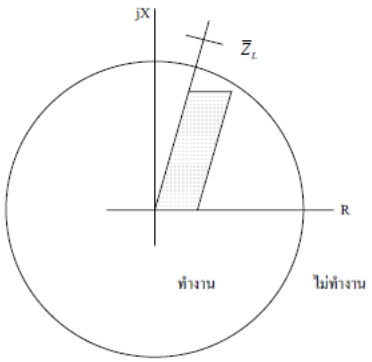
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

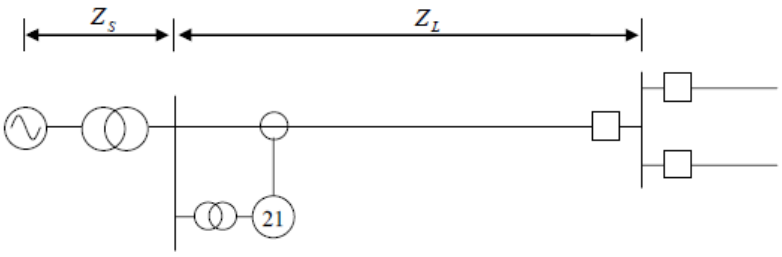
2.1 หลักการของรีเลย์ระยะทาง [1] [2] [4] [5]

รีเลย์ระยะทางหาตำแหน่งของฟอลต์โดยการตอบสนองต่อค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์วัดได้ จากการเปรียบเทียบค่ากระแสที่รีเลย์มองเห็น กับค่าแรงดันที่รีเลย์วัดได้ ณ จุดติดตั้งรีเลย์ รีเลย์ระยะทางมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น รีเลย์แบบคานสมดุล รีเลย์แบบถ้วยเหนี่ยวนำ หรืออาจเป็นสแตติกรีเลย์ ที่ประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบขนาด (Magnitude Comparator) หรือวงจรเปรียบเทียบมุม (Phase Comparator) อิมพีแดนซ์ที่วัดได้ อาจรวมค่าอิมพีแดนซ์ของอาร์ค และอิมพีแดนซ์ของดิน โดยรีเลย์จะทำงานเมื่ออิมพีแดนซ์ที่วัดได้ต่ำกว่าอิมพีแดนซ์เซ็ตติ้ง ซึ่งหมายถึงฟอลต์ที่เกิดขึ้นอยู่ในเขตที่ต้องการป้องกัน ปลายสุดของเขตที่ต้องการป้องกันเรียกว่า จุดสมดุล(Balance Point) และระยะทางจากรีเลย์ถึงจุดสมดุลเรียกว่ารีช (Reach)

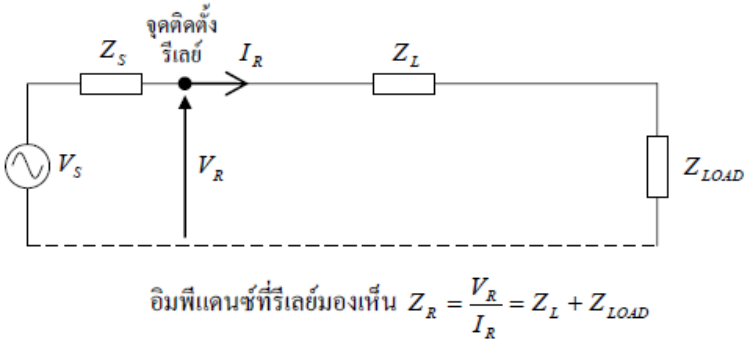
ในสภาวะการจ่ายไฟปกติ รีเลย์มองเห็นอิมพีแดนซ์เป็นอิมพีแดนซ์ของสายส่งรวมกับโหลด เมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้น อิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจากรีเลย์ถึงจุดเกิดฟอลต์ สามารถเขียนขอบเขตของการเกิดฟอลต์บนแผนภาพอิมพีแดนซ์ได้ โดยวงกลมเป็นคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบอิมพีแดนซ์ แบบดั้งเดิมที่ใช้หลักการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุต ที่ป้อนให้กับรีเลย์ ถ้าขอบเขตการเกิดฟอลต์อยู่ภายในวงกลมรีเลย์จะทำงาน และหากอยู่นอกวงกลมรีเลย์จะไม่ทำงาน



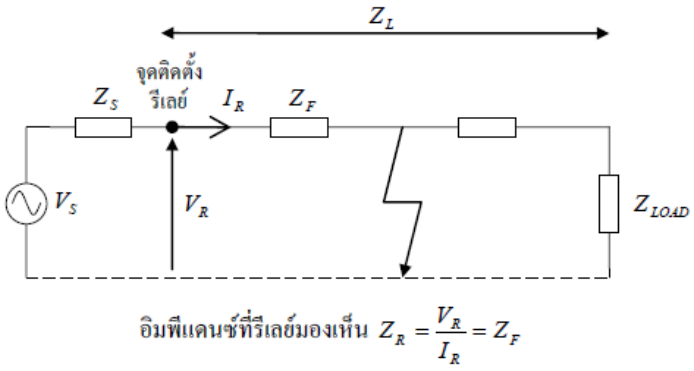
ภาพที่ 2.1 แสดงจุดทำงานของรีเลย์ระยะทาง



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแผนภาพเส้นเดี่ยว



ภาพที่ 2.3 ค่าอิมพีแดนซ์ขณะจ่ายไฟปกติ



ภาพที่ 2.4 ค่าอิมพีแดนซ์ขณะเกิดการลัดวงจร

2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิและอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ

ปริมาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอินพุตป้อนให้กับรีเลย์ระยะทางคือแรงดันและกระแสทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นจะเป็นอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_{FP}/VT\ Ratio}{I_{FP}/CT\ Ratio} = Z_P \times \frac{CT\ Ratio}{VT\ Ratio} \quad (2.1)$$

2.1.2 ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบมุมของสัญญาณของรีเลย์ระยะทางแบบโม

รีเลย์ระยะทางแบบโมทำงานโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณ 2 สัญญาณ โดยไม่สนใจขนาดและมีเงื่อนไขการทำงานตามสมการ

$$\bar{S}_1 = \bar{V}_{polarised} \quad (2.2)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{V} - \bar{I}\bar{Z} \quad (2.3)$$

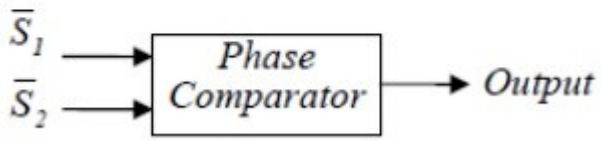
$\bar{V}_{polarised}$ คือ แรงดันที่รีเลย์นำมาใช้เปรียบเทียบ

$\bar{V}$ คือ แรงดันที่ป้อนให้กับรีเลย์

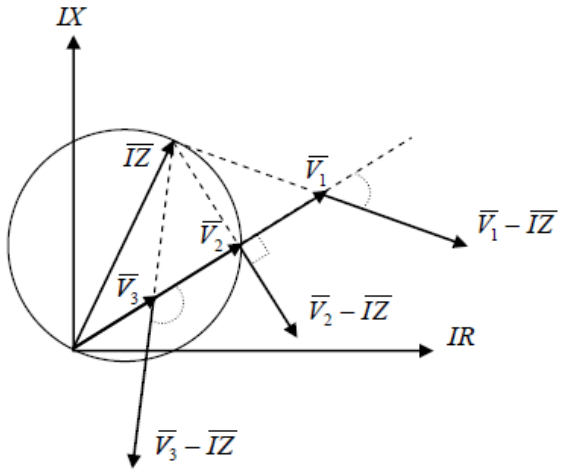
$\bar{I}$ คือ กระแสที่ป้อนให้กับรีเลย์

$\bar{Z}$ คือ อิมพีแดนซ์เซ็ตติ้งของรีเลย์

$$90° < \angle\bar{S}_1 - \angle\bar{S}_2 < 270°$$



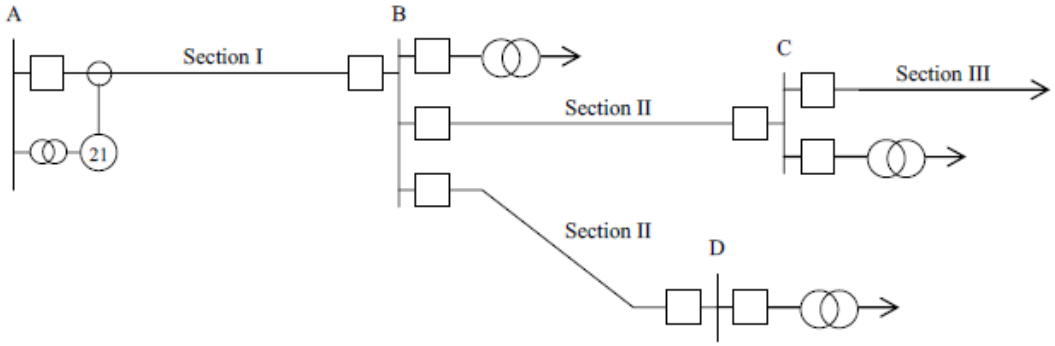
ภาพที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบมุมของสัญญาณ



ภาพที่ 2.6 คุณลักษณะการทำงานในรูปแผนภาพแรงดันของรีเลย์ระยะทางแบบโมที่มีการโพลาไลซ์ด้วยตัวมันเอง

2.1.3 การตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

กองออกแบบสถานีไฟฟ้า (2546) กำหนดหลักเกณฑ์ทั่วไปในการตั้งค่าการทำงานของรีเลย์ป้องกันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในส่วนของรีเลย์ระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Redial Lineไว้ดังนี้



ภาพที่ 2.7 โซนการป้องกันของรีเลย์ระยะทางกรณีจ่ายไฟแบบ Radial Lineที่มา: กองออกแบบสถานีไฟฟ้า ฝ่ายอกแบบสถานีและสายส่ง กฟภ. (2546)

โซนการทำงาน

Zone 1 = 80% of Line Impedance Section I

Zone 2 = 100% of Line Impedance Section I + 50% of Line Impedance Section II (Shortest Line) ทั้งนี้ต้องมากกว่า 120% of Line Impedance Section I

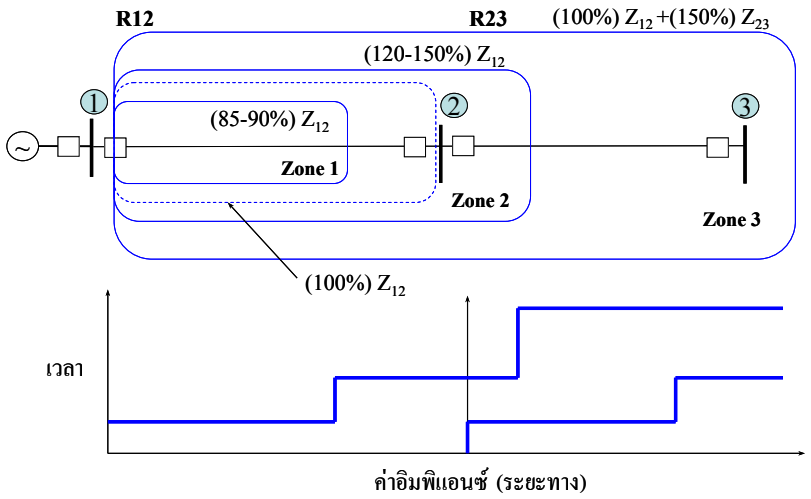
Zone 3 = 100% of Line Impedance Section I + 120% of Line Impedance Section II (Longest Line) ทั้งนี้ต้องมากกว่า 100% of Line Impedance Section (I+II) +25% of LineImpedance Section III แต่ต้องไม่เกิน 100% of Line Impedance Section I + 80% of Transformer at Remote end

เวลาการทำงาน

Zone 1 = ทันทีทันใด

Zone 2 = 300 ms

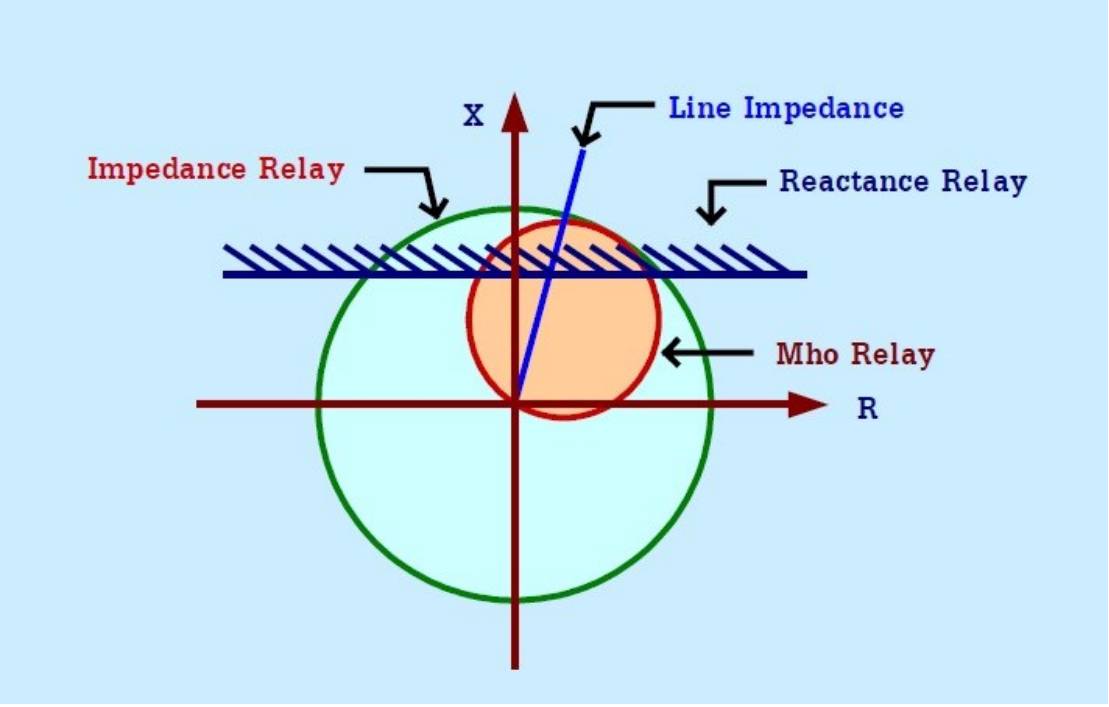
Zone 3 = 600 ms



ภาพที่ 2.8 ขอบเขตการป้องกันของรีเลย์แบบระยะทาง

2.1.4 ข้อดีข้อเสียของ mho relay

- เป็นรีเลย์แบบมีทิศทางในตัวเอง (Inherently Directional)
- เมื่อปรับให้ป้องกันสายถึงช่วงหนึ่งแล้ว จะมีลักษณะการทำงานที่กินบริเวณน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์และรีแอคแตนซ์รีเลย์ ดังภาพ 2.8
- มีโอกาสทำงานผิดพลาดอันเนื่องมาจากความผิดปกติอื่นๆของระบบ ที่ไม่ใช่การลัดวงจรน้อย
- ความต้านทานอาร์กมีผลต่อ mho relay มาก จึงเหมาะสำหรับสายที่ยาวๆ และมีเสาเป็นเหล็ก เพราะมีค่าความต้านทานอาร์กต่ำ
- การเกิดการลัดวงจรใกล้รีเลย์จะทำให้แรงดันเป็นศูนย์ส่งผลให้ mho relay ทำงานไม่ได้



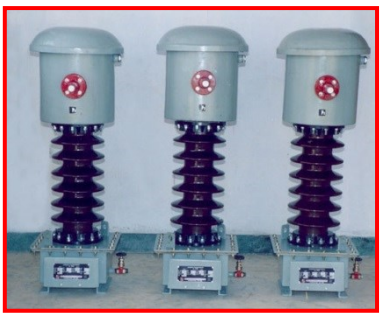
ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะการทำงานซึ่งกินพื้นที่น้อยของ mho relay

2.2 หม้อแปลงเครื่องมือวัด [3]

หม้อแปลงเครื่องมือวัด เป็นเครื่องสำเร็จ ที่ใช้สำหรับแปลงแรงดันหรือกระแส เพื่อให้สามารถใช้ได้กับเครื่องวัดไฟฟ้าภายในพิสัยความถี่กำลัง โดยเครื่องวัดปกติ การขยายพิสัยวัดกระแสทำได้โดยใช้ชันต์ การขยายพิสัยวัดแรงดันทำโดยใช้ตัวต้านทานอนุกรม (ตัวคูณ) ซึ่งสามารถทำได้โดยสะดวก และพบเห็นทั่วไปในการวัดกระแสตรง อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีขีดจำกัดที่ค่ากระแสและแรงดันไม่สูงมาก เมื่อกระแสมีค่าสูงมากเกินไม่กี่ร้อยแอมแปร์ กำลังที่สูญเสียในชันต์จะมีค่ามากพอ นอกจากนั้นจะต้องคิดถึงการฉนวนเครื่องวัดให้พอเพียง ซึ่งเป็นเรื่องยากถ้ากระแสที่จะวัดอยู่ที่หลายร้อยหรือหลายพันโวลต์เหนือดิน ในกรณีที่ต้องวัดค่าที่มีพิสัยกว้างให้มีความถูกต้อง เป็นเรื่องที่ไม่เหมาะสมที่จะต้องมีเครื่องวัดที่สามารถวัดค่าพิสัยกว้างให้ถูกต้องทั้งหมด แต่โดยการลดกระแสหรือแรงดันค่าสูงลงมาด้วยอัตราส่วนที่รู้ค่า และถูกต้องหลายๆค่าโดยใช้หม้อแปลง และใช้เครื่องมือวัดที่สามารถวัดขนาดกระแสหรือแรงดันค่าไม่สูง แต่มีความถูกต้องมากวัดค่า จะสามารถได้พิสัยกว้าโดยมีความถูกต้องตามต้องการแต่ประหยัดและปลอดภัย เราสามารถแบ่งหม้อแปลงเครื่องมือวัดตามการใช้งานได้เป็นหม้อแปลงกระแส (Current Transformer(CT)) และหม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer (PT)) หม้อแปลงเครื่องมือวัดมีลักษณะเหมือนหม้อแปลงกำลังทั่วๆไป

2.2.1 หม้อแปลงกระแส

เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานสำหรับลดกระแสสูงๆ ที่ไหลในสายไฟฟ้าให้มีค่าลดต่ำลง เพื่อนำไปต่อเข้ากับแอมมิเตอร์ วัตต์มิเตอร์และกิโลวัตต์-ฮาวมิเตอร์เช่นเดียวกัน ขนาดกำลังเอาต์พุตจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์ (VA) พิกัดกระแสบอกเป็นอัตราส่วน เช่น 100/5 , 200/5, 300/5 เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

2.2.2 หม้อแปลงแรงดัน

เป็นหม้อแปลงแรงดันขนาดเล็กใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าสูงๆ เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำๆใช้กับโวลต์มิเตอร์ วัตต์มิเตอร์ และกิโลวัตต์ฮาวมิเตอร์ พิกัดกำลังเอาต์พุตจะบอกเป็นโวลต์-แอมป์(VA) ส่วนพิกัดแรงดันจะบอกแรงดันไฟฟ้าของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ เช่น 1500/100 โวลต์ , 4800/120 โวลต์ , 22000/220 โวลต์ เป็นต้น

ภาพที่ 2.11 หม้อแปลงแรงดัน

2.3 การลัดวงจร [3] [4]

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่มีการต่อลงดินนั้น มีการลัดวงจรที่เป็นไปได้ทั้งหมดอยู่ 10 ลักษณะ คือ

1. Three Phase Fault 1 แบบ
2. Phase-to-Phase Fault 3 แบบ ได้แก่ A-B, B-C, C-A
3. Phase-to-Phase-to-Ground Fault 3 แบบ ได้แก่ A-B-G, B-C-G, C-A-G
4. Phase-to-Ground Fault 3 แบบ ได้แก่ A-G, B-G, C-G

จากลักษณะของการเกิดลัดวงจรที่เป็นไปได้ทั้ง 10 แบบดังกล่าวนี้ สมการของระบบที่เกี่ยวข้องกับแรงดันและกระแสที่ตำแหน่งของรีเลย์ย่อมแตกต่างกันไปในแต่ละลักษณะวงจร จึงเป็นไปได้ว่าจะต้องใช้ Distance Relay หลายๆ ตัว แต่ละตัวถูกกระตุ้นให้ทางานโดยแรงดันและกระแสขาเข้าที่ต่างกันเพื่อใช้ในการวัดระยะทางของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรได้อย่างถูกต้องสาหรับการลัดวงจรแบบต่างๆ และเพื่อให้การตั้งค่าอิมพีแดนซ์สาหรับรีเลย์ทั้งหมดเป็นไปในแนวทางเดียวกันจะใช้หลักการที่ว่า

ไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรแบบใดก็ตาม แรงดันและกระแสขาเข้าที่ใช้ป้อนให้กับรีเลย์ตัวที่เหมาะสม จะต้องทาให้รีเลย์ตัวนั้นสามารถวัด Positive Sequence Impedance (Z_{IF}) ได้

ตัวแปรที่ใช้ในสมการ

E_A หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟส A

E_B หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟส B

E_C หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟส C

I_A หมายถึงกระแสในเฟส A

I_B หมายถึงกระแสในเฟส B

I_C หมายถึงกระแสในเฟส C

Z_S หมายถึงอิมพีแดนซ์ที่อยู่หลังจุดที่ติดตั้งรีเลย์

Z_{1F} หมายถึงอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นใน Positive Sequence

Z_{2F} หมายถึงอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นใน Negative Sequence

Z_{0F} หมายถึงอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นใน Zero Sequence

E_1 หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าใน Positive Sequence

E_2 หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าใน Negative Sequence

E_0 หมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าใน Zero Sequence

I_1 หมายถึงกระแสใน Positive Sequence

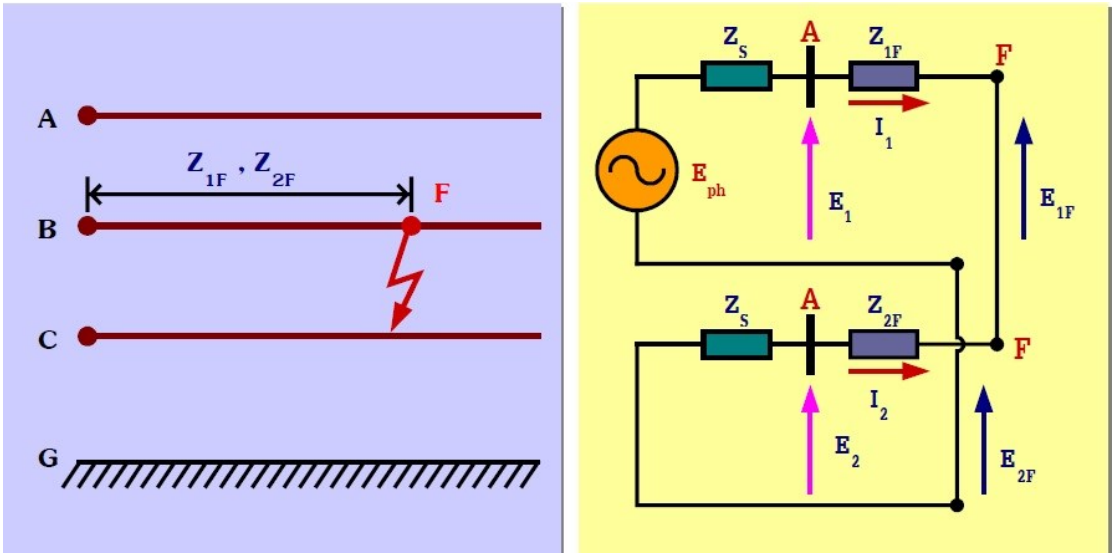
I_2 หมายถึงกระแส Negative Sequence

I_0 หมายถึงกระแส Zero Sequence

a หมายถึงค่าที่มีขนาด 1 และมีมุม 120 องศา

2.3.1 Phase to Phase Fault

พิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส B และ C ที่จุด F ของสายส่ง 3 เฟส ดังรูป สามารถแทนด้วย Symmetrical Component โดยมี Positive และ Negative Sequence Network ต่อขนานกันที่จุด F ดังภาพ 2.12 ซึ่งมี Positive และ Negative Sequence Impedance เท่ากัน



ก. การเกิดลัดวงจร ข. วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.12 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร B-C

แรงดันที่จุด F ใน Positive และ Negative Sequence มีค่าเท่ากันดังนี้

$$E_{1F} = E_{2F} = E_1 - Z_{1F}I_1 = E_2 - Z_{1F}I_2 \quad (2.4)$$

สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$Z_{1F} = (E_1 - E_2)/(I_1 - I_2) \quad (2.5)$$

โดยที่

$$E_A = E_0 + E_1 + E_2 \quad (2.6)$$

$$E_B = E_0 + a^2E_1 + aE_2 \quad (2.7)$$

$$E_C = E_0 + aE_1 + a^2E_2 \quad (2.8)$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 \quad (2.9)$$

$$I_B = I_0 + a^2I_1 + aI_2 \quad (2.10)$$

$$I_C = I_0 + aI_1 + a^2I_2 \quad (2.11)$$

จะได้

$$E_B - E_C = (a^2 - a)(E_1 - E_2) \quad (2.12)$$

และ

$$I_B - I_C = (a^2 - a)(I_1 - I_2) \quad (2.13)$$

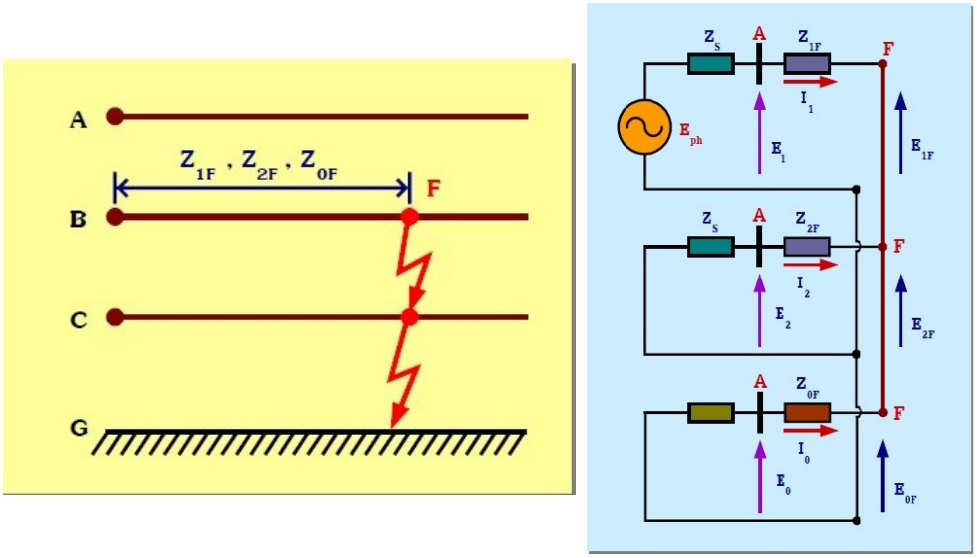
จากสมการข้างต้นจะได้

$$Z_{1F} = (E_1 - E_2)/(I_1 - I_2) = (E_B - E_C)/(I_B - I_C) \quad (2.14)$$

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสเมื่อใช้แรงดันสายระหว่างเฟสที่ลัดวงจรกับผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้นจะสามารถวัดค่า Positive Sequence Impedance ได้

2.3.2 Phase to Phase to Ground Fault

เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส B – C และ Ground ที่จุด F จะสามารถแทนด้วย Symmetrical Component โดยมี Positive และ Negative Sequence Network ต่อขนานกันที่จุด F ดังภาพที่ 2.13 โดยสามารถวัดค่า Positive Sequence Impedance ได้เช่นเดียวกับ Line to Line Fault

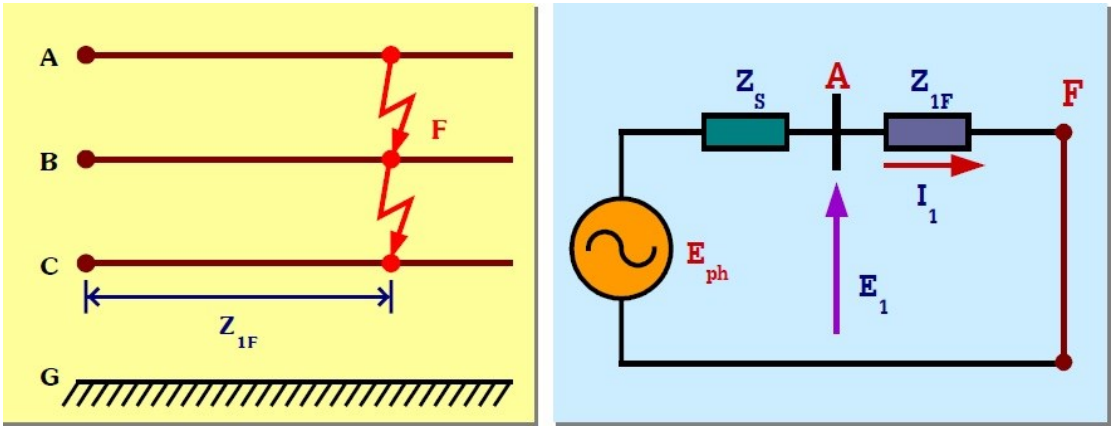


ก. การเกิดลัดวงจร ข. วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.13 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร B-C-G

2.3.3 Tree Phase Fault

เมื่อเกิดการลัดวงจรทั้ง 3 เฟสที่จุด F จะสามารถแทนด้วย Symmetrical Component ซึ่งมีเพียง Positive Sequence Network ดังภาพ 2.14



ก. การเกิดลัดวงจร ข. วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.14 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร 3 เฟส

จะได้สมการแสดงลักษณะการลัดวงจร 3 เฟส ดังนี้

$$E_1 = E_A = Z_{1F}I_1 = Z_{1F}I_A = E_{ph} - Z_S I_1 \quad (2.15)$$

เมื่อ $E_2 = E_0 = 0$ และ $I_2 = I_0 = 0$

โดยที่

$$E_A = E_0 + E_1 + E_2 = E_1 \quad (2.16)$$

$$E_B = E_0 + a^2E_1 + aE_2 = a^2E_1 \quad (2.17)$$

$$E_C = E_0 + aE_1 + a^2E_2 = aE_1 \quad (2.18)$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 = I_1 \quad (2.19)$$

$$I_B = I_0 + a^2I_1 + aI_2 = a^2I_1 \quad (2.20)$$

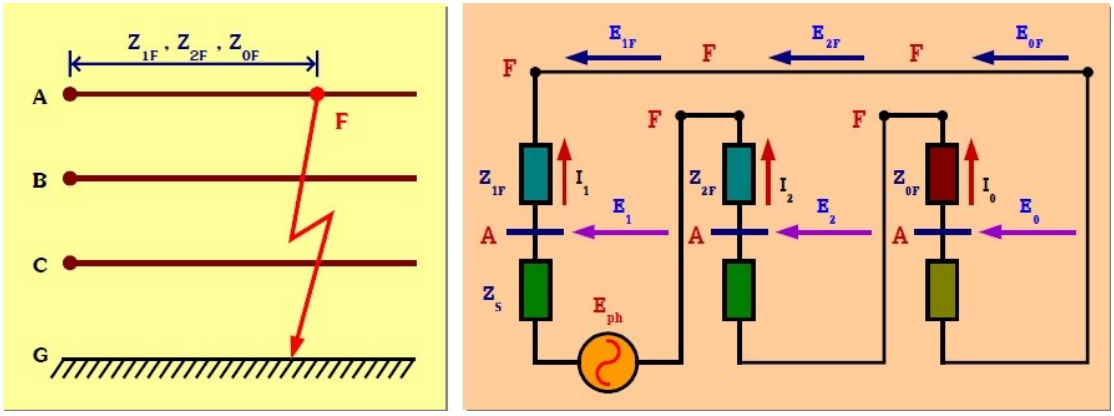
$$I_C = I_0 + aI_1 + a^2 I_2 = aI_1 \quad (2.21)$$

จะได้ว่า

$$Z_{1F} = (E_A - E_B)/(I_A - I_B) = (E_B - E_C)/(I_B - I_C) = (E_C - E_A)/(I_C - I_A) \quad (2.22)$$

2.3.4 Phase to Ground Fault

สำหรับการลัดวงจรที่เฟส A กับ Ground ที่จุด F จะสามารถแทนด้วย Symmetrical Component ที่มีทั้ง Positive , Negative และ Zero Sequence Network ต่ออนุกรมกันที่จุด F ดังภาพ 2.15



ก. การเกิดลัดวงจร ข. วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.15 วงจร Symmetrical Component สำหรับการลัดวงจร A – G

ได้สมการในเทอมของแรงดันและกระแส ดังนี้

$$E_{1F} = E_1 - Z_{1F} I_1 \quad (2.23)$$

$$E_{2F} = E_2 - Z_{1F} I_2 \quad (2.24)$$

$$E_{0F} = E_0 - Z_{0F} I_0 \quad (2.25)$$

แรงดันที่เฟส A สามารถเขียนได้ในรูป Symmetrical Component ซึ่งจะมีค่าเป็น 0

$$E_{AF} = E_{0F} + E_{1F} + E_{2F} = 0 \quad (2.26)$$

$$E_{AF} = E_A - Z_{1F}I_A - (Z_{0F} - Z_{1F})I_0 = 0 \quad (2.27)$$

จะได้ว่า $I_A^{'} = I_A\left(1 + \frac{m}{3}\right)$ (2.28)

เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ของสายส่งทั้งเส้น และเรียก m ว่า Compensation Factor ซึ่งตัวชดเชยกระแสเฟสในส่วนที่เป็นผลมาจากเฟสไม่ลัดวงจร ในที่สุดจะได้ว่า

$$Z_{1F} = E_A / I_A^{'} \quad (2.29)$$

ดังนั้นถ้าเราใช้แรงดันเฟสและกระแสที่ถูกชดเชยแล้วเป็นปริมาณขาเข้า จะทำให้ รีเลย์ระยะทางสามารถวัด Positive Sequence Impedance ได้โดยทั่วไปค่า m สำหรับสายส่ง overhead จะมีค่าระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 หรืออาจจะใช้ค่าเฉลี่ยที่ 2.00 ก็ได้ นั่นคือ Z_0 ของสายส่งจะมีค่าเป็น 3 เท่าของ Z_1

2.4 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จิรศักดิ์ (2541) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของรีเลย์ระยะทาง โดยใช้โปรแกรม DELPHI Client/Server Suite version 3.0 ทำงานโดยการป้อนข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ระดับแรงดัน อิมพีแดนซ์ของสายส่ง อิมพีแดนซ์ของระบบเป็นต้น ภายใต้ระบบไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เมื่อสมมติตำแหน่งของฟอลต์ โปรแกรมจะคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็น โดยใช้แรงดันและกระแสก่อนและหลังการเกิดฟอลต์ โดยอิมพีแดนซ์ค่านี้หาได้จากการหารเฟสเซอร์แรงดันด้วยกระแส แล้วนำไปเปรียบเทียบกับคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์ที่เก็บไว้ ถ้าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นอยู่ในขอบเขตการป้องกันรีเลย์จะทำงาน อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถคำนวณหาขอบเขตของการเกิดฟอลต์เมื่อมีความต้านทานฟอลต์ (R_f) ซึ่งผลของการพัฒนาโปรแกรมทำให้สามารถทราบถึงข้อจำกัด และปัญหาการใช้งานรีเลย์แต่ละชนิดและทำให้เลือกใช้รีเลย์ได้อย่างเหมาะสม

ฤชุชัย (2549) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมถนะ การทางานของรีเลย์ระยะทางโดยใช้โปรแกรมแมตแลปซีมูลิงค์ มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถ สร้างแบบจาลองทางไฟฟ้ากาลัง และจาลองเหตุการณ์เพื่อวัดกระแสและแรงดัน ณ.จุดต่างๆได้ทุกรูปแบบของการเกิดฟอลต์โดยปริมาณที่วัดได้จะเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เหมือนกับปริมาณไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงกระแส และ หม้อแปลงแรงดัน ที่ป้อนให้กับรีเลย์ดังนั้นถ้าเราทราบหลักการของรีเลย์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ได้ตามความต้องการเหมือนการใช้งานจริงในระบบไฟฟ้าได้ เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่เริ่มใช้โปรแกรมนาไปศึกษาใช้งานเบื้องต้นได้ ในการวิจัยครั้งนี้จะเป็นการวิจัยในรูปแบบการเกิดฟอลต์ แบบเฟส กับ กราว์ด เพื่อทาให้สามารถวิเคราะห์ฟอลต์ ทุกรูปแบบ ได้ต่อไปในระบบไฟฟ้ากาลัง