บทที่ 8

ตัวอย่างการวิเคราะห์การป้องกันแบบประสานการทำงานด้วยโปรแกรม

เนื้อหาในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการคำนวณปรับตั้งค่าพิกัดการทำงานของอุปกรณ์ตัดวงจรในการออกแบบระบบป้องกันสำหรับระบบไฟฟ้า โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ซึ่งขั้นตอนการคำนวณจะเป็นไปตามลำดับ ดังต่อไปนี้

1) เขียนไดอะแกรมเส้นเดี่ยว (Single-line diagram) ของระบบไฟฟ้าที่จะวิเคราะห์

2) เขียนข้อมูลที่จำเป็นในการหากระแสลัดวงจร และรายละเอียดเพิ่มเติมของอุปกรณ์

3) คำนวณหากระแสลัดวงจรที่จุดต่างๆ จากข้อมูลในข้อที่ 2

4) เลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันเบื้องต้น จากค่ากระแสโหลดเต็มพิกัด และกระแสลัดวงจร [5,8-9,29,33]

5) วิเคราะห์กลุ่มของเส้นโค้งลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ที่อยู่บนกราฟสเกล Log-Log เพื่อการทำงานตามลำดับก่อนหลัง (Selectivity) ที่ดีที่สุด โดยในขั้นตอนนี้จะมีรายละเอียดย่อย คือ

5.1) กำหนดส่วนของระบบไฟฟ้าที่จะวิเคราะห์

5.2) เรียกเส้นโค้งการทำงานของอุปกรณ์ เช่น กราฟของมอเตอร์, ฟิวส์ หรือเซอร์กิตเบรคเกอร์ ที่อยู่บนสายวงจรวิเคราะห์ที่กำลังพิจารณาออกมาบนกราฟสเกล Log-Log และเมื่อมีการใช้ฟิวส์ป้องกันวงจรด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง ผู้ออกแบบต้องกำหนดจุดที่จำเป็นในการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันลงบนกราฟสเกล Log-Log ซึ่งได้แก่ Inrush point และ ANSI point (หรือ Transformer point)

5.3) กำหนดขนาดของค่ากระแสลัดวงจรบนกราฟสเกล Log-Log

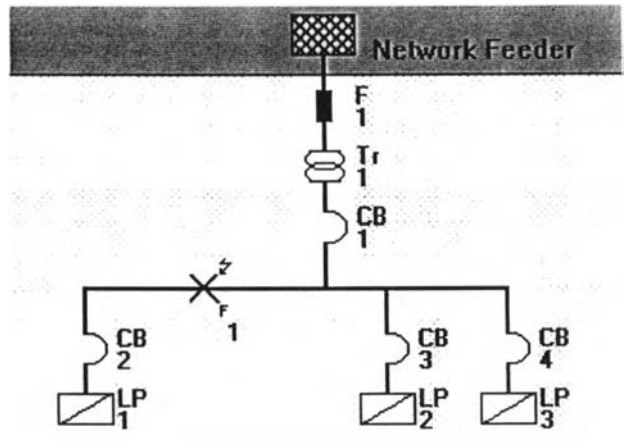
5.4) วิเคราะห์ Selectivity ตามหลักเกณฑ์

5.5) ปรับตั้งหรือเรียกกราฟของอุปกรณ์ป้องกันใหม่ ถ้าลักษณะการวางตัวของเส้นโค้งเหล่านี้ไม่เป็นไปตามกฎเกณฑ์การออกแบบ

เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการออกแบบได้ดีขึ้น พิจารณาจากตัวอย่างดังต่อไปนี้

8.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1

จากไดอะแกรมเส้นเดี่ยวรูปที่ 8.1 และข้อมูลที่กำหนดให้ จงวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันเมื่อเกิดผิดพร่องที่จุด F1 (คิดกระแสลัดวงจรเฉพาะกรณี 3 เฟสสมดุล)



รูปที่ 8.1 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบป้องกันของตัวอย่างที่ 1

โดยข้อมูลของอุปกรณ์ในรูปที่ 8.1 จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้า	S_{kQ} = 500 MVA, U_{nQ} = 22 kV
หม้อแปลง : Tr1	22 kV / 400 V, S_{rT} = 1000 kVA, u_{Kr} = 6 %, P_{KrT} = 13.5 kW, Delta-Wye connection
แผงจ่ายโหลด : LP1	**สำหรับโหลดต่อเนื่องขนาด** 100 kVA
แผงจ่ายโหลด : LP2	**สำหรับโหลดต่อเนื่องขนาด** 200 kVA
แผงจ่ายโหลด : LP3	**สำหรับโหลดต่อเนื่องขนาด** 300 kVA

<u>วิธีทำ</u>

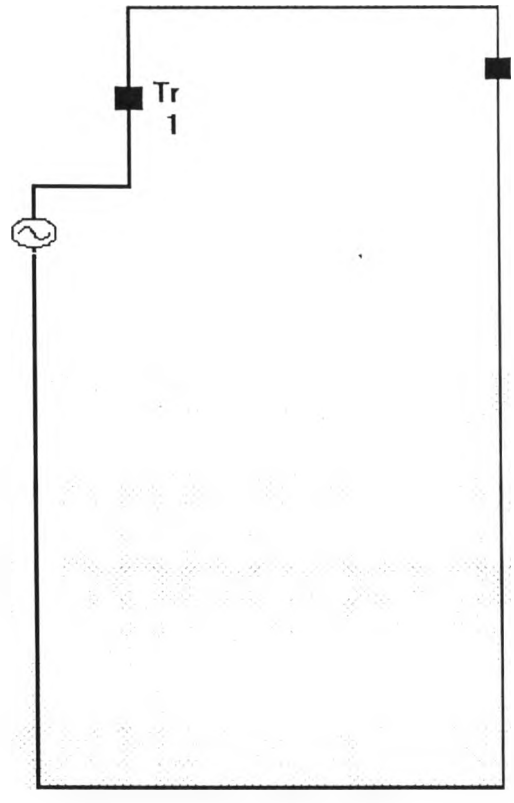
*** ขั้นตอนในการหากระแสลัดวงจร**

ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์หลักแต่ละตัว หาได้เช่นเดียวกับตัวอย่างการคำนวณในบทที่ 6 โดยในที่นี้จะได้

อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า : Z_{Qt} = 0.035 + j0.350 mΩ

อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง : Z_{T1} = 2.160 + j9.350 mΩ

กรณีลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 จะได้วงจรสมมูล ดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจร ของตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1

ดังนั้น จะได้ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรแบบลำดับบวก คือ

$$Z_{K1} = Z_{Qt}+Z_{T1}$$

$$= (0.035+j0.350)+(2.160+j9.350)$$

$$= 2.20+j9.70 \quad m\Omega$$

นั่นคือ $|Z_{k1}| = 9.95 \quad m\Omega$

ดังนั้นกระแสลัดวงจรกรณี 3 เฟสสมดุล : $I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_{k1}|} = \frac{(1.0 \times 400)}{(\sqrt{3} \times 9.95)}$

$$= 23.21 \text{ kA}$$

*** ขั้นตอนการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน**

ในตัวอย่างนี้เนื่องจากสมมุติให้แผงจ่ายโหลด (Load panel) มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งการคำนวณตั้งค่าพิกัดให้กับอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวนี้จะปรับตั้งที่ 125% ของกระแสโหลดพิกัด (I_{FL})

- I_{FL} ของ LP1 = $\frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4}$ = 144.34 A

ซึ่งได้ 125% ของ I_{FL} = 1.25×144.34 = 180.34 A

ดังนั้น เลือกขนาดพิกัดของ CB2 = 200 AT

เช่นเดียวกันกับ LP1 จะได้

- 125%I_{FL} ของ LP2 = $1.25 \times \left(\frac{200}{\sqrt{3} \times 0.4} \right)$ = 360.85 A

ดังนั้น เลือกขนาดพิกัดของ CB3 = 400 AT

- 125%I_{FL} ของ LP3 = $1.25 \times \left(\frac{300}{\sqrt{3} \times 0.4} \right)$ = 541.27 A

ดังนั้น เลือกขนาดพิกัดของ CB4 = 600 AT

- จากข้อมูลของหม้อแปลง จะได้

$$I_{FL-HV} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 22} = 26.24 \text{ A}$$

$$I_{FL-LV} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 0.4} = 1443.38 \text{ A}$$

จากค่ากระแสโหลดพิกัดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง (I_{FL-HV}) ทำให้ขนาดพิกัดการทำงานของฟิวส์ Fuse1 ควรเป็น 40 A (ได้จากการประมาณขนาดที่ 150% ของกระแสโหลดพิกัด) ส่วนทางด้านแรงดันต่ำควรเลือกขนาดพิกัดของ CB1 เท่ากับ 1500 AT (ในที่นี้เลือกให้เป็นแบบอิเล็กทรอนิคส์)

*** ขั้นตอนการวิเคราะห์กลุ่มของเส้นโค้งอุปกรณ์ป้องกัน**

การวิเคราะห์หาขนาดพิกัดการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในตัวอย่างนี้ จะทำเพียงสองตัวก็พอ คือ CB1 ขนาด 1500 AT กับ CB4 ขนาด 600 AT เพราะถ้า CB1 มี Selectivity กับ CB4 แล้วก็เป็นที่แน่นอนว่า เมื่อเกิดผิดพร่องที่จุด F1 จะทำให้ CB4 ตัดวงจรก่อนที่ CB1 จะทำงาน ซึ่งเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่เหลือที่ต่อขนานกับ CB4 จะมี Selectivity กับ CB1 ด้วย สรุปก็คือ ในกรณีที่มีเซอร์กิตเบรคเกอร์ต่อขนานกันหลายตัว ให้เลือกวิเคราะห์เพียงเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่ใหญ่ที่สุดเพียงตัวเดียวก็พอ ดังนั้นเมื่อเกิดจุดผิดพร่องที่จุด F1 ในตัวอย่างที่ 1 ผู้ออกแบบควรเลือกวิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกัน โดยให้ลำดับการตัดวงจรเป็นดังนี้ CB4, CB1 และ Fuse1

จากไดอะแกรมจะเห็นว่า มีการใช้ฟิวส์ป้องกันวงจรด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง ดังนั้นผู้ออกแบบต้องกำหนดจุดพิกัดการทำงานเพื่อควบคุมตำแหน่งของฟิวส์บนกราฟสเกล Log-Log ด้วย โดยจุดที่ว่านี้คือ Inrush point และ ANSI point ซึ่งมีหลักการคิด ดังนี้

ตอนเริ่มสตาร์ทหม้อแปลง จะเกิดกระแส Inrush ซึ่งมีค่าประมาณ 12 เท่าของกระแส I_{FL} เป็นเวลา 0.1 วินาที แต่ฟิวส์แรงสูงจะต้องไม่ตัดวงจร เพราะกระแสนี้เป็นกระแสเพียงชั่วขณะเมื่อเริ่มการทำงานเท่านั้น

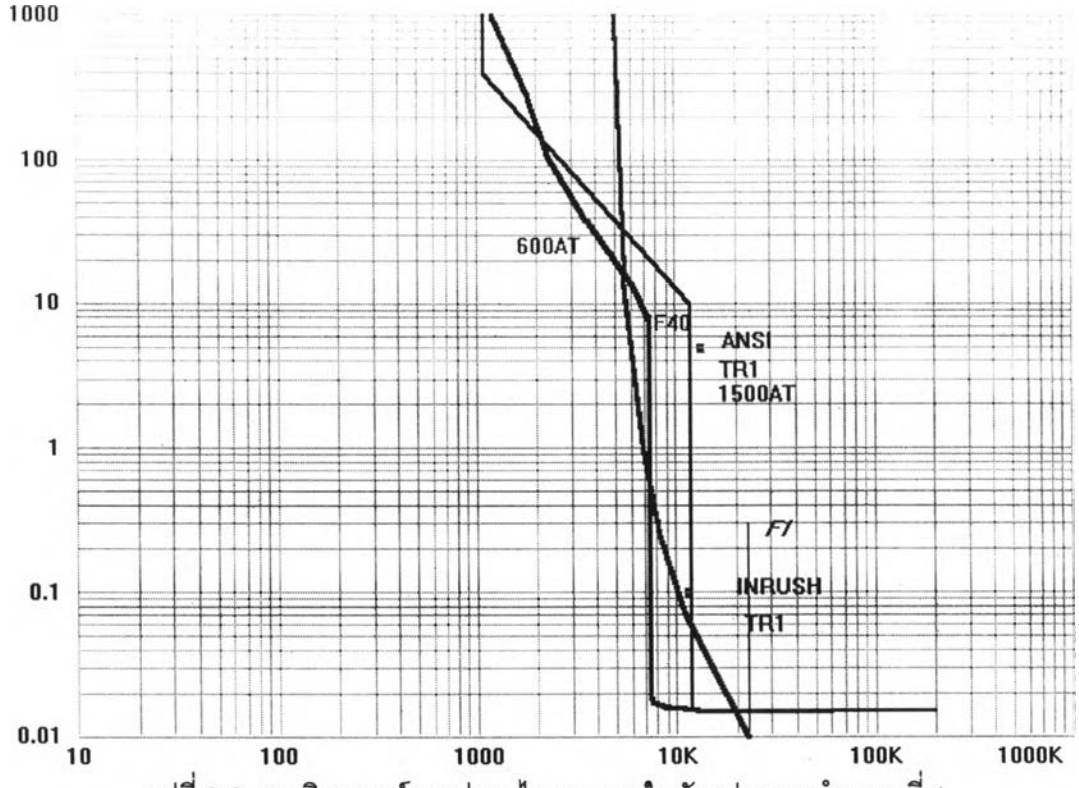
ดังนั้นให้ Inrush point = 12×1443.3 = 11.54 kA ที่ 0.1 วินาที

และเมื่อเกิดกระแสลัดวงจร ฟิวส์ต้องใช้ช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะทำงาน แต่เวลาที่กล่าวถึงนี้จะต้องไม่นานเกินกว่าที่หม้อแปลงจะทนได้ ซึ่งจุดนี้เรียกว่า ANSI point ในตัวอย่างนี้ ถ้าประมาณให้หม้อแปลงสามารถทนกระแสลัดวงจรได้นาน 5 วินาที และจากการคำนวณกระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.21 kA แต่เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ เดลต้า-วาย (Δ-Y) ดังนั้นจึงต้องปรับค่ากระแส ANSI ด้วย ซึ่งกระแส ANSI ที่ปรับแล้วจะมีค่าเท่ากับ 0.577×23.21 = 13.38 kA ที่ 5 วินาที

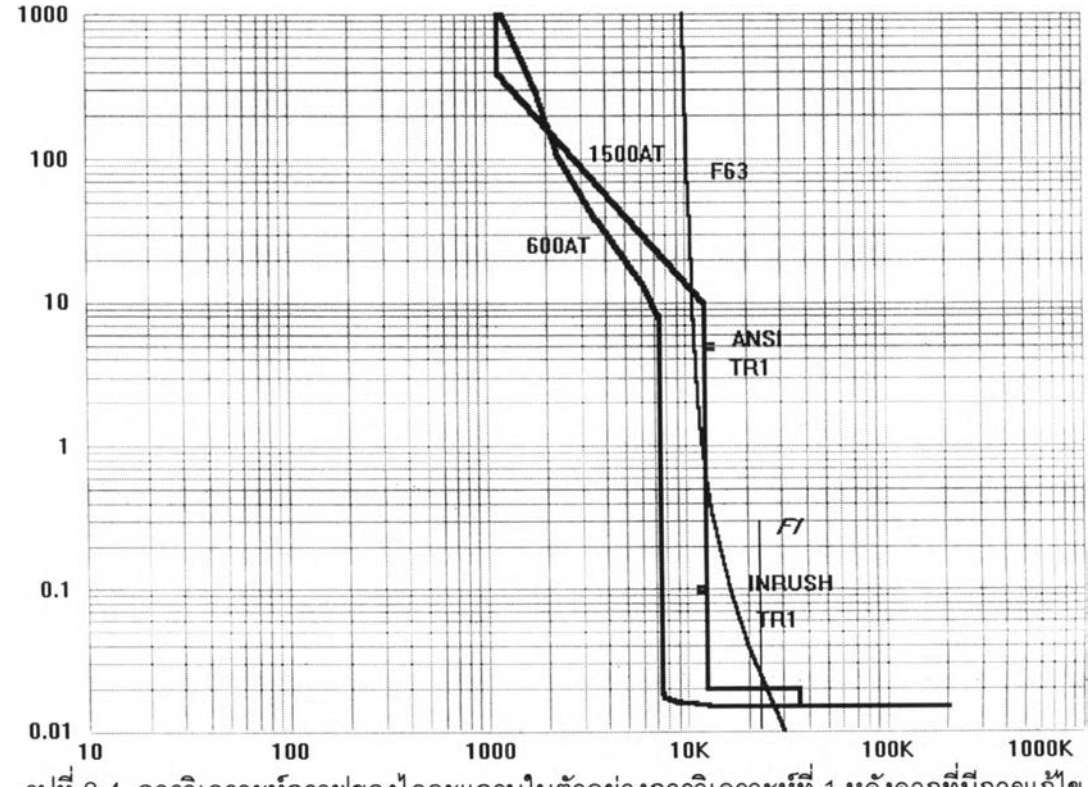
ดังนั้น ANSI point = 13.38 kA ที่ 5 วินาที

เมื่อนำกราฟของเซอร์กิตเบรคเกอร์ 1500 AT และ 600 AT มาลงบนกระดาษกราฟสเกล Log-Log แล้วจะได้ดังรูปที่ 8.3 ซึ่งจะเห็นว่า CB4 ขนาด 600 AT จะทำงานก่อน CB1 ขนาด 1500 AT ถึงค่ากระแสลัดวงจรประมาณ 10.5 kA เท่านั้น และถ้าเกิดผิดพร่องที่ให้กระแสลัดวงจรเต็มที่ ณ. จุด F1 คือ 23.2 kA อาจทำให้ CB1 ขนาด 1500 AT ทำงานก่อน ซึ่งเป็นลักษณะของระบบป้องกันแบบที่มีการจัดลำดับการตัดวงจรเพียงบางส่วน (Partially selective protective system)

ถ้าต้องการให้ระบบป้องกันเป็นแบบที่มีการจัดลำดับการตัดวงจรแบบเต็มที่ (Fully selective protective system) ก็สามารถทำได้โดยการปรับลักษณะเส้นโค้งของ CB1 ที่เป็นแบบอิเล็กทรอนิคส์เพื่อให้เกิดสภาพการจัดลำดับมากขึ้น นอกจากนั้นจะเห็นว่าเส้นโค้งของฟิวส์ขนาด 40 A จะวางตัวอยู่ใต้จุด Inrush point ดังนั้นผู้ออกแบบควรเลือกฟิวส์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 63 A ซึ่งกลุ่มของกราฟอุปกรณ์ที่มีการแก้ไขแล้วจะเป็นดังรูปที่ 8.4



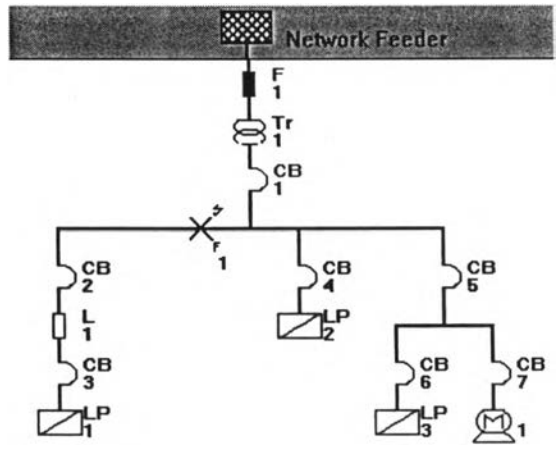
รูปที่ 8.3 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการคำนวณที่ 1



รูปที่ 8.4 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1 หลังจากที่มีการแก้ไข

8.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2

จากไดอะแกรมเส้นเดี่ยวรูปที่ 8.5 และข้อมูลที่กำหนดให้ จงวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันเมื่อเกิดผิดพร่องที่จุด F1 (โดยคิดกระแสลัดวงจรทุกกรณี)



รูปที่ 8.5 ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบป้องกันของตัวอย่างที่ 1

ข้อมูลของอุปกรณ์ในรูปที่ 8.5 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้า	S_{kQ} = 500 MVA, U_{nQ} = 22 kV
หม้อแปลง : Tr1	22 kV / 400 V, S_{rT} = 2000 kVA, u_{Kr} = 6 %, P_{KrT} = 20 kW, Delta-Delta connection, $R_{(0)T}/R_T$ = 1.00, $X_{(0)T}/X_T$ = 0.95
มอเตอร์ : M1	U_{rM} = 400 V, S_{rM} = 500 kVA, I_{LR}/I_{rM} = 6.25, Wound-rotor type, $R_{(0)M}/R_M$ = 15.20, $X_{(0)M}/X_M$ = 5.32
สายส่ง : L1	PVC 3x25 sqmm., R_L = 0.740 mΩ/m., X_L = 0.107 mΩ/m., 40 m., $R_{(0)L}/R_L$ = 3.70, $X_{(0)L}/X_L$ = 1.81
แผงจ่ายโหลด : LP1	สำหรับโหลดต่อเนื่องขนาด 400 kVA
แผงจ่ายโหลด : LP2	สำหรับโหลดต่อเนื่องขนาด 500 kVA
แผงจ่ายโหลด : LP3	สำหรับโหลดต่อเนื่องขนาด 100 kVA

วิธีทำ

*** ขั้นตอนในการหากระแสลัดวงจร**

ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์หลักแต่ละตัว หาได้เช่นเดียวกับตัวอย่างการคำนวณในบทที่ 6 โดยในที่นี้จะได้อิมพีแดนซ์ลำดับบวก ดังต่อไปนี้

อิมพีแดนซ์ลำดับบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า : $Z_{Qt} = 0.035 + j0.350 \ m\Omega$

อิมพีแดนซ์ลำดับบวกของหม้อแปลง : $Z_{T1} = 0.80 + j4.73 \ m\Omega$

อิมพีแดนซ์ลำดับบวกของมอเตอร์ : $Z_{M1} = 19.83 + j47.21 \ m\Omega$

อิมพีแดนซ์ลำดับบวกของสายส่ง : $Z_{L1} = 29.60 + j4.28 \ m\Omega$

ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกข้างต้นทำให้ได้อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของอุปกรณ์หลัก ดังนี้

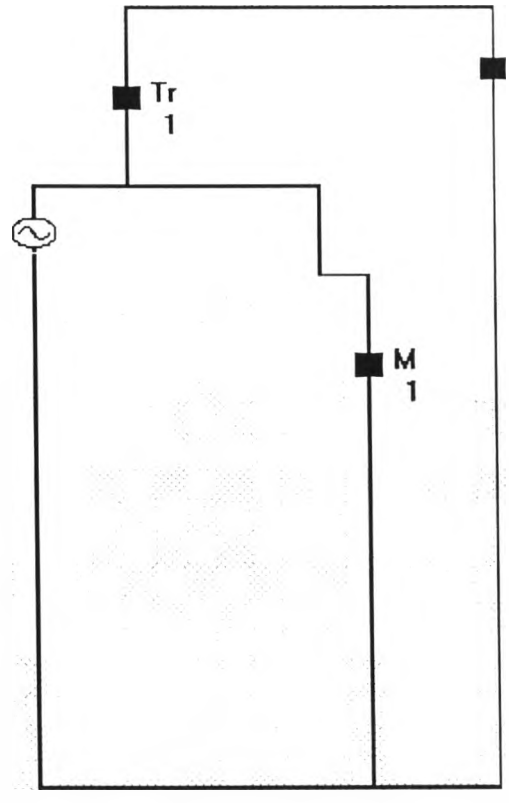
- **อิมพีแดนซ์ลำดับลบของหม้อแปลง** $Z_{(0)T1} = (1.00 \times 0.80) + j(0.95 \times 4.73)$
  $= 0.80 + j4.49 \ m\Omega$
- **อิมพีแดนซ์ลำดับลบของมอเตอร์** $Z_{(0)M1} = (15.20 \times 19.83) + j(5.32 \times 47.21)$
  $= 301.72 + j251.16 \ m\Omega$
- **อิมพีแดนซ์ลำดับลบของหม้อแปลง** $Z_{(0)L1} = (3.7 \times 29.60) + j(1.81 \times 4.28)$
  $= 109.52 + j7.75 \ m\Omega$

จากค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้ทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 สรุปค่าอิมพีแดนซ์ของตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2

อุปกรณ์	อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (= อิมพีแดนซ์ลำดับลบ) ($m\Omega$)	อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ ($m\Omega$)
แหล่งจ่ายไฟฟ้า	0.035 + j0.350	-
หม้อแปลง : Tr1	0.80 + j4.73	0.80 + j4.49
มอเตอร์ : M1	19.83 + j47.21	301.72 + j251.16
สายส่ง : L1	29.60 + j4.28	109.52 + j7.75

กรณีลัดวงจรที่ตำแหน่ง F1 จะได้วงจรสมมูล ดังรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจร ของตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2

ดังนั้น จะได้ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรแบบลำดับบวก คือ

$Z_{K1} = (Z_{Qt}+Z_{T1}) \,//\, Z_{M1}$

(// คือ เครื่องหมายแสดงการต่อขนานกันของอิมพีแดนซ์)

$= [(0.035+j0.350)+(0.80+j4.73)] \,//\, (19.83+j47.21)$

$= 0.86+j4.61 \quad m\Omega$

นั่นคือ $|Z_{k1}| = 4.69 \quad m\Omega$

ดังนั้นกระแสลัดวงจรกรณี 3 เฟสสมดุล : $I''_{k3} = \dfrac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_{k1}|} = \dfrac{(1.0 \times 400)}{(\sqrt{3} \times 4.69)}$

$= 49.24$ kA

และจะได้กระแสลัดวงจรในกรณีของการลัดวงจรระหว่างสายโดยไม่เกี่ยวข้องกันดิน

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{2|Z_{k1}|} = \frac{(1.0 \times 400)}{(2 \times 4.69)} = 42.64 \text{ kA}$$

ในทำนองเดียวกัน ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับศูนย์ คือ

$$Z_{K0} = Z_{(0)T1} // Z_{(0)M1}$$

$$= (0.80+j4.49) // (301.72+j251.16)$$

$$= 0.83+j4.44 \quad m\Omega$$

นั่นคือ $|Z_{k0}| = 4.52 \quad m\Omega$

ดังนั้นกระแสลัดกระแสลัดวงจรในกรณีของการลัดวงจรระหว่างสายกับพื้นดิน :

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{(Z_{k0} + 2Z_{k1})} = \frac{\left(\sqrt{3} \times 1.0 \times 400\right)}{([0.83 + j4.44] + 2[0.86 + j4.61])}$$

$$= 49.84 \text{ kA}$$

จากการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้ง 3 กรณีที่จุดผิดพร่อง F1 สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 สรุปขนาดของกระแสลัดวงจรทุกกรณีที่คำนวณได้ในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2

ประเภทของกระแสลัดวงจร	ขนาดของกระแสลัดวงจร (kA)
กระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล	49.24
กระแสลัดวงจรระหว่างสาย	42.64
กระแสลัดวงจรระหว่างสายกับพื้นดิน	49.84

*** ขั้นตอนการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน**

ในตัวอย่างนี้เนื่องจากสมมุติให้แผงจ่ายโหลด (Load panel) มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งการคำนวณตั้งค่าพิกัดให้กับอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวนี้จะปรับตั้งที่ 125% ของกระแสโหลดพิกัด (I_{FL})

- $125\%I_{FL}$ ของ LP1 = $1.25 \times \left(\frac{400}{\sqrt{3} \times 0.4}\right)$ = 721.69 A

ดังนั้น เลือกขนาดพิกัดของ CB3 และ CB2 = 800 AT

- $125\%I_{FL}$ ของ LP2 = $1.25 \times \left(\frac{500}{\sqrt{3} \times 0.4}\right)$ = 902.11 A

ดังนั้น เลือกขนาดพิกัดของ CB4 = 1000 AT

- $125\%I_{FL}$ ของ LP3 = $1.25 \times \left(\frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4}\right)$ = 180.34 A

ดังนั้น เลือกขนาดพิกัดของ CB6 = 200 AT

- พิจารณามอเตอร์ M1 ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์ (Wound-rotor motor)

การปรับตั้งค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่ใช้ในการป้องกันการลัดวงจรของมอเตอร์นี้ จะปรับตั้งที่ค่า 150% ของกระแสโหลดพิกัด (I_{FL}) ดังข้อกำหนดในตารางที่ 5.1

เนื่องจาก I_{FL} ของมอเตอร์ M1 = $\frac{500}{(\sqrt{3} \times 0.4)}$ = 721.69 A

ซึ่งได้ 150% ของ I_{FL} = 1.50×721.69 = 1082.53 A

ดังนั้น จึงเลือกขนาดพิกัดของ CB7 = 1200 AT

- พิจารณาหาขนาดพิกัดการทำงานของ CB5 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ป้องกันสำหรับวงจรสายป้อนที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์ที่รวมกับโหลดอื่น ซึ่งหลักเกณฑ์การปรับตั้งค่าให้ CB5 นี้จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ :

ขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน = พิกัดอุปกรณ์ป้องกันตัวโตที่สุด + ผลรวมพิกัดกระแสมอเตอร์ที่เหลือ + 1.25(พิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง)

$$CB_F = CB_{\max} + \sum I_R + 1.25(I_{L1})$$

โดยที่ CB_F = ขนาดของเครื่องป้องกันสายป้อน

$CB_{\max}$ = ขนาดของเครื่องป้องกันมอเตอร์ตัวใหญ่ที่สุด

$\sum I_R$ = ผลรวมพิกัดกระแสโหลดของมอเตอร์ที่เหลือ

I_{L1} = พิกัดกระแสโหลดต่อเนื่อง

ดังนั้น ในที่นี้จะได้

$$CB_5 = CB_7 + 0 + 1.25(I_{FL-LP3})$$

$$= 1200 + 1.25(\frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4})$$

$$= 1380.42$$

$$\approx 1400 \text{ AT}$$

- จากข้อมูลของหม้อแปลง จะได้

$$I_{FL-HV} = \frac{2000}{\sqrt{3} \times 22} = 52.49 \text{ A}$$

$$I_{FL-LV} = \frac{2000}{\sqrt{3} \times 0.4} = 2886.75 \text{ A}$$

จากค่ากระแสโหลดพิกัดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง (I_{FL-HV}) ทำให้ขนาดพิกัดการทำงานของฟิวส์ Fuse1 ควรเป็น 80 A (ได้จากการประมาณขนาดที่ 150% ของกระแสโหลดพิกัด) ส่วนทางด้านแรงดันต่ำควรเลือกขนาดพิกัดของ CB1 เท่ากับ 3000 AT (ในที่นี้เลือกให้เป็นแบบอิเล็กทรอนิคส์)

*** ขั้นตอนการวิเคราะห์กลุ่มของเส้นโค้งอุปกรณ์ป้องกัน**

จากที่ได้สรุปไว้ในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 1 **ถึงกรณีที่มีเซอร์กิตเบรคเกอร์ต่อขนานกันหลายตัว ซึ่งให้เลือกวิเคราะห์เพียงเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่ใหญ่ที่สุดเพียงตัวเดียวก็พอ ดังนั้นเมื่อเกิดจุดผิดพร่องที่จุด F1 ในตัวอย่างที่ 2 ผู้ออกแบบควรเลือกวิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกัน โดยให้ลำดับการตัดวงจรเป็นดังนี้** CB5, CB1 **และ** Fuse1

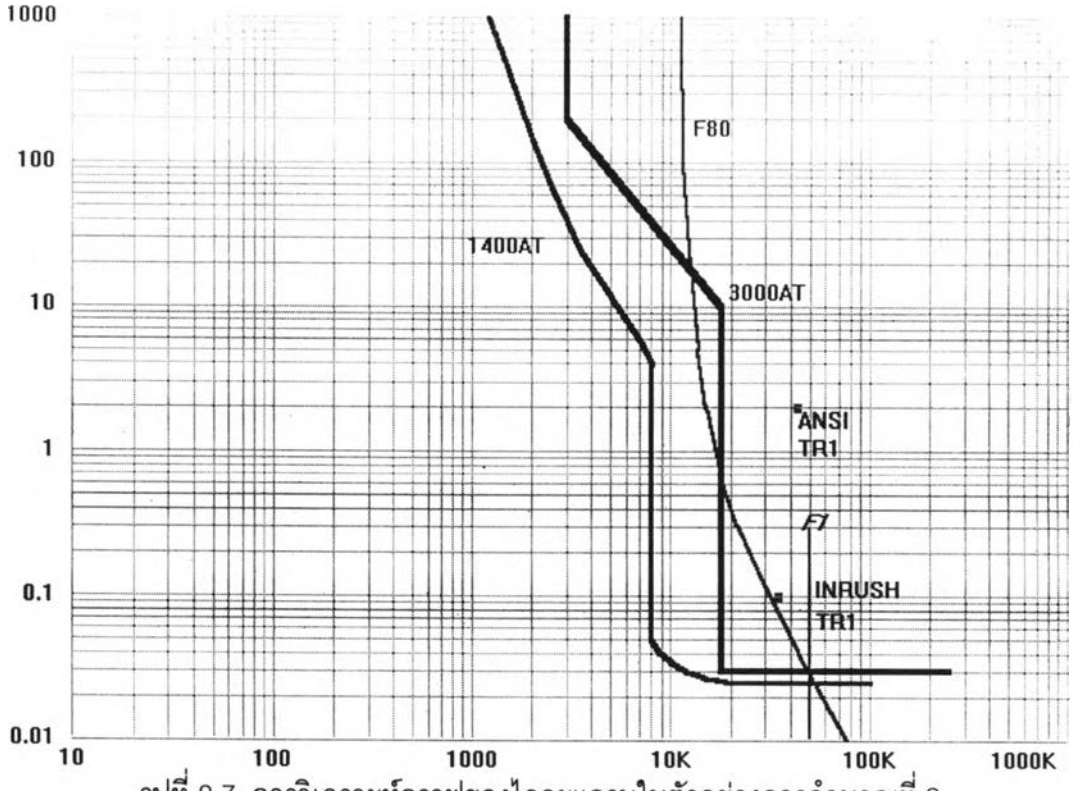
จากไดอะแกรมจะเห็นว่า มีการใช้ฟิวส์ป้องกันวงจรด้านแรงดันสูงของหม้อแปลง ดังนั้นผู้ออกแบบต้องกำหนดจุดพิกัดการทำงานเพื่อควบคุมตำแหน่งของฟิวส์บนกราฟสเกล Log-Log **ด้วย โดยจุดที่ว่านี้คือ** Inrush point **และ** ANSI point **ซึ่งมีหลักการคิด ดังนี้**

ตอนเริ่มสตาร์ทหม้อแปลง จะเกิดกระแส Inrush **ซึ่งมีค่าประมาณ** 12 **เท่าของกระแส** I_{FL} **เป็นเวลา** 0.1 **วินาที ดังนั้นได้** Inrush point = 12×2886.75 = 34.64 kA **ที่** 0.1 **วินาที**

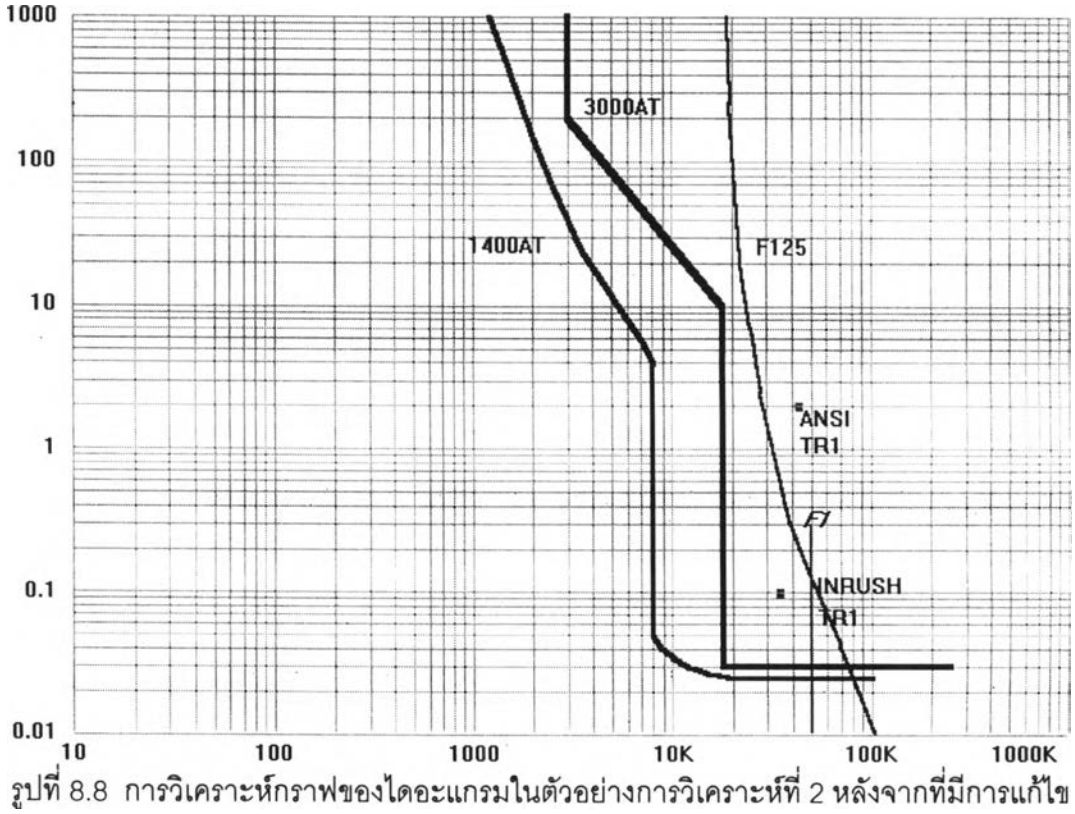
และเมื่อเกิดกระแสลัดวงจร ฟิวส์ต้องใช้ช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะทำงาน แต่เวลาที่กล่าวถึงนี้จะต้องไม่นานเกินกว่าจุดที่หม้อแปลงจะทนได้ ซึ่งจุดนี้เรียกว่า ANSI point **โดยในตัวอย่างนี้ ถ้าประมาณให้หม้อแปลงสามารถทนกระแสลัดวงจรได้นาน** 2 **วินาที และจากค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่คำนวณได้จากการลัดวงจรทั้ง** 3 **กรณี ณ.ตำแหน่ง** F1 **ซึ่งมีค่าเท่ากับ** 49.84 kA **แต่เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบ เดลต้า-เดลต้า** (Δ-Δ) **ดังนั้นจึงต้องปรับค่ากระแส** ANSI **ด้วย ซึ่งกระแส** ANSI **ที่ปรับแล้วจะมีค่าเท่ากับ** 0.866×49.84 = 43.16 kA **ดังนั้น** ANSI point = 43.16 kA **ที่** 2 **วินาที**

จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งหมดที่คำนวณได้ รวมทั้งข้อกำหนดพิเศษในการออกแบบแสดงบนกราฟสเกล Log-Log **ดังแสดงด้วยรูปที่** 8.7

จากรูปที่ 8.7 **จะเห็นว่า ระบบป้องกันจะเป็นแบบที่มีการจัดลำดับการตัดวงจรแบบเต็มที่** (Fully selective protective system) **ก็ต่อเมื่อเส้นโค้งของฟิวส์ไม่วางตัวอยู่ต่ำกว่า** Inrush point **ของหม้อแปลง และมีการจัดเรียงลำดับการทำงานกับเส้นโค้งของ** CB1 **และ** CB5 **ซึ่งในที่นี้จะแก้ปัญหาด้วยการใช้ฟิวส์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น คือ** 125 A **โดยผลที่ได้จะเป็นไปตามรูปที่** 8.8



รูปที่ 8.7 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการคำนวณที่ 2



รูปที่ 8.8 การวิเคราะห์กราฟของไดอะแกรมในตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ 2 หลังจากที่มีการแก้ไข