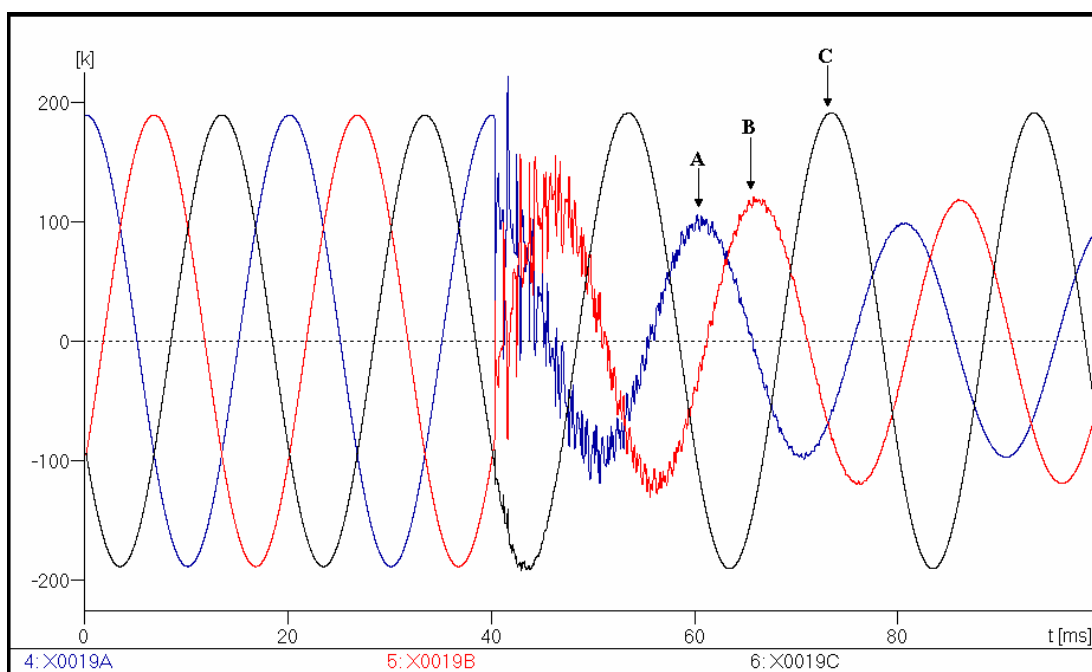
ในการจำลองฟอลต์นั้นเพื่อศึกษาฟอลต์ที่แตกต่างกันจึงทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่มีผลเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ประเภทของฟอลต์ 10 ประเภท ได้แก่ AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ 10%-90% ของระยะทางทั้งหมด (ช่วงละ 10%)
- มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ 0° - 330° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ 30°)
- ขนาดของโหลดเท่ากับ 500 MVA (p.f.=0.8)
- ความต้านทานของฟอลต์ 10 โอห์ม
- เกิดฟอลต์ขึ้นทั้ง 2 วงจร

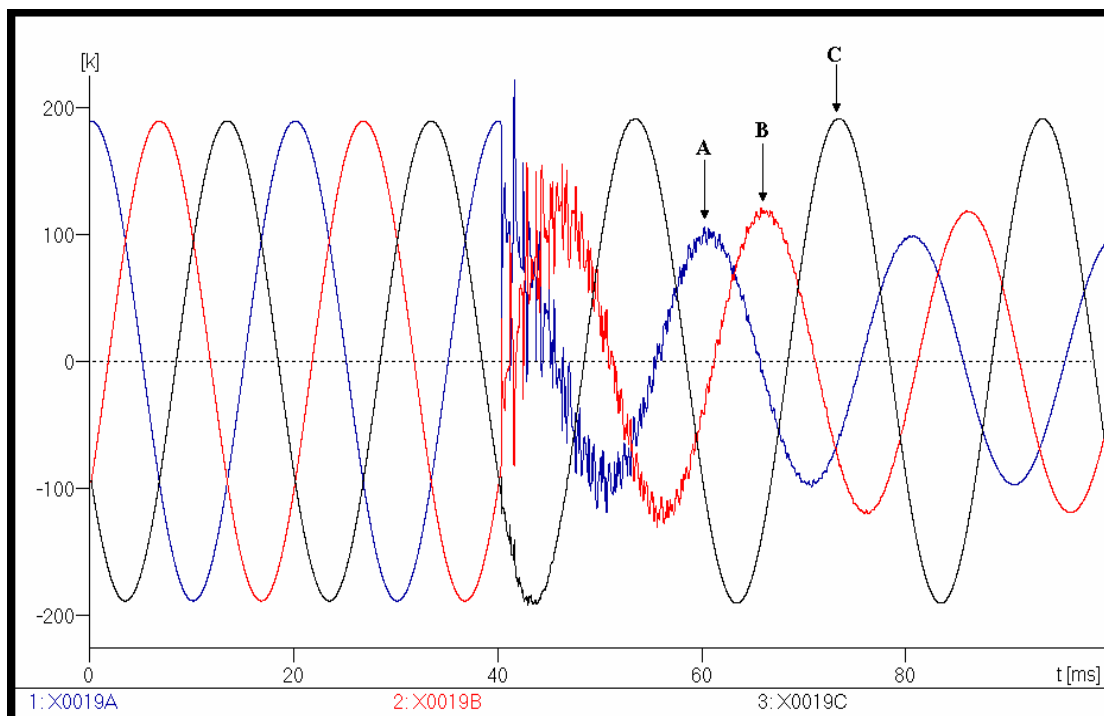
โดยใช้สวิตช์ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบและเวลาของการเกิดฟอลต์ ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เริ่มเกิดฟอลต์ที่ $t = 0.04$ วินาที และทำการจำลองสัญญาณทั้งหมด 5 ไซเคิล (0-0.1 วินาที) โดยไม่มีการกำจัดฟอลต์ออก กำหนดความถี่การสุ่ม (Sampling frequency rate) 200 kHz ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการจำลองในรูปที่ 5.3



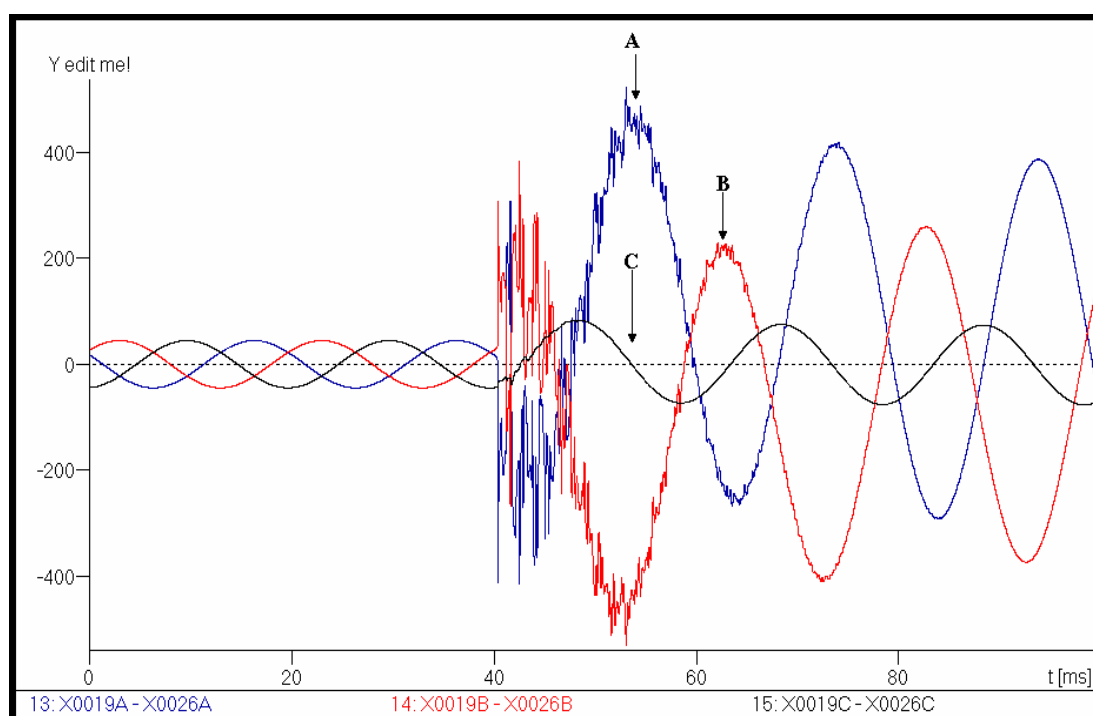
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรในการจำลองฟอลต์แบบ ABG วงจรที่ 2 ที่ 37.72 km ของระบบจำลอง



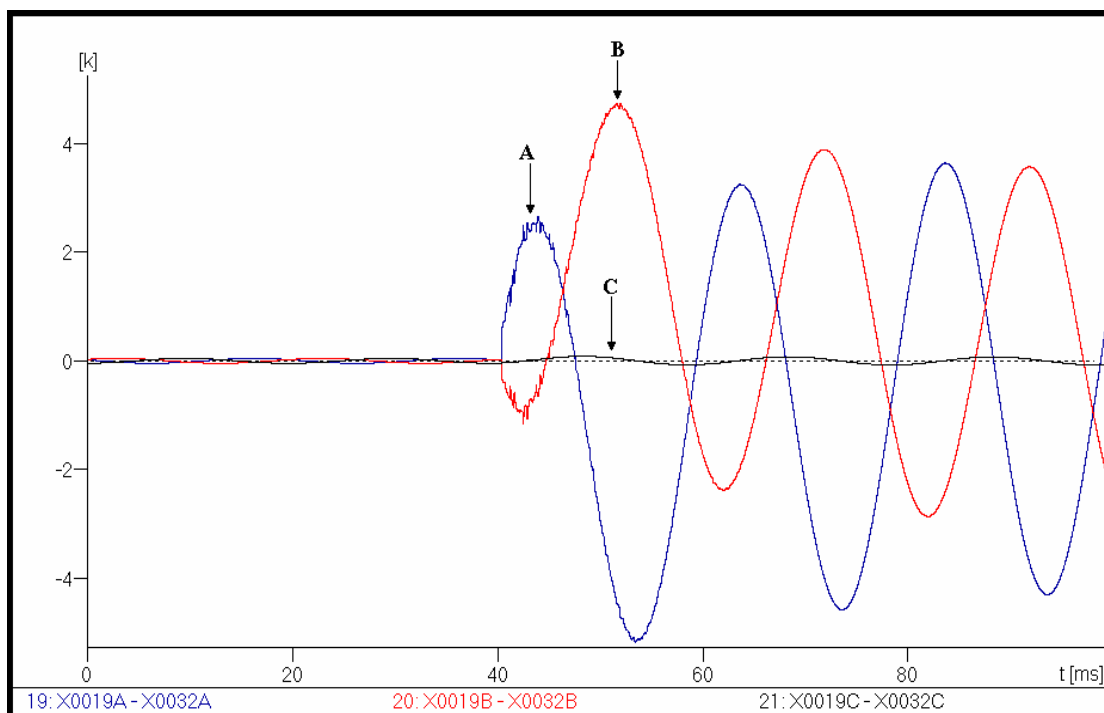
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณฟอลต์ของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 1



รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณพล็อตของแรงดันที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 2



รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณพล็อตของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 1

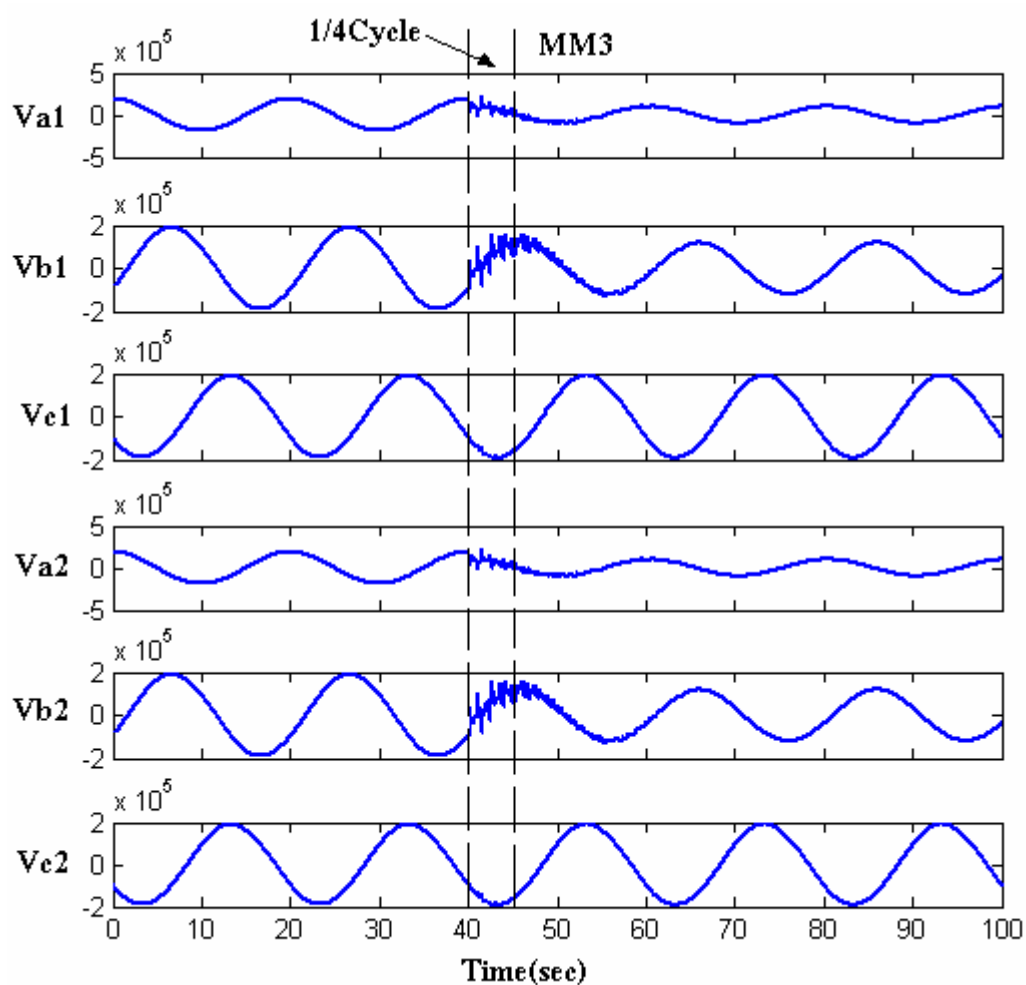


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณฟอลต์ของกระแสที่ได้จากการจำลองที่ปลายด้านส่ง วงจรที่ 2

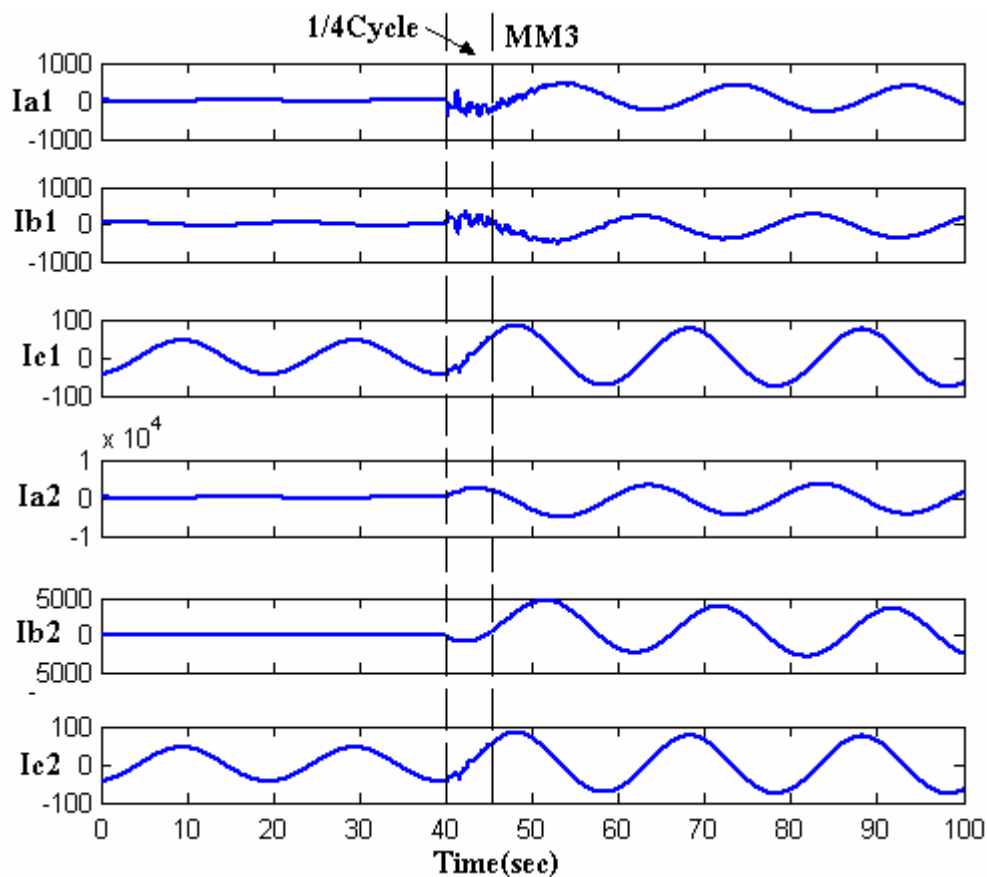
5.2 การวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

จากทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ตที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 วิทยานพนธ์นี้จึงได้นำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (DWT) มาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์บนสายส่ง โดยทำการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่ปลายด้านส่งของสายส่ง โดยสมมติฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์คือ ในสภาวะปกติสัญญาณกระแสและแรงดันจะไม่มีองค์ประกอบความถี่สูงรวมอยู่ แต่ในสภาวะที่มีฟอลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่สูงเกิดขึ้นและควรจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วย เช่น มุมที่เริ่มเกิดฟอลต์ ตำแหน่งที่เกิด หรือเฟสที่เกิดฟอลต์ เป็นต้น วิทยานพนธ์นี้จึงทำการศึกษาแบบของฟอลต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งสัญญาณฟอลต์ในแต่ละแบบจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ได้นำตัวอย่างของสัญญาณกระแสฟอลต์ทั้งสองวงจรจากปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียวที่ได้จากการจำลองด้วยความถี่การสุ่ม (Sampling frequency rate) 200 kHz มาทำการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยเพื่อทำการแยกองค์ประกอบความถี่สูงในสเกลที่ 1 – 5 ออกมา แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่จากสัมประสิทธิ์ที่ได้ในแต่ละสเกล ผลที่ได้จะนำมาใช้ใน 3 ลักษณะคือ การตรวจจับฟอลต์และระบุวงจรที่เกิดฟอลต์, การหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และการระบุประเภทของฟอลต์ โดยเลือกใช้ข้อมูลในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังจากที่เริ่มเกิดฟอลต์ ซึ่งใช้ช่วงของข้อมูลที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับหลักการเดิมที่ใช้การแปลงฟูเรียร์ที่ต้องใช้ช่วงของข้อมูลในการ

วิเคราะห์อย่างน้อย 1 ไซเคิล ในการอธิบายการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลี่ยนี่จึงได้ยกตัวอย่างของสัญญาณฟอลต์ตามระบบในรูปแบบที่ 5.8 ซึ่งเป็นฟอลต์ที่เฟส A และ B ลงดิน (ABG) ที่วงจรที่ 2 ที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร วัดจากปลายด้านส่งของสายส่ง (30 % ของระยะทางเต็ม 188.6 กิโลเมตร) เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดของการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลี่ยนดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณแรงดันฟอลต์ที่พิจารณาด้านปลายส่งทั้ง 2 วงจร (MM3)



รูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณกระแสฟอลต์ที่พิจารณาด้านปลายส่งทั้ง 2 วงจร (MM3)

5.2.1 การตรวจจับและระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ (Detection and specify fault circuit)

รูปแบบของการตรวจจับฟอลต์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำสัญญาณกระแสมาทำการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพื่อต้องการลดจำนวนในการวิเคราะห์และความซับซ้อนในการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ จากนั้นนำสัญญาณกระแสมาทำการแปลงใหม่ให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่าง ๆ โดยอาศัยการแปลงด้วยเมตริกการแปลง (Transformation matrix) ซึ่งสมการการแปลงได้แสดงอยู่ในสมการที่ 5.1[20]

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

เมื่อ I_0 = Ground mode หรือ Zero sequence

I_1 = Aerial mode หรือ Positive sequence

I_2 = Aerial mode หรือ Negative sequence

T = เมตริกซ์การแปลงของคาร์ก (Clarke's Transformation matrix)

ในส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เมตริกซ์การแปลงของคาร์ก (Clarke's Transformation matrix) กับระบบจำลอง เนื่องจากสามารถใช้ได้กับสายส่งทั้งแบบมีการไขว้สลับสายแบบสมบูรณ์ และแบบไม่มีการไขว้สลับสาย ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าลักษณะการจัดวางของสายส่งต้องอยู่ในแนวตั้งได้ทุก ๆ ช่วงความถี่ เมตริกซ์การแปลงของระบบจำลองได้แสดงดังตารางที่ 5.1

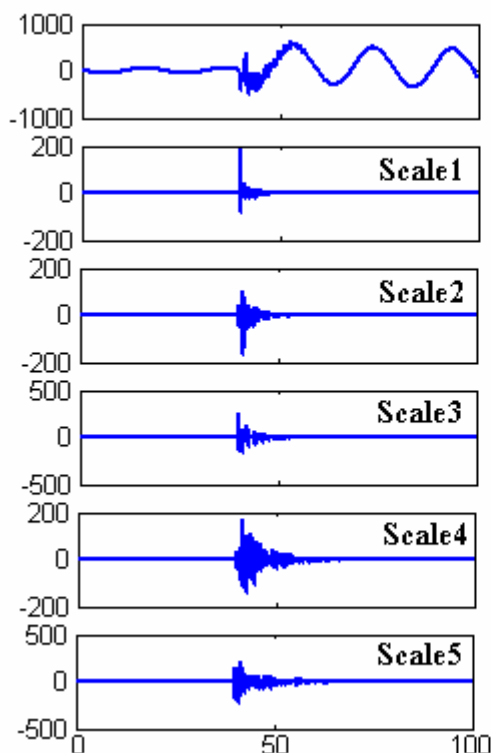
ตารางที่ 5.1 แสดงความเร็วคลื่นเดินทางและเมตริกซ์การแปลงของระบบจำลอง [21]

Scale	Frequency range (kHz)	Traveling wave speed(km/s)	Transformation matrix
1	50 - 100	297213	$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
2	25 - 50	296988	
3	12.5 - 25	296748	
4	6.25 - 12.5	296464	
5	3.125 - 6.25	296411	

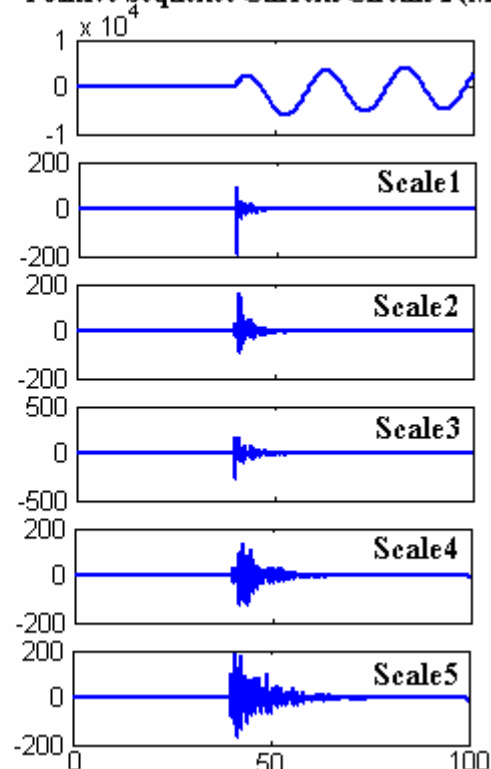
หลังจากที่ทำการแปลงองค์ประกอบในแต่ละเฟสให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบลำดับต่าง ๆ แล้วการตรวจจับพอลต์ทำโดยการนำองค์ประกอบลำดับบวก มาผ่านการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยโดยใช้เวฟเล็ตแม่ชนิด Daubechies 4 (db4) ในการแยกองค์ประกอบความถี่สูงออกมา 5 สเตจด้วยกัน ดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ซึ่งแต่ละสเตจจะแสดงค่าของช่วงความถี่ดังนี้

สเตจที่ 1 มีช่วงความถี่	50 – 100	kHz
สเตจที่ 2 มีช่วงความถี่	25 – 50	kHz
สเตจที่ 3 มีช่วงความถี่	12.5 – 25	kHz
สเตจที่ 4 มีช่วงความถี่	6.25 – 12.5	kHz
สเตจที่ 5 มีช่วงความถี่	3.125 – 6.25	kHz

Positive Sequence Current Circuit 1 (MM3)

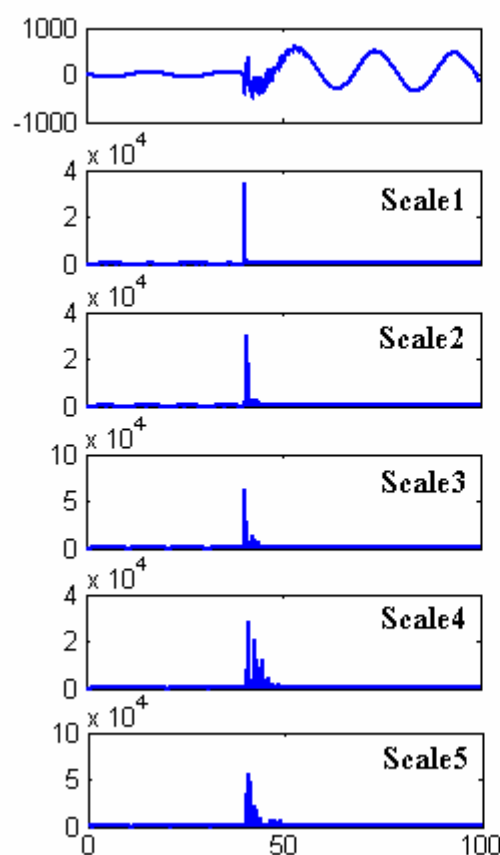


Positive Sequence Current Circuit 2 (MM3)

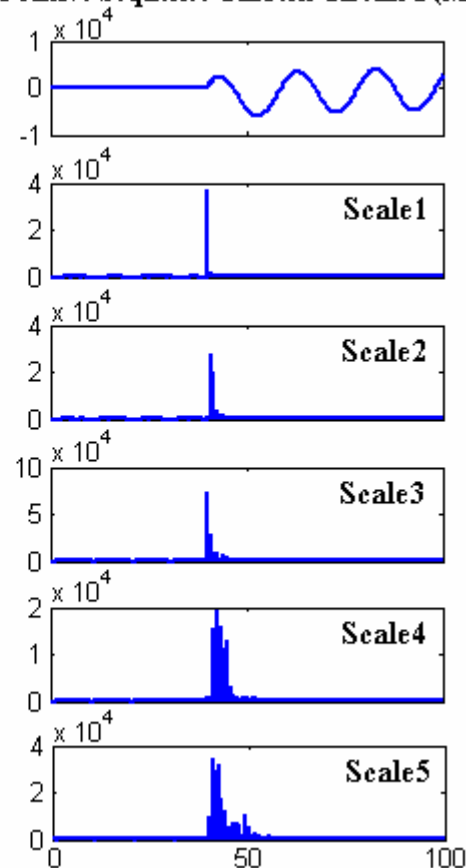


รูปที่ 5.10 แสดงผลการแปลงเวฟได้ตของกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งด้านส่งทั้ง 2 วงจร

Positive Sequence Current Circuit 1 (MM3)



Positive Sequence Current Circuit 2 (MM3)



รูปที่ 5.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังสองของกระแสลำดับบวกของปลายสายส่งด้านส่งทั้ง 2 วงจร

จากผลการแปลงเวฟเล็ตสามารถสังเกตได้ว่าก่อนมีฟอลต์เกิดขึ้น ($t < 0.04$ s) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตจะมีค่าต่ำมาก แต่ในสภาวะที่เริ่มมีฟอลต์ ($t \geq 0.04$ s) จะพบว่าค่าของสัมประสิทธิ์ในสเกลที่ 1 – 5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพื่อให้พิจารณาง่ายขึ้นจึงนำสัมประสิทธิ์มายกกำลังสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนและง่ายต่อการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ซึ่งวิทยานิพนธ์ได้กำหนดการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์และค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ในสภาวะก่อนเกิดฟอลต์ ซึ่งพิจารณาในทุก ๆ สเกลโดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า "ถ้าสัมประสิทธิ์ในสเกลใดมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นมากกว่าสภาวะปกติ 5 เท่า แสดงว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นในสายส่ง" นอกจากนี้ในทางปฏิบัติการเกิดฟอลต์บนสายส่งยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบความถี่แต่การวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยที่มีการวิเคราะห์แบบหลายระดับความละเอียด จึงทำให้สามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแต่ละช่วงความถี่ได้ ในบางครั้งอาจจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงในการตรวจจับฟอลต์ในสเกลที่ 1 แต่ก็สามารถพบการเปลี่ยนแปลงในสเกลถัดไปได้

ขั้นตอนในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์เป็นการตัดสินใจว่าเกิดฟอลต์วงจรไหน โดยพิจารณาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกทั้งสองวงจรของปลายสายส่งด้านส่ง โดยใช้ข้อมูลจากสเกลที่ 1 เพียงอย่างเดียวเนื่องจากมีความถูกต้องมากกว่าสเกลอื่น ๆ และยังให้ความแม่นยำทางด้านเวลาที่ดี โดยตั้งสมมติฐานไว้ว่า "ถ้าค่าสัมประสิทธิ์วงจรใดวงจรหนึ่งมีค่ามากกว่าอีกวงจรหนึ่งแสดงว่าวงจรนั้นเกิดฟอลต์" เมื่อสามารถทราบวงจรที่เกิดฟอลต์แล้วจากนั้นนำข้อมูลทางด้านเวลาของวงจรที่เกิดฟอลต์มาทำการหาตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ได้ ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนต่อไป

5.2.2 การหาตำแหน่งฟอลต์ (Fault location)

เมื่อทราบวงจรที่เกิดฟอลต์แล้วจากนั้นนำข้อมูลทางด้านเวลาของวงจรที่สามารถตรวจจับได้ในสเกลที่ 1 มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงนั้นเริ่มเกิดที่เวลาใดบ้าง ซึ่งเวลานี้คือเวลาที่เริ่มเกิดฟอลต์นั่นเอง จากทฤษฎีคลื่นเดินทางเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น ณ จุดใด ๆ บนสายส่งจะเกิดสัญญาณฟอลต์เดินทางจากจุดที่เกิดฟอลต์ไปยังปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่ง ซึ่งถ้าสามารถตรวจจับเวลาที่คลื่นแต่ละลูกเดินทางมาถึงปลายทั้ง 2 ด้านได้ ก็สามารถนำเวลาที่ได้มาแทนในสมการที่ 5.2 เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของฟอลต์ที่เกิดขึ้น [22]

$$d = \frac{(L - v \times (t_B - t_A))}{2} \quad (5.2)$$

เมื่อ

d = ระยะทางจากจุดที่เกิดฟอลต์วัดจากปลายสายส่งด้าน MM3

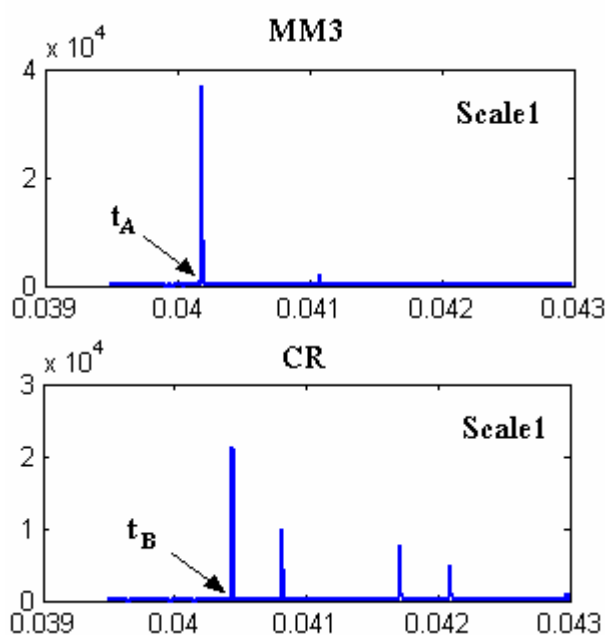
L = ความยาวของสายส่ง (188.6 km)

t_A = เวลาที่สัญญาณฟลัดต์มาถึงปลายด้าน MM3

t_B = เวลาที่สัญญาณฟลัดต์มาถึงปลายด้าน CR

v = ความเร็วการเดินทางของคลื่น (297213 km/s)

โดยสามารถแสดงการคำนวณตำแหน่งฟลัดต์โดยใช้เวลาที่สามารถตรวจจับได้ในสเกลที่ 1 จากการแปลงเวฟเฟิร์มของกระแสลำดับบวก ซึ่งเป็นฟลัดต์ที่เฟส A และ B ลงดินที่ระยะทาง 56.58 กิโลเมตร จากความยาวสายส่งทั้งหมด 188.6 กิโลเมตร ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 5.13 แสดงพีคแรกทีวัดได้ของสัญญาณกระแสลำดับบวกที่ปลายสายส่งแต่ละด้านในสเกลที่ 1

เมื่อ

$L = 188.6$ กิโลเมตร

$t_A = 0.040195$ วินาที

$t_B = 0.040445$ วินาที

$v = 297213$ กิโลเมตร/วินาที (km/s)

$$d = \frac{(188.6 - 297213 \times (0.040445 - 0.040195))}{2}$$

$$d = 57.148 \quad \text{กิโลเมตร}$$

คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง (56.58 กิโลเมตร) ที่เกิดฟลัดต์เท่ากับ 0.568 กิโลเมตร

5.2.3 การระบุประเภทฟอลต์ (Fault classification)

ลักษณะของฟอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสและองค์ประกอบลำดับต่าง ๆ ทั้ง 2 วงจร ทำการเปรียบเทียบกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของกระแสลำดับศูนย์เพื่อทำให้ค่าขององค์ประกอบในแต่ละเฟสมีฐานอ้างอิงเดียวกันและได้ทำการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Matlab [5] ซึ่งจะช่วยให้สามารถให้ความเข้าใจได้มากยิ่งขึ้น เพื่อความสะดวกในการอธิบายขั้นตอนทั้งหมดจึงทำการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$X_{com}^c = \frac{X_{max}^c}{Z_{max}^c}$$

X_{max}^c = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสเฟส X ในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์ (X=เฟส A, B และ C ตามลำดับ)

Z_{max}^c = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์

Ph_{max}^c = ค่าสูงสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส (A_{com}^c , B_{com}^c และ C_{com}^c)

Ph_{min}^c = ค่าต่ำสุดของค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 เฟส (A_{com}^c , B_{com}^c และ C_{com}^c)

P_{max}^c = ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์
c = วงจรที่ 1, 2

5.2.3.1 การวิเคราะห์เพื่อระบุฟอลต์ที่เกิดฟอลต์

พิจารณาค่าเปรียบเทียบ (A_{com}^c , B_{com}^c และ C_{com}^c) โดยเฟสที่จะสามารถระบุว่าการเกิดฟอลต์ได้นั้นต้องมีรูปแบบข้อใดข้อหนึ่งใน 3 ข้อต่อไปนี้

1. ต้องมีค่าเปรียบเทียบมากกว่า 1 และมีค่ามากกว่า 10% ของค่า Ph_{max}^c
2. หรือค่าเปรียบเทียบมีมากกว่า 5 เท่าของค่า Ph_{min}^c
3. หรือ 10 เท่าของ X_{max}^c มากกว่า P_{max}^c

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส A

if [$(A_{com}^c > 1)$ and $(A_{com}^c > 0.1 * Ph_{max}^c)$] or [$(A_{com}^c > 5 * Ph_{min}^c)$] or [$(A_{max}^c * 10 > P_{max}^c)$]

then

phase A fault

else

phase A unfault

end

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส B

```

if [( $B_{com}^c > 1$ )and( $B_{com}^c > 0.1 * Ph_{max}^c$ )]or[( $B_{com}^c > 5 * Ph_{min}^c$ )]or[( $B_{max}^c * 10 > P_{max}^c$ )]
then
    phase B fault
else
    phase B unfault
end

```

พิจารณาฟอลต์ที่เฟส C

```

if [( $C_{com}^c > 1$ )and( $C_{com}^c > 0.1 * Ph_{max}^c$ )]or[( $C_{com}^c > 5 * Ph_{min}^c$ )]or[( $C_{max}^c * 10 > P_{max}^c$ )]
then
    phase C fault
else
    phase C unfault
end

```

5.2.3.2 การวิเคราะห์เพื่อระบุฟอลต์ลงดิน

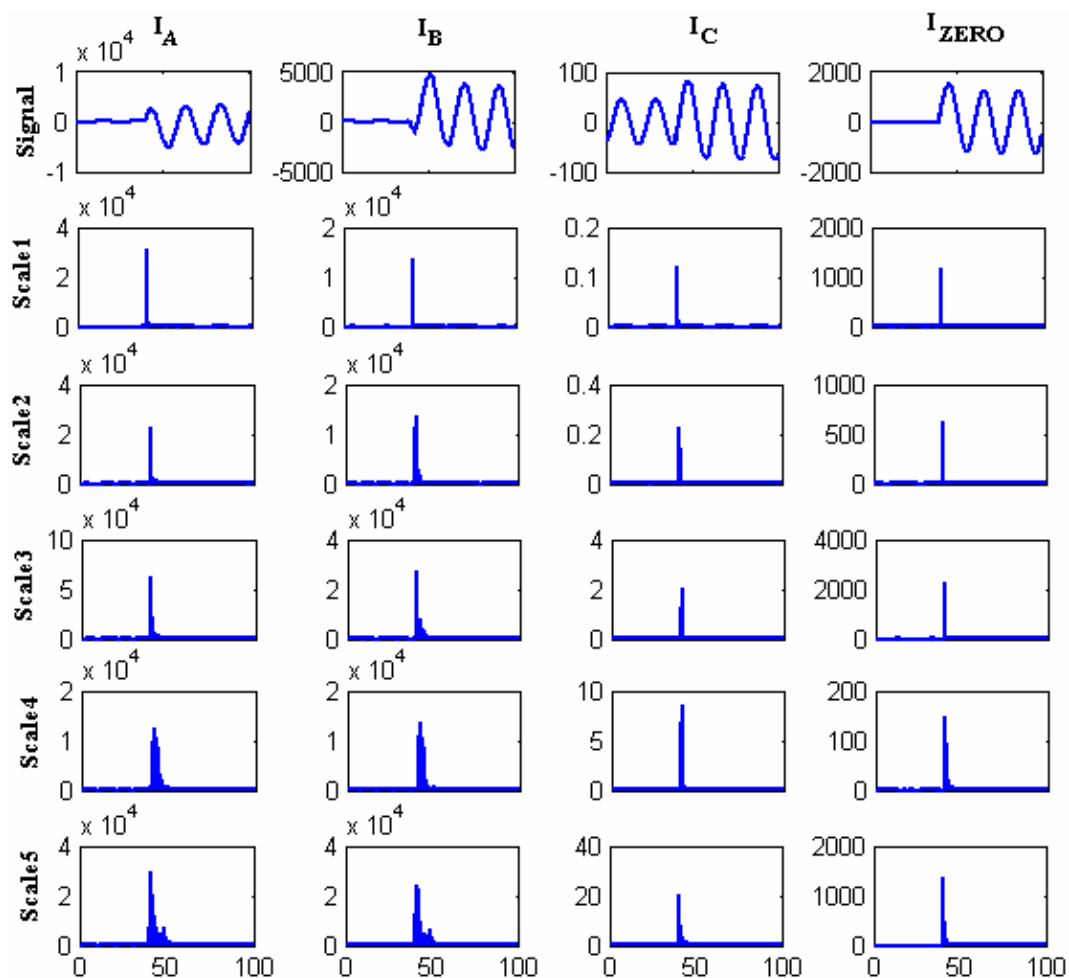
เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดขององค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง $\frac{1}{4}$ ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์เปรียบเทียบกับค่าคงที่ (ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบหลายตัวอย่างและเห็นว่ามีค่าคงที่อยู่มากหนึ่งที่สามารถนำมาอ้างเพื่อระบุฟอลต์ลงดินได้)

```

if [( $Z_{max}^c > 0.004$ )]
then
    Ground fault
else
    Ground unfault
End

```

เพื่อแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์อย่างชัดเจน จึงขอยกตัวอย่างของสัญญาณของฟอลต์ที่เฟส A และ B ลงดิน (ABG) ที่เกิดขึ้นบนสายส่งวงจรที่ 2 โดยนำข้อมูลของวงจรที่ 2 มาใช้เป็นข้อมูล เนื่องจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ได้ทำการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์แล้ว



รูปที่ 5.14 แสดงการแปลงเวฟเลตของกระแสฟอลต์ที่วัดได้จากปลายสายส่งด้าน MM3

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดของกระแสในแต่ละเฟสในช่วง 1/4 ไซเคิล หลังเกิดฟอลต์ที่ปลายด้าน MM3 กรณีเกิดฟอลต์วงจรที่ 2

เวฟเลต สเกลที่ (L)	$A_{\max}^2$	$B_{\max}^2$	$C_{\max}^2$	$Z_{\max}^2$
1	3.108E+04	1.357E+04	0.123	1.178E+03
2	2.248E+04	1.374E+04	0.226	6.321E+02
3	6.218E+04	2.743E+04	2.068	2.293E+03
4	1.249E+04	1.356E+04	8.636	1.463E+02
5	2.999E+04	2.416E+04	20.346	1.349E+03

ตารางที่ 5.3 ผลการระบุประเภทฟอลต์ที่พิจารณาจากปลายด้าน MM3

เวฟเล็ด สเกลที่ (L)	เฟส A	เฟส B	เฟส C	ฟอลต์ ลงดิน
1	F	F	-	F
2	F	F	-	F
3	F	F	-	F
4	F	F	-	F
5	F	F	-	F
สรุป	F	F	-	F

เมื่อ

พิจารณาตามเฟส

" F " = เกิดฟอลต์

" - " = ไม่เกิดฟอลต์

พิจารณาฟอลต์ลงดิน

" F " = เกิดฟอลต์

" - " = ไม่เกิดฟอลต์

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ฟอลต์บนสายส่งด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเล็ดแล้วจะพบว่ายังมีข้อเสียอยู่ก็คือ การแปลงเวฟเล็ดไม่สามารถบ่งบอกถึงวงจรที่เกิดฟอลต์, ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และประเภทของฟอลต์ได้ด้วยตัวมันเอง จึงต้องทำการออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์พัฒนาขั้นตอนการออกแบบอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการออกแบบขั้นตอนที่กล่าวมาอาจยังไม่สามารถพิจารณาฟอลต์ได้ในทุกลักษณะ ดังนั้นจึงมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจ เพื่อลดความยุ่งยากในส่วนของการออกแบบการวิเคราะห์ด้วยการแปลงเวฟเล็ดออกไป ซึ่งหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการแปลงเวฟเล็ดและโครงข่ายประสาทเทียม

5.3 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

การฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์จะใช้ Neural Network Toolbox [16] ของโปรแกรม MATLAB ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งองค์ประกอบหลักในการเรียนรู้และการประมวลผล โปรแกรม MATLAB ได้ทำการกำหนดไว้แล้ว แต่ผู้ฝึกสอนจะเป็นผู้นำมาใช้งานเอง เช่น การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและไบอัส (Weights, Bias), ฟังก์ชันถ่ายโอน

(Transfer function), เทคนิคการฝึกสอนของโครงข่ายเป็นต้น ยกเว้นแต่กลุ่มของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต และจำนวนของชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ผู้ฝึกสอนจะเป็นผู้กำหนดขึ้นเอง

การเลือกข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย ซึ่งข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตจะต้องมีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ฝึกสอนแล้วยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายด้วย แนวความคิดในการเลือกข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมได้มาจากการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถตรวจจับได้ด้วยการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วย โดยใช้ข้อมูลในสเกลที่ 1 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากข้อมูลในสเกลที่ 1 สามารถให้ความถูกต้องมากกว่าสเกลอื่น ๆ โดยเฉพาะค่าเวลาที่ตรวจจับได้

ลักษณะของพอลต์แต่ละประเภทจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยทำการแบ่งชุดข้อมูลอินพุตได้ดังนี้

- ประเภทของพอลต์ 10 ประเภท ได้แก่ AG, BG, CG, ABG, BCG, CAG, AB, BC, CA และ ABC
- ตำแหน่งที่เกิดพอลต์ 10%-90% ของระยะทางทั้งหมด (ช่วงละ 10%)
- มุมที่เริ่มเกิดพอลต์ 0° - 330° เมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันที่เฟส A (ช่วงละ 30°)
- เกิดพอลต์ขึ้นทั้ง 2 วงจร

รวมเป็นจำนวนทั้งหมด 2160 ชุด ซึ่งแบ่งเป็นชุดข้อมูลฝึกสอน(Training pattern) 1080 ชุด, ชุดข้อมูลทดสอบ (Test pattern) 540 ชุด และชุดที่ใช้ในการทดสอบ (Unseen pattern) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับชุดฝึกสอนและทดสอบจำนวน 540 ชุด

5.3.1 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (BP)

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะประกอบไปด้วย ชั้นอินพุต (Input Layer), ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และ ชั้นเอาต์พุต (Output Layer) ซึ่งชั้นซ่อนจะเป็นชั้นที่เพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายและจำนวนของชั้นซ่อนสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้นขึ้นไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดชั้นซ่อนจำนวน 2 ชั้นให้กับโครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วยังสามารถแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนได้ดีกว่าจำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น ดังรูปที่ 5.15

$$O/P_{ANN} = f^3(LW^{3,2} * f^2(LW^{2,1} * f^1(IW^{1,1} * p + b^1) + b^2) + b^3) \quad (5.3)$$

โดยที่ $IW^{1,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นของมูลอินพุตกับชั้นซ่อนที่ 1

$LW^{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 1 กับชั้นซ่อนที่ 2

$LW^{3,2}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนที่ 2 กับชั้นเอาต์พุต

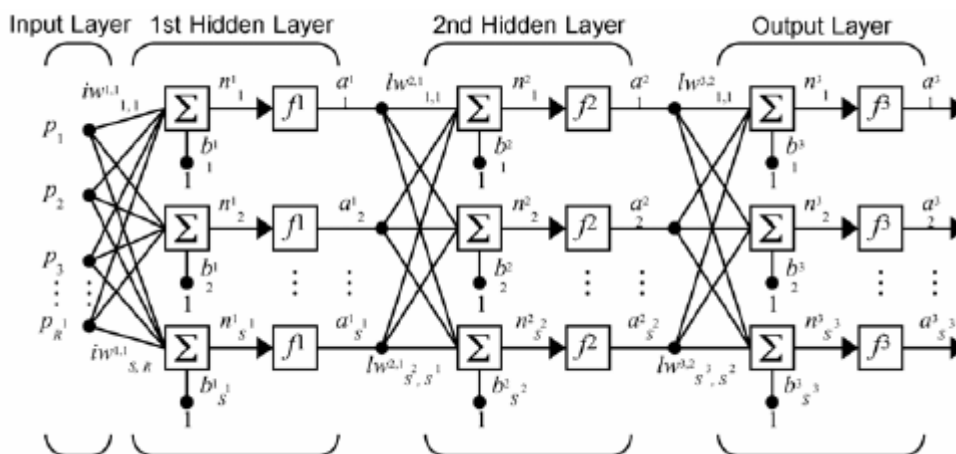
b^1, b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2

b^3 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

f^1, f^2 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดแทนเจนต์ซิกมอยด์ (tan – sigmoid)

f^3 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

$P = [P_1, P_2, \dots, P_R]$ คือ เวกเตอร์อินพุตของโครงข่าย



รูปที่ 5.15 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน [16]

โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) ของชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) ได้แสดงในสมการที่ 5.4

$$MAPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{O/P_{ANNi} - O/P_{TARGETi}}{O/P_{TARGETi}} \right| * 100\% \quad (5.4)$$

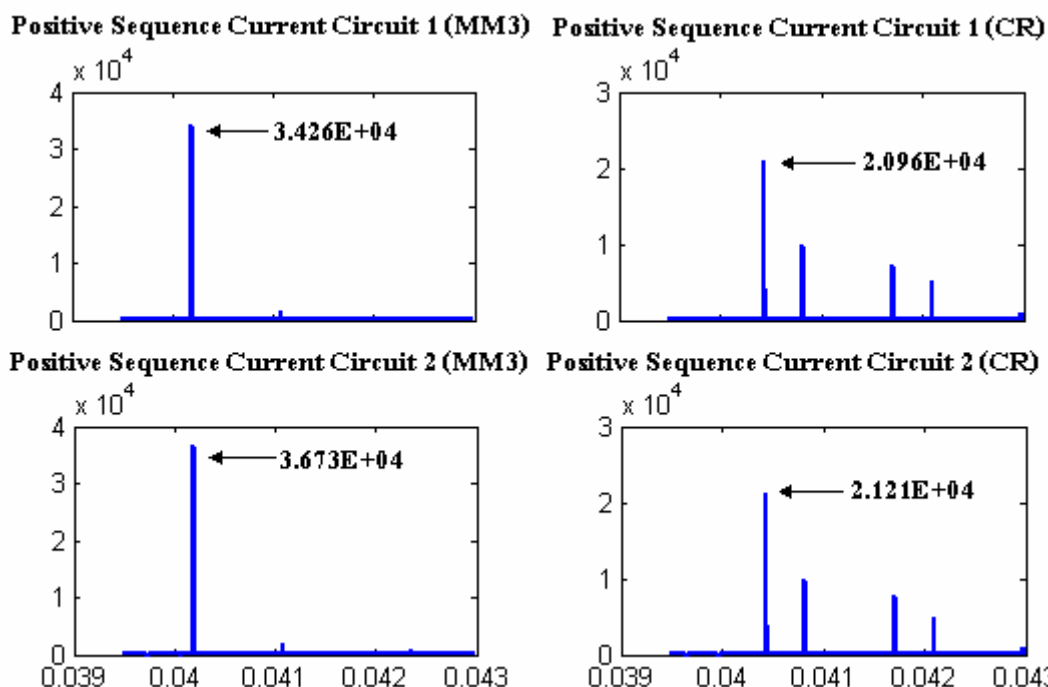
โดยที่ O/P_{ANN} คือ เอาต์พุตที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม

O/P_{TARGET} คือ เอาต์พุตที่เป็นคำตอบที่ต้องการ

n คือ จำนวนชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ (1080 และ 540 ชุด)

5.3.1.1 การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทของกระแสประกอบลำดับบวกที่วัดได้จากปลายสายส่งด้านส่ง (MM3) ทั้ง 2 วงจร

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยโครงข่ายที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 มี 2 และ 1 นิวรอน ตามลำดับ และชั้นเอาต์พุตมี 2 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรคู่โดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าเอาต์พุตในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ของโครงข่ายประสาทเทียม

วงจรที่เกิดฟอลต์	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2
เกิดฟอลต์วงจรที่ 1	1	0
เกิดฟอลต์วงจรที่ 2	0	1

จากนั้นทำการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เป็นชนิด Tan-Sigmoid และเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นเอาต์พุตเป็นชนิด Linear หลังจากนั้นทำการจัดระเบียบข้อมูล (Normalization) ก่อนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยเริ่มจากการสุ่มค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส (Random initial weight and biases) โดยทำการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับด้วยวิธี Levenberg-Marquardt Algorithm [15] แล้วทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) กระบวนการทั้งหมดจะกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนแรกเป็นจำนวน 20,000 ครั้ง (iteration) เพื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดข้อมูลทดสอบที่ดีที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 เพิ่มขึ้นทีละ 1 นิวรอน เป็นจำนวน 15 นิวรอน เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้วหยุดการฝึกสอน

หลังจากทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเสร็จสิ้น จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพสูงสุด มาทดสอบกับข้อมูลทดสอบที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen) (เป็นชุดทดสอบที่ไม่เกี่ยวข้องกับชุดฝึกสอนและทดสอบก่อนหน้านี้) โดยจะป้อนให้เพียงค่าอินพุตเพียงอย่างเดียวและพิจารณาคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมว่าใกล้เคียงกับเอาต์พุตเป้าหมายหรือไม่ (ผลการทดสอบได้แสดงในบทถัดไป) โดยกระบวนการฝึกสอนและทดสอบดังกล่าวจะใช้กับการระบุตำแหน่งฟอลต์และการระบุประเภทฟอลต์ในหัวข้อถัดไป ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดทดสอบและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

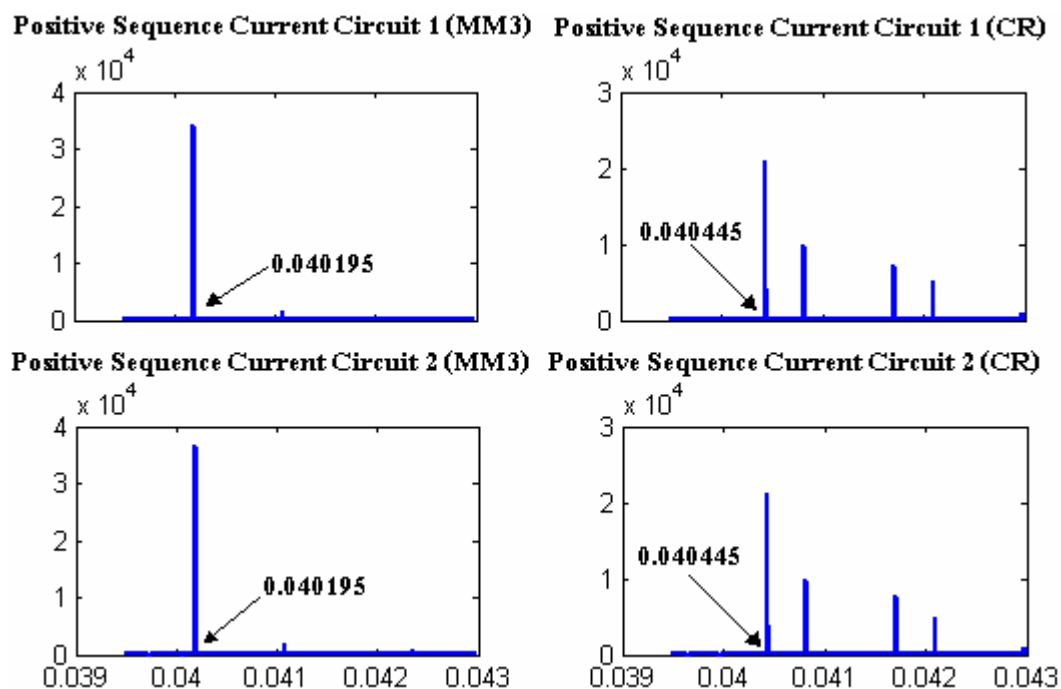
Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2							
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8
Detection	MAPE of Test	0.567	6.256	0.555	6.259	6.281	6.258	6.274	6.315
	Training time (minute)	3.58	6.32	8.41	10.54	13.59	18.01	22.11	26.17

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2						
		10-9	11-10	12-11	13-12	14-13	15-14	16-15
Detection	MAPE of Test	6.497	6.374	6.387	6.399	6.553	6.455	6.362
	Training time (minute)	31.42	37.57	45.03	65.22	62.46	81.13	87.25

5.3.1.2 การหาตำแหน่งฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้เวลาที่สามารถตรวจจับได้ของฟีดแบ็กที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเต็มหน่วยของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านเพียงสายส่งเดียว เนื่องจากเวลาที่ตรวจจับได้ของสายส่งทั้ง 2 วงจรมีค่าเท่ากัน ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงเวลาที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็ทของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกที่วัดได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้าน ทั้ง 2 วงจร

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 มี 2 และ 1 นิวรอน ตามลำดับ และชั้นเอาต์พุตมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 โดยมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรคู่ ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดทดสอบและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

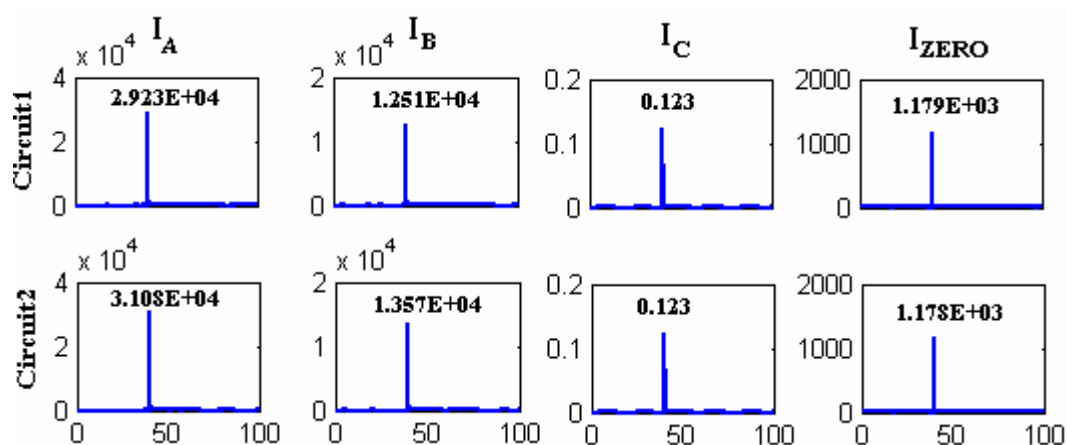
Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2							
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8
Location	MAPE of Test	0.0851	0.0045	0.0038	0.0065	0.0039	0.0134	0.0068	0.0047
	Training time (minute)	3.42	4.26	3.04	4.06	2.59	3.15	3.20	2.42

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2						
		10-9	11-10	12-11	13-12	14-13	15-14	16-15
Location	MAPE of Test	0.0199	0.0101	0.0105	0.0075	0.0191	0.0623	0.0486
	Training time (minute)	3.06	3.09	1.53	1.44	3.03	0.57	1.56

5.3.1.3 การระบุประเภทฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุประเภทฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกที่ตรวจจ้งฟอลต์ได้ของกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง 1/4 ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ของทั้ง 2 วงจรทางด้านปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตของกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับ ศูนย์ที่วัดได้จากปลายสายส่งด้านส่ง (MM3) ทั้ง 2 วงจร

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 8 นิวรอน, ชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 มี 2 และ 1 นิวรอน ตามลำดับ และชั้นเอาต์พุตมี 4 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับเฟสที่เกิดฟอลต์ในระบบ สายส่งวงจรคู่โดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.7 ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าเอาต์พุตในการระบุประเภทฟอลต์ของโครงข่ายประสาทเทียม

ประเภทของฟอลต์	A	B	C	G
ฟอลต์เฟส A ลงดิน	1	0	0	1
ฟอลต์เฟส A,B ลงดิน	1	1	0	1
ฟอลต์ระหว่างเฟส A,B	1	1	0	0
ฟอลต์ 3 เฟส	1	1	1	0

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยผิดพลาดสัมบูรณ์ของชุดทดสอบและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอน

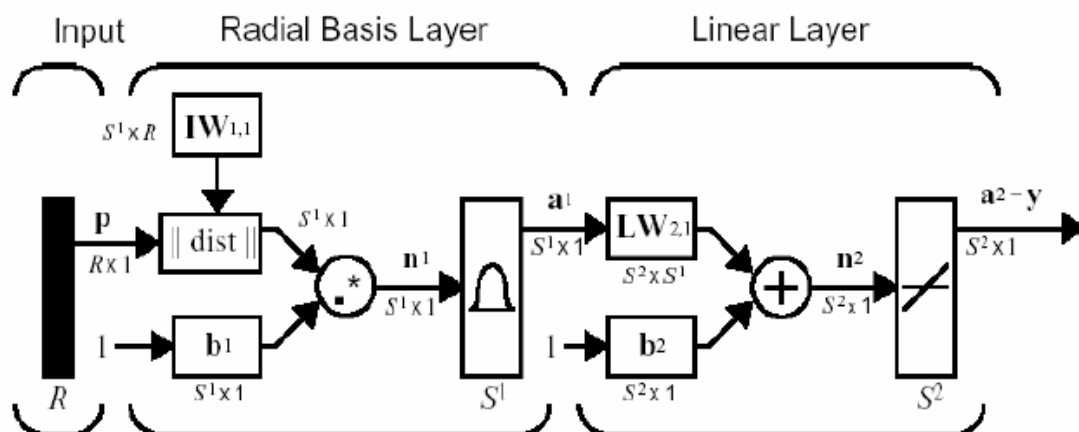
Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2						
		2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7
Classification	MAPE of Test	14.295	6.258	7.488	1.049	5.409	5.525	8.851
	Training time (minute)	10.46	18.04	28.30	32.44	41.52	52.13	76.17

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

Protection	ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2					
		9-8	10-9	11-10	12-11	13-12	14-13
Classification	MAPE of Test	5.985	8.573	13.206	9.020	7.555	9.058
	Training time (minute)	82.11	104.34	120.19	159.12	200.58	234.13

5.3.2 การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (RBF)

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี (Radial basis function : RBF) ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.17 เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้จากสมการที่ 5.5



รูปที่ 5.17 แบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี [15]

เอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาได้ดังนี้

$$O/P_{ANN} = f^3 \left(LW_{2,1} * \exp \left(\frac{\|P - W_j\|^2}{\sigma_j^2} \right) + b^2 \right) \quad (5.5)$$

โดยที่

W_j คือ เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน

σ_j คือ ค่ากระจายค่าคงที่ (ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าไบแอส $b = \frac{0.8326}{Spread}$) ในชั้นซ่อน

f^3 คือ ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น (linear)

$LW_{2,1}$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต

b^2 คือ ค่าไบแอสในชั้นเอาต์พุต

$P = [P_1, P_2, \dots, P_R]$ คือ เวกเตอร์อินพุตของโครงข่าย

5.3.2.1 การระบุวงจรที่เกิดฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ที่ตรวจจับได้จากการแปลงเวฟเล็ดแบบเต็มหน่วยของกระแส

องค์ประกอบลำดับบวกในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ซึ่งเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการเรียนรู้ OLS (orthogonal least squares : OLS) [23] และชั้นเอาต์พุตมี 2 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับการระบุวงจรที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจรคู่โดยมีความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่วงจรนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.5

จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมี โดยโครงข่ายชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนชนิดฐานรัศมี (radial basis) จากนั้นคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธี ยูคลิดเดียนดิสแตนซ์ (Euclidean distance weight function : dist) และทำการคำนวณอินพุตของโครงข่ายด้วยวิธี ผลคูณ (Product net input function : netprod) ส่วนชั้นเอาต์พุตจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดเชิงเส้น (Linear) จากนั้นคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธี คอทโปรดัค (Dot product weight function : dotprod) และทำการคำนวณอินพุตของโครงข่ายด้วยวิธี ผลบวก (Sum net input function : netsum) ซึ่งทั้งสองชั้นจะมีค่าไบแอส $\left(b = \frac{0.8326}{Spread}\right)$ ซึ่งค่าไบแอสนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระจาย (Spread) จากนั้นทำการกำหนดค่ากระจายคงที่เริ่มต้นเท่ากับ 1.40 และจำนวนนิวรอนสูงสุดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 นิวรอน เมื่อคำนวณครบหนึ่งรอบการฝึกสอนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนครั้งที่คำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ ขบวนการทั้งหมดนี้จะทำซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 2.40 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือจนกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

Protection	ค่า Spread ที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า Spread ที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบ	ค่า Spread ที่ดีที่สุด	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในรอบที่ดีที่สุด (วินาที)	ค่า MAPE ของชุดทดสอบที่ดีที่สุด
Detection	1.40 ถึง 2.40	0.01	1.59	46	23.1581

5.3.2.2 การหาตำแหน่งฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้เวลาที่สามารถตรวจจับได้ของฟิสิกส์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยของกระแสองค์ประกอบลำดับบวกในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ที่ได้จากปลายสายส่งทั้ง 2 ด้านเพียงสายส่งเดียว เนื่องจากเวลาที่ตรวจจับได้ของสายส่งทั้ง 2 วงจรมีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 2 นิวรอน, ชั้นซ่อนจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการเรียนรู้ OLS (orthogonal least squares : OLS) และชั้นเอาต์พุตมี 1 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 โดยมีค่าสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจร จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีโดยทำการกำหนดค่ากระจายคงที่เริ่มต้นเท่ากับ 0.01 และจำนวนนิวรอนสูงสุดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 นิวรอน เมื่อคำนวณครบหนึ่งรอบการฝึกสอนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนครั้งที่คำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ ขบวนการทั้งหมดนี้จะทำซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 0.10 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือจนกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

Protection	ค่า Spread ที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า Spread ที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบ	ค่า Spread ที่ดีที่สุด	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในรอบที่ดีที่สุด (วินาที)	ค่า MAPE ของชุดทดสอบที่ดีที่สุด
Location	0.01 ถึง 0.10	0.01	0.07	13	5.4293E-14

5.3.2.3 การระบุประเภทฟอลต์

การเลือกข้อมูลที่ใช้ในการระบุประเภทฟอลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกใช้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์จากการแปลงเวฟเล็ตในสเกลแรกที่ตรวจจับฟอลต์ได้ของกระแสในเฟส A, B, C และองค์ประกอบลำดับศูนย์ในช่วง $1/4$ ไซเคิลหลังเกิดฟอลต์ ของทั้ง 2 วงจรทางด้านปลายสายส่งด้านส่งเพียงด้านเดียว ซึ่งเป็นชุดเดียวกับที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบกับ

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิด โดยโครงสร้างที่ใช้ในการฝึกสอนจะประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นอินพุตมี 8 นิวรอน, ชั้นซ่อนจะถูกกำหนดด้วยกระบวนการเรียนรู้ OLS (orthogonal least squares : OLS) และชั้นเอาต์พุตมี 4 นิวรอน ซึ่งค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีค่าสัมพันธ์กับเฟสที่เกิดฟอลต์ในระบบสายส่งวงจร โดยมี ความหมายว่า ถ้าคำตอบมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ถ้าคำตอบมีค่าน้อยกว่า 0.5 แสดงว่าไม่เกิดฟอลต์ที่เฟสนั้น ดังแสดงตัวอย่างเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมไว้ในตารางที่ 5.7 จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดฟังก์ชันฐานรัศมีโดยทำการกำหนดค่ากระจายคงที่เริ่มต้นเท่ากับ 0.01 และจำนวนนิวรอนสูงสุดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 นิวรอน เมื่อคำนวณครบหนึ่งรอบการฝึกสอนจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนจะถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนครั้งที่คำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ ขบวนการทั้งหมดนี้จะทำซ้ำจนกระทั่งค่าผิดพลาดเป้าหมายเท่ากับ 0 จากนั้นทำการเพิ่มค่ากระจายคงที่ในชั้นซ่อนที่ 1 โดยเพิ่มครั้งละ 0.01 จนถึง 0.50 เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหรือจนกว่าค่าผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์เท่ากับ 0 แล้วหยุดการฝึกสอน ผลการฝึกสอนและเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนได้แสดงในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในแต่ละรอบ

Protection	ค่า Spread ที่ใช้ในการทดสอบ	ค่า Spread ที่เพิ่มขึ้นแต่ละรอบ	ค่า Spread ที่ดีที่สุด	เวลาที่ใช้ในการฝึกสอนในรอบที่ดีที่สุด (วินาที)	ค่า MAPE ของชุดทดสอบที่ดีที่สุด
Type	0.01 ถึง 0.50	0.01	0.32	50	26.7092