



การป้องกันระบบไฟฟ้า Power System Protection

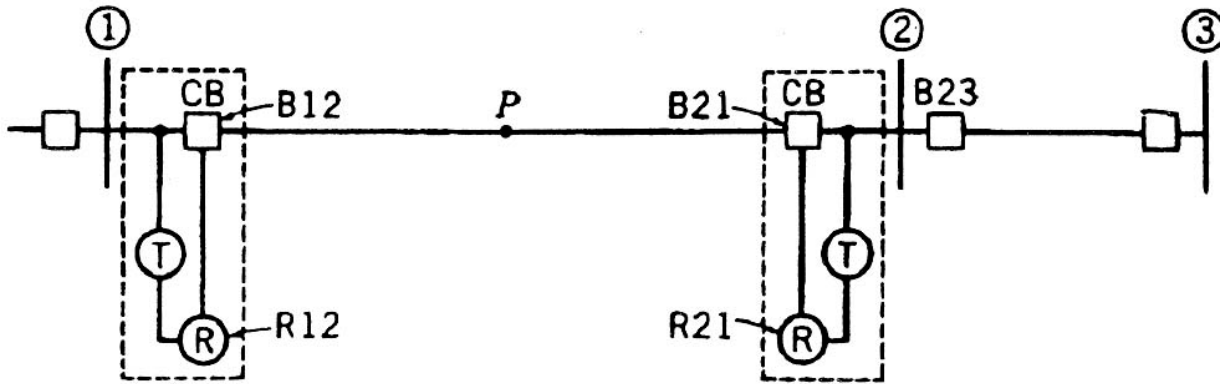
ระบบป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

- ต้องทำหน้าที่ตัดส่วนที่เกิดฟอลต์ ออกจากระบบโดยเร็วที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้
- เป็นระบบที่ทำงานโดยอัตโนมัติ
- ประเภทการป้องกันระบบ
 - ลัดวงจร
 - เป็ดวงจร

ผลกระทบต่อระบบ กรณีไม่มีระบบป้องกัน

1. เสถียรภาพของระบบลดลง
2. เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ เนื่องจากกระแสสูง (โดยเฉพาะบริเวณใกล้เคียงจุดเกิดฟอลต์)
3. อุปกรณ์แรงสูงที่มีฉนวนน้ำมัน อาจเกิดการระเบิดได้
4. เกิดปัญหาไฟดับเป็นบริเวณวงกว้างได้ เนื่องจากไม่มีการตัดส่วนที่เกิดปัญหาฟอลต์ออกไป

ส่วนประกอบของระบบป้องกัน



1. อุปกรณ์ตัดวงจร (Circuit Breaker, CB หรือ B)
2. ตัวลดทอนสัญญาณ (Transducer, T)
3. รีเลย์ (Relay, R)

Circuit Breaker

- ทำหน้าที่เปิดวงจร เมื่อเกิดกระแสฟอลต์ในระบบ



Recloser

- ทำหน้าที่เปิดวงจร ในระบบสายส่งและระบบจำหน่าย สามารถทำการตรวจสอบฟอลต์ก่อนเปิดวงจรถาวรได้



Recloser Controller



LARGE DISPLAY
SHOWS METERED
CURRENTS

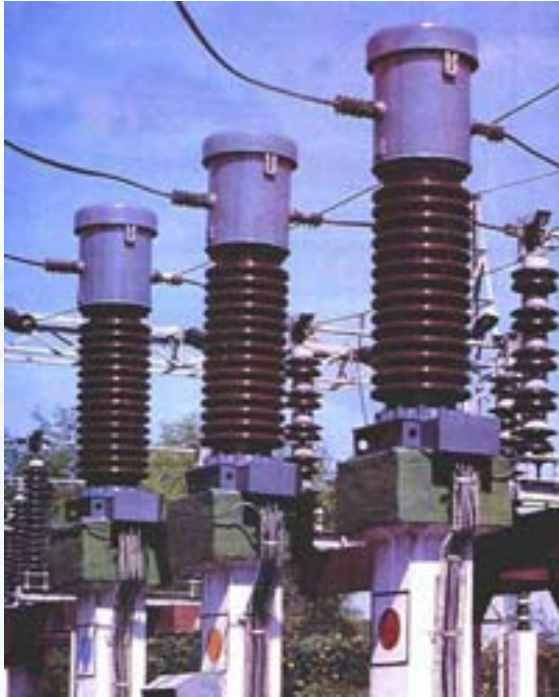
INDICATORS
ARE VISIBLE
IN DIRECT SUN
AND ARE RETAINED
THROUGH POWER
INTERRUPTIONS

EASY TO USE
OPERATOR
CONTROLS



Transducer

- ลดขนาดและป้อนสัญญาณกระแสและแรงดันขนาดพอเหมาะ ให้แก่วัด



CT



VT

หม้อแปลงกระแส (Current Transformer , CT)

- มี 2 ประเภท คือ

1. แบบบุชชิ่ง (Bushing CT)

ติดตั้งอยู่ภายในขั้วของอุปกรณ์สำคัญ เช่น หม้อแปลงกำลัง, Circuit Breaker โดยตัวถังอุปกรณ์ต่อลงดิน ไม่สามารถใช้งานที่ระดับแรงดันสูงๆ ได้

2. แบบแยกเดี่ยว (Free Standing CT)

เป็นชุดหม้อแปลงกระแสต่างหาก เหมาะสำหรับงานที่ระดับแรงดันสูงๆ

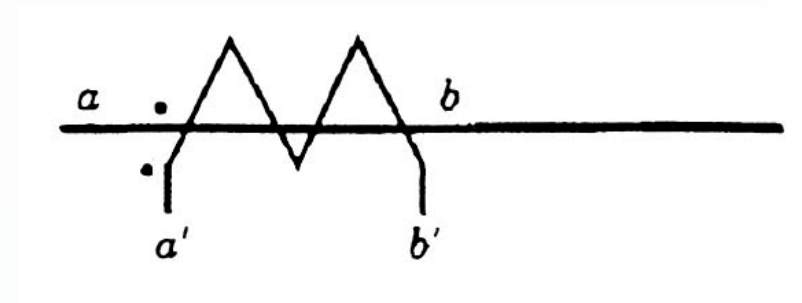
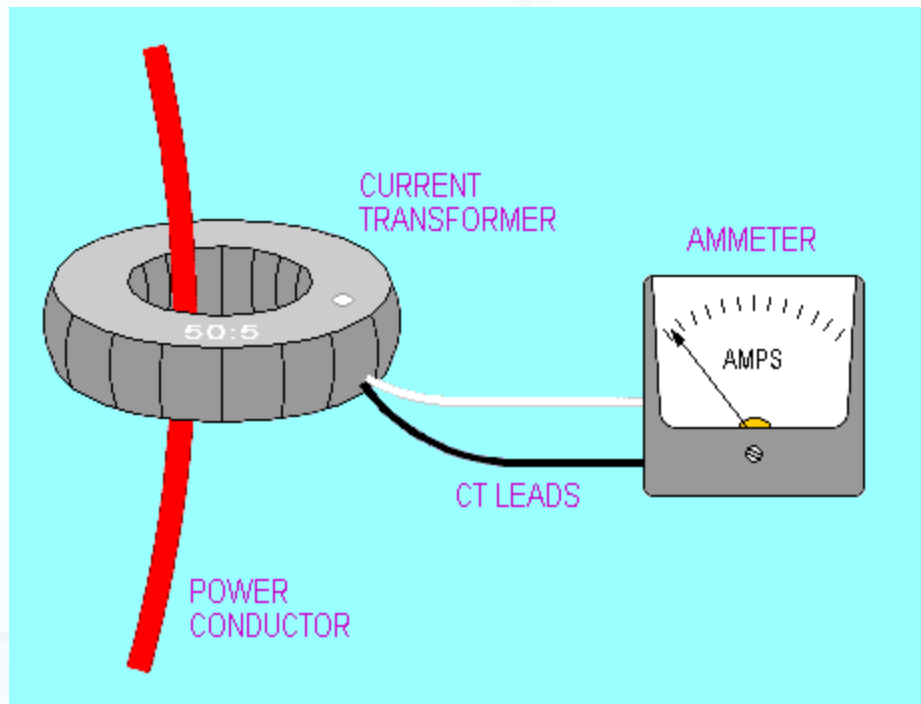


Bushing CT



Free Standing CT

การทำงานและสัญลักษณ์ของ CT



อัตรามาตรฐานของ CT

อัตราทด	อัตราทด	อัตราทด
50:5	300:5	800:5
100:5	400:5	900:5
150:5	450:5	1000:5
200:5	500:5	1200:5
250:5	600:5	

พิกัดกระแสด้านทุติยภูมิ (ด้านรีเลย์)

หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer , VT)

- มี 2 ประเภท คือ

1. ชนิดขดลวด

มีโครงสร้างเหมือนกับหม้อแปลงกำลัง แต่ที่ระดับแรงดันสูงๆ จะมีราคาแพง จึงนิยมใช้ที่ระดับแรงดันระดับกลาง

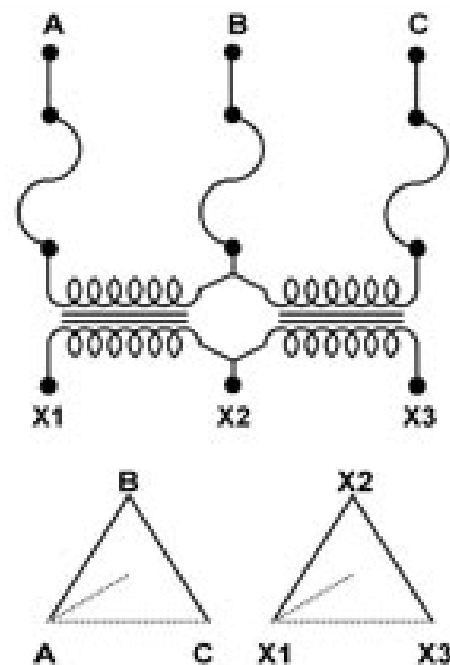
2. ชนิดคาปาซิเตอร์

เหมาะสำหรับแรงดันสูง (69 kV ขึ้นไป) ใช้หลักการแบ่งแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุ แล้วต่อกับหม้อแปลงชนิดขดลวดอีกที เพื่อปรับขนาดแรงดันให้เหมาะกับรีเลย์

หม้อแปลงแรงดันชนิดคลวด



CONNECTION DIAGRAM



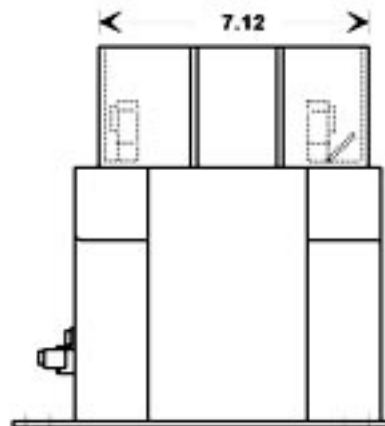
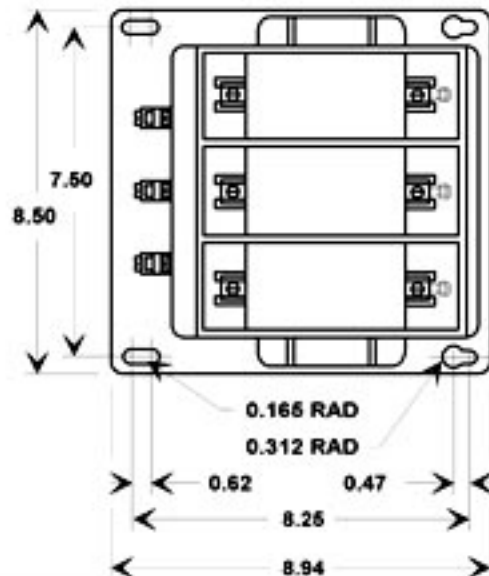
5 kV class

หม้อแปลงแรงดันชนิดขดลวด

ALL UNITS HAVE 120VAC SECONDARIES

CATALOG NUMBER	RATED PRIMARY VOLTAGE	RATIO	FUSE RATING
3PT3-60-841FFF	840	7:1	1.0E
3PT3-60-122FFF	1200	10:1	1.0E
3PT3-60-242FFF	2400	20:1	0.5E
3PT3-60-422FFF	4200	35:1	0.5E
3PT3-60-482FFF	4800	40:1	0.5E

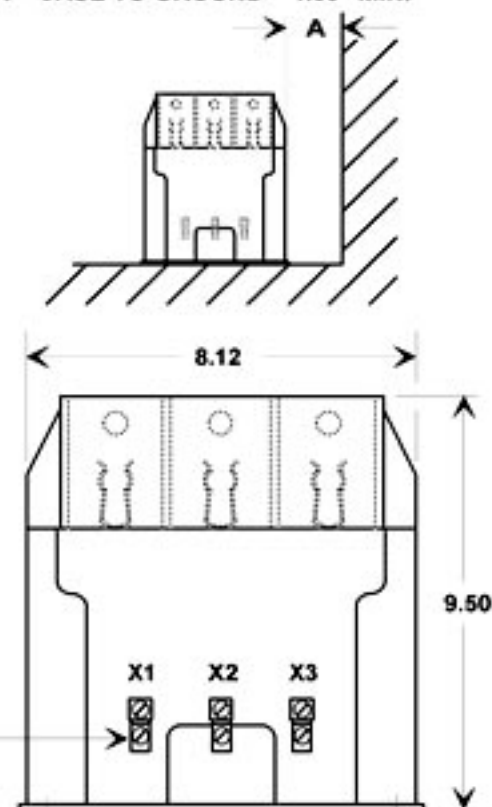
CASE DIMENSIONS (INCHES)



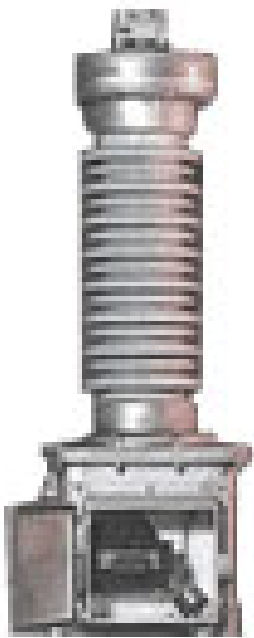
SINGLE HOLE SOLDERLESS LUGS FOR #6 THRU #14 WIRE

RECOMMENDED SPACING

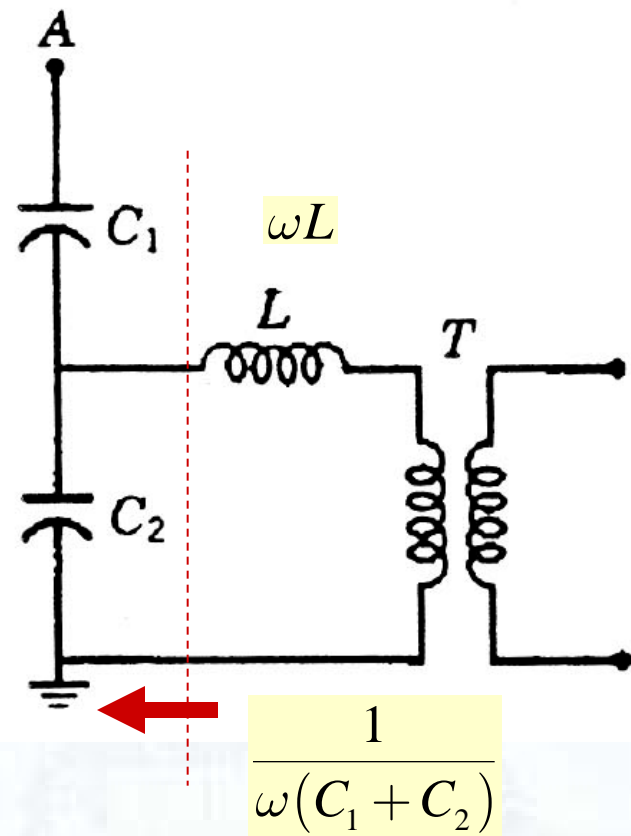
A = CASE TO GROUND = 1.50" MIN.



หม้อแปลงแรงดันชนิดคาปาซิเตอร์



315 kV



Relay

- ทำหน้าที่ตรวจหาฟอลต์และสั่งให้อุปกรณ์ตัดตอนเปิดวงจร



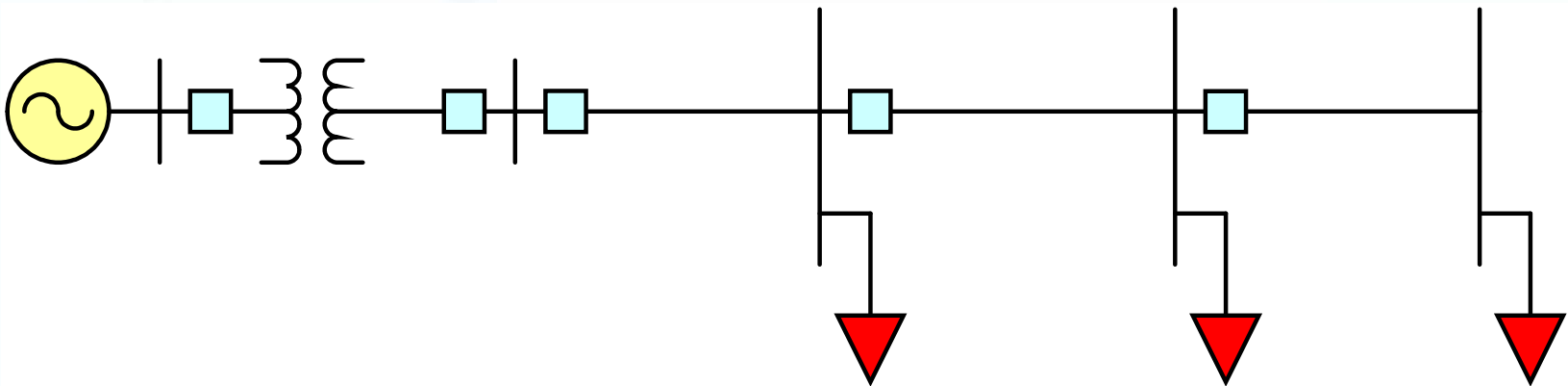
คุณสมบัติของรีเลย์ที่ดี

- ทำงานได้อย่างรวดเร็ว (Fast)
- มีความน่าเชื่อถือสูง (Reliable)
- มีความสามารถในการแยกแยะได้ดี (Selectivity)

ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

- รูปแบบของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะส่งผลต่อการจัดเรียงของอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการทำงานของระบบป้องกัน
- ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แบ่งเป็น
 1. ระบบเรเดียล (Radial System)
 2. ระบบข่าย (Network System)

Radial System



Radial System

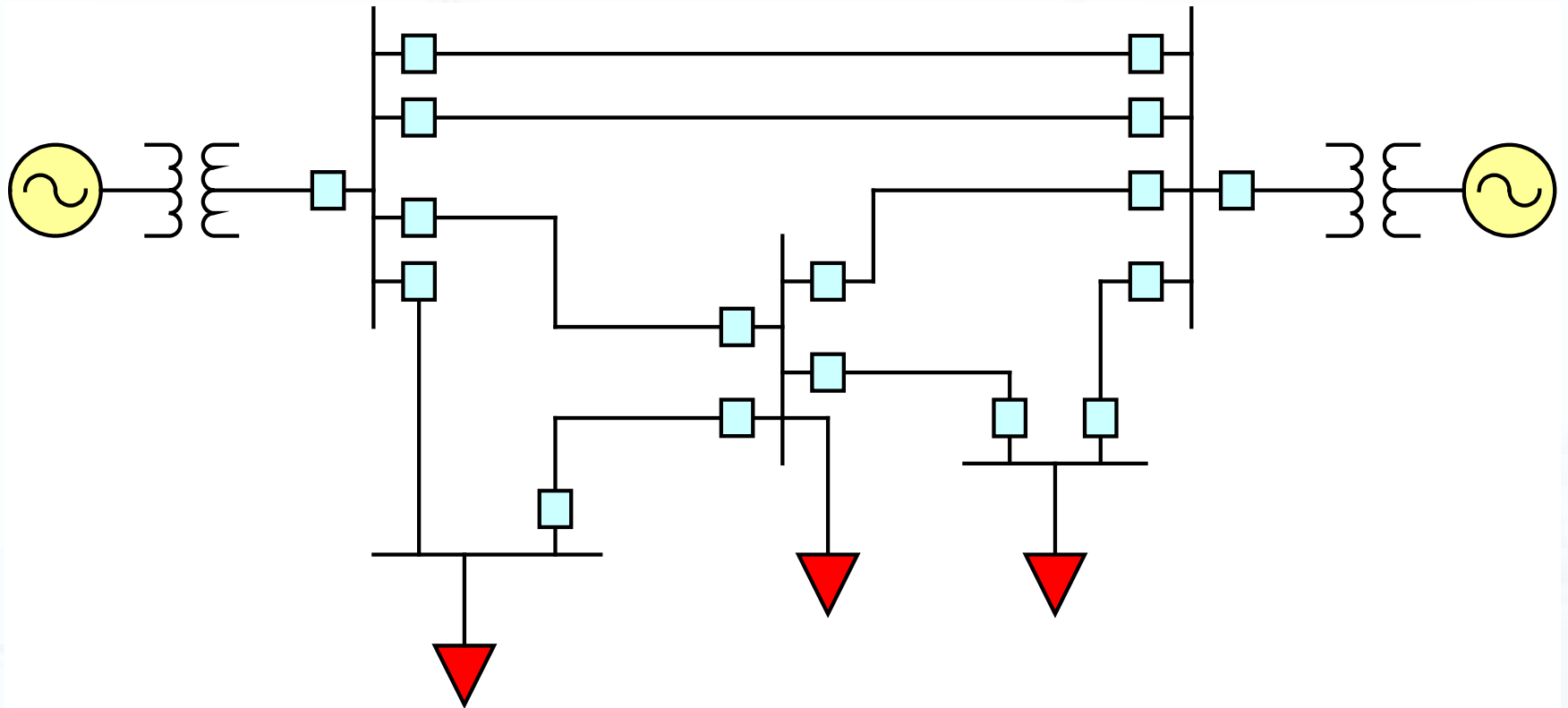
ข้อดี

- เป็นระบบที่ง่าย และประหยัด เนื่องจากใช้แหล่งจ่ายเดียว

ข้อเสีย

- ถ้าเกิดขัดข้องที่ต้นทางจ่ายโหลด จะทำให้ไม่สามารถจ่ายโหลดได้ทั้งหมด และยากต่อการบำรุงรักษาอุปกรณ์
- ความเชื่อถือได้ของระบบต่ำ (ดูจากการดับไฟ)

Network System



มีหลายแหล่งจ่าย

Network System

ข้อดี

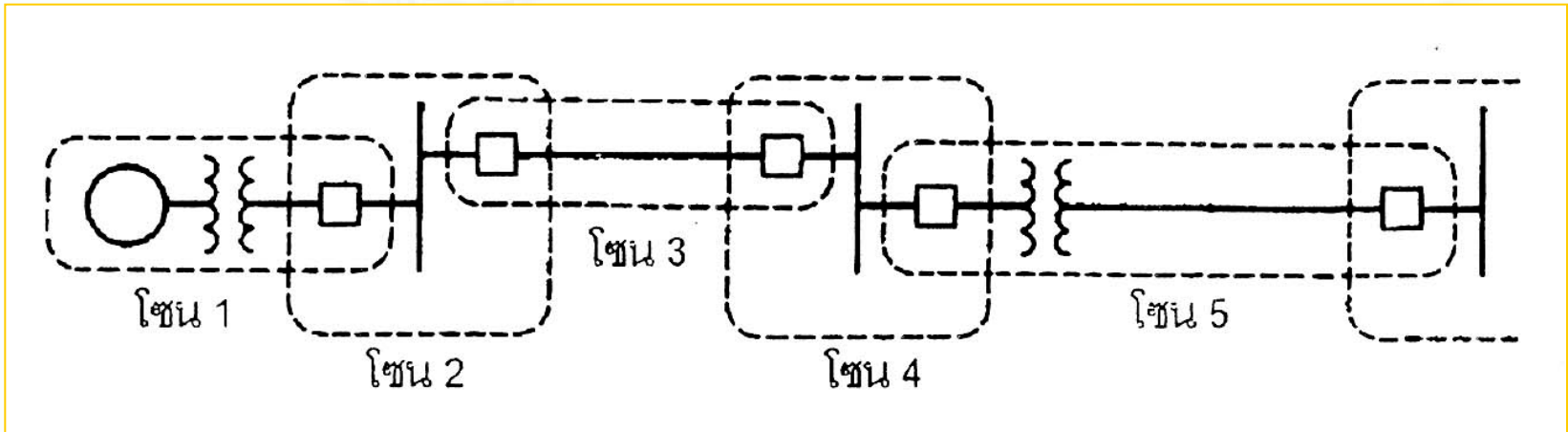
- มีความเชื่อถือได้มากกว่าระบบเรเดียล
- มีความยืดหยุ่นในการจ่ายไฟ เพราะมีหลายแหล่งจ่ายในระบบเดียวกัน
- สามารถบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ง่าย โดยไม่ส่งผลต่อการจ่ายไฟมาก

ข้อเสีย

- ลงทุนสูง
- ออกแบบระบบป้องกันได้ยาก เนื่องจากระบบมีความซับซ้อน

โซนป้องกัน (Protection Zone)

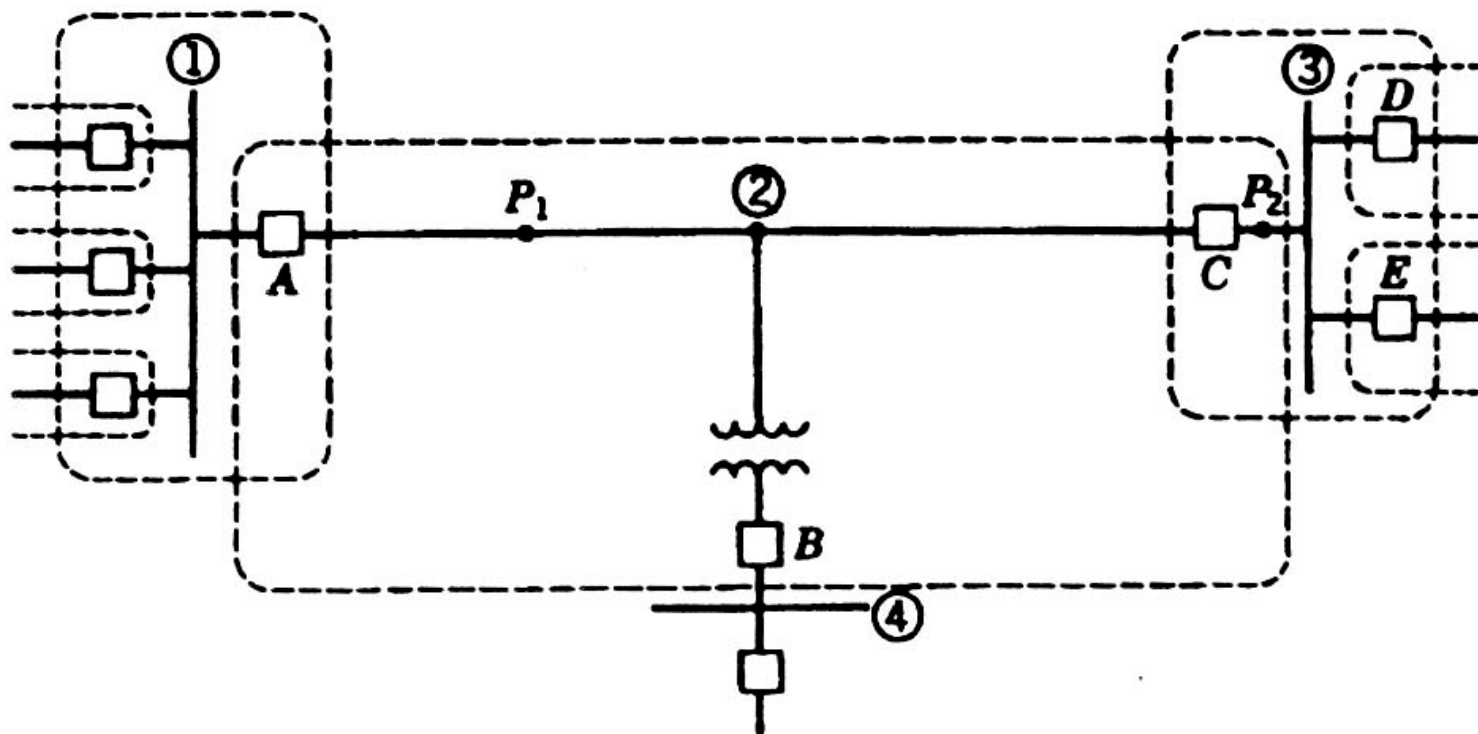
- กำหนดโซนป้องกันให้แก่ระบบป้องกันฯ ต่าง เพื่อช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบป้องกัน
- ระบบป้องกันจะตัดทุกส่วนภายในโซนออกจากระบบที่เหลือโดยการ
ทำงานของอุปกรณ์ตัดตอน → ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอน
เป็นตัวกำหนดโซนป้องกัน
- โซนป้องกันที่ติดกัน มักจะเหลื่อมกันอยู่เสมอ เพื่อลบจุดบอดหรือพื้นที่ซึ่งไม่อยู่ในโซนป้องกันใดๆ

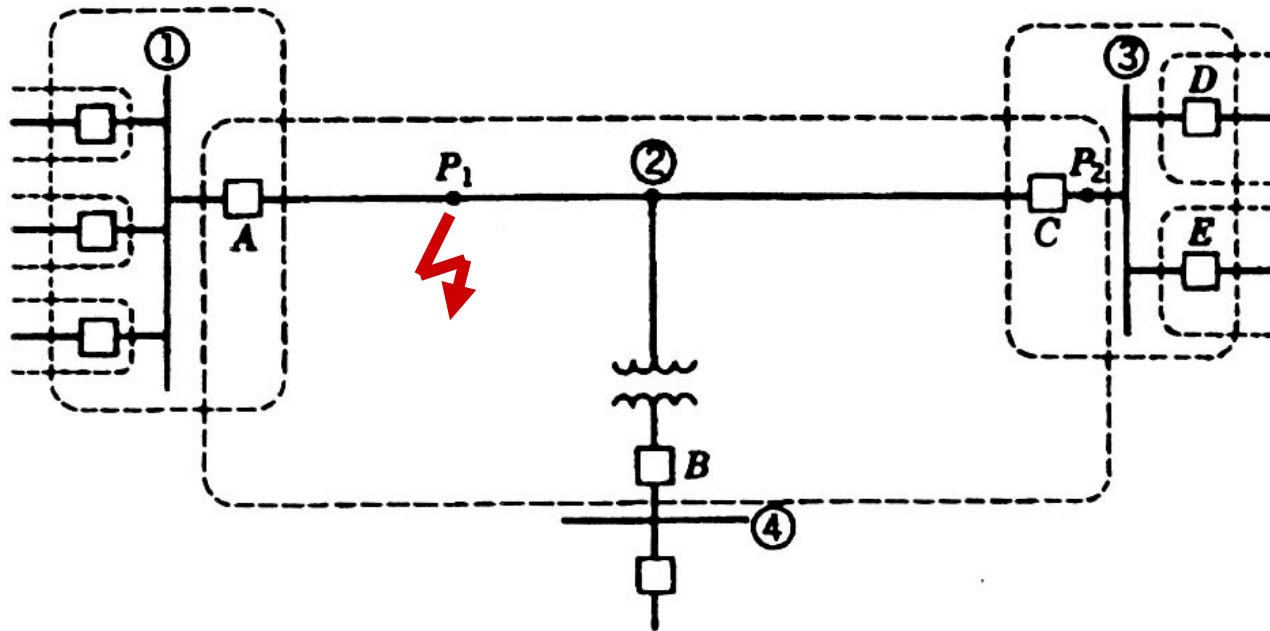


- ในแต่ละ โซนจะมีอุปกรณ์ติดตั้งอยู่หนึ่งหรือมากกว่า
- ในแต่ละ โซนจะออกแบบให้มีอุปกรณ์ตัดตอนอย่างน้อย 2 ตัว ซึ่งในแต่ละตัวถูกจัดให้อยู่ในโซน 2 โซนที่ติดกัน
- บริเวณที่เหลื่อมกันควรมีพื้นที่น้อยที่สุด เท่าที่จำเป็น

ตัวอย่างที่ 1

จากระบบในรูป อุปกรณ์ตัดตอนไหนจะเปิดวงจรเมื่อเกิดฟอลต์ที่จุด P_1 และ P_2

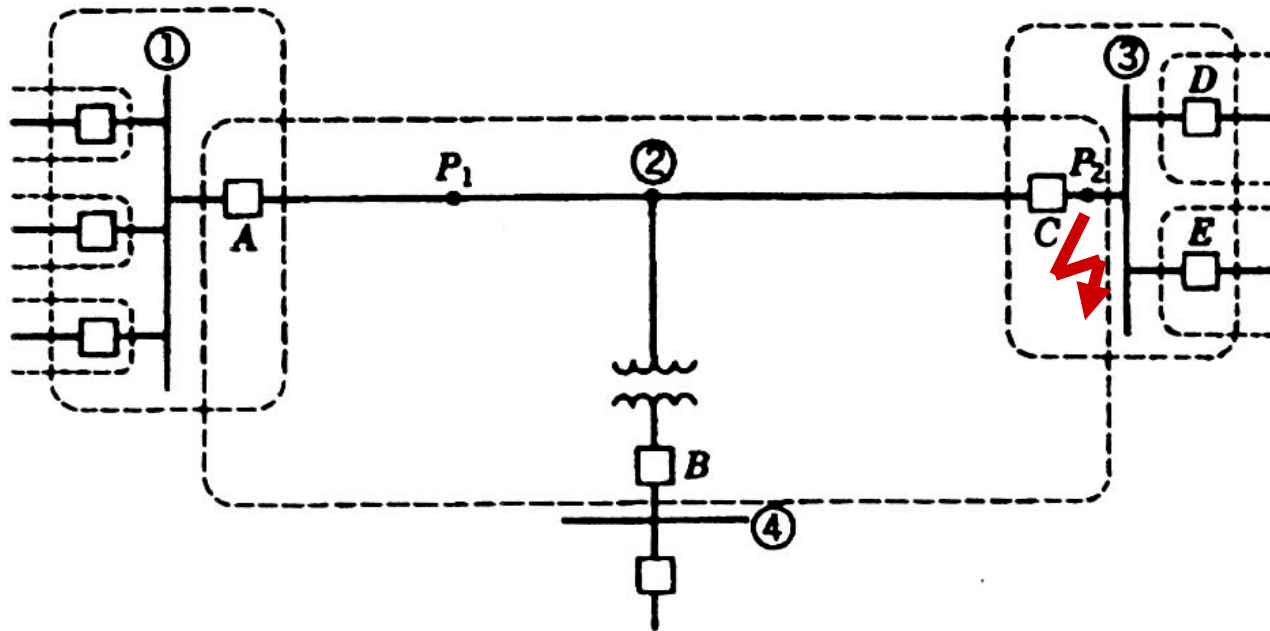




เกิดฟอลต์ที่จุด P_1

- พิจารณาว่าตำแหน่งฟอลต์อยู่ในโซนไหนบ้าง
- อุปกรณ์ตัดตอนทุกตัวที่อยู่ใน โซนที่มีตำแหน่งฟอลต์จะทำงาน

CB : A, B, C เปิดวงจร



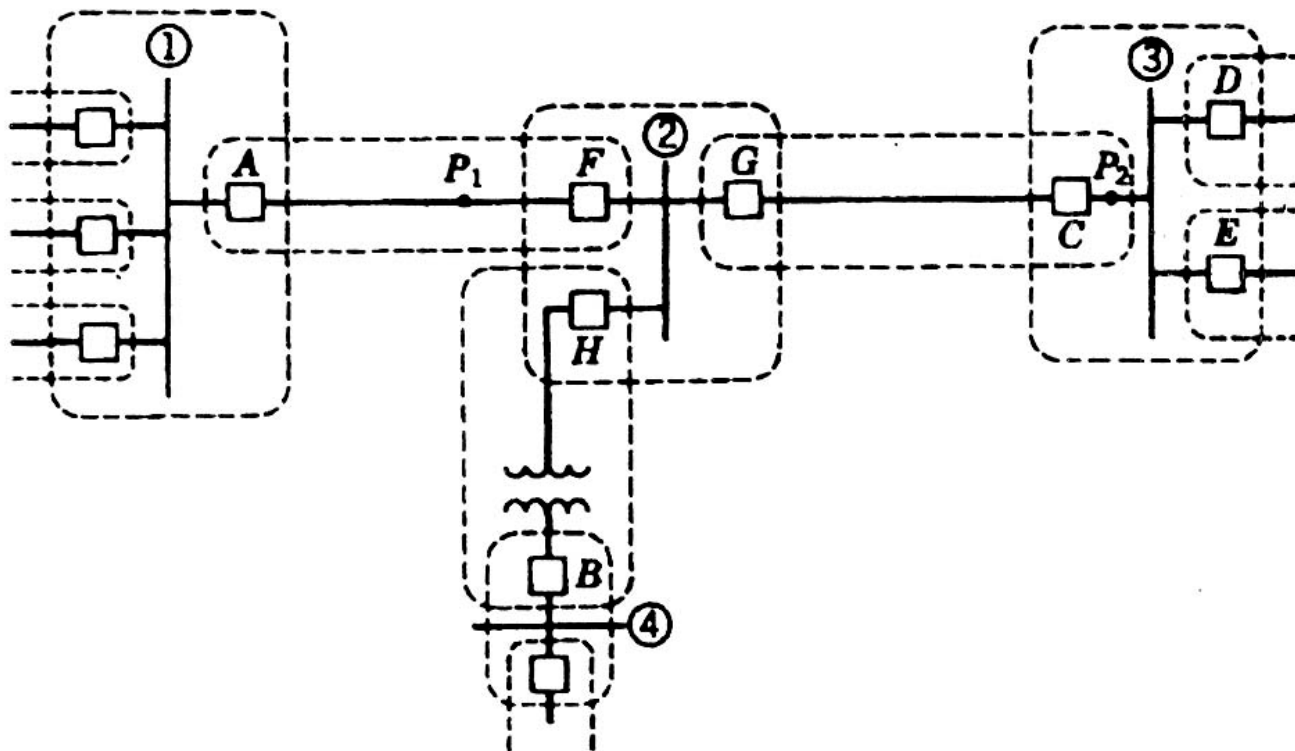
เกิดฟอลต์ที่จุด P_2

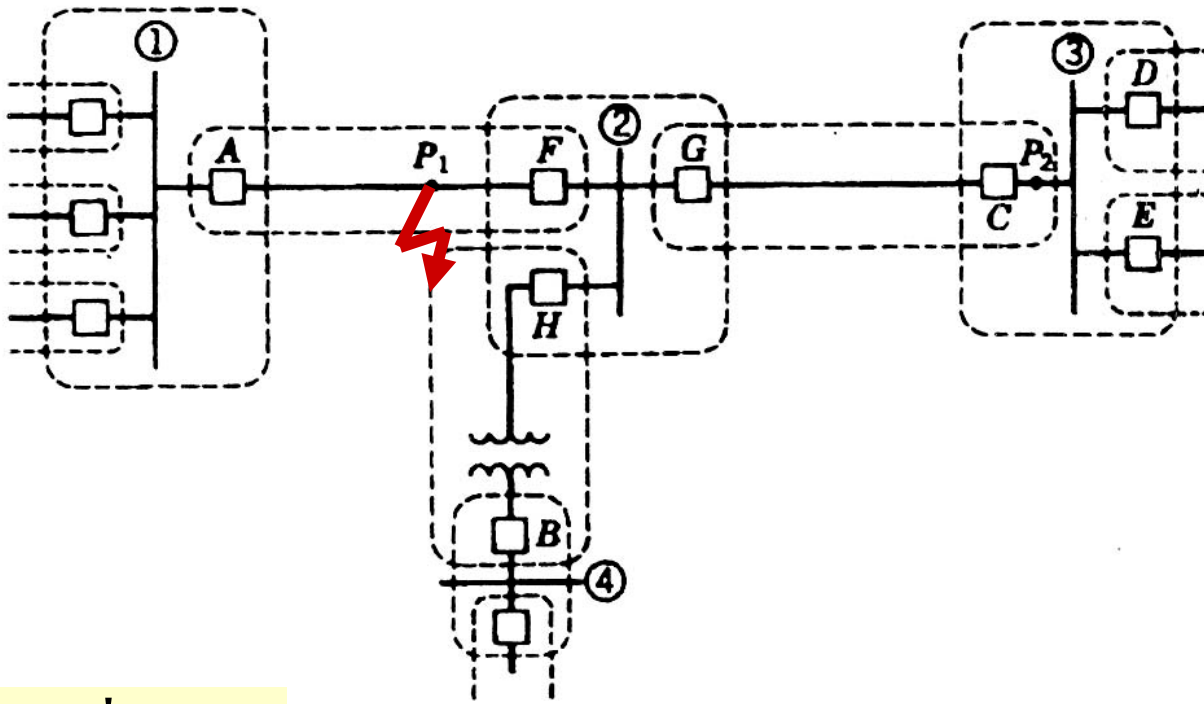
- พิจารณาว่าตำแหน่งฟอลต์อยู่ในโซนไหนบ้าง
- อุปกรณ์ตัดตอนทุกตัวที่อยู่ใน โซนที่มีตำแหน่งฟอลต์จะทำงาน

CB : A, B, C, D, E เปิดวงจร

ตัวอย่างที่ 2

จากระบบในรูป อุปกรณ์ตัดตอนไหนจะเปิดวงจรเมื่อเกิดฟอลต์ที่จุด P_1 และ P_2

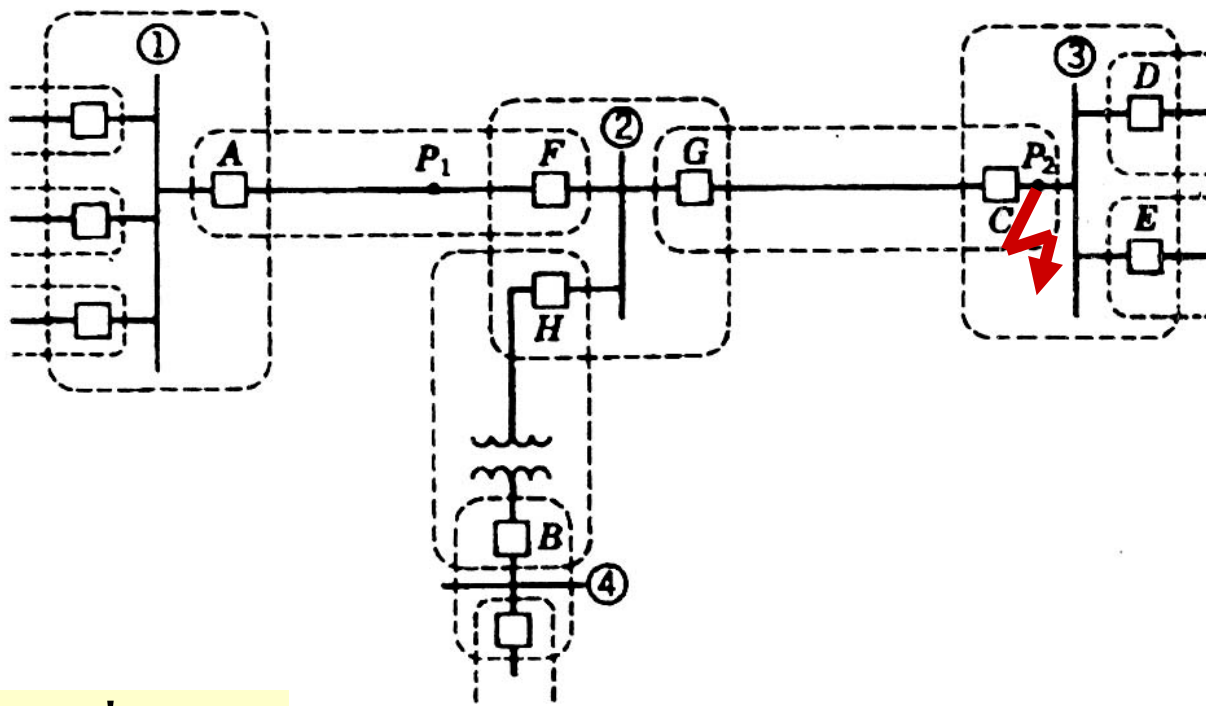




เกิดฟอลต์ที่จุด P_1

- พิจารณาว่าตำแหน่งฟอลต์อยู่ในโซนไหนบ้าง
- อุปกรณ์ตัดตอนทุกตัวที่อยู่ใน โซนที่มีตำแหน่งฟอลต์จะทำงาน

CB : A, F เปิดวงจร



เกิดฟอลต์ที่จุด P_2

- พิจารณาว่าตำแหน่งฟอลต์อยู่ในโซนไหนบ้าง
- อุปกรณ์ตัดตอนทุกตัวที่อยู่ใน โซนที่มีตำแหน่งฟอลต์จะทำงาน

CB : G, C, D, E เปิดวงจร

ตรรกการออกแบบรีเลย์

- ต้องแยกได้ระหว่างฟอลต์ในโซนป้องกัน กับภาระอื่นๆ ทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นได้
- ต้องสังักตรวจจร หรือ “**ทริป (Trip)**” ได้อย่างรวดเร็ว
- เชื่อถือได้ทุกครั้ง
 - ทริปเมื่อเกิดฟอลต์ในโซน
 - ไม่ทริป (Block) เมื่อเกิดฟอลต์นอกโซน
- รีเลย์แต่ละประเภท จะมีหลักการตัดสินใจแตกต่างกัน ต้องออกแบบระบบป้องกันให้เหมาะสมที่สุด

ประเภทของรีเลย์

รีเลย์ที่ใช้ในระบบป้องกัน มี 5 ประเภท คือ

1. รีเลย์ขนาด (Magnitude Relays)
2. รีเลย์ทิศทาง (Direction Relays)
3. รีเลย์อัตราส่วน (Ratio Relays)
4. รีเลย์แตกต่าง (Differential Relays)
5. รีเลย์ไพลอต (Pilot Relays)

รีเลย์ขนาด (Magnitude Relays)

- ที่ใช้กันมากคือ **รีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relays)**
- ตอบสนองต่อขนาดของกระแสขาเข้า ถ้ามีขนาดสูงกว่าค่าที่ตั้ง (Setting) จะสั่งทริป

$$|I_f| > |I_p|$$

ทริป

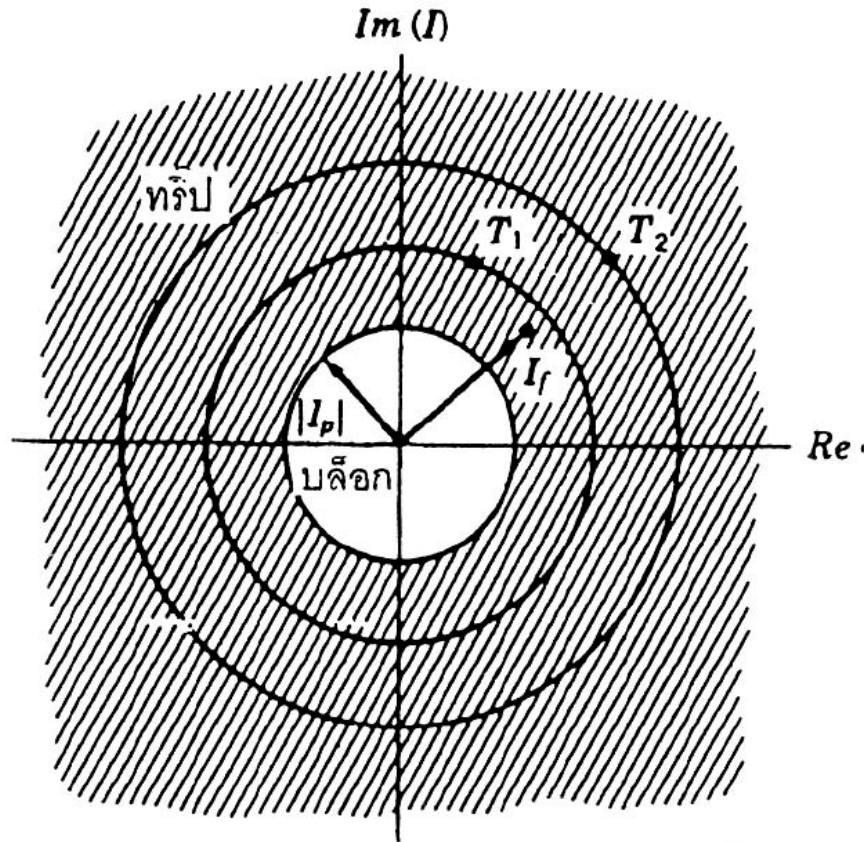
$$|I_f| < |I_p|$$

บล็อก

$|I_f|$ - ขนาดกระแสฟอลต์ด้านทุติยภูมิของ CT

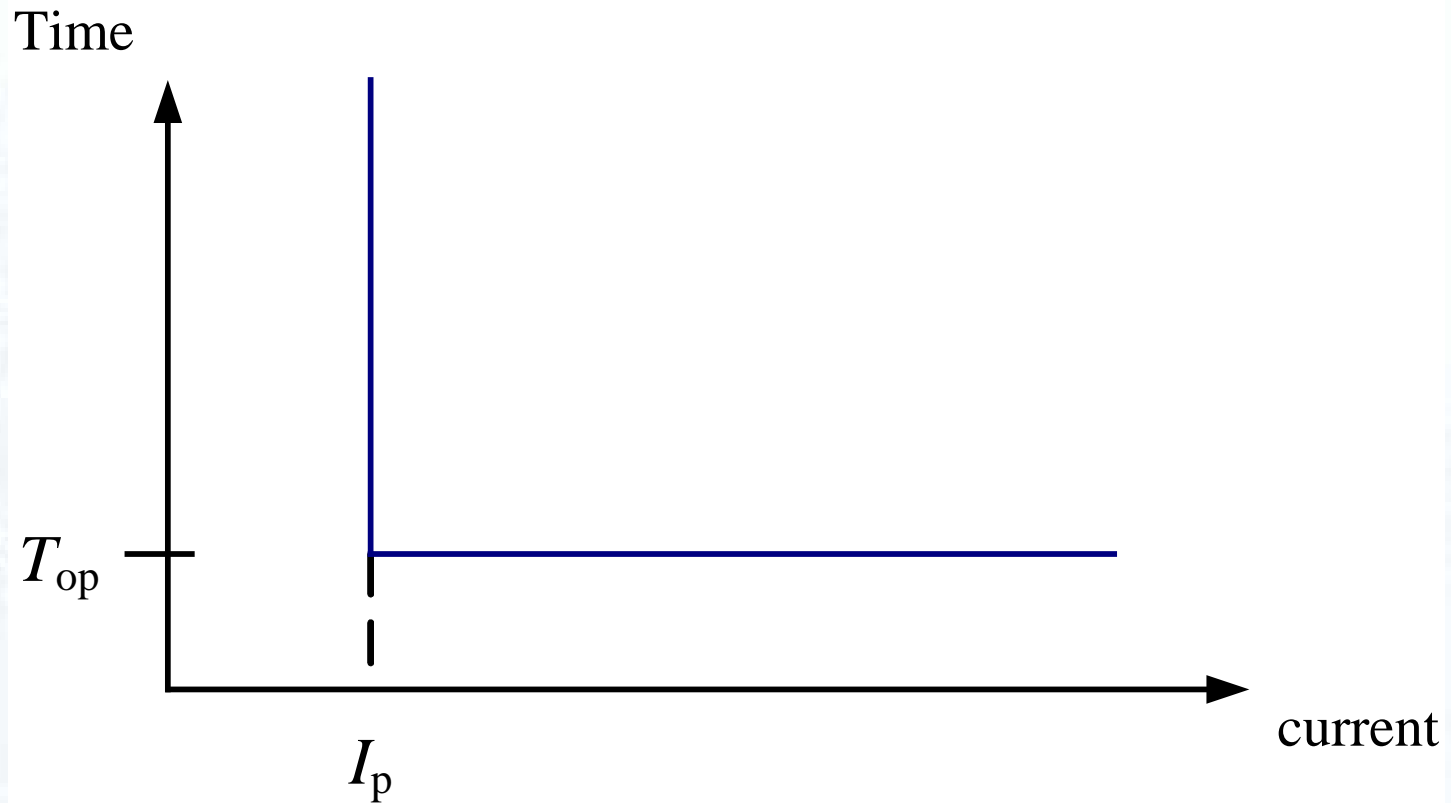
$|I_p|$ - ขนาดกระแสตั้ง (Pick-up) ของรีเลย์

กราฟแสดงการทริปและบล็อกของรีเลย์กระแสเกิน



- รีเลย์แบบทำงานทันทีทันใด $\rightarrow T_1 = T_2$
- รีเลย์แบบทำงานหน่วงเวลา $\rightarrow T_1 > T_2$

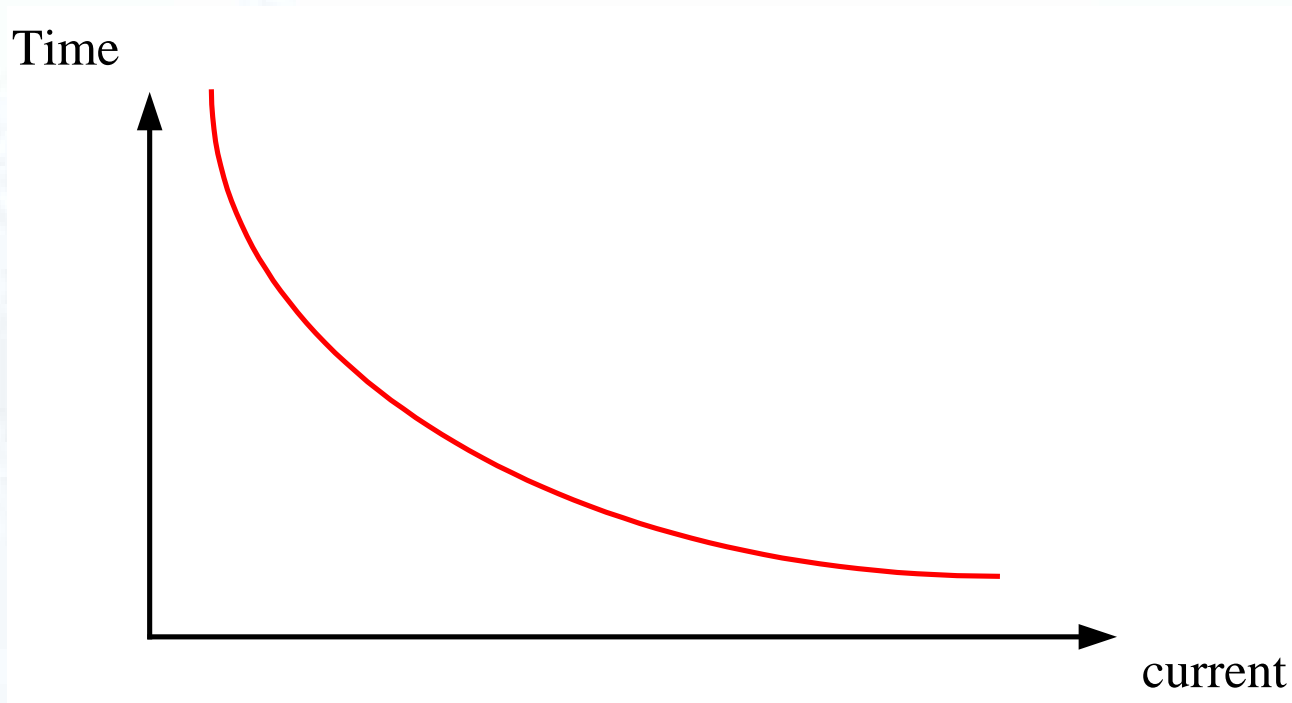
1. รีเลย์กระแสเกินแบบทำงานทันทีทันใด (Instantaneous Overcurrent Relays)



2. รีเลย์กระแสเกินแบบทำงานหน่วงเวลา (Time Overcurrent Relays)

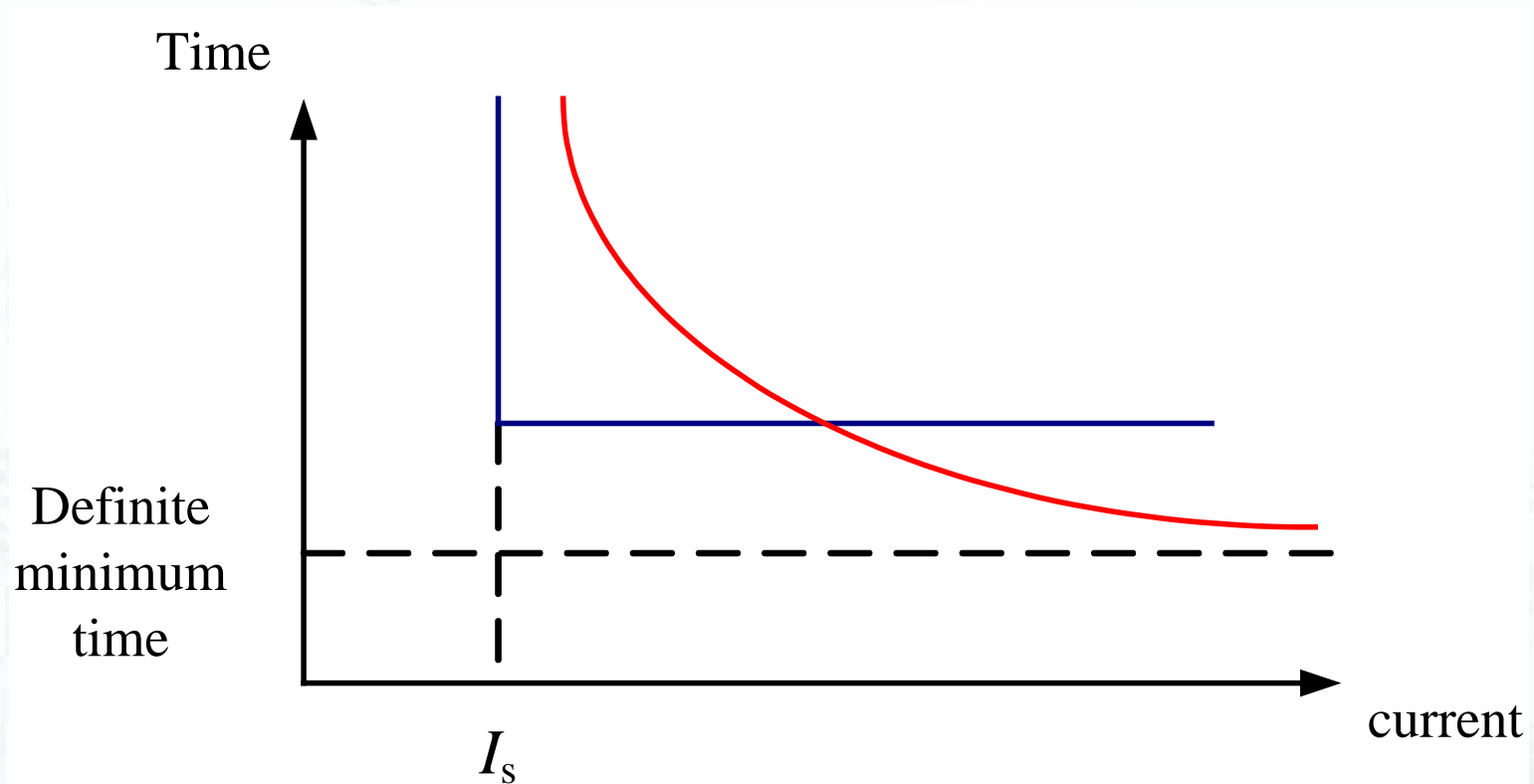
$$T = \phi(|I_f| - |I_p|)$$

เมื่อ T คือ ความเร็วการทำงาน



3. รีเลย์กระแสเกินแบบผสม

(Inverse Definite Minimum Time (IDMT) Overcurrent Relays)



การปรับตั้ง (Setting) การทำงานของรีเลย์กระแสเกิน

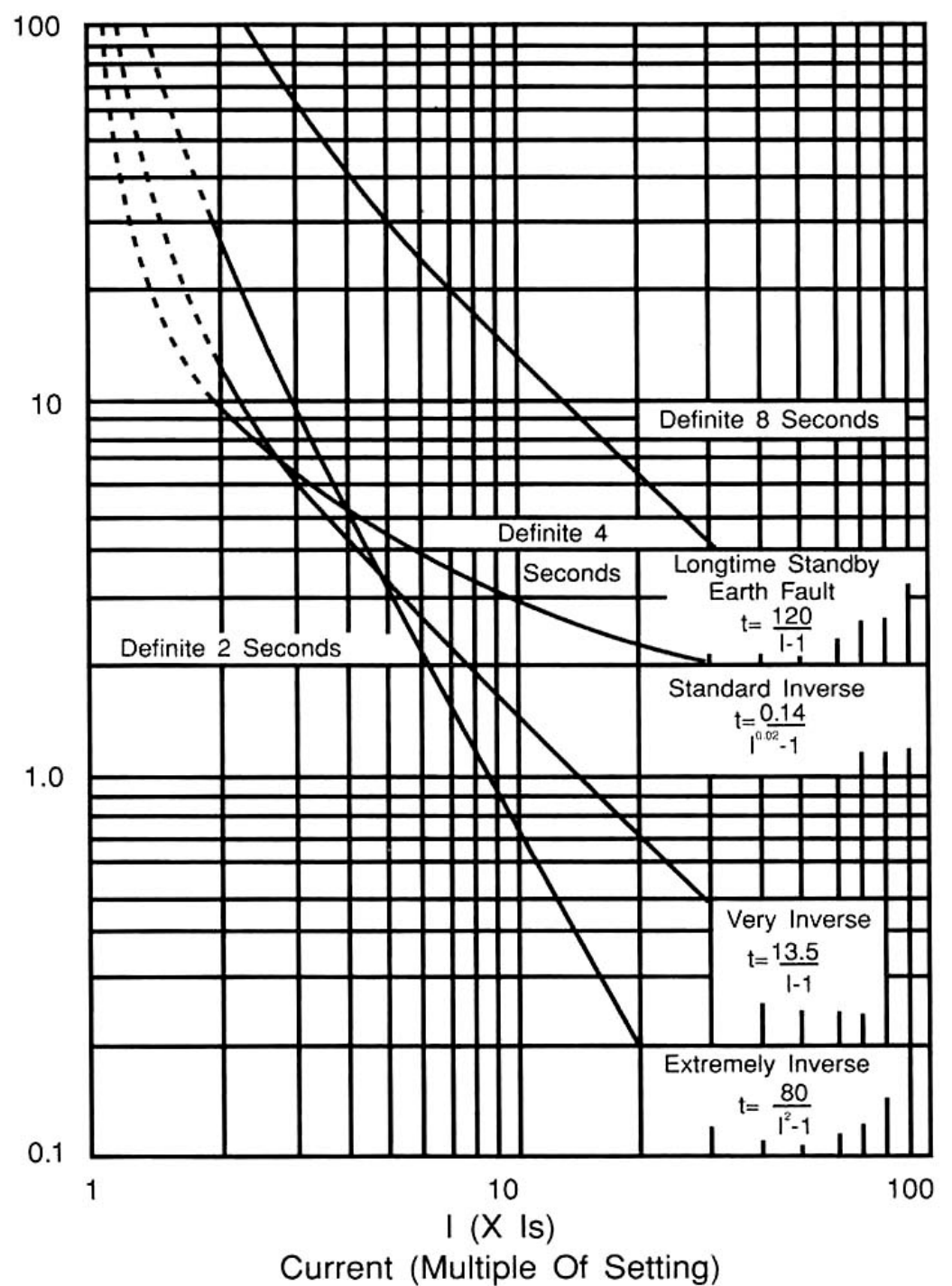
- ตั้งค่ากระแสตั้ง I_p โดยปรับแทปด้านขดลวดขาเข้า CT โดยค่าแทปมีให้เลือกค่า 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0, 12.0 A
- เส้นลักษณะสมบัติจะมีกระแสฟอลต์ I_f จะเป็นจำนวนเท่าของกระแสตั้ง
- ลักษณะเวลาผกผัน (Inverse-Time) สามารถปรับได้ โดยปรับตัวหมุนปรับตั้งเวลา (Time Dial Setting)

- ค่าเวลาต่ำสุด → รีเลย์ทำงานไวสุด

- ค่าเวลามากสุด → รีเลย์ทำงานช้าสุด

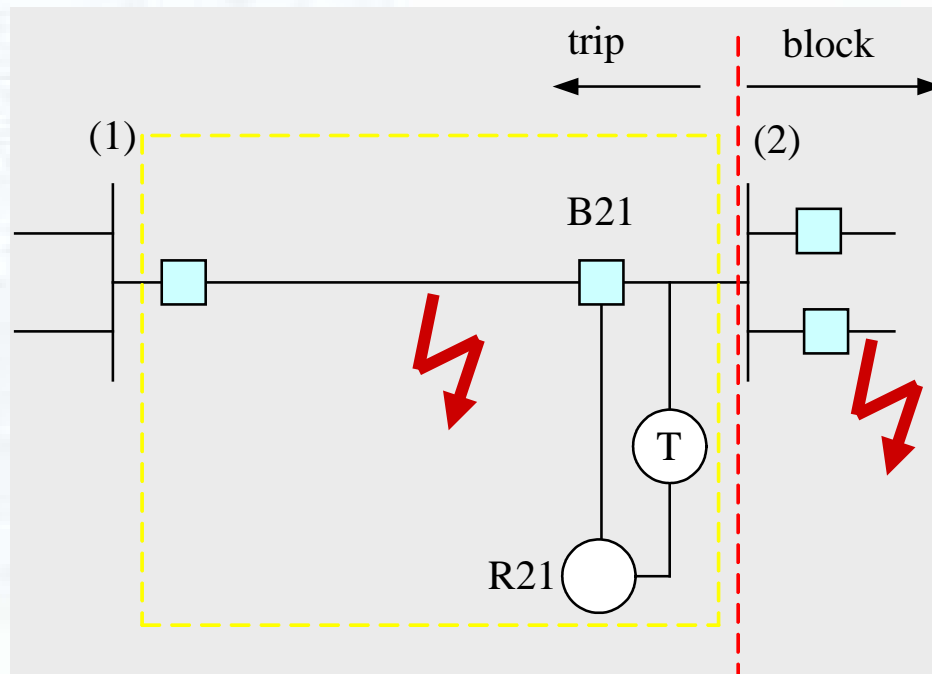
กราฟคุณลักษณะของรีเลย์

Operating Time, t (Seconds)



รีเลย์ทิศทาง (Directional Relays)

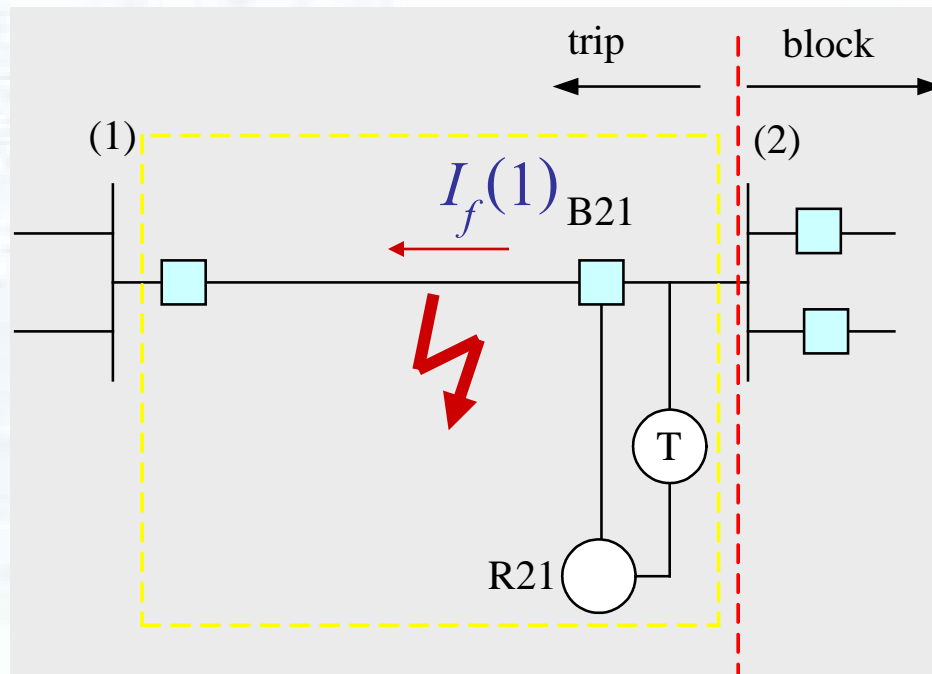
- ใช้ในกรณีที่โซนป้องกันครอบคลุมเพียงด้านใดด้านหนึ่งของตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์
- รีเลย์จะทำงานเมื่อเกิดฟอลต์เพียงด้านเดียวของรีเลย์เท่านั้น



การทำงานของรีเลย์ทิศทาง

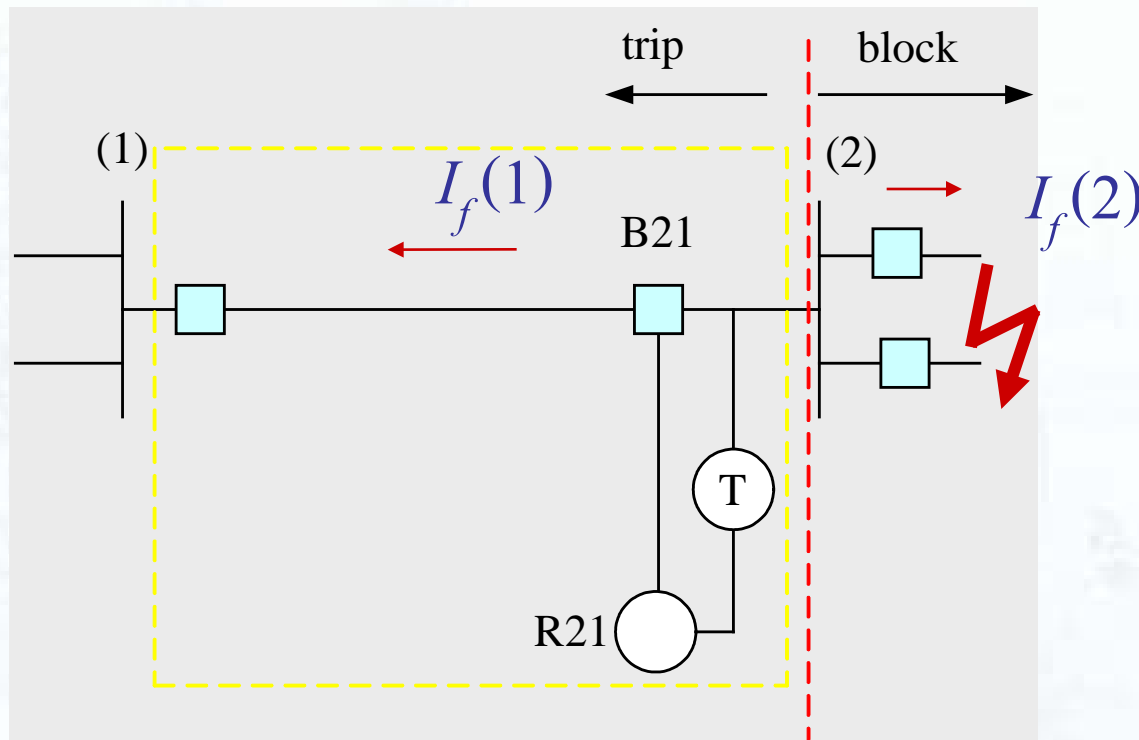
กรณีที่ 1 (อ้างอิง)

- เมื่อเกิดฟอลต์ด้านซ้ายของรีเลย์ กระแสฟอลต์จะไหลจากบัส 2 ลงสู่ฟอลต์
- เนื่องจากสายส่งเป็นค่ารีแอกทีฟ มุมเฟสของกระแสฟอลต์จะล้าหลังแรงดันบัส 2 เกือบๆ 90°

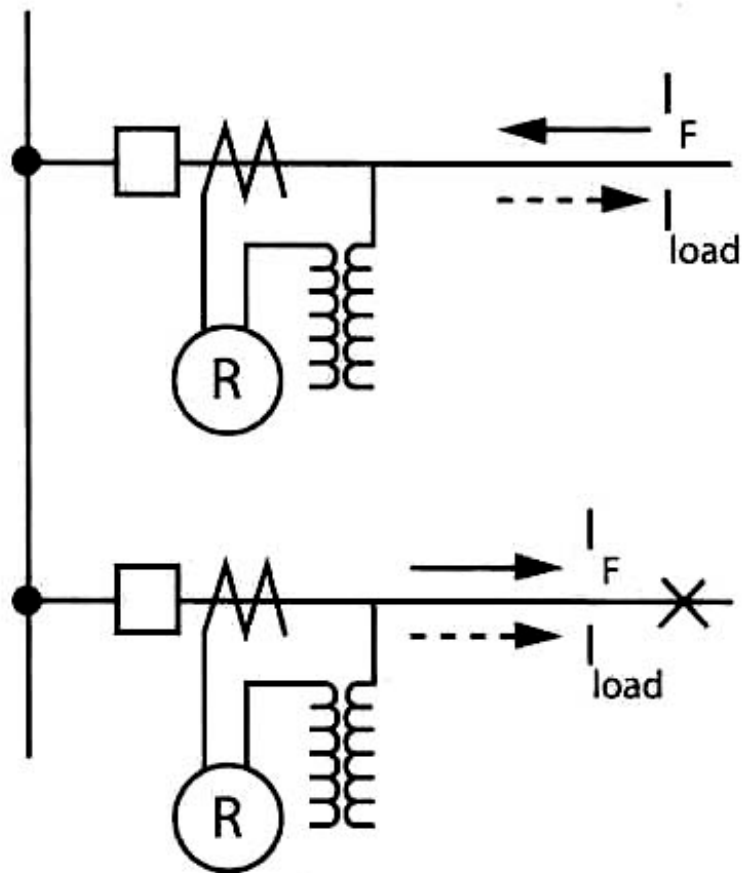
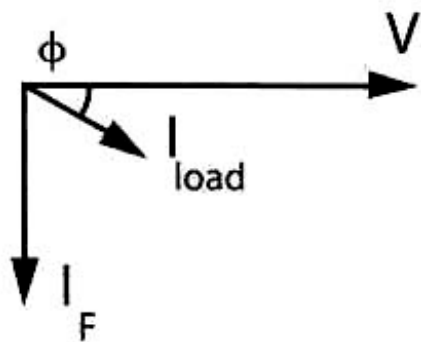
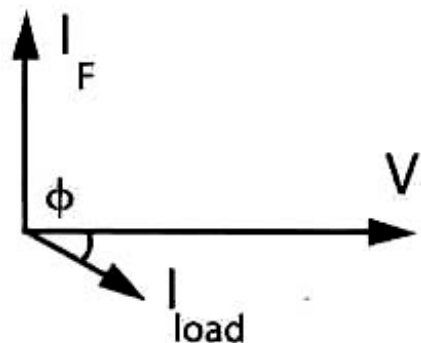


กรณีที่ 2

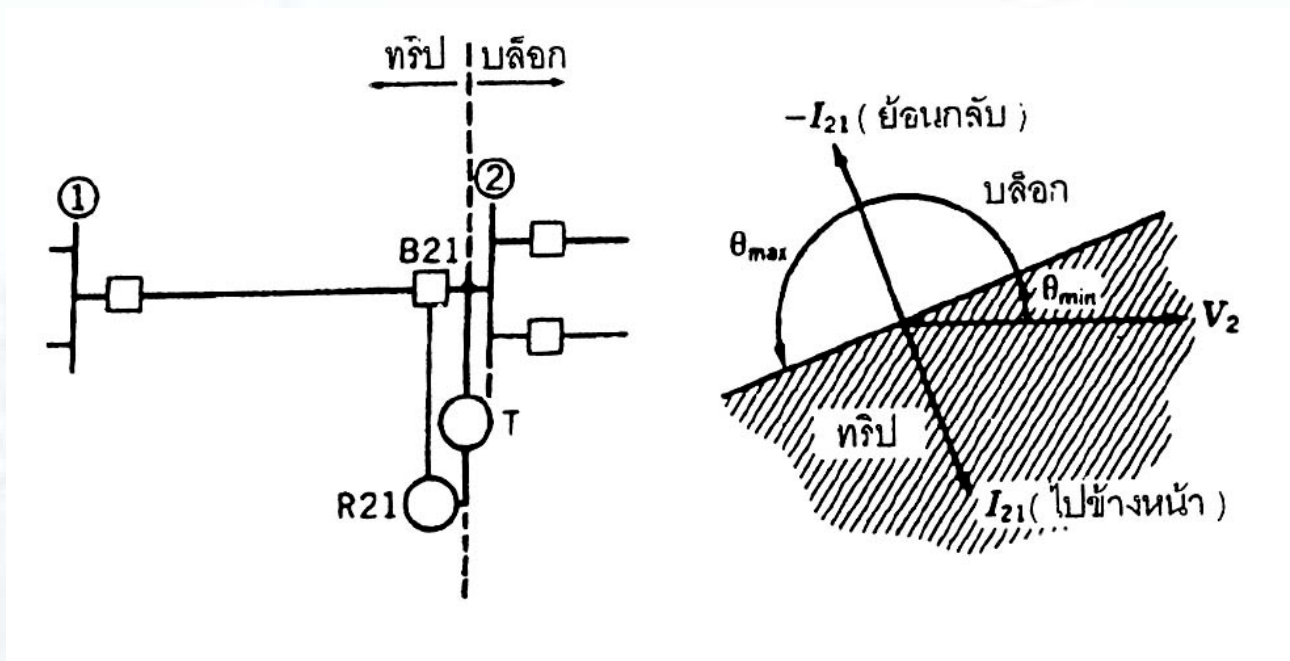
- เมื่อเกิดฟอลต์ด้านขวาของรีเลย์ กระแสฟอลต์จะไหลทิศทางตรงข้ามกับกรณีที่ 1
- เนื่องจากสายส่งเป็นค่ารีแอคทีฟ มุมเฟสของกระแสฟอลต์จะนำหน้าแรงดันบัส 2 เกือบๆ 90°



การเปรียบเทียบมุมเฟส

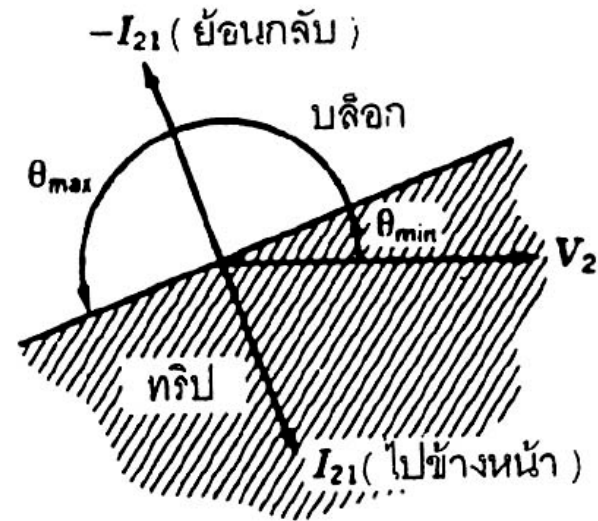
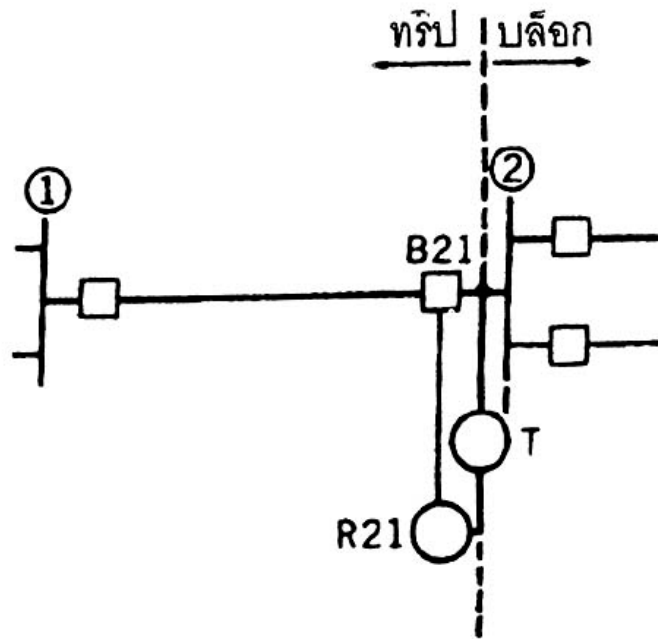


❖ การทำงานของรีเลย์ทิศทาง อธิบายได้ด้วยแผนผังเฟสเซอร์บนระนาบคอมเพล็กซ์ (Complex Plan)



V_2 คือ ปริมาณอ้างอิง เรียกว่า “ปริมาณโพลาไรซิง (polarizing)”

$\theta_{\min}, \theta_{\max}$ คือ มุมที่กำหนดบริเวณการทำงานของรีเลย์ทิศทาง



$$\theta_{\min} > \theta_{op} > \theta_{\max}$$

ทริป

$$\theta_{\min} < \theta_{op} < \theta_{\max}$$

โยธา

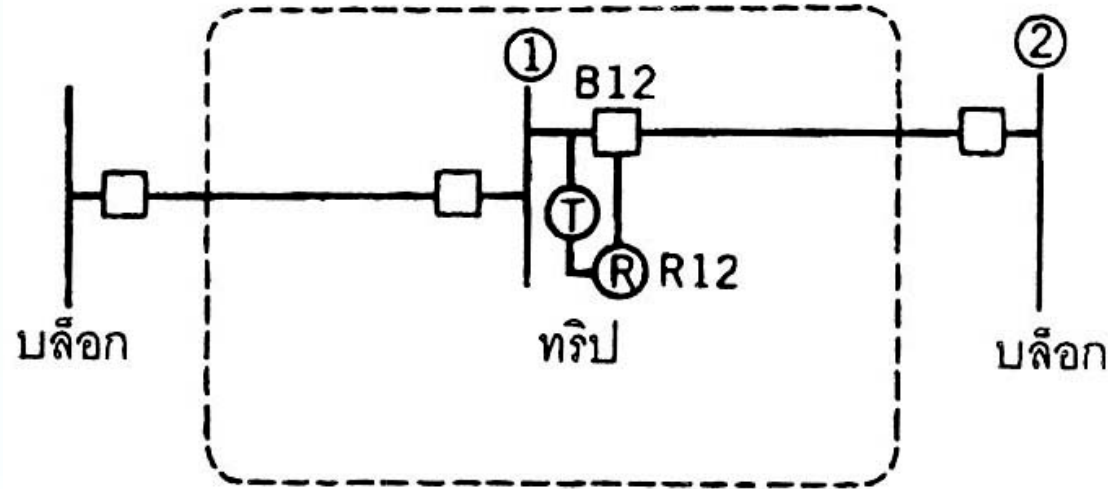
เมื่อ θ_{op} คือ มุมของกระแสที่วัดเทียบกับแรงดันโพล่าไรซิง

รีเลย์อัตราส่วน (Ratio Relays)

- สามารถกำหนดโซนป้องกันได้จากระยะทางของจุดเกิดฟอลต์กับจุดติดตั้งรีเลย์
- ระยะทางจะเป็นอัตราส่วนกับค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดเกิดฟอลต์กับจุดติดตั้งรีเลย์

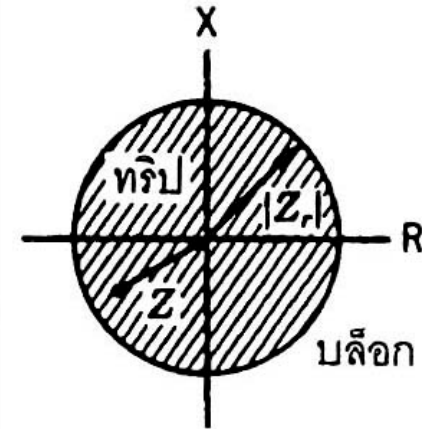
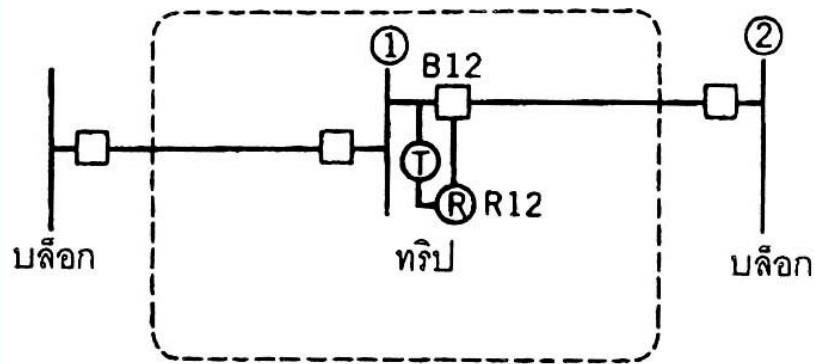
→ ตั้งค่ารีเลย์ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ (Z_r)

- เมื่อเกิดฟอลต์ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์เห็น จะน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของค่าที่ตั้งไว้



- **โซนป้องกันของรีเลย์** คือ ความยาวของสายจากบัส 1 ถึงจุดที่มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่าค่าที่ตั้ง $|Z_r|$
- **เมื่อเกิดฟอลต์** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแส วัดที่จุด R12 เป็น

$$Z = \frac{V_1}{I_{12}}$$



- การทำงานของรีเลย์ กำหนดให้

$$|Z| < |Z_r|$$

ทริป

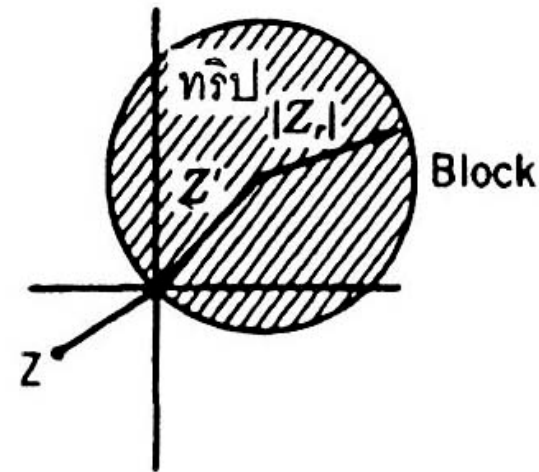
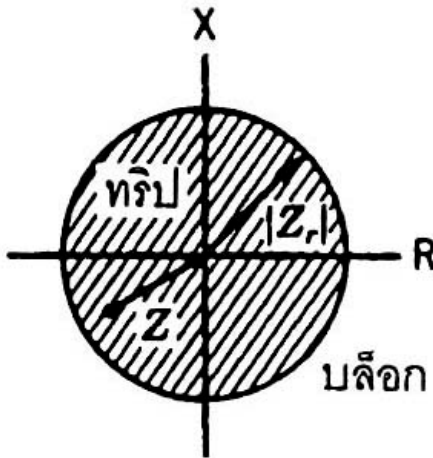
$$|Z| > |Z_r|$$

บล็อก

- เรียกรีเลย์ประเภทนี้ว่า

- รีเลย์อิมพีแดนซ์ (Impedance Relay)
- รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay)

- สามารถตัดแปลงรีเลย์อิมพีแดนซ์ โดยเลื่อนจุดศูนย์กลางกลางของวงกลมออก



- การทำงานของรีเลย์ เปลี่ยนเป็น

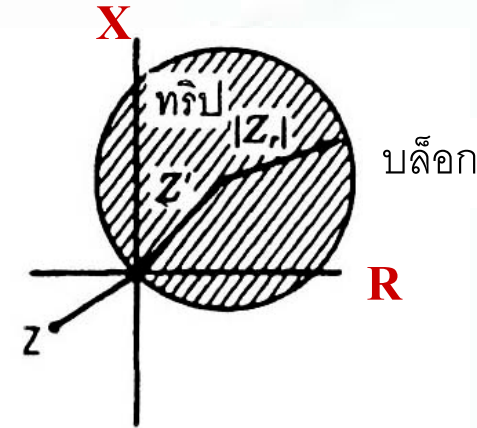
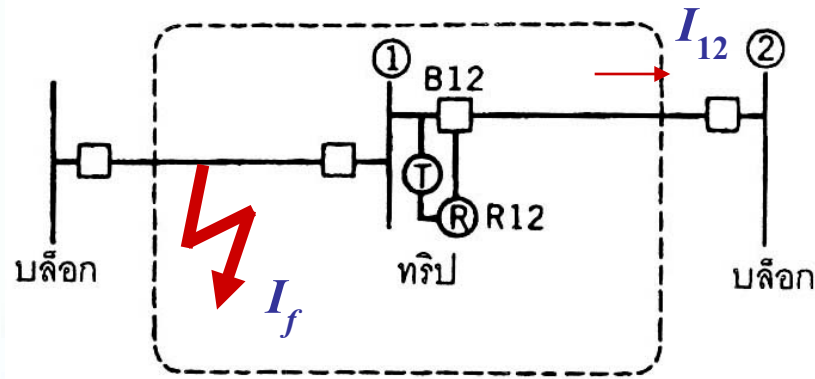
$$|Z - Z'| < |Z_r|$$

ทริป

$$|Z - Z'| > |Z_r|$$

บล็อก

❖ กรณีเลือกให้เส้นวงกลมผ่านจุดศูนย์ (Origin)



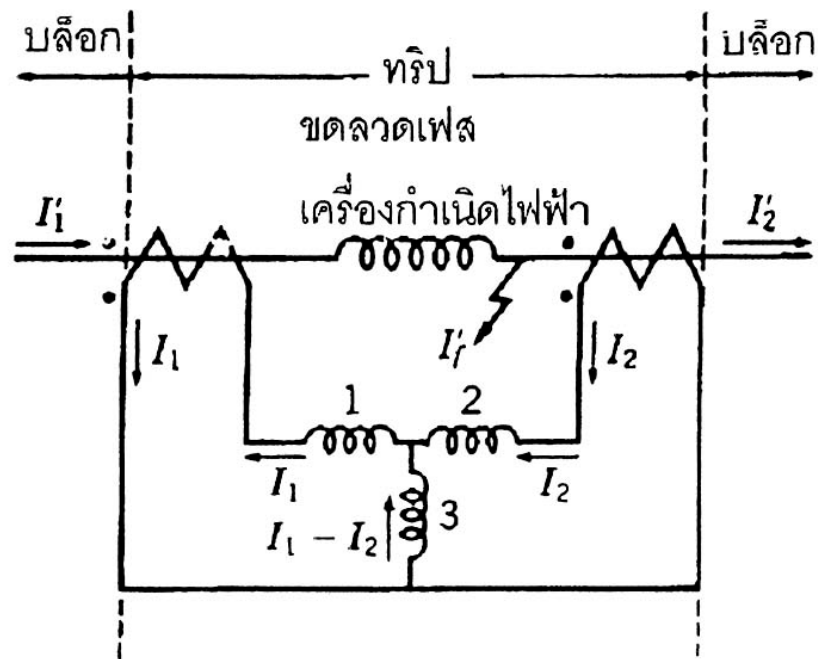
- รีเลย์จะไม่สั่งทริป เมื่อเกิดฟอลต์ด้านซ้ายมือของบัส 1 ไม่ว่าจะเกิดใกล้กับบัสมากแค่ไหน → ทำงานเป็นรีเลย์ทิศทาง

เกิดฟอลต์บัส 1 → $Z = \frac{V_1}{(-I_f)}$ → ควอดแดรนท์ที่ 3 → รีเลย์ไม่สั่งทริป

- กรณีนี้ เรียกเป็น รีเลย์โมห์ (Mho Relays)

รีเลย์ผลต่าง (Differential Relays)

- ใช้กับโซนป้องกันที่เป็นพื้นที่แคบๆ รอบๆ จุดที่ติดตั้งรีเลย์
- ใช้หลักการตรวจสอบต่อเนื่องของกระแสที่ไหลเข้าและออกจากโซนป้องกัน
- เหมาะสำหรับใช้ป้องกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น



ภาวะปกติ

$$I_1 - I_2 = 0$$

เกิดฟอลต์ภายในโซน

$$I_1 - I_2 = I_f \rightarrow \text{ทริป}$$

- ในทางปฏิบัติ CT มักมีความคลาดเคลื่อนขออัตราส่วนได้
- การทำงานของรีเลย์จึงกลายเป็น

$$|I_1 - I_2| > |I_p|$$

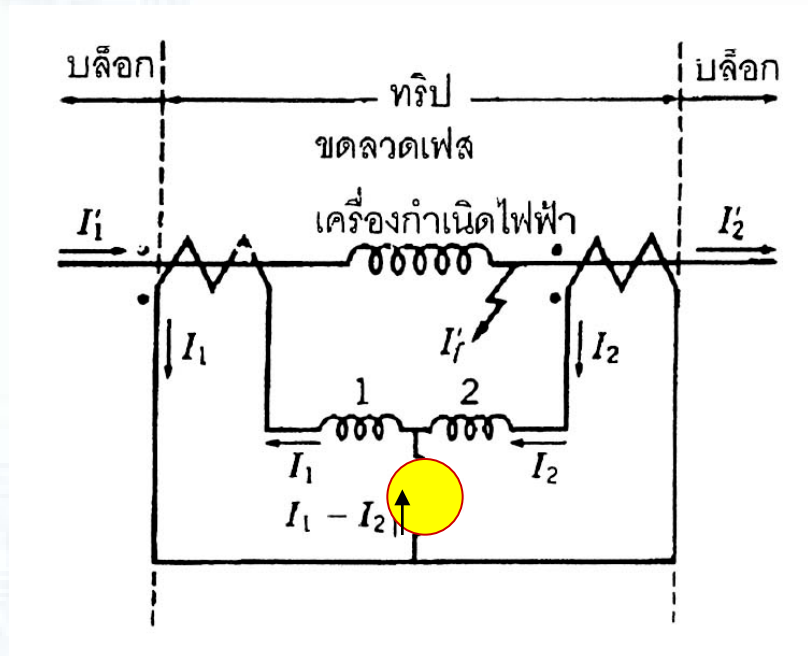
ทริป

$$|I_1 - I_2| < |I_p|$$

บล็อก

โดยที่ I_p มีค่าต่ำๆ

- ในการใช้งาน จะติดตั้งรีเลย์ที่ขดลวด 3



- เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของ CT สามารถออกแบบรีเลย์ ทำงานเป็น

กระแสดทริป

$$|I_1 - I_2| > k |(I_1 + I_2)/2|$$

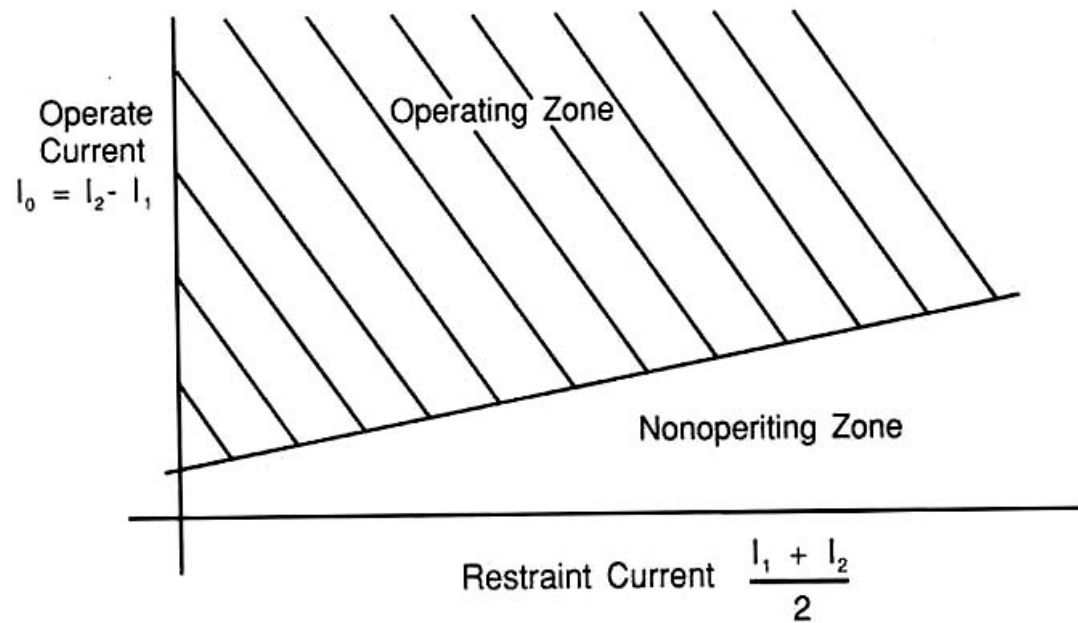
ทริป

กระแสรั้ง

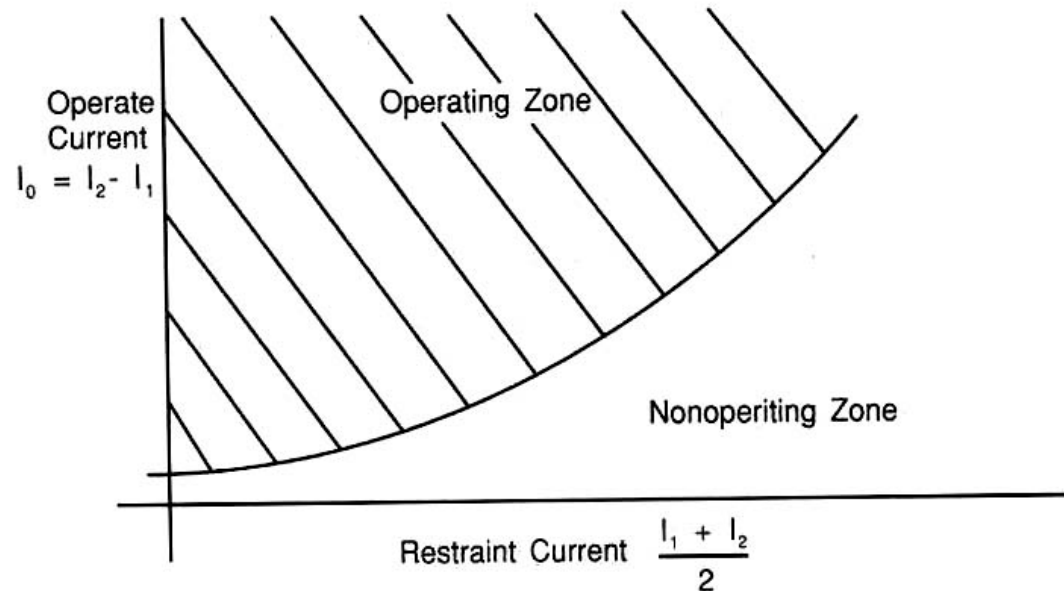
$$|I_1 - I_2| < k |(I_1 + I_2)/2|$$

บัสบาร์

Fixed Percentage Relay

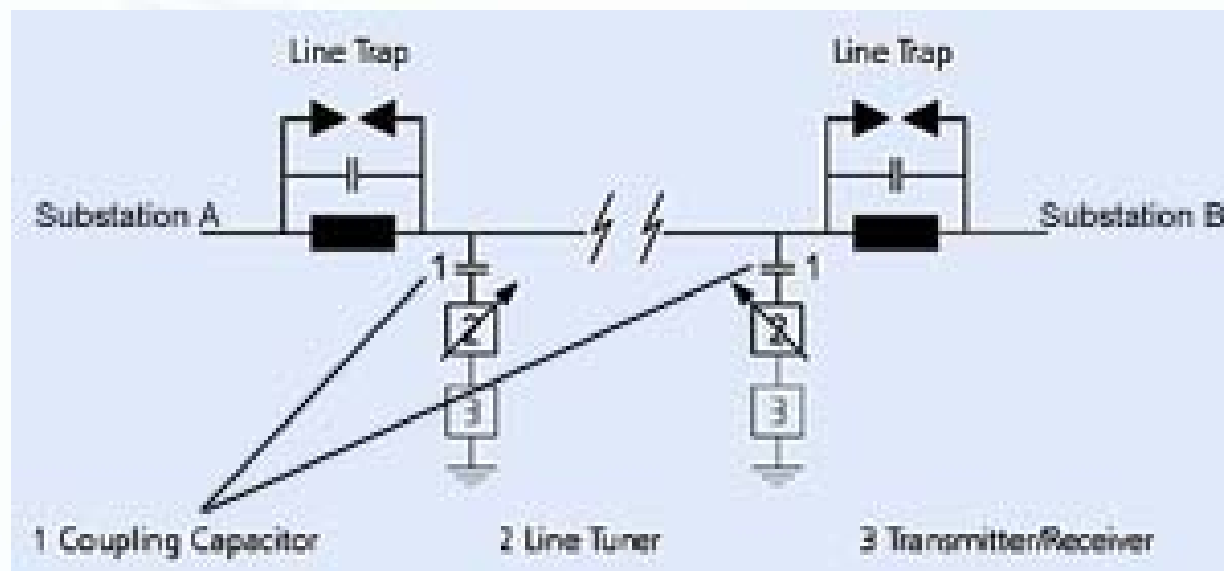


Variable Percentage Relay

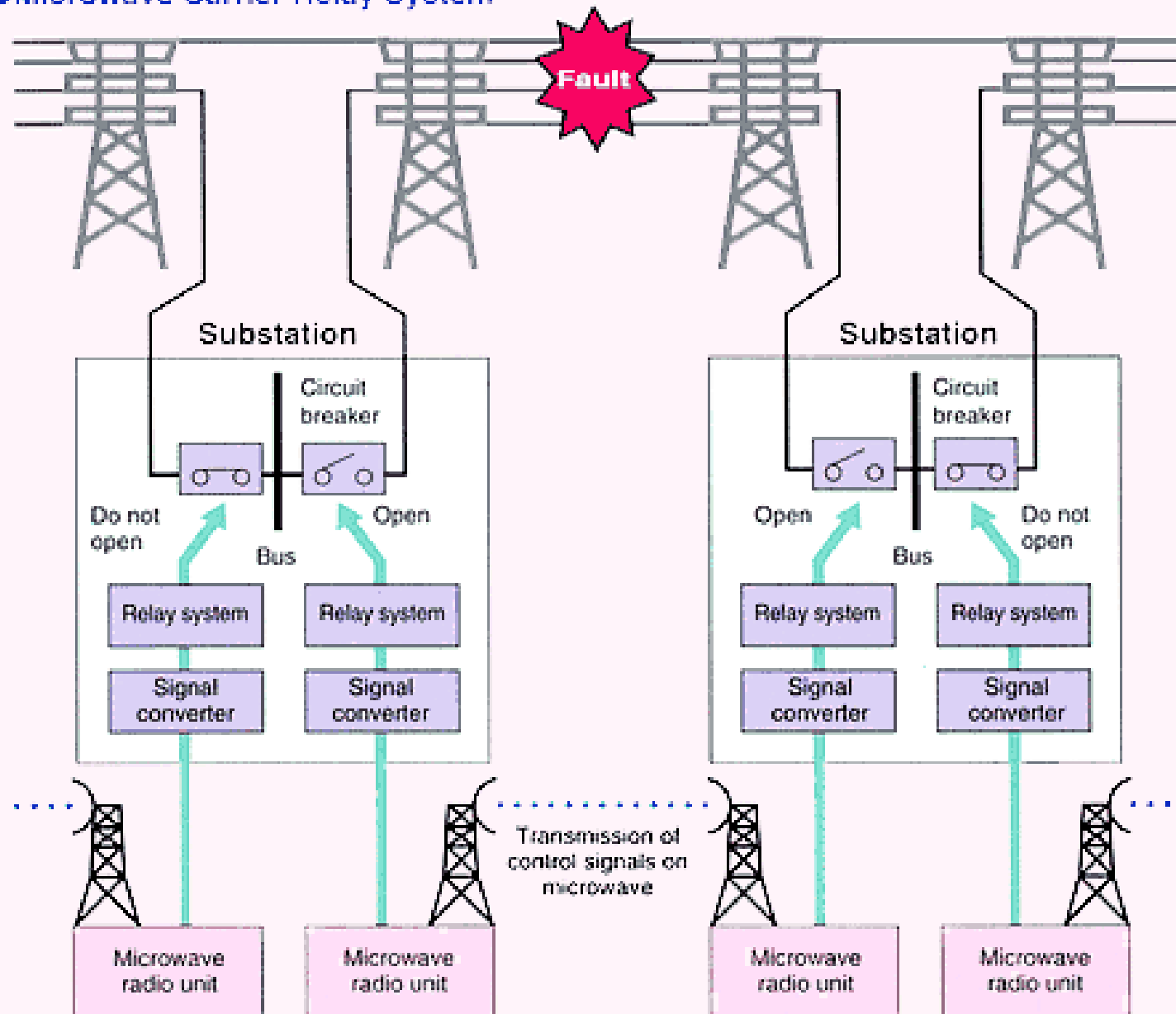


รีเลย์ไพลอต (Pilot Relays)

- ใช้กับโซนป้องกันที่มีบริเวณกว้างไกล เช่น ป้องกันสายส่งไฟฟ้า
- แก้ปัญหาสัญญาณกระแสที่เข้าและออกจากโซนที่ผ่าน CT แล้ว ห่างไกลกัน (หลายร้อยกิโลเมตร)
- ใช้เทคนิคการสื่อสารข้อมูล นำข้อมูลที่ปลายด้านหนึ่งส่งไปให้อุปกรณ์ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของโซนป้องกัน
- สื่อที่ใช้ส่งสัญญาณ อาจเป็นวงจรคู่สายโทรศัพท์, PLC (Power Line Carrier) หรือ ไมโครเวฟ



● Microwave Carrier Relay System



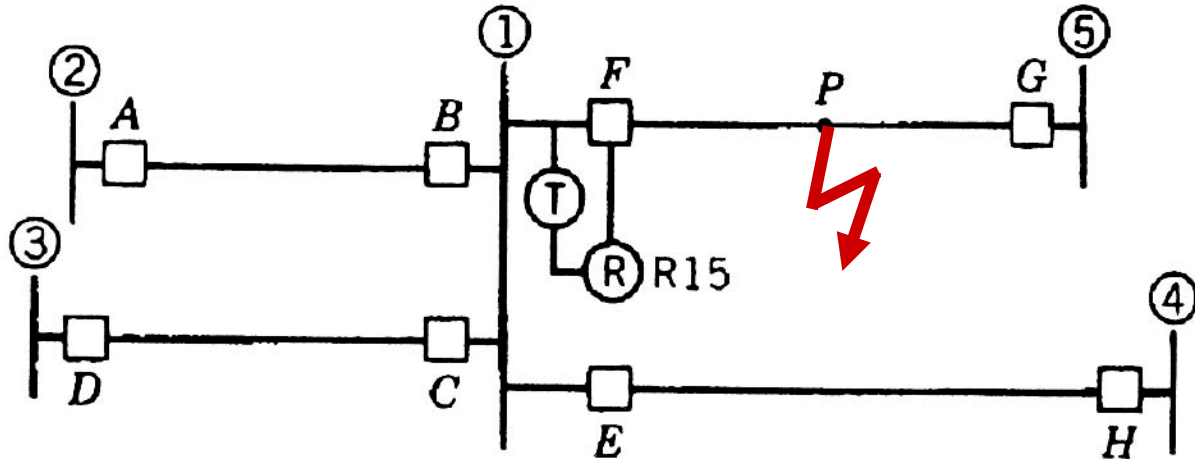
ระบบป้องกันระยะแรกและสำรอง

ระบบป้องกันระยะแรก (Primary Protection System)

- เป็นระบบที่สามารถแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบได้เร็วที่สุด
- ทำให้พื้นที่ดับไฟมีน้อยที่สุด

ระบบป้องกันสำรอง (Back Up Protection System)

- ทำงาน เพื่อกรณีที่ระบบป้องกันระยะแรกล้มเหลวเท่านั้น



Primary System : CB F และ G เปิดวงจร (ทริป)

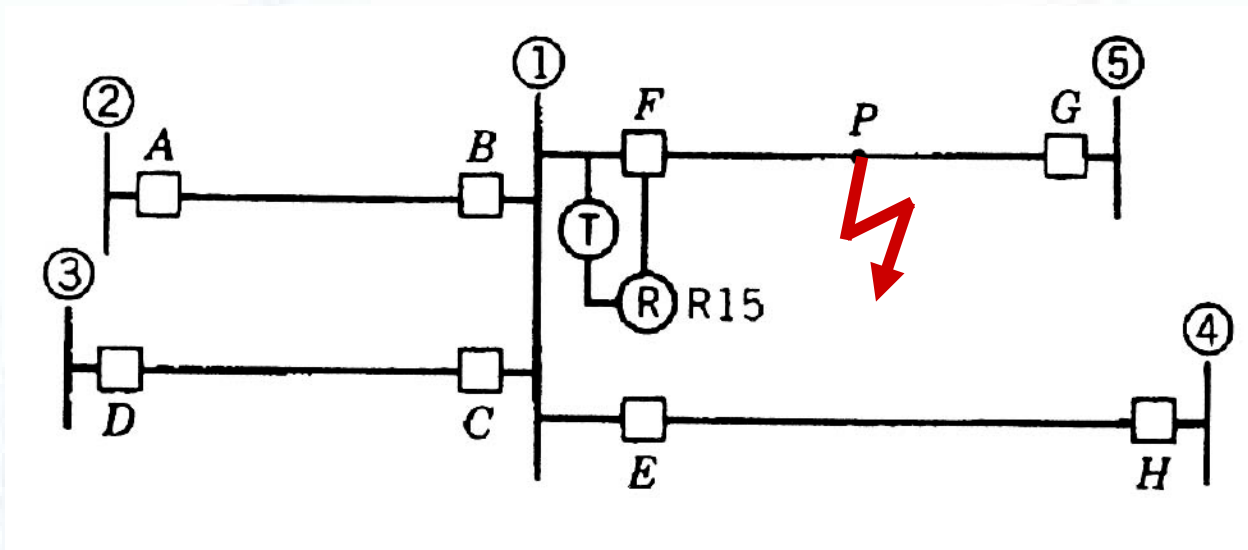
• กรณี CB F ไม่ทำงาน

Back up System : CB A , D และ H เปิดวงจร (ทริป) เพื่อป้องกัน
 บัส 2,3 และ 4 \rightarrow ไฟฟ้าดับกว้างขึ้น

การออกแบบระบบป้องกันสำรอง

- ทิ้งช่วงเวลาที่เหมาะสมเพียงพอให้ระบบป้องกันหลักได้ทำงานตามที่ถูออกแบบไว้
- หากระบบป้องกันสำรองทำงานเร็วเกินไป จะเกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้างโดยไม่จำเป็น
- การทิ้งช่วงเวลา ให้ระบบป้องกันระยะแรก กับ ระบบป้องกันสำรองให้ทำงานสัมพันธ์กัน เรียกว่า **เวลาหน่วงประสาน (Coordination Time Delay)**

ระบบป้องกันท้องถิ่น (Local Protection System)



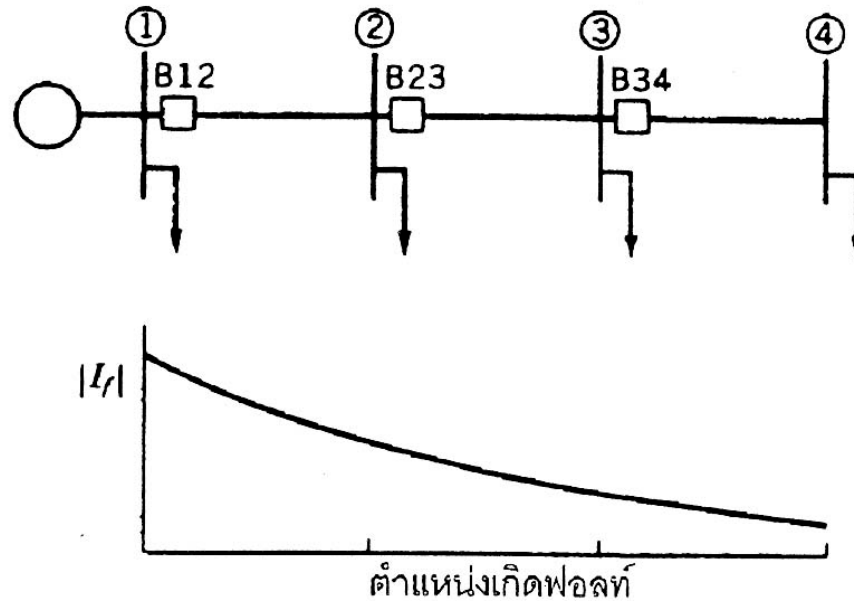
❖ กรณีเบรกเกอร์ F ไม่ทำงาน

Local Protection System : เบรกเกอร์ B, C และ E ที่บัส 1 ทำงาน

ระบบป้องกันสายส่ง

- สายส่งระดับแรงดันยิ่งสูง การออกแบบระบบป้องกันจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น
- สายส่งระดับแรงดันยิ่งสูง ผลกระทบจะกว้างและรุนแรงมากยิ่งขึ้น การออกแบบต้องละเอียดและรอบคอบ และมีการวางระบบป้องกันสำรองซ้ำซ้อนกันมาก
- ระบบป้องกันสายส่ง แบ่งเป็น
 1. ระบบป้องกันสายส่งย่อย (ระดับ MV)
 2. ระบบป้องกันสายส่งแรงสูง (ระดับ HV, VHV)

ระบบป้องกันสายส่งย่อย



- ระบบมักเป็นแบบเรเดียล (Radial System)
- กระแสฟอลต์จะลดลงตามระยะทางที่ห่างจากบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- สามารถใช้ รีเลย์กระแส มาใช้ในระบบป้องกันแบบนี้ได้

วิธีการออกแบบระบบป้องกัน

- หาค่ากระแสฟอลต์มากที่สุด และต่ำที่สุด เพื่อใช้ตั้งค่าเวลาของรีเลย์ กระแสเกินให้เหมาะสม
- ระบบป้องกันระยะแรก (หลัก)
 - รีเลย์บัส 1 ป้องกันสายส่ง 1-2
 - รีเลย์บัส 2 ป้องกันสายส่ง 2-3
 - รีเลย์บัส 3 ป้องกันสายส่ง 3-4
- ระบบป้องกันสำรอง
 - รีเลย์บัส 1 สำรองรีเลย์บัส 2 ป้องกันสายส่ง 2-1
 - รีเลย์บัส 2 สำรองรีเลย์บัส 3 ป้องกันสายส่ง 3-4

หลักการออกแบบระบบป้องกันสำรอง

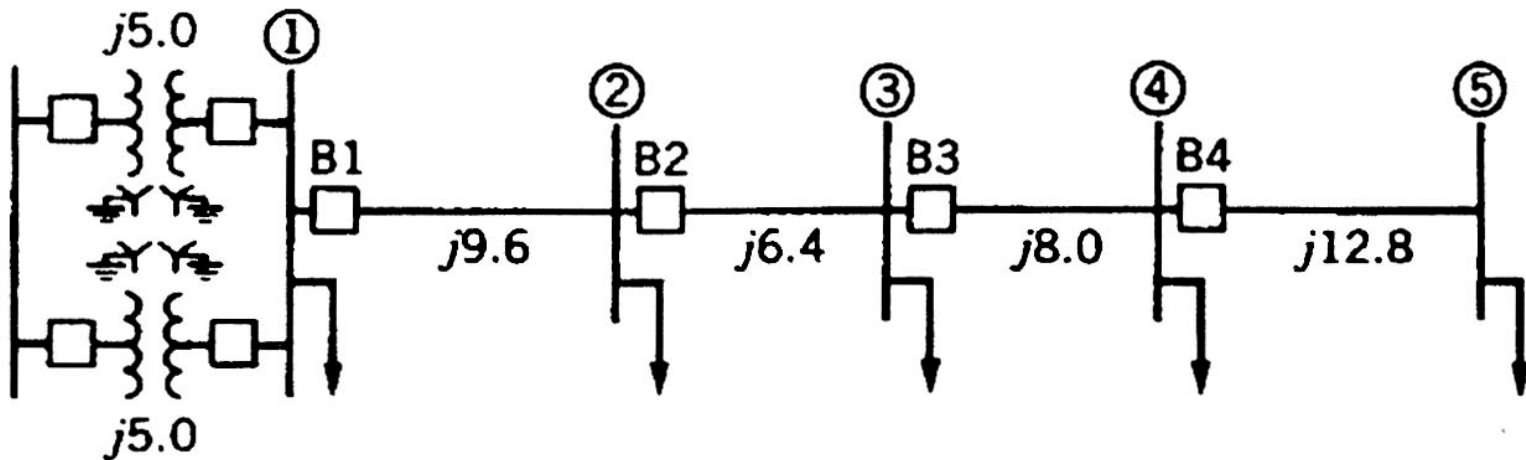
กำหนดให้รีเลย์ X ใช้สำรอง รีเลย์ Y (อยู่ด้านปลายทาง)

การตั้งค่ารีเลย์ X ทำได้ดังนี้

- กำหนดกระแสตั้ง เท่ากับ $1/3$ ของกระแสต่ำสุดที่รีเลย์ Y มองเห็น
- ให้รีเลย์ X ทำงานล่าช้าไป 0.3 วินาที หลังรีเลย์ Y เมื่อเกิดกระแสฟอลต์สูงสุดที่รีเลย์ Y จะมองเห็น

ตัวอย่างที่ 3

ระบบส่ง 13.8 kV แบบเรเดียล จ่ายไฟด้วยหม้อแปลงตัวเดียวได้ ให้ออกแบบระบบป้องกันสำหรับฟอลต์ระหว่างสาย (line to line) และแบบ 3 เฟส



❖ พิจารณาที่บัส 5 **

1. กระแสฟอลต์สูงสุด

- เกิดเมื่อหม้อแปลงทั้งสองจ่ายโหลด และเกิดฟอลต์

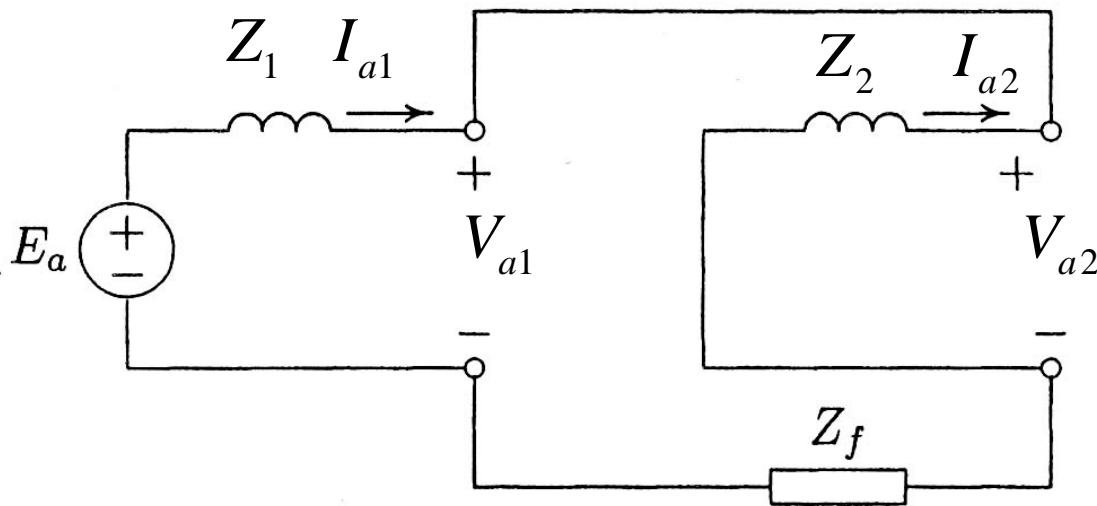
$$I_f = \frac{13,800/\sqrt{3}}{j((5.0//5.0) + 9.6 + 6.4 + 8.0 + 12.8)}$$

$$= -j202.75$$

❖ พิธีการที่บัส 5 **

2. กระแสฟอลต์ต่ำสุด

- เกิดเมื่อมีหม้อแปลงตัวเดียวจ่ายโหลด และเกิดฟอลต์ระหว่างสายที่บัส 5
- เนื่องจาก $Z_1 = Z_2$



$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

- ไม่มีวงจรข่ายลำดับศูนย์

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$= \frac{13,800/\sqrt{3}}{2 \times j(5.0 + 9.6 + 6.4 + 8.0 + 12.8)} = -j95.307$$

ຈາກ

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix}$$

$$I_f = I_b = -I_c = (a^2 - a)I_{a1} = -j\sqrt{3} \cdot I_{a1}$$

$$= -j165.1 \text{ A}$$

สามารถหากระแสฟอลต์สูงสุดและต่ำสุดที่บัสอื่นๆ ได้ด้วยวิธีเดียวกัน

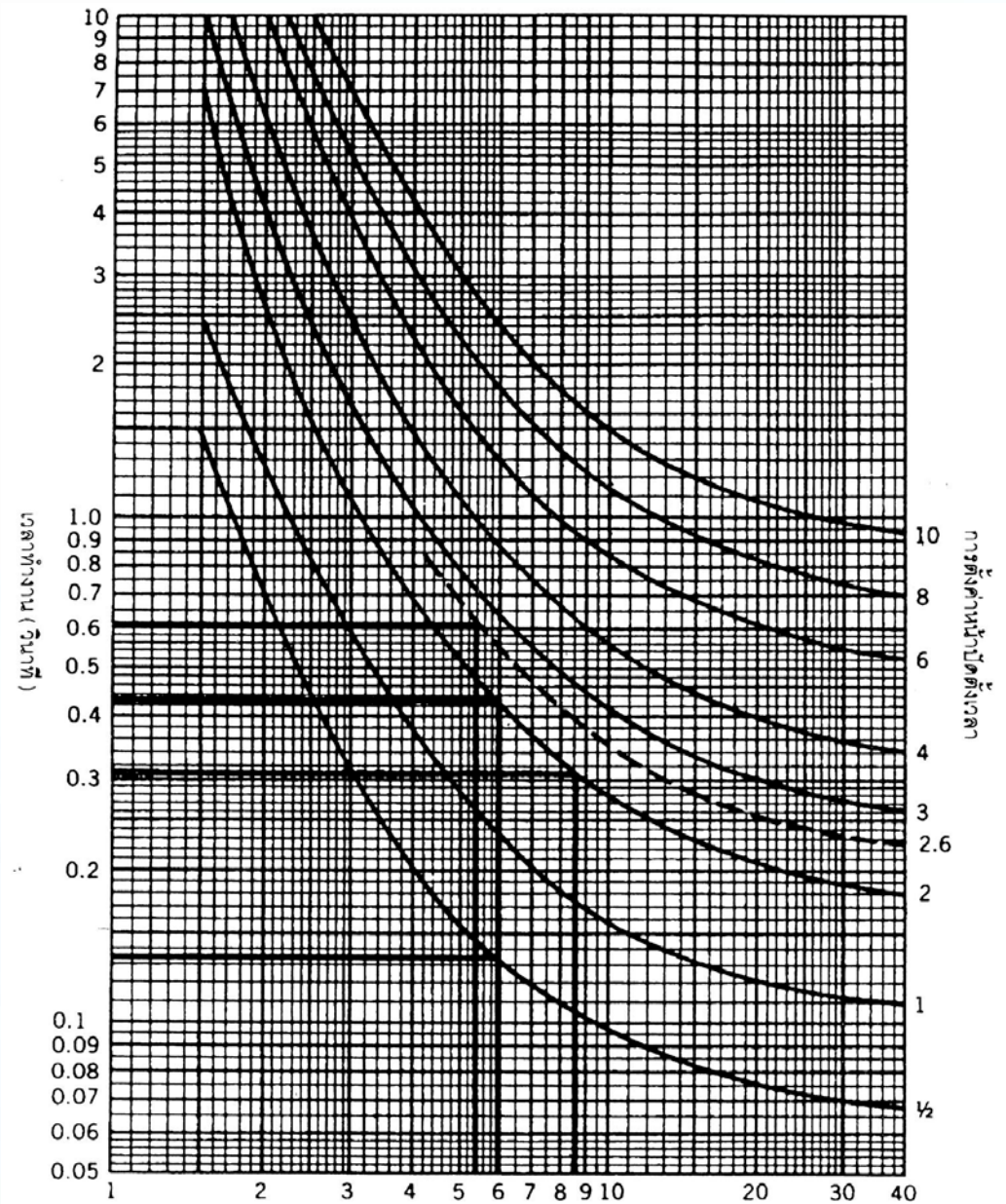
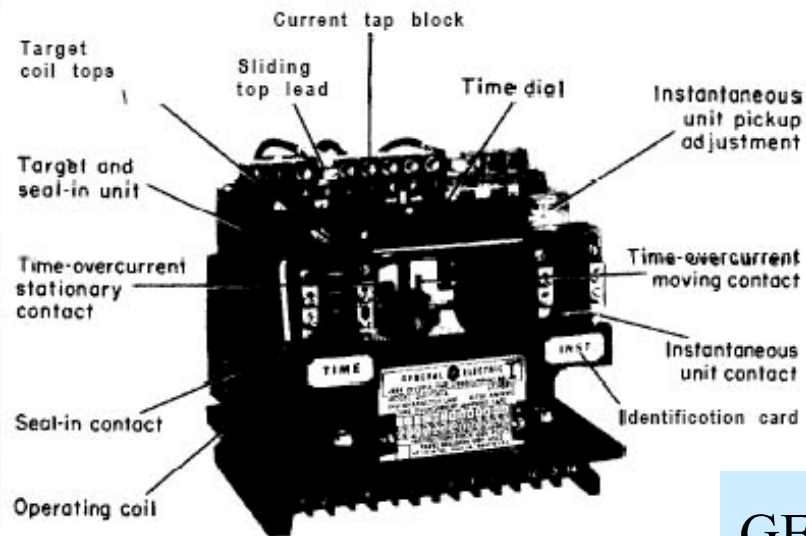
บัสที่เกิดฟอลต์	1	2	3	4	5
กระแสฟอลต์สูงสุด (A)	3187.2	658.5	430.7	300.7	202.7
กระแสฟอลต์ต่ำสุด (A)	1380	472.6	328.6	237.9	165.1

สิ่งที่ต้องกระทำ ในการตั้งค่ารีเลย์

- กำหนดอัตราส่วนของ CT
- การตั้งค่าของรีเลย์
- การปรับเวลาทำงานของรีเลย์ (Time Dial Setting)

ต้องรู้ว่าใช้รีเลย์รุ่นไหน และมีคุณลักษณะอย่างไร
ในกรณีนี้ใช้รีเลย์ ของ GE รุ่น IFC-53

(Time Overcurrent)



GE รุ่น IFC-53

การตั้งค่าเริ่มตอบสนองหลายค่า
อัตราส่วน I_f/I_p

การตั้งค่ารีเลย์ R4

- R4 ต้องทำงานเมื่อกระแสมากกว่า 165.1 A แต่ในทางปฏิบัติตั้งค่ากระแสทริปเพียง 1/3 ของกระแสฟอลต์ต่ำสุด

$$I_p = \frac{165.1}{3} = 55 \text{ A}$$

- เลือกอัตราส่วน CT เป็น 50:5 ทำให้กระแสตั้งรีเลย์ เท่ากับ

$$I_p = 55 \times \frac{5}{50} = 5.5 \text{ A}$$

เลือกค่า tap ใกล้เคียงคือ 5.0 A

- R4 อยู่ปลายสายส่ง ไม่ต้องทำหน้าที่ยกป้องกันสำรอง
- ตั้งเวลาทำงานไว้เร็วที่สุดได้ คือ ปรับเวลาเป็น 1/2

การตั้งค่ารีเลย์ R3

- R3 ต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R4 จึงต้องสั่งทริปที่ 1/3 ของกระแสฟอลต์ต่ำสุดที่ R 4 มองเห็น คือ 165.1 A

$$I_p = \frac{165.1}{3} = 55 \text{ A}$$

- เลือกอัตราส่วน CT เป็น 50:5 ทำให้กระแสรีเลย์ เท่ากับ

$$I_p = 55 \times \frac{5}{50} = 5.5 \text{ A}$$

เลือกค่า tap ใกล้เคียงคือ 5.0 A

การตั้งค่ารีเลย์ R3 เป็นระบบป้องกันสำรอง

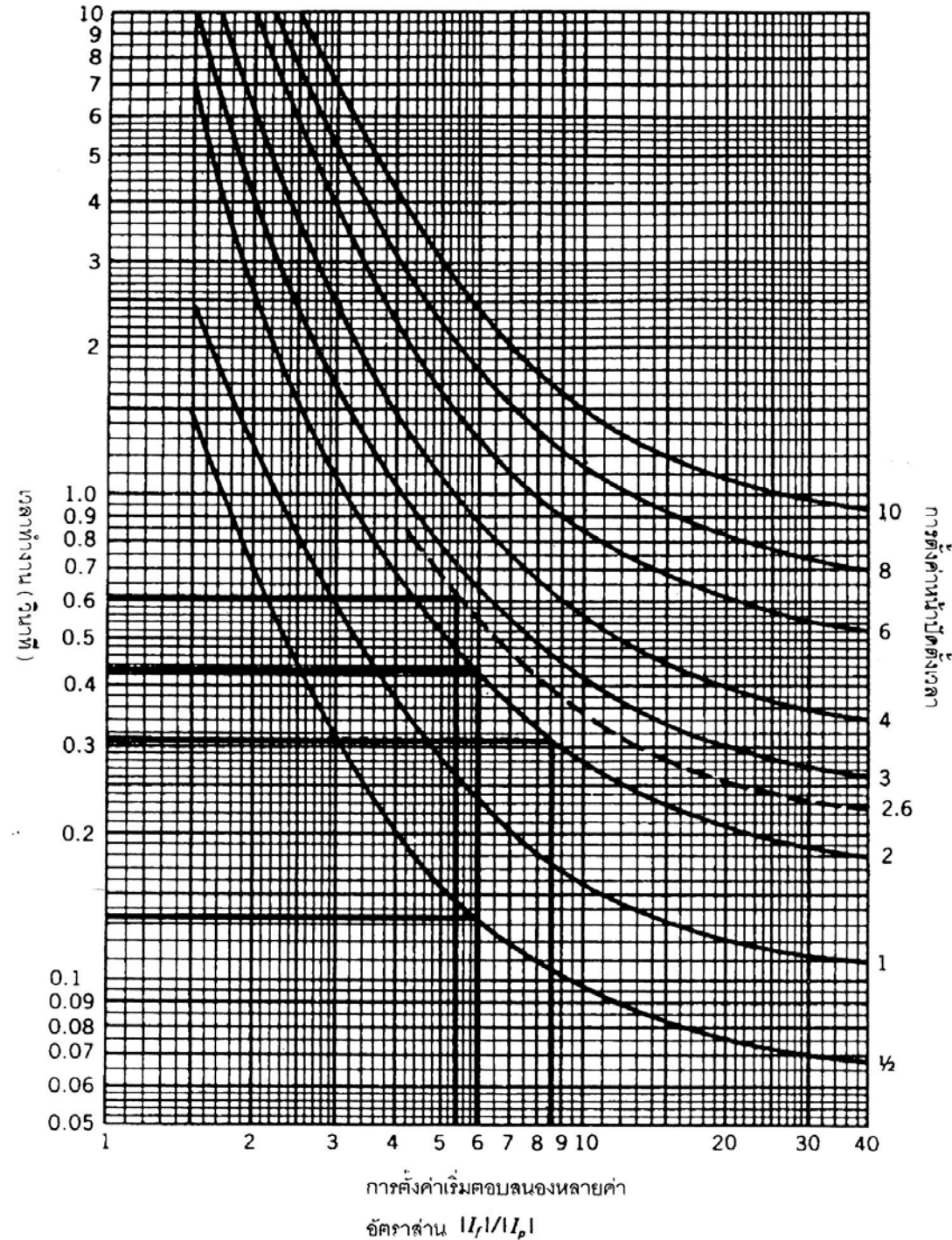
- R3 ต้องทำงานช้ากว่า R4 ที่ค่ากระแสสูงสุดที่ R4 มองเห็น (300.7 A) เป็นเวลา 0.3 วินาที



หาเวลาที่ R4 ทำงาน จากกราฟคุณสมบัติของรีเลย์

- กระแสฟอลต์ที่ R4 คิดเป็น $300.7 \times \frac{5}{50} \times \frac{1}{5} = 6.0$ เท่าของ I_p

- กระแสฟอลต์ที่ R3 คิดเป็น $300.7 \times \frac{5}{50} \times \frac{1}{5} = 6.0$ เท่าของ I_p



R4 ทำงานภายใน 0.135 วินาที

R3 ทำงานด้วยเวลา

$$0.135 + 0.3 = 0.435 \text{ วินาที}$$

❖ $|I_f|/|I_p| = 6.0$ ตั้งเวลาทำงาน
ของ R3 ไว้ที่

2.0

การตั้งค่ารีเลย์ R2

- R2 ต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R3 จึงต้องสั่งทริปที่ 1/3 ของกระแสฟอลต์ต่ำสุดที่ R3 มองเห็น คือ **237.9 A**

$$I_p = \frac{237.9}{3} = 79.3 \text{ A}$$

- เลือกอัตราส่วน CT เป็น **100:5** ทำให้กระแสรีเลย์ เท่ากับ

$$I_p = 79.3 \times \frac{5}{100} = 3.9 \text{ A}$$

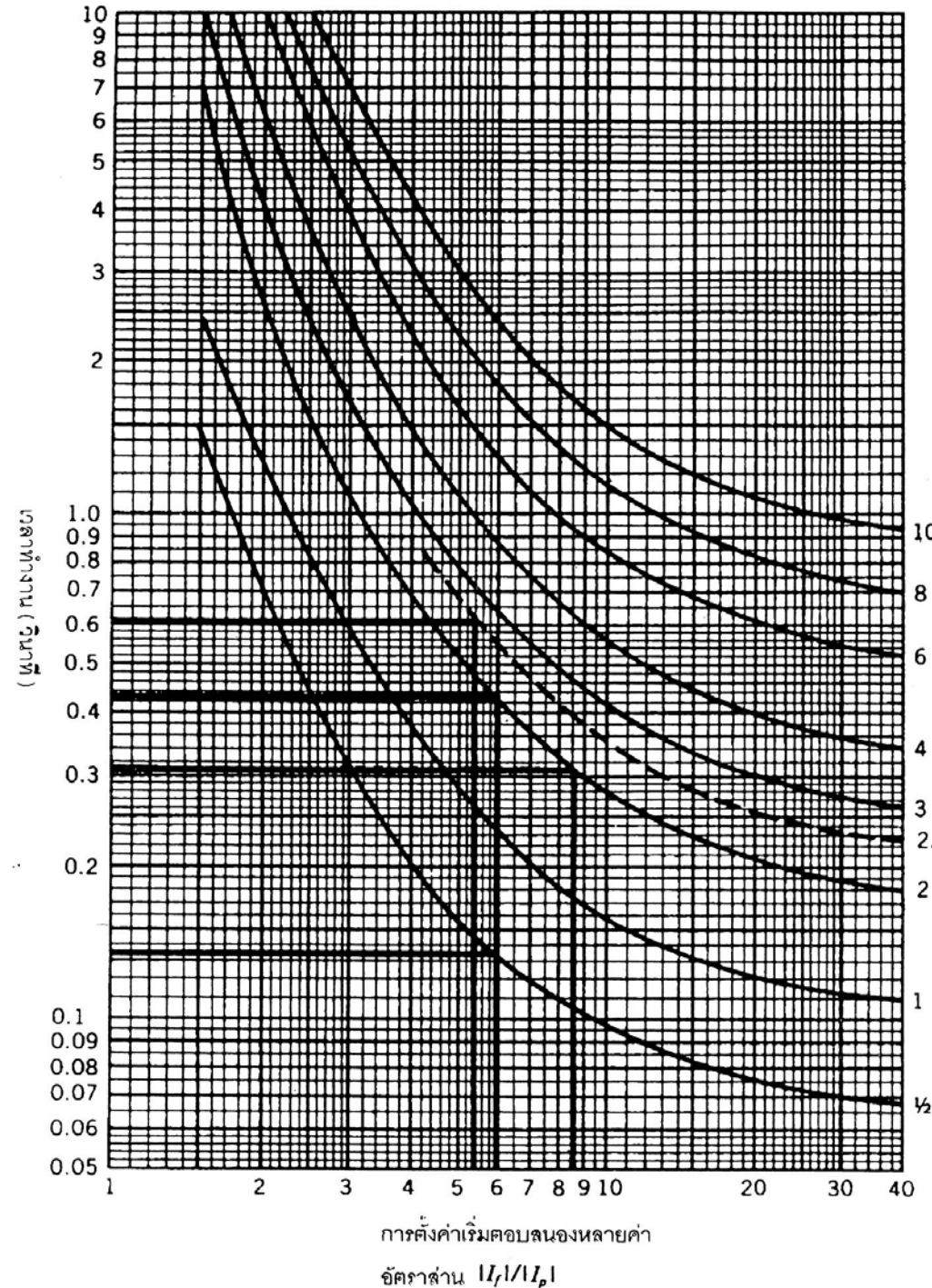
เลือกค่า tap ใกล้เคียงคือ 4.0 A

การตั้งค่ารีเลย์ R2 เป็นระบบป้องกันสำรอง

- R2 ต้องทำงานช้ากว่า R3 ที่ค่ากระแสสูงสุดที่ R3 มองเห็น (**430.7 A**) เป็นเวลา 0.3 วินาที

- กระแสฟอลต์ที่ R3 คิดเป็น $430.7 \times \frac{5}{50} \times \frac{1}{5} = 8.6$ เท่าของ I_p

- กระแสฟอลต์ที่ R4 คิดเป็น $430.7 \times \frac{5}{100} \times \frac{1}{4} = 5.4$ เท่าของ I_p



รีเลย์ R3

R3 มี $|I_f|/|I_p| = 0.86$

R3 ตั้งเวลาทำงานไว้ที่ 2.0

R3 ทำงานภายใน 0.31 วินาที

รีเลย์ R2

R2 ทำงานด้วยเวลา

$0.31 + 0.3 = 0.61$ วินาที

❖ $|I_f|/|I_p| = 5.4$ ตั้งเวลาทำงาน
ของ R2 ไว้ที่

2.6

การตั้งค่ารีเลย์ R1

- R1 ต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R2 จึงต้องสั่งทริปที่ 1/3 ของกระแสฟอลต์ต่ำสุดที่ R3 มองเห็น คือ 328.6 A

$$I_p = \frac{328.6}{3} = 109.533 \text{ A}$$

- เลือกอัตราส่วน CT เป็น 100:5 ทำให้กระแสรีเลย์ เท่ากับ

$$I_p = 109.533 \times \frac{5}{100} = 5.48 \text{ A}$$

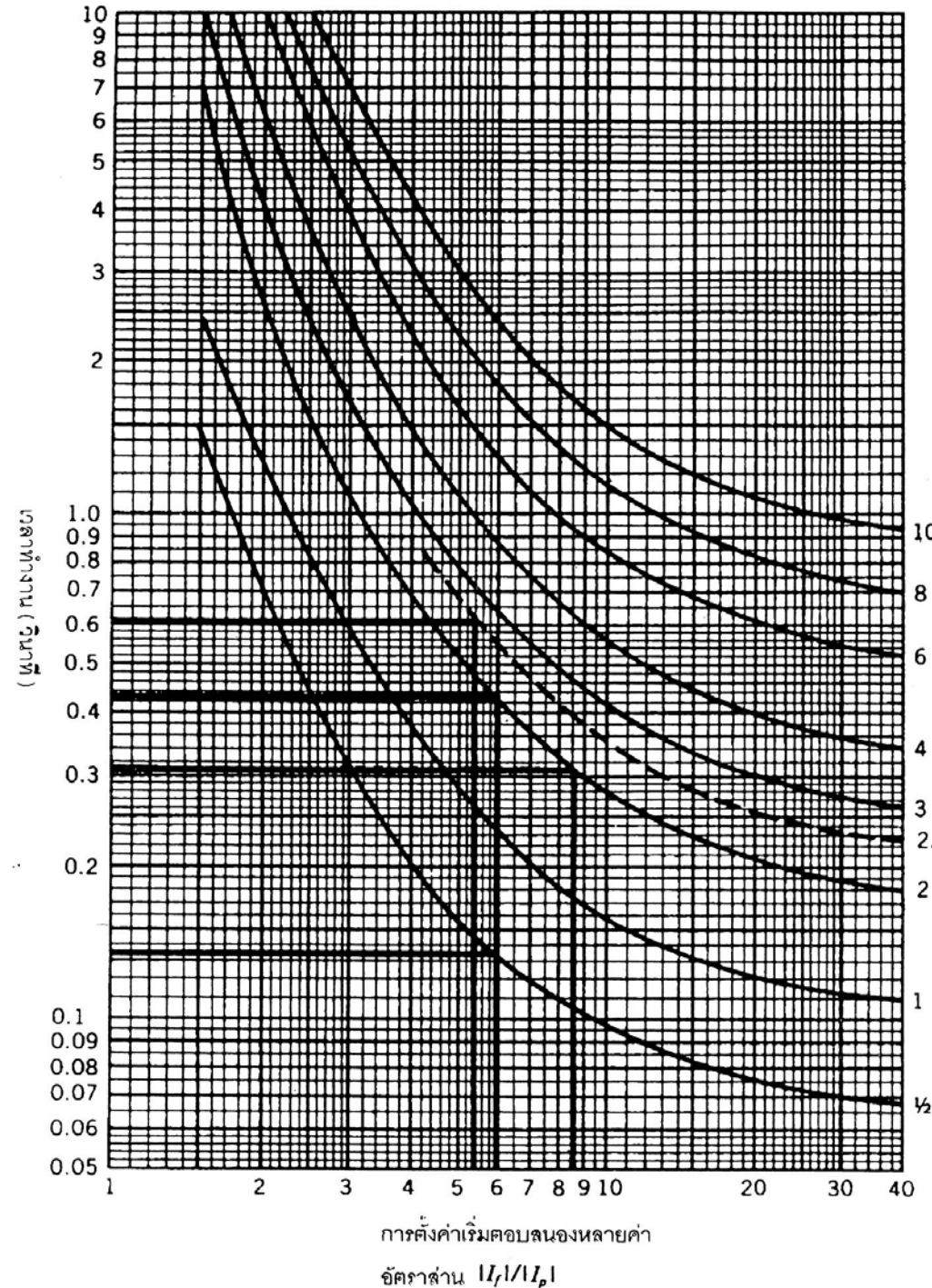
เลือกค่า tap ใกล้เคียงคือ 5.0 A

การตั้งค่ารีเลย์ R1 เป็นระบบป้องกันสำรอง

- R1 ต้องทำงานช้ากว่า R2 ที่ค่ากระแสสูงสุดที่ R2 มองเห็น (**658.5 A**) เป็นเวลา 0.3 วินาที

- กระแสฟอลต์ที่ R2 คิดเป็น $658.5 \times \frac{5}{100} \times \frac{1}{4} = 8.23$ เท่าของ I_p

- กระแสฟอลต์ที่ R1 คิดเป็น $658.5 \times \frac{5}{100} \times \frac{1}{5} = 6.59$ เท่าของ I_p



R3 มี $|I_f|/|I_p| = 0.823$

R3 ตั้งเวลาทำงานไว้ที่ 2.6

R3 ทำงานภายใน 0.4 วินาที

R2 ทำงานด้วยเวลา

$$0.4 + 0.3 = 0.7 \text{ วินาที}$$

❖ $|I_f|/|I_p| = 6.59$ ตั้งเวลาทำงาน
ของ R2 ไว้ที่

3.6

สรุปการตั้งค่ารีเลย์ในตัวอย่างที่ 3

	R1	R2	R3	R4
อัตราส่วน CT	100:5	100:5	50:5	50:5
กระแสตั้ง, A	5	4	5	5
เวลาทำงาน	3.6	2.6	2.0	1/2

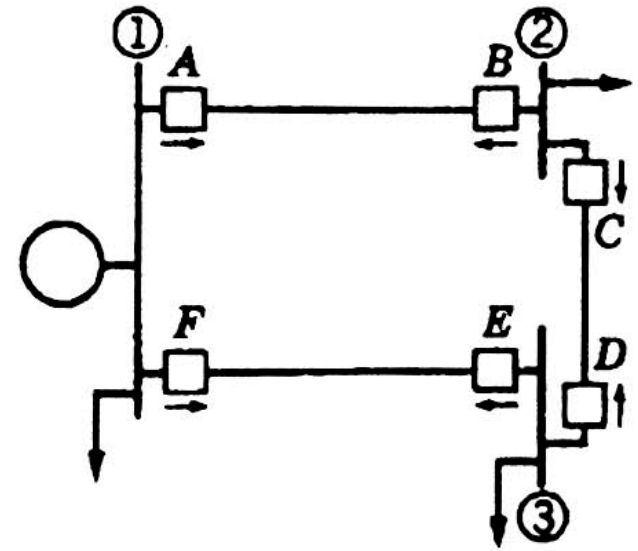
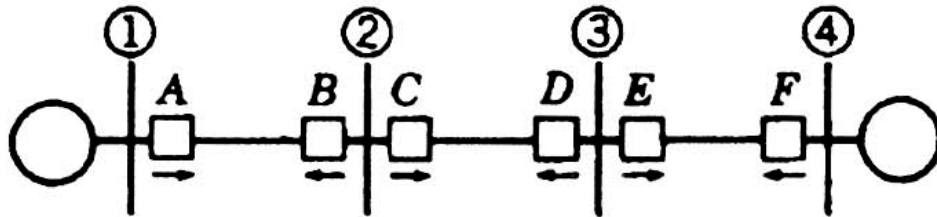
❖ การประยุกต์ใช้รีเลย์กระแสเกิน กับระบบที่เป็นวงจรข่าย (มีหลายแหล่งจ่าย)

- กระแสฟอลต์จะมาทั้ง 2 ด้านของสายส่ง จึงต้องมี CB ทั้ง 2 ด้านของสาย
- รีเลย์ทุกตัวต้องถูกออกแบบให้ตอบสนองต่อฟอลต์ในโซนป้องกันของตัวเองเท่านั้น (ทิศทางลูกศรที่เขียนกำกับรีเลย์)



ต้องใช้รีเลย์กระแสเกิน ที่มีคุณสมบัติเป็นรีเลย์ทิศทางด้วย

(Directional Relays)

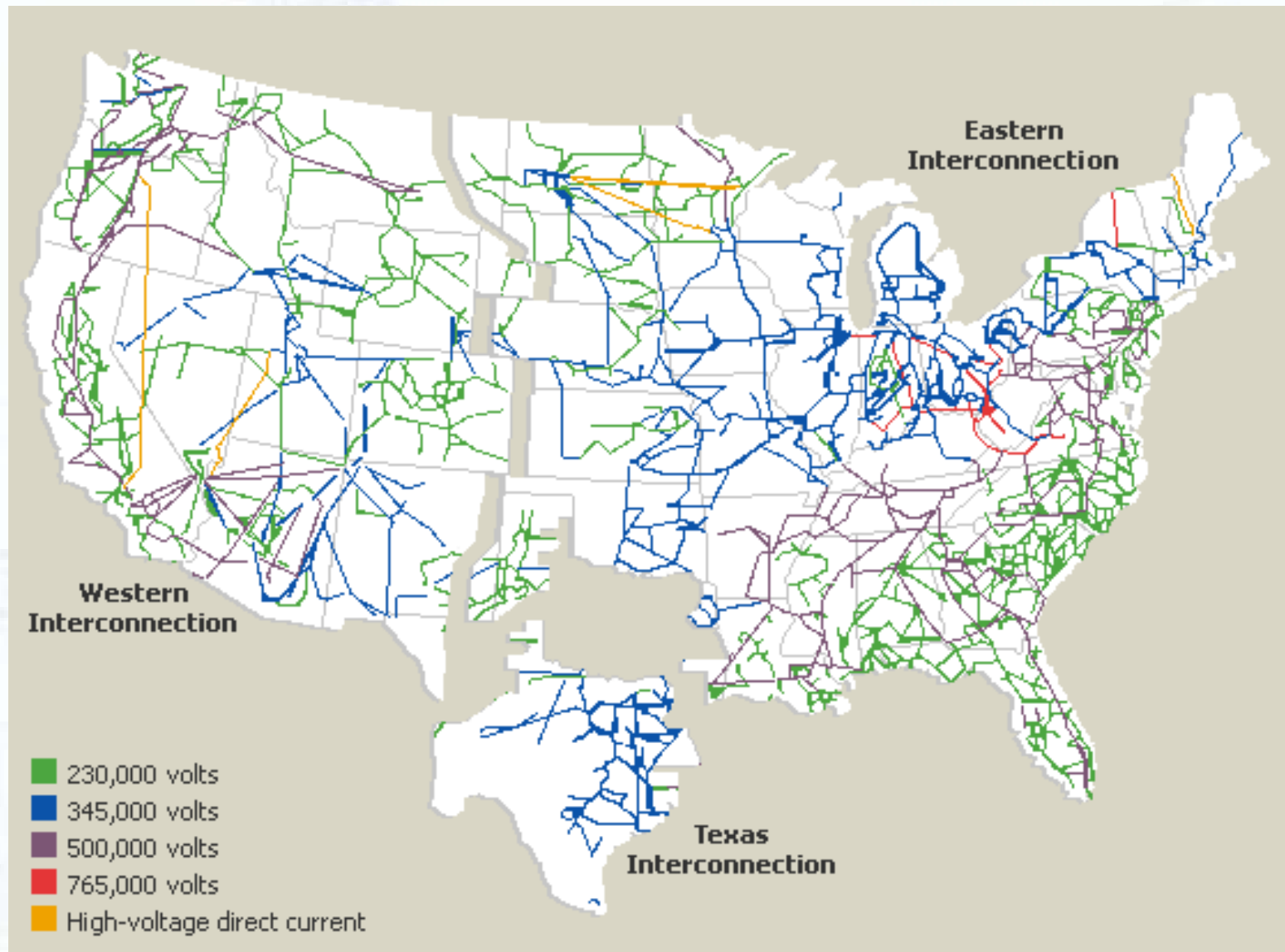


- รีเลย์ที่ต่อกับเบรกเกอร์ *A*, *C* และ *E* ต้องประสานเวลาการทำงานกัน
- รีเลย์ที่ต่อกับเบรกเกอร์ *F*, *D* และ *B* ต้องประสานเวลาการทำงานกัน
- เบรกเกอร์ทำงานโดยเอาสัญญาณของรีเลย์ทั้งสองมา “AND” กัน
(เบรกเกอร์ที่ต่อกับรีเลย์ทั้ง 2 จะไม่ทำงานจนกว่ารีเลย์ทั้ง 2 สังเกตใน
เวลาเดียวกัน)

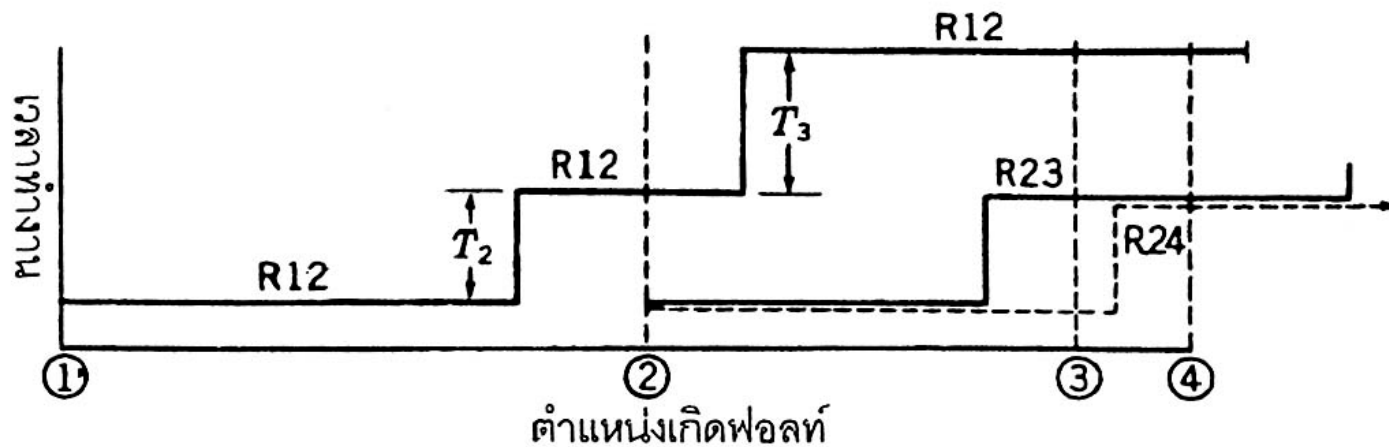
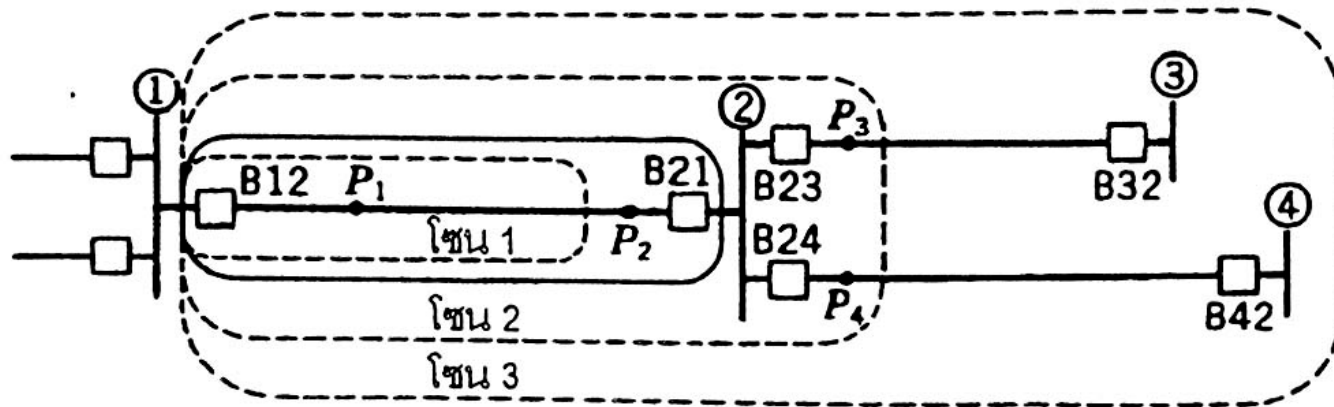
ระบบป้องกันสายส่งแรงสูงและแรงสูงมาก

- ระบบไฟฟ้าแรงสูง จะต่อเชื่อมกันเป็นเครือข่าย หรือ กริด ไม่สามารถใช้วิธีป้องกันโดยรีเลย์กระแสเกินได้
- ใช้รีเลย์อิมพีแดนซ์ในการป้องกันสายส่งของระบบกริด (Grid System) โดยทำงานไม่ขึ้นกับขนาดกระแสฟอลต์
- รีเลย์จะตอบสนองต่อค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดที่เกิดฟอลต์กับจุดที่ติดตั้งรีเลย์ จึงถูกเรียกว่า **รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay)**

Power Grid in U.S.A



ตัวอย่างการออกแบบระบบป้องกัน

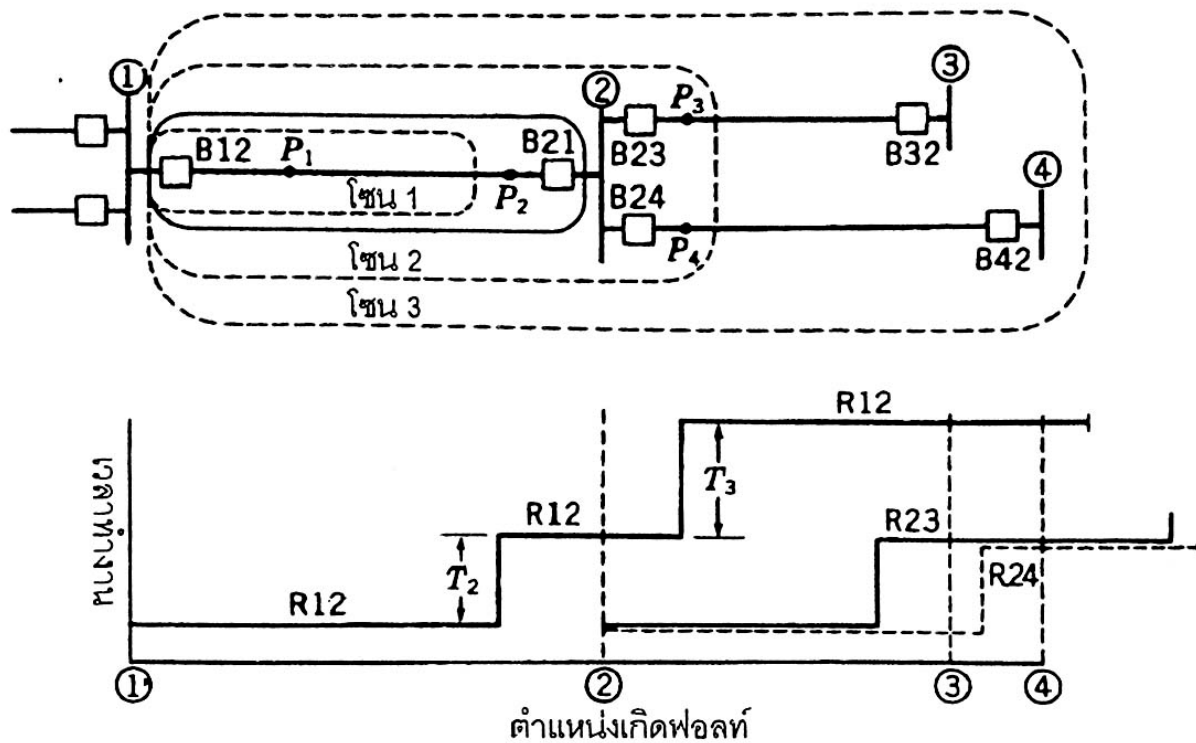


- รีเลย์ R12 จะสั่งทริปตามค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ระหว่างบัส 1 กับจุด P_1

การทำงานของรีเลย์อิมพีแดนซ์ในระบบป้องกันสายส่งแรงสูง

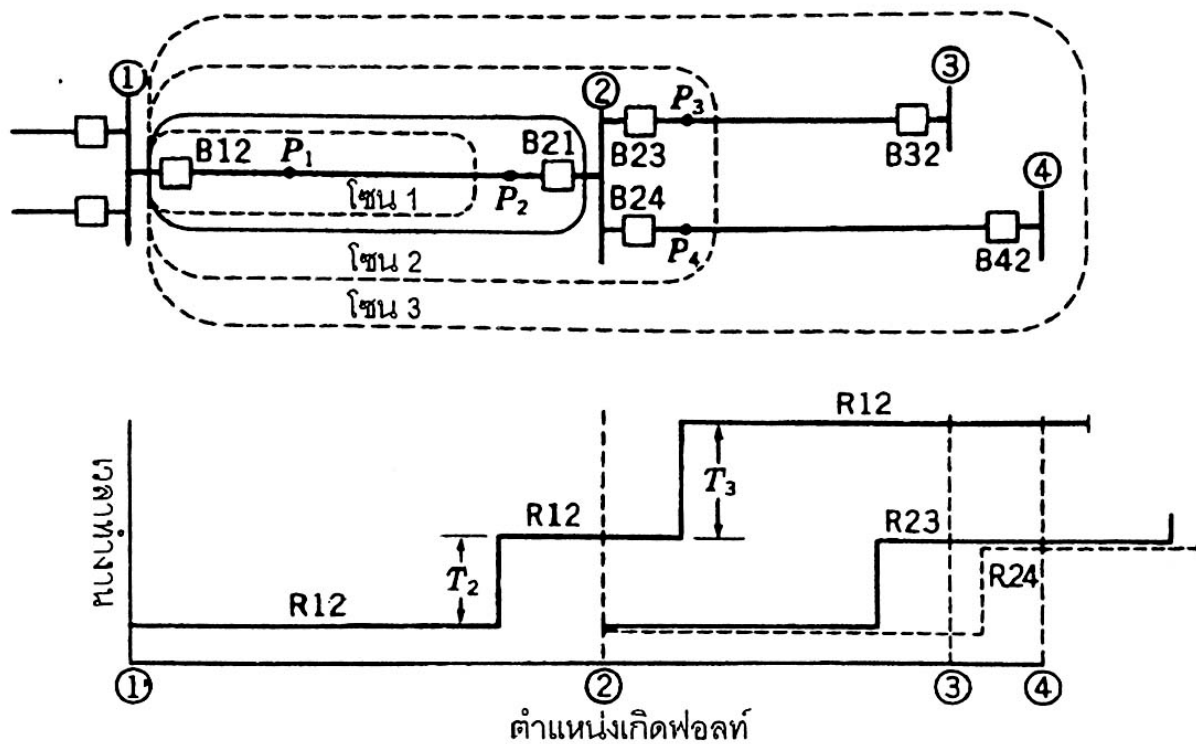
- ใช้ค่าแรงดันระหว่างสาย เช่น $V_a - V_b$
- ใช้ผลต่างกระแสแต่ละเฟส เช่น $I_a - I_b$ (เรียก กระแสเคลต้า)
- และต้องมีรีเลย์อีก 3 ชุด ซึ่งให้ค่าแรงดันเฟส (V_a, V_b, V_c) และกระแสในแต่ละเฟส (I_a, I_b, I_c) รวมทั้ง กระแสนิวทรัล (I_0) เพื่อจัดการกับฟอลต์ลงดินได้ทุกรูปแบบ

ใช้รีเลย์ 3 ชุด

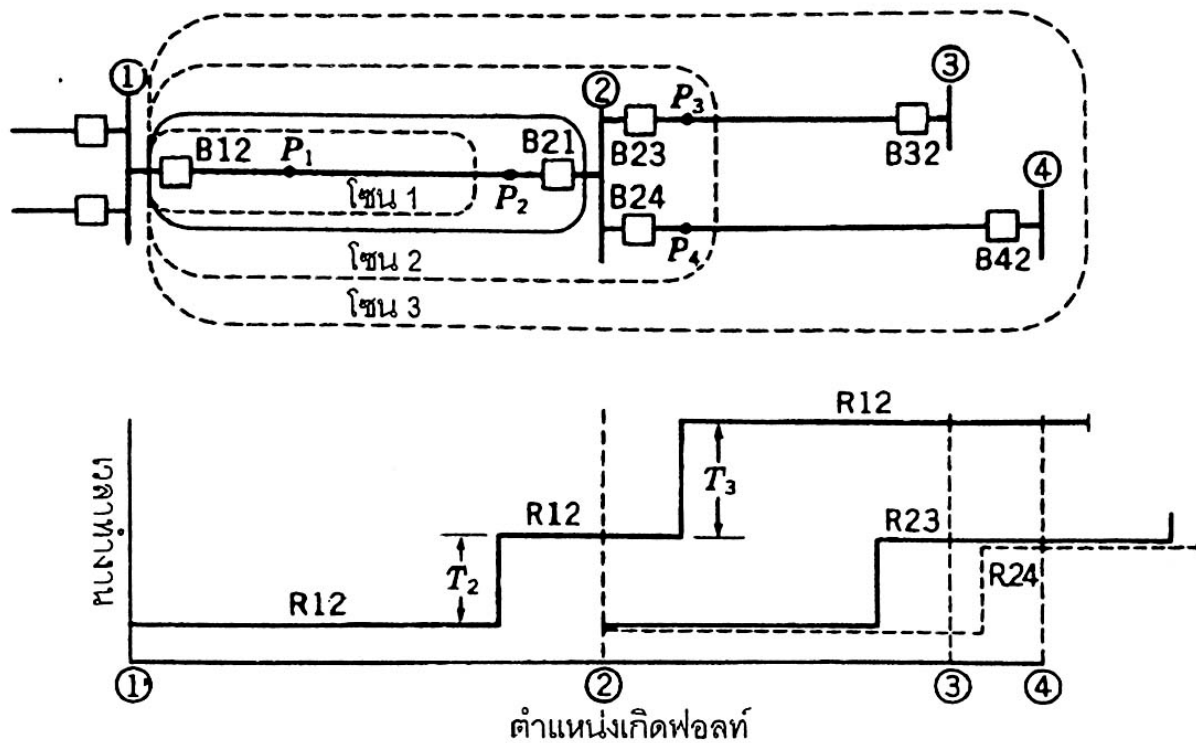


รีเลย์ R12

- **โซน 1** ครอบคลุมระยะทาง 80 % จากบัส 1 ถึง บัส 2 (Under Reaching Zone)
- **โซน 2** ครอบคลุมระยะทาง 120 % จากบัส 1 ถึง บัส 2 (Over Reaching Zone)

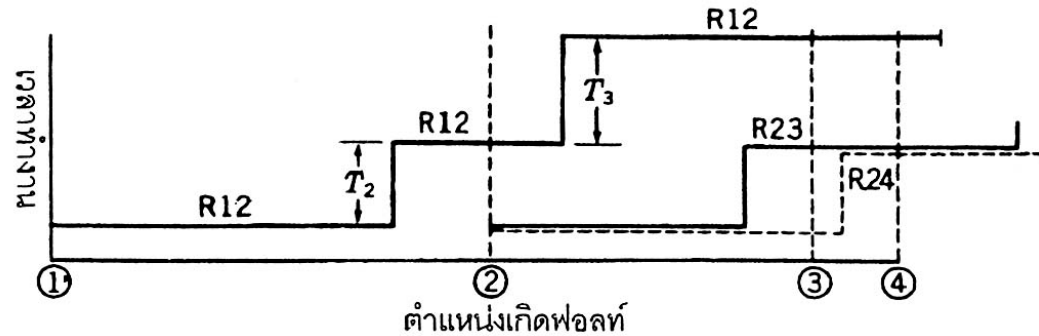
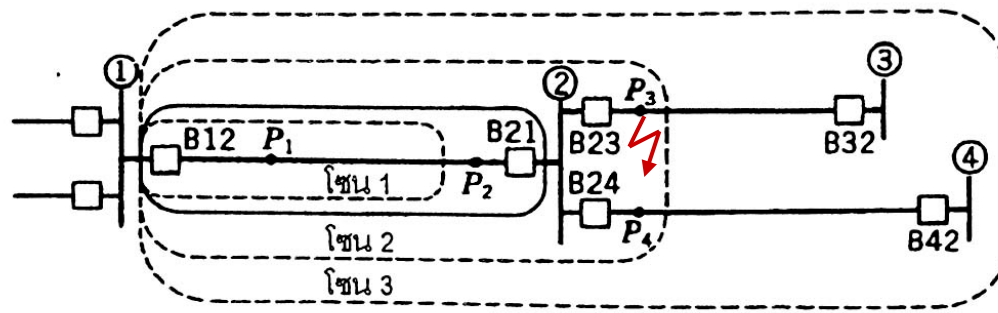


- เกิดฟอลต์ในโซน 1 → R12 จะสั่งทริปทันที
- เกิดฟอลต์ในโซน 2 → R12 จะถูกหน่วงเวลาเพื่อประสานเวลาทำงานกับ R23 และ R24
- โซน 1 เวลาทำงานประมาณ 1 ไชเคิล , โซน 2 เวลาทำงาน 15 – 30 ไชเคิล



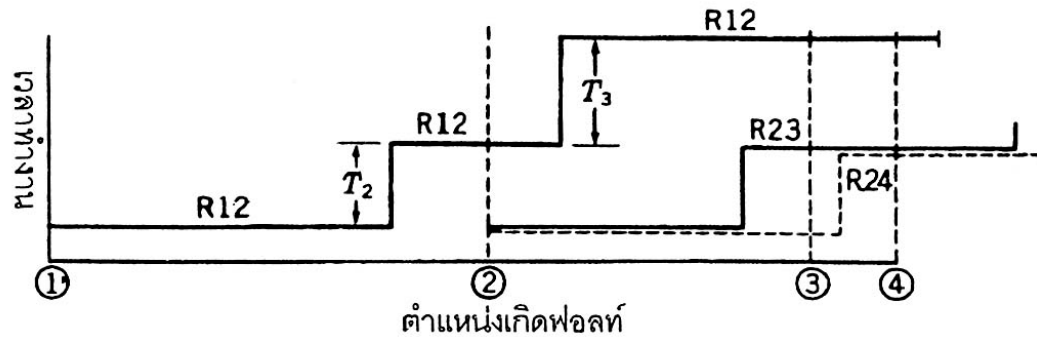
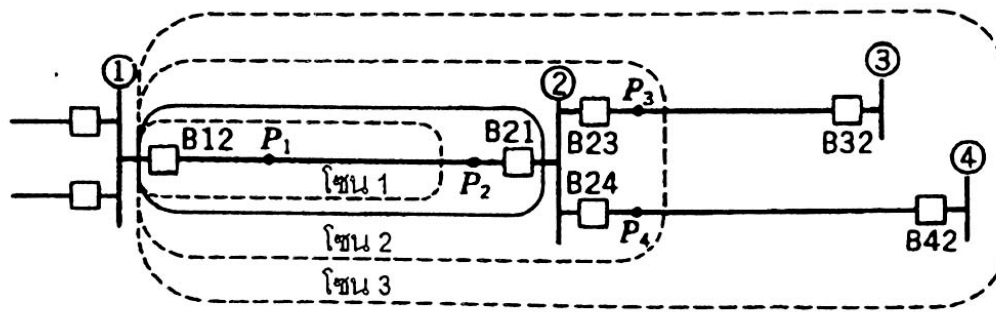
รีเลย์ R21

- R21 จะแบ่งเป็น โซน 1 และ โซน 2 เช่นเดียวกับ R12
- ถ้าเกิดฟอลต์ที่จุด P_1 ทั้ง R12 และ R21 จะสั่งทริปทันที
- ถ้าเกิดฟอลต์ที่จุด P_2 ทั้ง R12 จะหน่วงเวลาทำงาน ส่วน R21 จะสั่งทริปทันที



กรณีเกิดฟอลต์ที่จุด P_3

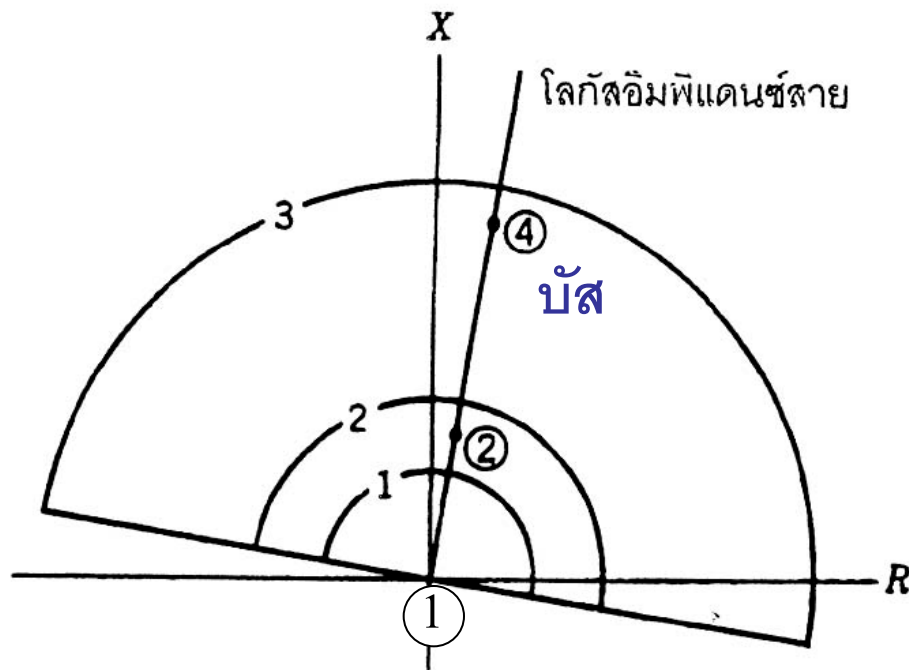
- ฟอลต์อยู่ในโซน 1 ของ R23 → B23 ทริปทันที
- ฟอลต์อยู่ในโซน 2 ของ R12 → และ R12 จะสั่ง B12 ทริป ถ้า B23 ไม่ทำงาน (R12 ป้องกันสำรองให้ R23)
- การทำงานของ R42 จะเหมือนกับ R12 เพราะ P_3 อยู่ในโซน 2 ของ R42



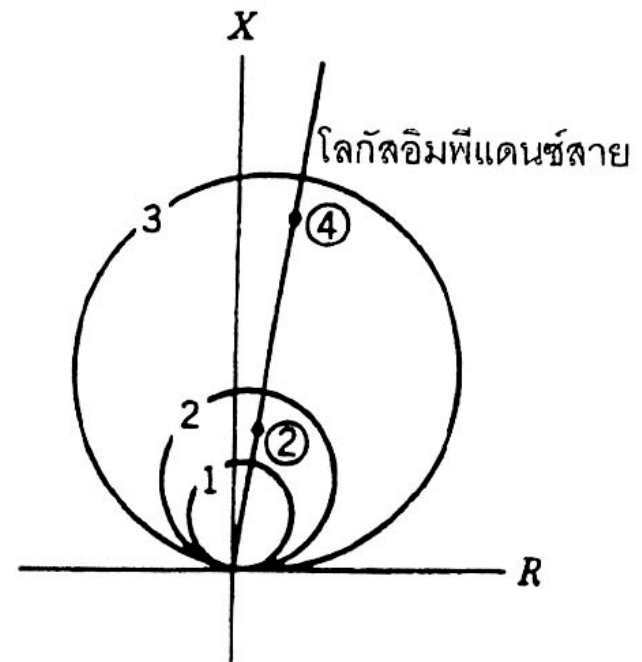
โซน 3 (ทำหน้าที่ป้องกันสำรองระยะไกล)

- โซนที่ต้องทำงานเร็วกว่า ต้องมีช่วง (reach) ครอบคลุมระยะทางที่ไกลกว่า โซนที่ทำงานช้ากว่า เช่น โซน 3 ของ R_{12} จะสั้นกว่าโซน 2 ของ R_{23} หรือ R_{24}
- การประสานเวลาสำหรับโซน 3 (T_3) จะตั้งเวลาที่ประมาณ 1 วินาที

- สามารถเขียนลักษณะรีเลย์ที่ใช้ป้องกันระบบ ในรูปของรีเลย์อิมพีแดนซ์แบบทิศทาง และ รีเลย์โมห์ เป็นดังนี้



รีเลย์อิมพีแดนซ์แบบทิศทาง



รีเลย์โมห์ (Mho Relay)

ข้อควรระวังในการออกแบบระบบป้องกันระบบส่งแรงสูง

- บางครั้งการประสานเวลาของโซน 3 กับ โซน 2 จะทำได้ยากมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่แรงดันสูงมาก ในกรณีจะตัดการป้องกันสำรอง ระยะไกล (โซน 3) ออกไป
- ในช่วงที่โหลดของสายส่งสูงมากๆ เช่น ในภาวะฉุกเฉิน อิมพีแดนซ์ของ โหลดจะมีค่าต่ำ จึงต้องตรวจสอบให้ละเอียดว่า อิมพีแดนซ์ไม่เป็นค่าที่อยู่ ในโซนป้องกันรีเลย์ (ปรับการออกแบบรีเลย์ให้มากกว่าภาวะฉุกเฉิน)

ตัวอย่างที่ 4

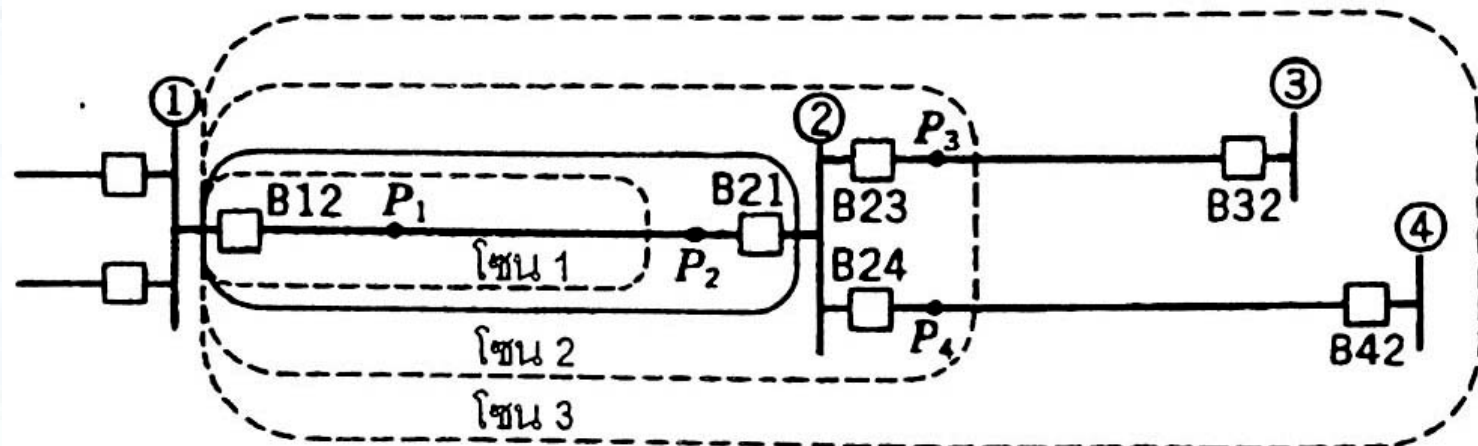
สายส่งไฟฟ้า 138 kV มีความยาวแต่ละช่วง ดังนี้

ช่วง 1 — 2 ยาว 64 km

ช่วง 2 — 3 ยาว 64 km

ช่วง 2 — 4 ยาว 96 km

ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก เท่ากับ $0.05 + 0.5 \text{ Ohm/km}$ ค่าโหลดสูงสุดของสาย 1-2 ในภาวะฉุกเฉินเท่ากับ 50 MVA



จอกแบบระบบป้องกันรีเลย์ระยะทางแบบ 3 โชน โดย

- กำหนดค่าการปรับตั้งโชนของ R12
- กำหนดให้ทราบจุดต่างๆ บนระนาบ $R-X$ ซึ่งโชนวงจรทั้ง 3 จะต้องผ่าน

อิมพีแดนซ์ลำดับบวกของสายส่งแต่ละช่วง

สาย 1-2	$3.2 + j32 \Omega$
สาย 2-3	$3.2 + j32 \Omega$
สาย 2-4	$4.8 + j48 \Omega$

- กระแสโหลดสูงสุด คือ กระแสในภาวะฉุกเฉิน

$$I_{p,\max} = \frac{50 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 138 \text{ kV}} = 209.2 \text{ A}$$

- แรงดันเฟสของระบบ คือ

$$V_p = \frac{138 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 79.67 \text{ kV}$$

- เนื่องจากรีเลย์ระยะทาง ทำงานตามอัตราส่วนแรงดันต่อกระแส จึงต้องมี CT และ CVT ในแต่ละเฟส

- เลือกอัตราส่วน CT เป็น 200 : 5 กระแสโหลดสูงสุดที่รีเลย์ เท่ากับ

$$209.5 \times \frac{5}{200} \approx 5 \text{ A}$$

- แรงดันขาออกของ CVT ตามมาตรฐานเท่ากับ 67 V จะได้อัตราส่วน CVT เป็น

$$\frac{79.67 \times 10^3}{67} = 1189.1/1$$

- ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์เห็น (ด้านทุติยภูมิ) จะเป็น

$$\frac{V_p \times \frac{1}{1189.1}}{I_p \times \frac{5}{200}} = \frac{V_p}{I_p} \times 0.0336 = Z_{line} \times 0.0336$$

- ค่าอิมพีแดนซ์สายส่งทั้ง 3 ช่วงที่รีเลย์เห็น (ด้านทุติยภูมิ) จะเป็น

สาย 1-2	$0.11 + j1.1 \Omega$
---------	----------------------

สาย 2-3	$0.11 + j1.1 \Omega$
---------	----------------------

สาย 2-4	$0.16 + j1.6 \Omega$
---------	----------------------

- ขณะสายส่งจ่ายกระแสโหลดสูงสุด **209.2 A** (สมมติ Pf 0.8 ล้าหลัง) รีเลย์จะเห็นค่าที่อิมพีแดนซ์ของโหลดเท่ากับ

$$Z_{load} = \frac{67}{209.2 \left(\frac{5}{200} \right)} \times (0.8 + j0.6)$$

$$= 10.2 + j7.7 \ \Omega$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ตั้งที่ตัวรีเลย์แต่ละตัว ต้องน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

การปรับตั้งรีเลย์ R12

โซน 1 : รีเลย์ต้องมีระบบป้องกันเท่ากับ 80% ของความยาวสายส่ง 1-2

$$0.8 \times (0.11 + j1.1) = 0.088 + j0.88 \ \Omega$$

โซน 2 : รีเลย์ต้องมีระบบป้องกันเท่ากับ 120% ของความยาวสายส่ง 1-2

$$1.2 \times (0.11 + j1.1) = 0.13 + j1.32 \ \Omega$$

โซน 3 : รีเลย์ต้องมีระบบป้องกันครอบคลุมสายส่งที่ยาวที่สุด ซึ่งต่อกับบัส 2 นั่นคือสายส่ง 2-4

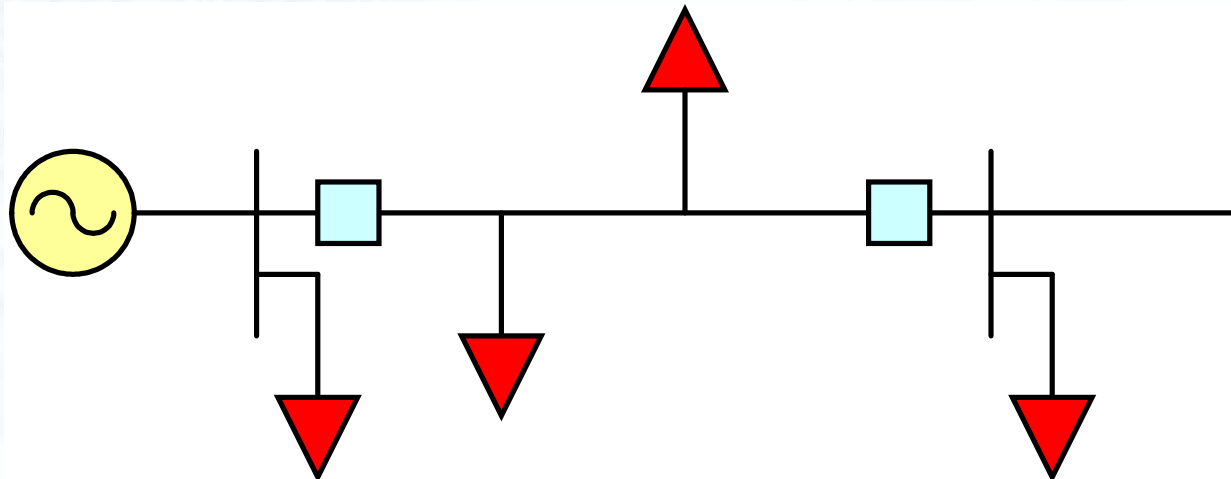
$$(0.11 + j1.1) + 1.2 \times (0.16 + j1.6) = 0.302 + j3.02 \ \Omega$$

- สามารถเลือกใช้ระยะทางแบบทิศทาง (Distance) หรือ รีเลย์โมห์ ได้
- ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ พบว่า

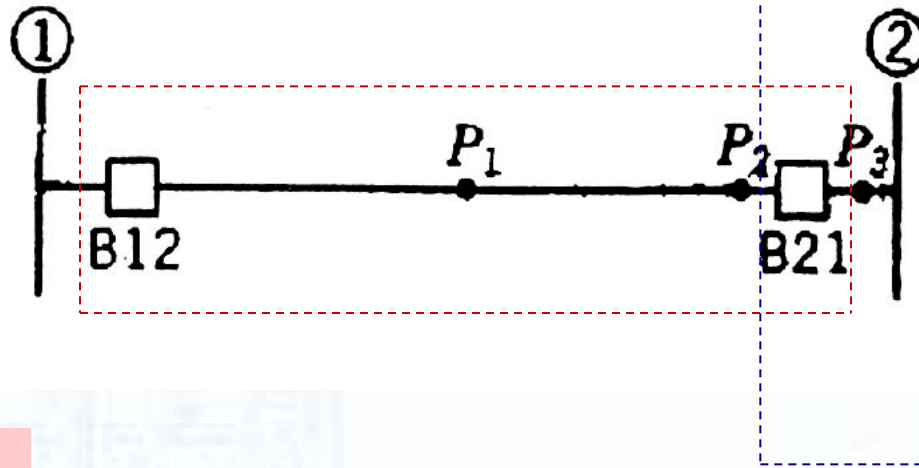
- ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจาก บัส 1 — 4 และอยู่นอกโซนป้องกันของรีเลย์
- สามารถมั่นใจได้ว่ารีเลย์ไม่ทริป เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดมากๆ
- สมมติโหลดสูงสุดมีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับเส้นโค้ง โซน 3 อาจมีผลทำให้รีเลย์ระยะทางแบบทิศทางสั่งทริปผิดพลาดได้ จึงอาจใช้รีเลย์โมห์เท่านั้น (มีพื้นที่สั่งทริปน้อยกว่า)

การป้องกันสายส่งด้วยรีเลย์ไหลอต

- ระบบสายส่งแรงสูงและสูงมาก ที่มีระยะทางไกลๆ บางกรณีไม่ยอมรับการทำงานหน่วงเวลาของรีเลย์ เนื่องจากปัญหาด้านเสถียรภาพ
- จำต้องหาวิธีที่ทำให้รีเลย์ทั้ง 2 ด้านสั่งทริปทันที ซึ่งจะใช้รีเลย์ไหลอตในการสั่ง

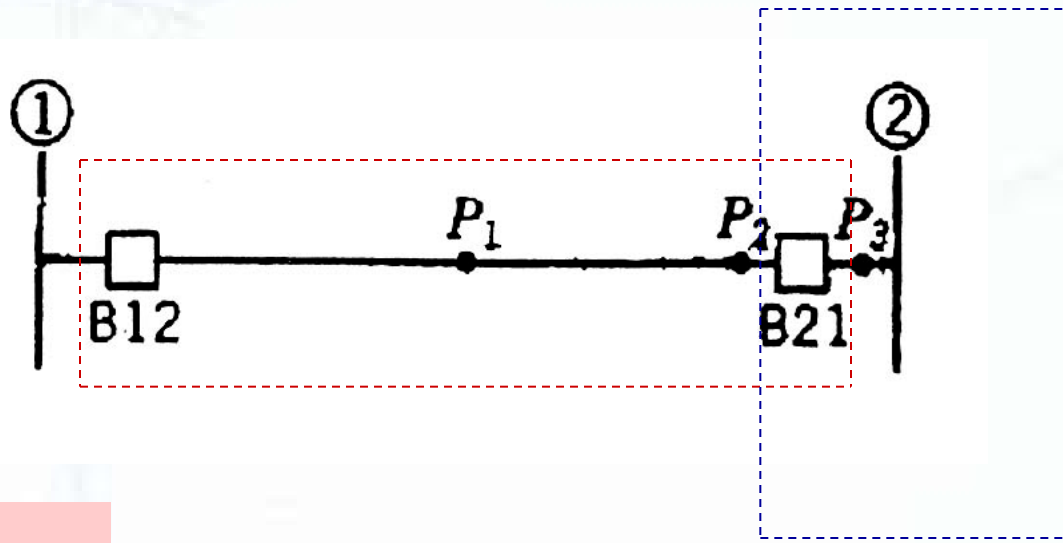


การทำงานของรีเลย์ไฟลอต



เกิดฟอลต์จุด P_1

- รีเลย์ $R12$ และ $R21$ ต่างเห็นฟอลต์ไหลในโซนป้องกันของตัวเอง
(Forward direction)
- รีเลย์ $R12$ และ $R21$ จะส่งข้อมูลถึงกัน ว่ามีฟอลต์เกิดขึ้นในโซนของตัวเอง → รีเลย์ทั้ง 2 ก็จะสั่งทริปได้ทันที



เกิดฟอลต์จุด P_2, P_3

- รีเลย์ R12 และ R21 ต่างเห็นฟอลต์เหมือนกัน
- รีเลย์ R21 สามารถแยกแยะได้ว่าฟอลต์ที่ P_3 อยู่นอกโซนป้องกันจึงแจ้งให้ R12 ทราบ
- รีเลย์ R12 จึงไม่สั่งทริปในกรณีเกิดฟอลต์ที่ P_3 แต่จะสั่งทริปทันทีที่กรณีเกิดฟอลต์ที่ P_2

เรียกวิธีนี้ว่า “การเปรียบเทียบทิศทาง (Directional Comparison)”