

การศึกษาแนวทางการระบุชนิดของฟอลต์ ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ และฟอลต์อิมพีแดนซ์
โดยใช้ข้อมูลรูปแบบสัญญาณคลื่น ด้วยตรรกะแบบฟัซซี่ และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น
กรณีศึกษาช่วงสายส่งสถานีไฟฟ้าปาย – สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน

นายธนภัทร์ มุทานนท์

กองควบคุมการจ่ายไฟ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค thanapat.mut@pea.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอแนวทางการนำข้อมูลรูปแบบสัญญาณคลื่นจาก Disturbance Record เช่น Digital Fault Recorder (DFR) มาใช้ในการระบุชนิดของฟอลต์ ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ รวมถึงการหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ โดยศึกษาช่วงสายส่งสถานีไฟฟ้าปาย – สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน ด้วยการจำลองการเกิดฟอลต์ในรูปแบบต่าง ๆ ผ่านโปรแกรม DigSILENT และเก็บข้อมูลเพื่อนำมาสร้างเป็น Model ด้วยวิธีการใช้ตรรกะแบบฟัซซี่ และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผลการศึกษาพบว่า การใช้ตรรกะแบบฟัซซี่ สามารถระบุชนิดของฟอลต์ได้อย่างแม่นยำ และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นสามารถระบุตำแหน่งเกิดฟอลต์ได้ในกรณีที่ค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ รวมถึงสามารถคำนวณหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ได้ ในกรณีที่รู้ค่าของแรงดัน, กระแสไฟฟ้า และมุมของกระแส แต่ทั้งนี้วิธีการตรรกะแบบฟัซซี่ และการถดถอยเชิงเส้นเป็นวิธีการทางสถิติ และตัวอย่างที่นำมาสร้าง Model เป็นเพียงตัวอย่างจากการจำลองในโปรแกรมเท่านั้น หากในอนาคตมีข้อมูลจาก Disturbance Record มากพอก็จะสามารถนำมาปรับปรุงรูปแบบของ Model ให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นได้

คำสำคัญ : Digital Fault Recorder, ตรรกะฟัซซี่, การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น, ฟอลต์อิมพีแดนซ์

1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ส่วนใหญ่เป็นระบบแบบเรเดียล (Radial) เมื่อเกิดความผิดปกติหรือกระแสลัดวงจรในระบบจึงเป็นการยากในการค้นหาตำแหน่งของกระแสลัดวงจรเพื่อกำจัดออกจากระบบ ทำให้ระยะเวลาไฟฟ้าดับในแต่ละครั้งเกิดขึ้นเป็นเวลานาน กฟผ. จึงได้มีการศึกษาหาเครื่องมือ เทคโนโลยี และวิธีการต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยนำเครื่องบันทึกความผิดปกติแบบดิจิทัล (Digital Fault Recorder : DFR) มาใช้งาน โดยอุปกรณ์ DFR จะทำหน้าที่ตรวจจับและบันทึกสัญญาณรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้า

เมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า นอกจากนั้นแล้วเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ติดตั้ง และใช้งานในระบบไฟฟ้าของ กฟผ. เช่น รีเลย์ป้องกัน (Protection Relay) บางผลิตภัณฑ์ และบางรุ่น ที่ติดตั้งใช้งานในสถานีไฟฟ้าต่าง ๆ ทั้งในระบบ 115 kV และ 22 kV นั้น ก็สามารถบันทึกข้อมูลสัญญาณรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า รวมถึงสัญญาณดิจิทัลต่าง ๆ ในขณะที่เกิดเหตุการณ์การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าได้เช่นกัน แต่ความละเอียดของข้อมูลจะด้อยกว่าอุปกรณ์ DFR ซึ่งข้อมูลที่บันทึกได้ทั้งจากอุปกรณ์ DFR และจากรีเลย์ป้องกันนั้น สามารถนำมาวิเคราะห์ เก็บสถิติ และประยุกต์ใช้งานในด้านการจัดการปัญหาไฟฟ้าขัดข้องในระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ได้

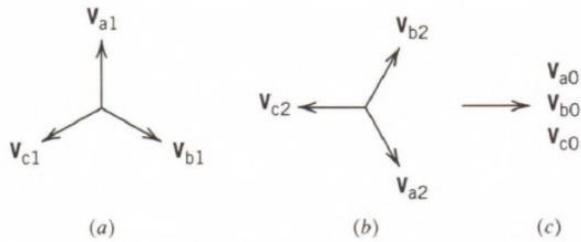
โดยในบทความนี้ จะนำเสนอแนวทางการนำข้อมูลรูปแบบสัญญาณคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ DFR และรีเลย์ป้องกันมาใช้ในการระบุชนิดของฟอลต์ (Fault Type), ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ (Fault Location) รวมถึงค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Fault Impedance)

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component)

ในระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส ส่วนประกอบสมมาตรเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอลต์ในระบบสายส่ง ประกอบด้วย 1) ส่วนประกอบลำดับบวก, 2) ส่วนประกอบลำดับลบ และ 3) ส่วนประกอบลำดับศูนย์ ตามรูปที่ 1 โดยการนำเฟสเซอร์สามเฟสสมมูลที่มีเฟสลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของแต่ละเฟสมารวมกันจะได้เฟสเซอร์ของแต่ละเฟสดังสมการ

$$\begin{aligned} V_a &= V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \\ V_b &= V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \\ V_c &= V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \end{aligned} \quad (1)$$



รูปที่ 1 (a) ส่วนประกอบลำดับบวก, (b) ส่วนประกอบลำดับลบ และ (c) ส่วนประกอบลำดับศูนย์

โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลกับองค์ประกอบสมมาตรโดยใช้เฟสเอเป็นเฟสอ้างอิง ซึ่งกำหนดให้ตัวปฏิบัติการ (Operator, a) มีค่า $a = 1\angle 120^\circ$ และความสัมพันธ์ขององค์ประกอบลำดับบวก ลบ และศูนย์ เมื่อเทียบกับเฟสเอจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} V_b^{(0)} &= V_a^{(0)}; V_c^{(0)} = V_a^{(0)} \\ V_b^{(1)} &= a^2 V_a^{(1)}; V_c^{(1)} = a V_a^{(1)} \\ V_b^{(2)} &= a V_a^{(2)}; V_c^{(2)} = a^2 V_a^{(2)} \end{aligned} \quad (2)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสของระบบเดิม และองค์ประกอบลำดับบวก ลบ ศูนย์ ในสมการที่ (2) นำไปแทนลงในสมการที่ (1) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

ซึ่งการคำนวณหากระแสไม่สมดุลจะสามารถใช้ความสัมพันธ์ของกระแสลำดับบวก ลบ ศูนย์ เช่นเดียวกับแรงดัน โดยกระแสเฟส abc สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault)

ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เฟส ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) จะเป็นการลัดวงจรชนิด 3 เฟส (3 – Phase Fault) หรือลัดวงจร 3 เฟสลงกราวด์ (3 – Phase Fault to Ground) โดยการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันตก และกระแสฟอลต์นั้นจะใช้เพียงแค่องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence) เท่านั้น โดยมีวงจรสมมูลเทวินิน (Thavenin equivalent circuit) ตามรูปที่ 2 และสมการเพื่อหาค่ากระแสฟอลต์ดังนี้

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (5)$$

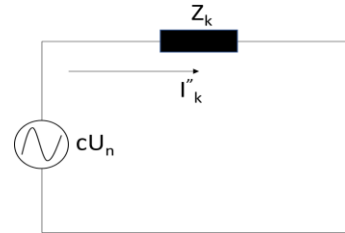
โดยที่ I_k'' คือ กระแสฟอลต์ 3 เฟส

c คือ Voltage Factor (ในระบบ 115 kV , $c = 1.1$)

U_n คือ แหล่งจ่ายไฟสมมูล

R_k คือ ผลรวมของความต้านทานที่ต่ออนุกรม

X_k คือ ผลรวมของรีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรม



รูปที่ 2 วงจรสมมูลเทวินิน (Thavenin equivalent circuit) ของการลัดวงจรชนิด 3 เฟส (3 – Phase Fault)

2.3 ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault)

ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบ 3 เฟส ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) จะเป็นการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงกราวด์ (Single Phase to Ground), ลัดวงจรชนิด 2 เฟสลงกราวด์ (Double Phase to Ground) และลัดวงจรชนิดเฟส - เฟส (Phase – Phase Fault) โดยการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันตก และกระแสฟอลต์นั้นจะใช้ทั้ง องค์ประกอบลำดับบวก (Positive Sequence), องค์ประกอบลำดับลบ (Negative Sequence) และองค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence)

ในบทความนี้จะพูดถึงแค่การคำนวณการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงกราวด์ (Single Phase to Ground) เท่านั้น โดยมีวงจรสมมูลเทวินิน (Thavenin equivalent circuit) ตามรูปที่ 3 และสมการเพื่อหาค่ากระแสฟอลต์ดังนี้

$$I_k'' = 3I_a^{(0)} \quad (6.1)$$

$$I_a^{(0)} = I_a^{(1)} = I_a^{(2)} \quad (6.2)$$

$$I_a^{(0)} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}(Z^{(1)} + Z^{(2)} + Z^{(0)} + 3Z_F)} \quad (6.3)$$

โดยที่ I_k'' คือ กระแสฟอลต์

$I_a^{(0)}$ คือ กระแสฟอลต์เฟส a วงจรลำดับศูนย์

$I_a^{(1)}$ คือ กระแสฟอลต์เฟส a วงจรลำดับบวก

$I_a^{(2)}$ คือ กระแสฟอลต์เฟส a วงจรลำดับลบ

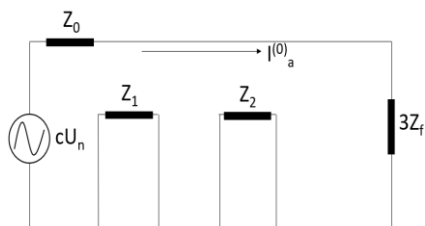
c คือ Voltage Factor (ในระบบ 115 kV , $c = 1.1$)

U_n คือ แหล่งจ่ายไฟสมมูล

$Z^{(0)}$ คือ อิมพีแดนซ์สมมูลวงจรลำดับศูนย์

$Z^{(1)}$ คือ อิมพีแดนซ์สมมูลวงจรลำดับบวก

$Z^{(2)}$ คือ อิมพีแดนซ์สมมูลวงจรลำดับลบ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลเทวินิน (Thavenin equivalent circuit) ของการลัดวงจรชนิด 1 เฟสลงกราวด์ (Single Phase to Ground Fault)

2.4 ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic)

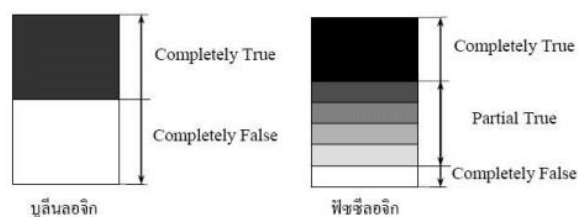
ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4 โดยมีขั้นตอนประมวลผล 4 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซีโดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละการอินพุต (Input) และความสำคัญต่อการเอาต์พุต (Output) ที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญเพื่อให้เป็นฟัซซีการอินพุต

- ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผลอาจจะสร้างการเก็บข้อมูลการคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม

- ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุตโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล

- ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซีโดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นเอาต์พุต และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์เช่น วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบในสถานการณ์นั้น ๆ



รูปที่ 4 ตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) และตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy logic)

2.5 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression)

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งได้แก่ตัว ประมาณการ (Predictor, X) และตัวตอบสนอง (Response, y) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear) ทั้งนี้ในขั้นตอนการทำ Regression ต้องมีการเก็บจำนวน Sample space จำนวนมากพอ นั่นคือ มี x และ y ที่มีความสัมพันธ์กันหลายๆ ครั้ง เพื่อนำมาหาสมการความสัมพันธ์อย่างไ้ก็ตาม การ Regression อาจมีค่าคลาดเคลื่อนได้ และเมื่อมีค่าประมาณการ (Predictor) มีมากกว่า 1 ตัว จะเรียกว่า Multiple Linear Regression โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i \quad (7)$$

โดยที่ β_0 คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าประมาณการที่ X_i

2.6 ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

เป็นสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 การคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) มีหลายชนิด เช่น

- การวิเคราะห์โดยใช้พารามเมตริก (Parametric procedure) ใช้สำหรับตัวแปรที่มีระดับการวัดอันดับ (Interval scale) หรืออัตราส่วน (Ratio scale)

- การวิเคราะห์แบบไม่ใช้พารามเมตริก (Nonparametric procedure) ใช้สำหรับตัวแปรที่มีระดับการวัดมาตฐานามบัญญัติ (Nominal scale) หรือมาตราเรียงอันดับ (Ordinal scale)

ซึ่งการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้น สามารถดูทิศทางของความสัมพันธ์ได้ 3 รูปแบบคือ

- สหสัมพันธ์ทางบวก (Positive Correlation) หมายถึง เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงอีกตัวแปรหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย

- สหสัมพันธ์ทางลบ (Negative Correlation) หมายถึง เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกตัวแปรหนึ่งจะมีค่าเพิ่มหรือลดลงตรงกันข้ามเสมอ

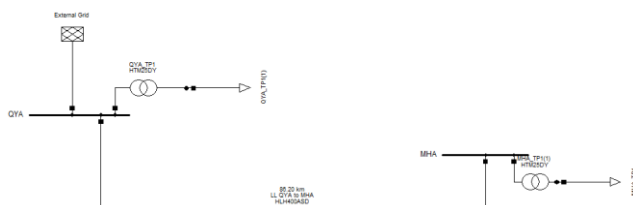
- สหสัมพันธ์เป็นศูนย์ (No Correlation) หมายถึงตัวแปรสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

3. กรณีศึกษา

บทความนี้เลือกใช้ช่วงสายส่งสถานีไฟฟ้าสาย - สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน ระยะทางประมาณ 86.2 กม. ซึ่งเป็นระยะทางที่ยาวที่สุดของสายส่งระหว่างสถานีไฟฟ้าในระบบ 115 kV ของ กฟผ. รายละเอียดของวงจรแสดงได้ตามรูปที่ 5 โดยทำการ Model และ Simulate ผ่านโปรแกรม DigSILENT ซึ่งสามารถแบ่งกรณีได้ดังนี้

1. Simulate 3 Phase Fault ในสายส่งช่วงสถานีไฟฟ้าสาย - สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน โดยกำหนดให้ $Z_f = 0$
2. Simulate Single Phase to Ground Fault ในสายส่งช่วงสถานีไฟฟ้าสาย - สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน โดยกำหนดให้ $Z_f = 0$
3. Simulate Phase to Phase Fault ในสายส่งช่วงสถานีไฟฟ้าสาย - สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน โดยกำหนดให้ $Z_f = 0$
4. Simulate Phase to Phase to Ground Fault ในสายส่งช่วงสถานีไฟฟ้าสาย - สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน โดยกำหนดให้ $Z_f = 0$

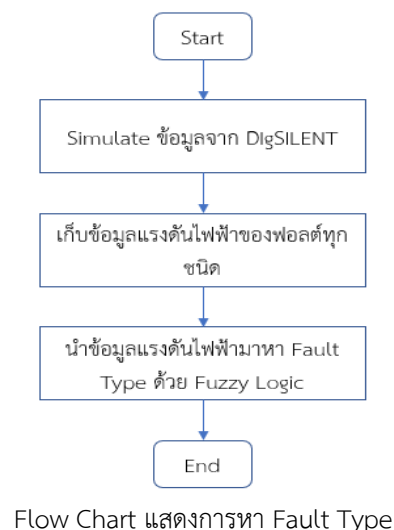
โดยในแต่ละกรณีศึกษาจะทำการเก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ เช่น ค่าแรงดันทุกเฟส, กระแสไฟฟ้าทุกเฟส, มุมแรงดันระหว่างเฟส, มุมกระแสระหว่างเฟส และมุมระหว่างแรงดันและกระแสในแต่ละเฟส เพื่อเป็น Input ในการระบุชนิดของฟอลต์ (Fault Type), ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ (Fault Location)



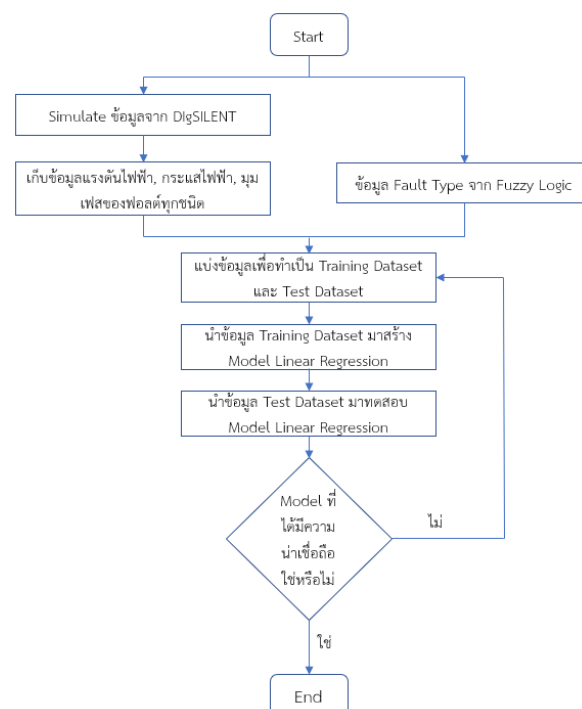
รูปที่ 5 วงจรสายส่งช่วงสถานีไฟฟ้าสาย - สถานีไฟฟ้าแม่ฮ่องสอน

สำหรับการระบุตำแหน่งในการเกิดฟอลต์ (Fault Location) และค่าฟอลต์อินพีแดนซ์ (Fault Impedance) นั้น จะทำการศึกษาเฉพาะฟอลต์ชนิด 1 เฟสลงกราวด์ (Single Phase to Ground) และฟอลต์ชนิด 3 เฟส (3 - Phase Fault) เนื่องจากเป็นชนิดของฟอลต์ที่เกิดบ่อยที่สุด และเป็นฟอลต์ที่เกิดแล้วรุนแรงที่สุดตามลำดับ

โดยในการศึกษาจะใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DigSILENT คำนวณค่ากระแส และแรงดัน เพื่อนำมาใช้ในการหาตำแหน่งในการเกิดฟอลต์ (Fault Location) และค่าฟอลต์อินพีแดนซ์ (Fault Impedance) โดยค่าฟอลต์อินพีแดนซ์ (Fault Impedance) นั้นในที่นี้จะกำหนดให้มีเฉพาะแค่ค่า Real part (Resistance) เท่านั้น เนื่องจาก สาเหตุของการเกิดฟอลต์ส่วนใหญ่มาจากต้นไม้หรือสัตว์



Flow Chart แสดงการหา Fault Type

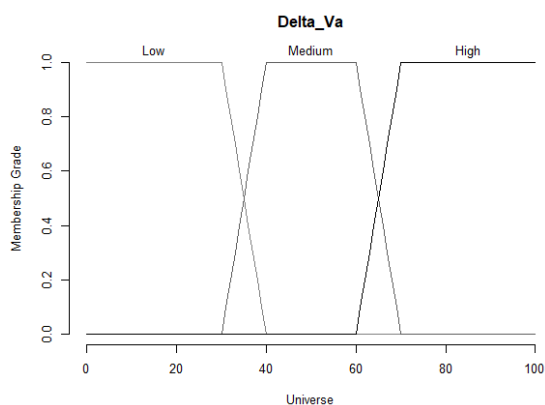


Flow Chart แสดงการหา Fault Location

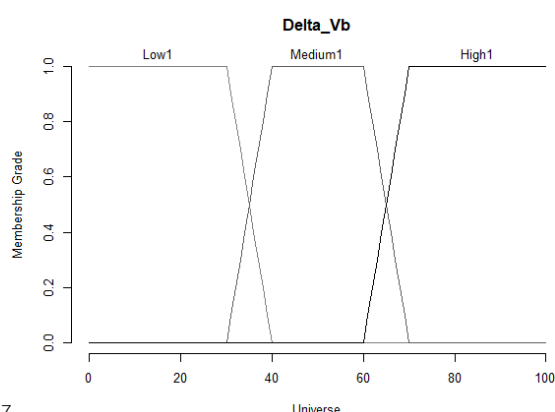
4. ผลการศึกษา

4.1 การระบุชนิดของฟอลต์ (Fault Type)

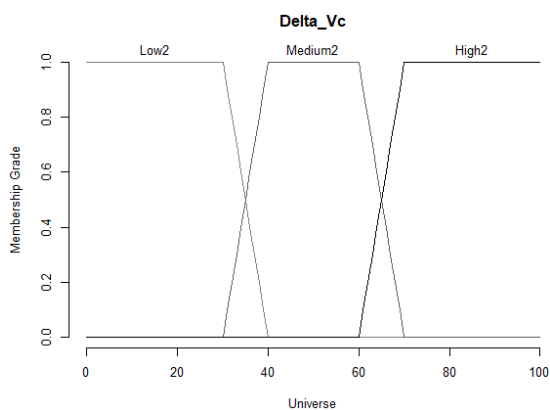
จากรูปที่ 6 – 8 แสดงถึงฟัซซีอินพุต โดยสร้างมาจากตัวแปรขนาดของแรงดันตกเมื่อเกิดฟอลต์ โดยกำหนดให้เซตของฟัซซีอินพุตในแต่ละตัวประกอบด้วยค่า Low, Medium และ High โดยอ้างอิงจากค่าความต่างระหว่างแรงดันช่วงก่อนเกิดฟอลต์ กับแรงดันตกขณะเกิดฟอลต์ (Delta_V) โดยรูปที่ 9 แสดงถึงฟัซซีเอ้าท์พุต ซึ่งเป็นเซตของชนิดของฟอลต์ต่างๆ



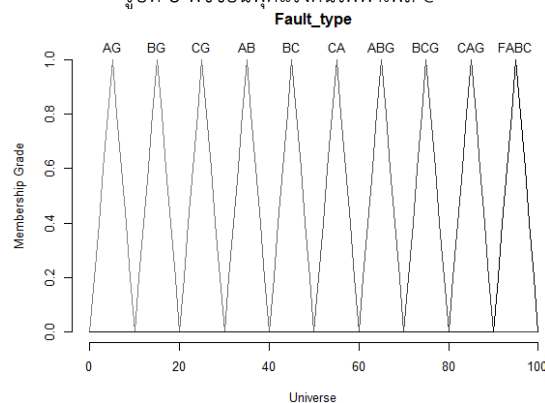
รูปที่ 6 ฟัซซีอินพุตแรงดันไฟฟ้าเฟส a



รูปที่ 7 ฟัซซีอินพุตแรงดันไฟฟ้าเฟส b



รูปที่ 8 ฟัซซีอินพุตแรงดันไฟฟ้าเฟส c



รูปที่ 9 ฟัซซีเอาต์พุตชนิดของฟอลต์ต่างๆ

โดยจะนำฟัซซีอินพุต และฟัซซีเอาต์พุตมาเพื่อกำหนดเป็น Inference Rules ดังนี้

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง Low แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 1 เฟสลงกราว์เฟส a

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง Low แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 1 เฟสลงกราว์เฟส b

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง High แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 1 เฟสลงกราว์เฟส c

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง Medium และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง Medium และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง Low แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น เฟส - เฟส (a-b)

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง Medium และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง Medium แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น เฟส - เฟส (b-c)

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง Medium และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง Medium แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น เฟส - เฟส (c-a)

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง Low แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 2 เฟสลงกราว์เฟส (a-b)

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง High แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 2 เฟสลงกราว์เฟส (b-c)

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง Low และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง High แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 2 เฟสลงกราว์เฟส (c-a)

-ถ้า Delta_V เฟส a อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส b อยู่ในช่วง High และ Delta_V เฟส c อยู่ในช่วง High แล้ว ชนิดของฟอลต์ เป็น 3 เฟส (3 - Phase Fault)

ชนิดของฟอลต์	ผลจากการรัน Fuzzy Logic
AG	AG
BG	BG
CG	CG
AB	AB
BC	BC
CA	CA
ABG	ABG
BCG	BCG
CAG	CAG
ABC	ABC

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบหา Fault Type ด้วยวิธีการ Fuzzy Logic

4.2 การระบุตำแหน่งการเกิดฟอลต์ (Fault Location)

จากตารางที่ 2 แสดงสมการ Multiple Linear Regression เพื่อหาตำแหน่งจุดเกิดฟอลต์ โดยเลือกมาจากสมการ Multiple Linear Regression ที่หาตำแหน่งจุดเกิดฟอลต์ได้ใกล้เคียงกับ DigSILENT มากที่สุดจาก 3 สมการดังนี้

- 1.สมการ Multiple Linear Regression โดยใช้ทุกตัวแปร X
- 2.สมการ Multiple Linear Regression โดยใช้ตัวแปร X ที่มีค่า Correlation สูงเมื่อเทียบกับตัวแปร Y เช่น Type AG ตัวแปร X_1, X_2, X_3, X_4, X_6 เป็นต้น
- 3.สมการ Multiple Linear Regression โดยใช้ตัวแปร X ที่มีค่า Significant สูงเมื่อเทียบกับตัวแปร Y เช่น Type AG ตัวแปร X_1, X_5, X_6 เป็นต้น

จากตารางที่ 3 ได้แสดงผลเปรียบเทียบระยะทางจากการ Simulate และระยะทางจากสมการ Multiple Linear Regression พบว่า ระยะทางที่ได้จากการ Simulate ในโปรแกรม DigSILENT มีความใกล้เคียงกับระยะทางที่ได้จากสมการ Multiple Linear Regression สำหรับฟอลต์ทุกชนิด ยกเว้นฟอลต์ชนิด 3 เฟส

Fault Type	สมการแสดงตำแหน่งเกิดฟอลต์โดย Multiple Linear Regression
AG	$Y = -2589.4188 - 17.1602X_1 - 3.3146X_2 - 18.5221X_3 + 3.6127X_4 + 54.2737X_6$
BG	$Y = -2616.644 - 17.0191X_1 - 19.3753X_2 - 3.5243X_3 + 54.7113X_4 + 3.8958X_5$
CG	$Y = -2616.644 - 3.5243X_1 - 17.0191X_2 - 19.3753X_3 + 54.7113X_5 + 3.8958X_6$
AB	$Y = -6478.364 + 5.252X_1 - 21.675X_2 - 2.557X_4 + 3.014X_5 - 17.213X_7 - 38.645X_8$
BC	$Y = -3447.629 + 53.505X_2 - 56.026X_3 + 2.611X_4 - 4.413X_5 + 29.921X_9$
CA	$Y = 6975.49973 - 9.78319X_1 - 37.10547X_5 - 12.24148X_7 + 11.33199X_8$
ABG	$Y = -2026.593 + 37.884X_1 + 69.297X_2 + 74.193X_3 - 14.181X_4 + 2.589X_5 - 92.792X_6 + 3.120X_7 - 32.611X_8$
BCG	$Y = 10836.463 + 74.193X_1 + 37.884X_2 + 69.297X_3 - 92.192X_4 - 14.181X_5 + 2.589X_6 + 3.120X_8 - 32.611X_9$
CAG	$Y = 9727.401 + 69.604X_1 + 73.938X_2 + 37.357X_3 + 2.496X_4 - 92.429X_5 - 14.066X_6 - 32.577X_7 + 3.042X_9$
ABC	$Y = 274.181453 - 1.879786X_1 - 0.072545X_4$

ตารางที่ 2 แสดงสมการ Multiple Linear Regression สำหรับหารหาตำแหน่งจุดเกิดฟอลต์ของ Fault Type ต่างๆ เมื่อ Y คือ ตำแหน่งจุดเกิดฟอลต์

X_1 คือ ความต่างระหว่างแรงดันช่วงก่อนเกิดฟอลต์ กับ แรงดันตกขณะเกิดฟอลต์ เฟส A

X_2 คือ ความต่างระหว่างแรงดันช่วงก่อนเกิดฟอลต์ กับ แรงดันตกขณะเกิดฟอลต์ เฟส B

X_3 คือ ความต่างระหว่างแรงดันช่วงก่อนเกิดฟอลต์ กับ แรงดันตกขณะเกิดฟอลต์ เฟส C

X_4 คือ ขนาดกระแสช่วงเกิดฟอลต์เฟส A (kA)

X_5 คือ ขนาดกระแสช่วงเกิดฟอลต์เฟส B (kA)

X_6 คือ ขนาดกระแสช่วงเกิดฟอลต์เฟส C (kA)

X_7 คือ ความต่างของมุมระหว่างแรงดันเฟส A และ B ช่วงเกิดฟอลต์

X_8 คือ ความต่างของมุมระหว่างแรงดันเฟส B และ C ช่วงเกิดฟอลต์

X_9 คือ ความต่างของมุมระหว่างแรงดันเฟส C และ A ช่วงเกิดฟอลต์

ชนิดของ ฟอลต์	ระยะทางห่างจากสถานีฯ (กม.)		% Error
	DigSILENT	Regression	
AG	6.034	6.013	0.348
AG	44.824	45.011	0.417
BG	37.928	37.941	0.034
BG	80.166	80.157	0.011
CG	52.582	52.564	0.034
CG	82.752	82.749	0.004
AB	45.686	45.282	0.884
AB	76.718	76.376	0.446
BC	43.962	43.767	0.444
BC	81.890	81.747	0.175
CA	22.412	22.408	0.018
CA	77.580	77.575	0.006
ABG	37.066	37.643	1.557
ABG	76.718	77.160	0.576
BCG	48.272	48.676	0.837
BCG	81.890	84.123	2.727
CAG	22.412	22.532	0.535
CAG	77.580	77.738	0.204
3P	39.652	42.021	5.974
3P	75.856	73.808	2.700

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบระยะทางจากการ Simulate และ ระยะทางจากสมการ Multiple Linear Regression

4.3 การหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Fault Impedance)

จากผลการคำนวณหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Fault Impedance) เมื่อกำหนดเป็น Fault ชนิด 3 เฟส พบว่าสามารถใช้ค่าแรงดัน ก่อนการเกิดฟอลต์ (Pre – fault Voltage) และกระแสฟอลต์ (Fault Current) มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ รวมถึงตำแหน่งในการเกิดฟอลต์ได้ตามสมการ (5) และ (6) เมื่อ กำหนดให้ $Z_f = R_f$ โดยค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ และตำแหน่งในการเกิดฟอลต์ ที่คำนวณได้ ใกล้เคียงกับที่กำหนดค่าใน DigSILENT โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 4

DigSILENT		Calculate		%Error	
ระยะทาง (กม.)	R_f (Ohm)	ระยะทาง (กม.)	R_f (Ohm)	ระยะทาง	R_f
27	58.5	26.728	58.421	1.007	0.135
35	58.5	35.041	58.511	0.117	0.019
62	58.5	61.848	58.472	0.245	0.048
18	71.9	17.887	71.860	0.628	0.056
43	71.9	42.856	71.851	0.335	0.068
71	71.9	70.844	71.855	0.220	0.063
9	103.8	9.142	103.878	1.578	0.075
54	103.8	54.014	103.785	0.026	0.014
80	103.8	79.910	103.746	0.113	0.052

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระยะทาง และฟอลต์อิมพีแดนซ์ที่ใส่ใน DigSILENT กับระยะทางและฟอลต์อิมพีแดนซ์จากการคำนวณเมื่อเกิด 3 เฟสฟอลต์

ทั้งนี้สำหรับ Fault ชนิด 1 เฟสลงกราวด์ พบว่า สามารถใช้ค่าแรงดันก่อนการเกิดฟอลต์ (Pre – fault Voltage) และกระแสฟอลต์ (Fault Current) มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ รวมถึงตำแหน่งในการเกิดฟอลต์ได้เช่นกัน โดยค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ มีความใกล้เคียงกับที่ Simulate ส่วนค่าระยะทางจะมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะคลาดเคลื่อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางจากสถานีฯ ถึงจุดเกิดฟอลต์ และค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ โดยระยะทางมากจะทำให้คลาดเคลื่อนมาก และค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์มาก จะทำให้คลาดเคลื่อนน้อย โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 5

DigSILENT		Calculate		%Error	
ระยะทาง (กม.)	R _f (Ohm)	ระยะทาง (กม.)	R _f (Ohm)	ระยะทาง	R _f
27	58.5	26.527	58.131	1.752	0.631
35	58.5	36.167	58.641	3.334	0.241
62	58.5	64.422	58.869	3.906	0.631
18	71.9	18.778	72.031	4.322	0.182
43	71.9	44.708	72.150	3.972	0.348
71	71.9	72.986	72.131	2.797	0.321
9	103.8	9.345	103.823	3.833	0.022
54	103.8	56.433	104.320	4.506	0.501
80	103.8	82.687	104.249	3.359	0.433

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบระยะทาง และฟอลต์อิมพีแดนซ์ที่ใส่ใน DigSILENT กับระยะทางและฟอลต์อิมพีแดนซ์จากการคำนวณ เมื่อเกิด 1 เฟสลงกราวด์

4.4 การเปรียบเทียบวิธีหาตำแหน่งการเกิดฟอลต์

จากการเปรียบเทียบวิธีหาตำแหน่งการเกิดฟอลต์โดยวิธี Regression และวิธี Calculate โดยเมื่อกำหนดให้ค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์เท่ากับ 0 นั้นพบว่า เมื่อเกิด Fault ชนิด Single Phase to Ground นั้น การระบุตำแหน่งการเกิดฟอลต์ด้วยวิธี Regression มีความแม่นยำกว่าวิธี Calculate แต่หากเกิดฟอลต์ ชนิด 3 เฟส การระบุตำแหน่งการเกิดฟอลต์ด้วยวิธี Calculate มีความแม่นยำกว่าวิธี Regression โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 6

ชนิดของ ฟอลต์	ระยะทางห่างจากสถานีฯ (กม.)		
	DigSILENT	Regression	Calculate
AG	6.034	6.013	6.275
AG	44.824	45.011	46.452
BG	37.928	37.941	39.426
BG	80.166	80.157	82.597
CG	52.582	52.564	54.493
CG	82.752	82.749	85.205
3P	39.652	42.021	39.715
3P	75.856	73.808	75.981

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบวิธีหาตำแหน่งการเกิดฟอลต์โดยวิธี Regression และวิธี Calculate

5. สรุป

บทความนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้ข้อมูลรูปแบบสัญญาณคลื่นเพื่อนำมาระบุชนิดของฟอลต์ (Fault Type), ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ (Fault Location) รวมถึงค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Fault Impedance) โดยพบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ (Fault Impedance) เป็น 0 การใช้ตรรกะฟัซซี่ และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น สามารถใช้ระบุชนิดของฟอลต์ และตำแหน่งของฟอลต์ได้ค่อนข้างแม่นยำ

ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักสถิติ ดังนั้นถ้ามีข้อมูลรวบรวมจากอุปกรณ์ Disturbance Record ที่บันทึกเหตุการณ์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบมากพอ จะสามารถปรับปรุงให้ Model ดังกล่าวมีความแม่นยำขึ้นได้ รวมถึงจะสามารถสร้าง Model ใหม่ที่สามารถหาค่าฟอลต์อิมพีแดนซ์ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Annual Report ค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ประจำปี 2563 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- [2] Carlo Cocati & Kaveh Razi. (2012). Fuzzy-Logic-Based High Accurate Fault Classification of Single and Double-Circuit Power Transmission Lines. University of L'Aquila, Department of Electrical and Informatics Engineering
- [3] Itsuo Yamaura, Masao Yajima, Kyoko Tanaka and Hitoshi Fukuma. (2000). A Measurement Method of Grounding Impedance of a Tree. Shinshu University, Faculty of Textile Science and Technology
- [4] John J.Grainger & William D.Stevenson,JR. (1994). Power System Analysis
- [5] Patrick.S Pouabe Eboule, Jan Harm C Pretorius, Nhlanhla Mbuli and Collins Leke. (2018). Fault Detection and Location in Power Transmission Line Using Concurrent Neuro Fuzzy Technique. University of Johannesburg, IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)
- [6] Mohamed A.Ibrahim. (2012). Disturbance Analysis for Power Systems
- [7] Timothy J.Ross. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Application
- [8] Sami Ekici, Fatih Unal and Umit Ozleyen. (2019). Comparison of different regression models to estimate fault location on hybrid power

systems, IET Generation, Transmission & Distribution: Vol 13 Issue 20, pp. 4756-4765

- [9] Mark Tranmer & Mark Elliot. Multiple Linear Regression. Retrieved from <https://hummedia.manchester.ac.uk/institutes/cmist/archive-publications/working-papers/2008/2008-19-multiple-linear-regression.pdf>
- [10] A. Ferrero, S. Sangiovanni, and E. Zaitelli, "A fuzzy set approach to fault type identification in digital relaying," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, pp. 169–175, Jan. 1995.
- [11] กองควบคุมการจ่ายไฟ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค